



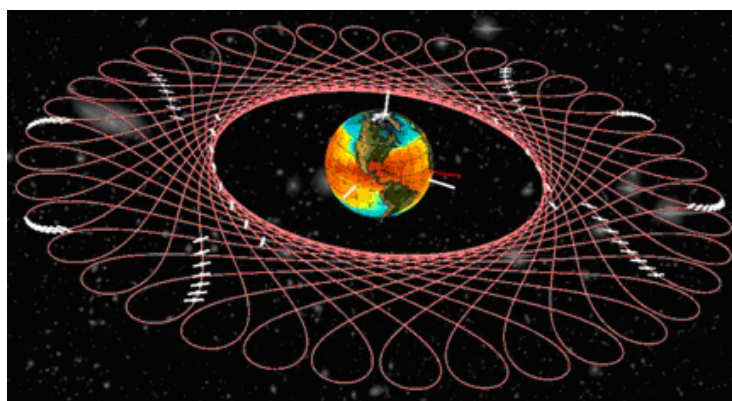
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

**Προσομοίωση προηγμένων τεχνικών εκτίμησης
και βελτίωσης σχεδιασμού και
μελέτης δορυφορικών γεωδαιτικών συστημάτων
επόμενης γενιάς**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μπούσιας- Αλεξάκης Ευάγγελος

Επιβλέπων Καθηγητής

Δημήτρης Δεληκαράογλου

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

Προσομοίωση προηγμένων τεχνικών εκτίμησης και βελτίωσης σχεδιασμού και μελέτης δορυφορικών γεωδαιτικών συστημάτων επόμενης γενιάς

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μπούσιας- Αλεξάκης Ευάγγελος

Παρουσιάστηκε δημόσια, εξετάστηκε και εγκρίθηκε
από την τριμελή επιτροπή στις /7/2013 :

Δημήτρης Παραδείσης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Δημήτρης
Δεληκαράογλου**
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
(Επιβλέπων)

Βασίλης Γκίκας
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Copyright © Μπούσιας- Αλεξάκης Ευάγγελος, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό ή άλλους σκοπούς πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι μέθοδοι της δορυφορικής γεωδαισίας χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τόσο σε γεωδαιτικές εφαρμογές, όσο και σε εργασίες που σχετίζονται ευρύτερα με το αντικείμενο του τοπογράφου μηχανικού. Ιδιαίτερα οι δορυφορικές τεχνικές προσδιορισμού θέσης και πλοήγησης βρίσκουν εφαρμογή σε όλα σχεδόν τα επιστημονικά πεδία των γεωεπιστημών και της μηχανικής. Επίσης, η χρήση των μοντέλων του πεδίου βαρύτητας, που παράγονται από βαρυτημετρικές δορυφορικές αποστολές, όπως η αποστολή GRACE, τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους που προκύπτουν από τις μετρήσεις δορυφορικών αποστολών όπως η TanDEM-X και η αποστολή STRM παλιότερα, καθώς και τα παράγωγα αλτιμετρικών δορυφορικών αποστολών όπως οι Jason-1 και Jason-2 αναδεικνύουν το εύρος και την σημασία της δορυφορικής γεωδαισίας στις μέρες μας. Ένα από τα πιο απαιτητικά στάδια κατά τον σχεδιασμό μίας αντίστοιχης αποστολής είναι η επιλογή των τροχιακών στοιχείων των δορυφόρων, καθώς και ο σχεδιασμός του κατάλληλου δορυφορικού σχηματισμού, στην περίπτωση που η αποστολή αποτελείται από περισσότερους του ενός δορυφόρους.

Η επιλογή των τροχιακών στοιχείων είναι ένα ιδιαίτερα σύνθετο και πολυπαραμετρικό πρόβλημα, κυρίως όταν πρέπει να τοποθετηθούν περισσότεροι του ενός δορυφόροι, η οποία δεν έχει μοναδική λύση. Επομένως, κατά τον σχεδιασμό μίας δορυφορικής αποστολής κρίνεται απαραίτητη η χρήση ενός κατάλληλου λογισμικού πακέτου, το οποίο να παρέχει στον σχεδιαστή την δυνατότητα προσομοίωσης και αξιολόγησης της απόδοσης του εκάστοτε σχηματισμού, ώστε να είναι σε θέση να πραγματοποιήσει τις απαιτούμενες διορθώσεις και να επιλέξει τις καλύτερες δυνατές παραμέτρους σχεδιασμού. Το STK (Systems Tool Kit) αποτελεί ένα λογισμικό μοντελοποίησης και ανάλυσης σύνθετων συστημάτων, ιδιαίτερα χρήσιμο για την περίπτωση δορυφορικών εφαρμογών, το οποίο είναι διαθέσιμο στο εργαστήριο Γεωπληροφορικής της ΣΑΤΜ. Ένας από τα αντικείμενα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του προγράμματος, η εμβάθυνση στις λειτουργίες του και η σύνταξη ενός μικρού τεχνικού εγχειριδίου χρήσης του STK, ενώ στη συνέχεια αναπτύσσονται σύντομες εφαρμογές που αναδεικνύουν την χρήση και τις δυνατότητες του προγράμματος.

Τέλος, παρότι τα όργανα και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην δορυφορική γεωδαισία εξελίσσονται συνεχώς, η αντίστοιχη μεθοδολογία για τον σχεδιασμό δορυφορικών σχηματισμών βασίζεται ακόμη σε μεθόδους που αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1970 ή και παλαιότερα, όπως για παράδειγμα ο φορμαλισμός Walker, σύμφωνα με τον οποίο σχεδιάστηκαν οι σχηματισμοί των συστημάτων GPS και Galileo. Οι νέοι σχηματισμοί που προτείνονται έκτοτε, αφορούν σε συγκεκριμένες δορυφορικές αποστολές και δεν αποτελούν μία ευρύτερη μεθοδολογία σχεδιασμού. Το 2004 οι D. Mortari et al στο άρθρο τους “The Flower Constellations” για πρώτη φορά εισήγαγαν την λογική σχεδιασμού των Flower Constellations, η οποία αφορά στον σχεδιασμό σχηματισμών, όλοι οι δορυφόροι των οποίων έχουν κοινό τροχιακό ίχνος, όπως αυτό παρατηρείται ως προς ένα γήινο (ECF) πλαίσιο αναφοράς. Με βάση την μεθοδολογία που ανέπτυξαν, και η οποία παρουσιάζεται στο τέταρτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας μπορούν να δημιουργηθούν σχηματισμοί για συστήματα GNSS, δορυφορικές αποστολές παρακολούθησης της γης (earth observation missions), αποστολές μελέτης του διαστήματος, και άλλες. Στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται η περίπτωση ενός σχηματισμού GNSS, βασισμένου στην λογική σχεδιασμού των Flower Constellations, του οποίου η απόδοση αξιολογείται και συγκρίνεται με τις αντίστοιχες αποδόσεις των σχηματισμών GPS και Galileo.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ανώτερης και Δορυφορικής Γεωδαισίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών με επιβλέποντα καθηγητή τον κ. Δημήτρη Δεληκαράογλου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Δημήτρη Δεληκαράογλου για την πολύτιμη καθοδήγησή του, τις ορθές παρατηρήσεις του, την κατανόηση του και την άψογη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω , την οικογένειά μου, την Άρτεμη και τους φίλους μου για όλη την υποστήριξη και την κατανόησή που μου έδειξαν.

Σας ευχαριστώ όλους

Μπούσιας- Αλεξάκης Ευάγγελος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι διττός: αφενός αφορά στην διερεύνηση των δυνατοτήτων προηγμένων λογισμικών εργαλείων, όπως το λογισμικό πακέτο *Satellite Tool Kit (STK)*, που αφορούν στην μοντελοποίηση και ανάλυση σύνθετων συστημάτων και ειδικά στον σχεδιασμό και την αξιολόγηση δορυφορικών αποστολών, και αφετέρου, με χρήση του λογισμικού STK, η αξιολόγηση ενός παγκόσμιου δορυφορικού σχηματισμού πλοήγησης, σχεδιασμένου βάσει της λογικής των Flower Constellations, που αποτελεί μία νέα μεθοδολογία κατανομής δορυφόρων σε συμβατές τροχιακές θέσεις, που χαρακτηρίζονται από επαναλαμβανόμενα τροχιακά ίχνη μέσω ενός κατάλληλου μηχανισμού κατανομής τους. Πιο συγκεκριμένα, σε πρώτο στάδιο η μελέτη εστιάζει στην ανάπτυξη σύντομων εφαρμογών δορυφορικής γεωδαισίας οι οποίες ως στόχο έχουν την κατανόηση της λειτουργίας και την ανάδειξη των δυνατοτήτων του λογισμικού STK. Δεύτερος βασικός στόχος είναι η αξιολόγηση του δορυφορικού σχηματισμού πλοήγησης Global Navigation Flower Constellation (GNFC) και η σύγκρισή της απόδοσης του σε σχέση με την απόδοση των συμβατικών σχηματισμών των συστημάτων GPS και GALILEO.

Η εργασία χωρίζεται σε έξι επιμέρους κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αποτελείται από μία εισαγωγή στους στόχους της διπλωματικής εργασίας και σε μία εκτενή παρουσίαση της δομής και των περιεχομένων της. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή των απαραίτητων θεωρητικών εννοιών που αφορούν στα συστήματα αναφοράς που χρησιμοποιούνται στη δορυφορική γεωδαισία, στον τρόπο περιγραφής της τροχιάς των δορυφόρων και τους χαρακτηριστικούς τύπους τροχιών, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου επιχειρείται μία εισαγωγή στα συστήματα GNSS και μία εκτενής περιγραφή των δεικτών γεωμετρικής ισχύος ή αλλιώς δεικτών DOP, οι οποίοι και θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των σχηματισμών GNSS. Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μία εκτενής ανάλυση του τρόπου λειτουργίας του STK, των χαρακτηριστικών του και των δυνατοτήτων εισαγωγής αντικειμένων, ανάλυσης και γραφικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται μία σειρά εφαρμογών που ως στόχο έχουν την εξοικείωση με το λογισμικό και την ανάδειξη των δυνατοτήτων του. Στο πέμπτο κεφάλαιο επιχειρείται μία εκτενής περιγραφή των Flower Constellations, των χαρακτηριστικών τους και των παραμέτρων σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται, προκειμένου να γίνει κατανοητή η λογική σχεδιασμού πάνω στην οποία βασίζονται, ενώ επίσης γίνεται αναφορά σε πιθανές εφαρμογές των Flower Constellations στο σχεδιασμό γεωδαιτικών, και όχι μόνο, δορυφορικών σχηματισμών. Αντικείμενο του έκτου και τελευταίου κεφαλαίου της διπλωματικής είναι η αξιολόγηση 3 δορυφορικών σχηματισμών πλοήγησης, των GPS, GALILEO και GNFC, και η σύγκριση μεταξύ της απόδοσης του σχηματισμού GNFC με τους συμβατικούς σχηματισμούς GPS και GALILEO αξιοποιώντας τις δυνατότητες του λογισμικού STK, καθώς και των λογισμικών SURFER και MATLAB.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is twofold: firstly, to explore the capabilities of advanced software tools, such as the STK (*Systems Tool Kit*), for the modeling and analysis of complex systems, especially for designing and evaluating satellite missions, and secondly through the use of STK to evaluate a Global Navigation Satellite System, designed on the basis of the so-called Flower Constellation concept, which constitutes a novel alternative methodology to distribute several satellites into admissible locations in orbits that are characterized by repeatable space tracks through a proper phasing mechanism. Specifically, the first parts of the study focuses on the development of short applications of satellite geodesy with the aim to understand the functionality and the full capabilities of STK software package. This was done in order to proceed into a second key objective, which was the evaluation of the global navigation satellite constellation GNFC (*Global Navigation Flower Constellation*) and the comparison of its performance to the performance of the conventionally designed constellations of the GPS and GALILEO satellite systems.

The thesis is divided into six separate chapters. The first chapter consists of an introduction to the purpose of this thesis and an extensive presentation of the structure of this thesis and the contents of each chapter. The second chapter provides an introduction to the necessary theoretical background that is related to the reference systems and frames used in satellite geodesy, the way to describe a satellite's orbit and the available typical orbit types. In the last part of the chapter we present a brief overview on the design issues pertaining to the Global Navigation Satellite Systems and give a thorough description of the Dilution of Precision Figure of Merit, which is used in the evaluation of the global navigation systems under consideration. In the third chapter, an extended analysis of STK's way of operation is presented, focusing mainly on its structure, its basic characteristics and the capabilities it provides as far as inserting objects, analyzing and visualizing the results of the design process. In the fourth chapter a series of applications are realized in order to demonstrate the software's operation and to highlight its geodetic capabilities. In the fifth chapter a thorough description of the Flower Constellations concepts is given, along with an extensive account on the characteristics and the parameters that rule the design process of a Flower Constellation, in order to understand the basic principles behind the eventual workings of the orbits of the satellites participating in such a constellation. In addition, possible implementation of the Flower Constellations in geodetic applications is discussed. Finally, the subject of the last chapter of the thesis is the evaluation of three global navigation satellite constellations, GNFC, GPS and GALILEO, and the comparison between GNFC's performance and the performance of the conventionally designed GPS and GALILEO, using the combined capabilities of the STK, MATLAB and SURFER packages.

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
ABSTRACT.....	vi
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Στόχοι της διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	1
2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΒΑΣΕΙΣ.....	5
2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Συστήματα Αναφοράς.....	6
2.2.1 Χρήσιμοι Ορισμοί.....	6
2.2.2 Διάκριση των Συστημάτων Συντεταγμένων.....	7
2.2.2.1 Αδρανειακά Συστήματα.....	7
2.2.2.2 Συμβατικά Γήινα Πλαίσια Αναφοράς.....	10
2.2.2.3 Διαταραχές των Κινήσεων της Γης.....	13
2.2.3 Συστήματα Χρόνου.....	16
2.3 Τροχιακά ή Κεπλέρια Στοιχεία.....	22
2.3.1 Διαταραχές στις τροχιές των δορυφόρων.....	26
2.3.2 Τύποι Τροχιών.....	28
2.3.2.1 Υψηλές Τροχιές (High Earth Orbits).....	29
2.3.2.2 Μέσες Τροχιές (Medium Earth Orbit).....	30
2.3.2.3 Χαμηλές Δορυφορικές Τροχιές (Low Earth Orbits-LEO).....	31
2.4 Εισαγωγή στα Συστήματα GNSS και στους Δείκτες Γεωμετρικής Ισχύος (Dilution Of Precision).....	33
2.4.1 Συστήματα GNSS.....	33
2.4.2 Προσδιορισμός Θέσης με χρήση συστήματος GNSS (Global Navigation Satellite Systems)- Το σύστημα GPS.....	35
2.4.3 Σήματα του συστήματος GPS.....	36
2.4.4 Παρατηρούμενα μεγέθη από το σύστημα GPS.....	37
2.4.5 Εξίσωση Παρατήρησης της Ψευδοαπόστασης.....	38
2.4.6 Απόλυτος Προσδιορισμός Θέσης σε Πραγματικό Χρόνο- Λύση Πλοήγησης- Οι Δείκτες DOP.....	39
3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ STK.....	49
3.1 Εισαγωγή.....	49
3.2 Βασικές Δυνατότητες του STK.....	49
3.3 Δομή του STK- Βασικές Λειτουργικές Ομάδες.....	51
3.4 Σενάρια και Βασικά Αντικείμενα στο STK.....	54
3.4.1 Σενάρια στο STK.....	54
3.4.2 Αντικείμενα στο STK.....	54
3.5 Εισαγωγή Οχημάτων στο STK.....	57
3.5.1 Εισαγωγή Δορυφορικών Τροχιών στο STK.....	57
3.5.2 Εισαγωγή Πορείας Οχήματος εδάφους και Πλοίου στο STK.....	61
3.6 Εισαγωγή άλλων αντικειμένων στο STK.....	62

3.6.1 Constellation.....	62
3.6.2 Αλυσίδα Αντικειμένων (Chain).....	63
3.6.3 Περιοχή Κάλυψης (Coverage Definition).....	64
3.6.4 Δείκτες Αξιολόγησης (Figures Of Merit).....	65
3.6.4.1 Απλή Κάλυψη (Simple Coverage).....	66
3.6.4.2 Κάλυψη από N αντικείμενα ενδιαφέροντος (N Asset Coverage).....	66
3.6.4.3 Χρόνος Κάλυψης (Coverage Time).....	67
3.6.4.4 Χρόνος εκ νέου "επίσκεψης" του δορυφόρου στην περιοχή ενδιαφέροντος (Revisit Time).....	68
3.6.4.5 Διάρκεια Κάλυψης (Access Duration).....	70
3.6.4.6 Αριθμός Προσβάσεων Κάλυψης (Number of Accesses).....	71
3.6.4.7 Υπολογισμός του Διαχωρισμού Προσβάσεων Κάλυψης (Measuring Access Separation).....	71
3.6.4.8 Αριθμός Κενών Κάλυψης (Number of Gaps).....	72
3.6.4.9 Μέσο Χρονικό Κενό (Time Average Gap).....	72
3.6.4.10 Χρόνος Ανταπόκρισης (Response Time).....	73
3.6.4.11 Περιορισμοί Πρόσβασης (Access Constraints).....	73
3.6.4.12 Dilution of Precision.....	77
3.6.4.13 Ακρίβεια Πλοήγησης (Navigation Accuracy).....	78
Κριτήρια Ικανοποίησης (Satisfaction Criteria).....	82
Διαστήματα Τιμών FOM που χρησιμοποιούνται για στατιστικά (FOM Value Limits for Computing Statistics).....	82
Δυνατότητα υπολογισμού ημερήσιων τιμών (Per Day Values) Δεικτών FOM.....	82
3.7 Επιβολή Περιορισμών (Constraints) στα Αντικείμενα του STK.....	83
3.7.1 Βασικοί Περιορισμοί.....	83
3.7.2 Άλλες Κατηγορίες Περιορισμών.....	86
3.8 Οπτικοποίηση στο STK.....	87
3.8.1 Δισδιάστατη Οπτικοποίηση στο STK.....	87
3.8.2 Τρισδιάστατη Οπτικοποίηση στο STK.....	92
3.9 Ανάλυση στο STK.....	98
3.9.1 STK Access Tool.....	99
3.9.2 Single Object Coverage.....	102
3.9.3 Report and Graph Manager.....	104
4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ STK.....	107
4.1 Εισαγωγή.....	107
4.2 Εφαρμογή 1η: Προσομοίωση πορείας πλοίου για την εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με την γεωμετρική ακρίβεια προσδιορισμού θέσης του δορυφορικού συστήματος GPS.....	107
4.2.1 Δημιουργία του Σεναρίου.....	108
4.2.2 Εισαγωγή του Δορυφορικού Σχηματισμού GPS.....	108
4.2.3 Εισαγωγή της πορείας του πλοίου.....	108
4.2.4 Υπολογισμός της Κάλυψης.....	109
4.2.5 Καθορισμός των Δεικτών Αξιολόγησης (FOM).....	109
4.3 Εφαρμογή 2η: Προσομοίωση πορείας οχήματος εδάφους για την εξαγωγή πληροφορίας σχετικής με την ποιότητα της γεωμετρίας του σχηματισμού GPS και την συνεισφορά της στην	

ακρίβεια προσδιορισμού θέσης με το σύστημα GPS.....	114
4.3.1 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους.....	114
4.3.1.1 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).....	114
4.3.1.2 Εισαγωγή του DEM στο Σενάριο του STK.....	116
4.3.1.3 Οπτικοποίηση του DEM στο STK.....	116
4.3.2 Εισαγωγή της Πορείας του οχήματος εδάφους.....	118
4.3.2.1 Great Arc Propagator File.....	118
4.3.3 Εισαγωγή του δορυφορικού σχηματισμού GPS.....	120
4.3.4 Ανάλυση της ποιότητας κάλυψης που παρέχει στο όχημα ο σχηματισμός GPS.....	120
4.3.4.1 Ανάλυση της επίδρασης του αναγλύφου στην ποιότητα κάλυψης με χρήση γωνιών αποκοπής.....	120
4.3.4.2 Ανάλυση της επίδρασης της χρήσης DEM στην αξιολόγηση της ποιότητας κάλυψης.....	125
4.3.5 Συμπεράσματα.....	127
4.4 Εφαρμογή 3η: Σύγκριση πρόβλεψης τροχιάς δορυφόρου με χρήση του SGP4 και του GPS propagator του STK με τις τροχιές ακριβείας της Υπηρεσίας IGS.....	128
4.4.1 SGP4 propagator.....	129
4.4.2 Αρχεία εισόδου TLE (Two Line Elements).....	129
4.4.3 GPS propagator.....	132
4.4.4 Αρχεία εισόδου SEM.....	133
4.4.5 Εφημερίδες της IGS- Εφημερίδες ακριβείας της IGS.....	134
4.4.6 Εισαγωγή των τροχιακών στοιχείων στο STK- Προσομοίωση Τροχιών.....	134
4.4.7 Δημιουργία Εφημερίδων σε STK format με τις συντεταγμένες τους στο ICRF.....	135
4.4.8 Δημιουργία Εφημερίδων του δορυφόρου στο R.I.C. (Radial, In-track, Cross-track) σύστημα συντεταγμένων.....	135
4.4.9 Επεξεργασία.....	136
4.4.9.1 Στην περίπτωση εξαγωγής των συντεταγμένων της εφημερίδας στο σύστημα ICRF.....	136
4.4.9.2 Στην περίπτωση εξαγωγής των συντεταγμένων της εφημερίδας στο σύστημα RIC.....	138
4.4.10 Συμπεράσματα.....	139
4.5 Εφαρμογή 4η: Εισαγωγή και επεξεργασία δορυφορικών αποστολών Formation Flying γεωδαιτικού ενδιαφέροντος στο STK.....	140
4.5.1 Δορυφορική Αποστολή GRACE.....	140
4.5.1.1 Στοιχεία της Αποστολής.....	142
4.5.1.2 Μέτρηση των μεταβολών του γήινου Πεδίου Βαρύτητας.....	142
4.5.1.3 Προϊόντα της Αποστολής GRACE.....	142
4.5.1.4 Παρόν και Μέλλον της Αποστολής.....	144
4.5.1.5 Εφαρμογή στο STK.....	144
4.5.2 Δορυφορικές Αποστολές TERRASAR-X και TanDEM-X.....	151
4.5.2.1 TERRASAR-X.....	151
4.5.2.2 TANDEM-X.....	153
Στόχος της αποστολής.....	153
Κύριος Στόχος- Πεδία εφαρμογών των αποστολών TerraSAR-X και TanDEM-X.....	153
Πλεονεκτήματα στην ακρίβεια του DEM λόγω της χρήσης δύο δορυφόρων για την	

ταυτόχρονη δημιουργία εικόνων SAR.....	154
Διαμόρφωση Τροχιάς.....	154
4.5.2.3 Δημιουργία του Σεναρίου στο STK.....	156
Εισαγωγή των τροχιών του δορυφορικού Σχηματισμού TanDEM-X στο STK.....	157
Εισαγωγή αισθητήρα για την απεικόνιση και προσομοίωση της περιοχής λήψης.....	157
Εισαγωγή αισθητήρα SAR.....	158
4.5.2.4 Ανάλυση στο STK.....	161
4.5.2.5 Πιθανότητα κάλυψης Σημείου (Point Probability of Coverage).....	167
5 Εισαγωγή στα Flower Constellations.....	173
5.1 Εισαγωγή.....	174
5.2 Παλαιότεροι Δορυφορικοί σχηματισμοί- Σχετιζόμενα Δορυφορικά Συστήματα.....	174
5.2.1 Το σύστημα Four- Leaf Clover.....	175
5.2.2 HEO- MIO.....	176
5.2.3 JOCOS Constellations.....	177
5.2.4 LOOPUS Constellations.....	178
5.2.5 COMBRA.....	179
5.3 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ των FC.....	180
5.3.1 Επαναλαμβανόμενα επίγεια τροχιακά ίχνη (Repeat Ground Track).....	181
5.3.2 Εύρεση της Δεσμικής Περιόδου.....	183
5.3.3 “Πάγωμα” Τροχιών με επαναλαμβανόμενο ίχνος (Frozen Repeat Groundtrack Orbits).....	184
5.3.4 Επίλυση των a και e	186
5.3.5 Satellite Phasing.....	186
5.3.5.1 Συμμετρικός Σχεδιασμός.....	189
5.3.5.2 Μη συμμετρικός σχεδιασμός.....	190
5.3.5.3 Ατελής Σχεδιασμός.....	190
5.3.5.4 Switched Flower Constellations.....	191
5.4 Επίδραση της τιμής των παραμέτρων του FC στον σχηματισμό.....	191
5.4.1 Κλίση του τροχιακού επιπέδου (i).....	193
5.4.2 Όρισμα του περιγείου (ω).....	193
5.4.3 Ύψος του περιγείου (h_p).....	194
5.4.4 Επιλογή των N_p και N_d	195
5.4.4.1 Ομοιότητα των Flower Constellations.....	197
5.4.5 Επιλογή των F_n και F_d (Phasing Considerations).....	198
5.4.5.1 Καθορισμός του αριθμού των δορυφόρων ανά τροχιά.....	200
5.4.5.2 Καθορισμός του αριθμού των τροχιακών επιπέδων.....	200
5.4.5.3 Επίπεδα Δορυφόρων (Planes of Satellites).....	201
5.4.5.4 Δευτερεύουσες Κλειστές Διαδρομές.....	202
5.4.5.5 Η παράμετρος F_h	203
5.5 Οικογένειες των Flower Constellations.....	203
5.5.1 Synodic Flower Constellations- Relative Flower Constellations.....	204
5.5.2 Contiguous Flower Constellations.....	204
5.5.3 Διπλά Συμβατοί FCs- Dual Compatible Flower Constellations.....	206
5.6 Πιθανές Εφαρμογές των Flower Constellations.....	207
6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ GNFC, GPS ΚΑΙ GALILEO.....	209

6.1 Εισαγωγή.....	209
6.2 Περιγραφή των Δορυφορικών Σχηματισμών GNFC, GPS και GALILEO.....	209
6.2.1 Global Navigation Flower Constellation (GNFC).....	209
6.2.1.1 Σύγκριση Γεωμετρικής Ισχύος του σχηματισμού GNFC με τους Σχηματισμούς GPS και GALILEO.....	212
6.2.2 Εισαγωγή στην γεωμετρία του Σχηματισμού GPS.....	212
6.2.2.1 Ο Αλγόριθμος Walker Delta.....	214
6.2.2.2 Walker Delta Constellation στο STK.....	215
Walker Delta Constellation.....	216
Modified Walker Delta Constellation.....	216
6.2.3 Το σύστημα GALILEO.....	217
6.2.3.1 Εισαγωγή στην γεωμετρία του Σχηματισμού GALILEO.....	217
6.3 Εφαρμογή Σύγκρισης Γεωμετρικής απόδοσης των σχηματισμών με χρήση του STK.....	219
6.3.1 Δημιουργία Σεναρίων- Καθορισμός Χρονικού Διαστήματος Μελέτης.....	219
6.3.2 Εισαγωγή των σχηματισμών στο STK.....	219
6.3.2.1 GPS.....	220
6.3.2.2 GNFC.....	220
6.3.2.3 GALILEO.....	220
6.3.3 Καθορισμός της περιοχής ενδιαφέροντος και δημιουργία του πλέγματος σημείων.....	221
6.3.4 Υπολογισμός της ποιότητας κάλυψης για τον κάθε σχηματισμό.....	222
6.3.5 Αποτελέσματα του κάθε σεναρίου.....	223
6.3.5.1 Σενάριο 1 (GPS).....	223
6.3.5.2 Σενάριο 2 και Σενάριο 4 (GNFC).....	227
6.3.5.3 Σενάριο 3 (GALILEO).....	232
6.3.6 Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των σεναρίων.....	236
6.3.6.1 Διαφορές μεταξύ GPS και GNFC.....	237
6.3.6.2 Διαφορές μεταξύ GALILEO και GNFC.....	240
6.3.7 Έλεγχος επαναληψιμότητας των τιμών του GDOP σε ημερήσια βάση.....	246
6.3.7.1 Χρήση των δεικτών RMSD και NRMSD.....	248
6.3.7.2 Αποτελέσματα ελέγχου επαναληψιμότητας.....	248
6.4 Συμπεράσματα.....	251
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	253
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	255
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	256
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α- Συστήματα Αναφοράς RIC και NTC.....	258
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	260

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Θεμελιώδεις Άξονες και σφαιρικές συντεταγμένες για ένα Ουρανογραφικό Σύστημα Συντεταγμένων.....	9
Σχήμα 2: Γραφική Απεικόνιση της Μετάπτωσης και της Κλόνισης στον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής της Γης.....	14
Σχήμα 3: Αληθές Στιγμαίο (XCT ,YCT ,ZCT) και Μέσο Συμβατικό (XT ,YT ,ZT) Γήινο Σύστημα Αναφοράς.....	15
Σχήμα 4: Γραφική απεικόνιση του ορισμού του Τοπικού Φαινόμενου και Μέσου Αστρικού Χρόνου...17	
Σχήμα 5: Τροχιακά ή Κεπλέρια Στοιχεία.....	22
Σχήμα 6: Επίδραση της κλίσης του τροχιακού επιπέδου στα όρια κάλυψης του γεωγραφικού πλάτους που δύναται να παράσχει ο δορυφόρος.....	24
Σχήμα 7: Αληθής και Έκκεντρη Ανωμαλία.....	26
Σχήμα 8: Χαμηλές, Μέσες και Υψηλές Τροχιές σε σύγκριση με την σεληνιακή τροχιά. Σχέση Ταχύτητας Περιστροφής με το Ύψος Πτήσης για χαμηλές, μέσες και υψηλές τροχιές.....	29
Σχήμα 9: Τροχιά τύπου Molniya.....	31
Σχήμα 10: Γραφική απεικόνιση των διανυσμάτων.....	40
Σχήμα 11: Σχέση μεταξύ γεωμετρίας δορυφόρων και PDOP.....	45
Σχήμα 12: Τετράεδρο Ορατότητας.....	46
Σχήμα 13: Χάρτης Απεικόνισης του ελάχιστου αριθμού Προσβάσεων Κάλυψης για κάθε σημείο της γήινης επιφάνειας από τον σχηματισμό GPS για χρονική διάρκεια μίας ημέρας.....	67
Σχήμα 14: Προσδιορισμός Διαστήματος Διάρκειας Κάλυψης.....	70
Σχήμα 15: Η ελάχιστη, μέγιστη ή μέση τιμή της συγκεκριμένης τιμής του περιορισμού κάλυψης που εφαρμόζεται για όλα τα ορατά καθορισμένα αντικείμενα ενδιαφέροντος κάποια δεδομένη χρονική στιγμή.....	74
Σχήμα 16: Επιπλέον δείγμα για τον υπολογισμό της μέγιστης τιμής.....	76
Σχήμα 17: Ορισμός Γωνίας Ύψους για κάποιον δορυφόρο.....	84
Σχήμα 18: Ορισμός Γωνίας Ύψους για εγκατάσταση ή στόχο.....	85
Σχήμα 19: Το ίχνος της τροχιάς των δορυφόρων του σχηματισμού GPS όπως απεικονίζεται σε ισαπέχουσα κυλινδρική προβολή.....	88
Σχήμα 20: Το ίχνος των δορυφόρων του σχηματισμού GPS όπως απεικονίζεται σε ορθή πολική προβολή και αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων (ECI).....	89
Σχήμα 21: Το ίχνος των δορυφόρων του σχηματισμού GPS όπως απεικονίζεται σε ορθή πολική προβολή και γήινο σύστημα συντεταγμένων (ECF).....	89
Σχήμα 22: Το ίχνος του ανοδικού μόνο τμήματος της τροχιάς των δορυφόρων (ισαπέχουσα κυλινδρική προβολή).....	90
Σχήμα 23: Το ίχνος του καθοδικού μόνο τμήματος της τροχιάς των δορυφόρων (ισαπέχουσα κυλινδρική προβολή).....	90
Σχήμα 24: Στιγμιότυπο που απεικονίζει το φωτεινό (ημέρα- κίτρινο) και σκοτεινό (νύχτα- κυανό) τμήμα της Γης.....	91
Σχήμα 25: Ο Δορυφορικός Σχηματισμός του Συστήματος GPS όπως απεικονίζεται στο 3D Graphics Window.....	92
Σχήμα 26: Απεικόνιση Πρόσβασης Αλυσίδας.....	93
Σχήμα 27: Απεικόνιση πρόσβασης (με κόκκινη ευθεία) μεταξύ του δορυφόρου της αποστολής GOCE	

με δορυφόρο GPS και παράλληλα την παραπάνω πρόσβαση αλυσίδας.....	94
Σχήμα 28: Οι κύριοι άξονες των συστημάτων ECI (κόκκινο) και ECF (μπλε).....	94
Σχήμα 29: Οι τροχιές 2 δορυφόρων του σχηματισμού GLONASS στο ECI σύστημα συντεταγμένων (με πράσινο χρώμα) και στο ECF (με κόκκινο και μοβ χρώμα).....	96
Σχήμα 30: Οπτικοποίηση του ψηφιακού μοντέλου του δορυφόρου GLONASS-M_11_32275.....	96
Σχήμα 31: Οπτικοποίηση του ψηφιακού μοντέλου του δορυφόρου GLONASS-M_11_32275 αφού έχει εισαχθεί και μία attitude sphere, με την προσθήκη των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων RIC (Range, In-Track, Cross-track) του δορυφόρου.....	97
Σχήμα 32: Απεικόνιση με χρήση κώνων του γεωμετρικού τόπου των σημείων της γήινης επιφάνειας στα οποία ο δορυφόρος του σχήματος έχει κοινή γωνία ύψους και ίση με 0, 30, 60 και 90 μοίρες.....	97
Σχήμα 33: Τοπικό οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων (Local Horizontal).....	101
Σχήμα 34: Σύστημα Συντεταγμένων VVLH.....	101
Σχήμα 35: Τοποκεντρικό Σύστημα Συντεταγμένων.....	101
Σχήμα 36: Ορισμός της μέτρησης του αζιμουθίου και της γωνίας ύψους στο τοποκεντρικό σύστημα συντεταγμένων.....	102
Σχήμα 37: Ορισμός του τρόπου μέτρησης του αζιμουθίου και της γωνίας ύψους στα συστήματα VVLH και HL.....	102
Σχήμα 38: Τιμές των δεικτών DOP όπως προέκυψαν για πλοίο που εκτελούσε τη διαδρομή Ηράκλειο- Πειραιάς.....	110
Σχήμα 39: Αριθμός Προσβάσιμων Δορυφόρων GPS από το πλοίο σε συνάρτηση με το χρόνο.....	111
Σχήμα 40: Χάρτης που απεικονίζει με χρήση χρωματικής κλίμακας την μεταβολή της τιμής του δείκτη GDOP κατά την εκτέλεση της διαδρομής του πλοίου.....	111
Σχήμα 41: Τιμές της ακρίβειας πλοήγησης για την διαδρομή πλοίου Ηράκλειο- Πειραιάς με σταθερό σφάλμα μέτρησης της απόστασης ίσο με 5 m.....	112
Σχήμα 42: Τιμές της ακρίβειας πλοήγησης για την διαδρομή πλοίου Ηράκλειο- Πειραιάς με μεταβαλλόμενο σφάλμα μέτρησης της απόστασης συναρτήσει της γωνίας ύψους του κάθε δορυφόρου.....	113
Σχήμα 43: Διαφορές μεταξύ των τιμών που προέκυψαν με χρήση σταθερής τιμής για το σφάλμα μέτρησης της απόστασης και των αντίστοιχων που προέκυψαν με χρήση του αρχείου Range Uncertainty File.....	113
Σχήμα 44: Δισδιάστατη χρωματική απεικόνιση υψομετρικής πληροφορίας.....	117
Σχήμα 45: Τρισδιάστατη Απεικόνιση Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου.....	117
Σχήμα 46: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πορείας του οχήματος επί του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου.....	119
Σχήμα 47: Μεταβολή της τιμής του δείκτη GDOP κατά την εκτέλεση ορεινής διαδρομής από όχημα εδάφους.....	120
Σχήμα 48: Μεταβολή του αριθμού δορυφόρων του σχηματισμού GPS που έχουν πρόσβαση σε όχημα ενώ αυτό εκτελεί την ορεινή διαδρομή Κόνιτσα- Ιωάννινα.....	121
Σχήμα 49: Μεταβολή της τιμής του δείκτη GDOP κατά την εκτέλεση ορεινής διαδρομής από όχημα εδάφους με επιβολή ελάχιστης τιμής της γωνίας ύψους ίσης με 10 μοίρες.....	121
Σχήμα 50: Μεταβολή του αριθμού δορυφόρων του σχηματισμού GPS που έχουν πρόσβαση σε όχημα ενώ αυτό εκτελεί την ορεινή διαδρομή Κόνιτσα- Ιωάννινα με επιβολή ελάχιστης αποδεκτής τιμής της γωνίας ύψους ίση με 10 μοίρες.....	122
Σχήμα 51: Μεταβολή της τιμής του δείκτη GDOP κατά την εκτέλεση ορεινής διαδρομής από όχημα	

εδάφους με επιβολή ελάχιστης τιμής της γωνίας ύψους ίσης με 20 μοίρες.....	122
Σχήμα 52: Μεταβολή του αριθμού δορυφόρων του σχηματισμού GPS που έχουν πρόσβαση σε όχημα ενώ αυτό εκτελεί την ορεινή διαδρομή Κόνιτσα- Ιωάννινα με επιβολή ελάχιστης αποδεκτής τιμής της γωνίας ύψους ίση με 20 μοίρες.....	123
Σχήμα 53: Μεταβολή της τιμής του δείκτη GDOP κατά την εκτέλεση ορεινής διαδρομής από όχημα εδάφους με επιβολή ελάχιστης τιμής της γωνίας ύψους ίσης με 30 μοίρες.....	123
Σχήμα 54: Μεταβολή του αριθμού δορυφόρων του σχηματισμού GPS που έχουν πρόσβαση σε όχημα ενώ αυτό εκτελεί την ορεινή διαδρομή Κόνιτσα- Ιωάννινα με επιβολή ελάχιστης αποδεκτής τιμής της γωνίας ύψους ίση με 30 μοίρες.....	124
Σχήμα 55: Μεταβολή της τιμής του δείκτη GDOP κατά την εκτέλεση ορεινής διαδρομής από όχημα εδάφους με επιβολή ελάχιστης τιμής της γωνίας ύψους ίσης με 40 μοίρες.....	124
Σχήμα 56: Μεταβολή του αριθμού δορυφόρων του σχηματισμού GPS που έχουν πρόσβαση σε όχημα ενώ αυτό εκτελεί την ορεινή διαδρομή Κόνιτσα- Ιωάννινα με επιβολή ελάχιστης αποδεκτής τιμής της γωνίας ύψους ίση με 40 μοίρες.....	125
Σχήμα 57: Μεταβολή της τιμής του δείκτη GDOP κατά την εκτέλεση ορεινής διαδρομής από όχημα εδάφους με επιβολή περιορισμού ορατότητας με χρήση DEM.....	126
Σχήμα 58: Μεταβολή του αριθμού δορυφόρων του σχηματισμού GPS που έχουν πρόσβαση σε όχημα ενώ αυτό εκτελεί την ορεινή διαδρομή Κόνιτσα- Ιωάννινα με επιβολή περιορισμού ορατότητας με χρήση DEM.....	127
Σχήμα 59: Μεταβολή του μέτρου του διανύσματος της διαφοράς ανάμεσα στη θέση του δορυφόρου GPS με PRN18, όπως προέκυψε από τον SGP4 propagator και από την εφημερίδα ακριβείας της IGS, με το χρόνο.....	137
Σχήμα 60: Μεταβολή του μέτρου του διανύσματος της διαφοράς ανάμεσα στη θέση του δορυφόρου GPS με PRN18, όπως προέκυψε από τον GPS propagator με χρήση almanac και από την εφημερίδα ακριβείας της IGS, με το χρόνο.....	137
Σχήμα 61: Μεταβολή των συντεταγμένων: Radial (μπλε), In-Track (πράσινο) και Cross-Track (κόκκινο) μεταξύ της θέσης του δορυφόρου με PRN 18, όπως προέκυψαν με εισαγωγή του δορυφόρου με χρήση του GPS propagator και με εισαγωγή του με χρήση της IGS εφημερίδας ακριβείας, με το χρόνο.....	138
Σχήμα 62: Μεταβολή των συντεταγμένων: Radial (μπλε), In-Track (πράσινο) και Cross-Track (κόκκινο) μεταξύ της θέσης του δορυφόρου με PRN 18, όπως προέκυψαν με εισαγωγή του δορυφόρου με χρήση του SGP4 propagator και με εισαγωγή του με χρήση της IGS εφημερίδας ακριβείας, με το χρόνο.....	139
Σχήμα 63: Χάρτης που απεικονίζει την αποχή του γεωειδούς από το ελλειψοειδές του WGS84σύμφωνα με το μοντέλο RL05.....	143
Σχήμα 64: Οπτικοποίηση του γεωειδούς όπως προκύπτει από το μοντέλο GGM03C.....	143
Σχήμα 65: Επίγειο ίχνος των δορυφόρων της αποστολής GRACE σε μία ισαπέχουσα κυλινδρική προβολή.....	145
Σχήμα 66: Ορθογραφική Προβολή (με κέντρο $\phi=45^{\circ}$ και $\lambda=0^{\circ}$) της τροχιάς της αποστολής GRACE..	146
Σχήμα 67: Διαχωρισμός του τμήματος της τροχιάς στο οποίο οι δορυφόροι έχουν πρόσβαση στο ηλιακό φως (κίτρινο), και στο τμήμα που οι δορυφόροι βρίσκονται υπό σκιά (μοβ).....	146
Σχήμα 68: Τα επίγεια ίχνη της τροχιάς του σχηματισμού GRACE όπως εμφανίζονται στην 3D Globe	148
Σχήμα 69: Στιγμιότυπο του δορυφορικού σχηματισμού GRACE, όπως απεικονίζεται στο 3D Graphics Window του STK.....	148

Σχήμα 70: Ίχνη με πρόσβαση (κίτρινο χρώμα) ή χωρίς πρόσβαση (κόκκινα) στο ηλιακό φως.....	149
Σχήμα 71: Χρονικά Διαστήματα Πρόσβασης στο ηλιακό φως, σκιάς και ημίφωτος.....	149
Σχήμα 72: Συνολικό Διάστημα πρόσβασης των δορυφόρων στο ηλιακό φως.....	150
Σχήμα 73: Απεικόνιση του Stripmap Mode.....	152
Σχήμα 74: Ελικοειδής Σχηματισμός Πτήσης του TanDEM-X.....	155
Σχήμα 75: Επίγειο Ίχνος των τροχιών του ζεύγους των δορυφόρων της αποστολής TanDEM-X.....	157
Σχήμα 76: Βασικές Γεωμετρικές Παράμετροι προσδιορισμού ενός συστήματος ραντάρ πραγματικού ανοίγματος SLAR (Side Looking Aperture Radar), κοινές και σε ένα σύστημα SAR.....	159
Σχήμα 77: Η μέγιστη και η ελάχιστη γωνία ύψους που ορίζονται για τον προσδιορισμό του οπτικού πεδίου ενός αισθητήρα τύπου SAR στο STK.....	160
Σχήμα 78: Στιγμιότυπο που απεικονίζει το οπτικό πεδίο των 2 δορυφόρων.....	160
Σχήμα 79: Αθροιστική Κάλυψη (Accumulative Coverage) ως συνάρτηση του χρόνου.....	162
Σχήμα 80: Κάλυψη ως ποσοστό % του συνολικού χρόνου που παρέχεται από το σχηματισμό ανά γεωγραφικό πλάτος.	163
Σχήμα 81: Χάρτης που παρουσιάζει τον ελάχιστο χρόνο εκ νέου επίσκεψης για το σύνολο της γήινης επιφάνειας.	164
Σχήμα 82: Χάρτης που παρουσιάζει τον μέγιστο χρόνο επανεπίσκεψης από το σχηματισμό για το σύνολο της αποστολής.....	164
Σχήμα 83: Η ελάχιστη, μέγιστη και μέση τιμή του μέγιστου χρόνου επανεπίσκεψης, που αφορά στο σύνολο των σημείων που βρίσκονται στο ίδιο γεωγραφικό πλάτος.....	165
Σχήμα 84: Απεικονίζεται η μεταβολή του μέγιστου χρόνου επανεπίσκεψης σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος για τον μεσημβρινό με $\lambda=250$	166
Σχήμα 85: Διάγραμμα που απεικονίζει τις συντεταγμένες του συστήματος RIC μεταξύ των 2 δορυφόρων της αποστολής TanDEM-X.....	167
Σχήμα 86: Χάρτης που απεικονίζει την θέση των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της μεταβολής της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει του χρόνου.....	168
Σχήμα 87: Μεταβολή της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει της παρόδου του χρόνου από τυχαία χρονική στιγμή αιτήματος κάλυψης που αφορά το σημείο 1.....	169
Σχήμα 88: Μεταβολή της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει της παρόδου του χρόνου από τυχαία χρονική στιγμή αιτήματος κάλυψης που αφορά το σημείο 2.....	169
Σχήμα 89: Μεταβολή της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει της παρόδου του χρόνου από τυχαία χρονική στιγμή αιτήματος κάλυψης που αφορά το σημείο 3.....	169
Σχήμα 90: Μεταβολή της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει της παρόδου του χρόνου από τυχαία χρονική στιγμή αιτήματος κάλυψης που αφορά το σημείο 4.....	169
Σχήμα 91: Μεταβολή της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει της παρόδου του χρόνου από τυχαία χρονική στιγμή αιτήματος κάλυψης που αφορά το σημείο 5.....	170
Σχήμα 92: Μεταβολή της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει της παρόδου του χρόνου από τυχαία χρονική στιγμή αιτήματος κάλυψης που αφορά το σημείο 6.....	170
Σχήμα 93: Μεταβολή της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει της παρόδου του χρόνου από τυχαία χρονική στιγμή αιτήματος κάλυψης που αφορά το σημείο 7.....	171
Σχήμα 94: Συγκεντρωτικό Γράφημα παρουσίασης των γραφικών καμπυλών μεταβολής της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει του χρόνου και για τα 7 σημεία που καλύπτουν τον ελλαδικό χώρο.	171
Σχήμα 95: Ενδεικτικά παραδείγματα σχηματισμών Four Leaf Clover.....	176

Σχήμα 96: Ενδεικτική LOOPUS τροχιά ενός δορυφόρου.....	178
Σχήμα 97: Αριστερά κεκλιμένο επίγειο ίχνος ενός σχηματισμού COMBRA αποτελούμενου από 6 δορυφόρους.....	179
Σχήμα 98 : Σχηματισμός τύπου Droplet αποτελούμενος από 8 δορυφόρους.....	180
Σχήμα 99: Οι σχετικές τροχιές διαφόρων Flower Constellations.....	181
Σχήμα 100: Οι δορυφόροι των αποστολών Jason 1 και Topex Poseidon.....	182
Σχήμα 101: Ονομαστική τροχιά του δορυφόρου TOPEX.....	182
Σχήμα 102: Σχετικές και Αδρανειακές τροχιές 1 και 2.....	188
Σχήμα 103: Διάγραμμα Ροής που παρουσιάζει την βασική διαδικασία σχεδιασμού ενός FC.....	192
Σχήμα 104: Πολική Προβολή FC με $\omega=270^\circ$	193
Σχήμα 105: Πολική Προβολή FC με $\omega=225^\circ$	193
Σχήμα 106: Ισομετρική Προβολή FC με $\omega=270^\circ$	194
Σχήμα 107: Ισομετρική Προβολή FC με $\omega=225^\circ$	194
Σχήμα 108: Η σχετική τροχιά ενός 3-1 FC για $h_p=400\text{km}$ και $h_p=13892\text{km}$	195
Σχήμα 109: Σχετικές τροχιές ενός 3-1 FC ((a) και (c)) και ενός 769-257 FC ((b) και (d)).....	196
Σχήμα 110: (a) Σχηματισμός 3-1-50 FC και (b) Σχηματισμός 769-257-50 FC.....	197
Σχήμα 111: Πολική προβολή της σχετικής τροχιάς ενός 3-1-4 FC με $F_n=1$ και $F_d=7$	199
Σχήμα 112: (α) το βασικό μοτίβο ενός FC, (b) FC με διπλασιασμένο το βασικό μοτίβο.....	200
Σχήμα 113: Κίνηση σε επίπεδα. Ο σχηματισμός 3-1-6-1-6 FC.....	201
Σχήμα 114: Σύγκριση της ακολουθίας των επιτρεπτών τιμών της ορθής αναφοράς του ανιόντος δεσμού και της μέσης ανωμαλίας.....	202
Σχήμα 115: Σύγκριση κατά την εκχώρηση τιμών ορθής αναφοράς σε ένα απλό FC και σε ένα contiguous FC με την παράμετρο $F_d=8$	205
Σχήμα 116: Βήμα κατανομής των δορυφόρων δορυφόρων για ένα βασικό FC (ΔM) και για ένα συνεχές FC (ΔMC).....	205
Σχήμα 117: Ο σχηματισμός GNFC. Οι σχετικές τροχιές των 2 FCs που τον απαρτίζουν.....	211
Σχήμα 118: Απεικόνιση των ECI τροχιών των δορυφόρων του GNFC στο 3D Graphics Window.....	211
Σχήμα 119: Απεικόνιση των αδρανειακών τροχιών των δορυφόρων που απαρτίζουν το σύστημα GPS στο 3D Globe.....	213
Σχήμα 120: Προβολές των σχετικών τροχιών των δορυφόρων που απαρτίζουν τον σχηματισμό GPS.....	214
Σχήμα 121: Απεικόνιση των αδρανειακών τροχιών των δορυφόρων που απαρτίζουν το σύστημα Galileo στο 3D Globe.....	218
Σχήμα 122: Προβολές των σχετικών τροχιών των δορυφόρων που απαρτίζουν τον σχηματισμό Galileo.....	218
Σχήμα 123: Το πλέγμα σημείων (coverage definition grid points) που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή.....	222
Σχήμα 124: Χάρτης που παρουσιάζει τις μέσες τιμές του δείκτη GDOP για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης που προκύπτει για τον σχηματισμό GPS.....	223
Σχήμα 125: Χάρτης που παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του δείκτη GDOP για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης που προκύπτει για τον σχηματισμό GPS.....	224
Σχήμα 126: Αθροιστική Συχνότητα Εμφάνισης των τιμών GDOP για το σχηματισμό GPS.....	225
Σχήμα 127: Χάρτης που παρουσιάζει τις τιμές, κάτω από τις οποίες κυμαίνεται ο δείκτης GDOP στο 90% του χρόνου μελέτης, που προκύπτει για τον σχηματισμό GPS.....	225

Σχήμα 130: Χάρτης που παρουσιάζει τις μέσες τιμές του δείκτη GDOP για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης που προκύπτει για τον σχηματισμό GNFC.....	228
Σχήμα 131: Χάρτης που παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του δείκτη GDOP για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης που προκύπτει για τον σχηματισμό GNFC.....	228
Σχήμα 132: Χάρτης που παρουσιάζει τις τιμές, κάτω από τις οποίες κυμαίνεται ο δείκτης GDOP στο 90% του χρόνου μελέτης, που προκύπτει για τον σχηματισμό GNFC.....	229
Σχήμα 133: Αθροιστική Συχνότητα Εμφάνισης των τιμών GDOP για το σχηματισμό GNFC.....	230
Σχήμα 134: Χάρτης που παρουσιάζει τον ελάχιστο αριθμό ορατών δορυφόρων σε κάθε σημείο, που παρατηρήθηκε κατά το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης για τον σχηματισμό GNFC.....	230
Σχήμα 135: Χάρτης που παρουσιάζει τον ελάχιστο αριθμό δορυφόρων που καλύπτουν κάθε σημείο για το 90% του χρόνου για τον σχηματισμό GPS.....	231
Σχήμα 136: Χάρτης που παρουσιάζει τις μέσες τιμές του δείκτη GDOP για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης που προκύπτει για τον σχηματισμό GALILEO.....	232
Σχήμα 137: Χάρτης που παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του δείκτη GDOP για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης που προκύπτει για τον σχηματισμό GALILEO.....	233
Σχήμα 138: Χάρτης που παρουσιάζει τις τιμές, κάτω από τις οποίες κυμαίνεται ο δείκτης GDOP στο 90% του χρόνου μελέτης, που προκύπτει για τον σχηματισμό GALILEO.....	233
Σχήμα 139: Αθροιστική Συχνότητα Εμφάνισης των τιμών GDOP για το σχηματισμό GALILEO.....	234
Σχήμα 140: Χάρτης που παρουσιάζει τον ελάχιστο αριθμό ορατών δορυφόρων σε κάθε σημείο, που παρατηρήθηκε κατά το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης για τον σχηματισμό GALILEO.....	234
Σχήμα 141: Χάρτης που παρουσιάζει τον ελάχιστο αριθμό δορυφόρων που καλύπτουν κάθε σημείο για το 90% του χρόνου για τον σχηματισμό GALILEO.....	235
Σχήμα 142: Διαφορές ανάμεσα στις μέσες τιμές του GDOP που προέκυψαν για τους σχηματισμούς GPS και GNFC.....	238
Σχήμα 143: Διαφορές ανάμεσα στις μέγιστες τιμές του GDOP που προέκυψαν για τους σχηματισμούς GPS και GNFC.....	238
Σχήμα 144: Διαφορές μεταξύ τις τιμών, κάτω από τις οποίες κυμαίνεται ο δείκτης GDOP στο 90% του χρόνου μελέτης, για τους σχηματισμούς GPS και GNFC.....	239
Σχήμα 145: Διαφορές ανάμεσα στις μέσες τιμές του GDOP που προέκυψαν για τους σχηματισμούς Galileo και GNFC.....	241
Σχήμα 146: Διαφορές μεταξύ τις τιμών, κάτω από τις οποίες κυμαίνεται ο δείκτης GDOP στο 90% του χρόνου μελέτης, για τους σχηματισμούς Galileo και GNFC.....	242
Σχήμα 147: Διαφορές ανάμεσα στις μέγιστες τιμές του GDOP που προέκυψαν για τους σχηματισμούς Galileo και GNFC.....	242
Σχήμα 148: Αποτελέσματα που αναφέρονται στις μέσες τιμές. Ποσοστό % βελτίωσης ή επιδείνωσης των μέσων τιμών του GDOP. (a) GPS- FC (b) Galileo- FC.....	244
Σχήμα 149: Αποτελέσματα που αναφέρονται στις μέγιστες τιμές. Ποσοστό % βελτίωσης ή επιδείνωσης των μέγιστων τιμών του GDOP. (a) GPS- FC (b) Galileo- FC.....	244
Σχήμα 150: Αποτελέσματα που αφορούν στις μέγιστες παρατηρούμενες τιμές σε κάθε σημείο για το 90% του χρόνου. Ποσοστό % βελτίωσης ή επιδείνωσης επί του συνόλου των σημείων για τους σχηματισμούς: (a) GPS- FC (b) Galileo- FC.....	245
Σχήμα 151: Περιοχή μελέτης για τον έλεγχο επαναληψιμότητας των τιμών GDOP σε ημερήσια βάση.	247

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Παράμετροι του WGS84.....	12
Πίνακας 2: Μεταβολή της τιμής του σφάλματος UERE για διάφορες γωνίες ύψους.....	46
Πίνακας 3: Κατηγοριοποίηση των τιμών GDOP σε σχέση με την γεωμετρία του Σχηματισμού.....	47
Πίνακας 4: Δείγμα αρχείου TLE με Κεπλέρια στοιχεία των σήμερα υπαρχόντων δορυφόρων του σχηματισμού GALILEO.....	59
Πίνακας 5: Στατικές Τιμές του N Asset Coverage	66
Πίνακας 6: Διαθέσιμες στατικές τιμές του χρόνου κάλυψης.	68
Πίνακας 7: Επιλογές προσδιορισμού της στατικής τιμής του χρόνου εκ νέου επίσκεψης.....	69
Πίνακας 8: Στατιστικές τιμές του δείκτη Access Duration.....	70
Πίνακας 9: Στατικές Τιμές του δείκτη: Number of Accesses.....	71
Πίνακας 10: Παράμετροι προσδιορισμού του χρονικού διαστήματος διαχωρισμού μεταξύ προσβάσεων.....	72
Πίνακας 11: Επιλογές προσδιορισμού των κενών κάλυψης.....	72
Πίνακας 12: Διαθέσιμες Στατικές Τιμές του χρόνου ανταπόκρισης.....	73
Πίνακας 13: Επιλογή της τιμής του περιορισμού που θα επιλεγεί βάσει όλων των διαθέσιμων αντικειμένων ενδιαφέροντος.....	75
Πίνακας 14: Διαθέσιμες στατικές τιμές κατά τον υπολογισμό του περιορισμού κάλυψης.....	76
Πίνακας 15: Καθορισμός Αριθμού αντικειμένων που χρησιμοποιούνται κατά την λύση πλοήγησης.....	77
Πίνακας 16: Διαθέσιμες Στατικές τιμές των δεικτών DOP.....	78
Πίνακας 17: Διαθέσιμα Είδη του δείκτη Navigation Accuracy.	79
Πίνακας 18: Επιλογή του επιθυμητού αριθμού προσβάσεων κατά τον υπολογισμό της ακρίβειας πλοήγησης.....	80
Πίνακας 19: Επιλογή της στατικής τιμής της ακρίβειας πλοήγησης.....	80
Πίνακας 20: Στατιστικά Μεγέθη της στατικής τιμής του δείκτη GDOP όπως προέκυψαν για την πορεία πλοίου.	110
Πίνακας 21: Μεταβολή του UERE συναρτήσει της γωνίας ύψους για δορυφόρους του σχηματισμού GPS και μετρήσεις της ψευδοαπόστασης στην συχνότητα L1.....	112
Πίνακας 22: Σφάλματα των προϊόντων της αποστολής SRTM.....	115
Πίνακας 23: Συγκεντρωτικός Πίνακας στατιστικών τιμών του δείκτη GDOP όπως προέκυψε για την πορεία οχήματος σε διαδρομή με έντονο ανάγλυφο, ανάλογα με τον περιορισμό πρόσβασης που επιβλήθηκε.....	128
Πίνακας 24: Τροχιακά Στοιχεία των δορυφόρων GRACE1 και GRACE2 όπως προέκυψαν από τα TLE με την πιο κοντινή εποχή αναφοράς στην χρονική στιγμή εκκίνησης του σεναρίου.....	146
Πίνακας 25: Συγκεντρωτικά Στοιχεία που αφορούν τις περιόδους λειτουργίας του σχηματισμού GRACE και σχετίζονται με την γραμμή ορατότητας των ηλιακών συλλεκτών των δορυφόρων με τον Ήλιο.....	150
Πίνακας 26: Βασικές Παράμετροι της Stripmap Mode.....	152
Πίνακας 27 Γεωμετρία του σχηματισμού για τις λειτουργίες Bistatic, Alternating Bistatic και Pursuit Monostatic.....	156
Πίνακας 28: Γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων 1 έως 7.....	167

Πίνακας 29: Τροχιακά Στοιχεία των δορυφόρων του Four Leaf Clover.....	175
Πίνακας 30: Διαταραχές λόγω του πεδίου βαρύτητας της Γης.....	185
Πίνακας 31: Παράμετροι του Δορυφορικού Σχηματισμού GNFC.....	210
Πίνακας 32: Ορθή αναφορά του ανιόντος δεσμού και μέση ανωμαλία των δορυφόρων 1 έως 15 του πρώτου Flower Constellation.....	210
Πίνακας 33: Συγκεντρωτικά Στοιχεία Εισαγωγής των Σεναρίων 1 μέχρι 4.....	219
Πίνακας 34 Αθροιστική Συχνότητα Εμφάνισης των τιμών GDOP για το σχηματισμό GPS.....	225
Πίνακας 35: Στατιστικές Τιμές του δείκτη GDOP που προέκυψαν για τον σχηματισμό του συστήματος GPS.....	227
Πίνακας 36: Αθροιστική Συχνότητα Εμφάνισης των τιμών GDOP για το σχηματισμό GNFC.....	230
Πίνακας 37: Στατιστικές Τιμές του δείκτη GDOP για τον σχηματισμό του GNFC.....	231
Πίνακας 38: Αθροιστική Συχνότητα Εμφάνισης των τιμών GDOP για το σχηματισμό GALILEO.....	234
Πίνακας 39: Στατιστικές Τιμές του δείκτη GDOP για τον σχηματισμό του GALILEO.....	235
Πίνακας 40: Διαφορές μεταξύ των στατιστικών τιμών, που αναφέρονται στο σύνολο του πλέγματος, για τους σχηματισμούς GPS και GNFC.....	239
Πίνακας 41: Διαφορές % μεταξύ των στατιστικών τιμών, που αναφέρονται στο σύνολο του πλέγματος, για τους σχηματισμούς GPS και GNFC.....	240
Πίνακας 42: Διαφορές μεταξύ των στατιστικών τιμών, που αναφέρονται στο σύνολο του πλέγματος, για τους σχηματισμούς Galileo και GNFC.....	243
Πίνακας 43: Διαφορές % μεταξύ των στατιστικών τιμών, που αναφέρονται στο σύνολο του πλέγματος, για τους σχηματισμούς Galileo και GNFC.....	243
Πίνακας 44: Συγκεντρωτικός Πίνακας: Παρουσιάζονται τα ποσοστά των σημείων, στα οποία βελτιώνονται (τιμές μεγαλύτερες του 0) ή υποβαθμίζονται (τιμές μικρότερες του 0) οι τιμές του GDOP με τη χρήση του σχηματισμού GNFC, ανά κατηγορία.....	246
Πίνακας 45: Συντεταγμένες των σημείων του πλέγματος της περιοχής μελέτης.....	247
Πίνακας 46: Τιμές των RMSD και NRMSD για τις ημέρες 1-2, 1-4, 1-8, 1-10 όπως προέκυψαν για τον σχηματισμό GPS.....	249
Πίνακας 47: Τιμές των RMSD και NRMSD για τις ημέρες 1-2, 1-4, 1-8, 1-10 όπως προέκυψαν για τον σχηματισμό GNFC.....	250
Πίνακας 48: Τιμές των RMSD και NRMSD για τις ημέρες 1-2, 1-4, 1-8, 1-10 όπως προέκυψαν για τον σχηματισμό GALILEO.....	250

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το STK αποτελεί ένα προηγμένο λογισμικό μοντελοποίησης, ανάλυσης, αξιολόγησης και οπτικοποίησης σύνθετων συστημάτων, το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην μελέτη και αξιολόγηση δορυφορικών αποστολών με εφαρμογές στην γεωδαισία και σε μία πληθώρα άλλων επιστημών. Η πλήρης σουίτα των πακέτων (*modules*) που απαρτίζουν το STK έχει παραχωρηθεί από την εταιρεία Analytical Graphics Inc. (AGI) για πανεπιστημιακή /εκπαιδευτική χρήση στο Κέντρο Γεωπληροφορικής της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., η οποία συμμετέχει μέσω του Εργαστηρίου Ανώτερης Γεωδαισίας της Σχολής σε ένα διεθνές δίκτυο ακαδημαϊκών χρηστών του STK που αποτελείται από περίπου 250 πανεπιστημιακά ιδρύματα και ερευνητικά κέντρα σε όλο τον κόσμο.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί αφενός η διεξοδική μελέτη και εξοικείωση με τη χρήση του εν λόγω λογισμικού πακέτου και, αφετέρου η αξιοποίηση του για την μοντελοποίηση, την ανάλυση, την οπτικοποίηση και την αξιολόγηση δορυφορικών αποστολών γεωδαιτικού ενδιαφέροντος.

1.1 Στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Δύο είναι οι κύριοι στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας:

- Πρώτον, η μελέτη του προγράμματος STK, η ανάδειξη των δυνατοτήτων που παρέχει σε εφαρμογές προσομοίωσης και αξιολόγησης συστημάτων, μέσα από μία σειρά συγκεκριμένων γεωδαιτικών εφαρμογών.
- Δεύτερον, ο σχεδιασμός και η αξιολόγηση ενός παγκόσμιου δορυφορικού σχηματισμού πλοήγησης, βασισμένου στις θεωρήσεις και τις αρχές λειτουργίας ειδικών δορυφορικών σχηματισμών όπως των λεγόμενων Flower Constellations καθώς και η σύγκριση της απόδοσης του εν λόγω συστήματος σε σχέση με τους σχηματισμούς που χρησιμοποιούνται στα συμβατικά συστήματα GPS και Galileo.

1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η εργασία χωρίζεται σε έξι επιμέρους κεφάλαια. Το παρόν κεφάλαιο αποτελείται από την εισαγωγή, τον προσδιορισμό των στόχων της διπλωματικής και την εκτενή περιγραφή της δομής της. Το δεύτερο κεφάλαιο είναι θεωρητικής φύσης και έχει ως στόχο την εισαγωγή των βασικών θεωρητικών εννοιών που κρίθηκαν απαραίτητες για την κατανόηση και την εκπόνηση της διπλωματικής. Το τρίτο

κεφάλαιο έχει ως στόχο την αναλυτική περιγραφή του προγράμματος STK ως προς την δομή του, τις δυνατότητές του και τον τρόπο λειτουργίας του, και θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένα μικρό τεχνικό εγχειρίδιο του προγράμματος. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσονται μικρές εφαρμογές με σκοπό την εξοικείωση με τον τρόπο λειτουργίας του λογισμικού και κυρίως την ανάδειξη ορισμένων βασικών δυνατοτήτων του. Το πέμπτο κεφάλαιο επιχειρεί μία εκτενή εισαγωγή στα Flower Constellations (FC), τα χαρακτηριστικά τους και τις καθοριστικές παραμέτρους σχεδιασμού ενός FC. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο αναπτύσσεται μία διαδικασία αξιολόγησης των σχηματισμών πλοήγησης GNFC (*Global Navigation Flower Constellation*), GPS και GALILEO, και σύγκρισης της απόδοσης μεταξύ του σχηματισμού GNFC και των σχηματισμών GPS και GALILEO. Πιο αναλυτικά:

Στο δεύτερο κεφάλαιο εισάγονται τα συστήματα και τα πλαίσια αναφοράς που χρησιμοποιούνται στην δορυφορική γεωδαισία και τα οποία χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα ουρανογραφικά και τα γήινα. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις κλίμακες χρόνου και ακολούθως στις κινήσεις του άξονα περιστροφής της Γης που επιδρούν στην μετατροπή των συντεταγμένων μεταξύ των δύο συστημάτων σε διαφορετικές εποχές αναφοράς. Η δεύτερη ενότητα του κεφαλαίου αναφέρεται στην περιγραφή της τροχιάς του δορυφόρου με χρήση των Κεπλέρειων στοιχείων και στους συνήθεις τύπους των δορυφορικών τροχιών των τεχνητών δορυφόρων. Επίσης πραγματοποιείται μία σύντομη αναφορά στις βασικές διαταραχές της Κεπλέρειας τροχιάς και στις αιτίες που τις προκαλούν. Στην τρίτη ενότητα του κεφαλαίου πραγματοποιείται μία σύντομη εισαγωγή στα συστήματα GNSS (*Global Navigation Satellite System*) και στα κριτήρια που έχουν θεσπιστεί για την αξιολόγησή τους, ενώ ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή του τρόπου μετρήσεων και προσδιορισμού θέσης με χρήση ενός συστήματος GNSS. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται μία εκτενής αναφορά στους δείκτες γεωμετρικής ισχύος ή δείκτες *DOP* (*Dilution of Precision*), με χρήση των οποίων μετράται η απόδοση των συστημάτων πλοήγησης ή εντοπισμού και οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των σχηματισμών στο ερευνητικό μέρος της εργασίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται μία εκτενής περιγραφή του λογισμικού Satellite Tool Kit (STK). Αρχικά περιγράφονται σε γενικές γραμμές η δομή του προγράμματος και οι βασικές δυνατότητες που παρέχει. Στη συνέχεια, αφού περιγραφούν τα βασικά αντικείμενα του STK, ακολουθεί η ανάλυση της διαδικασίας εισαγωγής και ρύθμισης των παραμέτρων του σεναρίου και των αντικειμένων του STK. Ακολούθως, παρουσιάζεται η διαδικασία ανάλυσης των δεδομένων και ο τρόπος εξαγωγής αποτελεσμάτων, με ιδιαίτερη βαρύτητα να δίνεται στους δείκτες αξιολόγησης ή δείκτες *FOM* (*Figures Of Merit*) που παρέχει το πρόγραμμα για την αξιολόγηση της απόδοσης δορυφορικών αποστολών. Στο κεφάλαιο περιλαμβάνεται επίσης μία ενότητα αφιερωμένη στις δυνατότητες και στις ρυθμίσεις δισδιάστατης και τρισδιάστατης οπτικοποίησης, που είναι διαθέσιμες από το λογισμικό. Ουσιαστικά το δεύτερο κεφάλαιο αποτελεί ένα μικρό τεχνικό εγχειρίδιο του λογισμικού STK.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της διπλωματικής αναπτύσσονται πέντε σύντομες εφαρμογές για την εξοικείωση με το πρόγραμμα και την ανάδειξη των δυνατοτήτων του. Η πρώτη αφορά στην προσομοίωση πορείας πλοίου και τον υπολογισμό της τιμής των δεικτών DOP και Navigation Accuracy κατά τη διάρκεια της διαδρομής με χρήση του συστήματος GPS. Η δεύτερη αφορά στην προσομοίωση της πορείας ενός οχήματος εδάφους σε ορεινή περιοχή και στον υπολογισμό της τιμής των δεικτών DOP και του ελάχιστου αριθμού προσβάσεων κατά την διάρκεια της διαδρομής με

χρήση του σχηματισμού GPS. Σε αυτή την εφαρμογή περιορίζεται ο ορίζοντας του σημείου, είτε με τη χρήση γωνιών αποκοπής, είτε με την εισαγωγή ενός DEM στην περιοχή μελέτης. Στην τρίτη εφαρμογή χρησιμοποιείται το STK για την σύγκριση των εφημερίδων που προκύπτουν με χρήση του GPS και του SGP4 propagator, ως προς τις εφημερίδες ακριβείας της IGS για ένα διάστημα 15 ημερών από την εποχή αναφοράς του SEM almanac για τον GPS propagator και του αρχείου TLE για τον SGP4 propagator. Η τέταρτη εφαρμογή αφορά την εισαγωγή του ζεύγους των δορυφόρων της αποστολής GRACE και την επίδραση που έχει στην απόδοση του συστήματος η αδυναμία πραγματοποίησης μετρήσεων όταν οι δορυφόροι δεν έχουν πρόσβαση στο ηλιακό φως, λόγω της φθοράς που έχουν υποστεί με την πάροδο των χρόνων οι μπαταρίες των δορυφόρων της αποστολής. Στην τελευταία εφαρμογή εξετάζεται το μέγιστο χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε ένας από τους δύο δορυφόρους της αποστολής να διέλθει εκ νέου από οποιαδήποτε περιοχή της γήινης σφαίρας. Η τιμή αυτή είναι κρίσιμη για παράδειγμα στην περίπτωση διαχείρισης κρίσεων, όπου μία άμεση αποτύπωση της κατάστασης μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη για την εκτίμηση της καταστροφής και την σύσταση ενός σχεδίου δράσης. Στο πλαίσιο της ίδιας εφαρμογής, υπολογίζεται και η πιθανότητα άμεσης κάλυψης συναρτήσει του χρόνου για σημεία του ελλαδικού χώρου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο επιχειρείται μία εκτενής εισαγωγή στην βασική λογική σχεδιασμού των Flower Constellations και στις βασικές παραμέτρους σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό ενός FC. Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένα FC που διακρίνονται από ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, ενώ παρουσιάζονται και οι πιθανές εφαρμογές στις οποίες θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η λογική σχεδιασμού των Flower Constellations.

Αντικείμενο του έκτου και τελευταίου κεφαλαίου είναι η αξιολόγηση ενός σχηματισμού GNSS, σχεδιασμένου βάσει της λογικής των Flower Constellations, ο οποίος στο εξής θα καλείται σχηματισμός *GNFC (Global Navigation Flower Constellation)*. Αρχικά παρουσιάζεται ο υπό εξέταση σχηματισμός, ενώ ακολουθεί η εκτενής περιγραφή των σχηματισμών των συστημάτων GPS και GALILEO. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία εισαγωγής και αξιολόγησης των τριών σχηματισμών στο STK. Ακολουθεί η παράθεση των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης, ενώ σε ένα επόμενο στάδιο πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν για τους σχηματισμούς GNFC και GPS, και GNFC και GALILEO. Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραπάνω εφαρμογή.

Κλείνοντας την διπλωματική, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το σύνολο της εργασίας, και οι προτάσεις για πιθανές μελλοντικές εφαρμογές και μελέτες.

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΒΑΣΕΙΣ

2.1 Εισαγωγή

Το δεύτερο κεφάλαιο έχει ως στόχο την περιγραφή των βασικών θεωρητικών εννοιών που διέπουν τον σχεδιασμό δορυφορικών τροχιών και θα χρειαστούν στα υπόλοιπα κεφάλαια της διπλωματικής. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο διαχωρίζεται σε τρεις επιμέρους ενότητες με βάση το περιεχόμενό τους. Στην πρώτη ενότητα επιχειρείται μία εισαγωγή στα συστήματα αναφοράς που χρησιμοποιούνται στην δορυφορική Γεωδαισία: τα ουρανογραφικά συστήματα (*ECI*, *Earth-centered inertial*), τα γήινα συστήματα (*ECEF* ή *ECF*, *earth-centered earth-fixed*) και τα σχετικά (ή σχεδόν) αδρανειακά (*quasi-inertial*) συστήματα αναφοράς, τα οποία και χρησιμοποιούνται κατεξοχήν για την περιγραφή της θέσης ενός τεχνητού δορυφόρου. Επιπλέον τονίζεται η σημασία του ακριβούς προσδιορισμού της χρονικής παραμέτρου, τόσο στις μετρήσεις με ένα δορυφορικό σύστημα όσο και στον σωστό προσδιορισμό της θέσης ενός δορυφόρου (και γενικότερα ενός άστρου ή ουράνιου σώματος), και περιγράφονται τα βασικά συστήματα χρόνου (κλίμακες χρόνου).

Δεδομένου ότι σε οποιαδήποτε μελέτη δορυφορικών συστημάτων, η διαχείριση των θεμάτων των δορυφορικών τροχιών αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες, στη δεύτερη ενότητα επιχειρείται μία εισαγωγή στα τροχιακά ή αλλιώς Κεπλέρια στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των δορυφορικών τροχιών. Επίσης γίνεται αναφορά στις ποικίλες διαταραχές που υφίστανται οι δορυφόροι στις τροχιές τους και στους λόγους που τις προκαλούν, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται εν συντομία οι βασικοί τύποι τροχιών που χρησιμοποιούνται στην δορυφορική γεωδαισία.

Στην τρίτη ενότητα του κεφαλαίου γίνεται αναφορά στα συστήματα GNSS πρώτης και δεύτερης γενιάς και τα διεθνή κριτήρια που έχουν καθιερωθεί για την αξιολόγησή τους, ενώ περιγράφεται εν συντομία ο τρόπος λειτουργίας τους. Ακολούθως γίνεται εκτενής αναφορά στους δείκτες DOP οι οποίοι εκφράζουν τη γεωμετρική ισχύ της εκάστοτε διάταξης των δορυφόρων κατά τα διαστήματα των παρατηρήσεων και αποτελούν το βασικό εργαλείο αξιολόγησης των σχηματισμών GNSS στην παρούσα διπλωματική.

2.2 Συστήματα Αναφοράς

2.2.1 Χρήσιμοι Ορισμοί

Για όλες τις εφαρμογές που αφορούν την Γεωδαισία είναι απαραίτητος ο ορισμός (και η χρήση) συστημάτων συντεταγμένων στα οποία περιγράφονται οι θέσεις και οι μεταβολές θέσεων των σωμάτων ή αντικειμένων ενδιαφέροντος.

Για την πληρέστερη κατανόηση των συστημάτων είναι χρήσιμοι οι ακόλουθοι ορισμοί:¹

Πλαίσιο Συντεταγμένων (Coordinate Frame) είναι ένα σύνολο (ορθογώνιων) αξόνων συντεταγμένων (ή άλλης γεωμετρικής κατασκευής) ως προς τους οποίους προσδιορίζεται η θέση ενός σημείου.

Σύστημα Συντεταγμένων (Coordinate System) είναι μία μέθοδος έκφρασης της θέσης ενός σημείου ως προς ένα καθορισμένο πλαίσιο συντεταγμένων. Η θέση μπορεί να καθοριστεί με ορθογώνιες, πολικές ή άλλες καμπυλόγραμμες (π.χ. γεωδαιτικές, κυλινδρικές, ελλειψοειδείς κ.ά.) συντεταγμένες.

Σύστημα Αναφοράς (Reference System) είναι η πλήρης προδιαγραφή για το πώς πρόκειται να διαμορφωθεί ένα σύστημα συντεταγμένων. Καθορίζει την προέλευση και τα θεμελιώδη επίπεδα (ή τους άξονες) του συστήματος συντεταγμένων και περιλαμβάνει επίσης το σύνολο των διαδικασιών, αλγορίθμων και σταθερών που απαιτούνται για τον μετασχηματισμό μεταξύ των παρατηρήσεων και των μοντέλων που αφορούν το εν λόγω σύστημα.

Πλαίσιο Αναφοράς (Reference Frame) είναι ένα σύνολο ευπροσδιόριστων σημείων αναφοράς (*fiducial points*) και των συντεταγμένων τους, που χρησιμεύει στην πρακτική υλοποίηση ενός συγκεκριμένου συστήματος αναφοράς. Οι συντεταγμένες άλλων σημείων μπορούν να προσδιοριστούν κάνοντας διαφορικές μετρήσεις των θέσεών τους ως προς τα σημεία αναφοράς. Ο όρος πλαίσιο αναφοράς συχνά χρησιμοποιείται ως συνώνυμος του πλαισίου συντεταγμένων που καθορίζει.

Εποχή Αναφοράς (Epoch of Reference) είναι μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή στην οποία αναφέρονται οι συντεταγμένες. Η χρήση της εποχής αναφοράς επιβάλλεται από την μεταβολή των συντεταγμένων με την πάροδο του χρόνου, λόγω κινήσεων είτε του σημείου είτε του πλαισίου αναφοράς.

Συμβατικό σύστημα αναφοράς (Conventional Reference System): κατά τη διαδικασία της δημιουργίας ενός πλαισίου αναφοράς επιλέγονται τα δεδομένα τα οποία θεωρούνται κατάλληλα και ακριβή. Η επιλογή αυτή πάντα εμπεριέχει στοιχεία που καθορίζονται από σειρά παραδοχών και για αυτό το λόγο το μοντέλο που αντιπροσωπεύει το σύστημα αναφοράς καλείται συμβατικό. (Kovalevsky et al., 1988)

Μια εκτεταμένη ανάλυση των διαφόρων συστημάτων συντεταγμένων, στα οποία περιγράφονται οι

¹ Όλοι οι ορισμοί έχουν μεταφερθεί κατά λέξη από τις Σημειώσεις Γεωδαιτικής Αστρονομίας του Ρ. Κορακίτη.

θέσεις και οι κινήσεις των σωμάτων, και οι διεθνείς συμβάσεις που διέπουν τον ορισμό, τη διατήρηση των συστημάτων συντεταγμένων, τον προσδιορισμό της μεταβολής τους καθώς και τα μοντέλα σύνδεσης μεταξύ τους έχει παρουσιαστεί από την Καλλιανού (2006), όπου δίνονται περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με το αντικείμενο της πρακτικής υλοποίησης παγκόσμιων συστημάτων και πλαισίων αναφοράς για τις γεωεπιστήμες και την αστρονομία.

2.2.2 Διάκριση των Συστημάτων Συντεταγμένων

Στη Δορυφορική Γεωδαισία απαιτούνται δύο θεμελιώδη είδη συστημάτων αναφοράς:

- Τα Ουρανογραφικά Συστήματα (*celestial systems*): Σταθερά (ακίνητα) ως προς το διάστημα (space-fixed), αδρανειακά συμβατικά συστήματα αναφοράς για την περιγραφή της κίνησης των ουράνιων σωμάτων, και
- Τα Γήινα Συστήματα (*terrestrial systems*): Σταθερά (ακίνητα) ως προς τη Γη, συμβατικά γήινα συστήματα αναφοράς για τον προσδιορισμό των θέσεων των σταθμών παρακολούθησης και την περιγραφή των αποτελεσμάτων της δορυφορικής γεωδαισίας.

Επιπλέον, για την περίπτωση των τεχνητών δορυφόρων γύρω από τη Γη χρησιμοποιείται επίσης το τροχιακό σύστημα αναφοράς (*orbital coordinate system*) το οποίο δεν περιστρέφεται με τη Γη αλλά περιφέρεται με αυτήν. Το συγκεκριμένο σύστημα, αποτελεί ουσιαστικά συνδετικό κρίκο μεταξύ των δύο προαναφερόμενων συστημάτων αναφοράς και χρησιμεύει στο να ορίζονται οι συντεταγμένες των δορυφόρων που περιφέρονται γύρω από τη Γη.

2.2.2.1 Αδρανειακά Συστήματα

Πρόκειται για συστήματα αναφοράς τα οποία είτε βρίσκονται σε ηρεμία είτε σε κατάσταση ομοιόμορφης ευθύγραμμης κίνησης με μηδενική επιτάχυνση. Οι νόμοι της κίνησης του Νεύτωνα ισχύουν μόνο στις περιπτώσεις αδρανειακών συστημάτων αναφοράς. Ένα σύστημα αναφοράς που κινείται με σταθερή ταχύτητα σε σχέση με ένα αδρανειακό σύστημα είναι και αυτό αδρανειακό. Αντίστοιχα, όταν ένα σύστημα στρέφεται ως προς ένα αδρανειακό σύστημα, τότε αυτό δεν είναι αδρανειακό. Η θεωρία κίνησης των τεχνικών δορυφόρων έχει αναπτυχθεί θεωρώντας το σύστημα αναφοράς ως αδρανειακό.

Τα αδρανειακά συστήματα συνήθως ορίζονται με μετρήσεις είτε ως προς τα άστρα είτε ως προς εξωγαλαξιακές ραδιοπηγές (quasars) και για τον λόγο αυτό συνηθίζεται να καλούνται και ουράνια συστήματα αναφοράς (*Celestial Reference Systems, CRS*). Ο ορισμός ενός ουράνιου συστήματος μπορεί να βασίζεται είτε σε κινηματικές είτε σε δυναμικές θεωρήσεις (Καλλιανού, 2006). Ένα κινηματικό CRS ορίζεται βάσει παρατηρήσεων προς αστέρες ή quasars με προσδιορισμένες τις θέσεις τους με μεγάλη ακρίβεια (και της ίδιας κίνησής τους στην περίπτωση που αυτή είναι μετρήσιμη) ως προς το βαρύκεντρο του ηλιακού συστήματος. Ένα δυναμικό CRS βασίζεται στην κίνηση ενός ή περισσότερων σωμάτων του ηλιακού συστήματος (πχ της Σελήνης και των πλανητών) και το

αντίστοιχο δυναμικό πλαίσιο αναφοράς καθορίζεται από τις τροχιακές εφημερίδες ή τον κατάλογο συντεταγμένων) τους.

Το Ισημερινό Σύστημα μιας καθορισμένης εποχής αναφοράς “T₀”, που χρησιμοποιείται στη σφαιρική αστρονομία εδώ και πολλά χρόνια αποτελεί μια αρκετά καλή προσέγγιση ενός συμβατικού αδρανειακού συστήματος αναφοράς. Πρόκειται για ένα ουρανογραφικό σύστημα συντεταγμένων, του οποίου η αρχή θεωρείται ότι συμπίπτει με το γεώκεντρο, M, το θεμελιώδες επίπεδο του αποτελείται από την προβολή του ισημερινού της Γης πάνω στην ουράνια σφαίρα (που αποτελεί τον ουράνιο ισημερινό), η πρωταρχική κατεύθυνση ορίζεται ως εκείνη προς το σημείο της εαρινής ισημερίας (*vernal equinox*), και το σύστημα εκ συμβάσεως είναι δεξιόστροφο. Με άλλα λόγια, ο θετικός άξονας Z είναι προσανατολισμένος προς το Βόρειο Πόλο της ουράνιας σφαίρας, ενώ ο θετικός ημιάξονας X προσανατολίζεται με διεύθυνση το εαρινό ισημερινό σημείο, το οποίο είναι η τομή του Ισημερινού με το επίπεδο της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο, δηλαδή την εκλειπτική. Ο άξονας Y συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα. Το θεμελιώδες χαρακτηριστικό του εν λόγω συστήματος είναι ότι ενώ ευθυγραμμίζεται με τον ισημερινό και τον βόρειο πόλο της Γης, δεν περιστρέφεται με τη Γη, αλλά παραμένει πρακτικά σταθερό με φόντο τα αστέρια.

Στην πραγματικότητα, καθώς το κέντρο μάζας της Γης υπόκειται σε μικρές επιταχύνσεις λόγω της ετήσιας κίνησης της Γης γύρω από τον Ήλιο, ο όρος **σχεδόν-αδρανειακό** σύστημα αναφοράς (*quasi-inertial system*) χρησιμοποιείται επίσης για τα ουράνια συστήματα με αρχή τους το γεώκεντρο. Μία παλαιότερη υλοποίηση του συστήματος είναι ο θεμελιώδης αστρικός κατάλογος FK5 (*Fifth Fundamental Catalogue*), ο οποίος αποτελείται από τις συντεταγμένες 1535 λαμπερών άστρων που συγκεντρώθηκαν από ένα μεγάλο αριθμό μεσημβρινών παρατηρήσεων (*meridian observations*).

Οι θέσεις των άστρων δίνονται συνήθως με τις σφαιρικές τους συντεταγμένες α (ορθή αναφορά- *right ascension*) και δ (απόκλιση- *declination*), όπου ως ορθή αναφορά ορίζεται η δίεδρη γωνία μεταξύ του άξονα X (ωριαίου του Υ) και του ωριαίου του άστρου και μετράται κατά την ορθή φορά. Η απόκλιση μετράται πάνω στον ωριαίο του άστρου από τον Ισημερινό μέχρι το άστρο. Παίρνει τιμές από 0 μέχρι 90 deg προς Βορρά και από 0 μέχρι -90 deg προς Νότο (Σχήμα 1).

Μετατροπή Ουράνιων Σφαιρικών συντεταγμένων σε καρτεσιανές συντεταγμένες

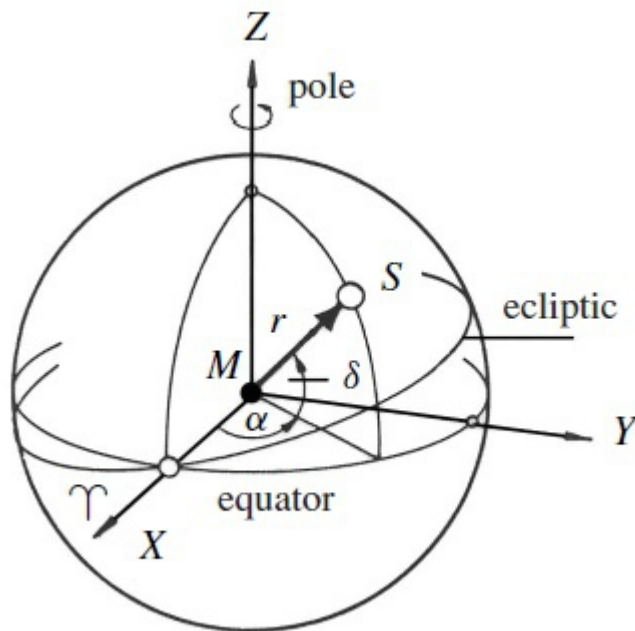
Για την μετατροπή των α και δ σε X, Y, Z χρησιμοποιούνται οι γνωστοί τύποι μετατροπής μεταξύ σφαιρικών και καρτεσιανών συντεταγμένων:

$$X = r \cdot \cos \delta \cdot \cos \alpha, \quad Y = r \cdot \cos \delta \cdot \sin \alpha, \quad Z = r \cdot \sin \delta, \text{ και} \quad (1)$$

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad \alpha = \arctan \frac{Y}{X}, \quad \delta = \arctan \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}, \quad (2)$$

όπου στη σφαιρική αστρονομία το r συνήθως ορίζεται ως η μοναδιαία ακτίνα (*unit radius*). Μπορούμε να θεωρήσουμε την ουράνια σφαίρα στο σχήμα 1 ως μία μοναδιαία σφαίρα και να

εφαρμόσουμε τους βασικούς τύπους της σφαιρικής γεωμετρίας.



Σχήμα 1: Θεμελιώδεις Άξονες και σφαιρικές συντεταγμένες για ένα Ουρανογραφικό Σύστημα Συντεταγμένων. (Πηγή: Seeber, 2003)

Το 1991 θεσπίστηκε από την IAU (*International Astronomical Union*) το νέο διεθνές ουράνιο σύστημα αναφοράς (ICRS- *International Celestial Reference System*) που είναι το θεμελιώδες σύστημα αναφοράς για τις αστρονομικές εφαρμογές. Αυτό είναι συμβατό με το πλαίσιο της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας και είναι βασισμένο σε κινηματικό ορισμό (αντί του δυναμικού).

Ουσιαστικά, για την υλοποίηση του έχει αντικατασταθεί το σύστημα του καταλόγου FK5 με έναν αντίστοιχο κατάλογο υψηλής ακρίβειας συντεταγμένων για 212 ραδιοπηγές. Οι άξονες του ICRS δεν έχουν καθοριστεί ως προς τον Άξονα Περιστροφής της Γης (Ισημερινό Επίπεδο) και το εαρινό ισημερινό σημείο, αλλά ως προς τις συντεταγμένες των εν λόγω μακρινών εξωγαλαξιακών πηγών. Με τον τρόπο αυτό, υλοποιείται το ουράνιο πλαίσιο αναφοράς (ICRF- *International Celestial Reference Frame*), καθορισμένο από τις ακριβείς συντεταγμένες εξωγαλαξιακών αντικειμένων (κυρίως quasars) που δεν έχουν μετρήσιμη εγκάρσια κίνηση (*transverse motion*).

Η αρχή του συστήματος ICRS μπορεί να είναι είτε το Βαρύκεντρο του Ηλιακού Συστήματος (αδρανειακό σύστημα), είτε το γεώκεντρο (σχεδόν αδρανειακό σύστημα). Έτσι το ICRS αποτελείται από τα επιμέρους (C. Ma *et al.*, 1998; Καλλιανού, 2006):

- Βαρυκεντρικό Ουρανογραφικό Σύστημα Αναφοράς (*Barycentric Celestial Reference System, BCRS*),

- όπου ο όρος «βαρυκεντρικό» στην προκειμένη περίπτωση υποδηλώνει ότι το κέντρο του συστήματος είναι το κέντρο μάζας των ουρανίων σωμάτων του ηλιακού συστήματος, και
- Γεωκεντρικό Ουρανογραφικό Σύστημα Αναφοράς (Geocentric Celestial Reference System, GCRS).

Για τη συσχέτιση μεταξύ των δύο συστημάτων απαιτείται να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις της θεωρίας της σχετικότητας.

Σήμερα, το ICRF στηρίζεται στις συντεταγμένες 608 εξωγαλαξιακών ραδιοπηγών που παρατηρήθηκαν με τεχνικές VLBI (Very Long Baseline Interferometry), συμπεριλαμβανομένων των 212 βασικών ραδιοπηγών που είναι μετρημένες με αβεβαιότητα 0.5 mas (milliarcsecond) και καθορίζουν τον προσανατολισμό των αξόνων του ICRS με ακρίβεια της τάξης 0.02 mas.

Προκειμένου να διασφαλιστεί η συνέχεια μεταξύ των συμβατικών ουράνιων συστημάτων αναφοράς, οι προσανατολισμοί των αξόνων του ICRS είναι σύμφωνοι (*consistent*) με τον άξονα περιστροφής και το εαρινό ισημερινό σημείο όπως αυτά έχουν προσδιοριστεί από το σύστημα FK5.

2.2.2.2 Συμβατικά Γήινα Πλαίσια Αναφοράς

Η αρχή ενός ιδεατού συμβατικού γήινου συστήματος αναφοράς θα πρέπει να είναι παγιωμένη (*fixed*) στο γεώκεντρο, το κέντρο μάζας της Γης αν συνυπολογίσουμε την μάζα της ατμόσφαιρας και των ωκεανών. Ο άξονας Z θα πρέπει να ταυτίζεται με τον άξονα περιστροφής της Γης, ο άξονας X να είναι προσανατολισμένος στον μηδενικό μεσημβρινό (συνήθως ο Μεσημβρινός του Greenwich) και ο άξονας Y να συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα. Καθώς το γεώκεντρο και ο άξονας περιστροφής δεν είναι άμεσα προσβάσιμα σε παρατηρήσεις, το ιδεατό γήινο σύστημα προσεγγίζεται με τον ορισμό κάποιων συμβάσεων (Καλλιανού, 2006).

Η κλασσική σύμβαση για τον προσανατολισμό των αξόνων βασίστηκε σε αστρονομικές παρατηρήσεις, θεσπίστηκε και διατηρήθηκε από το 1895 από την Διεθνή Υπηρεσία Πλάτους (*International Latitude Service*) και από το 1962 από την Διεθνή Υπηρεσία Κίνησης του Πόλου (*International Polar Motion Service- IPMS*).

Ο προσανατολισμός του συστήματος υλοποιείται μέσω της συμβατικής διεύθυνσης του μέσου προσανατολισμού του άξονα περιστροφής της Γης (*Polar Axis*) την περίοδο 1900-1905 (Συμβατικός Γήινος Πόλος- *Conventional Terrestrial Pole*), γνωστός επίσης και ως CIO (*Conventional International Origin*) και μέσω ενός μεσημβρινού μηδενικού μήκους (του μέσου μεσημβρινό του Greenwich).

Από το 1988 η ευθύνη για την θέσπιση και διατήρηση τόσο των συμβατικών ουράνιων όσο και των συμβατικών γήινων συστημάτων και πλαισίων αναφοράς μετατέθηκε στην Διεθνή Υπηρεσία Περιστροφής της Γης (*International Earth Rotation Service- IERS*). Σήμερα τα αποτελέσματα παρακολούθησης των κινήσεων της Γης από την υπηρεσία IERS βασίζονται σε σύγχρονες διαστημικές τεχνικές μετρήσεων SLR (*Satellite Laser Ranging*), LLR (*Lunar Laser Ranging*), VLBI, GPS και DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*).

Το συμβατικό γήινο σύστημα αναφοράς που θεσπίστηκε από την IERS και χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για επιστημονικές και πρακτικές εφαρμογές είναι το *International Terrestrial Reference System* (ITRS), το οποίο υλοποιείται από το αντίστοιχο *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF).

Το ITRS ορίζεται ακολούθως:

- Είναι γεωκεντρικό, με το κέντρο μάζας του να ορίζεται για το σύνολο της γήινης σφαίρας, συμπεριλαμβανομένων της ατμόσφαιρας και των ωκεανών.
- Η μονάδα μήκους είναι το μέτρο όπως ορίζεται στο SI και η κλίμακα είναι ορισμένη σύμφωνα με τη σχετικιστική θεωρία της βαρύτητας.
- Ο προσανατολισμός των αξόνων δίνεται από τον αρχικό προσανατολισμό του BIH (*Bureau International de l'Heure*) που αναφέρεται στην εποχή 1984.
- Η χρονική εξέλιξη του προσανατολισμού εξασφαλίζεται με μια κατάλληλη δεσμευτική συνθήκη (*no-net-rotation condition*) σε σχέση με τις οριζόντιες τεκτονικές κινήσεις σε ολόκληρο το φλοιό της Γης.

Οι προσανατολισμένοι άξονες του συστήματος συχνά αναφέρονται ως *IERS International Reference Pole* (IRP) και *IERS Reference Meridian* (IRM).

Η υλοποίηση του ITRS γίνεται μέσω του πλαισίου ITRF, το οποίο διαμορφώνεται από τις καρτεσιανές συντεταγμένες και τις ταχύτητες ενός παγκόσμιου συνόλου σταθμών στην επιφάνεια της Γης, εξοπλισμένων με συστήματα παρατήρησης δορυφορικής (SLR, GPS, DORIS) και διαστημικής γεωδαισίας (VLBI, LLR). Το σύνολο των σταθμών εμμέσως ορίζουν τον άξονα Z (CTP, *Conventional Terrestrial Pole* για το ITRF88 ή IRP για τις μετέπειτα εκδόσεις ITRF89, 90, κλπ.) και X (GMO, *Greenwich Mean Observatory*) του ITRF.

Ως γνωστόν οι καρτεσιανές συντεταγμένες ενός σημείου στο ITRF μπορούν εύκολα να μετατραπούν σε ελλειψοειδείς, με την επιλογή του κατάλληλου ελλειψοειδούς αναφοράς. Όταν χρησιμοποιούνται ελλειψοειδείς, αντί των καρτεσιανών συντεταγμένων ενδείκνυται η χρήση του ελλειψοειδούς GRS80 (με $a=6378137.0$ m, $e^2=0.00669438002290$).

Σχεδόν κάθε χρόνο υλοποιείται και ένα νέο ITRF βάσει νέων παρατηρήσεων με τεχνικές διαστημικής γεωδαισίας. Τα αποτελέσματα δημοσιεύονται με την επωνυμία ITRFxx, όπου xx είναι τα δύο τελευταία ψηφία της χρονιάς στην οποία αναφέρεται η επίλυση. Κάθε ITRF συντίθεται από το συνδυασμό αποτελεσμάτων που προέκυψαν από διαφορετικές τεχνικές, γεγονός που συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση των συστηματικών σφαλμάτων.

Ο καθορισμός ενός πλαισίου αναφοράς είναι μία δύσκολη διαδικασία, καθώς ο φλοιός της Γης υπόκειται συνεχώς σε ένα πλήθος παραμορφώσεων. Οι σημερινές τεχνικές δορυφορικής γεωδαισίας παρέχουν ακρίβειες καλύτερες του cm στον προσδιορισμό της θέσης σταθμών, γεγονός που επιβάλλει την μοντελοποίηση των διάφορων παραμορφώσεων στο επίπεδο του χιλιοστού. Προκειμένου να διατηρηθεί ο προσανατολισμός των αξόνων του συστήματος σταθερός ως προς τη δυναμική Γη, ο ρυθμός μεταβολής του προσανατολισμού του ITRF ορίζεται μέσω σύμβασης ώστε να

μην παρατηρείται στροφή του συστήματος ως προς τη λιθόσφαιρα της Γης.

World Geodetic System 1984

Το WGS84 δημιουργήθηκε και αναπτύσσεται από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ (*US Department of Defense*) από το 1960 για τον προσδιορισμό και την υλοποίηση του γεωκεντρικού γήινου συστήματος αναφοράς που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό θέσης με το σύστημα GPS. Οι βασικές παράμετροι του συστήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Το ελλειψοειδές του WGS84 πρακτικά συμπίπτει με το GRS80. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για να ορίσουν το ελλειψοειδές του WGS84 είναι: ο μεγάλος ημιάξονας (a), η βαρυτική σταθερά της Γης (GM), η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της Γης (ω) και ο κανονικοποιημένος αρμονικός συντελεστής δευτέρου βαθμού του γήινου δυναμικού ($\overline{C}_{2,0}$). Οι παράμετροι αυτές είναι ίδιες με τις αντίστοιχες του ελλειψοειδούς GRS80 με μία μικρή εξαίρεση. Η τιμή του αρμονικού συντελεστή $\overline{C}_{2,0}$ προέκυψε από την τιμή του συντελεστή J2 του GRS80 στρογγυλοποιημένου² στα 8 σημαντικά ψηφία από την σχέση:

$$\overline{C}_{2,0} = -J_2 / (5)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Για τον ίδιο λόγο προκύπτει και η διαφορά στην επιπλάτυνση των 2 ελλειψοειδών, καθώς δεν αποτελεί βασική παράμετρο προσδιορισμού και προκύπτει από τον συντελεστή $\overline{C}_{2,0}$. Η διαφορά στην τιμή της γεωκεντρικής σταθεράς προέκυψε από αναθεώρηση της αρχικής τιμής, η οποία ταυτιζόταν με αυτή του GRS80. (NIMA, 2000)

Παράμετροι	WGS84	GRS80
Μεγάλος ημιάξονας (a)	6 378 137 m	6378137 m
Επιπλάτυνση (f)	1/298.257223563	1 / 298.257222101
Γωνιακή Ταχύτητα (ω)	7.292115 x10 ⁻⁵ rad sec ⁻⁵	7.292115 x10 ⁻⁵ rad sec ⁻⁵
Γεωκεντρική Βαρυτική Σταθερά (GM)	398 600.4418 km ³ s ⁻²	398600.5 km ³ s ⁻²
Κανονικοποιημένος Αρμονικός Συντελεστής $\overline{C}_{2,0}$	-484.16685 x 10 ⁻⁶	-
Συντελεστής J2	-	108263 x10 ⁻⁸

Πίνακας 1: Παράμετροι του WGS84 (Πηγές: (NIMA, 2000) και wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/GRS_80)

Το WGS84 είναι ένα συμβατικό Γήινο Σύστημα Αναφοράς που πληροί όλα τα κριτήρια που θεσπίστηκαν από τις συμβάσεις της IERS. Ο άξονας Z έχει την κατεύθυνση του IERS Reference Pole, ο άξονας X έχει διεύθυνση από το γεώκεντρο προς τον μεσημβρινό του Greenwich (IRM), ενώ ο άξονας Y συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα.

² Μετάφραση του όρου truncation, ο οποίος αφορά στην στρογγυλοποίηση στον αμέσως μικρότερο ακέραιο.

Μετά από πολλές βελτιώσεις (*refinements*) η υλοποίηση του WGS84 συμπίπτει με το ITRF στο επίπεδο των 10 cm, και επομένως για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές μπορεί να θεωρηθεί ότι τα δυο αυτά πλαίσια αναφοράς, για τις περισσότερες εφαρμογές, πρακτικά ταυτίζονται.

Η πρακτική υλοποίηση του συστήματος γίνεται μέσω των συντεταγμένων ενός συνόλου σταθμών. Αυτοί οι σταθμοί είναι οι μόνιμοι σταθμοί παρακολούθησης των δορυφόρων GPS (*GPS tracking stations*) που λειτουργούν υπό την εποπτεία της πολεμικής αεροπορίας (*Air Force*) των ΗΠΑ και της Εθνικής Υπηρεσίας Χαρτογραφίσεων *NIMA* (*National Imagery and Mapping Agency*), ενώ υπεύθυνος οργανισμός για την υλοποίηση και την συντήρηση των πλαισίων του WGS84 είναι η NIMA. Από το 1994 και μετά για την υλοποίηση του συστήματος χρησιμοποιούνται μόνο παρατηρήσεις GPS από τους εν λόγω σταθμούς και όχι πλέον μετρήσεις Doppler από τους δορυφόρους TRANSIT, όπως γινόταν παλαιότερα. Οι διαφορετικές εκδόσεις του WGS84 που προκύπτουν από τις εν λόγω εκδόσεις υλοποιήσεων που πρακτικά διατηρούν το σύστημα WGS84 συμβατό με τις αντίστοιχες εκδόσεις του ITRF ονοματίζονται ως WGS84(Gxxxx), όπου η χρήση του χαρακτήρα G υποδηλώνει ότι οι υπολογισμοί βασίζονται σε μετρήσεις GPS και ο αριθμός xxxx δηλώνει τη βδομάδα χρόνου GPS (αρχίζοντας από 0h UTC, 2 Ιανουαρίου 1994). Η πιο πρόσφατη τέτοια έκδοση είναι το σύστημα WGS84 (G1150).

2.2.2.3 Διαταραχές των Κινήσεων της Γης

Όπως είναι γνωστό, οι κύριες κινήσεις της Γης είναι: μία περιφορά του κέντρου μάζας της γύρω από τον Ήλιο και μία περιστροφική κίνηση γύρω από τον άξονα που περνά από το κέντρο μάζας της. Αυτές οι δύο κινήσεις, που καθορίζουν τα θεμελιώδη συστήματα αναφοράς, διαταράσσονται από βαρυτικές επιδράσεις των άλλων μελών του ηλιακού συστήματος, ενώ η καθεμία διαταράσσει την άλλη.

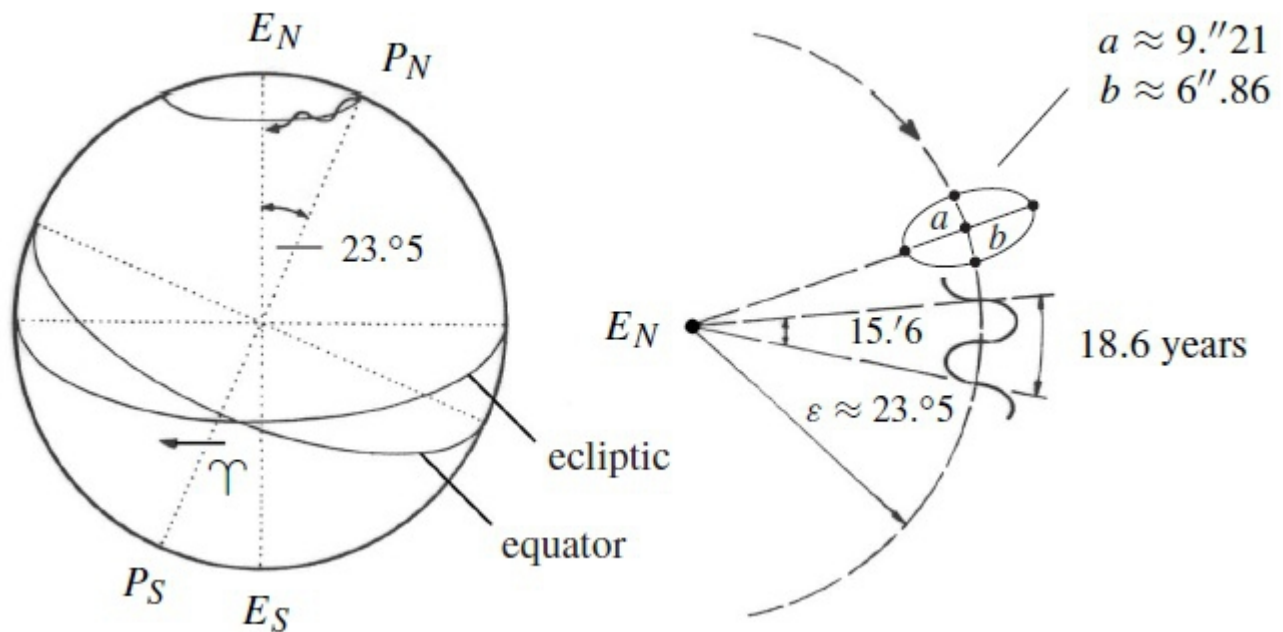
Η κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο γίνεται κατά μήκος μιας ελλειπτικής τροχιάς (εκλειπτική), στην οποία βασίζεται ο ορισμός της αφετηρίας του ουρανογραφικού συστήματος (δύο τομές του επιπέδου της εκλειπτικής με το ισημερινό επίπεδο- φθινοπωρινό και εαρινό ισημερινό σημείο). Το επίπεδο της εκλειπτικής μετακινείται ελαφρά λόγω των επιδράσεων των άλλων πλανητών (πλανητική μετάπτωση).

Προκειμένου να υπάρξει συσχέτιση μεταξύ ενός γήινου και ενός ουράνιου συστήματος αναφοράς είναι απαραίτητη η γνώση των παραμέτρων προσανατολισμού της Γης, που εκφράζουν την μεταβολή του άξονα και της ταχύτητας περιστροφής της συναρτήσει του χρόνου ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

Οι διαταραχές στην περιστροφή της Γης δίνονται από μία σειρά μεγεθών που ονομάζονται παράμετροι Προσανατολισμού της Γης (*Earth Orientation Parameters*) και τα οποία είναι τα $\{x_p, y_p, \delta\psi, \delta\epsilon, UT1-UTC\}$, όπου x_p, y_p είναι οι επίγειες συντεταγμένες του ουράνιου πόλου, $\delta\psi$ και $\delta\epsilon$ είναι οι χωρικές μεταθέσεις κατά μήκος της εκλειπτικής (ή αλλιώς κλόνιση στο εκλειπτικό μήκος) και κατά τη λόξωση της εκλειπτικής (ή αλλιώς κλόνιση στη λόξωση, *obliquity*) και $UT1-UTC$ η διαφορά παγκόσμιου και συντονισμένου χρόνου.

Δεδομένου ότι ο άξονας περιστροφής της Γης δεν είναι ακίνητος στο χώρο, η κίνησή του μπορεί να αναλυθεί στις παρακάτω συνιστώσες:

- Στη **μετάπτωση** (*precession*) και την **κλόνιση** (*Nutation*), οι οποίες αποτελούν διαταραχές της διεύθυνσης του άξονα περιστροφής της Γης στο χώρο και οφείλονται σε συνδυασμό ελκτικών δυνάμεων από τον Ήλιο και την Σελήνη, που προκαλούν ροπές κάθετες στη στροφορμή της Γης. Η μετάπτωση είναι μία αιώνια (secular- με περίοδο 25800 έτη) ομαλή κυκλική κίνηση του μέσου άξονα περιστροφής της Γης γύρω από τον άξονα της εκλειπτικής, η οποία προκαλείται από τις έλξεις της Σελήνης και του Ήλιου στην έξαρση της Γης στον ισημερινό. Αντίστοιχα η κλόνιση είναι μία επιπλέον ταλάντωση του αληθινού άξονα γύρω από το μέσο άξονα (Σχήμα 2), που προκαλείται από τα ίδια αίτια με τη μετάπτωση και οφείλεται στις περιοδικές μεταβολές των έλξεων της Σελήνης και του Ήλιου στη Γη. Σαν συνέπεια, η ταλάντωση αυτή είναι μία σύνθεση πολλών αρμονικών όρων, από τους οποίους ο κυριότερος έχει πλάτος $9.2''$ τόξου και περίοδο 18.6 χρόνια (Κορακίτης, 2008)



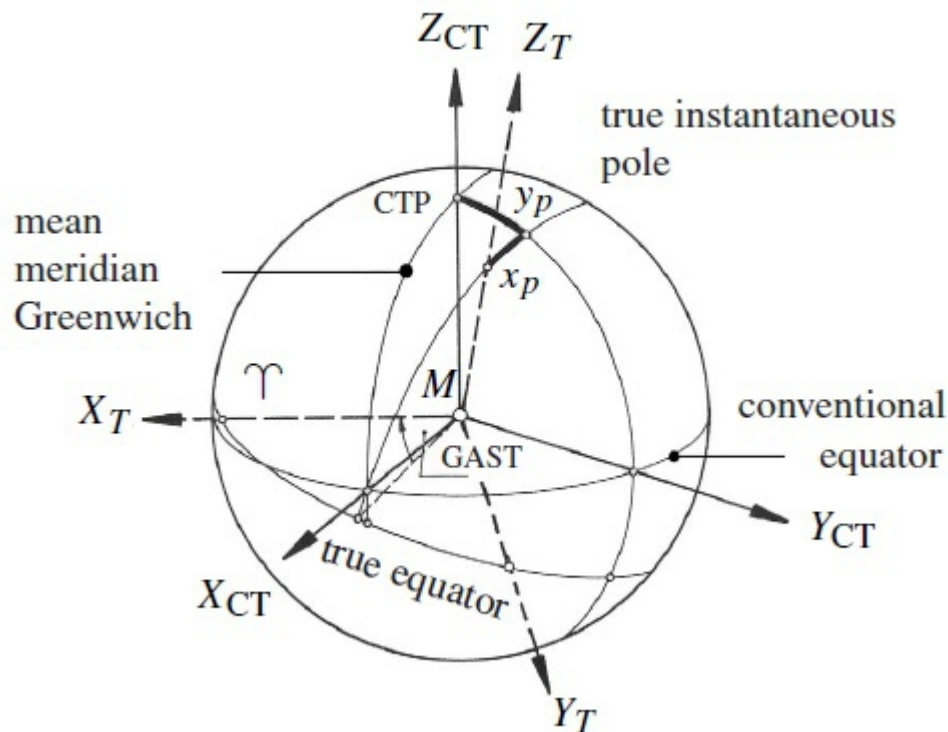
Σχήμα 2: Γραφική Απεικόνιση της Μετάπτωσης και της Κλόνισης στον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής της Γης. (Πηγή: Seeber, 2003)

Η επίδραση της μετάπτωσης και της κλόνισης κάθε χρονική στιγμή περιγράφονται με μεγάλη ακρίβεια με χρήση θεωρητικών μοντέλων θεσπισμένων από τις συμβάσεις της IERS³.

Λαμβάνοντας υπόψη την διόρθωση μόνο για την μετάπτωση προκύπτουν το ο μέσος ισημερινός και το μέσο ισημερινό σημείο, ενώ εάν ληφθεί υπόψη και η διόρθωση για την κλόνιση προκύπτει

3 Πηγή: <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/earthor/EOP.html> (IERS)

το αληθές ισημερινό σημείο που είναι η τομή του αληθούς ισημερινού με την ελλειπτική. Κατά συνέπεια διακρίνονται και ο μέσος (*mean*) και ο αληθής (*true*) αστρικός χρόνος, ανάλογα με το ισημερινό σημείο αναφοράς.



Σχήμα 3: Αληθές Στιγμιαίο (X_{CT}, Y_{CT}, Z_{CT}) και Μέσο Συμβατικό (X_T, Y_T, Z_T) Γήινο Σύστημα Αναφοράς, όπου x_p και y_p οι διορθωμένες συντεταγμένες για την κίνηση του πόλου και GAST ο φαινόμενος (ή αληθής) αστρικός χρόνος Greenwich.

- Στην Κίνηση του Πόλου (*Polar Motion*), η οποία αφορά την κίνηση του άξονα περιστροφής της Γης σε σχέση με το γήινο φλοιό. Συγκεκριμένα, είναι η κίνηση του αληθούς ουράνιου Πόλου (στιγμιαίου άξονα περιστροφής της Γης, διορθωμένου από τη μετάπτωση και την κλόνιση) ως προς ένα σημείο αναφοράς στο φλοιό της και η οποία οφείλεται στις επιδράσεις των δυνάμεων που ασκούνται από τη Σελήνη και τον Ήλιο και γεωφυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα, στους ωκεανούς και στο εσωτερικό της Γης. Η κίνηση του πόλου αναλύεται σε δύο συνιστώσες (x_p , y_p) όπως απεικονίζονται και στο σχήμα (3) και προκύπτουν από μετρήσεις αποστάσεων laser σε τεχνικούς δορυφόρους και τη Σελήνη καθώς και από παρατηρήσεις VLBI, που πραγματοποιούνται από την IERS.

Όσον αφορά τις μεταβολές της ταχύτητας της Γης, αυτές περιγράφονται από το Μήκος της Ημέρας (*Length Of Day*) που ορίζεται ως η διάρκεια μίας ηλιακής ημέρας στην κλίμακα του ατομικού χρόνου (Κορακίτης, 2008). Το μέγεθος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της γωνιακής ταχύτητας στα δελτία της IERS είναι η αλγεβρική διαφορά ανάμεσα στους χρόνους UT1 και UTC.

2.2.3 Συστήματα Χρόνου

Η υλοποίηση ενός συμβατικού πλαισίου αναφοράς για την διάσταση του χρόνου, το οποίο θα ονομάζεται κλίμακα χρόνου (*time scale*), απαιτεί την ίδια διαδικασία όπως η υλοποίηση ενός συστήματος αναφοράς για τον χώρο: επιλογή ιδεατού συστήματος, ορισμό και υλοποίηση (Κορακίτης, 2008)

Για την δορυφορική γεωδαισία, τρία διακριτά συστήματα χρόνου είναι ιδιαίτερα σημαντικά:

- Ο αστρικός χρόνος: Ο χρονικά εξαρτώμενος προσανατολισμός της Γης αναφορικά με τον αδρανειακό χώρο είναι απαραίτητος προκειμένου να συσχετιστούν οι παρατηρήσεις που αναφέρονται σε ένα γήινο σύστημα αναφοράς με ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Η κατάλληλη χρονική κλίμακα συνδέεται με την ημερήσια περιστροφή της Γης και καλείται Αστρικός Χρόνος (*Sidereal Time*) ή Παγκόσμιος χρόνος (*Universal Time*).
- Ο χρόνος εφημερίδων: Για την περιγραφή της κίνησης ενός ουράνιου σώματος είναι απαραίτητη μία αυστηρά ομοιόμορφη (*uniform*) μέτρηση του χρόνου, η οποία να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ανεξάρτητη μεταβλητή στις εξισώσεις κίνησης του σώματος. Μία κατάλληλη χρονική κλίμακα μπορεί να προκύψει από την τροχιακή κίνηση των ουράνιων σωμάτων γύρω από τον Ήλιο. Καλείται Χρόνος Εφημερίδων (*Ephemeris Time*), Δυναμικός Χρόνος (*Dynamical Time*), ή Γήινος Χρόνος (*Terrestrial Time*).
- Ατομικός Χρόνος. Η ακριβής μέτρηση του χρόνου ταξιδιού του σήματος απαιτεί μία ομοιόμορφη και εύκολα προσβάσιμη χρονική κλίμακα υψηλής ανάλυσης. Η κατάλληλη μέτρηση σχετίζεται με φαινόμενα της πυρηνικής φυσικής και ονομάζεται Ατομικός Χρόνος (*Atomic Time*).

Παρακάτω εξετάζονται εν συντομία κάθε μία χρονική κλίμακα ξεχωριστά:

Αστρικός Χρόνος

Με βάση την περιστροφή της Γης ορίζονται δύο ισοδύναμα συστήματα μέτρησης του χρόνου: ο αστρικός χρόνος (*sidereal time*) και ο παγκόσμιος χρόνος (*universal time*), που είναι ουσιαστικά ηλιακός χρόνος (Δερμάνης, 1999)

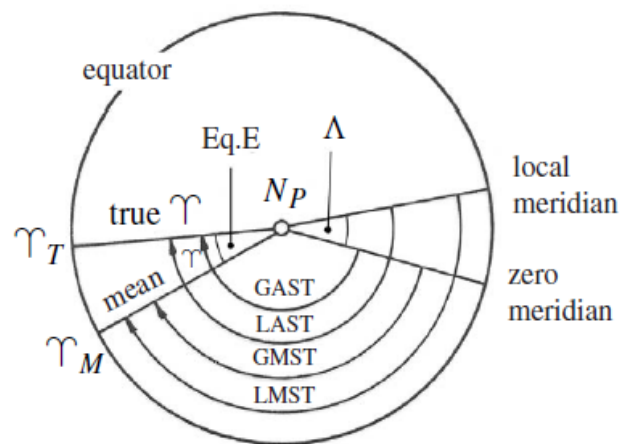
Ο αστρικός χρόνος είναι μια άμεση μέτρηση της ημερήσιας περιστροφής της Γης. Ίσες γωνίες στροφής ισοδυναμούν με ίσα διαστήματα αστρικού χρόνου, έτσι ώστε ο Αστρικός Χρόνος να αντανakλά την πραγματική περιστροφή της Γης και να μπορεί να προσδιοριστεί από παρατηρήσεις ουράνιων σωμάτων (Κορακίτης, 2008)

Ο τοπικός αστρικός χρόνος θ_0 (*Local Sidereal Time- LST*) ορίζεται από το ισημερινό σημείο Υ και τον αστρονομικό μεσημβρινό του τόπου. Κάθε στιγμή η αριθμητική του τιμή είναι ίση με την ωριαία γωνία του σημείου Υ . Όταν η γωνία του Υ αναφέρεται στον μεσημβρινό του Greenwich, ο χρόνος που προκύπτει λέγεται αστρικός χρόνος Greenwich (*Greenwich Sidereal Time- GST*).

Ανάλογα με το κατά πόσο λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της μετάπτωσης στον προσδιορισμό του

εαρινού ισημερινού σημείου που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του αστρικού χρόνου, διακρίνουμε τον Μέσο αστρικό χρόνο (*Mean Sidereal Time*- Διορθωμένο από την επίδραση της μετάπτωσης) και τον φαινόμενο αστρικό χρόνο (*Apparent Sidereal Time*- χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της μετάπτωσης).

Βασική μονάδα μέτρησης του αστρικού χρόνου είναι η μέση αστρική ημέρα (*mean sidereal day*) που είναι το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να αυξηθεί η τιμή του μέσου αστρικού χρόνου Greenwich κατά 24 h. Η μέση αστρική ημέρα είναι περίπου 8 msec μικρότερη από την διάρκεια μίας πλήρους περιστροφής της Γης ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς εξαιτίας της κίνησης του Υ στον Ισημερινό λόγω μετάπτωσης.



Σχήμα 4: Γραφική απεικόνιση του ορισμού του Τοπικού Φαινόμενου και Μέσου Αστρικού Χρόνου (LAST και LMST αντίστοιχα) και του Φαινόμενου και Μέσου Αστρικού Χρόνου Greenwich (GAST και GMST αντίστοιχα). (πηγή: Seeber, 2003)

Παγκόσμιος Χρόνος

Για πρακτικούς σκοπούς απαιτείται μία κλίμακα χρόνου η οποία να αντιστοιχεί στην ημερήσια κίνηση του Ήλιου. Η ωριαία γωνία του Ήλιου παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του χρόνου, που οφείλονται τόσο στην μεταβαλλόμενη απόκλιση (*declination*) του Ήλιου όσο και στην ελλειπτική περιστροφή της Γης και επομένως δεν ενδείκνυται για τον ορισμό μίας ομοιόμορφης κλίμακας χρόνου. Για το λόγο αυτό αντικαθίσταται από ένα πλασματικό μέσο Ήλιο ο οποίος κινείται με σταθερή ταχύτητα στο επίπεδο του Ισημερινού. Έτσι, ορίζεται η μέση ηλιακή ημέρα ως το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών διαβάσεων του πλασματικού μέσου Ήλιου από τον μεσημβρινό του σημείου. Η ωριαία γωνία του μέσου Ήλιου που αντιστοιχεί στον μεσημβρινό του Greenwich ονομάζεται Παγκόσμιος Χρόνος (*Universal Time- UT*). Για πρακτικούς σκοπούς η μέρα ξεκινά τα μεσάνυχτα και ως εκ τούτου ισχύει ότι ο UT ισούται με την ωριαία γωνία του μέσου Ήλιου που αντιστοιχεί στον μεσημβρινό του Greenwich συν δώδεκα ώρες.

Τόσο ο Παγκόσμιος όσο και ο αστρικός χρόνος βασίζονται στην περιστροφή της Γης. Η διαφορά στην διάρκεια της ημέρας μεταξύ των δύο χρόνων προσεγγίζει τα 4 λεπτά και οφείλεται στην παράλληλη κίνηση της Γης στην τροχιά της γύρω από τον Ήλιο κατά περίπου 1° ημερησίως.

Ο παγκόσμιος χρόνος ανάλογα με το εάν έχει διορθωθεί για την κίνηση του πόλου διαχωρίζεται σε UT0 και UT1 για τους οποίους ισχύει:

$$UT1 = UT0 + \Delta A_p, \quad (4)$$

Όπου το ΔA_p είναι η διαφορά που προκύπτει στο αστρονομικό μήκος και συνεπώς στον προσδιορισμό του χρόνου και που οφείλεται στην κίνηση του πόλου.

Η σχέση που συνδέει τον UT1 με τον GMST είναι η παρακάτω:

$$GMST = ERA(UT1) + 0.014506'' + 4612.156534''t + 1.3915817''t^2 + 0.00000044''t^3 + 0.000029956''t^4 + 0:0000000368''t^5, \quad (5)$$

όπου ERA είναι η γωνία περιστροφής της Γης (*Earth Rotation Angle*), η οποία είναι συνάρτηση του χρόνου UT1 και $t = (TT - 2000 \text{ January } 1d \text{ } 12h \text{ TT})$ σε days/36525. Επομένως, ο πρώτος όρος ERA(UT1) αφορά στην περιστροφή της Γης και το πολυώνυμο που ακολουθεί στον προσανατολισμό της (κυρίως στην επίδραση της κλόνισης και της μετάπτωσης στον ανιόντα δεσμό) (Petit & Luzum, 2010).

Ιουλιανή Ημερομηνία

Η Ιουλιανή Ημερομηνία (*Julian Date- JD*) ορίζεται ως ο αύξων αριθμός των ημερών που έχουν περάσει από το μεσημέρι της 1ης Ιανουαρίου του 4713 π.Χ. και χρησιμοποιείται λόγω της ευκολίας που παρέχει στους υπολογισμούς ένα σύστημα συνεχούς αρίθμησης των ημερών. Προκειμένου να αποφύγουμε τη χρήση πολύ μεγάλων αριθμών χρησιμοποιούμε ακόμη την τροποποιημένη Ιουλιανή ημερομηνία (*Modified Julian Date- MJD*) η οποία ισούται με:

$$MJD = JD - 2400000.5 \text{ days} \quad (6)$$

Ατομικός Χρόνος

Ο Διεθνής Ατομικός Χρόνος (*Temps Atomique International, TAI*) δημιουργήθηκε για να καλύψει την ανάγκη για μία εύκολα προσβάσιμη και αυστηρά ομοιόμορφη κλίμακα χρόνου. Όταν επιβεβαιώθηκε η μη ομαλή περιστροφή της Γης προέκυψε η ανάγκη ορισμού κλιμάκων χρόνου που να είναι ανεξάρτητες από την περιστροφή της Γης και να έχουν σταθερό μέτρο. Το δευτερόλεπτο του TAI επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να προσεγγίζει κατά το δυνατό την διάρκεια του δευτερολέπτου του χρόνου εφημερίδων και ορίζεται ως ακολούθως: “Το δευτερόλεπτο ορίζεται ως η διάρκεια 9192631770 περιόδων της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί μεταξύ των επιπέδων υπέρλεπτης υφής της

βασικής στάθμης του ατόμου του καισίου 133” (Κορακίτης, 2008), ορισμός του δευτερολέπτου στο SI (*International System of Units*) που υιοθετήθηκε και από τη 13η συνδιάσκεψη της Παγκόσμιας Επιτροπής Μέτρων και Σταθμών (*International Committee of Weights and Meters*) στο Παρίσι το 1967.

Στην πράξη ο ατομικός χρόνος υλοποιείται από τις αναγνώσεις πολλών ατομικών χρονομέτρων κατανεμημένων σε όλη τη Γη. Οι αναγνώσεις αναφέρονται σε ακίνητα χρονόμετρα (σε ηρεμία) και στη μέση στάθμη της θάλασσας. Ο TAI υπολογίζεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των αναγνώσεων μεμονωμένων χρονομέτρων (περίπου 250 το 2002). Δηλαδή πρόκειται για μία στατιστικά διαμορφωμένη κλίμακα χρόνου (συντονισμένη κλίμακα χρόνου) που προορίζεται για παγκόσμια χρήση.

Η εποχή του TAI ορίστηκε έτσι ώστε να συμφωνεί με την εποχή του UT1 ($UT1-TAI=0$) την 1 Ιανουαρίου του 1958. Από τότε, λόγω της επιβράδυνσης που παρατηρείται στην περιστροφή της Γης η διαφορά μεταξύ των κλιμάκων χρόνου ($TAI-UT1$) αυξάνεται συνεχώς. Από 6.1 sec την 1η Ιανουαρίου του 1968 είχε φτάσει τα 32.3 sec την 1η Ιανουαρίου 2003, ενώ τον Απρίλιο του 2013 έχει ξεπεράσει τα 35 sec. Η σχετικά μεγάλη αυτή διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι το μέτρο του δευτερολέπτου του SI υιοθετήθηκε βασισμένο στο δευτερόλεπτο των εφημερίδων (*ephemeris second*) το οποίο είχε προκύψει από μετρήσεις της διάρκειας της μέσης ηλιακής ημέρας την εποχή 1756 και 1895, όταν η περιστροφή της Γης ήταν ταχύτερη απ' ό,τι σήμερα.

Παγκόσμιος Συντονισμένος Χρόνος (*Universal Time Coordinated*)

Λόγω της ανάγκης ύπαρξης μίας κλίμακας χρόνου η οποία να παρέχει ταυτόχρονα μία αυστηρά ομοιόμορφη μονάδα χρόνου αλλά και την καλύτερη δυνατή προσαρμογή στον χρόνο UT1 (στην περιστροφή της Γης) εισήχθη το 1972 ο Παγκόσμιος Συντονισμένος Χρόνος. Ο UTC διαφέρει από τον TAI κατά έναν ακέραιο αριθμό δευτερολέπτων:

$$UTC = TAI - n \cdot (1 \text{ sec}) , \quad (7)$$

Κατά τέτοιο τρόπο ώστε η απόλυτη διαφορά του από τον UT1 να μην ξεπερνά τα 0.9 sec

$$|DUT1| = |UT1 - UTC| \leq 0.9 \text{ sec} \quad (8)$$

Έτσι η εποχή του UTC προσαρμόζεται στον UT1 εισάγοντας ή αφαιρώντας εμβόλιμα δευτερόλεπτα (*leap seconds*), ενώ η εναπομείνασα διαφορά DUT1 διανέμεται μέσω δελτίων (*bulletins*) της Διεθνούς Υπηρεσίας Περιστροφής της Γης και Συστημάτων Αναφοράς (IERS- *International Earth Rotation and Reference Systems Service*) και πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν σε όλους τους υπολογισμούς που σχετίζονται με Γήινα Συστήματα Αναφοράς (*Earth-Fixed Systems*).

Σύμφωνα με το Bulletin C 45 της IERS από την 1η Ιουλίου του 2012 0h UTC η ακέραια διαφορά $UTC - TAI = -35 \text{ sec}$, ενώ σύμφωνα με το Bulletin D 115 από τις 11 Απριλίου 2013 0 UTC η τιμή του DUT1 που θα χρησιμοποιείται είναι $DUT1 = +0.1 \text{ sec}$.

Χρόνος GPS

Το σύστημα GPS χρησιμοποιεί τη δική του καθορισμένη κλίμακα χρόνου, το χρόνο GPS (*GPS time*), η οποία χρησιμοποιεί ως μονάδα μέτρησης το δευτερόλεπτο του SI και απέχει από τον UTC σχεδόν έναν ακέραιο αριθμό δευτερολέπτων. Οι δύο κλίμακες χρόνου είχαν πανομοιότυπες εποχές αναφοράς στις 5 Ιανουαρίου του 1980. Καθότι στη χρονική κλίμακα GPS δεν χρησιμοποιούνται εμβόλιμα δευτερόλεπτα, η διαφορά του χρόνου GPS από τον UTC αυξάνεται συνεχώς. Ο χρόνος GPS προκύπτει από τα ατομικά ρολόγια που αποτελούν το σύστημα GPS, είναι δηλαδή ένας ανεξάρτητος ατομικός χρόνος και μπορεί να έχει μικρές αποκλίσεις σε σχέση με τον χρόνο TAI.

Η σχέση μεταξύ του χρόνου GPS και του UTC είναι διαθέσιμη τόσο σε δελτία της USNO (*United States Naval Observatory*) και του BIMP (*Bureau International des Poids et Mesures*) όσο και από το μήνυμα πλοήγησης του GPS.

Από την 1η Ιουλίου 2012 0h UTC η διαφορά UTC -GPS time δίνεται από τη σχέση:

$$[UTC - GPS\ time] = -16\ sec + C_o^4, \quad (9)$$

Όπου η διόρθωση C_o είναι της τάξης των μερικών nanoseconds και ανανεώνεται κάθε ημέρα στις 0h UTC. Επομένως η λήψη του σήματος GPS παρέχει πρόσβαση σε πραγματικό χρόνο στις κλίμακες TAI και UTC με αβεβαιότητα μικρότερη από 1 nanosecond (Seeber, 2003; BIMP, 2005).

Χρόνος Εφημερίδων, Δυναμικός Χρόνος, Γήινος Χρόνος

Μία αυστηρά ομοιόμορφη κλίμακα χρόνου μπορεί να εντοπιστεί στις ανεξάρτητες μεταβλητές των θεωριών της δυναμικής και των Εφημερίδων, δηλαδή τις χρονικά εξαρτημένες θέσεις των ουρανίων σωμάτων εκφρασμένες στα κατάλληλα πλαίσια αναφοράς. Χρονικές Κλίμακες που βασίζονται σε τέτοιες λογικές ικανοποιούν στο έπακρο την εννοιολογική ιδέα του Αδρανειακού Χρόνου (Seeber, 2003).

Η πρώτη υλοποιημένη κλίμακα δυναμικού χρόνου ήταν ο Χρόνος Εφημερίδων (*Ephemeris Time*), μία θεωρητικά ομοιόμορφη κλίμακα χρόνου για χρήση στην αστρονομία, που εισήγαγε η IAU (*International Astronomical Union*) το 1952. Ο χρόνος ET ορίζεται από την υιοθέτηση μίας εφημερίδας του Ήλιου στο συμβατικό σύστημα αναφοράς που ορίζεται από την εκλειπτική και το μέσο εαρινό ισημερινό σημείο (Κορακίτης, 2008)

Το 1977 η IAU υιοθέτησε τις αποκαλούμενες δυναμικές κλίμακες χρόνου με στόχο να ικανοποιηθούν οι αυξανόμενες απαιτήσεις για μια σχετικιστική διατύπωση των τροχιακών κινήσεων. Ο Βαρυκεντρικός Δυναμικός Χρόνος (*Barycentric Dynamical Time- BDT*) ορίστηκε ως η χρονική ανεξάρτητη μεταβλητή (*time-like argument*) για το βαρύκεντρο του ηλιακού συστήματος, ενώ ο Γήινος Δυναμικός Χρόνος (*Terrestrial Dynamical Time, TDT*) αναφερόταν στις γεωκεντρικές εφημερίδες.

4 Πηγή: BIMP Annual Report on Time Activities

Στα πλαίσια της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας, ένα χρονόμετρο που κινείται μαζί με τη Γη εμφανίζει περιοδικές μεταβολές μέχρι και 1.6 msec που προκαλούνται από την ετήσια κίνηση του στο βαρυτικό πεδίο του Ήλιου. Εντούτοις, η επίδραση αυτή δεν πρέπει να υπολογίζεται για τις τροχιές των δορυφόρων κοντά στη Γη, καθώς οι δορυφόροι ακολουθούν τη Γη στην κίνηση της γύρω από τον Ήλιο.

Ο δυναμικός χρόνος χρησιμοποιείται ως ανεξάρτητη μεταβλητή στις αστρονομικές εφημερίδες από το 1984. Ως θεμελιώδης μονάδα μέτρησης στην κλίμακα TDT εισήχθη το δευτερόλεπτο SI. Αντιστοιχεί στο χρόνο που θα μετρούσε ένα ατομικό ρολόι τοποθετημένο στο περιστρεφόμενο γεωειδές. Για λόγους συνέχειας τέθηκε ίσος με τον ET την 1η Ιανουαρίου του 1984. Αυτός είναι και ο λόγος που υπάρχει μία σταθερή διαφορά 32.184 sec μεταξύ TAI και TDT. Το 1991 ο χρόνος TDT επαναπροσδιορίστηκε και μετονομάστηκε σε Επίγειο Χρόνο (*Terrestrial Time*) (Φωτίου & Πικρίδας, 2008).

Για τις τροχιές των τεχνητών δορυφόρων στο γήινο πεδίο βαρύτητας χρησιμοποιείται το γεωκεντρικό αδρανειακό σύστημα αναφοράς, όπου ο χρόνος ορίζεται ως προς μία σταθερή κλίμακα η οποία εξ ορισμού έχει την ίδια μεταβολή με τον ατομικό χρόνο. Έτσι στις αντίστοιχες εξισώσεις κίνησης, ορίζεται ο επίγειος χρόνος TT (με μονάδα μέτρησης το δευτερόλεπτο του SI).

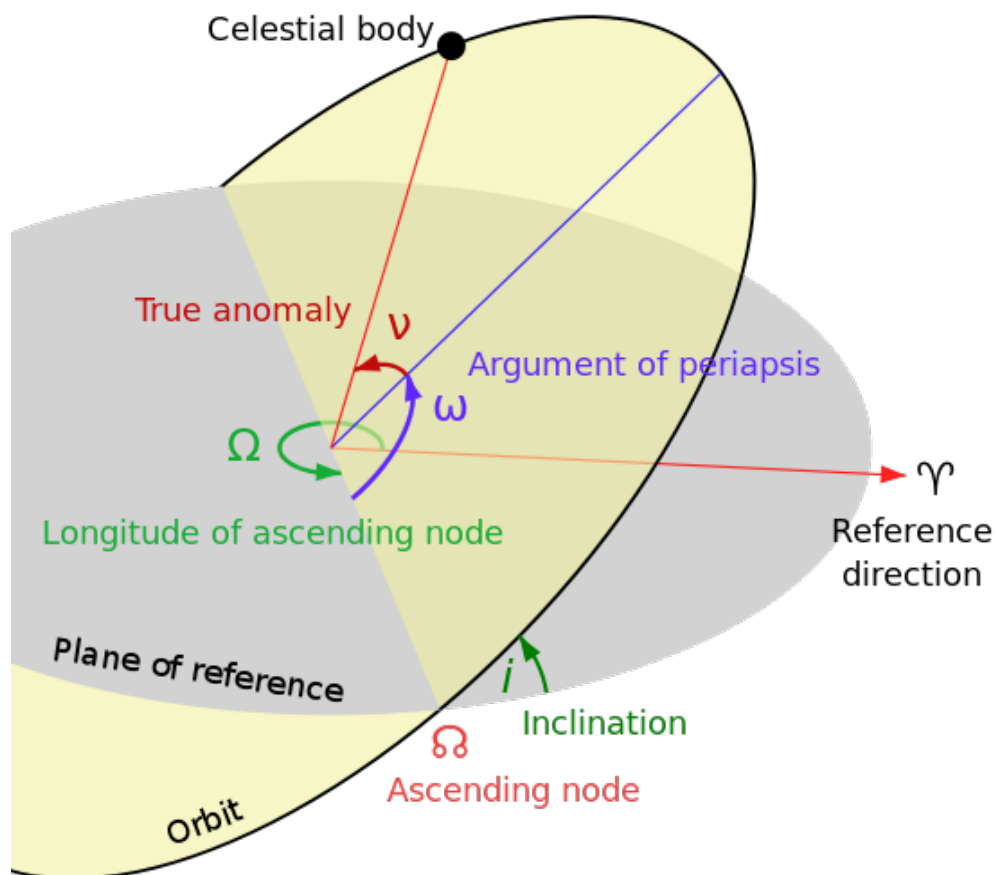
Η σύντομη εισαγωγή στα συστήματα χρόνου, καθώς και στις κινήσεις του άξονα περιστροφής της Γης κρίθηκε σκόπιμη καθώς οι έννοιες αυτές διέπουν την διαδικασία μετατροπής των ουρανογραφικών συντεταγμένων σε γήινες και το αντίστροφο. Το STK παρέχει αυτή την δυνατότητα σχεδόν αυτόματα, χρησιμοποιώντας για την μετατροπή μεταξύ του ICRF και του γήινου πλαισίου αναφοράς τα μοντέλα μετάπτωσης και κλόνισης, και τη γωνία περιστροφής της Γης που καθιερώθηκαν με τις συμβάσεις της IERS του 2003 και αναγράφονται στο υπόμνημα 32 (*technical note No 32*) της IERS. Επίσης, για λόγους συμβατότητας δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να χρησιμοποιήσει το μοντέλο J2000 ή και άλλα παρεμφερή μοντέλα τα οποία βασίζονται στην θεωρία του παλαιότερου συστήματος FK5 (*FK5 IAU76 theory*)⁵. Επίσης οι βασικές αυτές θεωρητικές έννοιες είναι απαραίτητες προκειμένου να κατανοήσει κανείς τον τρόπο λειτουργίας των αναπαραγωγέων τροχιάς και το περιεχόμενο των αρχείων εισόδου που χρησιμοποιούνται προκειμένου να δημιουργηθεί μία δορυφορική εφημερίδα στο STK. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το STK παρέχει την δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει την χρονική πληροφορία σε ένα σενάριο εκφρασμένη σε οποιοδήποτε σύστημα χρόνου επιθυμεί, ενώ παρέχει την δυνατότητα εύκολης μετατροπής μεταξύ διαφορετικών συστημάτων αναφοράς καθώς και διαφορετικών συστημάτων χρόνου.

5 Περισσότερες πληροφορίες πάνω στα συστήματα αναφοράς που παρέχει το STK μπορεί να βρει ο αναγνώστης στην ιστοσελίδα της AGI: <https://www.stk.com/resources/help/online/stk/source/stk/astrocomps.htm>.

2.3 Τροχιακά ή Κεπλέρια Στοιχεία

Στην περίπτωση που εξετάσουμε την κίνηση ενός δορυφόρου ως προς τη Γη, θεωρώντας πως η Γη είναι μία ομοιογενής σφαίρα και ο δορυφόρος περιγράφεται από μία σημειακή μάζα, καταλήγουμε στο γνωστό από τη Φυσική πρόβλημα των δύο σωμάτων. Σε αυτή την περίπτωση ένας δορυφόρος θα κινείται γύρω από τη Γη σε μία ελλειπτική τροχιά, το επίπεδο της οποίας σχηματίζει σταθερή γωνία με το ισημερινό επίπεδο. Η κίνηση του δορυφόρου θα περιγράφεται από τους Νόμους του Κέπλερ ενώ θα διέπεται επίσης από τους τρεις Νόμους της Κίνησης καθώς και τον Νόμο της Παγκόσμιας Έλξης του Νεύτωνα.

Για να προσδιορίζουμε την ελλειπτική τροχιά ενός δορυφόρου στο χώρο χρειαζόμαστε έξι παραμέτρους: τις γωνίες (Ω , i) για να ορισθεί η θέση του επιπέδου της τροχιάς, τη γωνία (ω) για να οριστεί η θέση του μεγάλου ημιάξονα στο επίπεδο αυτό, τις παραμέτρους (a, e) για να προσδιοριστεί το σχήμα της έλλειψης και μία από τις γωνίες (ν ή E ή M) για να προσδιοριστεί η θέση του δορυφόρου πάνω στην ελλειπτική τροχιά. Οι έξι αυτές παράμετροι, που ονομάζονται Τροχιακά ή Κεπλέρια Στοιχεία, εμφανίζονται στο Σχήμα 5 και παρουσιάζονται στην συνέχεια πιο αναλυτικά.



Σχήμα 5: Τροχιακά ή Κεπλέρια Στοιχεία (Πηγή: Wikipedia)

Εκκεντρότητα και Μεγάλος ημιάξονας της Έλλειψης:

Από την λύση της εξίσωσης κίνησης του προβλήματος των δύο σωμάτων προκύπτουν τροχιές που περιγράφονται από κωνικές τομές. Η κωνική τομή που ακολουθεί ένα αντικείμενο (π.χ. ένας δορυφόρος) κινούμενο γύρω από ένα κεντρικό σώμα (π.χ. τη Γη) εξαρτάται από την ταχύτητά του και το μέγεθος της ασκούμενης κεντρομόλου δύναμης (βαρυτική δύναμη που ασκείται στον δορυφόρο από την Γη). Εάν το αντικείμενο έχει την απαιτούμενη ταχύτητα (κινητική ενέργεια) προκειμένου να κατανικήσει την γήινη βαρυτική δύναμη τότε θα ακολουθεί μία κλειστή διαδρομή (κύκλο ή έλλειψη). Συνήθως η εκκεντρότητα της έλλειψης για τους περισσότερους δορυφόρους είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα οι τροχιές να είναι σχεδόν κυκλικές. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή η ταχύτητα του είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη που απαιτείται για να διατηρηθεί σε κλειστή τροχιά, το αντικείμενο θα ακολουθήσει μία ανοιχτή διαδρομή (παραβολή, με εκκεντρότητα $e=1$ ή υπερβολή, με εκκεντρότητα $e>1$) και θα διαφύγει του γήινου βαρυτικού πεδίου. Επειδή στις περισσότερες περιπτώσεις οι γεωδαιτικού ενδιαφέροντος δορυφόροι ακολουθούν σε γενικές γραμμές κλειστές διαδρομές παρακάτω θα εξεταστούν μονάχα τα τροχιακά στοιχεία τέτοιων τροχιών, δηλαδή κύκλου ($e=0$) ή έλλειψης ($0<e<1$).

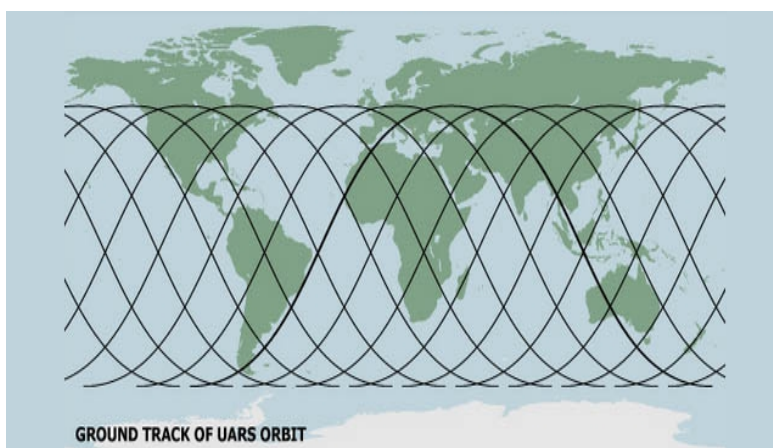
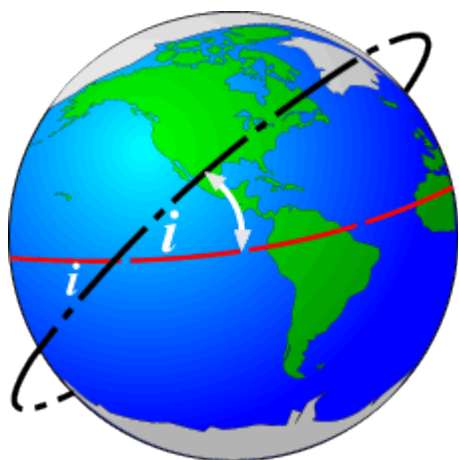
Η εκκεντρότητα και ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης καθορίζουν το σχήμα της τροχιάς του δορυφόρου. Από τα e και a προκύπτει και ο μικρός ημιάξονας της έλλειψης, b , ο οποίος ισούται με $b=\sqrt{(1-e^2)} \cdot a$.

Πέραν του μεγάλου ημιάξονα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν είτε η περίοδος της τροχιάς είτε η μέση ταχύτητα περιστροφής (*mean motion*) του για τον προσδιορισμό του μεγέθους της έλλειψης. Τέλος αντί των e και a θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν είτε οι ακτίνες του περιγείου και του απογείου, είτε τα υψόμετρα τους από την επιφάνεια της Γης προκειμένου να προσδιοριστεί το σχήμα της τροχιάς.

Γωνία Κλίσης

Ως γωνία κλίσης (*inclination angle*) ορίζεται η διέδρη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του ισημερινού επιπέδου και του επιπέδου της τροχιάς του δορυφόρου. Ανάλογα με τις τιμές που παίρνει η γωνία διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

- Για $i=0^\circ$ τα δύο επίπεδα ταυτίζονται και ο δορυφόρος περιστρέφεται κατά την ίδια φορά που περιστρέφεται και η Γη.
- Για $i=180^\circ$ τα δύο επίπεδα ταυτίζονται αλλά ο δορυφόρος περιστρέφεται κατά την αντίστροφη φορά περιστροφής της Γης.
- Για $0^\circ < i < 90^\circ$ η τροχιά ονομάζεται ορθή ή πρόδρομη (*prograde orbit*) και ο δορυφόρος περιστρέφεται με την ίδια φορά που περιστρέφεται η Γη.
- Για $i=90^\circ$ ο δορυφόρος κινείται σε πολική τροχιά (αναφέρεται εκτενέστερα παρακάτω).
- Για $90^\circ < i < 180^\circ$ η τροχιά ονομάζεται ανάδρομη (*retrograde orbit*) και ο δορυφόρος περιστρέφεται με αντίθετη φορά από την φορά περιστροφής της Γης.



Σχήμα 6: Επίδραση της κλίσης του τροχιακού επιπέδου στα όρια κάλυψης του γεωγραφικού πλάτους που δύναται να παράσχει ο δορυφόρος (Πηγές:

http://www.moebiusonline.eu/fuorionda/immagini/orbites_track1.png και <http://www.spacesafetymagazine.com/wp-content/uploads/2011/09/uars-satellite-debris-field1.jpg>)

Η γωνία κλίσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6, καθορίζει και το μέγιστο γεωγραφικό πλάτος από το οποίο θα διέρχεται ο δορυφόρος (και κατά συνέπεια ορίζει και τα όρια της κάλυψης που δύναται να παράσχει ο δορυφόρος με μετρήσεις, ανάλογα πάντα και με το οπτικό του πεδίο (line of sight)).

Ορθή Αναφορά του Ανιόντος Δεσμού

Η γωνία Ω , που σχηματίζει η διεύθυνση του ανιόντος δεσμού με την διεύθυνση του εαρινού ισημερινού σημείου, ονομάζεται ορθή αναφορά του ανιόντος δεσμού ή ορθή αναφορά του συνδέσμου ανάβασης (*Right Ascension of the Ascending Node*).

Ο ανιόν δεσμός ορίζεται ως η τομή του Τροχιακού Επιπέδου με το Ισημερινό επίπεδο από την οποία διέρχεται ο δορυφόρος κινούμενος προς το βόρειο ημισφαίριο. Το αντιδιαμετρικό του σημείο ονομάζεται κατιόντας δεσμός (ή σύνδεσμος κατάβασης- *descending node*).

Η ορθή αναφορά του ανιόντος δεσμού σε συνδυασμό με την κλίση της τροχιάς ορίζουν τη θέση και τον προσανατολισμό του επιπέδου της τροχιάς στο χώρο. Η τιμή της κυμαίνεται από 0° μέχρι 360° και μετράται προς ανατολάς.

Όρισμα του Περιγείου

Ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης που απεικονίζει την τροχιά ονομάζεται γραμμή των αψίδων (*line of apsides*) και τέμνει την τροχιά σε 2 σημεία. Το ένα εξ αυτών είναι το πλησιέστερο σημείο της τροχιάς στη Γη και λέγεται περίγειο (*perigee*) και το άλλο αποτελεί το πιο απομακρυσμένο σημείο της τροχιάς και ονομάζεται απόγειο (*apogee*).

Η γωνία ω , που σχηματίζεται ανάμεσα στην διεύθυνση του περιγείου και την διεύθυνση του συνδέσμου ανάβασης ονομάζεται όρισμα του περιγείου και καθορίζει την θέση του μεγάλου ημιάξονα στο επίπεδο της τροχιάς του δορυφόρου. Η τιμή της κυμαίνεται από 0° έως 360° και

μετράται κατά τη φορά κίνησης του δορυφόρου.

Αληθής (ή Μέση) Ανωμαλία

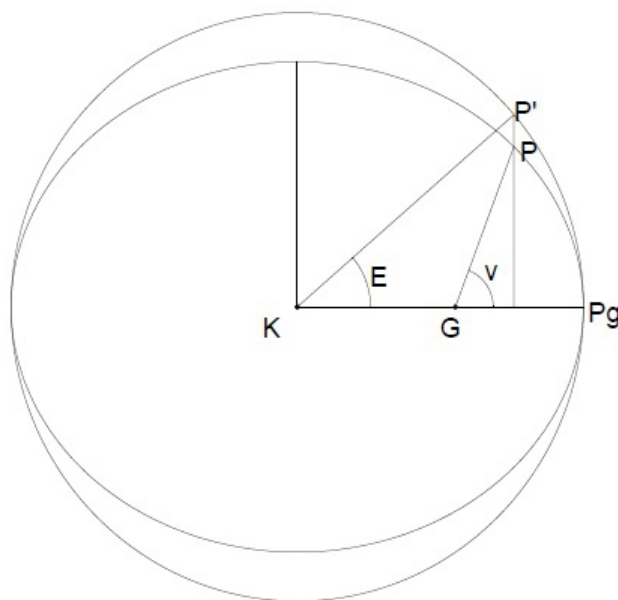
Η γωνία ν που σχηματίζει το διάνυσμα θέσης του δορυφόρου με την διεύθυνση του περιγείου, με αφετηρία τη διεύθυνση του περιγείου, ονομάζεται **αληθής ανωμαλία** (*true anomaly*) και προσδιορίζει την θέση του δορυφόρου πάνω στην ελλειπτική τροχιά σε κάποια χρονική στιγμή. Η τιμή της κυμαίνεται από 0° έως 360° και μετράται κατά τη φορά κίνησης του δορυφόρου.

Εκτός από την αληθή ανωμαλία ν , συχνότερα χρησιμοποιείται η **μέση ανωμαλία M** (*mean anomaly*) για τον προσδιορισμό της θέσης του δορυφόρου στην τροχιά του. Τυπικά η συγκεκριμένη γωνιακή παράμετρος δεν αναφέρεται στο πραγματικό σώμα, αλλά σε ένα ιδεατό σώμα που περιφέρεται με σταθερή γραμμική ταχύτητα πάνω στην τροχιά του. Η μέση ανωμαλία προκύπτει από την σχέση:

$$M = n \cdot (t - t_0), \text{ όπου } n = \frac{2\pi}{T} \text{ είναι η μέση κυκλική κίνηση του δορυφόρου και η διαφορά } (t - t_0)$$

εκφράζει το χρονικό διάστημα που έχει παρέλθει από την τελευταία διέλευση του δορυφόρου από το περίγειο (την χρονική στιγμή t_0). Η μέση ανωμαλία αυξάνεται *ομοιόμορφα* από 0 ως 360° κατά τη διάρκεια κάθε τροχιάς.

Για τον προσδιορισμό της θέσης του δορυφόρου στην τροχιά μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και η **έκκεντρη ανωμαλία** (*eccentric anomaly*) που προκύπτει ως εξής: Από τη θέση του δορυφόρου στην τροχιά του, P , φέρουμε την κάθετη στον μεγάλο ημιάξονα της έλλειψης και την προεκτείνουμε μέχρι να τμήση τον βοηθητικό κύκλο της έλλειψης στο σημείο P' . Η γωνία που σχηματίζεται με κορυφή το κέντρο της έλλειψης ανάμεσα στο διάνυσμα του Περιγείου και το διάνυσμα του P' ορίζεται ως η **έκκεντρη ανωμαλία** του δορυφόρου τη δεδομένη χρονική στιγμή. Στο Σχήμα 7 απεικονίζονται η **έκκεντρη** και η **αληθής ανωμαλία**, όπου K είναι το κέντρο της έλλειψης, G είναι το Γεώκεντρο και P_g το περίγειο της τροχιάς.



Σχήμα 7: Αληθής και Έκκεντρη Ανωμαλία

Η μέση ανωμαλία συσχετίζεται με την έκκεντρη ανωμαλία μέσω της σχέσης:

$$M = E - e \cdot \sin E , \quad (10)$$

η οποία καλείται και Εξίσωση του Κέπλερ (*Kepler's Equation*). Η έκκεντρη ανωμαλία σχετίζεται με την αληθή ανωμαλία μέσω της σχέσης:

$$\tan v = \frac{\sqrt{1-e^2} \sin E}{\cos E - e} , \quad (11)$$

Και οι τρεις ανωμαλίες E , M , v μηδενίζονται την χρονική στιγμή που ο δορυφόρος διέρχεται από το περίγειο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε από τις τρεις για τον προσδιορισμό της θέσης του δορυφόρου στην τροχιά του. Στη δορυφορική γεωδαισία συνηθίζεται να χρησιμοποιείται η μέση ανωμαλία, M , καθώς μπορεί να παρεμβάλλεται γραμμικά με τον χρόνο.

2.3.1 Διαταραχές στις τροχιές των δορυφόρων

Στην πραγματικότητα, τόσο η θέση όσο και ο προσανατολισμός του τροχιακού επιπέδου ενός δορυφόρου δεν παραμένουν σταθερά ως προς το χρόνο λόγω πολλών παραγόντων. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν ακόμα και τη μορφή της περίπου ελλειπτικής τροχιάς, με τελικό αποτέλεσμα η πραγματική τροχιά να διαφέρει αισθητά από την τέλεια έλλειψη που θα ήταν σύμφωνα με τους νόμους του Κέπλερ. Με άλλα λόγια, η πραγματική τροχιά του δορυφόρου θα διαφέρει από την κεπλέρια τροχιά που περιγράφει την κίνηση ενός δορυφόρου στην ιδεατή περίπτωση που

περιγράφεται από το πρόβλημα των δύο σωμάτων.

Ο κύριος παράγοντας στον οποίο οφείλεται η εν λόγω αλλαγή των τροχιακών χαρακτηριστικών είναι το ανομοιόμορφο γήινο πεδίο βαρύτητας, ή ακριβέστερα το γήινο πεδίο έλξης δεδομένου ότι οι δορυφόροι δεν συμμετέχουν στην ημερήσια περιστροφή της Γης και κατά συνέπεια δεν υφίστανται την επίδραση της φυγόκεντρης δύναμης που συνεπάγεται αυτή η περιστροφή. Συνεπώς, μία από τις βασικότερες επιδράσεις στην τροχιά οφείλεται στο γεγονός ότι η Γη δεν είναι ούτε μία τέλεια σφαίρα, ούτε έχει ομοιόμορφα κατανεμημένη μάζα στο εσωτερικό της και επομένως η κίνηση του δορυφόρου επηρεάζεται από το γήινο ελκτικό δυναμικό, το οποίο περιγράφεται από τη σχέση (Δεληκαράογλου, 2010):

$$\begin{aligned} V(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{l=1}^{\infty} \left(\frac{a_e}{r} \right)^l \sum_{m=0}^l (C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda) P_{lm}(\cos \theta) \right] \\ &= \frac{GM}{r} \left[1 - \sum_{l=1}^{\infty} \left(\frac{a_e}{r} \right)^l \sum_{m=0}^l (J_{lm} \cos m\lambda + K_{lm} \sin m\lambda) P_{lm}(\cos \theta) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

ή όταν χρησιμοποιούνται κανονικοποιημένοι συντελεστές:

$$\begin{aligned} V(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{l=1}^{\infty} \left(\frac{a_e}{r} \right)^l \sum_{m=0}^l (\overline{C}_{lm} \cos m\lambda + \overline{S}_{lm} \sin m\lambda) \overline{P}_{lm}(\cos \theta) \right] \\ &= \frac{GM}{r} \left[1 - \sum_{l=1}^{\infty} \left(\frac{a_e}{r} \right)^l \sum_{m=0}^l (\overline{J}_{lm} \cos m\lambda + \overline{K}_{lm} \sin m\lambda) \overline{P}_{lm}(\cos \theta) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

όπου (r, θ, λ) είναι οι σφαιρικές συντεταγμένες του σημείου, $V(r, \theta, \lambda)$ το γήινο ελκτικό δυναμικό στο συγκεκριμένο σημείο, a_e η ακτίνα της Γης, C_{lm} και S_{lm} οι λεγόμενοι συντελεστές του Stokes βαθμού l και τάξης m , και P_{lm} το πολυώνυμο Legendre αντίστοιχου βαθμού και τάξης.

Από τους συντελεστές C_{lm} και S_{lm} των σφαιρικών αρμονικών, σημαντικότερος είναι ο συντελεστής C_{20} ($C_{20} = -0.0010827$), ο οποίος αντιστοιχεί στην επίδραση του ισημερινού εξογκώματος της Γης και είναι περίπου 400 φορές μεγαλύτερος από τον επόμενο σε μέγεθος συντελεστή (Δερμάνης, 1999).

Εκτός από το πεδίο έλξης της Γης επιδρούν στο δορυφόρο και άλλες δυνάμεις που επομένως και αυτές επηρεάζουν την μορφή της τροχιάς του. Μπορούμε να τις διαχωρίσουμε σε συντηρητικές ελκτικές δυνάμεις και σε μη συντηρητικές.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν η έλξη της Σελήνης, του Ήλιου και των πλανητών που ασκούνται στον δορυφόρο καθώς και οι παλιρροϊκές δυνάμεις που οφείλονται στην παραμόρφωση του στερεού φλοιού και των θαλασσών, λόγω του φαινομένου των παλιρροιών. Κατά τρόπο ανάλογο της επίδρασης του γήινου βαρυτικού πεδίου, οι παρέλξεις της Σελήνης και του Ήλιου επάνω στην τροχιά του δορυφόρου μπορεί να είναι υπολογίσιμες, καθώς επίσης και η επίδραση των κοντινών πλανητών για δορυφορικές τροχιές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια υπολογισμού τους.

Στις μη συντηρητικές δυνάμεις ανήκουν η τριβή της γήινης ατμόσφαιρας, η επίδραση της γήινης ακτινοβολίας (απευθείας ή ανακλώμενη από τη Γη), καθώς και ορισμένες επιπλέον πολύ μικρές επιδράσεις που συνήθως αγνοούνται όπως η τριβή των ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων της πάνω ατμόσφαιρας, η θερμική ακτινοβολία του δορυφόρου, η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση με το γεωμαγνητικό πεδίο κ.α. Για παράδειγμα, η τριβή του δορυφόρου με την ατμόσφαιρα είναι αναπόφευκτο φυσικό φαινόμενο το οποίο αφαιρεί μέρος της κινητικής ενέργειας του με αποτέλεσμα να χάνει σταδιακά ύψος με κίνδυνο, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, να καταστραφεί στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας (την τροπόσφαιρα). Ανάλογα, η ακτινοβολία του Ήλιου, ειδικά για δορυφόρους που έχουν μεγάλη επιφάνεια, όπως οι δορυφόροι GPS, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς των τροχιών (Δεληκαράογλου, 1989).

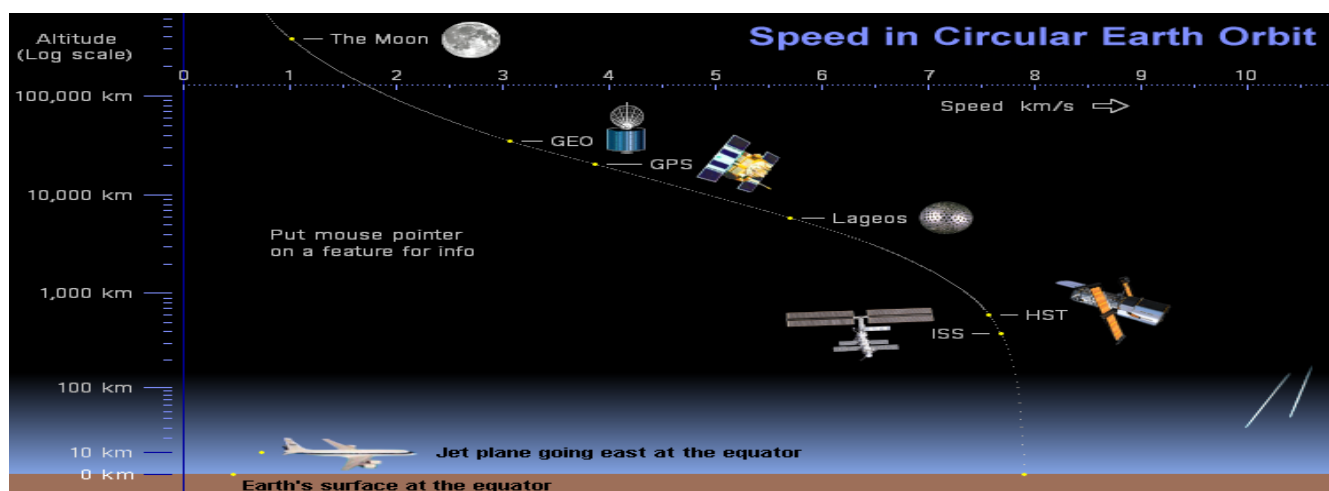
Οι πιο βασικές από τις παραπάνω διαταραχές των τροχιών λαμβάνονται υπόψη στους αναπαραγωγείς τροχιάς που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη τροχιών και δορυφορικών συστημάτων, που παρουσιάζονται στο δεύτερο κεφάλαιο.

2.3.2 Τύποι Τροχιών

Ανάλογα με το ύψος της τροχιάς του δορυφόρου υπάρχουν 3 είδη δορυφορικών τροχιών: οι υψηλές τροχιές (*High Earth Orbit*), οι μέσες τροχιές (*mid Earth Orbit*) και οι χαμηλές τροχιές (*Low Earth Orbit*). Οι περισσότεροι δορυφόροι που χρησιμοποιούνται για την μετεωρολογία ή για τηλεπικοινωνίες τείνουν να έχουν υψηλές τροχιές, όσο το δυνατό μακρύτερα από την επιφάνεια της Γης. Δορυφόροι που προορίζονται για πλοήγηση ή γεωστατικοί δορυφόροι έχουν συνήθως μέσες τροχιές, ενώ οι περισσότεροι επιστημονικοί δορυφόροι συνήθως τοποθετούνται σε χαμηλότερες τροχιές.

Σχέση Ύψους Τροχιάς και Ταχύτητας Περιστροφής

Το ύψος της τροχιάς, ή αλλιώς η απόσταση ανάμεσα στον δορυφόρο και την επιφάνεια της Γης καθορίζουν και την ταχύτητα περιστροφής του δορυφόρου. Η κίνηση ενός δορυφόρου ο οποίος περιστρέφεται γύρω από τη Γη καθορίζεται κυρίως από την βαρύτητα. Καθώς ένας δορυφόρος έρχεται πιο κοντά στη Γη η βαρυτική έλξη γίνεται μεγαλύτερη και επομένως περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Για παράδειγμα, ο δορυφόρος της NASA Aqua, με ύψος τροχιάς 705 km, χρειάζεται περίπου 99 λεπτά για να ολοκληρώσει μία περιστροφή του γύρω από τη Γη, ενώ ένας μετεωρολογικός δορυφόρος με ύψος τροχιάς κοντά στα 36000 km χρειάζεται 23 ώρες και 56 λεπτά για να ολοκληρώσει μία περιστροφή του. Με απόσταση 384403 km από το κέντρο της Γης η σελήνη ολοκληρώνει μία περιστροφή της σε 28 ημέρες.



Σχήμα 8: Χαμηλές, Μέσες και Υψηλές Τροχιές σε σύγκριση με την σεληνιακή τροχιά. Σχέση Ταχύτητας Περιστροφής με το Ύψος Πτήσης για χαμηλές, μέσες και υψηλές τροχιές (Πηγή: <http://www.freemars.org/jeff/speed/speed9.png>)

2.3.2.1 Υψηλές Τροχιές (High Earth Orbits)

Γεωσύγχρονες Δορυφορικές Τροχιές (Geosynchronous Orbits- GSO)

Όταν ένας δορυφόρος φτάσει σε απόσταση 42164^6 km (ύψος πτήσης 35800 km) από το κέντρο της Γης εισέρχεται σε μία ζώνη (*sweet spot*) όπου η ταχύτητα περιστροφής του είναι η ίδια με την ταχύτητα περιστροφής της Γης. Επειδή η ταχύτητα του δορυφόρου είναι η ίδια με την ταχύτητα περιστροφής της γης ο δορυφόρος φαίνεται να μένει σταθερά πάνω από ένα γεωγραφικό μήκος παρότι μπορεί να κινείται στη διεύθυνση Βορρά- Νότου. Αυτός ο τύπος τροχιάς ονομάζεται γεωσύγχρονη τροχιά (*geosynchronous orbit*) και μπορεί να είναι ελλειπτική και να γίνεται σε οποιοδήποτε σημείο πάνω από την επιφάνεια της Γης.

Όταν ένας δορυφόρος κινείται σε κυκλική γεωσύγχρονη τροχιά πάνω από τον ισημερινό (εκκεντρότητα και κλίση ίσες με το 0), σε ύψος 35786 km και με τέτοια ταχύτητα (11040 km/h), η τροχιά του αποτελεί μία ειδική περίπτωση γεωσύγχρονης τροχιάς που αποκαλείται γεωστατική (*geostationary earth orbit- GEO*) επειδή από τη Γη ο δορυφόρος φαίνεται να είναι σταθερός, καθώς βρίσκεται πάντα πάνω από το ίδιο ακριβώς σημείο της επιφάνειας της γης. Αυτού του τύπου η τροχιά επιδεικνύει μεγάλη σταθερότητα (απαιτούνται λίγοι διορθωτικοί ελιγμοί), ενώ απαιτείται ένας μικρός αριθμός δορυφόρων προκειμένου να επιτευχθεί σχεδόν παγκόσμια κάλυψη (σε πλάτη μεταξύ 75° Βόρεια και 75° Νότια). Στα μειονεκτήματα της τροχιάς περιλαμβάνονται τα υψηλά κόστη εκτόξευσης, ο περιορισμένος αριθμός θέσεων (*limited slots*) για την τοποθέτηση σε τροχιά των δορυφόρων και η μη παροχή κάλυψης στις περιοχές μεγάλου γεωγραφικού πλάτους.

Μία ακόμη κατηγορία γεωσύγχρονων τροχιών είναι οι κεκλιμένες γεωσύγχρονες τροχιές (*Inclined Geosynchronous Orbits- IGSO*). Πρόκειται για κυκλικές τροχιές με περίοδο περιστροφής 24 h, που σε

⁶ Ακτίνα 42164 km (Υψος περίπου 36000km) σύμφωνα με τον Riebeek (2009) , 35800 σύμφωνα με τον Seeber (2003).

αντίθεση με τις GEO είναι κεκλιμένες ως προς το ισημερινό επίπεδο. Για έναν παρατηρητή στη Γη ο δορυφόρος κινείται. Το ίχνος τους στο έδαφος (*ground track*) έχει το σχήμα του αριθμού 8 (*Analemma*). Ο συγκεκριμένος τύπος δορυφορικής τροχιάς παρέχει εξαιρετική κάλυψη σε περιοχές κοντά στους πόλους.

Οι γεωσύγχρονοι δορυφόροι είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι για την μετεωρολογία, τις τηλεπικοινωνίες και την παρακολούθηση της ηλιακής δραστηριότητας (*solar activity*).

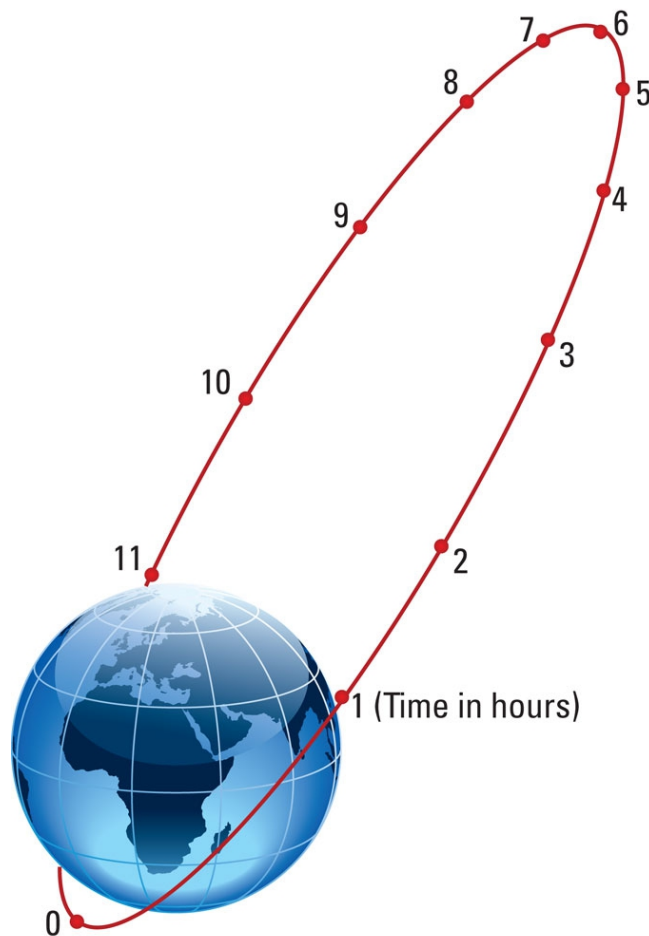
2.3.2.2 Μέσες Τροχιές (Medium Earth Orbit)

Σε μικρότερη απόσταση από τη Γη οι δορυφόροι σε μέση τροχιά κινούνται γρηγορότερα. Οι δύο πιο χαρακτηριστικοί τύποι μέσης τροχιάς είναι οι ημι-σύγχρονες δορυφορικές τροχιές (*semi-synchronous orbits*) και οι τροχιές Molniya.

Οι ημι-σύγχρονες δορυφορικές τροχιές είναι σχεδόν κυκλικές δορυφορικές τροχιές (με πολύ μικρή εκκεντρότητα) με απόσταση 26560 km από το κέντρο της Γης (περίπου 20200 km από την επιφάνεια της Γης- ανάλογα και με το σχηματισμό: GPS, GLONASS≈20000 km, Galileo≈24000 km). Ένας δορυφόρος σε αυτό το ύψος τροχιάς χρειάζεται περίπου 12 (π.χ. GPS, GLONASS) έως 14 ώρες (π.χ. GALILEO) για να ολοκληρώσει μία περιστροφή του.

Η δεύτερη πολύ συχνά χρησιμοποιούμενη κατηγορία μέσων τροχιών είναι η τροχιά Molniya, η οποία είναι πολύ χρήσιμη για την παρακολούθηση ή κάλυψη περιοχών σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Οι γεωστατικοί δορυφόροι είναι πολύτιμοι για την συνεχή κάλυψη μίας συγκεκριμένης περιοχής που παρέχουν, αλλά τοποθετούνται πάντα κοντά στον ισημερινό και έτσι δεν έχουν καλή απόδοση σε πολύ βόρειες και νότιες περιοχές, οι οποίες βρίσκονται πάντα στα άκρα του οπτικού πεδίου (*edge of view*) των γεωστατικών δορυφόρων. Οι τροχιές Molniya αποτελούν μία πολύ χρήσιμη λύση για τα συγκεκριμένα πλάτη.

Οι τροχιές Molniya συνδυάζουν μεγάλη κλίση (63.4°) με μεγάλη εκκεντρότητα (0.722) για να μεγιστοποιήσουν τον χρόνο παραμονής του δορυφόρου πάνω από περιοχές σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Λόγω της μεγάλης εκκεντρότητας, ο δορυφόρος κινείται πολύ πιο γρήγορα όταν βρίσκεται κοντά στο περίγειο. Όσο απομακρύνεται μειώνεται η ταχύτητά του, με αποτέλεσμα να παραμείνει πολύ περισσότερο χρόνο κοντά στο απόγειο. Ένας δορυφόρος με τροχιά τύπου Molniya χρειάζεται 12 ώρες για να ολοκληρώσει μία περιστροφή του, όμως περνά τα 2/3 της περιόδου περιστροφής του πάνω μόνο από το ένα ημισφαίριο. Όπως και οι ημισύγχρονες τροχιές έτσι και εδώ ο δορυφόρος χρειάζεται 24 ώρες για να καλύψει ένα πλήρες ίχνος του στην επιφάνεια της Γης (η περίοδος επανάληψης της τροχιάς είναι ίση με μία ημέρα). Αυτού του τύπου οι τροχιές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τις τηλεπικοινωνίες σε πολύ μεγάλα γεωγραφικά πλάτη.



Σχήμα 9: Τροχιά τύπου Molniya (Πηγή:
<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/OrbitsCatalog/page2.php>)

2.3.2.3 Χαμηλές Δορυφορικές Τροχιές (Low Earth Orbits-LEO)

Οι περισσότεροι επιστημονικοί δορυφόροι και πολλοί μετεωρολογικοί δορυφόροι είναι τοποθετημένοι σε σχεδόν κυκλικές, χαμηλές δορυφορικές τροχιές. Η κλίση του δορυφόρου εξαρτάται από το τι φαινόμενο είναι κατασκευασμένος να παρακολουθεί. Για παράδειγμα ο δορυφόρος της αποστολής *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) είχε εκτοξευτεί για να παρακολουθήσει τις βροχοπτώσεις στον τροπικό κύκλο και έτσι έχει μία σχετικά χαμηλή κλίση με το ισημερινό επίπεδο της τάξης των 35 μοιρών καλύπτοντας πάντα την περιοχή κοντά στον ισημερινό.

Ένας άλλος τύπος χαμηλής τροχιάς είναι η **πολική τροχιά**. Είναι ένας τύπος κεκλιμένης (*highly inclined*) τροχιάς, με κλίση $i \approx 90^\circ$ ως προς το ισημερινό επίπεδο, όπου ο δορυφόρος κινείται γύρω από τη Γη από πόλο σε πόλο ενώ χρειάζεται περίπου 99 λεπτά για να ολοκληρώσει μία περιστροφή του. Κατά τη διάρκεια του πρώτου μισού της τροχιάς του ο δορυφόρος παρακολουθεί το φωτεινό κομμάτι της Γης. Στον Πόλο ο δορυφόρος περνά από το φωτεινό στο σκοτεινό τμήμα της Γης.

Καθώς οι δορυφόροι κινούνται, η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της. Όταν ο δορυφόρος επανέλθει στην φωτεινή πλευρά της Γης βρίσκεται πάνω από μία ζώνη γειτονική της ζώνης που παρακολουθούσε κατά την προηγούμενη περιστροφή του. Σε μία περίοδο 24 ωρών, ένας δορυφόρος με πολική τροχιά θα έχει παρακολουθήσει το μεγαλύτερο τμήμα της Γης δυο φορές, τη μία φορά με το φως της ημέρας και την άλλη τη νύχτα.

Όπως οι γεωστατικοί δορυφόροι έχουν κάποια χαρακτηριστικά σημεία (*sweet spot*) που τους επιτρέπουν να μένουν πάντα πάνω από την ίδια περιοχή, έτσι και οι δορυφόροι σε σχεδόν πολική τροχιά γύρω από τη Γη έχουν αντίστοιχες ζώνες που τους επιτρέπουν να περνούν πάνω από τις περιοχές την ίδια πάντα τοπική ώρα, όπως γίνεται, παραδείγματος χάριν, με τους δορυφόρους τηλεπισκόπησης (πχ Landsat, SPOT). Αυτός ο τύπος τροχιάς ονομάζεται ηλιοσύγχρονη τροχιά (*sun-synchronous orbit*) και χρησιμοποιείται κυρίως για δορυφόρους που είναι εξοπλισμένοι με οπτικούς αισθητήρες, οι οποίοι συνήθως είναι επιθυμητό να παρατηρούν τις εκάστοτε περιοχές ενδιαφέροντος κάτω από ίδιες συνθήκες φωτός κάθε ημέρα (ή νύχτα). Για παράδειγμα για τον δορυφόρο Terra, είναι πάντα 10:30 το πρωί όταν ο δορυφόρος διέρχεται πάνω από τον ισημερινό στην Βραζιλία. Στην ακριβώς επόμενη περιστροφή του δορυφόρου γύρω από τη Γη περίπου 99 λεπτά αργότερα ο δορυφόρος διέρχεται πάνω από τον ισημερινό στο Ecuador ή την Κολομβία και η τοπική ώρα είναι και πάλι περίπου 10:30 το πρωί.

Η ηλιοσύγχρονη τροχιά είναι πολύ χρήσιμη για την επιστήμη καθώς διατηρεί την γωνία πρόσπτωσης του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια της Γης όσο το δυνατό πιο σταθερή, αν και η γωνία αλλάζει από εποχή σε εποχή. Αυτή η σταθερότητα στη γωνία πρόσπτωσης του ηλιακού φωτός δίνει τη δυνατότητα στους επιστήμονες να συγκρίνουν εικόνες της ίδιας εποχής αρκετών ετών χωρίς να χρειάζεται να ασχοληθούν με απότομες αλλαγές στη σκίαση και τον φωτισμό περιοχών, που θα μπορούσαν να δώσουν μία εσφαλμένη εντύπωση αλλαγής. Χωρίς τις ηλιοσύγχρονες τροχιές θα ήταν πολύ δύσκολο να παρακολουθείται η αλλαγή των συνθηκών στην επιφάνεια της γης (και στην ατμόσφαιρα) με τον χρόνο. Θα ήταν αδύνατο για παράδειγμα να συγκεντρωθεί η συνεχής πληροφορία που είναι απαραίτητη για την μελέτη της κλιματικής αλλαγής.

Το εύρος των διαδρομών που μπορεί να διανύσει ένας δορυφόρος για να τοποθετηθεί σε ηλιοσύγχρονη τροχιά είναι πολύ περιορισμένο. Για παράδειγμα εάν ένας δορυφόρος έχει ύψος τροχιάς 100 km θα πρέπει να έχει μία κλίση (*orbital inclination*) 96 μοιρών προκειμένου να διατηρηθεί σε ηλιοσύγχρονη τροχιά. Οποιαδήποτε απόκλιση (*deviation*) στο ύψος ή στην κλίση της τροχιάς του δορυφόρου θα τον οδηγούσε σε έξοδο από την ηλιοσύγχρονη τροχιά. Καθώς όμως οι ατμοσφαιρικές τριβές (*atmospheric drag*) και οι βαρυτικές έλξεις από τον ήλιο και την σελήνη μεταβάλλουν την τροχιά του δορυφόρου απαιτούνται συχνές παρεμβάσεις- ελιγμοί (*regular adjustments*) προκειμένου να διατηρηθεί ο δορυφόρος εντός ηλιοσύγχρονης τροχιάς.

2.4 Εισαγωγή στα Συστήματα GNSS και στους Δείκτες Γεωμετρικής Ισχύος (Dilution Of Precision)

Μεγάλο μέρος της διπλωματικής αφορά στην αξιολόγηση των δυνατοτήτων ακριβούς, αξιόπιστου και αποδοτικού προσδιορισμού θέσης με τη χρήση διαφορετικών συστημάτων GNSS, βάσει των τροχιακών στοιχείων των δορυφόρων που αποτελούν τον εκάστοτε σχηματισμό. Επομένως κρίνεται απαραίτητη μία σύντομη εισαγωγή στα συστήματα GNSS η οποία περιορίζεται στον ορισμό τους, τον τρόπο πραγματοποίησης μετρήσεων με χρήση ενός συστήματος GNSS καθώς και των δεικτών και των εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια για την αξιολόγηση και την σύγκριση της γεωμετρίας μεταξύ διαφορετικών δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης.

2.4.1 Συστήματα GNSS

Ο όρος Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης (*Global Navigation Satellite Systems- GNSS*) αναφέρεται σε δορυφορικούς σχηματισμούς⁷ που μέσω σημάτων που εκπέμπονται από τους δορυφόρους που τους αποτελούν στο διάστημα μεταδίδονται πληροφορίες προσδιορισμού θέσης, χρόνου και (κατά συνέπεια) ταχύτητας. Εξ' ορισμού τα συστήματα GNSS παρέχουν παγκόσμια κάλυψη.

Ο όρος GNSS επινοήθηκε στο δέκατο συνέδριο αεροπλοήγησης (*Air Navigation Conference*) το 1991, όπου ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπλοΐας (*International Civil Aviation Organization- ICAO*) αναγνώρισε ότι το βασικό αυτόνομο δορυφορικό σύστημα τον 21ο αιώνα θα παρέχεται από παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης.

Οι δέκτες GNSS προσδιορίζουν την θέση τους χρησιμοποιώντας την χρονική και χωρική πληροφορία που βρίσκεται κωδικοποιημένη στο σήμα που εκπέμπουν οι ορατοί από τον δέκτη δορυφόροι του σχηματισμού.

Η απόδοση ενός δορυφορικού συστήματος πλοήγησης GNSS εκτιμάται στην βάση τεσσάρων κριτηρίων:

- Ακρίβεια (*Accuracy*): Οι απαιτήσεις ακρίβειας στον προσδιορισμό της θέσης εξαρτώνται από την εφαρμογή. Για παράδειγμα για την προσγείωση αεροσκάφους απαιτείται ακρίβεια στον προσδιορισμό του υψομέτρου της τάξης των 4 m. Επομένως για να επιτευχθεί αυτή η ακρίβεια απαιτούνται διαφορετικές τεχνικές επίλυσης (DGPS).
- Ακεραιότητα (*integrity*): Η δυνατότητα ενός συστήματος να παρέχει χρονικές προειδοποιήσεις (*timely warnings*) στους χρήστες του όταν για οποιονδήποτε λόγο δεν ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί για πλοήγηση.
- Διαθεσιμότητα (*Availability*): Η δυνατότητα του συστήματος να παρέχει τις υπηρεσίες του στην

⁷ Ο όρος δορυφορικός σχηματισμός είναι η μεταφρασμένη στα ελληνικά εκδοχή του αγγλικού όρου *Constellation*, ο οποίος χρησιμοποιείται τόσο για αστερισμούς, όσο και για ένα σύνολο δορυφόρων που αποτελούν στο σύνολό τους στοιχεία του ίδιου συστήματος.

καθορισμένη περιοχή κάλυψης.

- Συνέχεια των υπηρεσιών (*Continuity of Service*): Η διαθεσιμότητα της υπηρεσίας σε συνεχή βάση χωρίς διακοπές κατά τη διάρκεια μιας εργασίας.

Τα συστήματα GPS και GLONASS, λόγω του πρωτίστως στρατιωτικού χαρακτήρα τους, δεν εγγυώνται όλες τις παραπάνω δυνατότητες. Για τον λόγο αυτό και μέχρι την δημιουργία ενός πλήρως λειτουργικού συστήματος GNSS (GNSS2) που θα πληροί τις παραπάνω προδιαγραφές προσδιορίστηκε μία ενδιάμεση γενιά παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης (GNSS1):

- Το **GNSS1** βασίζεται στα συστήματα GPS και GLONASS που λειτουργούν ως βασικός κορμός, ενώ ενισχύεται από επιπλέον πολιτικά συστήματα (components), όπως το σύστημα **EGNOS** (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) της ESA, το **WAAS** (*Wide Area Augmentation System*) της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Αεροπλοΐας (*Federal Aviation Administration*) των ΗΠΑ, και το σύστημα **MSAS** (*Multi-functional Satellite Augmentation System*) της Ιαπωνίας. Το σύστημα EGNOS, για παράδειγμα, αποτελείται από μικρό αριθμό δορυφόρων σε γεωστατική τροχιά και ένα δίκτυο σταθμών εδάφους, το οποίο είναι πλήρως λειτουργικό από τον Οκτώβριο του 2012. Ουσιαστικά συνιστά ένα βοηθητικό σύστημα εκπομπής διορθώσεων και σχετικών πληροφοριών για τα σήματα που εκπέμπονται (μέχρι στιγμής) από τους δορυφόρους GPS και GLONASS, με σκοπό την βελτίωση της ακρίβειας προσδιορισμού θέσης. Οι επίγειοι σταθμοί συλλέγουν μετρήσεις αποστάσεων από σήματα πλοήγησης στις δυο συχνότητες εκπομπής των συστημάτων GPS και GLONASS καθώς και των γεωστατικών δορυφόρων που επίσης εκπέμπουν πανομοιότυπα σήματα GPS και GLONASS. Τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί αποστέλλονται στα κέντρα ελέγχου της αποστολής (*Mission Control Centers- MCC*) όπου εκτιμώνται πληροφορίες σχετικές με την ακεραιότητα του κάθε συστήματος, διαφορικές διορθώσεις (διορθώσεις DGPS), καθώς και ιονοσφαιρικές καθυστερήσεις των σημάτων. Οι πληροφορίες στη συνέχεια αποστέλλονται στους δορυφόρους του συστήματος από όπου εκπέμπονται κωδικοποιημένες στην συχνότητα L1 του GPS στους χρήστες. Προκειμένου οι πληροφορίες να μπορούν είναι διαθέσιμες και σε αστικές περιοχές όπου μπορεί να παρατηρείται απώλεια της κάλυψης από τους δορυφόρους του συστήματος παρέχεται η δυνατότητα απόκτησης τους και μέσω διαδικτύου. Το σύστημα βελτιώνει την ακρίβεια προσδιορισμού θέσης σε επίπεδα από 1.5 έως 5 m.
- Τα συστήματα **GNSS2** αποτελούν τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης δεύτερης γενιάς, τα οποία σχεδιάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούν και τα 4 παραπάνω κριτήρια. Τέτοια είναι το υπό ανάπτυξη ευρωπαϊκό σύστημα GNSS GALILEO, η ανανέωση του σχηματισμού GPS με δορυφόρους της σειράς GPS IIF και της ενεργοποίησης νέων συχνοτήτων και κωδίκων στα πλαίσια της μετάβασης στο λεγόμενο εκσυγχρονισμένο σύστημα GPS 3^{ης} γενιάς (GPS III), καθώς και η σταδιακή αντικατάσταση των παλαιότερων δορυφόρων του σχηματισμού GLONASS με δορυφόρους της νέας γενιάς GLONASS-K. Επιπλέον, σχεδιάζονται νέα περιφερειακής κλίμακας συστήματα που είναι σήμερα σε διαφορετικές φάσεις της ανάπτυξης τους, όπως το σύστημα COMPASS (Κίνα), IRNSS (Ινδία) QZSS (Ιαπωνία).

Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο και διαδεδομένο σύστημα GNSS σήμερα είναι το σύστημα GPS. Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή της λειτουργίας και του τρόπου μετρήσεων με χρήση του συστήματος GPS καθώς η λογική λειτουργίας του είναι σχεδόν ταυτόσημη για όλα τα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης GNSS με μικρές μόνο διαφοροποιήσεις (όπως ορισμένες

επιπλέον δυνατότητες χάριν της τεχνολογικής προόδου, η χρήση ελαφρώς μετατοπισμένων συχνοτήτων των φορέων, η χρήση μία τρίτης συχνότητας εκπομπής του δορυφορικού σήματος (L5), πέρα από τις συχνότητες L1 και L2 κ.α.).

2.4.2 Προσδιορισμός Θέσης με χρήση συστήματος GNSS (Global Navigation Satellite Systems)- Το σύστημα GPS

Ένα σύστημα GNSS αποτελείται ουσιαστικά από "πομπούς σε τροχιά", που είναι οι δορυφόροι του σχηματισμού, και από τους δέκτες του εκπεμπόμενου σήματος. Τα δορυφορικά σήματα που εκπέμπονται από τους δορυφόρους χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση μετρήσεων από τον δέκτη, που ισοδυναμούν με τις αποστάσεις μεταξύ δέκτη και δορυφόρων σε κάθε χρονική στιγμή. Οι μετρήσεις των συστημάτων GNSS όπως και του GPS γίνονται πάνω σε "μετρητικούς" κώδικες ή σε ημιτονοειδή κύματα (φορείς των κωδίκων και του μηνύματος πλοήγησης) και είναι πάντα επηρεασμένες από συστηματικά σφάλματα που οφείλονται κυρίως στην επίδραση της ατμόσφαιρας στο δορυφορικό σήμα και στο μη συγχρονισμό των ταλαντωτών/ χρονομέτρων των δορυφόρων και των δεκτών.

Ο προσδιορισμός θέσης με GPS διακρίνεται γενικά σε δύο κατηγορίες: στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης (*absolute positioning, point positioning, single point positioning*) και στο σχετικό προσδιορισμό θέσης (*relative positioning, differential positioning*), μπορεί δε να γίνεται είτε μετά το πέρας των μετρήσεων (*post processing*) ή σε πραγματικό χρόνο (*real time positioning*), ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες σημείου ως προς ένα ορισμένο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς από παρατηρήσεις μόνο του αντίστοιχου δέκτη. Ο απόλυτος προσδιορισμός θέσης μπορεί να συγκριθεί με μία πλευρική οπισθοτομία με γνωστά (τριγωνομετρικά) σημεία τις θέσεις των τεσσάρων δορυφόρων στον χώρο τη χρονική στιγμή της μέτρησης. Στο σχετικό προσδιορισμό θέσης, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες σημείου ως προς ένα άλλο σημείο του οποίου οι συντεταγμένες θεωρούνται γνωστές ως προς ένα σύστημα αναφοράς τοπικό ή γεωκεντρικό ή αλλιώς προσδιορίζεται η σχετική θέση (διαφορές συντεταγμένων- Διάνυσμα Βάσης) του ενός σημείου ως προς το άλλο.

Στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης χρησιμοποιούμε τις παρατηρήσεις των μεμονωμένων σημείων και καταλήγουμε σε προσδιορισμό γεωκεντρικών συντεταγμένων σημαντικά χαμηλότερης ακρίβειας επειδή δεν μπορούν να αντιμετωπισθούν ικανοποιητικά τα διάφορα συστηματικά σφάλματα όπως στον σχετικό προσδιορισμό. Η ακρίβεια του απόλυτου προσδιορισμού θέσης με το GPS σε πραγματικό χρόνο (λύση πλοήγησης, *navigation solution*) είναι της τάξης των μερικών μέτρων (5-15 m).

Ο προσδιορισμός θέσης μπορεί ακόμη να διακριθεί σε στατικό (*static*) και κινηματικό (*kinematic*) ανάλογα με το αν το "αντικείμενο" που υπόκειται σε προσδιορισμό θέσης είναι ακίνητο ή κινείται.

Ακολουθεί μία σύντομη αναφορά στα σήματα που εκπέμπονται από τους δορυφόρους GPS και στα είδη των μετρήσεων που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης σημείου. Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου που αφορά στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο με χρήση των εξισώσεων της ψευδοαπόστασης, από όπου και ο αναγνώστης θα οδηγηθεί στην ανάλυση των δεικτών DOP που θα αποτελούν και το βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας ενότητας.

2.4.3 Σήματα του συστήματος GPS

Το σύστημα NAVSTAR GPS (*Navigation Satellite Timing and Ranging Geodetic Positioning System*) βασίζει τον προσδιορισμό θέσης στην μέτρηση αποστάσεων μίας διαδρομής, δηλαδή τα σήματα εκπέμπονται μόνο από τον δορυφόρο στον δέκτη. Το θεμελιώδες παρατηρούμενο μέγεθος είναι ο χρόνος ταξιδιού του σήματος από την κεραία εκπομπής του δορυφόρου μέχρι το κέντρο φάσης της κεραίας του δέκτη (Wells et al., 1989; B. Hofmann-Wellenhof et al., 1992; A. El-Rabbany, 2002).

Το ατομικό χρονόμετρο του δορυφόρου εκτός από την διατήρηση της κλίμακας χρόνου του δορυφόρου παράγει μία βασική συχνότητα $f_0 = 10.23 \text{ MHz}$, από την οποία προκύπτουν οι δύο βασικές συχνότητες ή κύματα φορείς (carrier frequencies, carrier waves) των ραδιοσημάτων που εκπέμπονται: η συχνότητα $L1=154 f_0$ και η συχνότητα $L2= 120 f_0$ με αντίστοιχα μήκη κύματος $\lambda_{L1}=19.03 \text{ cm}$ και $\lambda_{L2}=24.42 \text{ cm}$. Πάνω σε αυτές τις δύο βασικές συχνότητες διαμορφώνονται (προστίθενται) οι κώδικες C/A, P (κώδικες ψευδοτυχαίου θορύβου- *Pseudo-Random Noise* PRN) και το μήνυμα πλοήγησης (ο κώδικας C/A μόνο στον φορέα L1, ενώ ο κώδικας P και το μήνυμα πλοήγησης στους φορείς L1 και L2). Τα τρία ψηφιακά μηνύματα, αποτελούμενα από ακολουθίες δυαδικών ψηφίων, επαναλαμβάνονται στην αρχή κάθε εβδομάδας.

Οι κώδικες PRN είναι σήματα που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των ψευδοαποστάσεων. Πρόκειται για ακολουθίες δυαδικών ψηφίων (0 και 1) που παράγονται από συγκεκριμένους γνωστούς μαθηματικούς αλγορίθμους και επαναλαμβάνονται ύστερα από κάποιο καθορισμένο χρονικό διάστημα. Είναι διαφορετικοί για κάθε δορυφόρο.

Ο δέκτης του σήματος GPS μπορεί να συγκρίνει τον λαμβανόμενο κώδικα με ένα αντίγραφο που παράγει ο ίδιος. Ο χρόνος που απαιτείται για την ταύτιση του εισερχόμενου με τον παραγόμενο στο δέκτη κώδικα αντιστοιχεί στον χρόνο της διαδρομής του σήματος και συνεπώς οδηγεί στον προσδιορισμό της ψευδοαπόστασης. Ψευδοαπόσταση ονομάζεται το παρατηρούμενο μέγεθος που προκύπτει εάν ο χρόνος διαδρομής του σήματος πολλαπλασιαστεί με την ταχύτητα του φωτός. Καθότι το μέγεθος που προκύπτει είναι συστηματικά επηρεασμένο από τα σφάλματα συγχρονισμού του δέκτη και του δορυφόρου ως προς το χρόνο GPS διαφέρει από την γεωμετρική απόσταση και από εκεί πήρε και του όνομά του, ψευδοαπόσταση. Πέρα από τα σφάλματα συγχρονισμού των χρονομέτρων, η ψευδοαπόσταση πρέπει να διορθωθεί και από τις επιδράσεις της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας στον χρόνο ταξιδιού του σήματος. Επομένως οι πρωτογενείς μετρήσεις στους κώδικες PRN είναι μετρήσεις των χρονικών διαστημάτων “χρόνος λήψης στον δέκτη-χρόνος εκπομπής στον δορυφόρο”, που πολλαπλασιάζονται με την ταχύτητα του φωτός και μετατρέπονται

σε ψευδοαποστάσεις.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι κώδικες PRN είναι δύο ειδών: ο κώδικας C/A (*Coarse/Acquisition Code* ή *Clear Access*) και ο κώδικας P (*Precise* ή *Protected*). Ο C/A προστίθεται μόνο στον L1 φορέα ενώ ο P και στους δύο φορείς του σήματος. Κάθε δορυφόρος παράγει μία διαφορετική ακολουθία κωδίκων PRN, η οποία αποτελεί και το χαρακτηριστικό μέσο αναγνώρισης από ποιόν δορυφόρο προέρχεται το λαμβανόμενο σήμα. Για παράδειγμα αν υποθέσουμε ότι ο σχηματισμός αποτελείται από 30 δορυφόρους, τότε θα υπάρχουν 30 διαφορετικοί κώδικες C/A και 30 διαφορετικοί κώδικες P.

Ο κώδικας C/A είναι μία ακολουθία από 1023 chips ή ψηφία (χρησιμοποιείται ο όρος chip αντί του bit προκειμένου να γίνει σαφές ότι πρόκειται για κώδικα και όχι για δεδομένα) που παρέχονται με ρυθμό $1.023 \text{ MHz} = 1023000 \text{ bps}$ (*bits per second*). Ο κώδικας επαναλαμβάνεται περίπου κάθε 1 msec. Η ενδογενής ακρίβεια της μέτρησης των ψευδοαποστάσεων εξαρτάται από το μήκος κύματος του ψηφίου και ενδεικτικά είναι της τάξης του 0,5%-1% αυτού. Παραδείγματος χάριν, το ψηφίο του κώδικα C/A έχει μήκος κύματος ίσο με 300 m και έτσι η ακρίβεια στον προσδιορισμό της ψευδοαπόστασης είναι της τάξης του 1.5 m με 3 m.

Ο κώδικας P είναι μία τεράστια ακολουθία από περίπου $2.3547 \cdot 10^{14}$ ψηφία που παράγονται με ρυθμό 10.23 MHz, δηλαδή 10 φορές μεγαλύτερο από τον ρυθμό παραγωγής του C/A, και μήκος ψηφίου περίπου ίσο με 30 m. Επομένως η αντίστοιχη ενδογενής ακρίβεια στον προσδιορισμό της απόστασης με χρήση του κώδικα P είναι της τάξης των 15-30 cm.

Ο κώδικας C/A είναι απαραίτητος επειδή παρέχει την δυνατότητα για γρήγορη πρόσβαση στον κώδικα P και επιτρέπει τον ικανοποιητικό συγχρονισμό του χρονομέτρου του δέκτη ως προς τον χρόνο GPS ώστε οι μετρήσεις που καταγράφονται από τους δέκτες να είναι με ικανοποιητική ακρίβεια ταυτόχρονες (Φωτίου & Πικρίδας, 2008).

Τέλος, προκειμένου να υπολογισθεί η θέση του δέκτη σε πραγματικό χρόνο πρέπει να είναι γνωστές οι συντεταγμένες των δορυφόρων την εποχή αναφοράς της μέτρησης. Τη δυνατότητα αυτή προσφέρει το μήνυμα πλοήγησης (*navigation message- broadcast message*). Το μήνυμα αυτό αποστέλλεται με τον σχετικά αργό ρυθμό των 50 bps και επαναλαμβάνεται κάθε 30 sec (Seeber, 2003). Περιλαμβάνει δε πληροφορίες σχετικές με το χρόνο GPS, τα τροχιακά στοιχεία του δορυφόρου, διορθώσεις των παρατηρήσεων λόγω της επίδρασης της ατμόσφαιρας και της ιονόσφαιρας (διορθώνεται περίπου το 60% της επίδρασης), διορθώσεις των χρονομέτρων των δορυφόρων κ.α.

2.4.4 Παρατηρούμενα μεγέθη από το σύστημα GPS

Οι παρατηρήσεις του δέκτη που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό θέσης είναι οι εξής:

- **Μετρήσεις ψευδοαποστάσεων κώδικα (*pseudoranges from code measurements*):** Η μέτρηση της

ψευδοαπόστασης ισοδυναμεί με τη χρονική μετατόπιση (*time shift*) που απαιτείται προκειμένου να συσχετισθεί η ακολουθία κώδικα που λαμβάνει ο δέκτης με μία αντίστοιχη ακολουθία κώδικα που παράγεται στον δέκτη GPS. Μετρήσεις ψευδοαπόστασης πραγματοποιούνται τόσο στον κώδικα A/C στον φορέα L1 όσο και στον κώδικα P στις συχνότητες L1 και L2.

- **Μετρήσεις φάσεων ή διαφορές φάσεων στον φορέα (ή στους φορείς) των σημάτων (carrier phases- carrier phases differences):** Στον δέκτη το παραγόμενο από τον δέκτη ημιτονοειδές αντίγραφο – IF (*Intermediate Frequency*) σταθερής ονομαστικής συχνότητας, μετατοπίζεται έτσι ώστε να ταυτιστεί με τη φάση του εισερχόμενου και μετατοπισμένου λόγω Doppler φορέα IF. Έτσι και επιτευχθεί η ταύτιση (κλείδωμα φάσης αντιγράφου) μπορεί να διαβαστεί το μήνυμα δεδομένων, στη συνέχεια να εξαλειφθεί και τελικά να γίνει η μέτρηση της φάσης του καθαρού φορέα IF. Η μέτρηση αυτή είναι ίση με τη διαφορά φάσης μεταξύ του εισερχόμενου φορέα L1 ή L2 και του αντιγράφου του. Η ακρίβεια της φάσης εμπειρικά ισούται με το 0.5-1% του μήκους κύματος και είναι της τάξης του 1mm (Φωτίου & Πικρίδας, 2008).

Οι δείκτες DOP που αποτελούν ένα εργαλείο αξιολόγησης των σχηματισμών GNSS και χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις εφαρμογές της διπλωματικής που αφορούν τέτοιους σχηματισμούς προκύπτουν από την επίλυση των μετρήσεων της ψευδοαπόστασης κατά τον απόλυτο προσδιορισμό θέσης. Επίσης αντίστοιχοι δείκτες έχουν αναπτυχθεί και για την περίπτωση εφαρμογών σχετικού εντοπισμού, οι δείκτες RDOP (*Relative Dilution of Precision*). Οι δείκτες RDOP προκύπτουν από το άθροισμα των στοιχείων της κυρίας διαγωνίου του πίνακα μεταβλητότητας- συμμεταβλητότητας που αντιστοιχεί στο σύστημα επίλυσης διπλών διαφορών κώδικα ή φάσης (Erickson, 1992). Στην πράξη οι δείκτες DOP είναι ένα ευρέως αποδεκτό μέτρο εκτίμησης της επίδρασης της σχετικής γεωμετρίας δεικτών- δορυφόρων στην τελική ακρίβεια εντοπισμού των σημείων ενδιαφέροντος και γι' αυτό χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις. Αντίθετα, οι σχετικοί δείκτες RDOP χρησιμοποιούνται σπάνια και δεν έχουν γίνει αποδεκτοί στον ίδιο βαθμό (Κατσιγιάννη, 2011).

Επομένως στην συνέχεια της ενότητας και μετά την σύντομη εισαγωγή που προηγήθηκε ακολουθεί μια πιο εκτενής αναφορά στην εξίσωση της ψευδοαπόστασης και στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο, καταλήγοντας στον ορισμό, την χρήση και την σημασία των δεικτών DOP.

2.4.5 Εξίσωση Παρατήρησης της Ψευδοαπόστασης

Η ψευδοαπόσταση είναι η απόσταση δέκτη-δορυφόρου που υπολογίζεται απευθείας από τις μετρήσεις του δέκτη στον κώδικα C/A ή P. Εάν τα χρονόμετρα του δέκτη και του δορυφόρου ήταν τέλεια συγχρονισμένα και επιπλέον το μέσο διάδοσης ήταν το κενό, τότε η ψευδοαπόσταση θα ήταν ίση με την γεωμετρική απόσταση.

Η εξίσωση παρατήρησης της ψευδοαπόστασης εκφράζει τη σχέση ανάμεσα στην ψευδοαπόσταση (παρατήρηση), την αντίστοιχη γεωμετρική απόσταση (παρατηρούμενο μέγεθος) και τα διάφορα συστηματικά και τυχαία σφάλματα.

Η εξίσωση της ψευδοαπόστασης μεταξύ δέκτη A και δορυφόρου i με παρατηρήσεις του κώδικα C/A ή και P, αν αγνοηθεί το σφάλμα πολυανάκλασης είναι:

$$\rho_A^i = P_A^i + c \cdot \delta_A - c \cdot \delta_i + I_A^i + T_A^i + e_A^i, \quad (14)$$

όπου ρ_A^i είναι η παρατηρούμενη ψευδοαπόσταση, P_A^i είναι η γεωμετρική απόσταση ανάμεσα σε δορυφόρο και δέκτη, δ_A είναι το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη, δ_i είναι το σφάλμα του χρονομέτρου του δορυφόρου και I_A^i και T_A^i η ιονοσφαιρική και τροποσφαιρική καθυστέρηση. Το e_A^i αφορά στο τυχαίο σφάλμα (στο θόρυβο) της κάθε παρατήρησης. Η ψευδοαπόσταση μετράται στον κώδικα P και στις 2 συχνότητες L1 και L2 εφόσον ο δέκτης έχει τη δυνατότητα.

Στο μήνυμα πλοήγησης του δορυφόρου περιλαμβάνεται η διόρθωση του χρονομέτρου του δορυφόρου με ακρίβεια της τάξης του 1 μs. Επίσης αποστέλλονται προσεγγιστικές διορθώσεις που αφορούν στην επίδραση της ιονόσφαιρας, ενώ το τροποσφαιρικό σφάλμα υπολογίζεται από τα συνήθη τυπικά μοντέλα τροπόσφαιρας. Επομένως, εάν θεωρηθεί ότι το σφάλμα του χρονομέτρου του δορυφόρου προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τη διόρθωση του μηνύματος πλοήγησης, οι άγνωστες παράμετροι που πρέπει να υπολογιστούν είναι οι συντεταγμένες της θέσης του δέκτη (X,Y,Z) και το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη, και η εξίσωση 14 παίρνει τη μορφή:

$$\rho_A^i = P_A^i + c \cdot \delta_A + e_A^i, \quad (15)$$

η οποία είναι η τελική μορφή της εξίσωσης που χρησιμοποιείται και στη συνέχεια.

2.4.6 Απόλυτος Προσδιορισμός Θέσης σε Πραγματικό Χρόνο- Λύση Πλοήγησης- Οι Δείκτες DOP

Πραγματοποιώντας μία γεωμετρική ανάλυση του προβλήματος:⁸

Έστω ότι το διάνυσμα $\vec{s}$ αναπαριστά το διάνυσμα με αρχή το κέντρο της Γης και πέρας έναν δορυφόρο, το $\vec{u}$ αναπαριστά το διάνυσμα με αρχή το κέντρο της Γης και πέρας την θέση του δέκτη του χρήστη και $\vec{r}$ το διάνυσμα με αρχή τον δέκτη του χρήστη και πέρας τον δορυφόρο. Για τα τρία διανύσματα ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\vec{r} = \vec{s} - \vec{u}$$

Η απόσταση $\|\vec{r}\|$ υπολογίζεται μετρώντας τον χρόνο διάδοσης του σήματος από τον πομπό του δορυφόρου στον δέκτη του χρήστη. Έτσι η ψευδοαπόσταση ρ_i ορίζεται για τον δορυφόρο i από τη σχέση:

$$\rho_i = \|\vec{s}_i - \vec{u}\| + c * t_b + v_{\rho_i}, \quad (16)$$

⁸ Η μαθηματική ανάλυση του προβλήματος βασίζεται στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στις δημοσιεύσεις των Yariagadda et al. (2000), Jwo (2001) και Doong (2008). Οι συμβολισμοί από την άλλη πλευρά επιλέχθηκαν έτσι ώστε να ακολουθούν τις σημειώσεις του μαθήματος "Θεωρία Σφαλμάτων & Συνορθώσεις I" της Αγατζά- Μπαλοδήμου.

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός, t_b είναι η απόκλιση του χρονομέτρου του δέκτη από τον χρόνο του συστήματος και $v_{\rho i}$ είναι ο θόρυβος στην μέτρηση της ψευδοαπόστασης. Εκφράζοντας την θέση του δέκτη (X_u, Y_u, Z_u) με χρήση των συντεταγμένων του διανύσματος u οι μετρήσεις της ψευδοαπόστασης προς n δορυφόρους του σχηματισμού μπορούν να γραφούν ως:

$$\rho_i = \sqrt{(X_i - X_u)^2 + (Y_i - Y_u)^2 + (Z_i - Z_u)^2} + c * t_b + v_{\rho i}, \text{ με } i = 1, 2, 3 \dots n, \quad (17)$$

,όπου (X_i, Y_i, Z_i) το διάνυσμα θέσης του δορυφόρου i .

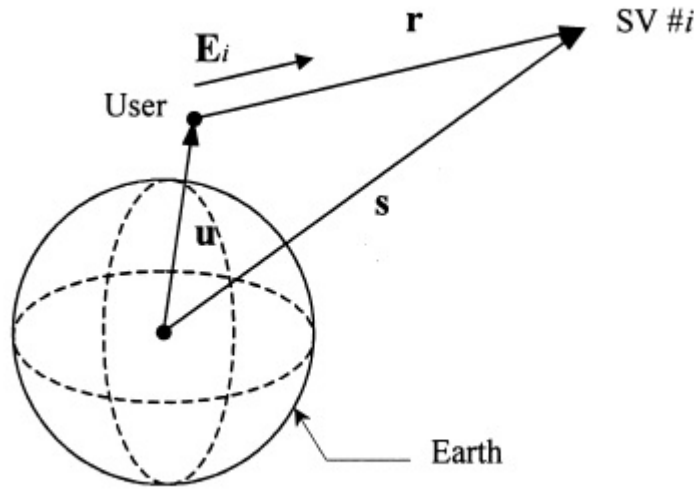


Figure 1. Definition of vectors.

Σχήμα 10: Γραφική απεικόνιση των διανυσμάτων (Πηγή: Dah-Jing Jwo, 2001).

Προκειμένου να γίνει οι συνόρθωση των παρατηρήσεων η εξίσωση 17 γραμμικοποιείται κατά Taylor και έτσι προκύπτει η εξίσωση :

$$\Delta \rho_i = \rho_i - \hat{\rho}_i = e_{i1} * \Delta X_u + e_{i2} * \Delta Y_u + e_{i3} * \Delta Z_u + c * t_b + v_{\rho i}, \quad (18)$$

όπου:

$$e_{i1} = \frac{\hat{X}_u - X_i}{\hat{r}_i}, \quad e_{i2} = \frac{\hat{Y}_u - Y_i}{\hat{r}_i}, \quad e_{i3} = \frac{\hat{Z}_u - Z_i}{\hat{r}_i},$$

και

$$\hat{r}_i = \sqrt{(\hat{X}_u - X_i)^2 + (\hat{Y}_u - Y_i)^2 + (\hat{Z}_u - Z_i)^2}.$$

Το διάνυσμα $\vec{E}_i = (e_{i1}, e_{i2}, e_{i3})$ με $i = 1, 2, \dots, n$ εκφράζει το διάνυσμα ορατότητας από τον χρήστη προς τους δορυφόρους. Η εξίσωση 18 μπορεί να παρασταθεί με τη χρήση πινάκων στη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \Delta\rho_3 \\ \vdots \\ \Delta\rho_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & 1 \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & 1 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & e_{n3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_u \\ \Delta Y_u \\ \Delta Z_u \\ c\Delta t_b \end{bmatrix} + v\rho_s , \quad (19)$$

ή εν συντομία:

$$\delta\rho = A \cdot \delta x + v ,$$

όπου $\delta\rho$ είναι το διάνυσμα των παρατηρήσεων, ο πίνακας $\mathbf{A}$ (η έντονη γραμματοσειρά (Bold) χρησιμοποιείται για να περιγράψει ότι η συγκεκριμένη μεταβλητή είναι πίνακας) είναι διαστάσεων $n \times 4$ με n το πλήθος των δορυφόρων και $n \geq 4$. Ο πίνακας $\mathbf{A}$ συνήθως αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως πίνακας γεωμετρίας (*geometry matrix*) ή πίνακας ορατότητας (*visibility matrix*) και ουσιαστικά πρόκειται για τον γνωστό από τη θεωρία σφαλμάτων αποκαλούμενο πίνακα σχεδιασμού (*design matrix*) που χρησιμοποιείται στην ελαχιστοτετραγωνική επίλυση με έμμεσες παρατηρήσεις. Όσον αφορά το δx , πρόκειται για το διάνυσμα των άγνωστων διορθώσεων και το $\mathbf{u}$ είναι το διάνυσμα του υπολοίπου (του θορύβου) της κάθε παρατήρησης. Θεωρείται γενικά ότι η αναμενόμενη τιμή του σφάλματος $E[\mathbf{u}] = 0$ (Dah-Jing Jwo, 2001).

Η επίλυση με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων προϋποθέτει ότι το σφάλμα της κάθε παρατήρησης ακολουθεί κανονική (Gauss) κατανομή. Σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από δέκτες στον κώδικα P του συστήματος GPS αποδείχτηκε ότι οι μετρήσεις δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή, αλλά πιθανόν κάποια από τις συναρτήσεις πυκνοτήτων που είναι βασισμένες στην κύρτωση. Για χρήστες του συστήματος κοντά στην επιφάνεια της Γης προέκυψε όμως ότι μπορεί να θεωρηθεί πως οι μετρήσεις ακολουθούν σχεδόν την κανονική κατανομή. Η γενική λύση της εξίσωσης 19 με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και για $n \geq 4$ είναι η εξίσωση:

$$\delta \hat{x} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \delta\rho . \quad (20)$$

Οι Yarlagaadda et al (2000) επισημαίνουν ότι σε περίπτωση που ο πίνακας συµμεταβλητότητας δεν προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό μίας σταθερής ποσότητας με έναν μοναδιαίο πίνακα (*identity matrix*) θα ήταν προτιμότερη μία ελαχιστοτετραγωνική επίλυση με χρήση πίνακα βαρών, ίσου με τον αντίστροφο του πίνακα συµμεταβλητότητας των σφαλμάτων των μετρήσεων V_l . Η σχέση μπορεί να γραφεί και στη μορφή:

$$\delta \hat{x} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^T \delta\rho , \text{ όπου } \mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$$

Η συµμεταβλητότητα των στοιχείων του διανύσματος των καλύτερων τιμών $\delta \hat{x}$ βρίσκεται με χρήση του νόμου μετάδοσης μεταβλητοτήτων από την σχέση:

$$\mathbf{V}_{\delta \hat{x}} = E[\delta \hat{x} \cdot \delta \hat{x}^T] = E[\mathbf{N}^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot (\delta\rho \cdot \delta\rho^T) (\mathbf{N}^{-1} \cdot \mathbf{A}^T)^T] = \mathbf{N}^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{V}_{\delta\rho} \cdot (\mathbf{N}^{-1} \cdot \mathbf{A}^T)^T , \quad (21)$$

Θεωρώντας τα σφάλματα στις μετρήσεις των αποστάσεων ως τυχαία ανεξάρτητα και ομοιόμορφα κατανομημένα (*independent and identically distributed*) μεταβλητότητας σ_{URE}^2 , η συμμεταβλητότητα μπορεί να εκφραστεί στη βολική μορφή πίνακα:

$$\mathbf{V}_{\delta\rho} = \mathbf{K}_n \cdot \sigma_{URE}^2, \quad (22)$$

ή θεωρώντας την ιδανική περίπτωση ισοβαρών παρατηρήσεων προκύπτει:

$$\mathbf{V}_{\delta\rho} = \mathbf{I} \cdot \sigma_{URE}^2,$$

όπου ο $\mathbf{K}_n$ είναι ένας διαγώνιος θετικός πίνακας, $\mathbf{I}$ είναι ένας μοναδιαίος πίνακας διαστάσεων $n \times 4$ και το σ_{URE}^2 είναι το λεγόμενο *User Equivalent Range Error*, μια επιλεγμένη τιμή που θεωρείται αντιπροσωπευτική της μεταβλητότητας-διακύμανσης της συνολικής επίδρασης των σφαλμάτων των μετρήσεων μετά τις διάφορες αναγωγές και διορθώσεις που γίνονται κατά το στάδιο της επεξεργασίας τους. Η τιμή URE υπολογίζεται από το συνδυασμό της επίδρασης των αβεβαιοτήτων στις εφημερίδες των δορυφόρων ή τα σφάλματα αναπαραγωγής της τροχιάς, χρονομέτρου και συγχρονισμού και θορύβου του δέκτη, όπως αυτά προβάλλονται στην γραμμή σύνδεσης παρατηρητή και δορυφόρου (Κατσιγιάννη, 2011). Μετά την εκτέλεση των πράξεων καταλήγουμε σε έναν πίνακα μεταβλητότητας- συμμεταβλητότητας των καλύτερων τιμών των στοιχείων, της μορφής:

$$\mathbf{V}_{\delta\hat{x}} = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta x}^2 & \sigma_{\Delta x \Delta y} & \sigma_{\Delta x \Delta z} & \sigma_{\Delta x \Delta ctb} \\ \sigma_{\Delta y \Delta x} & \sigma_{\Delta y}^2 & \sigma_{\Delta y \Delta z} & \sigma_{\Delta y \Delta ctb} \\ \sigma_{\Delta z \Delta x} & \sigma_{\Delta z \Delta y} & \sigma_{\Delta z}^2 & \sigma_{\Delta z \Delta ctb} \\ \sigma_{\Delta ctb \Delta x} & \sigma_{\Delta ctb \Delta y} & \sigma_{\Delta ctb \Delta z} & \sigma_{\Delta ctb}^2 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

όπου ισχύει ότι $E[v]=0$ και $E[\hat{x}]=0$ και $\mathbf{V}_{\delta\hat{x}}$ ο πίνακας μεταβλητότητας- συμμεταβλητότητας του διανύσματος των καλύτερων τιμών των συντεταγμένων του δέκτη και της διόρθωσης συγχρονισμού των χρονομέτρων.

Στην περίπτωση ισοβαρών παρατηρήσεων ο $\mathbf{V}_{\delta\hat{x}}$ ισούται με:

$$\mathbf{V}_{\delta\hat{x}} = \sigma_{URE}^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}. \quad (24)$$

Στην ιδανική περίπτωση ισοβαρών παρατηρήσεων ο δείκτης GDOP ορίζεται ως το ίχνος (*trace*) του πίνακα $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$, δηλαδή το άθροισμα των στοιχείων της κυρίας διαγωνίου του. Υπό μορφή σχέσης και για την γενικότερη περίπτωση προκύπτει η σχέση :

$$GDOP = \frac{\sqrt{\text{trace}(\mathbf{V}_{\delta\hat{x}})}}{\sigma_{URE}} = \frac{\sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 + \sigma_{tt}^2}}{\sigma_{URE}}, \quad (25)$$

Άλλοι δείκτες γεωμετρικής ισχύος είναι:

- Ο δείκτης PDOP (δείκτης θέσης- *Position DOP*), ο οποίος προκύπτει από τη σχέση:

$$PDOP = \frac{\sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2}}{\sigma_{URE}} , \quad (26)$$

και ο οποίος δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση του σφάλματος συγχρονισμού του δέκτη του δορυφόρου στην εκτίμηση της τελικής ακριβείας προσδιορισμού θέσης με μετρήσεις ψευδοαποστάσεων.

- Οι δείκτες HDOP (οριζόντιος δείκτης- *Horizontal DOP*) και VDOP (κατακόρυφος δείκτης- *Vertical DOP*), οι οποίοι αναφέρονται στην εκτιμώμενη ακρίβεια μόνο του οριζώντιου ή του κατακόρυφου προσδιορισμού θέσης αντίστοιχα και προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$HDOP = \frac{\sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_E^2}}{\sigma_{URE}} , \quad (27)$$

$$VDOP = \frac{\sigma_{UP}}{\sigma_{URE}} , \quad (28)$$

όπου τα σ_N^2 σ_E^2 σ_{UP}^2 προκύπτουν από την στροφή του συστήματος Χ,Y,Z σε ένα τοποκεντρικό σύστημα North, East, Up. Επομένως προκειμένου να μετατραπεί ο $V_{\hat{x}}$ σε $V_{\hat{x}}'$ γίνεται εφαρμογή του Νόμου Μετάδοσης Μεταβλητοτήτων:

$$V_{\hat{x}}' = Q \cdot V_{\hat{x}} \cdot Q^T , \quad (29)$$

όπου $Q = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 & 0 \\ -\sin\varphi \cdot \cos\lambda & -\sin\varphi \cdot \sin\lambda & \cos\varphi & 0 \\ \cos\varphi \cdot \cos\lambda & \cos\varphi \cdot \sin\lambda & \sin\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ είναι ο πίνακας στροφής μεταξύ των δύο συστημάτων.

- Ο δείκτης TDOP (χρονικός δείκτης- *Time DOP*) που αφορά στην επίδραση του συγχρονισμού των χρονομέτρων του δέκτη και του δορυφόρου και ισούται με:

$$TDOP = \frac{\sigma_{ctb}}{\sigma_{URE}} . \quad (30)$$

Συνοψίζοντας:

Η ακρίβεια (accuracy) προσδιορισμού θέσης με χρήση του συστήματος GPS εξαρτάται από δύο παράγοντες:

- Την ακρίβεια της εκάστοτε μέτρησης της ψευδοαπόστασης (*single pseudorange measurement*), εκφρασμένη από το User Equivalent Range Error (UERE) ή από την σχετική τυπική απόκλιση σ_r . “Ο συνδυασμός της επίδρασης των αβεβαιοτήτων στις εφημερίδες των δορυφόρων, τα σφάλματα αναπαραγωγής τροχιάς, χρονομέτρου, συγχρονισμού και θορύβου του δέκτη, προβλεβλημένος στην γραμμή σύνδεσης παρατηρητή και δορυφόρου αναφέρεται ως User Equivalent Range Error (UERE) ή User Range Error (URE)” (Seeber, 2003).
- Τη γεωμετρική ισχύ του σχηματισμού των δορυφόρων που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης. Η σχέση ανάμεσα στα σ_r και τη συνεπαγόμενη τυπική απόκλιση προσδιορισμού θέσης, σ' , περιγράφεται από μία βαθμωτή ποσότητα η οποία χρησιμοποιείται συχνά στην πλοήγηση και ονομάζεται δείκτης γεωμετρικής ισχύος (*Dilution of Precision- DOP*). Η σχέση που συνδέει τα τρία μεγέθη είναι:

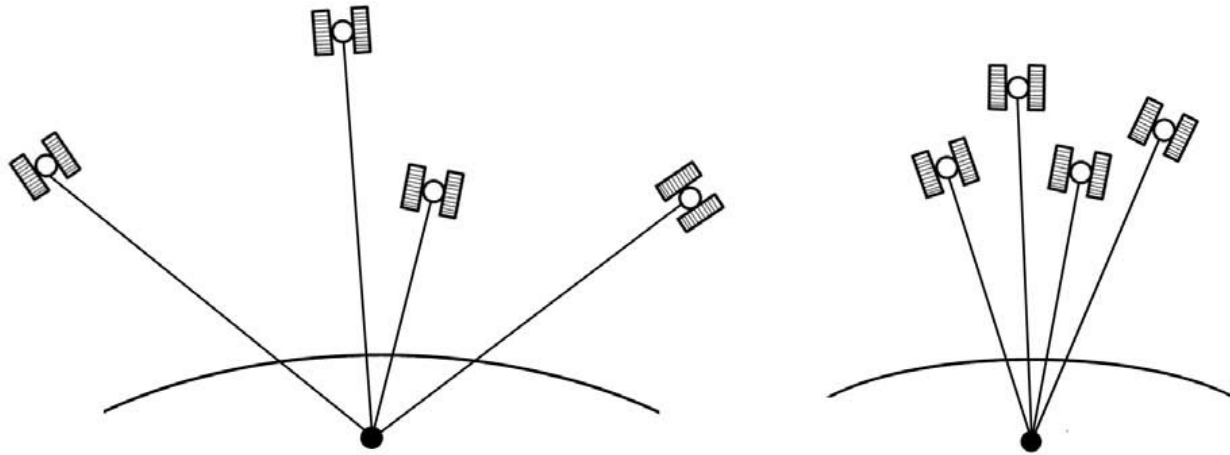
$$\sigma' = DOP \cdot \sigma_r \quad . \quad (31)$$

Ανάλογα με τις παραμέτρους που ενδιαφέρει να προσδιοριστούν από τη λύση, χρησιμοποιούνται και διαφορετικοί δείκτες DOP. Έτσι για τον τρισδιάστατο προσδιορισμό θέσης χρησιμοποιείται ο PDOP ($\sigma_p = PDOP \cdot \sigma_r$), για τον οριζοντιογραφικό προσδιορισμό θέσης (*horizontal positioning*) χρησιμοποιείται ο HDOP ($\sigma_H = HDOP \cdot \sigma_r$), για τον κατακόρυφο προσδιορισμό (*vertical positioning*) ο VDOP ($\sigma_V = VDOP \cdot \sigma_r$) και για τον προσδιορισμό της διαφοράς συγχρονισμού ανάμεσα στο χρονόμετρο του δέκτη και το χρονόμετρο του δορυφόρου ο TDOP ($\sigma_T = TDOP \cdot \sigma_r$).

Ο συνδυασμός της επίδρασης στον προσδιορισμό θέσης και του διορθωτικού όρου συγχρονισμού των χρονομέτρων εκφράζεται από τον δείκτη GDOP. Ισχύει ότι:

$$GDOP = \sqrt{PDOP^2 + TDOP^2} \quad . \quad (32)$$

Στο σχήμα 11 απεικονίζονται δύο κατανομές των δορυφόρων στον ορίζοντα του δέκτη τη στιγμή της μέτρησης. Η εικόνα στα αριστερά απεικονίζει μία καλή κατανομή, η οποία συνεπάγεται χαμηλή τιμή του δείκτη GDOP, ενώ η εικόνα στα δεξιά απεικονίζει μία κακή κατανομή δορυφόρων, η οποία οδηγεί σε υψηλές τιμές του δείκτη GDOP.



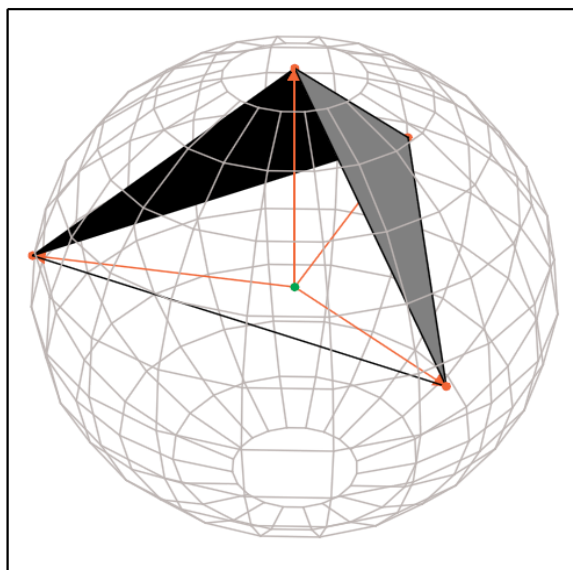
Σχήμα 11: Σχέση μεταξύ γεωμετρίας δορυφόρων και PDOP. Αριστερά: Καλή γεωμετρία Δορυφόρων → Χαμηλή τιμή του δείκτη PDOP, Δεξιά: Κακή γεωμετρία Δορυφόρων συνεπάγεται Υψηλή τιμή του δείκτη PDOP. (Πηγή: Seeber, 2003)

Η τιμή του δείκτη GDOP συχνά συσχετίζεται με τον “όγκο ορατότητας” (*viewing volume*). Στην περίπτωση τεσσάρων ορατών δορυφόρων, οι κορυφές του τετραέδρου προκύπτουν από τις τομές των διανυσμάτων, που σχηματίζονται με αρχή το σημείο του δέκτη και πέρας τον κάθε δορυφόρο, με μία μοναδιαία σφαίρα με κέντρο τη θέση του δέκτη (Σχήμα 12) . Η τιμή του δείκτη PDOP είναι αντιστρόφως ανάλογη με την τιμή του όγκου του τετραέδρου. (Langley, 1999)

$$PDOP \propto \frac{1}{V} . \quad (33)$$

Στο σχήμα 12 απεικονίζεται το τετράεδρο ορατότητας με τον ένα δορυφόρο στο ζενίθ του δέκτη και τους άλλους 3 να σχηματίζουν γωνίες ύψους 10 μοιρών με τον ορίζοντα του δέκτη. Μεγιστοποιώντας το εμβαδό του τετραέδρου ελαχιστοποιείται η τιμή του δείκτη PDOP.

Επίσης, οι Yarlagada et al (2000) αποδεικνύουν με μαθηματικό τρόπο ότι αυξάνοντας τον αριθμό των ορατών δορυφόρων που συμμετέχουν στον προσδιορισμό θέσης η τιμή του GDOP μειώνεται. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι στη γενική περίπτωση, οι τιμές του δείκτη VDOP είναι υψηλότερες των αντίστοιχων του δείκτη HDOP λόγω της γεωμετρίας του δορυφορικού σχηματισμού (οι δορυφόροι είναι διεσπαρμένοι στο οριζόντιο επίπεδο ενώ προφανώς δεν είναι δυνατή η μέτρηση κάτω από τον ορίζοντα του δέκτη).



Σχήμα 12: Τετράεδρο Ορατότητας με τον ένα δορυφόρο στο ζενίθ του δέκτη και τους άλλους 3 να σχηματίζουν γωνίες ύψους 10 μοιρών με τον ορίζοντα του δέκτη. (Πηγή: Langley,1999)

Error Source	Elevation Angle [deg]								
	5	10	15	20	30	40	50	60	90
Residual ionosphere	1322	1183	1060	950	772	641	582	582	582
OD & TS	67	67	67	67	67	67	67	67	67
Residual Troposphere	135	75	51	39	27	21	18	16	14
Thermal Noise, Interference, Multipath Random	20	20	19	18	18	17	17	17	17
Multipath Bias	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Satellite BGD	65	65	65	65	65	65	65	65	65
Code-Carrier Ionospheric Divergence	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Total (1-sigma error [cm])	1335	1192	1068	959	782	653	595	595	595
Total + 10% Margin (1- sigma error [cm])	1468	1311	1175	1055	860	718	655	655	655

Πίνακας 2: Μεταβολή της τιμής του σφάλματος UERE για διάφορες γωνίες ύψους. (Πηγή: Κατσιγιάννη, 2011)

Στον πίνακα 2 παρουσιάζεται η μεταβολή των διαφόρων σφαλμάτων που υπεισέρχονται στις μετρήσεις GPS ανάλογα με την επιλογή της γωνίας ύψους. Στην τελευταία γραμμή αναφέρεται το συνολικό σφάλμα UERE σε cm.

Τέλος, στον Πίνακα 3 παρατίθεται η κατηγοριοποίηση της “γεωμετρικής ποιότητας” των μετρήσεων ανάλογα με την τιμή του δείκτη GDOP. Τα στοιχεία του πίνακα θα χρησιμοποιούν και στη συνέχεια της διπλωματικής προκειμένου να γίνει η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ορισμένων εφαρμογών.

Τιμή DOP	Αξιολόγηση	Περιγραφή
1	Ιδανική	Είναι το πιο υψηλό επίπεδο εμπιστοσύνης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές που απαιτούν την υψηλότερη ακρίβεια κάθε χρονική στιγμή.
2-3	Εξαιρετική	Σ' αυτό το επίπεδο εμπιστοσύνης, οι μετρήσεις είναι ακριβείς για όλες τις εφαρμογές εκτός από τις πολύ ευαίσθητες
4-6	Καλή	Απεικονίζει το επίπεδο που χαρακτηρίζεται ως λιγότερο κατάλληλο για εκτέλεση εφαρμογών ακριβείας. Οι μετρήσεις θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία αξιόπιστων προτάσεων στις διαδρομές πλοήγησης.
7-8	Μέτρια	Οι μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για υπολογισμούς
9-20	Επαρκής	Αναπαριστά ένα χαμηλό επίπεδο εμπιστοσύνης και θα χρησίμευε σε μία χοντρική εκτίμηση της θέσης.
21-50	Φτωχή	Σε αυτό το επίπεδο, οι μετρήσεις είναι ανακριβείς και πρέπει να απορρίπτονται

Πίνακας 3: Κατηγοριοποίηση των τιμών GDOP σε σχέση με την γεωμετρία του Σχηματισμού. (Πηγή: Γ. Σείδος, 2009)

3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ STK

3.1 Εισαγωγή

Το Satellite Tool Kit (STK) είναι ένα προηγμένο λογισμικό μοντελοποίησης και ανάλυσης σύνθετων συστημάτων, ιδιαίτερα χρήσιμο για διαστημικές εφαρμογές, αμυντικό σχεδιασμό και πληροφοριακά συστήματα.

Αποτελείται από μια σουίτα προγραμμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν το καθένα αυτόνομα ή σε συνδυασμό μεταξύ τους για να μελετηθούν μέσω ρεαλιστικών προσομοιώσεων σύνθετα συστήματα, αποτελούμενα από δορυφόρους, αεροσκάφη, οχήματα εδάφους σε συνδυασμό με τους αισθητήρες και τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που χρησιμοποιούν στο πλαίσιο του περιβάλλοντος μίας ενιαίας αποστολής. Μέσω της δυνατότητας οπτικοποίησης της κάθε αποστολής που είναι ενσωματωμένη στο πρόγραμμα και της εύκολης δημιουργίας εμπεριστατωμένων αναφορών και ποικιλίας γραφημάτων, δίνεται η δυνατότητα της καλύτερης δυνατής κατανόησης της συμπεριφοράς του εξεταζόμενου συστήματος και της αξιολόγησης της απόδοσης του ως προς τους εκάστοτε στόχους που έχουν τεθεί.

3.2 Βασικές Δυνατότητες του STK

Παρακάτω αναφέρονται εν συντομία ορισμένες βασικές δυνατότητες του προγράμματος όσον αφορά την εισαγωγή στοιχείων του συστήματος, την οπτικοποίηση, την εκτίμηση της απόδοσης συστημάτων, την παρουσίαση των αποτελεσμάτων και την προσαρμοστικότητα του προγράμματος στις απαιτήσεις των χρηστών.

Το STK παρέχει, ακόμη και σε χρήστες με περιορισμένες γνώσεις προγραμματισμού, τη δυνατότητα φόρτωσης ή δημιουργίας πορείας οποιουδήποτε οχήματος (εδάφους, θαλάσσης, αέρα ή διαστήματος) με στοιχεία για τη θέση και τον προσανατολισμό του, δυνατότητα συνδυασμού αυτών των πορειών με χωρικά δεδομένα ή εικόνες, τη δυνατότητα δημιουργίας πεδίου ορατότητας με προσθήκη αισθητήρων σε κάθε όχημα καθώς και διαχείρισης της γεωμετρίας, της ανάλυσης ορατότητας και κάλυψης, της διανυσματικής ανάλυσης μεταξύ στοιχείων του συστήματος καθώς και των συστημάτων και πλαισίων αναφοράς στα οποία εκφράζονται οι πορείες.

Όσον αφορά τις δυνατότητες οπτικοποίησης είναι δυνατή η απεικόνιση ολόκληρου ή μέρους του συστήματος σε στατικό ή δυναμικό χρόνο από οποιαδήποτε οπτική γωνία, η εμφάνιση δισδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων των αντικειμένων, η χρήση δισδιάστατης και τρισδιάστατης οπτικοποίησης της κίνησης των αντικειμένων σε δυναμικό χρόνο.

Όλες οι προαναφερόμενες δυνατότητες στο σύνολο τους συμβάλουν στην καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας και απόδοσης των συστημάτων μέσω των οπτικών ενδείξεων που παρέχονται από το πρόγραμμα και βοηθούν στην αξιολόγηση εναλλακτικών προτάσεων σχεδιασμού. Με τον τρόπο αυτό, το STK αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο σε εφαρμογές όπως τα συστήματα πλοήγησης, οι κινητές επικοινωνίες, η διασύνδεση τηλεπικοινωνιακών κόμβων, οι επίγειες ή/και δορυφορικές πλατφόρμες αισθητήρων παρατήρησης της Γης, τα συστήματα δορυφορικών σχηματισμών και επίγειων σταθμών σε διάφορα γεωγραφικά πλάτη κ.ά.

Μία καλύτερη αντίληψη για την απόδοση των συστημάτων δίνεται χάρη στη δυνατότητα μοντελοποίησης των περιορισμών (γεωμετρικών, ορατότητας και οπτικού πεδίου), τις αναφορές και τα γραφήματα ποιοτικών και ποσοτικών δεικτών που μπορούν πολύ εύκολα να εξαχθούν από το STK καθώς και στη δυνατότητα καθορισμού χρονικών περιόδων και ενεργοποίησης συμβάντων σε καθορισμένες χρονικές στιγμές.

Το STK παρέχει τη δυνατότητα διαδραστικής παρουσίασης των αποτελεσμάτων τρισδιάστατα, με αποθηκευμένες θέσεις λήψης και πορείες της κάμερας, δημιουργία επαγγελματικών εικόνων και video μέσα σε λίγα λεπτά και εύκολη μεταφορά των σεναρίων σε άλλο υπολογιστή.

Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα προσαρμογών ορισμένων εφαρμογών και την δημιουργία ροών εργασιών για τη διευκόλυνση και την ταχύτερη εκτέλεση των εργασιών του χρήστη. Το πρόγραμμα χαρακτηρίζεται από διαδραστικότητα με βασικά εμπορικά πακέτα αλλά και γλώσσες προγραμματισμού (ένα παράδειγμα αποτελεί το matlab interface του STK). Επίσης το STK δίνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης στο πρόγραμμα διαφόρων μορφότυπων αρχείων αστροδυναμικών και γεωχωρικών εφαρμογών, εφαρμογών μοντελοποίησης καθώς και πολλών άλλων εφαρμογών. Μέσω της λειτουργικής μονάδας STK Integration Module, ενισχύονται οι δυνατότητες αυτοματοποίησης και ενσωμάτωσης που παρέχονται από το STK. Ο χρήστης μπορεί να αυτοματοποιήσει επαναλαμβανόμενες εργασίες έξω από το περιβάλλον του προγράμματος, παραδείγματος χάριν σε μία σελίδα HTML. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει στον χρήστη την ενσωμάτωση του STK με άλλα λογισμικά, όπως το Microsoft Excel ή το MATLAB, και την ανάπτυξη εφαρμογών προσαρμοσμένων στις ανάγκες του χρήστη, οι οποίες όμως θα αξιοποιούν τις πλούσιες βιβλιοθήκες του STK.

Παρότι το STK στις πρώτες εκδόσεις του προοριζόταν κυρίως για τη μελέτη, το σχεδιασμό και την αξιολόγηση δορυφορικών συστημάτων, οι τωρινές του δυνατότητες το καθιστούν ένα εργαλείο εξίσου κατάλληλο για τη μελέτη συστημάτων που πέραν των διαστημικών εφαρμογών εκτείνονται εξίσου σε εφαρμογές που αφορούν αποστολές αεροσκαφών, εφαρμογές GIS, τηλεπικοινωνιακά συστήματα και πλήθος άλλων εφαρμογών. Τη διεύρυνση αυτή των δυνατοτήτων του προγράμματος φανερώνει και η αλλαγή της εμπορικής ονομασίας του στην τελευταία έκδοση που κυκλοφόρησε από Satellite Tool Kit σε System Tool Kit.

Μετά την σύντομη αναφορά των δυνατοτήτων του προγράμματος ακολουθεί η παρουσίαση του τρόπου δόμησης και λειτουργίας του.

3.3 Δομή του STK- Βασικές Λειτουργικές Ομάδες

Το STK αποτελείται από πολλές λειτουργικές ομάδες (*modules*), κάθε μία από τις οποίες αφορά σε ένα συγκεκριμένο τύπο εφαρμογών και οι οποίες όμως, στο σύνολο τους, συνθέτουν την κεντρική σουίτα εφαρμογών του STK.

Ακολουθεί η σύντομη αναφορά στις βασικότερες λειτουργικές ομάδες που συνθέτουν το πρόγραμμα, καθώς και στις βασικές δυνατότητες που παρέχει η καθεμία:

STK Basic

Πρόκειται για τη βασική και δωρεάν έκδοση του STK, ένα δισδιάστατο και τρισδιάστατο περιβάλλον μοντελοποίησης για την αξιολόγηση της απόδοσης συστημάτων. Χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση σύνθετων συστημάτων που μπορεί να αποτελούνται για παράδειγμα από αεροσκάφη, δορυφόρους, οχήματα εδάφους και τους αισθητήρες τους, στο πλαίσιο του περιβάλλοντος μίας αποστολής. Οι βασικές δυνατότητες που παρέχει είναι η εισαγωγή ή δημιουργία και η διαχείριση λεπτομερών αναλυτικών μοντέλων, η αξιολόγηση της απόδοσης ενός συστήματος στη βάση των στόχων μίας αποστολής (μέσω των υπολογισμών πρόσβασης) και η δυνατότητα απόδοσης των αποτελεσμάτων μέσω αναφορών, διαγραμμάτων και δισδιάστατων και τρισδιάστατων προσομοιώσεων της αποστολής (σε πραγματικό ή στατικό χρόνο).

STK Pro

Παρέχει τη δυνατότητα πιο εξελιγμένης μοντελοποίησης με χρήση περιορισμών κάλυψης, ευέλικτων σχημάτων (ή διατάξεων) αισθητήρων, δυνατότητα πολύπλοκων συνδέσεων ορατότητας, περισσότερες πορείες (ή ίχνη πορειών) αντικειμένων και δυνατότητα εισαγωγής ψηφιακών δεδομένων εδάφους (*digital terrain data*).

Συμβάλει στην πιο ρεαλιστική προσομοίωση των μοντέλων καθώς δίνει την δυνατότητα επιβολής περιορισμών στη συμπεριφορά τους βάσει γεωγραφικών κριτηρίων και κριτηρίων κίνησης. Δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να καθορίσει περιοχές εκτός κάλυψης καθώς και να δημιουργήσει διασυνδεδεμένα συστήματα με χρήση καθορισμένων ομάδων αντικειμένων και πολλαπλών συνδέσεων μεταξύ των αντικειμένων (STK Chains).

Air Craft Mission Modeler

Χρησιμοποιεί συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αεροσκαφών που είναι βασισμένα σε εμπειρικά ντετερμινιστικά μοντέλα ατράκτων (*airframe*) προκειμένου να δημιουργήσει πιο ρεαλιστικές πορείες πτήσης αεροσκαφών.

Astrogator

Πρόκειται για ένα εξειδικευμένο εργαλείο ανάλυσης για εφαρμογές που αφορούν διαστημικούς ελιγμούς και τον σχεδιασμό της πορείας διαστημικών σκαφών. Μπορεί να υποστηρίξει ένα απεριόριστο αριθμό συμβάντων για την μοντελοποίηση της τροχιάς διαστημικών σκαφών, περιλαμβάνοντας υπολογιστικά μοντέλα για θεωρητικά "στιγμιαίες" (*impulsive burns*) αλλά και σταδιακές (*finite burns*) αλλαγές τροχιάς, καθώς και τη δυνατότητα προσομοίωσης υψηλής πιστότητας της τροχιάς ενός δορυφόρου.

Attitude

Πρόκειται για ένα εργαλείο που αφορά στη μοντελοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς και την προσομοίωση αντικειμένων στο STK. Παρέχει τα απαραίτητα εργαλεία (*system engineering tools*) ώστε σε συνδυασμό με τις δυνατότητες παραγωγής έγκυρων εφημερίδων από το πρόγραμμα, να μπορεί ο χρήστης να αξιολογεί τη δυναμική συμπεριφορά συστημάτων. Υποστηρίζει την δημιουργία και ανάλυση απεριόριστων προφίλ συμπεριφοράς (*attitude profiles*) ώστε να βρεθεί το κατάλληλο ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε αποστολής. Παρέχει τη δυνατότητα τρισδιάστατης οπτικοποίησης της συμπεριφοράς του δορυφόρου (*3D attitude View*) και προσομοίωσης της όπως προβάλλεται σε οποιοδήποτε πλαίσιο αναφοράς.

Conjunction Analysis Tool

Παρέχει μια πολυεπίπεδη προσέγγιση όσον αφορά την αναγνώριση και τον προσδιορισμό επικίνδυνα κοντινών προσεγγίσεων (*close approach situations*) όπως το ενδεχόμενο σύγκρουσης μεταξύ δορυφόρων. Αξιοποιεί την βάση δορυφορικών δεδομένων της υπηρεσίας NORAD (*North American Aerospace Defense Command*)⁹, εκτελεί τους υπολογισμούς με πολύ μεγάλη ταχύτητα, παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού ελλειψοειδών σφάλματος και στις τρεις συνιστώσες της τροχιάς του δορυφόρου (*tangential, cross-track, normal*) και παράγει αναφορές και λύσεις που αφορούν στη πιθανότητα σύγκρουσης μεταξύ αντικειμένων.

Coverage

Παρέχει ένα ολοκληρωμένο σύνολο δυνατοτήτων προσδιορισμού του βαθμού αποτελεσματικότητας μιας καθορισμένης ομάδας αντικειμένων σε μια καθορισμένη περιοχή ενδιαφέροντος και για δεδομένο χρονικό διάστημα. Μερικές από τις δυνατότητες που παρέχει είναι ο καθορισμός της περιοχής μελέτης από το χρήστη, η ολοκληρωμένη στατιστική ανάλυση όλων των δεδομένων και η εξομαλυσμένη χρωματική απόδοση των ισαριθμικών καμπυλών που αναφέρονται σε κάποιον από τους κατάλληλους δείκτες κάλυψης.

⁹ Ο NORAD είναι ένας διακρατικός οργανισμός μεταξύ των ΗΠΑ και του Καναδά που είναι επιφορτισμένος με τον αεροδιαστημικό έλεγχο της Βόρειας Αμερικής.

Communications

Δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού και ανάλυσης λεπτομερών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Ο χρήστης μπορεί να προσθέσει πομπούς και δέκτες σε αντικείμενα του STK προκειμένου να διευκολύνει την γρήγορη ανάλυση αποστολών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, των δορυφορικών ζεύξεων που παρατηρούνται από επίγειους σταθμούς, την εκτίμηση πιθανών διαλείψεων επικοινωνίας μεταξύ επίγειων σταθμών και δορυφόρων, κ.ά.

Radar

Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό και την ανάλυση συστημάτων radar. Οι χρήστες μπορούν να προσθέσουν μοντέλα radar και RCS σε άλλα αντικείμενα του STK προκειμένου να πραγματοποιήσουν γρήγορες αναλύσεις συστημάτων radar. Το RCS (*Radar Cross Sections*) είναι ένα μέτρο της ανιχνευσιμότητας ενός αντικειμένου από ένα Radar. Μεγαλύτερη τιμή του RCS υποδηλώνει μεγαλύτερη δυσκολία ανίχνευσης του συγκεκριμένου αντικειμένου από ένα Radar. Μερικές από τις δυνατότητες του συγκεκριμένου module είναι η δημιουργία μοντέλων RCS, η δημιουργία μοντέλων συμβατικών Radar και Radar συνθετικού ανοίγματος (*synthetic aperture radar*, SAR), η δυνατότητα χρήσης πολλαπλών τύπων κεραιών και η δυνατότητα προσομοίωσης συστημάτων radar σε mono-static ή bi-static λειτουργία.

Space Environment and Effects Tool (SEET)

Αυτό το εργαλείο έχει σχεδιαστεί προκειμένου να διευκολύνει σχεδιαστές διαστημικών ατράκτων, αναλυτές και διαχειριστές διαστημικών αποστολών να αξιολογήσουν τις επιπτώσεις του διαστημικού περιβάλλοντος πάνω σε ένα διαστημικό σκάφος ή διαστημική πλατφόρμα, προκειμένου να κατανοηθούν και να αντιμετωπιστούν οι συνθήκες που επικρατούν στο διάστημα (π.χ. διαστημικός καιρός, επιδράσεις της ιονόσφαιρας και του γεωμαγνητικού πεδίου, κ.ά.) και επηρεάζουν τη λειτουργία τους.

Urban Propagation Extension

Πρόκειται για μία επέκταση (*extension*) του STK Communications Module που παρέχει πολύ γρήγορες εκτιμήσεις τις απώλειες του σήματος τηλεπικοινωνιακών διαύλων σε συγκεκριμένες θέσεις, σε αστικό περιβάλλον.

STK Integration Module

Επιτρέπει την αυτοματοποίηση επαναληπτικών διαδικασιών και έξω από το περιβάλλον της εφαρμογής. Δίνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης στην εφαρμογή και παράλληλης χρήσης και άλλων λογισμικών και εργαλείων, όπως το Microsoft Excel και το Autocad.

3.4 Σενάρια και Βασικά Αντικείμενα στο STK

3.4.1 Σενάρια στο STK

Ένα σενάριο αποτελεί το υψηλότερου επιπέδου αντικείμενο στο STK. Τα σενάρια περιλαμβάνουν τα επιμέρους αντικείμενα και καθιστούν το περίγραμμα για μία προτεινόμενη σειρά γεγονότων-συμβάντων (events) που μπορούν να οπτικοποιηθούν από το πρόγραμμα.

Από τη βασική σελίδα ιδιοτήτων του σεναρίου ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τον χρόνο εκκίνησης και τερματισμού του σεναρίου, την εποχή αναφοράς καθώς και το χρονικό βήμα οπτικοποίησης βασικών παραμέτρων του σεναρίου. Επίσης καθορίζει τις βασικές μονάδες που θα χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή και εξαγωγή μεγεθών όπως οι μονάδες χρόνου, απόστασης, μάζας, θερμοκρασίας, δύναμης, συχνότητας, γεωγραφικού μήκους και πλάτους. Επίσης καθορίζεται το αρχείο με τις παραμέτρους προσανατολισμού της Γης (λόγω της κίνησης του άξονα περιστροφής της όπως αναφέρεται στο δεύτερο Κεφάλαιο).

3.4.2 Αντικείμενα στο STK

Τα βασικά αντικείμενα στο STK είναι τα παρακάτω:

Όχημα (Vehicle) - Κατηγορία Αντικειμένων

Ως τέτοια θεωρούνται οποιαδήποτε κινητά αντικείμενα ξηράς, θαλάσσης, αέρα ή διαστήματος. Στο STK, τα οχήματα χωρίζονται σε 6 κατηγορίες: δορυφόροι, οχήματα εδάφους, αεροσκάφη, πλοία, οχήματα εκτόξευσης και πύραυλοι.

Δορυφόρος (Satellite)

Προσομοιώνει την πορεία και την συμπεριφορά δορυφόρων που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη ή κάποιον άλλον πλανήτη και τους φυσικούς δορυφόρους τους.

Όχημα Εδάφους (Ground Vehicle)

Προσομοιώνει την πορεία και την συμπεριφορά οχημάτων εδάφους.

Αεροσκάφος (Aircraft)

Προσομοιώνει την πορεία και συμπεριφορά αεροσκαφών.

Πλοίο (*Ship*)

Προσομοιώνει την πορεία και την συμπεριφορά πλοίων ή οποιασδήποτε άλλης θαλάσσιας πλατφόρμας.

Όχημα Εκτόξευσης (*Launch Vehicle*)

Προσομοιώνει την πορεία και την συμπεριφορά οχημάτων εκτόξευσης ή αλλιώς πυραύλων εκτόξευσης.

Πύραυλος (*Missile*)

Προσομοιώνει την πορεία και την συμπεριφορά βαλλιστικών πυραύλων. Γενικά ως πύραυλος (*Rocket*) νοείται ένα όχημα που ακολουθεί ελλειπτική τροχιά η οποία ξεκινά και τελειώνει στην επιφάνεια της Γης.

Αστέρας (*Star*)

Ένα καθορισμένο σημείο στην ουράνια σφαίρα που αναπαριστά ένα άστρο και χαρακτηρίζεται από τη θέση του και τη φωτεινότητά του.

Πλανήτης (*Planet*)

Αντικείμενο του ηλιακού συστήματος που περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο.

Εγκατάσταση (*Facility*)

Μία καθορισμένη τοποθεσία στην επιφάνεια της Γης που αναπαριστά σταθμούς εδάφους, σημεία εκτόξευσης, σταθμούς παρακολούθησης- εντοπισμού (*tracking stations*) ή άλλες υποδομές που παρέχουν άλλες υποστηρικτικές λειτουργίες σε δορυφόρους.

Υπάρχει διαθέσιμη βάση δεδομένων της AGI, ενσωματωμένη στο STK που περιλαμβάνει επίγειες διαστημικές εγκαταστάσεις σε παγκόσμια κλίμακα.

Στόχος (*Target*)

Σημείο ενδιαφέροντος στο έδαφος, το οποίο θεωρείται ακίνητο. Υπάρχει και η δυνατότητα καθορισμού μίας ολόκληρης γραμμικής ή επιφανειακής περιοχής ως στόχου με χρήση των αντικειμένων Line Target και Area Target αντίστοιχα.

Αισθητήρες (*Sensors*)

Οι αισθητήρες μπορεί να αναπαριστούν συσκευές εκπομπής ή λήψης σημάτων ή παλμών (π.χ. radar, laser) που στοχεύουν σε κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση, καθώς και αισθητήριες

διατάξεις/συστοιχίες αισθητήρων με τα σχετικά χαρακτηριστικά τους αλλά και τους περιορισμούς τους. Μπορούν να συνδεθούν ως τμήμα κάποιου άλλου αντικειμένου όπως ενός οχήματος, μιας εγκατάστασης ή ενός στόχου. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσδιορίσουν περιοχές όπως το περιορισμένο οπτικό πεδίου ενός δορυφόρου.

Τα αντικείμενα που αναφέρονται παραπάνω αποτελούν στοιχεία της βασικής (και δωρεάν) έκδοσης του STK. Ωστόσο, στο Κεντρο Γεωπληροφορικής του ΕΜΠ διατίθεται η πλήρης έκδοση του STK, η οποία περιλαμβάνει επιπλέον modules και επιτρέπει πέραν των προαναφερόμενων βασικών αντικειμένων να χρησιμοποιηθούν επιπλέον αντικείμενα, όπως: Receiver, Transmitter, Communication System (αντικείμενα του module Communications), Coverage Definition, Figure of Merit (STK/ Coverage), Attitude Coverage, Attitude Coverage FOM (STK/ Attitude και STK/ Coverage), Radar (STK Radar), Constellation, Chain και MTO (STK Professional Edition). Τα κυριότερα από τα εν λόγω επιπρόσθετα αντικείμενα, μερικά από τα οποία θα χρησιμοποιηθούν σε επόμενο στάδιο της διπλωματικής, παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια:

Περιοχές Κάλυψης (*Coverage Definition*)

Αντικείμενο του STK που επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει την περιοχή κάλυψης, συμπεριλαμβανομένης της περιοχής ενδιαφέροντος, τον καθορισμό στατικών και δυναμικών γραφημάτων (εφόσον είναι διαθέσιμα), καθώς και άλλες παραμέτρους κάλυψης.

Δείκτες Αξιολόγησης - *Figures Of Merit (FOM)*

Πρόκειται για αντικείμενα του STK/Coverage που επιτρέπουν στο χρήστη να αξιολογήσει την ποιότητα κάλυψης που παρέχεται από διαθέσιμα αντικείμενα (*assets*) ή αντικείμενα των οποίων η κάλυψη που παρέχουν μελετάται για κάποια δεδομένη περιοχή. Ο όρος *assets* χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει "αντικείμενα του STK που επιλέγονται για χρήση παροχής κάλυψης σε μία περιοχή κάλυψης. Μπορεί να πρόκειται για μία εγκατάσταση, ένα στόχο, οποιοδήποτε είδος οχήματος, αισθητήρα, πομπό ή δέκτη, αλυσίδα αντικειμένων ή δορυφορικό σχηματισμό. Επίσης διαθέσιμα αντικείμενα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της κάλυψης και κάποιου άλλου αντικειμένου, πέρα από την περιοχή κάλυψης.

Σχηματισμός (*Constellation*)

Ένα σύνολο αντικειμένων που αφότου καθοριστεί, αντιμετωπίζεται από το πρόγραμμα ως ένα και μόνο αντικείμενο. Διευκολύνει πολύ στη χρήση του προγράμματος όταν υπάρχει ανάγκη εισαγωγής πολύ μεγάλου αριθμού αντικειμένων (π.χ. οι δορυφόροι GPS, GLONASS, GALILEO κ.ά.).

Attitude Coverage¹⁰

Συνδυάζει τις λειτουργίες του STK/ Attitude και του STK/ Coverage ώστε να παρέχει τη δυνατότητα

¹⁰ Attitude: Ο προσανατολισμός των 3 κυρίων αξόνων ενός αντικείμενο σε σχέση με κάποιο σύστημα αναφοράς. Επιτρέπει στο χρήστη να προσδιορίσει τον στατικό(κάποια δεδομένη χρονική στιγμή) ή δυναμικό (με την πάροδο του χρόνου) προσανατολισμό ενός οχήματος.

ανάλυσης της κάλυψης σε διάφορες διευθύνσεις, με χρήση των διαθέσιμων Δεικτών Αξιολόγησης του STK/Attitude, οι οποίοι επιτρέπουν την αξιολόγηση της ποιότητας κάλυψης σε διαφορετικές διευθύνσεις.

3.5 Εισαγωγή Οχημάτων στο STK

Οι κυριότεροι τύποι οχημάτων που θα μας απασχολήσουν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι οι δορυφόροι, τα οχήματα εδάφους και τα πλοία. Η εισαγωγή δορυφορικών τροχιών στο STK μπορεί να γίνει με ένα πλήθος αναπαραγωγέων (*propagators*) τροχιάς, δηλαδή κατάλληλων μαθηματικών αλγορίθμων που μετά την εισαγωγή της αρχικής θέσης του δορυφόρου και με χρήση διαφορετικών φυσικών μοντέλων από τον καθένα, προεκτείνουν την πορεία του για το καθορισμένο από το χρήστη χρονικό διάστημα στο μέλλον. Για την εισαγωγή των πορειών οχημάτων εδάφους και πλοίων χρησιμοποιείται ο αναπαραγωγέας Great Arc Propagator, ενώ για οποιοδήποτε είδος οχήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι STK External και Real Time propagators.

3.5.1 Εισαγωγή Δορυφορικών Τροχιών στο STK

Το STK διαθέτει ένα πλήθος αναπαραγωγέων δορυφορικών τροχιών διαφορετικής πολυπλοκότητας ο καθένας, ανάλογα με τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούν προκειμένου να προσομοιάσουν με λιγότερο ή περισσότερο ρεαλιστικό τρόπο τις φυσικές διαταραχές στις οποίες υπόκειται η τροχιά ενός δορυφόρου. Οι διαταραχές αυτές μπορεί να είναι είτε συντηρητικές (π.χ. από τις βαρυτικές επιδράσεις πολλαπλών ουράνιων σωμάτων, παλίρροιες κ.ά.), είτε μη συντηρητικές (π.χ. από τις επιδράσεις αεροπέδησης εξ αιτίας τριβών, πίεσης από ποικίλες ακτινοβολίες στο διάστημα κ.ά.). Ο εκάστοτε κατάλληλος αναπαραγωγέας δορυφορικών τροχιών επιλέγεται ανάλογα με τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα, καθώς και τον σκοπό και την απαιτούμενη ακρίβεια της αποστολής ενδιαφέροντος.

Two Body Propagator

Κατά την αναπαραγωγή της τροχιάς του δορυφόρου λαμβάνει υπ' όψιν στους υπολογισμούς μόνο τη δύναμη της βαρύτητας που προέρχεται από τη Γη, την οποία και θεωρεί ως μία σημειακή μάζα. Το συγκεκριμένο αυτό πρόβλημα στις εφαρμογές της διαστημικής Μηχανικής ονομάζεται **πρόβλημα των δύο σωμάτων** και είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθότι σε αυτό μπορούν να αναχθούν πολλά φαινόμενα, όπως για παράδειγμα η κίνηση των πλανητών, αλλά και των φυσικών ή τεχνητών δορυφόρων ενός πλανήτη.

J2 Perturbation Propagator

Ο J2 propagator κατά τον υπολογισμό μίας τροχιάς λαμβάνει υπ' όψιν τις μακροχρόνιες μη περιοδικού χαρακτήρα (*secular*) επιδράσεις ή αλλιώς αποκαλούμενες διαταραχές ή παρέλξεις στα τροχιακά στοιχεία του δορυφόρου, οι οποίες οφείλονται στην επιπλάτυνση της Γης.

Ο συντελεστής J2 είναι ο χαμηλότερου βαθμού αρμονικός συντελεστής ζώνης του αναπτύγματος σε σφαιρικές αρμονικές συναρτήσεις του γήινου δυναμικού της βαρύτητας, ο οποίος αντιπροσωπεύει τις κύριες επιπτώσεις στο βαρυτικό πεδίο που οφείλονται στην επιπλάτυνση της Γης. Ο J2 propagator λαμβάνει υπ' όψιν τις πρώτης τάξης μη περιοδικές επιδράσεις του συντελεστή J2.

J4 Perturbation Propagator

Ο J4 Propagator περιλαμβάνει στους υπολογισμούς τροχιών τις μη περιοδικές επιδράσεις πρώτης και δεύτερης τάξης του συντελεστή J2, και πρώτης τάξης του αρμονικού συντελεστή J4. Τα αποτελέσματα που δίνει έχουν πολύ μικρή διαφορά από αυτά του J2 propagator, καθώς η τιμή της επίδρασης δεύτερης τάξης του συντελεστή J2 είναι πολύ μικρή και η τιμή του συντελεστή J2 είναι κατά τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή του J4.¹¹

Κανένας από τους τρεις παραπάνω "αναπαραγωγείς" τροχιάς δεν λαμβάνει υπ' όψιν στους υπολογισμούς τις επιδράσεις στην τροχιά λόγω ατμοσφαιρικής τριβής, ηλιακής ακτινοβολίας ή μεταβολών στο γήινο βαρυτικό πεδίο λόγω επιδράσεων του Ήλιου, της Σελήνης και άλλων ουράνιων σωμάτων. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε αρχικές (πρώιμες) αναλύσεις, όπου δεν υπάρχουν ακριβή δεδομένα για το δορυφορικό όχημα και που ως στόχο έχουν την ανάλυση γενικών τάσεων στην συμπεριφορά ή απόδοση του εκάστοτε υπό μελέτη δορυφορικού συστήματος. Ο προσομοιωτής J2 χρησιμοποιείται τυπικά για τον υπολογισμό δορυφορικών τροχιών για χρονικό διάστημα ανάλυσης μερικών εβδομάδων ή λίγων μηνών, ενώ ο J4 για αναλύσεις που αφορούν μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα της τάξης των μερικών μηνών ή λίγων ετών.

Οι λύσεις που προκύπτουν από τον J2 και J4 perturbation propagator είναι προσεγγιστικές, βασισμένες στα μέσα Κεπλέρια στοιχεία (βλέπε δεύτερο κεφάλαιο). Όπως αναφέρεται και παραπάνω, οι δυνάμεις που ασκούνται σε έναν δορυφόρο προκαλούν μη περιοδικές και περιοδικές μεταβολές (μικρού εύρους) των Κεπλέριων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα οι συντελεστές J2 και J4 προκαλούν μόνο περιοδικές ταλαντεύσεις στον ημιάξονα, την εκκεντρότητα και την κλίση της έλλειψης της τροχιάς, ενώ παράγουν μη περιοδικές παρεκκλίσεις (drifts) στο όρισμα του περιγείου ω , στην ορθή αναφορά Ω και την μέση ανωμαλία M . Οι J2 και J4 propagators μοντελοποιούν μόνο τις μη περιοδικές παρεκκλίσεις των Κεπλέριων στοιχείων. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι σε ορισμένες δορυφορικές αποστολές και στη διαδικασία του σχεδιασμού γίνεται συνήθως προσπάθεια να αξιοποιηθεί η επικρατούσα μη περιοδική παρέκκλιση που οφείλεται στο συντελεστή J2, προκειμένου να μελετηθεί με πιο ρεαλιστικό τρόπο η τροχιά ενός δορυφόρου.

Για την χρήση ενός από τους παραπάνω αναπαραγωγείς τροχιάς ο χρήστης καθορίζει την αρχική χρονική στιγμή στην οποία αναφέρονται οι αρχικές συντεταγμένες του δορυφόρου, την χρονική στιγμή λήξης της αναπαραγωγής της τροχιάς του καθώς και το χρονικό βήμα που θα χρησιμοποιηθεί, το επιθυμητό σύστημα αναφοράς συντεταγμένων (π.χ. ICRF, Inertial, Fixed κ.ά.), τον τύπο των συντεταγμένων (π.χ. Κεπλέρια στοιχεία, καρτεσιανές συντεταγμένες και ταχύτητες κ.ά.) και προφανώς τις τιμές των παραμέτρων/συντεταγμένων που εισάγονται.

¹¹Πηγή: σελ 108, (Δελιακάρσκι, 2010): "...γεγονός που αποδεικνύει η σημαντικά μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή C2 (κατά 3 τάξεις μεγέθους)...", όπου όπως θα αναφερθεί και σε επόμενο κεφάλαιο J2=C2.

SGP4 Propagator

Ο συγκεκριμένος αναπαραγωγέας τροχιάς που είναι γνωστός με την ονομασία Simplified General Perturbations 4 (SGP4) Propagator λαμβάνει υπ' όψιν στους υπολογισμούς τις μη περιοδικές και περιοδικές μεταβολές λόγω της επιπλάτυνσης της Γης, μεταβολές στο γήινο πεδίο βαρύτητας που οφείλονται στις βαρυτικές επιδράσεις του Ήλιου και της Σελήνης, καθώς και τις επιδράσεις λόγω ατμοσφαιρικής τριβής. Ο SGP4 χρησιμοποιείται με στοιχεία εισόδου τα αρχεία TLE (Two Line Elements) που παρέχονται από τη NASA και περιέχουν ένα συγκεκριμένο σετ μέσων τροχιακών Κεπλέρων στοιχείων του διαστημικού αντικειμένου στο οποίο αναφέρεται το αρχείο. Στον παρακάτω πίνακα 4 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αρχείου TLE.

GIOVE-A									
1	28922U	05051A	13173.89956478	.00000003	00000-0	00000+0	0	1135	
2	28922	56.3589	118.6528	0006319	359.6190	41.2398	1.69429843	46423	
GIOVE-B									
1	32781U	08020A	13173.38372805	.00000065	00000-0	10000-3	0	7401	
2	32781	56.8763	153.9726	0002867	239.6263	120.3115	1.65405376	32022	
GALILEO-PFM (GSAT0101)									
1	37846U	11060A	13171.26941037	.00000008	00000-0	00000+0	0	2373	
2	37846	54.8994	112.7310	0004001	300.7671	246.4147	1.70474372	10355	
GALILEO-FM2 (GSAT0102)									
1	37847U	11060B	13171.15083536	.00000009	00000-0	00000+0	0	2408	
2	37847	54.9001	112.7329	0005047	286.0634	228.9102	1.70474624	10358	
GALILEO-FM3 (GSAT0103)									
1	38857U	12055A	13173.35422235	.00000041	00000-0	00000+0	0	1058	
2	38857	55.2191	232.5075	0004266	234.0881	125.9734	1.70473546	4310	
GALILEO-FM4 (GSAT0104)									
1	38858U	12055B	13173.87565799	.00000040	00000-0	00000+0	0	990	
2	38858	55.2195	232.4910	0003387	236.2005	123.8690	1.70473585	4318	

Πίνακας 4: Δείγμα αρχείου TLE με Κεπλέρια στοιχεία των σήμερα υπάρχοντων δορυφόρων του σχηματισμού GALILEO.

Ο αναπαραγωγέας τροχιάς SGP4 παράγει εφημερίδες στο σύστημα αναφοράς TEME (*True Equator Mean Equinox*), που βασίζεται στην εποχή αναφοράς που προσδιορίζεται στο αρχείο TLE. Τα TLE αρχεία παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα για μερικές μέρες πριν και μετά την εποχή αναφοράς τους. Για το λόγο αυτό και τα TLE στοιχεία ενός μεγάλου αριθμού δορυφόρων ανανεώνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα και είναι διαθέσιμα στο Διαδίκτυο, π.χ. στην ιστοσελίδα <http://celestrak.com/>.

GPS

Ο GPS αναπαραγωγέας τροχιάς επιτρέπει στο χρήστη να δημιουργήσει δορυφόρους GPS με χρήση των τροχιακών στοιχείων που περιλαμβάνονται στα *GPS almanac files* που εκπέμπουν οι δορυφόροι ως μέρος του μηνύματος πλοήγησης (*data message*). Η μεθοδολογία αναπαραγωγής τροχιάς που

ακολουθεί ο GPS propagator καθορίζεται από το τεχνικό εγχειρίδιο Interface Specification ICD-GPS-200, το οποίο περιλαμβάνει τα πρότυπα, κανόνες και οδηγίες που υλοποιούν τις προδιαγραφές που σχετίζονται με την διεπαφή μεταξύ του τμήματος του Διαστήματος και του τμήματος των χρηστών του συστήματος GPS.

Η ακτοφυλακή των ΗΠΑ παράγει σε καθημερινή βάση GPS almanacs στο λεγόμενο μορφότυπο SEM (*System Effectiveness Model*), τα οποία η AGI παρέχει μέσα από τον Online Server της αυτόματα στους χρήστες του STK. Κάθε αρχείο SEM περιέχει τροχιακά στοιχεία για όλους τους δορυφόρους του σχηματισμού GPS που είναι ενεργοί τη δεδομένη εποχή αναφοράς του almanac.

Πέρα από τους παραπάνω αναπαραγωγείς που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της διπλωματικής, το STK διαθέτει επιπλέον για ειδικές χρήσεις και τους εξής αναπαραγωγείς τροχιάς:

HPOP Propagator

Ο αναπαραγωγέας τροχιάς υψηλής ακρίβειας (*High Precision Orbit Propagator*) μπορεί να διαχειριστεί κυκλικές, ελλειπτικές, παραβολικές και υπερβολικές τροχιές σε αποστάσεις που κυμαίνονται από την επιφάνεια της Γης ως την τροχιά της Σελήνης και ακόμη μακρύτερα. Χρησιμοποιεί τα ίδια τροχιακά στοιχεία για να προσδιορίσει την θέση του δορυφόρου την εποχή αναφοράς με τους Two-Body, J2 και J4 propagators.

LOP Propagator

Ο αναπαραγωγέας μακροπρόθεσμης πρόβλεψης τροχιάς (*Long-Term Orbit Predictor*) παρέχει ακριβή πρόβλεψη της κίνησης της τροχιάς ενός δορυφόρου για πολλούς μήνες ή και χρόνια. Χρησιμοποιεί τα ίδια τροχιακά στοιχεία ως δεδομένα εισόδου με τους αναπαραγωγείς Two-Body, J2 και J4.

SPICE Propagator

Ο αναπαραγωγέας SPICE "διαβάζει" εφημερίδες από δυαδικά αρχεία καθορισμένου format που παράγονται από το Jet Propulsion Laboratory (JPL) της NASA προκειμένου να παράγει την τροχιά του δορυφόρου. Αν και τα αρχεία αυτά προορίζονται κυρίως για τροχιακές εφημερίδες ουρανίων σωμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου και για διαστημικά σκάφη.

Astrogator Propagator

Ο αναπαραγωγέας Astrogator παρέχει τη δυνατότητα σχεδιασμού τροχιών και ελιγμών δορυφορικών σκαφών και επιπλέον παρέχει δυνατότητες στόχευσης (*targeting*)¹².

¹² Δυνατότητα στροφής του δορυφόρου κατά τον άξονα Z προκειμένου να έχει ορατότητα σε κάποιον συγκεκριμένο στόχο.

3.5.2 Εισαγωγή Πορείας Οχήματος εδάφους και Πλοίου στο STK

Η πορεία ενός οχήματος εδάφους ή πλοίου στο STK μπορεί να γίνει με χρήση ενός από τους παρακάτω αναπαραγωγείς:

Great Arc Propagator

Αναπαραγάγει μία πορεία, σημείο προς σημείο, πάνω ή κάτω από την επιφάνεια της Γης με προσδιορισμό της θέσης, του ύψους ή του βάθους του κάθε σημείου της διαδρομής. Διαδοχικά σημεία της διαδρομής συνδέονται με τόξο μέγιστου κύκλου (Great Arc), το οποίο ανήκει σε επίπεδο που περνά από τα σημεία και το κέντρο της Γης.

Μία διαδρομή μπορεί να εισαχθεί είτε χειροκίνητα στο περιβάλλον του STK είτε με ένα κατάλληλα διαμορφωμένο αρχείο συντεταγμένων που να περιλαμβάνει όλα τα σημεία της διαδρομής. Για τη χρήση του πρέπει να οριστεί η χρονική στιγμή εκκίνησης και λήξης της διαδρομής, η μέθοδος υπολογισμού της διαδρομής (από διαδοχικές θέσεις σημείων σε διαδοχικές χρονικές στιγμές ή με τη χρήση ταχύτητας και επιτάχυνσης), η επιφάνεια αναφοράς των υψομέτρων, η συχνότητα παρεμβολής σημείων στη διαδρομή και η μέθοδος παρεμβολής των υψομέτρων που θα χρησιμοποιηθεί.

Οι ακόλουθοι δύο αναπαραγωγείς χρησιμοποιούνται για οποιοδήποτε είδος οχήματος, συμπεριλαμβανομένων και των δορυφόρων, και είναι οι εξής:

STK External Propagator

Ο STK External Propagator επιτρέπει την ανάγνωση της εφημερίδας από αρχείο, το οποίο παρέχει συνταγμένες σε ephemeris file format (*.E). Είναι ιδιαίτερα χρήσιμος σε περιπτώσεις που υπάρχει κάποια διαθέσιμη εφημερίδα που έχει συνταχθεί από άλλο πρόγραμμα αλλά είναι επιθυμητή η περαιτέρω ανάλυσή της με χρήση του STK. Το αρχείο μπορεί να περιέχει την πληροφορία της εφημερίδας, όπως η θέση και η ταχύτητα σε τακτές χρονικές στιγμές σε μία ποικιλία format και τύπων (και συστημάτων) συντεταγμένων. Τα αρχεία με αυτή τη μορφοποίηση θα συζητηθούν και πιο αναλυτικά και σε επόμενο κεφάλαιο.

Real Time Propagator

Ο Real Time Propagator επιτρέπει την αναπαραγωγή εφημερίδων της τροχιάς κίνησης οχημάτων χρησιμοποιώντας δεδομένα που λαμβάνει σε σχεδόν πραγματικό χρόνο (*near real time data*) μέσω εισόδου που έχει δημιουργηθεί με χρήση του Connect Module.

3.6 Εισαγωγή άλλων αντικειμένων στο STK

3.6.1 Constellation

Το STK δίνει τη δυνατότητα ομαδοποίησης συσχετιζόμενων αντικειμένων, όπως ένα σύνολο εγκαταστάσεων ή δορυφόρων σε ένα αντικείμενο που ονομάζεται Constellation και που μπορεί να λειτουργήσει ως τμήμα σε μία αλυσίδα αντικειμένων. Τα αντικείμενα που αποτελούν το Constellation παράλληλα το καθορίζουν.

Για να δημιουργήσουμε ένα Constellation στο STK, στο μενού εντολών Insert επιλέγουμε τον Object Catalog και στη συνέχεια το αντικείμενο Constellation. Στην σελίδα των ιδιοτήτων του, και πιο συγκεκριμένα στην σελίδα Constellation Definition ο χρήστης μπορεί να προσθέσει ή να αφαιρέσει αντικείμενα από τον σχηματισμό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι εάν κάποιο αντικείμενο έχει προσαρτημένα και άλλα αντικείμενα πάνω του, τότε τα "υποαντικείμενά" του δεν προστίθενται αυτόματα στο σχηματισμό με την πρόσθεση του γονικού αντικειμένου αλλά πρέπει να εισαχθούν ξεχωριστά.

Περιορισμοί που μπορούν να επιβληθούν σε έναν σχηματισμό (Constraining a Constellation)

Το STK επιτρέπει τον προσδιορισμό κριτηρίων περιορισμού κάλυψης για περιπτώσεις που οι σχηματισμοί συνδέονται με άλλα αντικείμενα σε αλυσίδες αντικειμένων. Οι περιορισμοί αυτοί είναι οι εξής:

- *Οποιοδήποτε από* (Any of- either/ or criterion): Το κριτήριο περιορισμού ικανοποιείται εάν οποιοδήποτε αντικείμενο του σχηματισμού πληροί τις προϋποθέσεις πρόσβασης στα άλλα στοιχεία της αλυσίδας. Για παράδειγμα εάν ένας σχηματισμός αποτελείται από 3 εγκαταστάσεις εδάφους, τις A, B, C, και παράλληλα ανήκει σε μία αλυσίδα με 1 δορυφόρο, ο περιορισμός ικανοποιείται εάν ο δορυφόρος έχει πρόσβαση έστω σε μία από τις 3 εγκαταστάσεις του σχηματισμού (προφανώς μπορεί να έχει πρόσβαση και σε παραπάνω από μία εγκαταστάσεις).
- *Όλα* (All of – AND criterion): Το κριτήριο ικανοποιείται μόνο εάν όλα τα αντικείμενα του σχηματισμού πληρούν τις προϋποθέσεις πρόσβασης της αλυσίδας. Για παράδειγμα, στον ίδιο σχηματισμό του προηγούμενου παραδείγματος ο περιορισμός ικανοποιείται όταν ο δορυφόρος έχει ταυτόχρονη πρόσβαση στις εγκαταστάσεις A και B και C.
- *Το λιγότερο N* (At least N- AND/OR): Ο περιορισμός ικανοποιείται εφόσον τουλάχιστον ο καθορισμένος αριθμός αντικειμένων του σχηματισμού πληροί τις προϋποθέσεις πρόσβασης της αλυσίδας. Ο αριθμός του ελάχιστου αριθμού αντικειμένων καθορίζεται από το χρήστη. Για το παραπάνω παράδειγμα και με ελάχιστο αριθμό αντικειμένων δύο, το κριτήριο πληρούται εάν ο δορυφόρος έχει πρόσβαση στις εγκαταστάσεις (A και B) ή (A και C) ή (B και C) ή (A και B και C). Ένα αντίστοιχο παράδειγμα θα ήταν η χρήση του περιορισμού $N \geq 4$ στην περίπτωση εντοπισμού θέσης με χρήση του σχηματισμού GPS, όπου ο δέκτης θα πρέπει να έχει πρόσβαση σε τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους του σχηματισμού.

- *Ακριβώς N* (Exactly N- Only Criterion): Το κριτήριο του περιορισμού ικανοποιείται μόνον όταν επακριβώς καθορισμένος αριθμός αντικειμένων του σχηματισμού πληρούν τις προϋποθέσεις πρόσβασης στα άλλα αντικείμενα της αλυσίδας. Δηλαδή στο παράδειγμα μας και για N=2 το κριτήριο πληρούται εφόσον ο δορυφόρος έχει πρόσβαση στις εγκαταστάσεις (A και B) ή (A και C) ή (B και C), αλλά όχι στην περίπτωση που έχει πρόσβαση στις εγκαταστάσεις (A και B και C).
- *Κανένα* (None of- Only criterion): Το συγκεκριμένο κριτήριο ικανοποιείται μόνο στην περίπτωση που κανένα αντικείμενο του σχηματισμού δεν ικανοποιεί τις προϋποθέσεις πρόσβασης της αλυσίδας. Αποτελεί έναν εναλλακτικό τρόπο εντοπισμού των περιόδων μη πρόσβασης ενός σχηματισμού σε κάποιο αντικείμενο. Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου περιορισμού είναι διαθέσιμα μόνο μέσα από την Αναφορά ή το γράφημα "Complete Chain Access".

3.6.2 Αλυσίδα Αντικειμένων (Chain)

Αφού εισαχθεί μία αλυσίδα αντικειμένων από τον Object Catalog, ανοίγοντας την σελίδα ιδιοτήτων της αλυσίδας και στη σελίδα Definition ο χρήστης μπορεί να εισάγει (ή να αφαιρέσει) αντικείμενα στην (από την) αλυσίδα και να καθορίσει την σειρά με την οποία τα αντικείμενα συνδέονται μεταξύ τους μέσα στην αλυσίδα. Αντικείμενα της αλυσίδας μπορούν να αποτελέσουν και ολόκληροι σχηματισμοί αντικειμένων.

Όπως και στους σχηματισμούς, ένα υπο-αντικείμενο που είναι συνδεδεμένο με κάποιο γονικό αντικείμενο δεν μετακινείται αυτόματα στην αλυσίδα με τη μετακίνηση του γονικού αντικειμένου, αλλά πρέπει να εισαχθεί ξεχωριστά.

Η σειρά των αντικειμένων σε μία αλυσίδα είναι ιδιαίτερα σημαντική. Κατά τους υπολογισμούς των συνδέσεων μεταξύ των αντικειμένων μέσα στην αλυσίδα λαμβάνονται υπόψη οι χρονικές καθυστερήσεις στη διάδοση του φωτός (light time delays). Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι περιορισμοί που αφορούν στους σχηματισμούς, και αναφέρονται στην ενότητα 3.6.1, επηρεάζοντας το τελικό αποτέλεσμα κάλυψης.

Στις σύνθετες ρυθμίσεις ο χρήστης έχει τη δυνατότητα καθορισμού επιλογών σχετικών με τον τρόπο υπολογισμού και αποθήκευσης των αλυσίδων στο πρόγραμμα. Εδώ περιλαμβάνεται ο καθορισμός της χρονικής περιόδου υπολογισμού της κάλυψης (Object Time, Scenario Time ή Specified Time), η δυνατότητα αυτόματου εκ νέου υπολογισμού των προσβάσεων σε περίπτωση που ενημερωθούν τα στοιχεία κάποιου αντικειμένου της αλυσίδας (automatically recompute accesses), η δυνατότητα επιλογής όσον αφορά τον τρόπο αποθήκευσης των προσβάσεων σε μία αλυσίδα, και τέλος η δυνατότητα χρήσης διαφορετικού βήματος κατά την ανάλυση κάλυψης σε χρονικές περιοχές κοντά στις χρονικές στιγμές εκκίνησης και λήξης της πρόσβασης, για μεγαλύτερη ακρίβεια στον καθορισμό τους.

Τέλος και στις αλυσίδες αντικειμένων δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να καθορίσει ορισμένες βασικές ρυθμίσεις που αφορούν στην οπτικοποίησή τους στο 2D και 3D Graphics Window.

3.6.3 Περιοχή Κάλυψης (Coverage Definition)

Μετά την εισαγωγή του αντικειμένου της περιοχής κάλυψης από τον Object catalog του STK μπορεί να γίνει ο καθορισμός των ιδιοτήτων του αντικείμενου.

Η ανάλυση της κάλυψης στο STK βασίζεται στην προσβασιμότητα των διαθέσιμων αντικείμενων που παρέχουν κάλυψη στην καθορισμένη γεωγραφική περιοχή. Για τους σκοπούς της ανάλυσης, οι γεωγραφικές περιοχές ενδιαφέροντος υποδιαιρούνται σε υποπεριοχές (*regions*) και σημεία (*points*). Τα σημεία αυτά έχουν καθορισμένη θέση και κάθε ένα από αυτά χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας των εν λόγω αντικείμενων. Η προσβασιμότητα σε μία υποπεριοχή υπολογίζεται βάσει της προσβασιμότητας των επιλεγμένων αντικείμενων στους στόχους που ανήκουν στην υποπεριοχή. Ο συνδυασμός της γεωγραφικής περιοχής, των υποπεριοχών και των σημείων συνθέτει το πλέγμα κάλυψης.

Επομένως προκειμένου να οριστεί πλήρως μία περιοχή κάλυψης πρέπει:

- Αρχικά να καθοριστούν τα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος. Αυτό μπορεί να γίνει με ποικίλους τρόπους όπως η εισαγωγή της περιοχής με χρήση ενός αρχείου με μορφή shape file (*.shp) ή η χρήση ενός γραμμικού ή επιφανειακού στόχου που έχει δημιουργηθεί στο STK, η χρήση ολόκληρης της γήινης σφαίρας, ο καθορισμός ζωνών της γήινης σφαίρας που θα περικλείονται από καθορισμένα από το χρήστη γεωγραφικά πλάτη κ.α.
- Στη συνέχεια απαιτείται ο καθορισμός του πλέγματος, ο οποίος γίνεται μέσω του καθορισμού του βαθμού ανάλυσης/ λεπτομέρειας (*granularity*) αναφορικά με την τοποθέτηση των σημείων. Η εισαγωγή του πλέγματος γίνεται καθορίζοντας την απόσταση μεταξύ των σημείων, διαδικασία που γίνεται με χρήση μίας από τις τρεις παρακάτω μεθόδους: (1) μέσω της εισαγωγής του εμβადού που πρέπει να περικλείουν (2) μέσω της απόστασης τους στον ισημερινό (3) ή τέλος μέσω του καθορισμού της διαφοράς σε μοίρες του γεωγραφικού πλάτους και μήκους μεταξύ των όμορων σημείων. Έπειτα μπορεί να καθοριστεί το υψόμετρο των σημείων από μία από τις διαθέσιμες επιφάνειες αναφοράς (ύψος ή βάθος από την Μέση Στάθμη της Θάλασσας (MSL), ύψος ή βάθος από το ελλειψοειδές, απόσταση από το μοντέλο εδάφους που έχει εισαχθεί στην περιοχή (Terrain) ή απόσταση από το κέντρο της Γης (Radius).

Μετά τον καθορισμό του πλέγματος σειρά έχει ο καθορισμός των αντικείμενων σύμφωνα με τα οποία θα υπολογιστεί η πρόσβαση στην περιοχή, δηλαδή η διαδικασία εισαγωγής και αφαίρεσης αντικείμενων στη λίστα που περιλαμβάνει τα αντικείμενα που θα χρησιμοποιηθούν κατά τον υπολογισμό της κάλυψης. Αφού γίνει ο υπολογισμός της πρόσβασης για όλα τα σημεία που δημιουργήθηκαν είναι δυνατό αντί να αφαιρεθεί κάποιο από τα διαθέσιμα αντικείμενα απλά να μεταβληθεί η κατάστασή του σε ανενεργή (status → inactive) προκειμένου να εξεταστούν οι συνέπειες εξαίρεσης του αντικείμενου στο αποτέλεσμα κάλυψης της περιοχής.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά την εισαγωγή ενός σχηματισμού ή μίας αλυσίδας αντικείμενων στην λίστα των διαθέσιμων αντικείμενων. Κατά τον υπολογισμό πρόσβασης μίας αλυσίδας στην περιοχή ενδιαφέροντος κάθε σημείο (Grid Point) θεωρείται ότι βρίσκεται στο τέλος της αλυσίδας.

Όσον αφορά στους σχηματισμούς, το STK υπολογίζει τις προσβάσεις μεταξύ του κάθε σημείου του πλέγματος και των αντικειμένων που αποτελούν τον σχηματισμό είτε ανεξάρτητα για κάθε αντικείμενο (separate) είτε συγκεντρωτικά για το σύνολο των αντικειμένων (grouped). Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί η επιλογή grouped, τυχόν επικαλύψεις στην κάλυψη των σημείων σε κοινά χρονικά διαστήματα, από αντικείμενα που ανήκουν στον σχηματισμό αφαιρούνται και όλα τα διαθέσιμα αντικείμενα για τη δεδομένη χρονική περίοδο επικάλυψης λογίζονται σαν ένα μοναδικό αντικείμενο. Πρακτικά αυτό σημαίνει πιο γρήγορους υπολογισμούς, αλλά δεν παρέχει την πληροφορία που αφορά στο πόσα στοιχεία του σχηματισμού έχουν ταυτόχρονη πρόσβαση στην περιοχή. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση (όπως αναφέρθηκε και για τις αλυσίδες κάλυψης) μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα κριτήρια περιορισμού κατά την χρήση σχηματισμών (Constellation Use Constraints).

Όταν ένας σχηματισμός χαρακτηρίζεται ανενεργός, τότε το ίδιο συμβαίνει και με όλα τα στοιχεία του. Είναι δυνατό επίσης μεμονωμένα στοιχεία του σχηματισμού να χαρακτηριστούν ανενεργά ανεξάρτητα από τον υπόλοιπο σχηματισμό, ο οποίος παραμένει ενεργός και συμμετέχει στους υπολογισμούς πρόσβασης. Σε περίπτωση όμως που χρησιμοποιούνται κριτήρια περιορισμού του σχηματισμού, θα λογίζεται στους υπολογισμούς και ο δορυφόρος που είναι τώρα ανενεργός, καθώς οι περιορισμοί έχουν υπολογιστεί σε προηγούμενο στάδιο.

Επιπλέον παρέχονται δυνατότητες προσδιορισμού της χρονικής περιόδου κατά την οποία υπολογίζεται η πρόσβαση (από προεπιλογή αυτή ταυτίζεται με την χρονική περίοδο του σεναρίου), καθώς και δυνατότητες προσαρμογής του τρόπου υπολογισμού και αποθήκευσης της πληροφορίας πρόσβασης από το STK. Παραδείγματος χάριν, η επιλογή "Automatically Recompute Accesses" συνεπάγεται τον επαναυπολογισμό των καλύψεων κάθε φορά που ανανεώνεται ή μεταβάλλεται κάποιο από τα διαθέσιμα αντικείμενα, επιλογή συνυπολογισμού των χρονικών καθυστερήσεων διαδρομής του φωτός- Use Light Time Delay- καθώς και ρύθμιση των "Access Options (επιλογών πρόσβασης)" προκειμένου να διαφοροποιείται το βήμα που χρησιμοποιείται για ακριβέστερο προσδιορισμό των χρονικών στιγμών εκκίνησης ή λήξης της πρόσβασης μεταξύ αντικειμένων).

Τέλος όσον αφορά την οπτικοποίηση του Coverage Definition, το STK παρέχει τη δυνατότητα επιλογής του χρώματος και του συμβόλου που θα χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση (η οποία είναι προαιρετική) των σημείων και των υποπεριοχών του πλέγματος κάλυψης.

3.6.4 Δείκτες Αξιολόγησης (Figures Of Merit)

Το STK δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να προσδιορίσει την μέθοδο με την οποία θα μετρηθεί η ποιότητα της κάλυψης επιλέγοντας έναν από τους παρακάτω δείκτες. Οι περισσότεροι από αυτούς μπορούν να αναφέρονται είτε στη στατική συμπεριφορά μεταξύ σημείου- περιοχής και αντικειμένου, δηλαδή σε όλη τη διάρκεια του χρόνου μελέτης, είτε στη δυναμική συμπεριφορά μεταξύ σημείου και αντικειμένου, η οποία αναφέρεται σε δεδομένη χρονική στιγμή και επομένως μεταβάλλεται με το χρόνο. Οι στατικές και δυναμικές τιμές υπολογίζονται προκειμένου να απεικονιστούν στο 2D και 3D γραφικό περιβάλλον, καθώς και για να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή αναφορών και γραφημάτων.

Με τον συγκεκριμένο τρόπο εισαγωγής ένας δείκτης FOM εισάγεται σαν αντικείμενο στο STK και πιο συγκεκριμένα ως υποαντικείμενο του γονικού αντικειμένου, που είναι μία Περιοχή Κάλυψης (*Coverage Definition*), την οποία και θα αξιολογήσει. Για την αξιολόγηση της κάλυψης άλλων αντικειμένων χρησιμοποιείται το *Single Object Coverage Tool*, το οποίο και εξετάζεται σε επόμενη ενότητα (3.8.2). Η διαδικασία καθορισμού του δείκτη FOM και των παραμέτρων υπολογισμού του είναι σχεδόν η ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Ακολουθούν όλοι οι διαθέσιμοι τύποι FOM και η περιγραφή τους:

3.6.4.1 Απλή Κάλυψη (*Simple Coverage*)

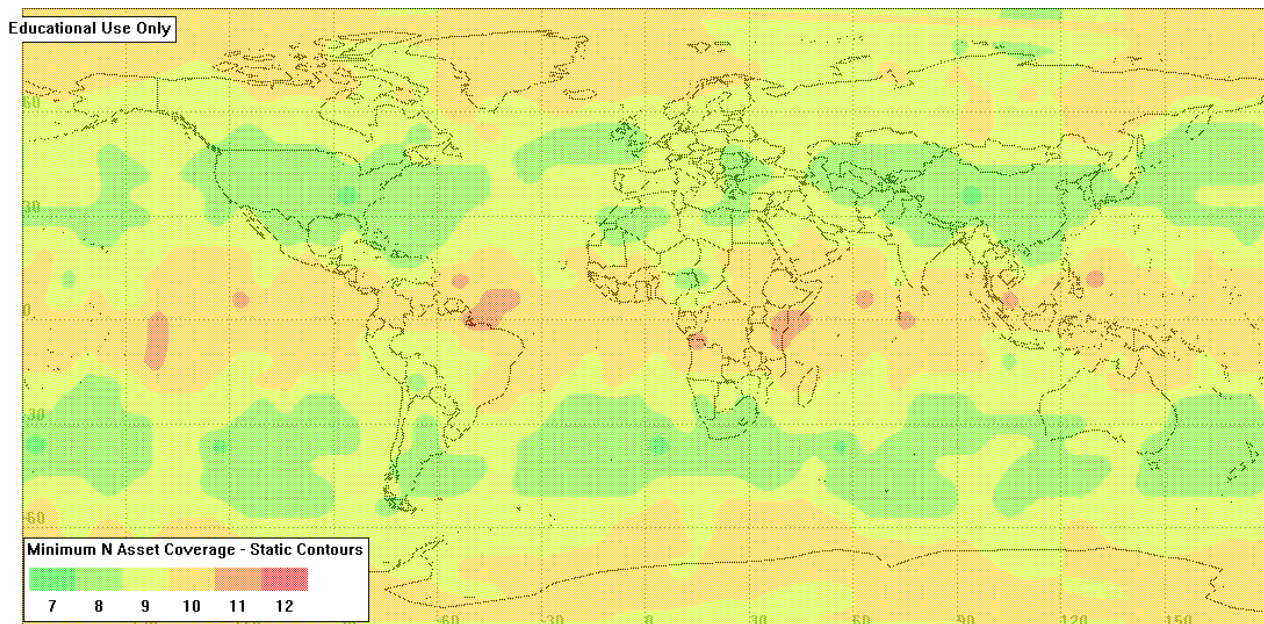
Η απλή κάλυψη μετρά το κατά πόσο ένα σημείο είναι προσβάσιμο από οποιοδήποτε από τα αντικείμενα ενδιαφέροντος. Η εκτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς μέσω της απλής κάλυψης γίνεται με την εκχώρηση της τιμής 1 για σημεία που βρίσκονται μέσα στην περιοχή πρόσβασης τη δεδομένη στιγμή και της τιμής 0 για σημεία που δεν βρίσκονται μέσα στη περιοχή πρόσβασης του αντικειμένου. Αντίστοιχα η στατική εκτίμηση της συμπεριφοράς γίνεται εκχωρώντας την τιμή 1 σε σημεία στα οποία είχε πρόσβαση το αντικείμενο οποιαδήποτε χρονική στιγμή της διάρκειας μελέτης, και την τιμή 0 στα σημεία στα οποία το αντικείμενο δεν είχε καθόλου πρόσβαση.

3.6.4.2 Κάλυψη από N αντικείμενα ενδιαφέροντος (*N Asset Coverage*)

Σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται ο αριθμός των αντικειμένων ενδιαφέροντος (*assets*) N που έχουν ταυτόχρονη πρόσβαση στο σημείο, όπου το N κυμαίνεται μεταξύ του 0 και του μέγιστου αριθμού αντικειμένων που έχουν καθοριστεί ως ενδιαφέροντα κατά την διαδικασία ορισμού της κάλυψης (*Coverage Definition*). Υπάρχουν 4 εναλλακτικές επιλογές για τον υπολογισμό της στατικής τιμής του δείκτη N asset Coverage που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 5:

Επιλογή	Περιγραφή
Minimum	Ο ελάχιστος (ακέραιος) αριθμός αντικειμένων που καλύπτουν ένα σημείο καθ' όλη τη διάρκεια ενδιαφέροντος. Είναι χρήσιμη όταν στην κάλυψη χρησιμοποιείται πολύ μεγάλος αριθμός αντικειμένων.
Maximum	Ο μέγιστος (ακέραιος) αριθμός αντικειμένων που καλύπτουν ταυτόχρονα ένα σημείο καθ' όλη τη διάρκεια ενδιαφέροντος.
Average	Ο μέσος όρος των αντικειμένων που καλύπτουν κάθε σημείο καθ' όλη τη διάρκεια ενδιαφέροντος.
% Above	Η τιμή υποδεικνύει ότι τα σημεία του πλέγματος καλύπτονται από τουλάχιστον N αντικείμενα ενδιαφέροντος, για X% του χρόνου ενδιαφέροντος, όπου το N είναι η εξαγόμενη τιμή και το X καθορίζεται από τον χρήστη.

Πίνακας 5: Στατικές Τιμές του N Asset Coverage



Σχήμα 13: Χάρτης Απεικόνισης του ελάχιστου αριθμού Προσβάσεων Κάλυψης για κάθε σημείο της γήινης επιφάνειας από τον σχηματισμό GPS για χρονική διάρκεια μίας ημέρας.

Επίσης στο σχήμα 13 απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός προσβάσεων κάλυψης για κάθε σημείο της γήινης επιφάνειας από τον σχηματισμό GPS για την χρονική διάρκεια μίας ημέρας.

3.6.4.3 Χρόνος Κάλυψης (*Coverage Time*)

Υπολογίζει τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία τα σημεία του πλέγματος καλύπτονται από τα αντικείμενα. Προφανώς δεν υπάρχει δυναμική εκτίμηση αποτελεσμάτων αλλά μόνο στατική. Οι επιλογές για τον τρόπο παρουσίασης και υπολογισμού του χρόνου κάλυψης ακολουθούν στον παρακάτω πίνακα 6:

Επιλογή	Περιγραφή
Percent	Το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο καλύπτεται ένα σημείο.
Total	Ο συνολικός χρόνος καθ' όλη τη διάρκεια ενδιαφέροντος που ένα σημείο είναι υπό κάλυψη.
% Per Day	Το ποσοστό του χρόνου ανά ημέρα κατά τη διάρκεια του οποίου το σημείο είναι υπό κάλυψη. Το ποσοστό προκύπτει από τη διαίρεση του συνολικού χρόνου κάλυψης καθ' όλη τη διάρκεια ενδιαφέροντος με το συνολικό αριθμό των ημερών της διάρκειας ενδιαφέροντος.
Per Day	Ο λόγος του συνολικού χρόνου κάλυψης προς το άθροισμα των ημερών της περιόδου ενδιαφέροντος
Minimum % Per Day	Το ελάχιστο ποσοστό χρόνου κάλυψης ενός σημείου ανά ημερολογιακή ημέρα.
Maximum % Per Day	Το μέγιστο ποσοστό χρόνου κάλυψης ενός σημείου ανά ημερολογιακή ημέρα.
% Per Day std Dev	Η τυπική απόκλιση του ποσοστιαίου χρόνου κάλυψης ενός σημείου ανά ημερολογιακή ημέρα.
Minimum Per Day	Ο ελάχιστος χρόνος κάλυψης ενός σημείου ανά ημερολογιακή ημέρα
Maximum Per Day	Ο μέγιστος χρόνος κάλυψης ενός σημείου ανά ημερολογιακή ημέρα
Per Day std Dev	Η τυπική απόκλιση της τιμής του χρόνου κάλυψης σημείου ανά ημερολογιακή ημέρα.
% Time Above	Το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο ένα σημείο καλύπτεται από τουλάχιστον έναν καθορισμένο αριθμό αντικειμένων ενδιαφέροντος και αφορά όλη τη χρονική διάρκεια ενδιαφέροντος.
Total Time Above	Το ποσό του χρόνου κατά τον οποίο ένα σημείο καλύπτεται από τουλάχιστον έναν καθορισμένο αριθμό αντικειμένων ενδιαφέροντος και αφορά τη συνολική χρονική διάρκεια ενδιαφέροντος.

Πίνακας 6: Διαθέσιμες στατικές τιμές του χρόνου κάλυψης.

Οι ημερολογιακές ημέρες (calendar days) μετρώνται από μεσάνυχτα σε μεσάνυχτα σε χρόνο UTC.

3.6.4.4 Χρόνος εκ νέου "επίσκεψης" του δορυφόρου στην περιοχή ενδιαφέροντος (*Revisit Time*)

Ο χρόνος εκ νέου επίσκεψης εκφράζει τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία δεν παρέχεται κάλυψη σε μία περιοχή (ή σημείο), τα οποία ονομάζονται και κενά κάλυψης (*coverage gaps*). Όσον αφορά τον δυναμικό υπολογισμό των κενών κάλυψης το πρόγραμμα υπολογίζει την διάρκεια του τρέχοντος κενού κάλυψης για κάθε σημείο. Στην περίπτωση που υπάρχει κάλυψη τότε η τιμή είναι ίση με 0. Οι

διαφορετικές επιλογές που περιγράφουν τον στατικό υπολογισμό των κενών κάλυψης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Επιλογή	Περιγραφή
Minimum	Υπολογίζεται η ελάχιστη τιμή κενού κάλυψης για όλη την χρονική διάρκεια μελέτης
Maximum	Υπολογίζεται η μέγιστη τιμή κενού κάλυψης για όλη την χρονική διάρκεια μελέτης
Average	Υπολογίζεται η μέση διάρκεια κενού κάλυψης για όλη την χρονική διάρκεια μελέτης
Std Deviation	Υπολογίζεται η τυπική απόκλιση της διάρκειας των κενών κάλυψης στο σύνολο της χρονικής διάρκειας μελέτης.
% below	Η τιμή που υπολογίζεται υποδηλώνει ότι για το X% του χρόνου, το σημείο έχει χρόνο εκ νέου επίσκεψης (revisit time) μικρότερο ή ίσο με R, όπου το X καθορίζεται από τον χρήστη και το R είναι η υπολογιζόμενη τιμή.
% below Gaps only	Η τιμή που υπολογίζεται υποδηλώνει ότι το σημείο έχει έναν χρόνο εκ νέου επίσκεψης από το αντικείμενο το πολύ ίσο με R, για X % του χρόνου όταν βρίσκεται σε κενό κάλυψης, όπου R είναι η υπολογιζόμενη τιμή και X η τιμή που καθορίζεται από τον χρήστη.
Num % below	Η τιμή που υπολογίζεται υποδηλώνει ότι το x% των κενών κάλυψης έχουν διάρκεια κάλυψης μικρότερη από R, όπου το R είναι η υπολογιζόμενη τιμή και X ορίζεται από τον χρήστη. Για παράδειγμα, αν το x τεθεί ίσο με 90% και υπάρχουν 100 κενά κάλυψης το R θα ισούται με τη διάρκεια του ενενηκοστού κενού κάλυψης.

Πίνακας 7: Επιλογές προσδιορισμού της στατικής τιμής του χρόνου εκ νέου επίσκεψης.

Το Coverage Module χρησιμοποιεί έναν "αισιόδοξο" αλγόριθμο σε περιπτώσεις που υπάρχουν κενά κάλυψης στα όρια της διάρκειας μελέτης. Η διάρκεια αυτών των κενών κάλυψης υπολογίζεται θεωρώντας ότι τα κενά ξεκινούν ή τελειώνουν την ίδια χρονική στιγμή με αυτή της περιόδου μελέτης και επομένως αγνοείται το τι συνέβαινε πριν ή μετά. Αυτή η θεώρηση είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη στην ερμηνεία των δεικτών Revisit Time, Time Average Gap και Response Time.

Επιλογή End Gaps

Δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει εάν θα συμπεριλάβει τα κενά κάλυψης που τυχόν υπάρχουν στην αρχή ή στο τέλος της χρονικής διάρκειας μελέτης στους υπολογισμούς που αφορούν στον χρόνο επανεπίσκεψης των αντικειμένων.

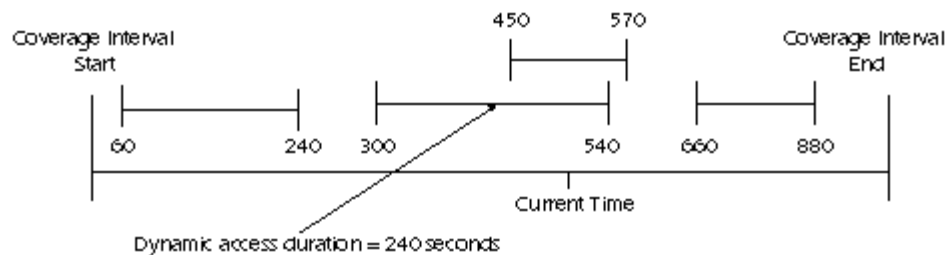
Επιλογή Min #Assets

Με αυτή την επιλογή καθορίζεται ο ελάχιστος αριθμός αντικειμένων ενδιαφέροντος που πρέπει να έχουν πρόσβαση σε ένα σημείο ή μία περιοχή προκειμένου να θεωρείται πως το σημείο ή η περιοχή καλύπτεται. Για παράδειγμα για τον υπολογισμό του χρονικού διαστήματος εκ νέου κάλυψης μίας

περιοχής για την στερεογραφική απόδοσή της η τιμή των ελάχιστων αντικειμένων πρέπει να τεθεί ίση με 2. Τότε το STK θα υπολογίσει τα χρονικά διαστήματα που τουλάχιστον 2 αντικείμενα ενδιαφέροντος είναι διαθέσιμα και μετά θα υπολογίσει τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των περιόδων κάλυψης.

3.6.4.5 Διάρκεια Κάλυψης (*Access Duration*)

Η διάρκεια κάλυψης υπολογίζει τα διαστήματα κατά την διάρκεια των οποίων παρέχεται κάλυψη από ένα συγκεκριμένο αντικείμενο ενδιαφέροντος. Κατά την δυναμική θεώρηση, ως διάρκεια κάλυψης υπολογίζεται το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα που περιλαμβάνει τον τρέχοντα χρόνο. Εάν δεν υπάρχει κάλυψη προφανώς η τιμή της διάρκειας είναι 0.



Σχήμα 14: Προσδιορισμός Διαστήματος Διάρκειας Κάλυψης (Πηγή: STK D. A. Help)

Επιλογή	Περιγραφή
Minimum	Υπολογίζει την ελάχιστη διάρκεια ανάμεσα σε όλα τα χρονικά διαστήματα κάλυψης για όλη τη διάρκεια ενδιαφέροντος.
Maximum	Υπολογίζει την μέγιστη διάρκεια ανάμεσα σε όλα τα χρονικά διαστήματα κάλυψης για όλη τη διάρκεια ενδιαφέροντος.
Average	Υπολογίζει την μέση διάρκεια όλων των χρονικών διαστημάτων κάλυψης για όλη τη διάρκεια ενδιαφέροντος.
Std Deviation	Υπολογίζει την τυπική απόκλιση της διάρκειας όλων των χρονικών διαστημάτων κάλυψης για όλη τη διάρκεια ενδιαφέροντος.
Percent Above	Η υπολογιζόμενη τιμή υποδηλώνει ότι το σημείο είναι σε διάστημα κάλυψης και διάρκειας τουλάχιστον D για το X% του χρόνου, όπου D είναι η υπολογιζόμενη τιμή και το X καθορίζεται από τον χρήστη.
Sum	Υπολογίζει το άθροισμα της διάρκειας όλων των διαστημάτων κάλυψης για τον συνολικό χρόνο ενδιαφέροντος.

Πίνακας 8: Στατιστικές τιμές του δείκτη *Access Duration*.

3.6.4.6 Αριθμός Προσβάσεων Κάλυψης (*Number of Accesses*)

Ο αριθμός Προσβάσεων Κάλυψης υπολογίζει το σύνολο των ανεξάρτητων προσβάσεων σε κάποιο σημείο. Ο δυναμικός ορισμός αφορά τον υπολογισμό του αριθμού των αντικειμένων που είναι προσβάσιμα εκείνη τη δεδομένη στιγμή.

Επιλογή	Περιγραφή
Total	Υπολογίζει τον συνολικό αριθμό προσβάσεων κατά τη διάρκεια μελέτης, χωρίς να λαμβάνει υπόψη επικαλυπτόμενες προσβάσεις (overlapping accesses). Ένα σημείο του πλέγματος με ενιαία πρόσβαση σε 2 δορυφόρους θα θεωρηθεί ότι έχει προσβάσεις ακόμη και αν το διάστημα κάλυψης του δεύτερου δορυφόρου περιέχεται εξ ολοκλήρου στο διάστημα κάλυψης του πρώτου.
Minimum Per Day	Ο ελάχιστος αριθμός προσβάσεων ανά ημερολογιακή ημέρα.
Maximum Per Day	Ο μέγιστος αριθμός προσβάσεων ανά ημερολογιακή ημέρα.
Average Per Day	Ο λόγος του συνολικού χρόνου κάλυψης κατά τη διάρκεια μελέτης προς το σύνολο των ημερών στο διάστημα ενδιαφέροντος.
In Span	Ο αριθμός των προσβάσεων που καταγράφηκαν μεταξύ των καθορισμένων μέγιστων και ελάχιστων τιμών στο σύνολο του χρόνου μελέτης.
In Span Per Day	Ο αριθμός των προσβάσεων που καταγράφηκαν μεταξύ των καθορισμένων μέγιστων και ελάχιστων τιμών διαιρεμένες με το σύνολο των ημερών του χρόνου μελέτης.

Πίνακας 9: Στατικές Τιμές του δείκτη: *Number of Accesses*

Όπως και με το χρόνο κάλυψης, και στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι ημερολογιακές ημέρες (calendar days) μετρώνται από μεσάνυχτα σε μεσάνυχτα σε χρόνο UTC.

3.6.4.7 Υπολογισμός του Διαχωρισμού Προσβάσεων Κάλυψης (*Measuring Access Separation*)

Ο διαχωρισμός Περιόδων Κάλυψης εντοπίζει χρονικές περιόδους κατά τις οποίες σημεία του πλαισίου έχουν πολλαπλές περιόδους κάλυψης μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ή μία από την άλλη. Το χρονικό διάστημα για τον διαχωρισμό μεταξύ προσβάσεων πρέπει να προσδιορίζεται από τις παραμέτρους του πίνακα 10:

Επιλογή	Περιγραφή
Minimum	Το ελάχιστο χρονικό διάστημα για να προσδιοριστεί αν 2 ή περισσότερα χρονικά διαστήματα κάλυψης συμβαίνουν μέσα στο καθορισμένο χρονικό διάστημα.
Maximum	Το μέγιστο χρονικό διάστημα για να προσδιοριστεί αν 2 ή περισσότερα χρονικά διαστήματα κάλυψης συμβαίνουν μέσα στο καθορισμένο χρονικό διάστημα.

Πίνακας 10: Παράμετροι προσδιορισμού του χρονικού διαστήματος διαχωρισμού μεταξύ προσβάσεων.

Ο Διαχωρισμός Προσβάσεων Κάλυψης είναι ένας λογικός (τελεστής) δείκτης και οι προκύπτουσες τιμές του μπορεί να είναι 0 ή 1. Η στατική τιμή του δείκτη είναι 1 εάν οι περιορισμοί του διαχωρισμού ικανοποιούνται οποτεδήποτε μέσα στο διάστημα ενδιαφέροντος. Η δυναμική τιμή του δείκτη είναι 1 αν οι περιορισμοί ικανοποιούνται το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

3.6.4.8 Αριθμός Κενών Κάλυψης (*Number of Gaps*)

Υπολογίζεται ο αριθμός των κενών κάλυψης που βρίσκονται στο διάστημα μελέτης της κάλυψης. Στο δυναμικό ορισμό ο δείκτης παίρνει τις τιμές 1 ή 0 ανάλογα με το αν το σημείο βρίσκεται εντός ή εκτός κάλυψης τη δεδομένη χρονική στιγμή. Οι υπολογιστικές επιλογές του δείκτη αναφέρονται στον πίνακα 11:

Επιλογή	Περιγραφή
Total	Ο συνολικός αριθμός κενών πρόσβασης καθ' όλη τη διάρκεια μελέτης.
Minimum Per Day	Ο ελάχιστος αριθμός κενών κάλυψης ανά ημερολογιακή ημέρα.
Maximum Per Day	Ο μέγιστος αριθμός κενών κάλυψης ανά ημερολογιακή ημέρα.
Average Per Day	Ο λόγος του συνολικού αριθμού των κενών κάλυψης καθ' όλη τη διάρκεια μελέτης προς τον αριθμό των ημερών της διάρκειας μελέτης.
In Span	Ο αριθμός των κενών κάλυψης που βρίσκονται μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής που καθορίζει ο χρήστης για όλη την περίοδο μελέτης.
In Span Per Day	Ο λόγος του αριθμού των κενών κάλυψης που βρίσκονται μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής για όλη την περίοδο μελέτης προς τον αριθμό των ημερών της διάρκειας μελέτης.

Πίνακας 11: Επιλογές προσδιορισμού των κενών κάλυψης.

3.6.4.9 Μέσο Χρονικό Κενό (*Time Average Gap*)

Το μέσο χρονικό κενό υπολογίζει το μέσο χρονικό διάστημα του κενού κάλυψης με τυχαία δειγματοληψία στη χρονική γραμμή των σημείων του πλέγματος. Καθώς ο δείκτης δεν έχει δυναμική συμπεριφορά, δεν υπολογίζονται τιμές εξαρτώμενες από τον χρόνο.

Όπως ισχύει για τον χρόνο εκ νέου επίσκεψης, και στη συγκεκριμένη περίπτωση το Coverage Module χρησιμοποιεί έναν "αισιόδοξο" αλγόριθμο σε περιπτώσεις που υπάρχουν κενά κάλυψης στα όρια της διάρκειας μελέτης. Η διάρκεια αυτών των κενών κάλυψης υπολογίζεται θεωρώντας ότι τα κενά ξεκινούν ή τελειώνουν την ίδια χρονική στιγμή με αυτή της περιόδου μελέτης και επομένως αγνοείται το τι συνέβαινε πριν ή μετά. Αυτή η θεώρηση είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη στην ερμηνεία των δεικτών Revisit Time, Time Average Gap και Response Time.

3.6.4.10 Χρόνος Ανταπόκρισης (*Response Time*)

Υπολογίζεται ως το χρονικό διάστημα μεταξύ του χρόνου αιτήματος για κάλυψη ενός σημείου και του χρόνου κατά τον οποίο πραγματοποιείται η κάλυψη. Ο δυναμικός ορισμός του χρόνου ανταπόκρισης είναι ο χρόνος μέχρι την αρχή της επόμενης πρόσβασης και έχει την τιμή 0 αν το σημείο καλύπτεται τη δεδομένη χρονική στιγμή και 1000000sec αν ο χρόνος της προσομοίωσης είναι ύστερος της τελευταίας περιόδου κάλυψης. Οι υπολογιστικές επιλογές για τη στατική εκδοχή του δείκτη αναφέρονται στον πίνακα 12:

Επιλογές	Περιγραφή
Minimum	Υπολογίζεται ο ελάχιστος χρόνος ανταπόκρισης για το σύνολο της περιόδου ενδιαφέροντος. Η τιμή είναι 0 αν δεν υπάρχει καμία κάλυψη για κανένα σημείο του πλέγματος.
Maximum	Υπολογίζεται ο μέγιστος χρόνος ανταπόκρισης για το σύνολο της περιόδου ενδιαφέροντος. Χρήσιμο για τον υπολογισμό του μέγιστου χρονικού κενού κάλυψης μεταξύ προσβάσεων.
Average	Ο μέσος χρόνος ανταπόκρισης για το σύνολο της περιόδου ενδιαφέροντος. Υπολογίζεται από τον τύπο: $\text{TimeAverageGap} / 2$.
% Below	Η υπολογιζόμενη τιμή υποδηλώνει ότι το σημείο έχει χρόνο ανταπόκρισης το πολύ R, για X% του χρόνου, όπου R η υπολογιζόμενη τιμή και το X επιλέγεται από το χρήστη.
% Below Gaps only	Η υπολογιζόμενη τιμή υποδηλώνει ότι το σημείο έχει χρόνο ανταπόκρισης το πολύ R, για X% του χρόνου που βρίσκεται υπό κάλυψη, όπου R η υπολογιζόμενη τιμή και το X επιλέγεται από το χρήστη.

Πίνακας 12: Διαθέσιμες Στατικές Τιμές του χρόνου ανταπόκρισης.

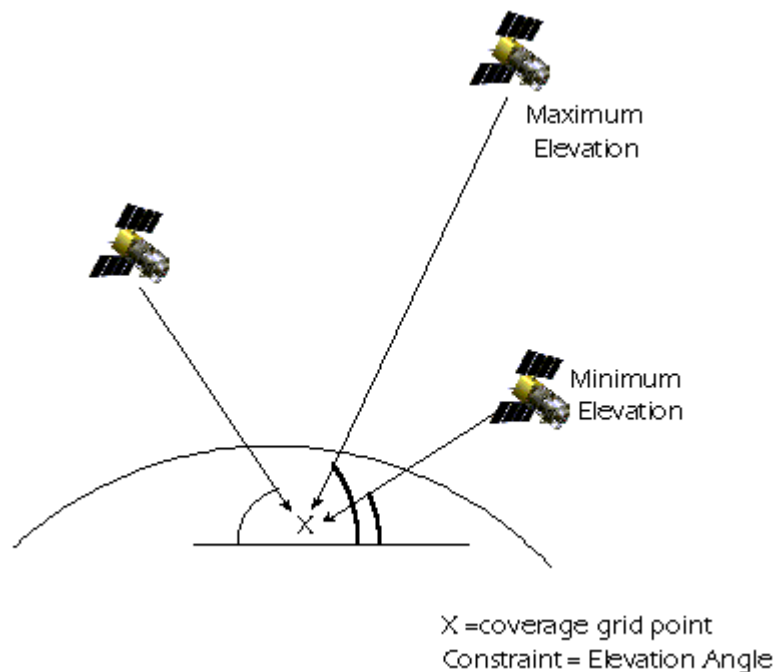
3.6.4.11 Περιορισμοί Πρόσβασης (*Access Constraints*)

Οι περιορισμοί πρόσβασης υπολογίζουν την τιμή μίας παραμέτρου περιορισμού πρόσβασης που χρησιμοποιείται από το STK για να καθορίσει την αμοιβαία ορατότητα μεταξύ σημείων (και αντικειμένων). Ο δείκτης FOM περιορισμού πρόσβασης αναφέρεται στις τιμές του επιλεγμένου περιορισμού σε κάθε σημείο του πλέγματος. Η επιλογή ενός περιορισμού πρόσβασης ως δείκτη FOM

δεν έχει καμία επίδραση στους υπολογισμούς των προσβάσεων ορατότητας μεταξύ των αντικειμένων του σεναρίου. Οι περιορισμοί αξιολογούνται από την προοπτική των σημείων του πλέγματος και όχι των αντικειμένων ενδιαφέροντος. Όταν χρησιμοποιούνται περιορισμοί κάλυψης για την εκτίμηση της ποιότητας της κάλυψης πρέπει να προσδιορίζονται:

- Ο τύπος περιορισμού κάλυψης που χρησιμοποιείται.
- Η τιμή του περιορισμού που θα επιλεγεί βάσει όλων των διαθέσιμων αντικειμένων ενδιαφέροντος.
- Το στατιστικό μέγεθος που θα υπολογιστεί ως στατική τιμή.
- Το χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της στατικής τιμής.

Το στατιστικό μέγεθος του περιορισμού για ένα σύνολο αντικειμένων είναι απαραίτητο καθώς για κάθε σημείο του πλέγματος μπορεί να υπολογιστεί μία μόνο τιμή για κάθε χρονική στιγμή.



Σχήμα 15: Η ελάχιστη, μέγιστη ή μέση τιμή της συγκεκριμένης τιμής του περιορισμού κάλυψης που εφαρμόζεται για όλα τα ορατά καθορισμένα αντικείμενα ενδιαφέροντος κάποια δεδομένη χρονική στιγμή.

Ο δυναμικός ορισμός του δείκτη περιορισμού κάλυψης είναι η ελάχιστη, μέγιστη ή μέση τιμή του επιλεγμένου τύπου περιορισμού πρόσβασης καθώς εφαρμόζεται σε όλα τα ορατά αντικείμενα ενδιαφέροντος για κάθε σημείο του πλέγματος την δεδομένη χρονική στιγμή.

Ο στατικός ορισμός του access constraint figure of merit προκύπτει από τη δειγματοληψία του δυναμικού ορισμού με καθορισμένο χρονικό βήμα και για την καθορισμένη διάρκεια μελέτης.

Πρόκειται για μία πολύ έντονη υπολογιστική διαδικασία η οποία εξαρτάται από την συνολική διάρκεια του υπό εξέταση σεναρίου, το χρονικό βήμα και τον συνολικό αριθμό των σημείων του πλέγματος.

Επιλογή του τύπου του Περιορισμού Κάλυψης (Type of Access Constraint)

Ο τύπος του περιορισμού κάλυψης που είναι διαθέσιμος εξαρτάται από τον τύπο του αντικειμένου που έχει συσχετισθεί με τα σημεία του πλέγματος. Από προεπιλογή τα σημεία του πλέγματος συσχετίζονται με την κλάση αντικειμένων των στόχων. Η προεπιλογή μπορεί όμως να αλλάξει με χρήση της επιλογής Grid Constraint Option στην σελίδα επιλογών του πλέγματος.

Επιλογή της μεθόδου για την επιλογή της τιμής του περιορισμού

Αφού έχει επιλεγεί ο τύπος του περιορισμού πρέπει να προσδιοριστεί ποια τιμή του περιορισμού θα επιλεγεί βάσει όλων των διαθέσιμων αντικειμένων ενδιαφέροντος. Οι επιλογές αναφέρονται στον πίνακα 13:

Επιλογή	Περιγραφή
Ελάχιστη	Οι τιμές περιορισμού υπολογίζονται για όλα τα διαθέσιμα αντικείμενα εκείνη τη στιγμή και επιλέγεται η ελάχιστη.
Μέγιστη	Οι τιμές περιορισμού υπολογίζονται για όλα τα διαθέσιμα αντικείμενα εκείνη τη στιγμή και επιλέγεται η μέγιστη.
Μέση	Οι τιμές περιορισμού υπολογίζονται για όλα τα διαθέσιμα αντικείμενα εκείνη τη στιγμή και επιλέγεται ο μέσος όρος τους.
Άθροισμα	Οι τιμές περιορισμού υπολογίζονται για όλα τα διαθέσιμα αντικείμενα εκείνη τη στιγμή και επιλέγεται το άθροισμά τους.

Πίνακας 13: Επιλογή της τιμής του περιορισμού που θα επιλεγεί βάσει όλων των διαθέσιμων αντικειμένων ενδιαφέροντος

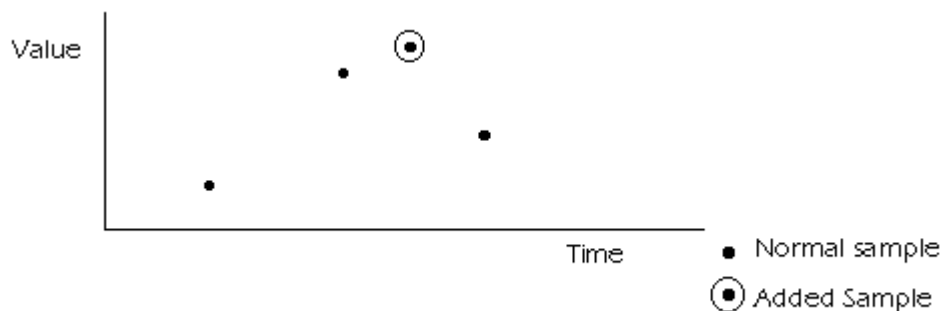
Επιλογή του στατιστικού μεγέθους που θα χρησιμοποιηθεί στον στατικό ορισμό του περιορισμού

Είναι επίσης απαραίτητος ο προσδιορισμός του στατιστικού μεγέθους που θα χρησιμοποιηθεί στον στατικό ορισμό του περιορισμού κάλυψης. Οι διαθέσιμες επιλογές παρατίθενται στον πίνακα 14:

Επιλογή	Περιγραφή
Minimum	Η ελάχιστη τιμή των δειγμάτων τιμών δυναμικού ορισμού του περιορισμού πρόσβασης.
Maximum	Η μέγιστη τιμή των δειγμάτων τιμών δυναμικού ορισμού του περιορισμού πρόσβασης.
Average	Η μέση τιμή των δειγμάτων των τιμών δυναμικού ορισμού του περιορισμού πρόσβασης.
Percent Above	Η τιμή του δυναμικού περιορισμού κάλυψης είναι μεγαλύτερη από την τιμή που υπολογίζεται για το X% του χρόνου, όπου το X καθορίζεται από τον χρήστη.
Percent Below	Η τιμή του δυναμικού περιορισμού κάλυψης είναι μικρότερη από την τιμή που υπολογίζεται για το X% του χρόνου, όπου το X καθορίζεται από τον χρήστη.
Sum	Το άθροισμα των δειγμάτων του δυναμικού ορισμού του περιορισμού κάλυψης.

Πίνακας 14: Διαθέσιμες στατικές τιμές κατά τον υπολογισμό του περιορισμού κάλυψης.

Εάν επιλεγεί η ελάχιστη ή η μέγιστη τιμή, τότε προσθέτονται από τον αλγόριθμο υπολογισμού επιπλέον δείγματα στην αρχή και στο τέλος της περιόδου μελέτης αλλά και σε περιοχές, όπου από τα υπάρχοντα δείγματα που τις περικλείουν φαίνεται να υπάρχει κάποιο ακρότατο σημείο. (παρακάτω σχήμα)



Σχήμα 16: Επιπλέον δείγμα για τον υπολογισμό της μέγιστης τιμής

Σε κάθε περίπτωση, οι τιμές της δειγματοληψίας λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του στατιστικού μεγέθους μόνο αν αντιστοιχούν σε χρονικές στιγμές όπου τουλάχιστον ένα αντικείμενο ενδιαφέροντος έχει πρόσβαση στο σχετικό σημείο του πλαισίου.

Τέλος πρέπει να γίνει **ο προσδιορισμός του χρονικού βήματος** που θα χρησιμοποιηθεί για την επιλογή των δειγμάτων για τον υπολογισμό των στατικών τιμών.

3.6.4.12 Dilution of Precision

Η γεωμετρική ισχύς DOP (*Dilution of Precision*) μετρά την αβεβαιότητα μίας λύσης πλοήγησης που βασίζεται σε μετρήσεις απόστασης μίας διαδρομής από ένα σύνολο πομπών. Οι πομποί αυτοί συνήθως αναφέρονται στους πομπούς που βρίσκονται στους δορυφόρους ενός σχηματισμού GNSS (Global Navigation Satellite System). Ως γνωστόν εάν ένας δέκτης στο έδαφος έχει πρόσβαση σε τουλάχιστον 4 δορυφόρους τότε μπορεί να προσδιοριστεί μία λύση πλοήγησης η οποία θα περιλαμβάνει τη θέση του δέκτη, καθώς και την χρονική διαφορά ανάμεσα στο χρονόμετρο του δέκτη και σε αυτό του δορυφόρου (οι δείκτες DOP παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα 2.4.6).

Οι δείκτες DOP βοηθούν στον προσδιορισμό της επίδρασης του αριθμού των μετρήσεων (του αριθμού των ταυτόχρονα ορατών δορυφόρων) και της γεωμετρίας των πομπών στην αβεβαιότητα της λύσης πλοήγησης. Η τιμή που προκύπτει μπορεί πολλαπλασιαζόμενη με την τυπική αβεβαιότητα στην μέτρηση της απόστασης (η οποία θεωρείται κοινή για όλους τους δορυφόρους) να παρέχει την θεωρητική αβεβαιότητα της λύσης πλοήγησης.

Όταν χρησιμοποιείται κάποιος δείκτης DOP για τον προσδιορισμό της ποιότητας της κάλυψης στο STK, πρέπει να προσδιοριστούν:

- Ο συγκεκριμένος δείκτης DOP που θα χρησιμοποιηθεί (GDOP, PDOP/PDOP(3), HDOP/HDOP(3), VDOP/VDOP(3), TDOP- η σημασία του κάθε δείκτη αναλύεται σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι δείκτες που επισημαίνονται με (3) μπορούν να υπολογιστούν ακόμη και αν υπάρχει πρόσβαση μόνο σε 3 δορυφόρους).
- Ο μέγιστος αριθμός αντικειμένων ενδιαφέροντος (*assets*) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή της λύσης πλοήγησης. (Πίνακας 15).
- η μέθοδος για τον υπολογισμό της στατικής τιμής του δείκτη DOP που θα αναφέρεται στο σύνολο του χρονικού διαστήματος κάλυψης (Πίνακας 16).
- Το χρονικό βήμα που θα χρησιμοποιηθεί (κατά τη δειγματοληψία των δυναμικών τιμών του δείκτη DOP) για τον υπολογισμό του στατικής τιμής του δείκτη DOP που θα αναφέρεται στο σύνολο της διάρκειας κάλυψης.

Μέθοδος	Περιγραφή
Over Determined	Υπολογίζει το δείκτη DOP βασιζόμενο στον σύνολο των διαθέσιμων αντικειμένων ενδιαφέροντος (<i>assets</i>).
Best Four	Υπολογίζει την τιμή του δείκτη DOP βασιζόμενη στο σετ των τεσσάρων δορυφόρων που ο συνδυασμός τους δίνει την μικρότερη τιμή του GDOP.
Best N	Υπολογίζει την τιμή του δείκτη DOP βασιζόμενη στο σετ των N καλύτερων δορυφόρων που ο συνδυασμός τους δίνει την μικρότερη τιμή του GDOP. Η τιμή N εισάγεται από το χρήστη.

Πίνακας 15: Καθορισμός Αριθμού αντικειμένων που χρησιμοποιούνται κατά την λύση πλοήγησης.

Επιλογή	Περιγραφή
Minimum	Η ελάχιστη τιμή του δείκτη DOP σε κάθε σημείο καθ' όλη τη διάρκεια κάλυψης.
Maximum	Η μέγιστη τιμή του δείκτη DOP σε κάθε σημείο καθ' όλη τη διάρκεια κάλυψης.
Average	Η μέση τιμή του δείκτη DOP σε κάθε σημείο υπολογισμένη για το σύνολο της διάρκειας κάλυψης.
Percent Above	Η τιμή του δείκτη DOP είναι μικρότερη από την υπολογισμένη τιμή για το Χ% του χρόνου κάλυψης, όπου το Χ καθορίζεται από το χρήστη.

Πίνακας 16: Διαθέσιμες Στατικές τιμές των δεικτών DOP.

Οι δύο παραπάνω πίνακες αναφέρονται μόνο στις στατικές τιμές των δεικτών DOP. Για τον υπολογισμό των δυναμικών τιμών αρκούν τα δύο πρώτα βήματα προσδιορισμού.

Το STK παρέχει την δυνατότητα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων, τόσο των στατικών όσο και των δυναμικών τιμών των διαφόρων δεικτών DOP.

3.6.4.13 Ακρίβεια Πλοήγησης (*Navigation Accuracy*)

Η ακρίβεια πλοήγησης προσδιορίζει την αβεβαιότητα μία λύσης πλοήγησης, βασισμένης σε μετρήσεις μίας κατεύθυνσης (*one-way measurements*) από ένα σύνολο πομπών. Συνήθως, πρόκειται για τους πομπούς που είναι τοποθετημένοι στους δορυφόρους ενός συστήματος GNSS. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως εάν τέσσερις ή περισσότεροι δορυφόροι είναι ορατοί, τότε μπορούν να προσδιοριστούν η θέση του δέκτη και το σφάλμα συγχρονισμού του χρονομέτρου του δέκτη με το χρονόμετρο του δορυφόρου, που αποτελούν τη λύση πλοήγησης.

Ο δείκτης αξιολόγησης Navigation Accuracy λαμβάνει υπόψη του τον αριθμό και την γεωμετρία των διαθέσιμων δορυφόρων την χρονική στιγμή της μέτρησης και την αβεβαιότητα της μέτρησης μίας κατεύθυνσης κατά την λύση πλοήγησης. Η αβεβαιότητα της μέτρησης μπορεί να προσδιοριστεί από τον χρήστη ως μία σταθερή τιμή ή ως συνάρτηση της γωνίας ύψους.

Κατά τον καθορισμό των δεικτών DOP και την επίλυση των εξισώσεων παρατήρησης θεωρείται ότι η αβεβαιότητα της μίας μέτρησης για όλες τις μετρήσεις ισούται με 1. Οι αβεβαιότητες στις μετρήσεις αποστάσεων, τόσο στους δείκτες DOP, όσο και στην ακρίβεια πλοήγησης, θεωρείται ότι είναι ασυσχέτιστες.

Όταν χρησιμοποιείται ο δείκτης FOM Navigation Accuracy για τον προσδιορισμό της ποιότητας της κάλυψης, πρέπει να προσδιοριστούν από τον χρήστη:

- Το είδος του δείκτη Navigation Accuracy προς προσδιορισμό.
- Ο μέγιστος αριθμός αντικειμένων ενδιαφέροντος (*assets*) που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των λύσεων.

- Η μέθοδος για τον υπολογισμό των στατικών τιμών της ακρίβειας πλοήγησης για το σύνολο του χρονικού διαστήματος ενδιαφέροντος.
- Το χρονικό βήμα που θα χρησιμοποιηθεί κατά τον υπολογισμό της στατικής τιμής.
- Η μέθοδος για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας της απόστασης για κάθε αντικείμενο ενδιαφέροντος (πχ για κάθε ορατό δορυφόρο του σχηματισμού GPS).

Είδος της ακρίβειας πλοήγησης που θα υπολογιστεί

Στον πίνακα 17 αναφέρονται τα διαθέσιμα είδη ακρίβειας πλοήγησης που μπορούν να υπολογιστούν ανάλογα με το μέγεθος του οποίου την αβεβαιότητα θέλουμε να υπολογίσουμε. Στις περιπτώσεις των δεικτών PACC, HACC και VACC του πίνακα, η ακρίβεια πλοήγησης μπορεί να υπολογιστεί και στην περίπτωση που είναι ορατοί μόνο τρεις δορυφόροι, αγνοώντας το σφάλμα συγχρονισμού των χρονομέτρων. Σε περίπτωση που υπάρχουν περισσότεροι των τριών δορυφόροι, το σφάλμα συγχρονισμού του χρονομέτρου υπολογίζεται κανονικά.

Επιλογή	Περιγραφή
GACC (Geometric Accuracy)	Υπολογίζεται η ακρίβεια για το σύνολο των στοιχείων της λύσης πλοήγησης, δηλαδή η αβεβαιότητα στην θέση του σημείου και στο ον προσδιορισμό του σφάλματος συγχρονισμού των χρονομέτρων.
PACC/PACC(3)* (Position Accuracy)	Υπολογίζεται η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό της θέσης του δέκτη.
HACC/HACC(3)* (Horizontal Accuracy)	Υπολογίζεται η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό θέσης του δέκτη στο οριζόντιο επίπεδο (γεωγραφικό μήκος και πλάτος ή αλλιώς συντεταγμένες East και North).
VACC/VACC(3)* (Vertical Accuracy)	Υπολογίζεται η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό του υψομέτρου του δέκτη.
TACC (Time Accuracy)	Υπολογίζεται η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό του σφάλματος συγχρονισμού των χρονομέτρων του δορυφόρου και του δέκτη.

Πίνακας 17: Διαθέσιμα Είδη του δείκτη Navigation Accuracy.

Επιλογή του επιθυμητού αριθμού προσβάσεων

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τον αριθμό των προσβάσεων που θα χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό της ακρίβειας πλοήγησης. Οι διαθέσιμες επιλογές αναφέρονται στον πίνακα 18.

Μέθοδος	Τιμή
Over Determined	Στον υπολογισμό της ακρίβειας πλοήγησης χρησιμοποιείται το σύνολο των ορατών δορυφόρων από τον δέκτη.
Best Four	Στον υπολογισμό της ακρίβειας πλοήγησης χρησιμοποιούνται οι τέσσερις δορυφόροι, από τον συνδυασμό των οποίων προκύπτει η μικρότερη τιμή του GDOP.
Best N	Στον υπολογισμό της ακρίβειας πλοήγησης χρησιμοποιούνται οι N δορυφόροι, από τον συνδυασμό των οποίων προκύπτει η μικρότερη τιμή του GDOP, όπου ο αριθμός των δορυφόρων N προσδιορίζεται από τον χρήστη.
Best Four Acc	Στον υπολογισμό της ακρίβειας πλοήγησης χρησιμοποιούνται οι τέσσερις δορυφόροι, από τον συνδυασμό των οποίων προκύπτει η μικρότερη τιμή της ακρίβειας πλοήγησης.
Best N	Στον υπολογισμό της ακρίβειας πλοήγησης χρησιμοποιούνται οι N δορυφόροι, από τον συνδυασμό των οποίων προκύπτει η μικρότερη τιμή της ακρίβειας πλοήγησης, όπου ο αριθμός των δορυφόρων N προσδιορίζεται από τον χρήστη.

Πίνακας 18: Επιλογή του επιθυμητού αριθμού προσβάσεων κατά τον υπολογισμό της ακρίβειας πλοήγησης.

Επιλογή της Στατικής Τιμής

Όπως και σε αρκετούς από τους παραπάνω δείκτες FOM, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη υπολογισμού μίας στατικής τιμής του δείκτη Navigation Accuracy, η οποία αφορά στο σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης. Οι διαθέσιμες στατικές τιμές αναφέρονται στον πίνακα 19.

Επιλογή	Περιγραφή
Average	Υπολογίζεται η μέση αβεβαιότητα σε κάθε σημείο που προκύπτει για όλη τη διάρκεια μελέτης.
Maximum	Υπολογίζεται η μέγιστη αβεβαιότητα σε κάθε σημείο που παρατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια μελέτης.
Minimum	Υπολογίζεται η ελάχιστη αβεβαιότητα σε κάθε σημείο που παρατηρείται καθ' όλη τη διάρκεια μελέτης.
Percent Below	Η τιμή της αβεβαιότητας είναι μικρότερη από την προκύπτουσα τιμή για το X% του χρόνου, όπου το ποσοστό X προσδιορίζεται από τον χρήστη.

Πίνακας 19: Επιλογή της στατικής τιμής της ακρίβειας πλοήγησης

Κατά το χρονικό διάστημα μελέτης που καθορίστηκε από τον χρήστη για τον υπολογισμό της στατικής τιμής της αβεβαιότητας πλοήγησης, μπορεί να υπάρχουν διαστήματα όπου ο αριθμός των ορατών δορυφόρων να είναι ανεπαρκής για τον υπολογισμό της λύσης πλοήγησης, γεγονός που οδηγεί σε αδυναμία υπολογισμού της ακρίβειας πλοήγησης για τα συγκεκριμένα διαστήματα. Το STK δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει πώς και εάν θα συμπεριλάβει τα συγκεκριμένα

διαστήματα στον υπολογισμό της στατικής τιμής της ακρίβειας πλοήγησης.

Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει είτε να αγνοήσει (*ignore*) τα συγκεκριμένα διαστήματα, οπότε και η στατική τιμή που θα προκύψει θα έχει υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις χρονικές περιόδους κατά τις οποίες μπορεί να υπολογιστεί η λύση πλοήγησης, είτε να τις συμπεριλάβει στους υπολογισμούς, οπότε και εισάγεται η τιμή που έχει προσδιοριστεί στην επιλογή “*Invalid Data Indicator*” στις περιπτώσεις που είναι αδύνατος ο υπολογισμός της λύσης πλοήγησης.

Προσδιορισμός του Χρονικού Βήματος

Ο χρήστης καλείται να προσδιορίσει το χρονικό βήμα που θα χρησιμοποιηθεί κατά την δειγματοληψία των δυναμικών τιμών για τον υπολογισμό της στατικής τιμής.

Προσδιορισμός της Αβεβαιότητας στην μέτρηση των αποστάσεων δέκτη-δορυφόρου

Δύο τύποι αβεβαιοτήτων μπορούν να προσδιοριστούν: η *Asset Range Uncertainty* και η *Receiver Range Uncertainty*.

Asset Range Uncertainty

Για κάθε αντικείμενο ενδιαφέροντος (πχ κάθε δορυφόρο GPS) η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό της απόστασης μεταξύ του αντικειμένου και του δέκτη μπορεί να προσδιοριστεί:

- Είτε μέσω μίας σταθερής τιμής που εκχωρείται από τον χρήστη σε m.
- Είτε σε σχέση με την γωνία ύψους του αντικειμένου (δορυφόρου), μέσω της εισαγωγής ενός αρχείου το οποίο περιέχει την αβεβαιότητα στην απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και του αντικειμένου ως συνάρτηση της γωνίας ύψους και έχει έναν συγκεκριμένο μορφότυπο (*Range Uncertainty Files, *.re*). Υπάρχουν δύο τρόποι καθορισμού των αρχείων: είτε αντιστοιχίζοντας τις διάφορες γωνίες ύψους με την αντίστοιχη τιμή της τυπικής απόκλισης της απόστασης (*range standard deviation*), είτε αντιστοιχίζοντας της γωνίες ύψους με την αντίστοιχη τιμή της διακύμανσης της απόστασης (*range variation*).

Receiver Range Uncertainty

Η αβεβαιότητα στην μέτρηση της απόστασης λόγω του δέκτη είναι σταθερή και ανεξάρτητη της γεωμετρίας. Μπορεί να ερμηνευθεί ως το επίπεδο του θορύβου στις μετρήσεις ψευδοαπόστασης (*white noise level of pseudo-range measurement*) που οφείλεται στο hardware του δέκτη. Για παράδειγμα, εάν η μέτρηση της ψευδοαπόστασης του δεκτή από έναν δορυφόρο έχει χαρακτηρίζεται από μία αβεβαιότητα της τάξης των 4 m και ο δέκτης έχει μία αβεβαιότητα της τάξης των 3m, τότε η προκύπτουσα συνολική αβεβαιότητα που υπολογίζεται από το πρόγραμμα προκύπτει: $\sqrt{4^2+3^2}=5\text{ m}$. Η αντίστροφη τιμή της διακύμανσης της κάθε ψευδοαπόστασης που χρησιμοποιείται στην λύση πλοήγησης εισάγεται στον πίνακα βαρών που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πίνακα N (βλέπε Ενότητα 2.4.6) κατά την επίλυση με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων.

Κριτήρια Ικανοποίησης (Satisfaction Criteria)

Το STK δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού κριτηρίων κατά τον υπολογισμό των δεικτών κάλυψης, έτσι ώστε το STK να εφαρμόζει τις γραφικές ιδιότητες που έχουν προσδιοριστεί μόνο στην περίπτωση ικανοποίησης των συγκεκριμένων κριτηρίων, ώστε να διευκολύνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Προκειμένου να κάνει χρήση της συγκεκριμένης δυνατότητας, ο χρήστης πρέπει να ενεργοποιήσει την επιλογή (Satisfaction → Enable) και στη συνέχεια να ορίσει μία τιμή κατωφλίου (*Threshold*) καθώς και τον τύπο του κριτηρίου σύγκρισης που επιθυμεί να εφαρμόσει. Οι διαθέσιμοι τύποι (λογικοί τελεστές) είναι: At Least($\geq$), At Most($\leq$), Equal to($=$), Greater Than($>$), Less Than($<$) .

Το STK δύναται να εφαρμόσει τα κριτήρια τόσο στη στατική όσο και στη δυναμική συμπεριφορά (και απεικόνιση της) των δεικτών FOM. Επίσης παρέχει ένα εύρος αναφορών και γραφημάτων.

Σε περίπτωση που για την παρουσίαση είναι ενεργοποιημένη και η επιλογή σχεδιασμού ισαριθμικών καμπυλών (*contours*) η ικανοποίηση των κριτηρίων δεν προβάλλεται στα γραφικά. Τέλος δεν μπορούν να εφαρμοστούν κριτήρια σε περιπτώσεις δεικτών FOM που παίρνουν μόνο δύο τιμές (0,1) όπως για παράδειγμα η απλή κάλυψη.

Διαστήματα Τιμών FOM που χρησιμοποιούνται για στατιστικά (FOM Value Limits for Computing Statistics)

Ενεργοποιώντας την επιλογή '*Use FOM Values in Limits for Statistics*' καθορίζεται από το χρήστη το διάστημα τιμών μέσα στο οποίο πρέπει να βρίσκεται ο δείκτης FOM προκειμένου να συμμετάσχει στον υπολογισμό των στατιστικών δεικτών (μέγιστη-ελάχιστη τιμή, μέσος όρος, τυπική απόκλιση...). Από τον χρήστη ορίζονται τα άκρα του διαστήματος (Min, Max). Τέλος ο χρήστης μπορεί να ενεργοποιήσει την επιλογή '*Exclude FOM Value in Limits*' και να χρησιμοποιηθούν οι τιμές του δείκτη FOM που βρίσκονται εκτός του διαστήματος που όρισε ο χρήστης.

Δυνατότητα υπολογισμού ημερήσιων τιμών (Per Day Values) Δεικτών FOM

Σε ορισμένους δείκτες αξιολόγησης παρέχεται η δυνατότητα υπολογισμού ημερήσιων τιμών και πιο συγκεκριμένα της μέγιστης, ελάχιστης και μέσης ημερήσιας τιμής. Ο υπολογισμός της μέσης τιμής γίνεται διαιρώντας το συνολικό χρονικό διάστημα κάλυψης δια τη συνολική διάρκεια κάλυψης σε μέρες. Στην περίπτωση υπολογισμού της μέγιστης ή ελάχιστης τιμής πρώτα προσδιορίζονται τα ημερολογιακά ημερήσια διαστήματα βασισμένα στο χρόνο UTC και στη συνέχεια υπολογίζεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του δείκτη για κάθε ημέρα.

3.7 Επιβολή Περιορισμών (*Constraints*) στα Αντικείμενα του STK

Στην ορολογία του STK, ο όρος περιορισμός χρησιμοποιείται για να ορισθεί “μία οριακή συνθήκη που τοποθετείται επί μίας παραμέτρου και περιορίζει την εγκυρότητά της σε ένα υποσύνολο του αρχικού συνόλου τιμών της.”

Η επιβολή περιορισμών αποσκοπεί στην εκτίμηση φαινομένων και επιδράσεων, που διαφέρουν κατά περίπτωση, και δεν λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς του γενικότερου μαθηματικού μοντέλου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των προσβάσεων.

Οι περιορισμοί του STK χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με το είδος του αντικειμένου και της εφαρμογής και πολλές φορές την λειτουργική ενότητα (*module*) στην οποία ανήκουν. Οι πιο βασικές από αυτές είναι οι εξής: Βασικοί Περιορισμοί (*Basic Constraints*), Ηλιακοί Περιορισμοί (*Sun Constraints*), Χρονικοί Περιορισμοί (*Temporal Constraints*), *Advanced Constraints*, Περιορισμοί Ζώνης (*Zones*), Targeting, Vector, Special, Search Track, SAR και άλλοι.

3.7.1 Βασικοί Περιορισμοί

Οι βασικοί περιορισμοί επιτρέπουν την επιβολή τυπικών περιορισμών πρόσβασης μεταξύ αντικειμένων. Σημειώνεται ότι δεν είναι όλοι οι περιορισμοί διαθέσιμοι για όλα τα αντικείμενα. Επίσης οι βασικοί περιορισμοί των αισθητήρων διαφέρουν από αυτούς των υπολοίπων βασικών αντικειμένων.

Με χρήση της επιλογής '*exclude time intervals*' λαμβάνονται ως έγκυρης πρόσβασης τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία δεν ικανοποιείται η συνθήκη του περιορισμού (με άλλα λόγια, το συμπλήρωμα των λύσεων που ικανοποιούν την συνθήκη).

Πρέπει να γίνει η διάκριση μεταξύ των περιορισμών κάλυψης που αναφέρονται εδώ και των περιορισμών κάλυψης που αφορούν τους δείκτες αξιολόγησης. Οι περιορισμοί κάλυψης αντικειμένων εξαιρούν δεδομένα από τους υπολογισμούς πρόσβασης που πληρούν (ή δεν πληρούν) μία συνθήκη, με συνέπεια να μεταβάλλονται τα τελικά αποτελέσματα της κάλυψης ή των δεικτών αξιολόγησης της κάλυψης (FOM). Αντίθετα, οι περιορισμοί που υπολογίζονται ως τιμές FOM αποτελούν μόνο δείκτες αξιολόγησης της κάλυψης και δεν επιδρούν κατά κανένα τρόπο στα αποτελέσματα της κάλυψης.

Ορισμένοι από τους βασικούς περιορισμούς παρατίθενται παρακάτω:

Αζιμούθιο (*Azimuth Angle*): Ως περιορισμός τίθεται η ελάχιστη και η μέγιστη αποδεκτή τιμή της γωνίας του αζιμουθίου. Ανάλογα με το αντικείμενο η αζιμουθιακή γωνία μετράται και με ελαφρώς διαφορετικό τρόπο από το STK:

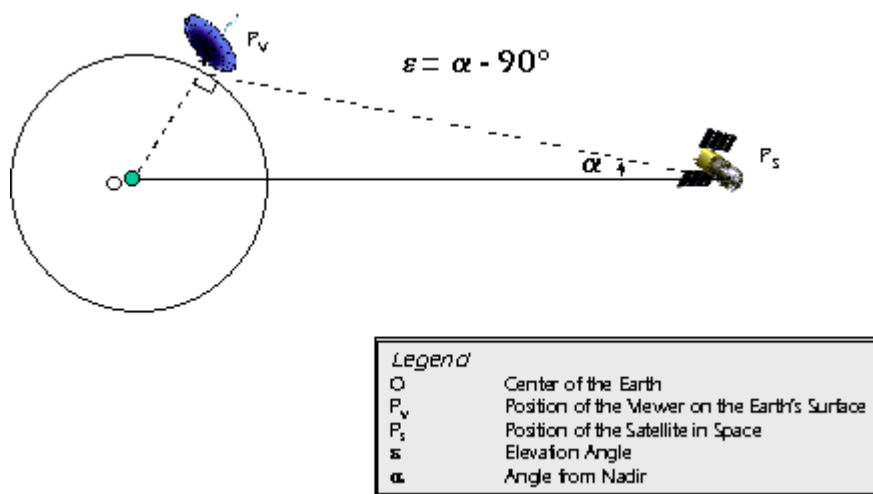
- Για εγκαταστάσεις ή στόχους το αζιμούθιο μετράται στο τοπικό οριζόντιο επίπεδο, το οποίο εφάπτεται της επιφάνειας του κεντρικού σώματος (για τις εφαρμογές μας η Γη). Είναι η γωνία

που σχηματίζεται μεταξύ του τοπικού Βορρά και της ευθείας που ενώνει τα δύο αντικείμενα με φορά προς ανατολάς.

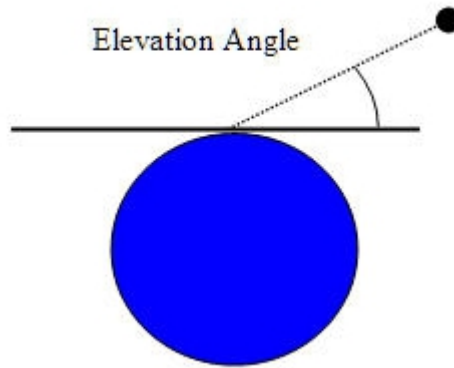
- Για πλοία, οχήματα εδάφους και αεροσκάφη το αζιμούθιο μετράται από την προβολή του διανύσματος περιστροφής της γης.
- Για τα υπόλοιπα αντικείμενα το αζιμούθιο μετράται στο επίπεδο που είναι κάθετο στο ναδίρ του αντικειμένου και είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της προβολής του διανύσματος της ταχύτητας περιστροφής της γης και της προβολής του διανύσματος της σχετικής θέσης των 2 αντικειμένων. Η γωνία μετράται με τον κανόνα του δεξιού χεριού.

Ρυθμός Μεταβολής του αζιμουθίου (*Azimuth Rate*): Τίθεται η ελάχιστη και η μέγιστη αποδεκτή τιμή του ρυθμού μεταβολής της αζιμουθιακής γωνίας.

Γωνία Ύψους: Για όλα τα αντικείμενα πέρα από τις εγκαταστάσεις και τους στόχους, η γωνία ύψους μετράται ως η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του διανύσματος στη διεύθυνση του ναδίου και του διανύσματος θέσης του αντικειμένου μειωμένη κατά 90 μοίρες. Για τις εγκαταστάσεις και τους στόχους ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται από το τοπικό οριζόντιο επίπεδο και την ευθεία που συνδέει την εγκατάσταση/ στόχο με το δεύτερο αντικείμενο.



Σχήμα 17: Ορισμός Γωνίας Ύψους για κάποιον δορυφόρο (Πηγή: STK D. A. Help)



Σχήμα 18: Ορισμός Γωνίας Ύψους για εγκατάσταση ή στόχο (Πηγή: STK D. A. Help)

Ρυθμός Μεταβολής της Γωνίας Ύψους (Elevation Rate): Προσδιορίζεται η ελάχιστη ή και η μέγιστη έγκυρη τιμή του ρυθμού μεταβολής της γωνίας ύψους.

Υψόμετρο (Altitude): Μπορεί να καθοριστεί μία μέγιστη και μία ελάχιστη τιμή για την επιτρεπόμενη διαφορά υψόμετρο μεταξύ των δύο αντικειμένων.

Απόσταση (Range): Η μέγιστη και η ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ των αντικειμένων

Range Rate: Ο μέγιστος και ο ελάχιστος επιτρεπόμενος ρυθμός μεταβολής της απόστασης μεταξύ των 2 αντικειμένων.

Propagation Delay: Η πρόσβαση στο αντικείμενο περιορίζεται από την μέγιστη ή/ και την ελάχιστη διάρκεια που χρειάζεται το σήμα για να μεταβεί από το ένα στο άλλο αντικείμενο.

Γραμμή Ορατότητας (Line-of-sight): Με την ενεργοποίηση αυτής της επιλογής η πρόσβαση σε ένα αντικείμενο περιορίζεται στις γραμμές ορατότητας που δεν τέμνονται (εμποδίζονται) από το έδαφος. Ανάλογα με το είδος του αντικειμένου το έδαφος μοντελοποιείται και με διαφορετικό τρόπο.

- Κατά την ανάλυση ορατότητας οχημάτων το έδαφος μοντελοποιείται ως η ελλειψοειδής επιφάνεια που καθορίζεται από το κεντρικό σώμα (central body- για τις γήινες εφαρμογές η Γη).
- Τα άστρα και οι πλανήτες μοντελοποιούν το έδαφος ως ένα ελλειψοειδές σχήμα που καθορίζεται από το κεντρικό σώμα του άλλου αντικειμένου.
- Οι γραμμικοί και οι επιφανειακοί στόχοι εκτιμούν την γραμμή ορατότητας για κάθε ακμή τους. Μία ακμή θεωρείται ότι έχει ορατότητα στο άλλο αντικείμενο αν η γωνία ύψους που σχηματίζουν είναι μεγαλύτερη από 0.
- Οι εγκαταστάσεις και οι στόχοι μοντελοποιούν το έδαφος ως ένα ελλειψοειδές που περνά από το υψόμετρο του σημείου όπου και βρίσκονται (και το οποίο αναφέρεται είτε στο γήινο

ελλειψοειδές είτε στη μέση στάθμη της θάλασσας). Η ελλειψοειδής επιφάνεια κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να περνά από το καθορισμένο υψόμετρο, να έχει το ίδιο κάθετο διάνυσμα στο σημείο με την επιφάνεια του ελλειψοειδούς και το ίδιο σχήμα με το σχήμα της επιφάνειας του κεντρικού σώματος (σφαίρα, πεπλατυσμένο σφαιροειδές ή τριαξονικό ελλειψοειδές).

Μάσκα Εδάφους (*Terrain Mask*): Εάν είναι ενεργοποιημένη, τότε η πρόσβαση μεταξύ αντικειμένων περιορίζεται από οποιαδήποτε πληροφορία εδάφους βρίσκεται στη γραμμή ορατότητας των δύο αντικειμένων.

AzEl (*Azimuth/ Elevation*) Mask: Χρησιμοποιείται μία μάσκα εδάφους, η οποία για κάθε τιμή του αζιμουθίου του σημείου του αντικειμένου προσδιορίζει την μέγιστη και ελάχιστη γωνία ύψους καθώς και περιορισμούς στην απόσταση (εάν έχουν τεθεί). Η μάσκα εδάφους είτε υπολογίζεται από το πρόγραμμα, είτε μπορεί να εισαχθεί ως αρχείο από τον χρήστη (format *.AEM- αναλυτικότερα στο STK Help: Azimuth Elevation Mask File Format).

Σε περίπτωση που τα αντικείμενα έχουν προσαρτημένο και κάποιον αισθητήρα μπορούν να τεθούν και οι παρακάτω δύο περιορισμοί:

Πεδίο Ορατότητας (*Field Of View*): Εάν είναι ενεργοποιημένη αυτή η επιλογή, θεωρείται ότι δεν υπάρχει πρόσβαση στην περίπτωση που το σχετιζόμενο αντικείμενο δεν βρίσκεται στο πεδίο ορατότητας του αισθητήρα όπως καθορίζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τον τύπο του αισθητήρα.

Μάσκα Αζιμουθίου- Γωνίας Ύψους Αισθητήρα (*Sensor AzEl Mask*): Αντίστοιχη με την παραπάνω λογική της AzEl Mask με τροποποιήσεις για χρήση σε αισθητήρες.

3.7.2 Άλλες Κατηγορίες Περιορισμών

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω υπάρχουν πολλές κατηγορίες περιορισμών πέρα από την κατηγορία των βασικών. Πιο συγκεκριμένα, το STK παρέχει δυνατότητα περιορισμού της ορατότητας:

- Ανάλογα με τη σχετική θέση του ήλιου ή/και της σελήνης με το αντικείμενο,
- Σε καθορισμένα από το χρήστη χρονικά διαστήματα (*temporal constraints*),
- Σε καθορισμένες εδαφικές ζώνες, που προσδιορίζονται με την εισαγωγή των γεωδαιτικών συντεταγμένων από το χρήστη,
- με χρήση διανυσμάτων μεταξύ του αντικειμένου αναφοράς και άλλων αντικειμένων
- με χρήση προηγμένων ή ειδικών περιορισμών πρόσβασης

Όσον αφορά τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, τα συστήματα ραντάρ και ραντάρ συνθετικού ανοίγματος, το STK παρέχει ένα εύρος κατηγοριών διαφορετικών περιορισμών που αφορούν σε δείκτες λειτουργίας και αξιολόγησης των συστημάτων, αλλά δεν αποτελούν αντικείμενο μελέτης της

παρούσας διπλωματικής.

3.8 Οπτικοποίηση στο STK

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του STK σε σχέση με αντίστοιχα άλλα προγράμματα είναι οι δυνατότητες δισδιάστατης και τρισδιάστατης οπτικοποίησης των σεναρίων που παρέχει. Με την εκκίνηση του προγράμματος και την δημιουργία ενός νέου σεναρίου, το πρόγραμμα πέρα από τις βασικές γραμμές εργαλείων και τον Object Browser, δημιουργεί τα παράθυρα "2D Graphics Window" και "3D Graphics Window", στα οποία οπτικοποιείται δισδιάστατα και τρισδιάστατα αντίστοιχα το εκάστοτε υπό μελέτη σενάριο.

3.8.1 Δισδιάστατη Οπτικοποίηση στο STK

Οι βασικές επιλογές δισδιάστατης οπτικοποίησης του 2D Graphics Window είναι οι ακόλουθες:

- Ο καθορισμός αρχής, πέρατος και βήματος του πλέγματος των γεωγραφικών συντεταγμένων.
- Ο καθορισμός του συστήματος αναφοράς (πχ ECI ή ECF) και της προβολής που θα χρησιμοποιηθεί (πχ ισαπέχουσα κυλινδρική, αζιμουθιακή, ορθή προβολή κ.α.).
- Ο καθορισμός της λεπτομέρειας των διανυσματικών στοιχείων που αναπαριστούν ακτογραμμές, εθνικά και τοπικά σύνορα, λίμνες και ποτάμια ανάλογα με τη μεγέθυνση που έχει γίνει στον αρχικό χάρτη.
- Ο καθορισμός του φόντου του χάρτη (εικόνων με γεωαναφορά ή απλού χρωματικού φόντου- υπάρχουν ορισμένες έτοιμες εικόνες στο STK παγκόσμιας κλίμακας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Παρόλα αυτά η μικρή ανάλυση τους έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγαλύτερες κλίμακες (κλίμακες της τάξης απεικόνισης εθνικών χαρτών).
- Δυνατότητα Προσομοίωσης της φωτεινότητας (μέρα ή νύχτα) σε στατικό και δυναμικό χρόνο.¹³
- Δυνατότητα Αναπαράστασης Γραμμών Σύνδεσης μεταξύ αντικειμένων.
- Δυνατότητα Εισαγωγής Λεζάντας με επεξηγηματικό κείμενο σε οποιοδήποτε σημείο του χάρτη.
- Καθορισμός του χρώματος, του πάχους και του είδους οποιουδήποτε από τα παραπάνω γραμμικού στοιχείου.
- Καθορισμός του ουρανίου σώματος που απεικονίζει ο χάρτης, ανάλογα με την αποστολή.

Πέρα από τις ρυθμίσεις οπτικοποίησης του 2D- Graphics Window, γίνονται ξεχωριστές ρυθμίσεις για το εκάστοτε αντικείμενο που δημιουργείται ή εισάγεται στο πρόγραμμα. Για παράδειγμα μετά την

¹³ Οι επιλογές στο STK είναι:

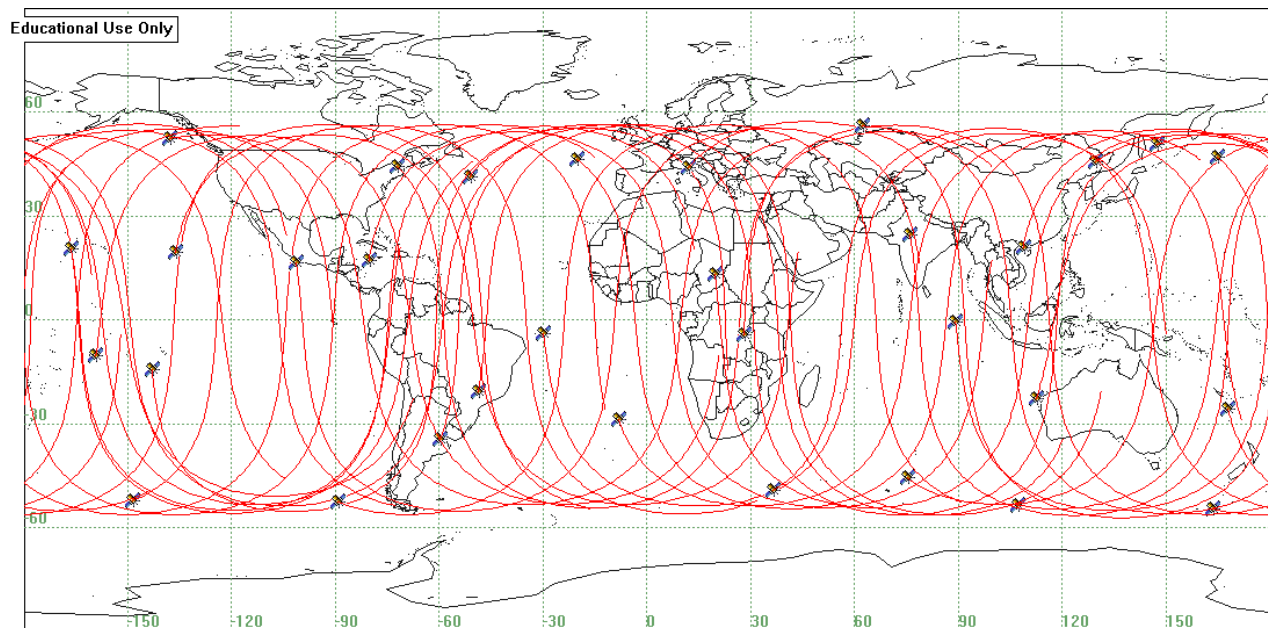
1 sunlight δηλαδή η περιοχή που τη δεδομένη στιγμή φωτίζεται από τον ήλιο,

2 umbra (λατινικά για σκιά) το σκοτεινότερο τμήμα της σκιάς όπου το σκιάζον σώμα αποκλείει κάθε φωτεινή δέσμη από την πηγή φωτός. Ένας παρατηρητής σε αυτή τη περιοχή αντιλαμβάνεται μία ολική έκλειψη) και

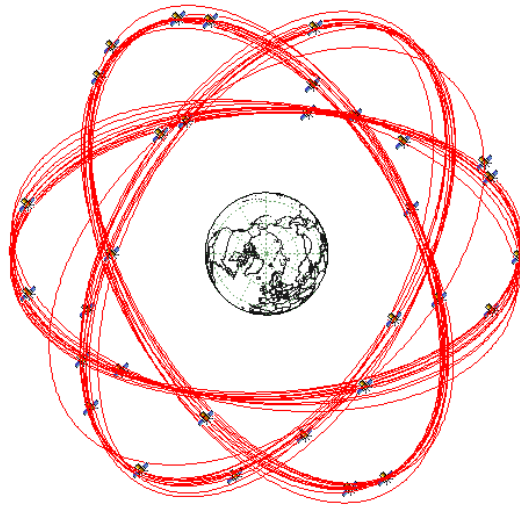
3 penumbra (από το λατινικό "paene umbra" → σχεδόν σκιά- ημίφως) όπου μόνο ένα τμήμα της φωτεινής πηγής αποκρύπτεται από το σκιάζον σώμα. Σε αυτή την περιοχή ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται μία μερική έκλειψη. (πηγή: wikipedia)

εισαγωγή ενός δορυφόρου στο STK ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει ποιες από τις παρακάτω πληροφορίες θέλει να εμφανίζονται στο χάρτη:

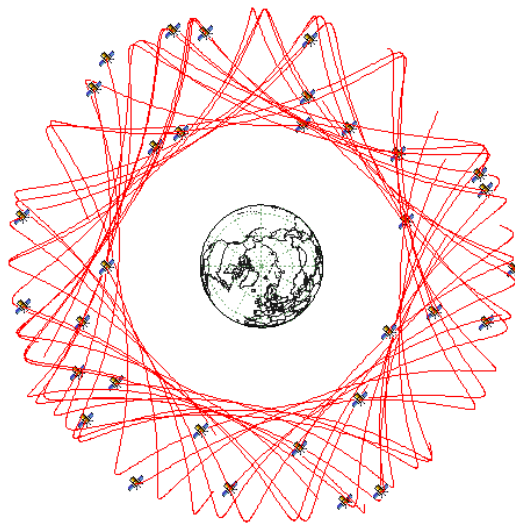
- Όνομα του Δορυφόρου
- Ίχνος της πορείας του δορυφόρου στο έδαφος και σήμανση της θέσης του δορυφόρου κάθε χρονική στιγμή (*ground track* και *ground track marker*)
- Ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου και σήμανση της θέσης του δορυφόρου κάθε χρονική στιγμή (*orbit track* και *orbit track marker*).



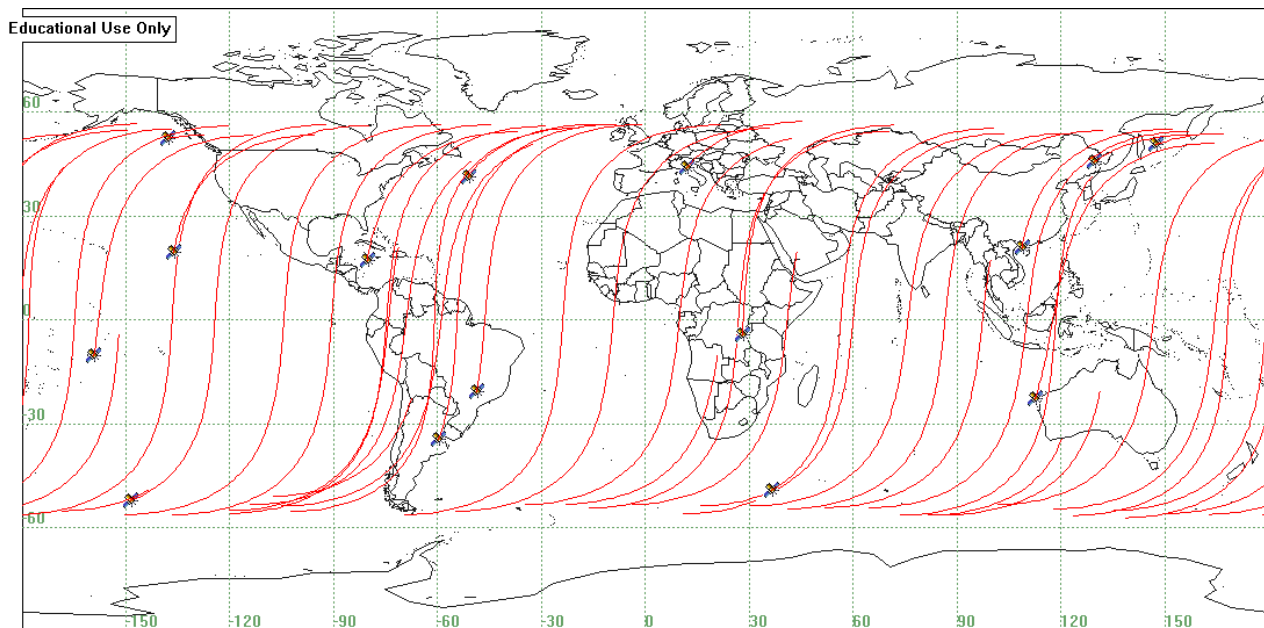
Σχήμα 19: Το ίχνος της τροχιάς των δορυφόρων του σχηματισμού GPS όπως απεικονίζεται σε ισαπέχουσα κυλινδρική προβολή



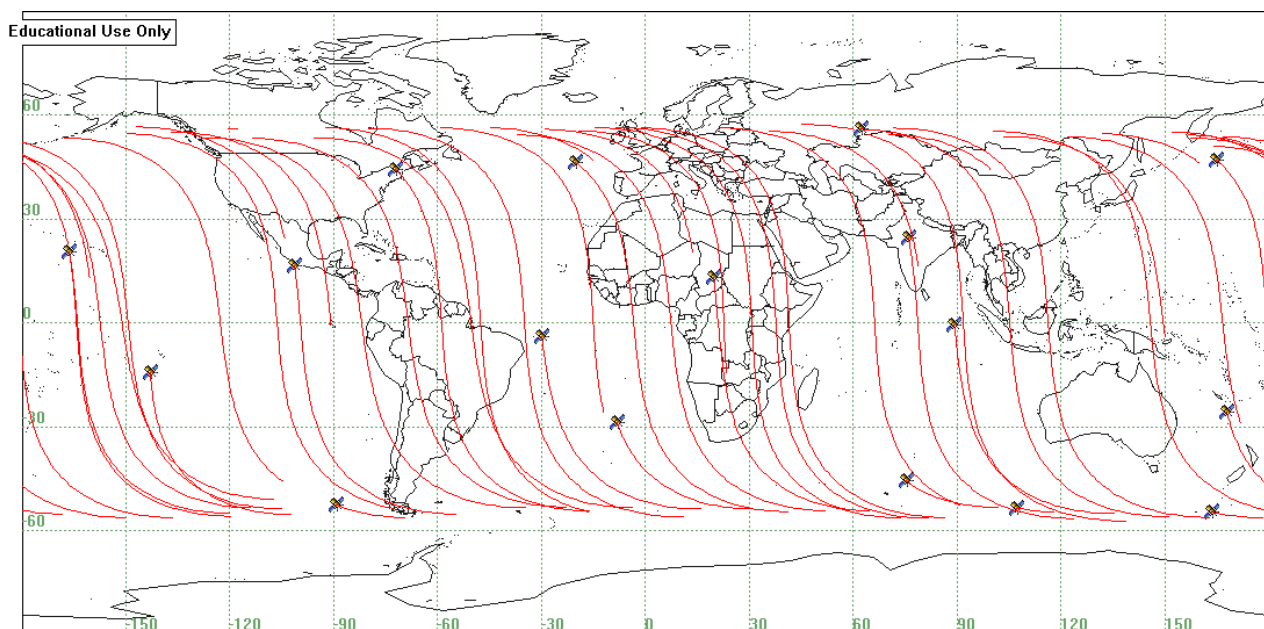
Σχήμα 20: Το ίχνος των δορυφόρων του σχηματισμού GPS όπως απεικονίζεται σε ορθή πολική προβολή και αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων (ECI).



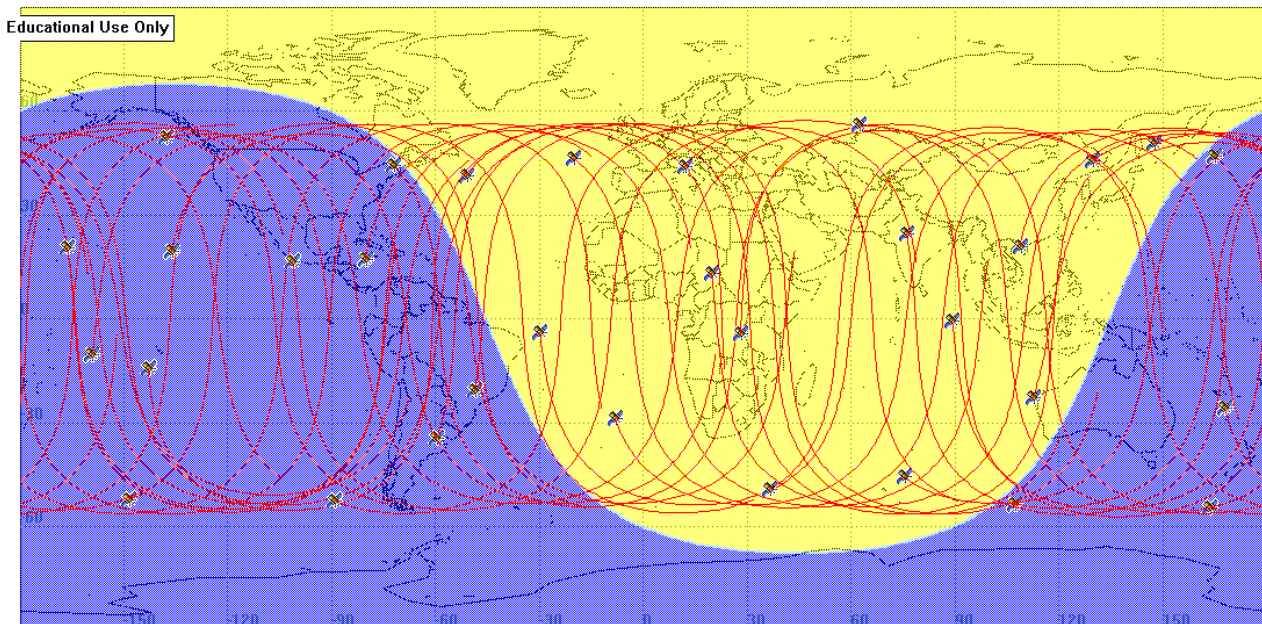
Σχήμα 21: Το ίχνος των δορυφόρων του σχηματισμού GPS όπως απεικονίζεται σε ορθή πολική προβολή και γήινο σύστημα συντεταγμένων (ECF)



Σχήμα 22: Το ίχνος του ανοδικού μόνο τμήματος της τροχιάς των δορυφόρων (ισαπέχουσα κυλινδρική προβολή)



Σχήμα 23: Το ίχνος του καθοδικού μόνο τμήματος της τροχιάς των δορυφόρων (ισαπέχουσα κυλινδρική προβολή)



Σχήμα 24: Στιγμιότυπο που απεικονίζει το φωτεινό (ημέρα- κίτρινο) και σκοτεινό (νύχτα- κυανό) τμήμα της Γης

Επίσης είναι δυνατή η επιλογή εμφάνισης μόνο του ανοδικού ή του καθοδικού τμήματος της τροχιάς ενός δορυφόρου στο χάρτη, καθώς και η επιλογή απεικόνισης συγκεκριμένου αριθμού περιόδων του δορυφόρου. Για παράδειγμα εάν ο δορυφόρος πραγματοποιεί στο χρονικό διάστημα του σεναρίου 5 περιστροφές γύρω από τη Γη, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να εμφανίζονται μόνο οι 3 τελευταίες στον στατικό χάρτη. Επιπλέον, κατά τη δυναμική απεικόνιση του σεναρίου, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει πιο τμήμα του ίχνους της τροχιάς του δορυφόρου που έχει ήδη διανύσει (*trailing*) ή που πρόκειται να διανύσει (*leading*) θα αναπαριστάται κάθε χρονική στιγμή στα γραφικά.

Όπως και στην περίπτωση του 2D Graphics Window και εδώ μπορεί να επιλεγεί η οπτικοποίηση της κατάστασης φωτισμού του δορυφόρου δηλαδή εάν βρίσκεται σε θέση που μπορεί ή δεν μπορεί να έχει πρόσβαση στο φως του Ήλιου.

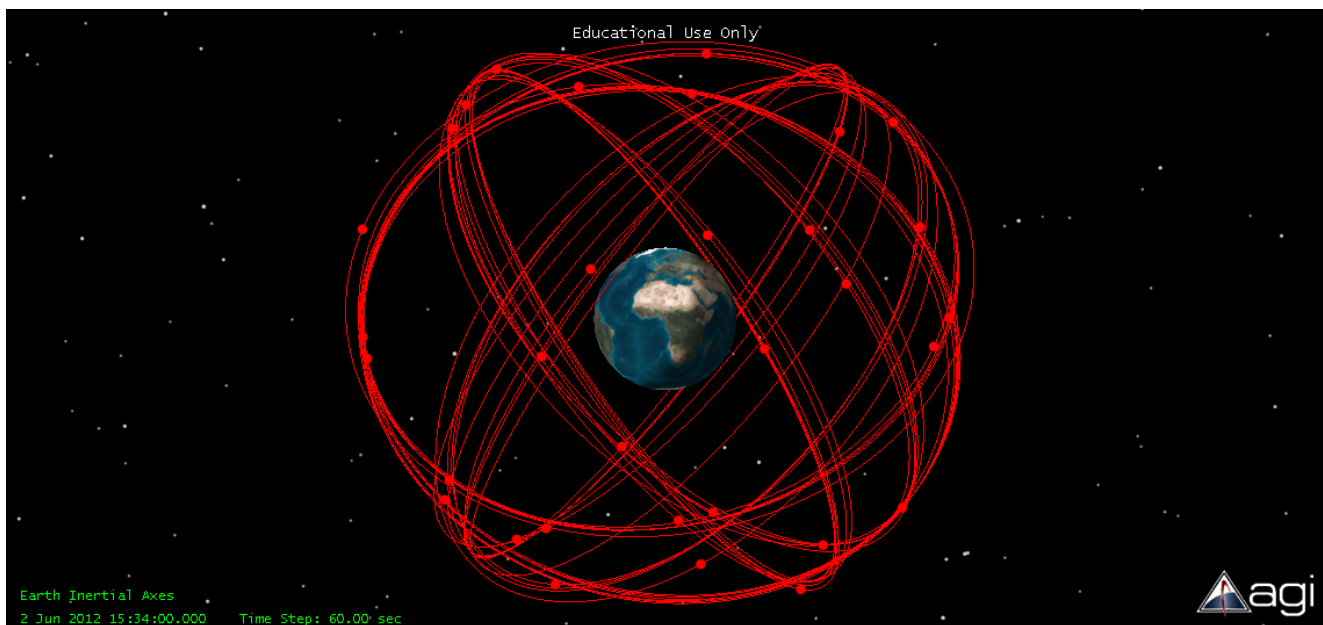
Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ισαριθμικές καμπύλες για να απεικονίσουν το γεωμετρικό τόπο των σημείων της γήινης επιφάνειας που σχηματίζουν ίδια γωνία ύψους με το δορυφόρο για διάφορες γωνίες ύψους (*elevation angle*)¹⁴, τις οποίες ορίζει είτε αναλυτικά ο χρήστης είτε εισάγει το άνω και κάτω άκρο και την ισοδιάσταση. Αποτελεί έναν ακόμη τρόπο για να εξετάσουμε τι τμήμα της γήινης επιφάνειας καλύπτει ο δορυφόρος, ανάλογα με το εύρος του οπτικού πεδίου που φέρει κάποιος αισθητήρας του (με την προϋπόθεση αισθητήρα γεωμετρίας κώνου και σφαιρικής γης).

Επίσης με ισαριθμικές καμπύλες μπορούν να απεικονιστούν γεωμετρικοί τόποι σημείων που απέχουν την ίδια απόσταση από κάποιο αντικείμενο και παράλληλα έχουν το ίδιο υψόμετρο με αυτό.

¹⁴ Γωνία ύψους: Η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο οριζόντιο επίπεδο όπως ορίζεται για οποιοδήποτε σημείο της γήινης επιφάνειας και το διάνυσμα που συνδέει το σημείο της γήινης επιφάνειας με τον δορυφόρο.

3.8.2 Τρισδιάστατη Οπτικοποίηση στο STK

Το STK παρέχει την δυνατότητα τρισδιάστατης οπτικοποίησης των σεναρίων του με χρήση του παραθύρου τρισδιάστατων γραφικών που διαθέτει και ανοίγει αυτόματα με τη δημιουργία ενός νέου σεναρίου. Ως προεπιλογή κεντρικό σώμα των γραφικών αποτελεί η Γη και αναπαριστώνται επίσης ο Ήλιος, η Σελήνη, οι υπόλοιποι πλανήτες του ηλιακού συστήματος καθώς και ορισμένα άστρα ανάλογα με τη φωτεινότητά τους. Με την εισαγωγή ενός αντικειμένου στο STK από το χρήστη, το αντικείμενο αυτόματα εισάγεται και στο 3D Graphics Window. Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τις ρυθμίσεις απεικόνισης των αντικειμένων, τις ευρύτερες ρυθμίσεις απεικόνισης του σεναρίου καθώς και τις παραμέτρους του 3D Graphics Window μέσα από τις σελίδες των ιδιοτήτων τους.

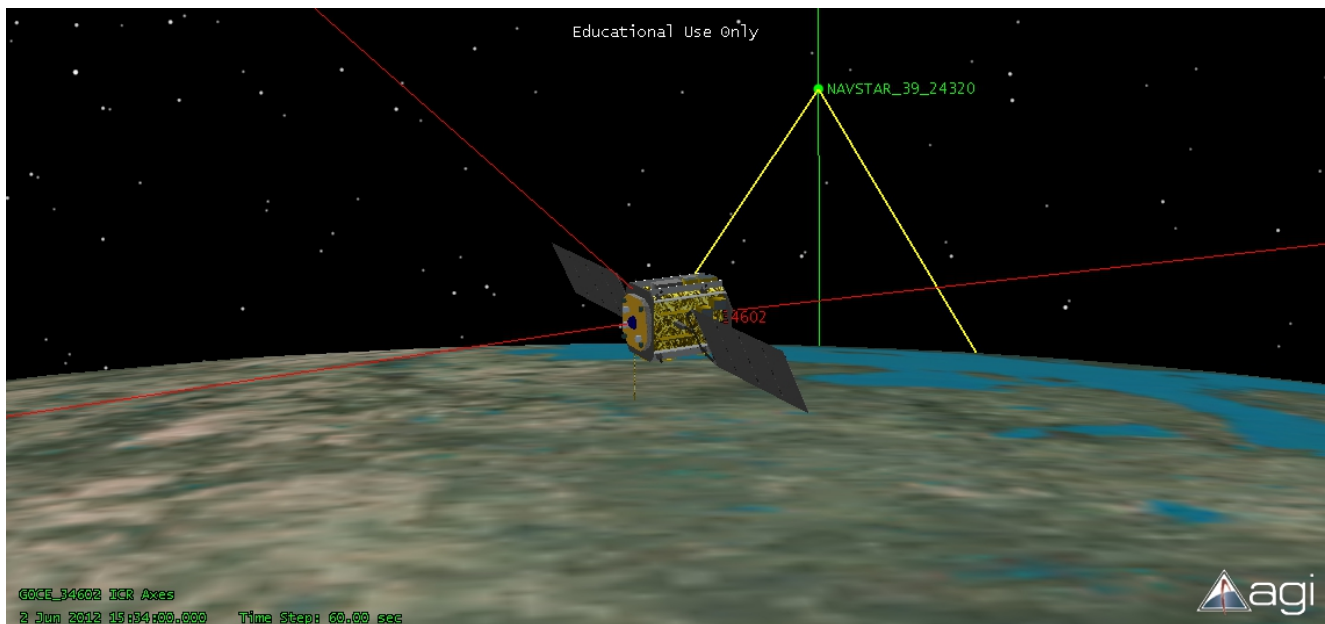


Σχήμα 25: Ο Δορυφορικός Σχηματισμός του Συστήματος GPS όπως απεικονίζεται στο 3D Graphics Window.

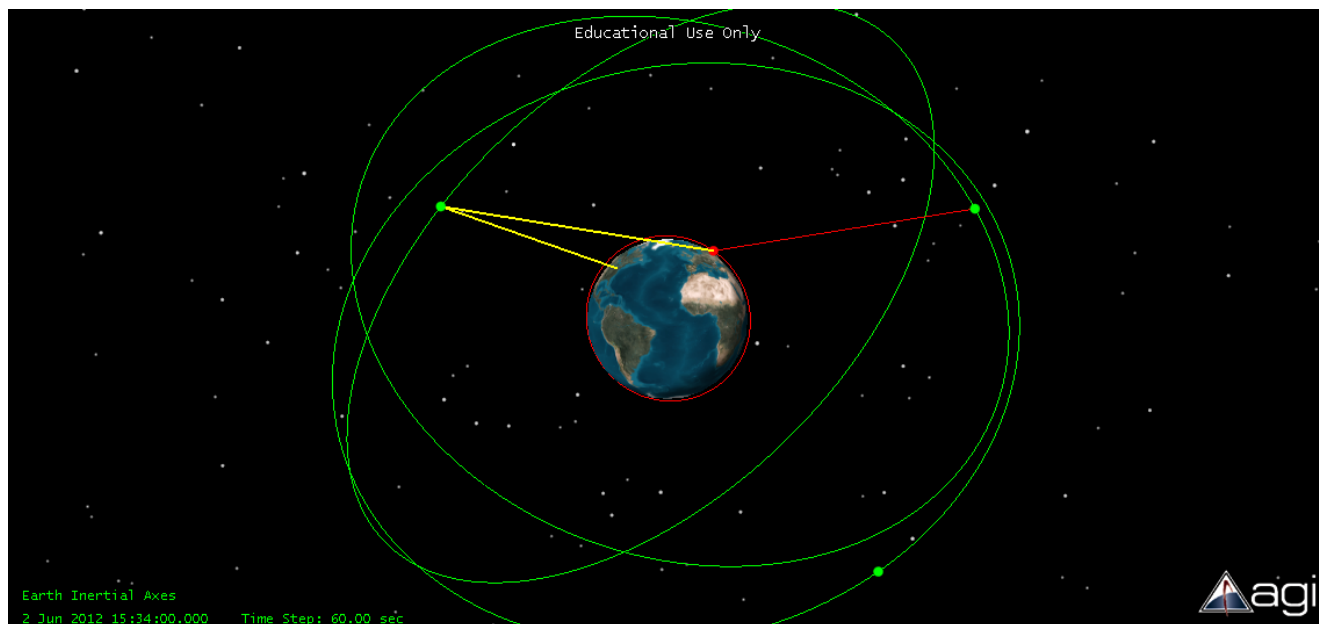
Πιο συγκεκριμένα μέσα από τη σελίδα των ιδιοτήτων του παραθύρου τρισδιάστατης απεικόνισης (3D Graphics Window → Properties) ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει:

- Τη λεπτομέρεια με την οποία θα απεικονίζονται οι ακτογραμμές, τα εθνικά και τοπικά σύνορα, οι λίμνες και τα ποτάμια από τα διανυσματικά διαθέσιμα δεδομένα.
- Τον τρόπο απεικόνισης του πλέγματος μεσημβρινών και παραλλήλων, του ισημερινού και του πρώτου Μεσημβρινού.
- Την απεικόνιση αστέρων και τον διαχωρισμό τους ανάλογα με την φωτεινότητά τους.
- Τις ρυθμίσεις φωτισμού (*lighting*), όπου ο χρήστης ρυθμίζει τη φωτεινότητα του Ήλιου (*Sun Level*) και την ένταση του πρόσθετου φωτός (*ambient light*- χρησιμοποιείται ανεξάρτητα με ημέρα ή νύχτα) ανεξάρτητα για την γήινη σφαίρα και τα αντικείμενα του σεναρίου. Επίσης ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσθέσει και κάποια επιπλέον πηγή φωτός.

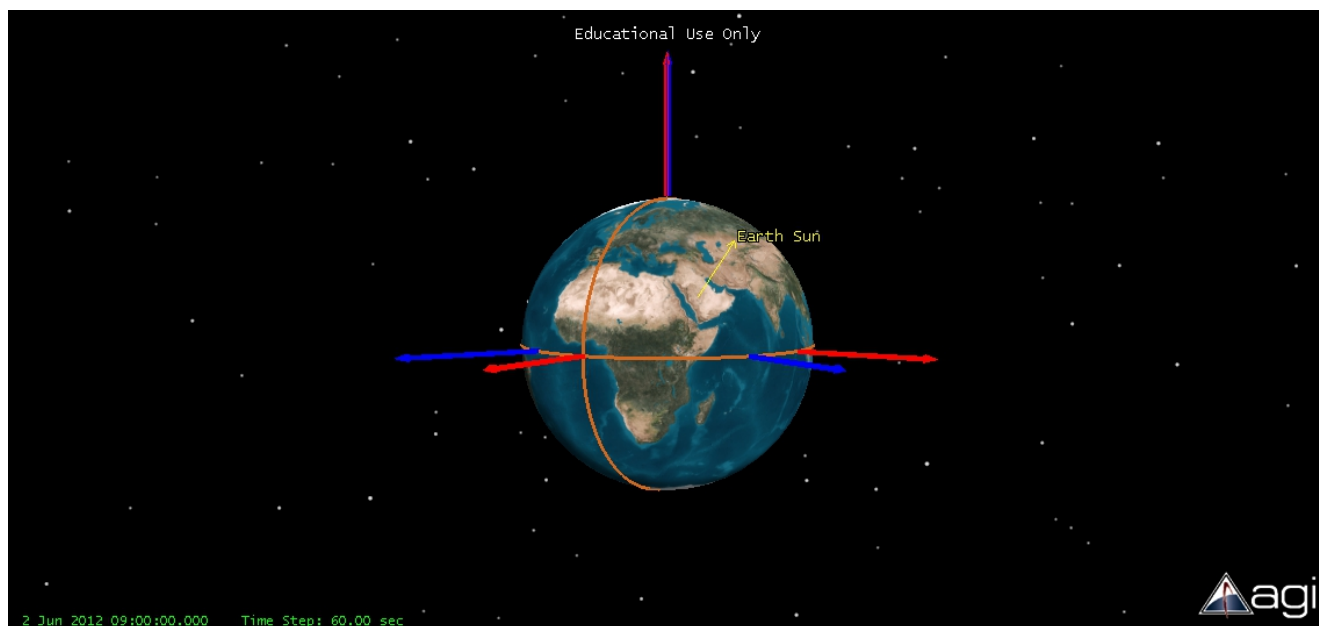
- Την εμφάνιση πλεγμάτων συντεταγμένων. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα στο ουρανογραφικό πλέγμα συντεταγμένων (ορθή αναφορά - απόκλιση), στο πλέγμα του συστήματος ECI και σε ένα πλέγμα που δημιουργείται στο επίπεδο της εκλειπτικής.
- Την προσθήκη και απεικόνιση επεξηγηματικών σχολίων των γραφικών.
- Την πληροφορία πρόσβασης
- Την απεικόνιση διανυσμάτων, όπως τους άξονες των συστημάτων ECI ή ECF, το διάνυσμα διεύθυνσης Γης- Ήλιου ή Γης- Σελήνης και αρκετά ακόμη διανύσματα. Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει και να προσθέσει επιπλέον διανύσματα.
- Γραμμές Σύνδεσης Μεταξύ αντικειμένων
- Την δυνατότητα Ρύθμισης του παραθύρου ώστε να επιτρέπει τη στερεοσκοπική παρατήρηση (Advanced → Stereo Display Option).



Σχήμα 26: Απεικόνιση Πρόσβασης Αλυσίδας (Κίτρινες Γραμμές) που αποτελείται από τον δορυφόρο της αποστολής GOCE, έναν δορυφόρο GPS και έναν σταθμό εδάφους.



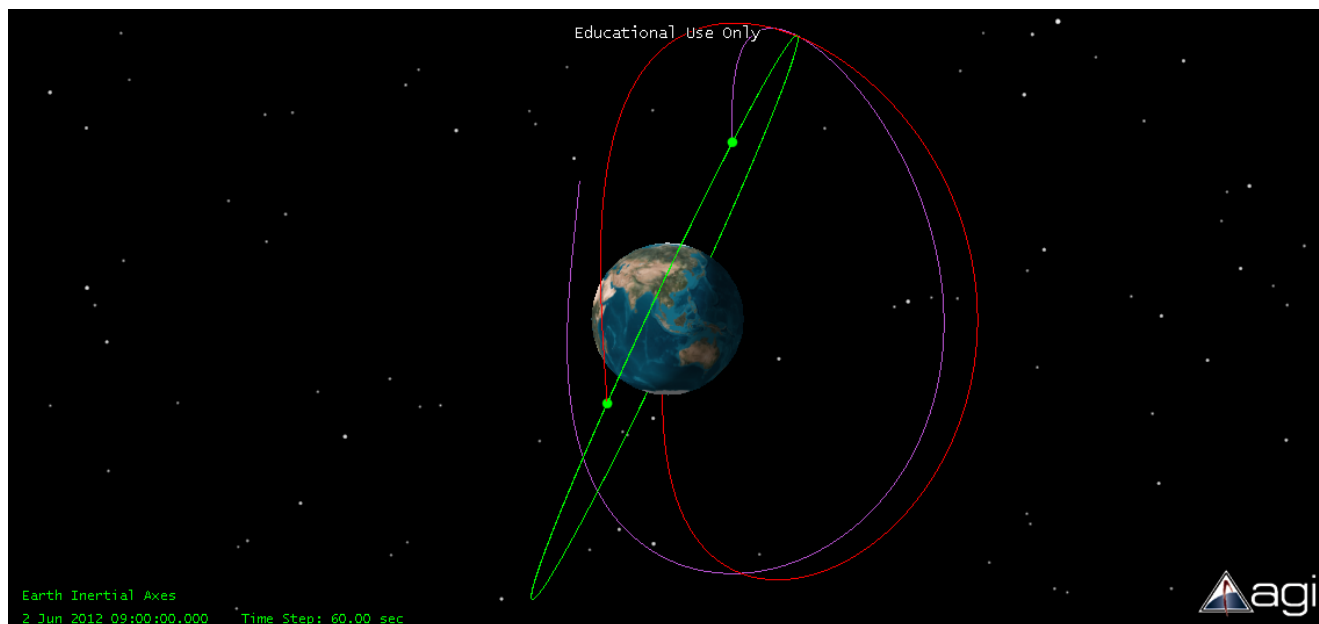
Σχήμα 27: Απεικόνιση πρόσβασης (με κόκκινη ευθεία) μεταξύ του δορυφόρου της αποστολής GOCE με δορυφόρο GPS και παράλληλα την παραπάνω πρόσβαση αλυσίδας (GOCE- Δορυφόρος GPS- Εγκατάσταση).



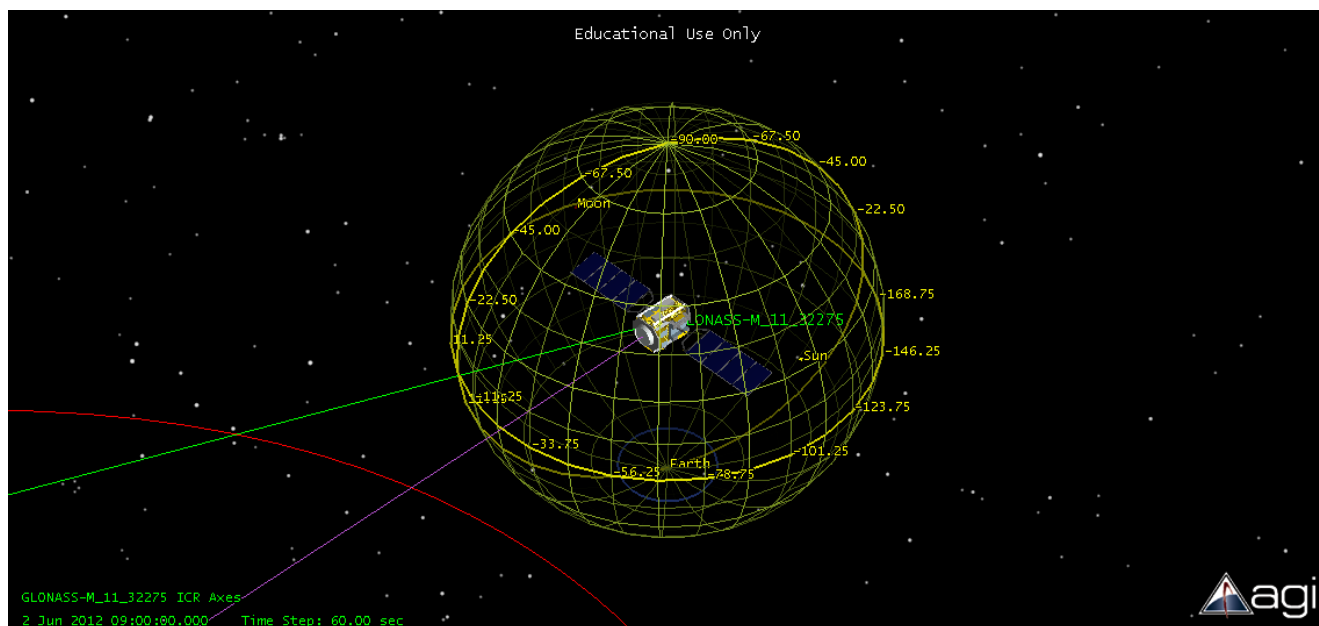
Σχήμα 28: Οι κύριοι άξονες των συστημάτων ECI (κόκκινο) και ECF (μπλε). Επισημαίνονται ο ισημερινός και ο πρώτος μεσημβρινός, καθώς και το διάνυσμα διεύθυνσης Γη-Ήλιου (κίτρινο).

Όσον αφορά τις ρυθμίσεις τρισδιάστατης οπτικοποίησης αντικειμένων του STK, παρακάτω αναφέρονται οι διαθέσιμες ρυθμίσεις που αφορούν την απεικόνιση δορυφόρων στο 3D Graphics Window και οι περισσότερες από τις οποίες εφαρμόζονται και στα υπόλοιπα οχήματα του STK:

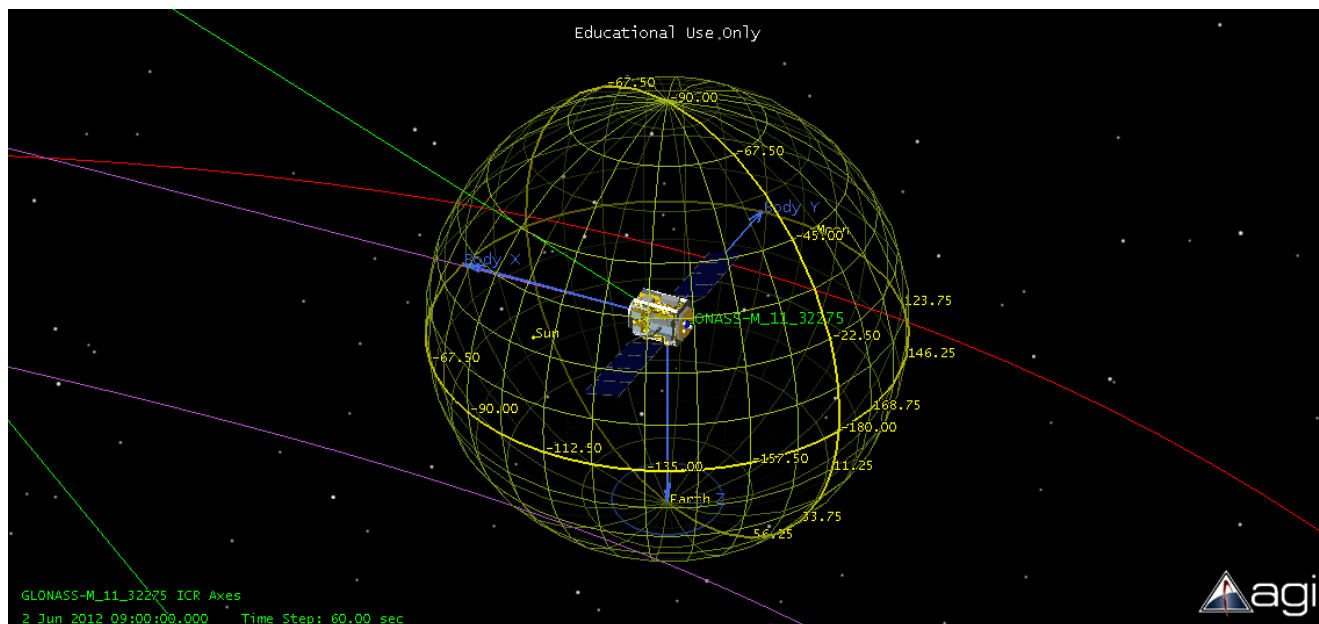
- Δυνατότητα ρύθμισης της απεικόνισης της τροχιάς και του ίχνους της τροχιάς των δορυφόρων στο έδαφος, καθώς και του τμήματος της τροχιάς που θα απεικονιστεί. Οι ρυθμίσεις είναι σχεδόν ίδιες με την αντίστοιχη σελίδα (*Pass*) του 2D Graphics Window και ο χρήστης μπορεί με την επιλογή '*Inherit From 2D Graphics*' να εφαρμόσει αυτόματα τις ίδιες ρυθμίσεις και για την τρισδιάστατη απεικόνιση.
- Δυνατότητα απεικόνισης των δορυφορικών τροχιών είτε στο ECI είτε στο ECF σύστημα.
- Εμφάνιση μίας σφαίρας γύρω από το αντικείμενο που χωρίζεται σε υποπεριοχές (το γωνιακό βήμα καθορίζεται από το χρήστη). Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει ακόμη την κλίμακα της σφαίρας καθώς και την προβολή ή όχι ουρανίων σωμάτων ή και άλλων αντικειμένων στη σφαίρα.
- Επιλογή εμφάνισης διανυσμάτων κατά την απεικόνιση (πχ το διάνυσμα του ναδίου ή της τροχιακής ταχύτητας του δορυφόρου, το διάνυσμα με διεύθυνση προς τον ήλιο ή τη σελήνη κ.α.)
- Δυνατότητα προσεγγιστικής οπτικοποίησης της περιοχής αβεβαιότητας της θέσης του δορυφόρου κάθε χρονική στιγμή. Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα παραλληλεπίπεδο, μία έλλειψη ή μία γραμμή κατάλληλα προσανατολισμένα ώστε να απεικονίσει προσεγγιστικά την αβεβαιότητα θέσης του δορυφόρου.
- Δυνατότητα απεικόνισης των κατακόρυφων που συνδέουν τον δορυφόρο με το έδαφος είτε για τη συγκεκριμένη θέση του δορυφόρου, είτε για το σύνολο της τροχιάς του.
- Δυνατότητα δημιουργίας και απεικόνισης του ελλειψοειδούς σφάλματος της θέσης ενός δορυφόρου. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εισαγωγή του Πίνακα μεταβλητότητας-Συμμεταβλητότητας. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει την κλίμακα της έλλειψης είτε απευθείας είτε χρησιμοποιώντας το διάστημα εμπιστοσύνης.
- Δυνατότητα εισαγωγής τρισδιάστατου μοντέλου για την αναπαράσταση του δορυφόρου (γενικότερα οχήματος, στόχου ή εγκατάστασης) στο 3D Graphics Window και στη συνέχεια προσαρμογής της κλίμακας του μοντέλου καθώς και της θέσης των αρθρωτών (κινούμενων) τμημάτων του (πχ οι συλλέκτες ηλιακής ενέργειας οι οποίοι μπορούν να περιστρέφονται για να έχουν τη μέγιστη πρόσβαση στο ηλιακό φως). Τα μοντέλα εισάγονται από αρχεία MDL ή COLLADA (.dae).
- Αντίστοιχα με το 2D Graphics Window ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει Range Contours, με την επιπλέον δυνατότητα σύνδεσης των ισαπεχουσών στο επίπεδο του δορυφόρου και των προβολών τους στο έδαφος με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός στερεού. Επίσης μπορούν να αναπαρασταθούν τα δισδιάστατα Elevation Contours που δημιουργήθηκαν, και με τη μορφή κώνων αυτή τη φορά που συνδέουν τις ισαριθμικές καμπύλες στο έδαφος με το κέντρο του δορυφόρου.
- Τέλος, ο χρήστης μπορεί να εισάγει στο παράθυρο γραφικών πληροφορία με τη μορφή δεδομένων (συντεταγμένες, γωνίες, αποστάσεις κ.α.), που ανανεώνονται δυναμικά με την εξέλιξη του σεναρίου.



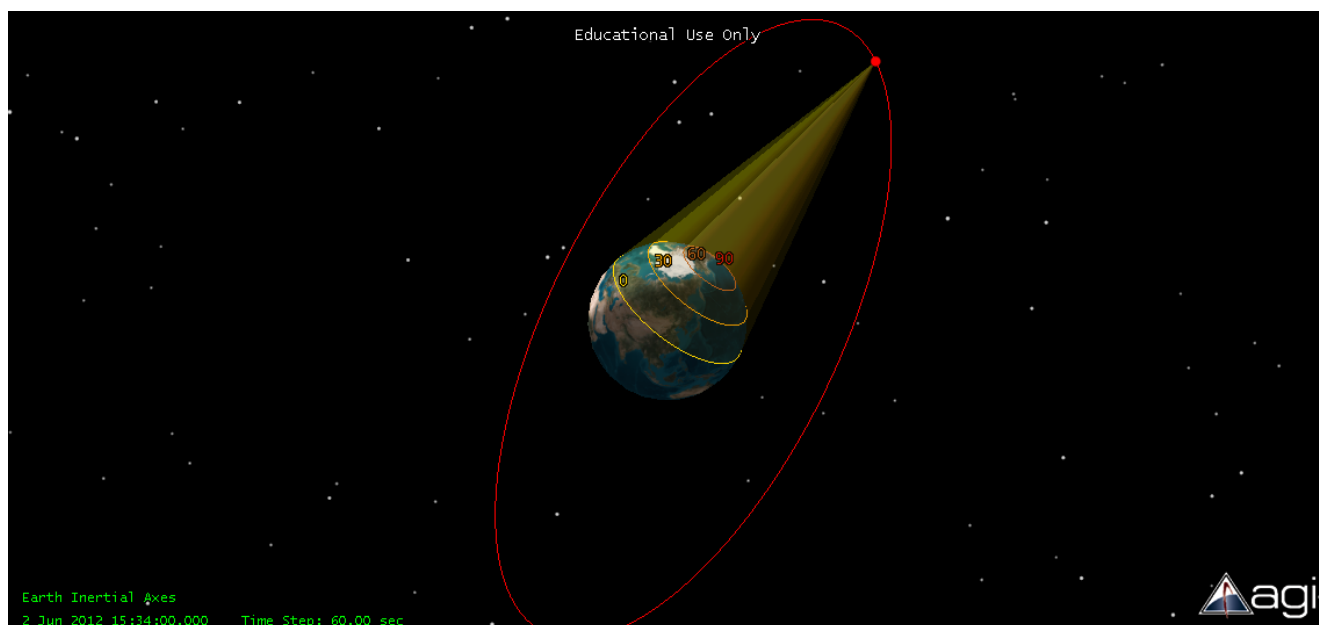
Σχήμα 29: Οι τροχιές 2 δορυφόρων του σχηματισμού GLONASS στο ECI σύστημα συντεταγμένων (με πράσινο χρώμα) και στο ECF (με κόκκινο και μοβ χρώμα).



Σχήμα 30: Οπτικοποίηση του ψηφιακού μοντέλου του δορυφόρου GLONASS-M_11_32275 αφού έχει εισαχθεί και μία attitude sphere.



Σχήμα 31: Οπτικοποίηση του ψηφιακού μοντέλου του δορυφόρου GLONASS-M_11_32275 αφού έχει εισαχθεί και μία attitude sphere, με την προσθήκη των αξόνων του συστήματος συντεταγμένων RIC (Range, In-Track, Cross-track) του δορυφόρου.



Σχήμα 32: Απεικόνιση με χρήση κώνων του γεωμετρικού τόπου των σημείων της γήινης επιφάνειας στα οποία ο δορυφόρος του σχήματος έχει κοινή γωνία ύψους και ίση με 0, 30, 60 και 90 μοίρες.

Ο χρήστης μπορεί πολύ εύκολα να περιηγείται στο 3D Graphics Window, να μεγεθύνει ή να απομακρύνεται από αντικείμενα, να στρέφει και να προσανατολίζει κατάλληλα την λήψη του.¹⁵

Πέρα από τη βασική περιήγηση στην εικόνα υπάρχουν τα εργαλεία κάμερας (*camera tools*) που βοηθούν το χρήστη στην διαμόρφωση της επιθυμητής οπτικοποίησης του σεναρίου του. Μερικά από αυτά αναφέρονται εν συντομία παρακάτω:

- View Position and Direction: Αποτελείται από 2 επιμέρους εργαλεία στο πρώτο εκ των οποίων καθορίζεται ένα αντικείμενο ως σημείο λήψης της εικόνας και ένα δεύτερο αντικείμενο ως σημείο στόχευσης του πρώτου. Στην άλλη περίπτωση καθορίζεται ο στόχος της κάμερας και ένα διάνυσμα (μία διεύθυνση) πάνω στο οποίο βρίσκεται το κέντρο λήψης της κάμερας.
- View Pilot: Χρησιμοποιείται για τον λεπτομερή καθορισμό της μεγέθυνσης (zoom in/ zoom out), τον προσανατολισμό και της στροφής της λήψης (view).
- Stored Views: Εργαλείο που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση λήψεων. Αποθηκεύει όλες τις ρυθμίσεις του 3D Graphics Window καθώς και τις ρυθμίσεις θέσης (position) και διευθύνσεων (direction) της λήψης.
- Camera Control Tool: Το εργαλείο χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της διαδρομής (path) που ακολουθεί η εικονική (όχι πραγματική- virtual) κάμερα κατά την δυναμική οπτικοποίηση της προσομοίωσης.
- 3D Graphics Snap: Χρησιμοποιείται για την εξαγωγή εικόνων υψηλής ευκρίνειας από το 3D Graphics Window.

Τέλος, η εργαλειοθήκη του 'Globe Manager' επιτρέπει την προσαρμογή του κεντρικού ουράνιου σώματος του σεναρίου (scenario globe- προεπιλογή η Υδρόγειος Σφαίρα), με προσθήκη σε αυτό εικονιστικών και εδαφικών δεδομένων καθώς και με την μετέπειτα επεξεργασία τους (στον Globe Manager θα αναφερθούμε και αργότερα κατά την απεικόνιση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους μίας εφαρμογής).

3.9 Ανάλυση στο STK

Το STK παρέχει τα εργαλεία για την πραγματοποίηση των παρακάτω τύπων ανάλυσης σε ένα σενάριο:

- Υπολογισμός της ορατότητας (*line-of-sight*) μεταξύ οποιονδήποτε αντικειμένων στο STK. Στη πρόσβαση (*access*) μεταξύ αντικειμένων μπορεί επίσης να συνυπολογιστούν οι επιδράσεις στην μετάδοση σήματος καθώς και να χρησιμοποιηθεί πλήθος περιορισμών πρόσβασης στους υπολογισμούς.
- Εκτίμηση της ποιότητας κάλυψης, με παράλληλη εφαρμογή περιορισμών κάλυψης.
- Κοινή ανάλυση κάλυψης για ένα σύστημα αντικειμένων ενδιαφέροντος (*assets*).

¹⁵ Καθότι έχουμε προσομοίωση τρισδιάστατης εικόνας την λέξη View που χρησιμοποιείται κυρίως στο αγγλικό κείμενο, την μεταφράζουμε είτε ως λήψη, από μία εικονική κάμερα που στρέφεται και προσεγγίζει είτε απομακρύνεται από αντικείμενα, είτε απλά εικόνα ανάλογα με την περίπτωση

- Ανάλυση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων με πρόβλεψη για μοντέλα βροχής, ατμοσφαιρικές απώλειες και παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων.¹⁶

Τα εργαλεία πρόσβασης (*access tools*) είναι διαθέσιμα στον κατάλογο εργαλείων ανάλυσης (*analysis menu*). Τα εργαλεία ανάλυσης Κάλυψης είναι διαθέσιμα στον κατάλογο εργαλείων ανάλυσης καθώς και στους καταλόγους αντικειμένων κάλυψης (STK/Coverage object menus).

3.9.1 STK Access Tool

Το STK επιτρέπει στο χρήστη να προσδιορίσει τα χρονικά διαστήματα που ένα αντικείμενο έχει πρόσβαση, ή αλλιώς βλέπει ένα άλλο αντικείμενο. Επιπλέον ο χρήστης μπορεί να επιβάλει περιορισμούς στις προσβάσεις και να καθορίσει εκείνος τις προϋποθέσεις μίας έγκυρης κάλυψης. Αυτοί οι περιορισμοί ορίζονται ως ιδιότητες των αντικειμένων μεταξύ των οποίων υπολογίζεται η πρόσβαση. Το STK μπορεί να υπολογίσει την πρόσβαση από όλους τους τύπους οχημάτων, εγκαταστάσεων, στόχων και αισθητήρων προς όλα τα αντικείμενα (συμπεριλαμβανομένων πλανητών και άστρων) στο πλαίσιο ενός σεναρίου.

Μία πρόσβαση προσδιορίζεται από δύο αντικείμενα, για τα οποία και υπολογίζεται. Μόλις δημιουργηθεί η πρόσβαση διατηρεί μία στενή σχέση με τα αντικείμενα που την καθορίζουν. Αν ένα από αυτά τα αντικείμενα μεταβληθεί κατά τέτοιο τρόπο που μπορεί να επηρεαστούν τα χρονικά διαστήματα πρόσβασης, τότε οι προσβάσεις υπολογίζονται εκ νέου αυτόματα. Επίσης, εαν οποιοδήποτε από τα αντικείμενα που την καθορίζουν αφαιρεθεί από το σενάριο, τότε αυτόματα καταργείται και η πρόσβαση.

Για να ανοίξει το εργαλείο πρόσβασης ο χρήστης επιλέγει Access από την γραμμή εργαλείων Ανάλυσης (*Analysis Toolbar*). Στη συνέχεια επιλέγεται το αντικείμενο ενδιαφέροντος για υπολογισμούς κάλυψης από τη λίστα (*Associated Objects list*) και μετά γίνεται ο υπολογισμός της κάλυψης, πατώντας compute. Ένας αστερίσκος (*) εμφανίζεται στα αριστερά των αντικειμένων για τα οποία έχει προσδιοριστεί η κάλυψη. Αν η επιλογή Static Highlight είναι ενεργοποιημένη, τότε τα παράθυρα 2D και 3D Graphics Windows ανανεώνονται για να απεικονίσουν την πρόσβαση από το πρώτο στο δεύτερο αντικείμενο (βασισμένα πάντα στα χρονικά διαστήματα πρόσβασης και τους περιορισμούς που έχουν τεθεί στα αντικείμενα). Η πρόσβαση μεταξύ αντικειμένων απεικονίζεται ως μία παχιά γραμμή που επικαλύπτει τα ίχνη στο έδαφος της πορείας των δορυφόρων.

Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει το χρονικό διάστημα εξέτασης της πρόσβασης μεταξύ αντικειμένων, το οποίο μπορεί να συμπίπτει με το χρονικό διάστημα εξέτασης του σεναρίου ή του αντικειμένου ή τέλος να καθορίζονται η αρχή και το πέρας του από τον χρήστη.

Στις προηγμένες ρυθμίσεις του σεναρίου καθορίζονται οι παράμετροι που αφορούν την αναγνώριση των ορίων των χρονικών διαστημάτων κάλυψης και την χρήση κατάλληλων αλγορίθμων για τον

¹⁶ Τα εργαλεία ανάλυσης τηλεπικοινωνιακών συστημάτων δεν αποτελούν στόχο της συγκεκριμένης διπλωματικής οπότε και δεν αναλύονται περαιτέρω.

επακριβή καθορισμό τους, τις χρονικές καθυστερήσεις λόγω του χρόνου διάδοσης του φωτός καθώς και τις επιδράσεις από τις διαδρομές του σήματος που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των προσβάσεων. Τέλος το STK δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει αν θέλει συνυπολογιστεί η επίδραση της ατμοσφαιρικής διάθλασης στους υπολογισμούς της πρόσβασης (με επιπλέον δυνατότητες ρύθμισης παραμέτρων- μοντέλου διάθλασης που θα χρησιμοποιηθεί κ.α.).

Graphics Option

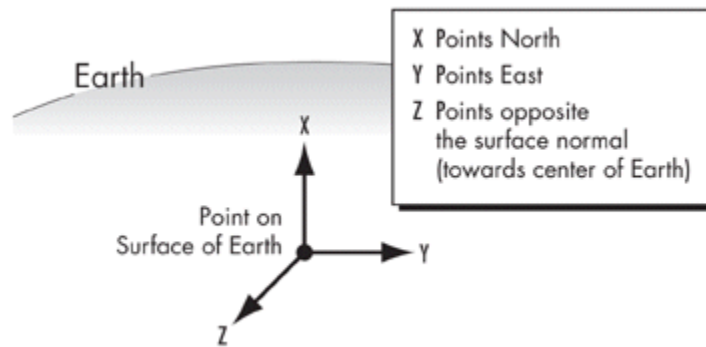
Η επιλογές στην περιοχή γραφικών του παραθύρου πρόσβασης επιτρέπουν στον χρήστη να προσδιορίσει τον τρόπο παρουσίασης της πρόσβασης μεταξύ των αντικειμένων στο παράθυρο 2D Graphics Window. Ο χρήστης μπορεί να ενεργοποιήσει την επιλογή "Inherit Settings" και τα γραφικά της πρόσβασης να προκύψουν από τις επιλογές που έχουν γίνει στη σελίδα "Global Attribute Page" των ιδιοτήτων του σεναρίου, είτε να καθορίσει διαφορετικά τα γραφικά για τη συγκεκριμένη πρόσβαση (γραμμή σύνδεσης, επιτονισμός αντικειμένων σε πρόσβαση, στατική απεικόνιση των τμημάτων της πορείας των οχημάτων που έχουν πρόσβαση).

Reports Graphs and Displays

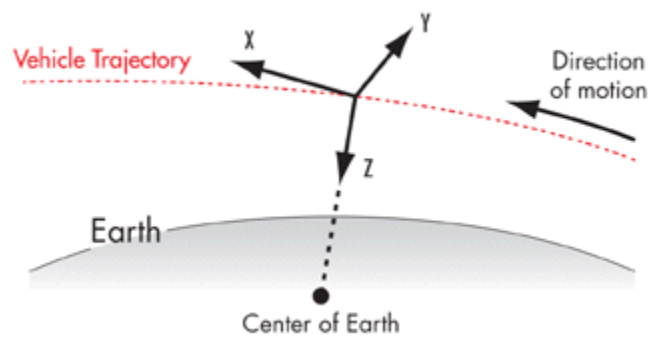
Ο χρήστης μπορεί να παράγει αναλυτικές αναφορές και διαγράμματα που να συνοψίζουν την δυνατότητα πρόσβασης μεταξύ των επιλεγμένων αντικειμένων. Επίσης του δίνεται η δυνατότητα σύνταξης αναφορών ή διαγραμμάτων πρόσβασης με πληροφορία σχετική με το αζιμούθιο, τη γωνία ύψους και την απόσταση των αντικειμένων κατά τα διαστήματα κάλυψης. Ανάλογα με το είδος του αντικειμένου για το οποίο υπολογίζουμε την Κάλυψη (access for) χρησιμοποιείται και διαφορετικό σύστημα αναφοράς κατά την παραγωγή των αναφορών και των διαγραμμάτων.

- Για εγκαταστάσεις και στόχους χρησιμοποιείται το σύστημα Local Horizontal (LH), βλ. Σχήματα 33 και 37.
- Για πλοία αεροσκάφη και οχήματα εδάφους χρησιμοποιείται το σύστημα ECF(Earth Centered Fixed) VVLH (Vehicle Velocity Local Horizontal). Η γωνία ύψους μετράται από την αρνητική φορά του άξονα Z του συστήματος (Σχήμα 37).
- Για δορυφόρους πυραύλους και συστήματα εκτόξευσης χρησιμοποιείται ένα σύστημα ECI (Earth Centered Inertial) VVLH. Και σε αυτή την περίπτωση η γωνία ύψους μετράται από την αρνητική φορά του άξονα Z (Σχήματα 34 και 37).

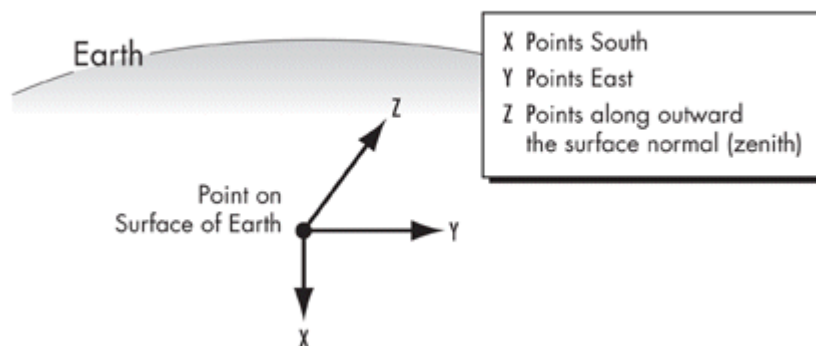
Στα σχήματα 33 με 37 παρουσιάζονται τρία βασικά συστήματα συντεταγμένων και ο καθορισμός του αζιμουθίου και της γωνίας ύψους σε αυτά.



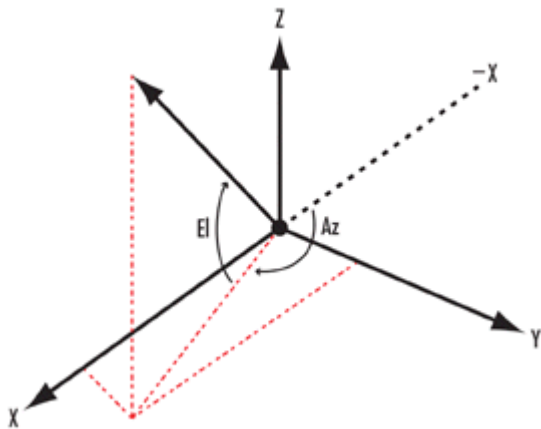
Σχήμα 33: Τοπικό οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων
(Local Horizontal)



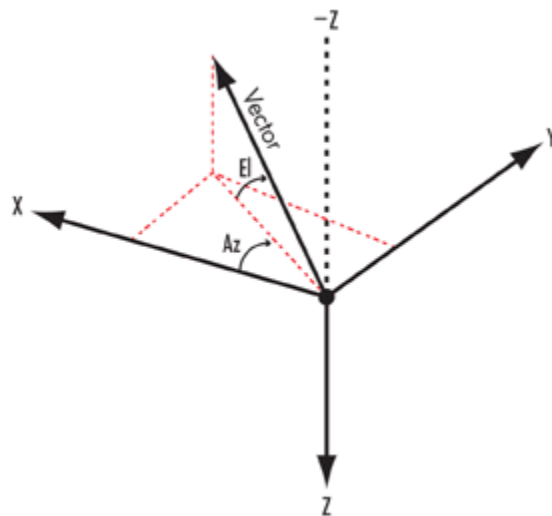
Σχήμα 34: Σύστημα Συντεταγμένων VVLH



Σχήμα 35: Τοποκεντρικό Σύστημα Συντεταγμένων



Σχήμα 36: Ορισμός της μέτρησης του αζιμουθίου και της γωνίας ύψους στο τοποκεντρικό σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 37: Ορισμός του τρόπου μέτρησης του αζιμουθίου και της γωνίας ύψους στα συστήματα VVLH και HL.

Επίσης ο χρήστης μπορεί να ανατρέξει στο 'Report and Graph Manager' προς αναζήτηση περισσότερων διαγραμμάτων που αφορούν την πρόσβαση μεταξύ αντικειμένων. Τέλος μπορεί να επιλέξει τα δεδομένα που θέλει να εμφανίζονται κατά την τρισδιάστατη οπτικοποίηση της πρόσβασης στο 3D Graphs Window του σεναρίου.

3.9.2 Single Object Coverage

Για την αξιολόγηση της ποιότητας κάλυψης ενός μόνο αντικειμένου στο STK, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το εργαλείο κάλυψης (*Coverage Tool*), το οποίο είναι διαθέσιμο στον κατάλογο εργαλείων ανάλυσης. Το εργαλείο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εγκαταστάσεις, ραντάρ, δέκτες, πομπούς, αισθητήρες, στόχους και όλα τα οχήματα. Συνίσταται για χρήση σε περιπτώσεις που ενδιαφέρει η γνώση της κάλυψης ενός μικρού αριθμού καλά καθορισμένων σημείων ή κατά μήκος της τροχιάς/ διαδρομής ενός κινούμενου αντικειμένου.

Οι κύριες διαφορές ανάμεσα στην περιοχή κάλυψης (*Coverage Definition*) και την κάλυψη αντικειμένου (*single object Coverage*) είναι ότι αφενός η κάλυψη αντικειμένου χρησιμοποιείται για την ανάλυση αντικειμένων με χρονικά μεταβαλλόμενες θέσεις και αφετέρου ότι μπορεί να αναλυθεί μόνον ένας δείκτης FOM τη φορά για τον προσδιορισμό της ποιότητας κάλυψης αντικειμένου.

Καθορισμός του χρονικού διαστήματος ανάλυσης της κάλυψης

Πρώτα, πρέπει να προσδιοριστούν οι χρόνοι εκκίνησης και λήξης που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της κάλυψης. Από προεπιλογή για τα οχήματα ή και αντικείμενα που είναι προσαρτημένα σε οχήματα χρησιμοποιείται η χρονική περίοδος που αντιστοιχεί στο όχημα, ενώ στις περιπτώσεις εγκαταστάσεων και στόχων (καθώς και αντικειμένων που είναι προσαρτημένα σε αυτά) χρησιμοποιείται η συνολική διάρκεια του σεναρίου.

Κατά τον υπολογισμό της κάλυψης ενός αντικειμένου, πρέπει να προσδιοριστούν ένα ή περισσότερα αντικείμενα ενδιαφέροντος (*assets*). Η χρονική περίοδος για την ανάλυση κάλυψης συντίθεται από την τομή της περιόδου που αντικείμενου αναφοράς (που καθορίστηκε στην παραπάνω παράγραφο) και της περιόδου του αντικειμένου ενδιαφέροντος. Τα αντικείμενα ενδιαφέροντος χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί το κατά πόσο είναι δυνατή η επίτευξη κάλυψης με το αντικείμενο αναφοράς. Εάν καθοριστεί κάποιο FOM αντί της απλής κάλυψης, η κάλυψη προς το αντικείμενο αναφοράς μετριέται μέσω της τιμής του δείκτη FOM.

Για την προσθήκη ενός αντικείμενου ενδιαφέροντος (*asset*) στο αντικείμενο αναφοράς, επιλέγεται το αντικείμενο από την *Assets list* και μετά η εντολή *Assign* (αντίστοιχα για να αφαιρεθεί η επιλογή *De-Assign*).

Μετά τον υπολογισμό των προσβάσεων από το STK, μπορεί να μεταβληθεί η κατάσταση (*status*) των αντικειμένων ενδιαφέροντος από ενεργή (*active*) σε ανενεργή (*inactive*) ή και αντίστροφα. Κατ' αυτό το τρόπο δίνεται η δυνατότητα να αφαιρεθούν επιλεγμένα *assets* από την εκτίμηση του αποτελέσματος χωρίς να αφαιρεθούν μόνιμα οι πληροφορίες πρόσβασης από τους υπολογισμούς κάλυψης (πχ μπορεί να προσομοιωθεί η επίδραση της βλάβης κάποιου *asset* στην τελική δυνατότητα κάλυψης).

Προσδιορισμός του Δείκτη Αξιολόγησης της Κάλυψης

Ο χρήστης μπορεί να αξιολογήσει την ποιότητα κάλυψης για το αντικείμενο αναφοράς επιλέγοντας την μέθοδο για τον υπολογισμό της κάλυψης (το επιθυμητό FOM), ορίζοντας τις ρυθμίσεις μέτρησης και προσδιορίζοντας τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούνται προκειμένου να επιτυγχάνεται ικανοποιητική κάλυψη του αντικειμένου. Ουσιαστικά οι διαθέσιμες ρυθμίσεις είναι οι ίδιες με την περίπτωση της ενότητας 3.5.4 όπου γίνεται εκτενής αναφορά στην εισαγωγή των Δεικτών Αξιολόγησης.

Παρουσίαση της Ποιότητας Κάλυψης σε Παράθυρο Γραφικών (Displaying the Quality of Coverage in a Graphics Window)

Μετά τον καθορισμό του δείκτη αξιολόγησης, μπορεί να ρυθμιστεί ο τρόπος παρουσίασής του στα 2D και 3D παράθυρα γραφικών του προγράμματος. Η απεικόνιση της κάλυψης γίνεται με τους εξής τρόπους:

- Με επισήμανση της θέσης του δορυφόρου (highlight marker) τις χρονικές στιγμές που υπάρχει

κάλυψη (ή ικανοποιούνται τα κριτήρια που έχουν τεθεί).

- Μέσω της επιλογής 'Display Options' σε περίπτωση που εξετάζεται η απλή κάλυψη ή ο διαχωρισμός Κάλυψης ή 'Satisfaction' για τους υπόλοιπους δείκτες αξιολόγησης ο χρήστης μεταβαίνει στο 'Object Coverage Graphics Window', όπου μπορεί να καθορίσει την γραφική παρουσίαση (χρώμα, πάχος, είδος γραμμής) τις χρονικές στιγμές που επιτυγχάνεται κάλυψη.
- Μέσω της επιλογής 'Contour' ο χρήστης έχει πρόσβαση στο 'Contours Window', όπου μπορεί να δημιουργήσει διαστήματα τιμών του δείκτη DOP και να τους αντιστοιχήσει χρωματικές τιμές για την δυναμική παρουσίαση της ποιότητας κάλυψης.
- Στην περίπτωση υπολογισμού κάλυψης για οχήματα, μέσω της επιλογής 'Show FOM Graphics on Vehicle Track' δίνεται η δυνατότητα και στατικής απεικόνισης της ικανοποίησης κριτηρίου κάλυψης και του διαχωρισμού τιμών κάλυψης κατά μήκος της πορείας οχήματος.

Αποθήκευση της Κάλυψης αντικειμένου

Με την επιλογή 'Save Configurations' θα αποθηκευτούν οι προσδιορισμοί κάλυψης που έχουν πραγματοποιηθεί μαζί με το σενάριο του STK.

3.9.3 Report and Graph Manager

Χρησιμοποιώντας τον Report and Graph Manager ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει τους παρακάτω τύπους αναφορών και γραφημάτων:

- Αναφορές που συνοψίζουν στατικά τα δεδομένα.
- Αναφορές που ανανεώνονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (dynamic displays).
- Γραφήματα που συνοψίζουν στατικά τα δεδομένα.
- Γραφήματα που ανανεώνονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (strip charts).

Για την δημιουργία μιας αναφοράς ή ενός γραφήματος ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Μετάβαση στον Report and Graph Manager από τον κατάλογο εργαλείων ανάλυσης ή από τον κατάλογο εργαλείων του αντικειμένου.
- Επιλογή του αντικειμένου ή των αντικειμένων στα οποία θα αναφέρεται η αναφορά ή το γράφημα.
- Επιλογή του τύπου της αναφοράς ή του διαγράμματος (Style) από τα ήδη υπάρχοντα ή από τύπους διαγραμμάτων που έχουν δημιουργηθεί από τον χρήστη.
- Προαιρετικά ο καθορισμός του χρονικού διαστήματος αναφοράς του διαγράμματος
- Δημιουργία του διαγράμματος (Generate)

Διαχείριση των Managing Reports and Graph Styles

Ο χρήστης έχει τις παρακάτω επιλογές όσον αφορά την διαχείριση των τύπων αναφορών και γραφημάτων:

- Μπορεί να επιλέξει ανάμεσα στην ταυτόχρονη εμφάνιση διαθέσιμων αναφορών και γραφημάτων, την εμφάνιση μόνο διαθέσιμων αναφορών ή μόνο διαθέσιμων γραφημάτων προκειμένου να κάνει την αναζήτηση του πιο εύκολη.
- Πέρα από τα διαθέσιμα από το πρόγραμμα γραφήματα και αναφορές ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει τα δικά του. Μπορεί να καθορίσει το περιεχόμενο και τη μορφοποίηση (format) των νέων αναφορών/ γραφημάτων ή να τροποποιήσει τα το περιεχόμενο και την μορφοποίηση των ήδη υπάρχοντων αναφορών/ γραφημάτων μέσω των επιλογών 'Customizing Reports' και 'Customizing Graphs'. Οι ιδιότητες που θα μπορεί να καθορίσει ο χρήστης που αφορούν το περιεχόμενο και τη μορφοποίηση των αναφορών/γραφημάτων εξαρτώνται από τον πάροχο της πληροφορίας (data provider) και τον τύπο του αντικειμένου.
- Ο χρήστης μπορεί είτε να δημιουργήσει το επιλεγμένο Report/Graph μέσα στο περιβάλλον του STK, να το μορφοποιήσει (μονάδες, τίτλος, άξονες
- κτλ.) και στη συνέχεια να το αποθηκεύσει, είτε να αποθηκεύσει απευθείας την αναφορά ή το γράφημά του.

Η δημιουργία ενός νέου γραφήματος απαιτεί τον καθορισμό πολλών περαιτέρω ρυθμίσεων που όμως ξεφεύγουν από το σκοπό και τα πλαίσια αυτής της διπλωματικής. Αξίζει πάντως να αναφερθεί ότι χάρη στις δυνατότητες παραγωγής αναφορών που διαθέτει και τα ενσωματωμένα συστήματα και πλαίσια αναφοράς, το STK μπορεί να χρησιμοποιηθεί πολύ εύκολα και ως ένα εργαλείο μετατροπής συστημάτων αναφοράς της θέσης δορυφόρων, συστημάτων ή και σημείων.

Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει το χρονικό διάστημα στο οποίο θα αναφέρεται η αναφορά ή το γράφημα. Οι επιλογές του είναι ανάμεσα στην επιλογή *"Use Object Properties"* όπου χρησιμοποιείται ο χρόνος μελέτης του αντικειμένου και αν δεν έχει οριστεί η χρονική περίοδος του σεναρίου, στην *"Use Advanced"* καθώς και στην επιλογή *"Specify Properties"* όπου ο χρήστης καθορίζει το την αρχή και την λήξη του διαστήματος μελέτης καθώς και το χρονικό βήμα.

Τέλος ο χρήστης μπορεί να επιλέξει εάν οι αναφορές και τα γραφήματα που δημιουργεί θα έχουν στατικό ή δυναμικό χαρακτήρα, δηλαδή θα αναπαράγονται παράλληλα με την προσομοίωση του σεναρίου σε δυναμικό χρόνο.

Σημείωση

Για την σύνταξη του παραπάνω κεφαλαίου χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες από το Desktop Applications Help του STK, καθώς και από τα tutorials του STK που είναι διαθέσιμα στην ιστοσελίδα: <http://www.agi.com/resources/help/online/stk/source/manuals/manuals.htm> .

4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ

ΤΟΥ STK

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύσσονται πέντε εφαρμογές που δημιουργήθηκαν με χρήση του Satellite Tool Kit. Πρόκειται για δύο εφαρμογές πλοήγησης, η μία εκ των οποίων αφορά στην πλοήγηση πλοίου και η άλλη στην πλοήγηση οχήματος εδάφους σε ορεινή περιοχή, μία εφαρμογή σύγκρισης των αποτελεσμάτων δύο διαφορετικών αναπαραγωγών του STK, και δύο εφαρμογές που αφορούν στην εισαγωγή και διερεύνηση δορυφορικών σχηματισμών παρακολούθησης της Γης. Σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις σκοπός είναι πέρα από την ανάλυση του εκάστοτε συστήματος, η ανάδειξη και η εξοικείωση με τα εργαλεία του προγράμματος STK.

4.2 Εφαρμογή 1^η: Προσομοίωση πορείας πλοίου για την εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με την γεωμετρική ακρίβεια προσδιορισμού θέσης του δορυφορικού συστήματος GPS

Στόχος της εφαρμογής είναι η αξιολόγηση της συνεισφοράς της γεωμετρίας του σχηματισμού GPS στη λύση πλοήγησης κατά την πορεία πλοίου που εκτελεί τη διαδρομή από το Ηράκλειο Κρήτης στον Πειραιά.

Αρχικά δημιουργήθηκε το σενάριο του STK και εισήχθησαν η πορεία του πλοίου και ο δορυφορικός σχηματισμός GPS για την χρονική περίοδο μελέτης. Στη συνέχεια, με χρήση του εργαλείου *single object coverage* και με αντικείμενο αναφοράς το πλοίο και αντικείμενα ενδιαφέροντος τους δορυφόρους του σχηματισμού GPS, υπολογίστηκαν οι προσβάσεις των δορυφόρων από το πλοίο. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν γραφήματα των δεικτών κάλυψης προκειμένου να εξαχθούν τα σχετικά συμπεράσματα για την ποιότητα κάλυψης που παρέχεται από τον σχηματισμό GPS στο πλοίο.

Πιο αναλυτικά, τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την εκτέλεση της εφαρμογής είναι τα εξής:

4.2.1 Δημιουργία του Σεναρίου

Αρχικά δημιουργήθηκε το σενάριο με όνομα "herakleion1". Ως περίοδος ανάλυσης ορίστηκε το χρονικό διάστημα από 13 Νοεμβρίου 2012 και ώρα 10:00:00 UTCG (*Universal Time Coordinated Gregorian*) έως τις 14 Νοεμβρίου 2012 και ώρα 10:00:00 UTCG. Η συντομογραφία UTCG παραπέμπει σε προσδιορισμό του παγκόσμιου συντονισμένου χρόνου UTC σε μορφότυπο γρηγοριανής ημερομηνίας. Ως εποχή αναφοράς ορίστηκε η χρονική στιγμή εκκίνησης του σεναρίου.

4.2.2 Εισαγωγή του Δορυφορικού Σχηματισμού GPS

Στο STK δίνεται η δυνατότητα απευθείας εισαγωγής ολόκληρου του σχηματισμού GPS. Με χρήση της εντολής 'Load GPS Constellation' (Insert Objects → Satellites → Load GPS Constellation) εισάγονται όλοι οι δορυφόροι του σχηματισμού, οι οποίοι με την εισαγωγή τους εκχωρούνται ως αντικείμενα του σχηματισμού GPS Constellation που έχει δημιουργηθεί αυτόματα από το πρόγραμμα. Ο αναπαραγωγέας τροχιάς που χρησιμοποιείται για την εισαγωγή των δορυφόρων είναι ο GPS propagator και τα αρχεία SEM που χρειάζονται για την εισαγωγή ανακτώνται αυτόματα από την βάση δεδομένων της AGI.

Ως προεπιλογή του προγράμματος, τα αρχεία για την εισαγωγή των δορυφόρων που χρησιμοποιούνται είναι τα GPS almanac files (μορφότυπου *.al3) που παράγονται από το *US Coast Guard Navigation Center* σε SEM format και διατίθενται σε τακτική βάση (συγκεκριμένα αυτή τη στιγμή τα almanacs ανανεώνονται μία φορά την ημέρα). Η AGI συλλέγει αυτά τα almanacs μέσω του AGI Online Server και τα διαθέτει για χρήση από το STK.

Το SEM almanac περιέχει τροχιακά στοιχεία για τον ενεργό δορυφορικό σχηματισμό GPS μίας προσδιορισμένης ημερομηνίας στην οποία και αναφέρεται το almanac (*almanac date*). Η ημερομηνία και τα στοιχεία του almanac χρησιμοποιούνται από τον GPS propagator προκειμένου να παραγάγει τις εφημερίδες των δορυφόρων για τις χρονικές περιόδους ενδιαφέροντος του εκάστοτε σεναρίου.

Ο χρήστης του STK μπορεί να προσδιορίσει την χρονική περίοδο ανάλυσης για τους δορυφόρους GPS. Η προεπιλογή είναι η χρήση της χρονικής περιόδου του σεναρίου στο οποίο εισάγονται οι δορυφόροι.

4.2.3 Εισαγωγή της πορείας του πλοίου

Για την προσομοίωση της πορείας πλοίου χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα πλοήγησης πλοίου της γραμμής που εκτελούσε την διαδρομή Ηράκλειο Κρήτης- Πειραιάς. Για την εισαγωγή των δεδομένων στο STK χρησιμοποιήθηκε ο STK External Propagator, ο οποίος περιγράφεται στην

ενότητα (3.5). Προκειμένου να γίνει η εισαγωγή πρέπει το αρχείο με τα αρχικά δεδομένα της πορείας του πλοίου να διαμορφωθεί στο κατάλληλο format που απαιτείται από τον propagator (για την ευκολότερη διαμόρφωση του αρχείου χρησιμοποιήθηκε και το πρόγραμμα MATLAB).

4.2.4 Υπολογισμός της Κάλυψης

Στη συνέχεια με χρήση του εργαλείου Single Object Coverage (Analysis → Coverage) και με την επιλογή ως αντικειμένου αναφοράς του πλοίου, και ως αντικειμένου ενδιαφέροντος τον σχηματισμό GPS Constellation, υπολογίζουμε τις προσβάσεις (Επιλογή Compute). Ως χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος προσδιορίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα το χρονικό διάστημα που χρειάζεται το πλοίο για να φτάσει στον Πειραιά.

4.2.5 Καθορισμός των Δεικτών Αξιολόγησης (FOM)

Μετά τον υπολογισμό των Προσβάσεων, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα στους διαθέσιμους δείκτες αξιολόγησης (FOM). Η αξιολόγηση της Κάλυψης θα γίνει με χρήση των δεικτών FOM: N asset Coverage και των δεικτών DOP.

Δείκτες DOP- N asset Coverage- Navigation Accuracy

Αφού επιλέξουμε ως Figure Of Merit τους δείκτες DOP, μεταβαίνουμε κατευθείαν στον Report and Graph Manager και επιλέγουμε από τα Installed Styles την δημιουργία (Generate) του διαγράμματος 'All DOPs'. Διαμορφώνονται οι τίτλοι, οι άξονες, οι μονάδες και οι λοιπές παράμετροι του διαγράμματος και αυτό αποθηκεύεται ως αρχείο εικόνας. Το αποτέλεσμα ακολουθεί στο σχήμα 38.

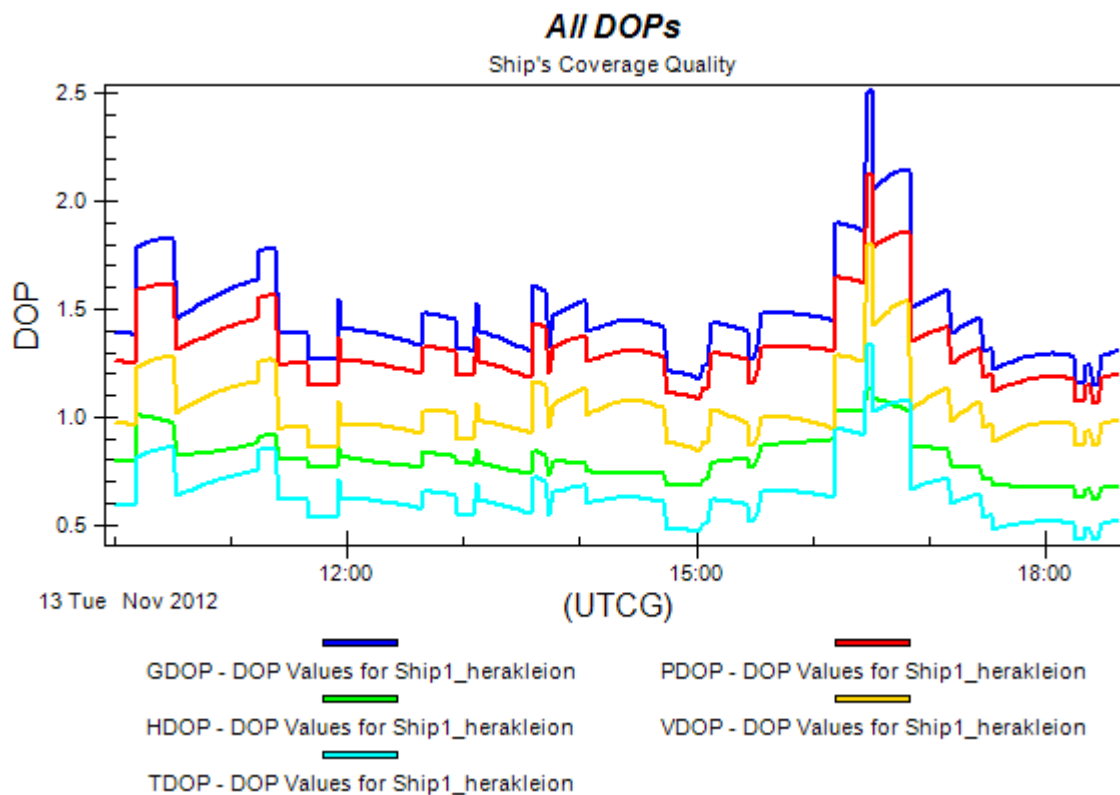
Πέρα από τις δυναμικές τιμές των δεικτών DOP, μπορούν να προκύψουν και οι στατικές τιμές τους. Κατά τον καθορισμό των δεικτών DOP επιλέγεται ο συγκεκριμένος δείκτης DOP που επιθυμούμε να υπολογιστεί (ανάμεσα σε GDOP, PDOP, VDOP κλπ) και το στατιστικό μέγεθος (μέσος όρος, ελάχιστη ή μέγιστη τιμή και τιμή κάτω από την οποία βρίσκεται ο δείκτης DOP για το 95% του χρόνου) που θέλουμε να χρησιμοποιηθεί ως στατική τιμή του δείκτη. Με αυτή τη διαδικασία προέκυψαν οι τιμές του Πίνακα 20. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι ανάλογα με το βήμα που θα χρησιμοποιήσουμε για τον υπολογισμό της στατικής τιμής ενδέχεται να έχουμε μικρές διαφοροποιήσεις στο τελικό αποτέλεσμα.

Αναφορές και Διαγράμματα μπορούν να δημιουργηθούν και χωρίς τη χρήση του Report and Graph Manager, από τα Reports και Graphs στη σελίδα του Single Object Coverage. Έτσι για παράδειγμα δημιουργούμε το διάγραμμα του σχήματος 39, στο οποίο απεικονίζεται ο αριθμός των προσβάσιμων δορυφόρων από το πλοίο για κάθε χρονική στιγμή.

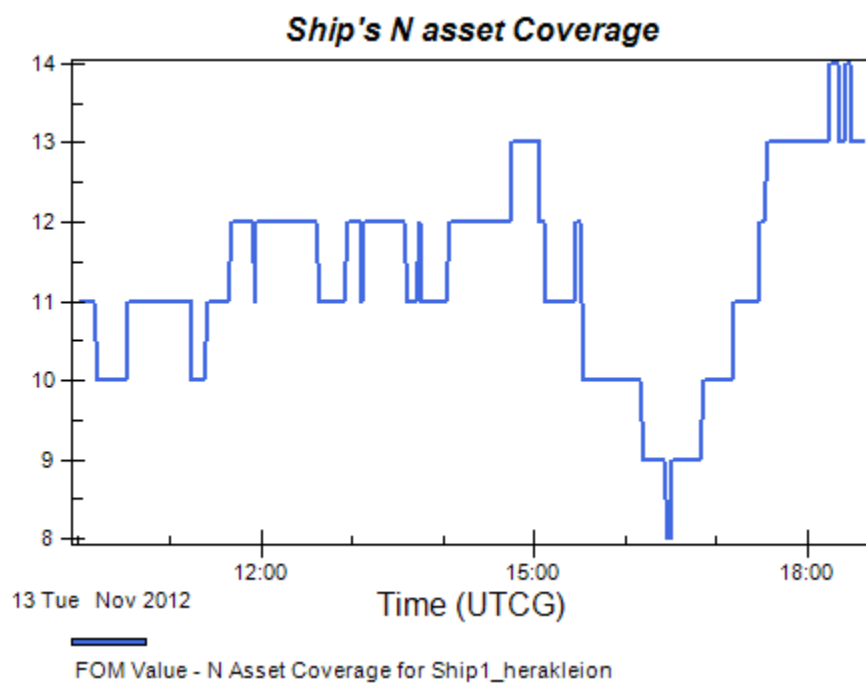
Στο χάρτη του σχήματος 40 απεικονίζεται με χρωματική κλίμακα η μεταβολή της τιμής του δείκτη GDOP κατά την εκτέλεση του δρομολογίου του πλοίου.

Στατιστικό Μέγεθος	Στατική Τιμή GDOP
Μέσος Όρος	1.47
Μέγιστη Τιμή	2.52
Ελάχιστη Τιμή	1.15
<Τιμή για το 95% του χρόνου	1.89

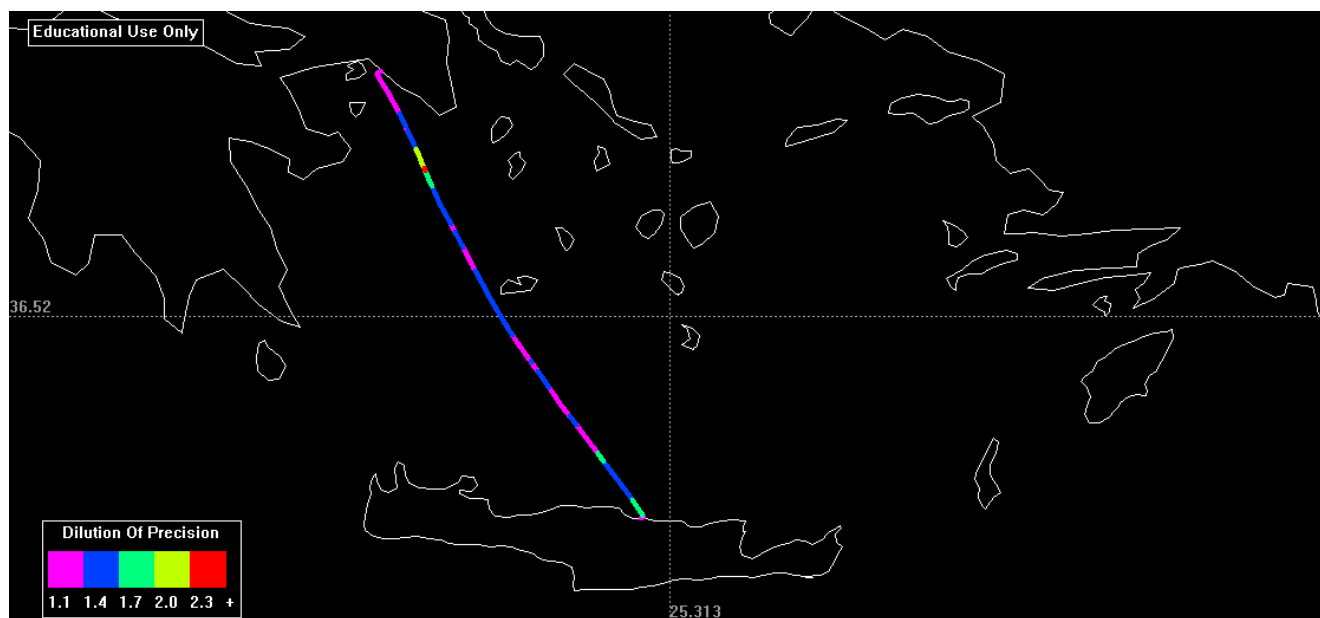
Πίνακας 20: Στατιστικά Μεγέθη της στατικής τιμής του δείκτη GDOP όπως προέκυψαν για την πορεία πλοίου.



Σχήμα 38: Τιμές των δεικτών DOP όπως προέκυψαν για πλοίο που εκτελούσε τη διαδρομή Ηράκλειο- Πειραιάς.



Σχήμα 39: Αριθμός Προσβάσιμων Δορυφόρων GPS από το πλοίο σε συνάρτηση με το χρόνο.



Σχήμα 40: Χάρτης που απεικονίζει με χρήση χρωματικής κλίμακας την μεταβολή της τιμής του δείκτη GDOP κατά την εκτέλεση της διαδρομής του πλοίου.

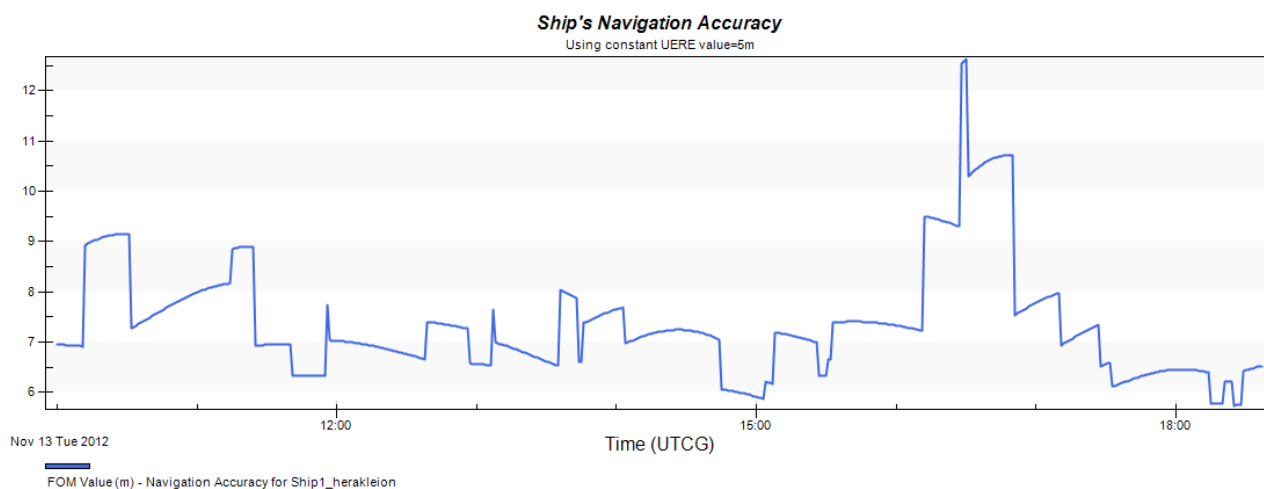
Επίσης, πέρα από τους δείκτες GDOP μπορεί να υπολογιστεί η a priori ακρίβεια πλοήγησης με χρήση

του δείκτη Navigation Accuracy, ο οποίος περιγράφεται στην ενότητα 3.6.4.13. Για την χρήση του συγκεκριμένου δείκτη είναι απαραίτητη είτε η εισαγωγή μίας σταθερής τιμής του σφάλματος στην μέτρηση της απόστασης, είτε η εισαγωγή ενός πίνακα ο οποίος συσχετίζει την μεταβολή του σφάλματος στην μέτρηση της απόστασης με την γωνία ύψους του εκάστοτε δορυφόρου, μέσω ενός κατάλληλα μορφοποιημένου αρχείου (*Range Uncertainty File*). Ο δείκτης υπολογίστηκε και για τις δύο περιπτώσεις: στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η σταθερή τιμή από προεπιλογή του προγράμματος είναι $\sigma=5\text{m}$, ενώ στην δεύτερη χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία του πίνακα B1 από τη διπλωματική της Κατσιγιάννη (2011) που αντιστοιχούν στην χρήση του συστήματος GPS και μετρήσεις μόνο στην συχνότητα L1. Η μεταβολή του σφάλματος προσδιορισμού της απόστασης συναρτήσει της γωνίας ύψους του εκάστοτε δορυφόρου παρουσιάζεται στον πίνακα 21.

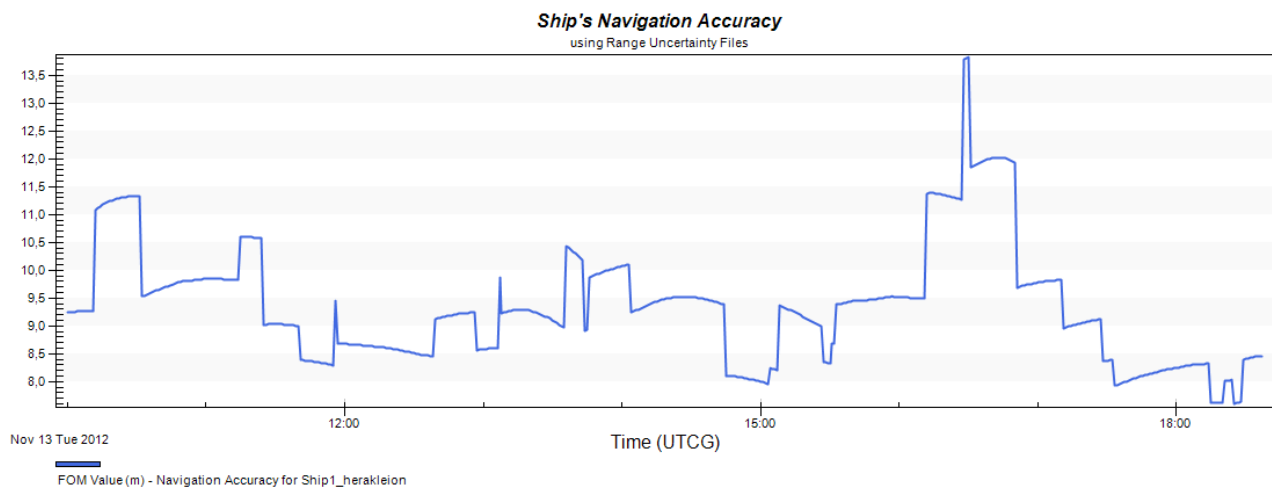
Γωνία Ύψους	5 deg	10 deg	15 deg	20 deg	30 deg	40 deg	50 deg	60 deg	90 deg
UERE GPS L1	844 cm	770 cm	709 cm	659 cm	581 cm	529 cm	496 cm	476 cm	460 cm

Πίνακας 21: Μεταβολή του UERE συναρτήσει της γωνίας ύψους για δορυφόρους του σχηματισμού GPS και μετρήσεις της ψευδοαπόστασης στην συχνότητα L1.

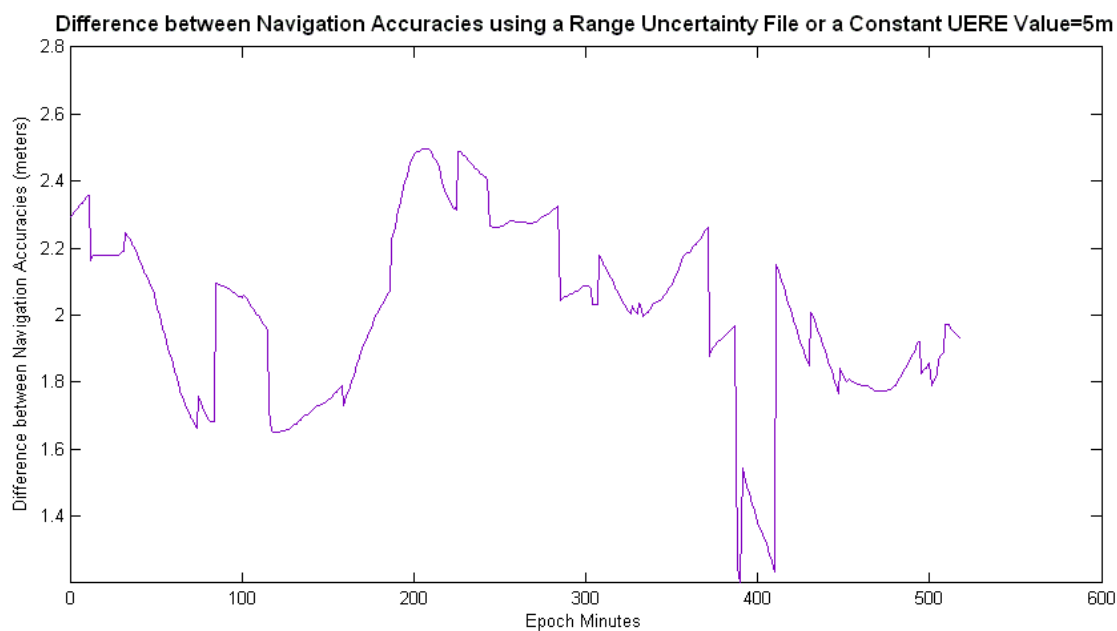
Τα αποτελέσματα του δείκτη Navigation Accuracy που προέκυψαν για την διαδρομή του πλοίου παρουσιάζονται στα διαγράμματα των σχημάτων 41 και 42, ενώ στο σχήμα 43 παρουσιάζονται οι διαφορές που προέκυψαν ανάμεσα στις δύο λύσεις.



Σχήμα 41: Τιμές της ακρίβειας πλοήγησης για την διαδρομή πλοίου Ηράκλειο- Πειραιάς με σταθερό σφάλμα μέτρησης της απόστασης ίσο με 5 m.



Σχήμα 42: Τιμές της ακρίβειας πλοήγησης για την διαδρομή πλοίου Ηράκλειο- Πειραιάς με μεταβαλλόμενο σφάλμα μέτρησης της απόστασης συναρτήσει της γωνίας ύψους του κάθε δορυφόρου.



Σχήμα 43: Διαφορές μεταξύ των τιμών που προέκυψαν με χρήση σταθερής τιμής για το σφάλμα μέτρησης της απόστασης και των αντίστοιχων που προέκυψαν με χρήση του αρχείου Range Uncertainty File.

Μέσα από την παραπάνω διαδικασία και τα παράγωγά της αναδεικνύεται η δυνατότητα προσομοίωσης εκ των προτέρων μίας διαδρομής ενός οποιουδήποτε οχήματος, είτε ενός πλοίου, είτε ενός οχήματος εδάφους είτε ενός αεροσκάφους. Στην παρούσα εφαρμογή εξετάστηκε η ποιότητα πλοήγησης με χρήση του δορυφορικού σχηματισμού GPS, ενώ με αντίστοιχο τρόπο και αρκετά εύκολα θα μπορούσε να εφαρμοστεί η διαδικασία για οποιονδήποτε άλλο σχηματισμό GNSS.

Οι εφαρμογές πρόσβασης όμως δεν είναι απαραίτητο να περιοριστούν στους δορυφόρους ενός συστήματος GNSS. Εξίσου εύκολα θα μπορούσε να εξεταστεί η ανίχνευση του πλοίου από ένα σύστημα ραντάρ ή η κάλυψή του από ένα σύστημα τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων. Επίσης η μελέτη θα μπορούσε να αφορά σε έναν ολόκληρο στόλο εμπορικών ή πολεμικών πλοίων που το καθένα εκτελεί μία διαφορετική διαδρομή και στην δυνατότητα ανίχνευσης της αδυναμίας κάλυψης κάποιου πλοίου από συστήματα πλοήγησης, τηλεπικοινωνιών, ανίχνευσης ραντάρ ή και άλλα.

4.3 Εφαρμογή 2^η: Προσομοίωση πορείας οχήματος εδάφους για την εξαγωγή πληροφορίας σχετικής με την ποιότητα της γεωμετρίας του σχηματισμού GPS και την συνεισφορά της στην ακρίβεια προσδιορισμού θέσης με το σύστημα GPS

Η εφαρμογή αυτή αναφέρεται και πάλι στον προσδιορισμό της γεωμετρικής ακρίβειας μίας λύσης πλοήγησης με χρήση του δορυφορικού σχηματισμού GPS, με τη διαφορά ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση υπεισέρχεται στον προσδιορισμό θέσης ο παράγοντας του έντονου αναγλύφου, ο οποίος περιορίζει, για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές ή μικρά χρονικά διαστήματα, την ορατότητα μεταξύ του αντικειμένου και των δορυφόρων του σχηματισμού.

Χρησιμοποιείται το ίδιο σενάριο που δημιουργήθηκε στην πρώτη εφαρμογή, οπότε και δεν χρειάζεται ανακαθορισμός των αρχικών παραμέτρων. Αρχικά, όπως και στην προηγούμενη εφαρμογή, εισάγονται η πορεία του οχήματος εδάφους και ο δορυφορικός σχηματισμός GPS. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές μέθοδοι για τον περιορισμό της ορατότητας μεταξύ του οχήματος εδάφους και των δορυφόρων. Στην πρώτη περίπτωση, η ορατότητα περιορίζεται με την εισαγωγή ενός καθολικού κριτηρίου στις γωνίες ύψους που πρέπει να σχηματίζουν οι δορυφόροι με το όχημα προκειμένου η πρόσβαση σε αυτό να θεωρείται έγκυρη (γωνία αποκοπής). Στη δεύτερη περίπτωση εισάγεται ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους στην ευρύτερη περιοχή στην οποία κινείται το όχημα και η ορατότητα των δορυφόρων από το όχημα περιορίζεται, με ρεαλιστικότερο τρόπο, βάσει του αναγλύφου, όπως αυτό καθορίζεται από το μοντέλο εδάφους. Στη συνέχεια και αφού δημιουργηθούν τα απαραίτητα γραφήματα γίνεται η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

4.3.1 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιήθηκε προήλθε από διαθέσιμα δεδομένα της επεξεργασίας των μετρήσεων ειδικής δορυφορικής αποστολής του διαστημικού λεωφορείου (*Space Shuttle*), η οποία περιγράφεται εν συντομία παρακάτω:

4.3.1.1 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

Πρόκειται για μία διεθνή διαστημική αποστολή με επικεφαλής την NASA σε συνεργασία με την NGA (*National Geo-spatial -Intelligence Agency*), η οποία εκτελέστηκε το 2000 και είχε ως στόχο την

συλλογή συμβολομετρικών δεδομένων ραντάρ (*interferometric radar data*) τα οποία χρησιμοποιήθηκαν από το εργαστήριο JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) της NASA, για την παραγωγή ενός σχεδόν παγκόσμιου προϊόντος τοπογραφικής πληροφορίας για γεωγραφικά πλάτη μικρότερα των 60 μοιρών.

Για την εξαγωγή της υψομετρικής πληροφορίας, το διαστημικό σκάφος της αποστολής έφερε δύο κεραίες, μία πάνω στο σκάφος με δυνατότητα αποστολής και λήψης σήματος και μία δεύτερη στο άκρο πτυσσόμενου βραχίονα προσαρτημένου στο σκάφος και σε απόσταση 60 m από την πρώτη με δυνατότητα λήψης του επιστρέφοντος σήματος ραντάρ. Για τη συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν συχνότητες στη C-Band και στην X-Band. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στη C-Band συχνότητα χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία τοπογραφικών χαρτών ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DEM) με σχεδόν παγκόσμια κάλυψη. Τα δεδομένα του X-Band radar χρησιμοποιούνται για την δημιουργία DEM ελαφρώς υψηλότερης ανάλυσης, χωρίς όμως να είναι διαθέσιμα δεδομένα σχεδόν παγκόσμιας κάλυψης.

Ο παρακάτω πίνακας (22) συνοψίζει την απόδοση του SRTM που έγινε με σύγκριση των αποτελεσμάτων της αποστολής με τις σχετικές μετρήσεις εδάφους που πραγματοποιήθηκαν για τον έλεγχο της ακρίβειας των μετρήσεων. Όλα τα σφάλματα του πίνακα αναφέρονται σε επίτεδο εμπιστοσύνης 90%.

	Africa	Australia	Eurasia	Islands	N. America	S. America
Absolute Geo-location Error	11.9	7.2	8.8	9.0	12.6	9.0
Absolute Height Error	5.6	6.0	6.2	8.0	9.0	6.2
Relative Height Error	9.8	4.7	8.7	6.2	7.0	5.5
Long Wave-length Height Error	3.1	6.0	2.6	3.7	4.0	4.9

Πίνακας 22: Σφάλματα των προϊόντων της αποστολής SRTM (Rodriguez et al 2005).

Στην εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από την ιστοσελίδα <http://srtm.csi.cgiar.org/Index.asp> της CSI, στην οποία είναι διαθέσιμα DEM σε σχεδόν παγκόσμια κλίμακα που έχουν προκύψει από τα δεδομένα του SRTM με εφαρμογή κατάλληλων αλγορίθμων για την κάλυψη των κενών από μετρήσεις περιοχών (*no data holes*), που λόγω της τοποθεσίας τους (λίμνες, ποτάμια, παχύ στρώμα χιονιού ή ορεινές περιοχές) δεν ήταν δυνατό να συλλεχθούν δεδομένα ραντάρ. Η υψομετρική ακρίβεια των δεδομένων είναι καλύτερη των 16 m και η χωρική τους ανάλυση είναι της τάξης των 90 m στον ισημερινό (3arc second). Τα δεδομένα είναι διαθέσιμα για αποστολή σε πλάκες (*tiles*) 5°x5°, στο σύστημα αναφοράς WGS84 και σε format *.TIF.

4.3.1.2 Εισαγωγή του DEM στο Σενάριο του STK

Για την εισαγωγή του DEM στο STK ανοίγουμε την σελίδα ιδιοτήτων του σεναρίου που δημιουργήσαμε και επιλέγουμε από τον αριστερό κατάλογο Basic → Terrain. Με την επιλογή Add μπορούμε να προσθέσουμε ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEM) στο σενάριο. Το STK έχει τη δυνατότητα αναγνώρισης πολλών διαφορετικών format αρχείων DEM.

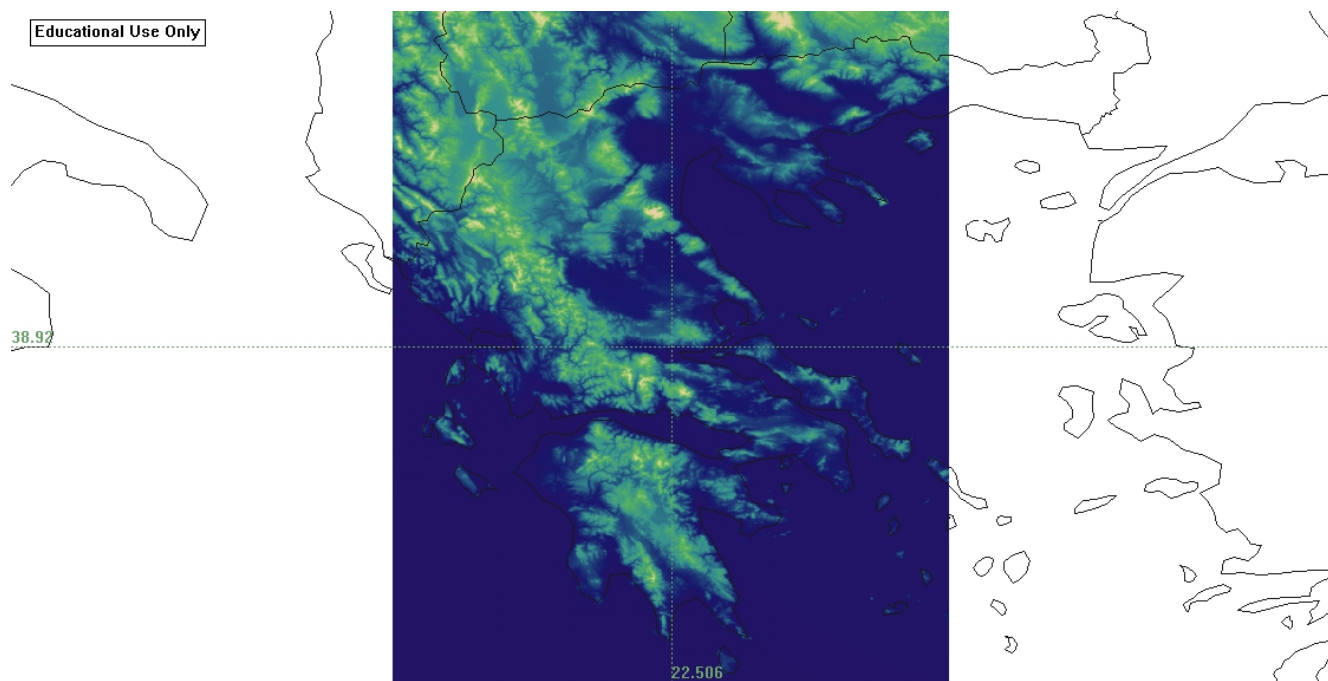
Με την παραπάνω διαδικασία προστίθενται στο σενάριο τα αρχεία TIF από τα δεδομένα του SRTM που καλύπτουν την περιοχή γεωγραφικού μήκους 20 με 25 μοιρών και γεωγραφικού πλάτους 35 με 45 μοιρών.

4.3.1.3 Οπτικοποίηση του DEM στο STK

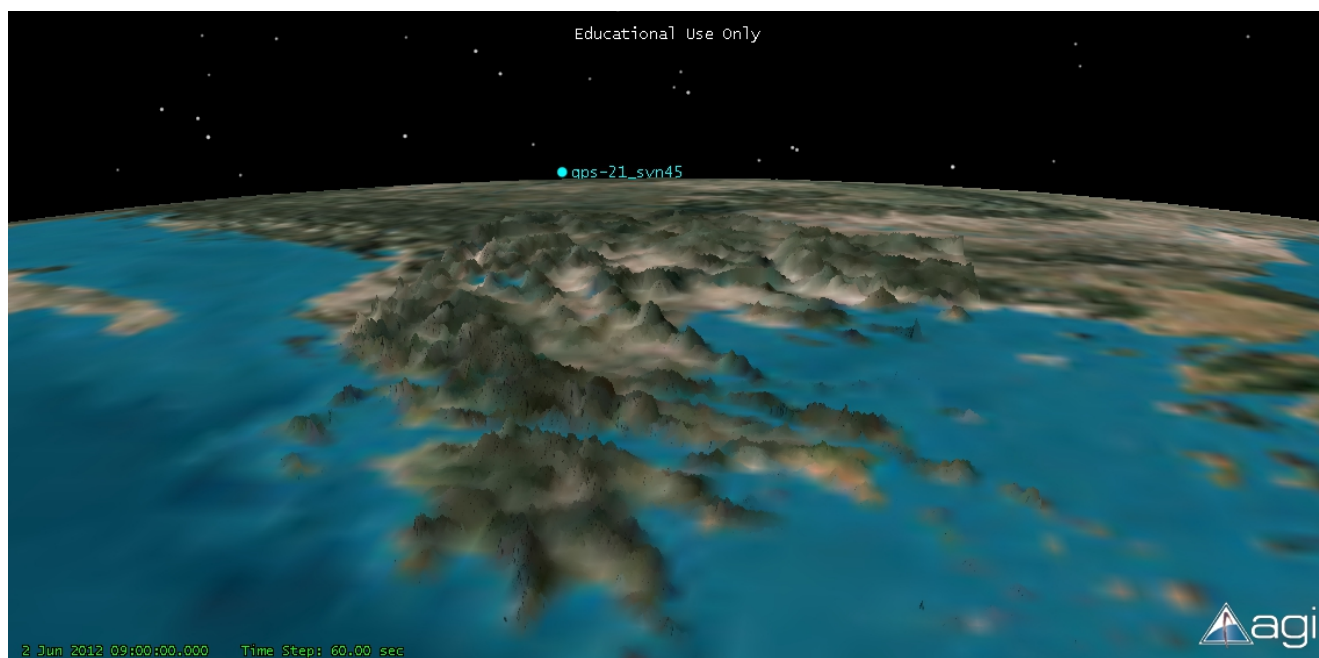
Προκειμένου να οπτικοποιηθεί μία εικόνα ή ένα DEM στο STK πρέπει να βρίσκεται σε συγκεκριμένους μορφότυπους. Οι εικόνες πρέπει να βρίσκονται είτε σε PDPTX format (ιδιόκτητο format της AGI) είτε σε format JP2(JPEG2000, ελεύθερο format αποθήκευσης εικόνων). Αντίστοιχα για τα DEM ισχύει ότι πρέπει να βρίσκονται σε format PDPT (ιδιόκτητο format της AGI).

Επομένως προκειμένου να οπτικοποιήσουμε το DEM που εισαγάγαμε στο STK θα πρέπει να τροποποιήσουμε το format του αρχείου από TIF σε PDPT. Αυτό γίνεται με χρήση του εργαλείου *Terrain Converter* (Utilities → Terrain Converter). Με τη χρήση του εργαλείου, παράλληλα με τη δημιουργία του αρχείου PDPT θα δημιουργήσουμε και μία δισδιάστατη χρωματική οπτικοποίηση του αναγλύφου. Για τη διαδικασία πρέπει να καθορίσουμε την γεωγραφική περιοχή που επιθυμούμε να οπτικοποιηθεί (μέγιστο και ελάχιστο γεωγραφικό πλάτος, μέγιστο και ελάχιστο γεωγραφικό μήκος), την επιφάνεια αναφοράς των υψομέτρων καθώς και τις χρωματικές ρυθμίσεις δισδιάστατης απεικόνισης του αναγλύφου (απόχρωση (*hue*) → αφορά την διαβάθμιση του χρώματος, κορεσμός (*saturation*) → ένταση του χρώματος, και τιμή (*value*) → φωτεινότητα). Από προεπιλογή οι ακραίες χρωματικές τιμές εκχωρούνται στο μέγιστο και ελάχιστο υψόμετρο που συναντώνται στο DEM.

Έπειτα καθορίζουμε την διεύθυνση, το όνομα και το format της εικόνας που θα δημιουργηθεί. Ενεργοποιώντας την επιλογή *'create a pdtt file for the selected region'* παράλληλα με την εικόνα δημιουργείται και το αρχείο PDPT του DEM που είναι απαραίτητο για την τρισδιάστατη οπτικοποίηση του αναγλύφου. Στις παρακάτω εικόνες 44 και 45 παρουσιάζονται αντίστοιχα μία δισδιάστατη και μία τρισδιάστατη οπτικοποίηση τμήματος του ελλαδικού χώρου.



Σχήμα 44: Δισδιάστατη χρωματική απεικόνιση υψομετρικής πληροφορίας.



Σχήμα 45: Τρισδιάστατη Απεικόνιση Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου. Η τιμή του αναγλύφου απεικονίζεται 7 φορές εντονότερη απ' ότι πραγματικά είναι, για λόγους εποπτικότητας.

4.3.2 Εισαγωγή της Πορείας του οχήματος εδάφους

Για την εισαγωγή του οχήματος εδάφους χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα πλοήγησης που συλλέχθηκαν από όχημα που εκτελούσε τη διαδρομή Κόνιτσα- Ιωάννινα. Σε αυτή την εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ο Great Arc Propagator και έτσι χρειάστηκε να μετασχηματίσουμε τα αρχικά δεδομένα της πορείας σε αρχείο με μορφή (format) *.PG (για την μορφοποίηση των δεδομένων του αρχείου χρειάστηκε και η χρήση του λογισμικού πακέτου MATLAB). Επίσης, καθότι μετά την πρώτη εισαγωγή του αρχείου στο STK παρατηρήθηκε ότι τα υψόμετρα των σημείων διέλευσης σε πολλές περιπτώσεις δεν συνέπιπταν με τα αντίστοιχα υψόμετρα του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (πολλές φορές ήταν μικρότερα από αυτά του DEM, γεγονός που είχε ως συνέπεια η διαδρομή να φαίνεται ότι βρίσκεται κάτω από το έδαφος, με αποτέλεσμα την συχνή εμφάνιση μηδενικής κάλυψης), χρειάστηκε να αγνοήσουμε τα αρχικά υψόμετρα και αντί αυτών να εκχωρήσουμε τα υψόμετρα του DEM που αντιστοιχούσαν στην συγκεκριμένη γεωγραφική θέση, γεγονός που επηρεάζει σε πολύ μικρό βαθμό τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Παρακάτω περιγράφονται τα αρχεία εισαγωγής πορείας οχήματος στον Great Arc Propagator.

4.3.2.1 Great Arc Propagator File

Πρόκειται για κατάλληλα συνταγμένα αρχεία κειμένου ASCII που χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή πορειών πλοίων, αεροπλάνων και οχημάτων εδάφους στο STK. Η κατάληξη αρχείων τέτοιου τύπου είναι είτε *.pg είτε *.pa. Το αρχείο αποτελείται από μία λίστα διαδοχικών σημείων διέλευσης του οχήματος τα οποία συνδέονται από το STK με τόξα μέγιστου κύκλου (*great arc paths*).

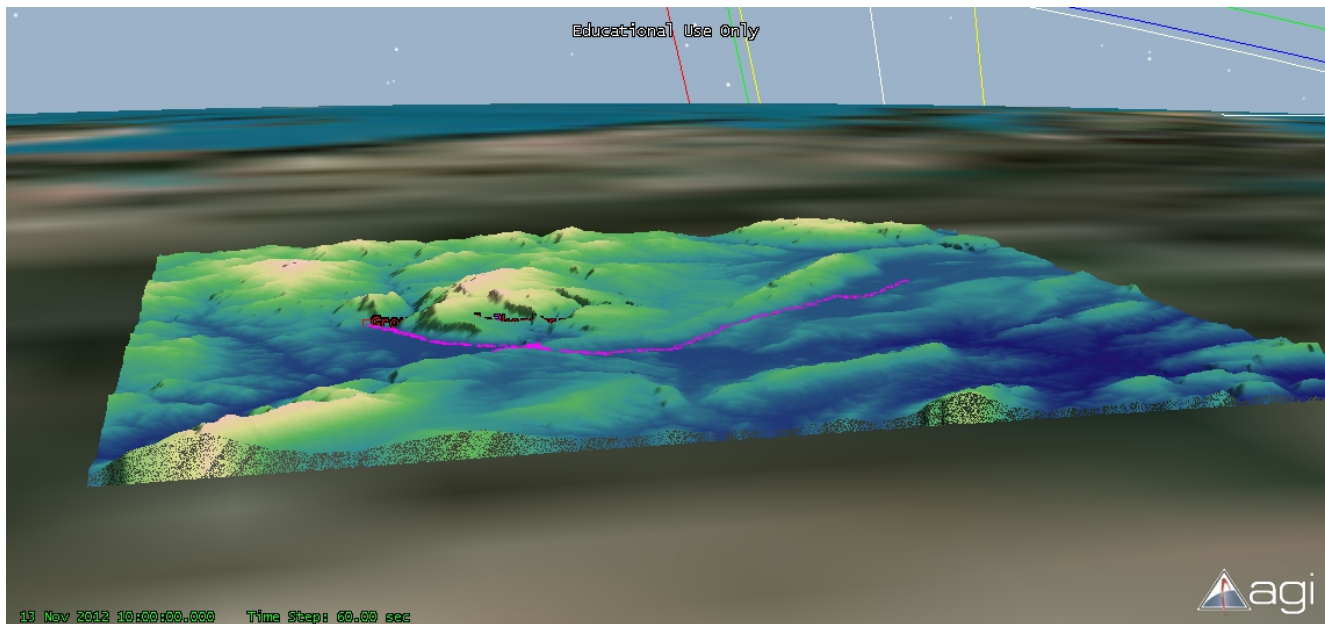
Στις πρώτες σειρές κάθε αρχείου, πριν την λίστα των σημείων διέλευσης, προηγούνται ορισμένες λέξεις κλειδιά (*keywords*), οι οποίες καθορίζουν το σύστημα αναφοράς των δεδομένων καθώς και τον τρόπο επεξεργασίας τους για την εξαγωγή της τελικής πορείας του οχήματος στο STK. Πιο αναλυτικά σε ένα τέτοιο αρχείο πρέπει να περιέχονται:

- Η έκδοση του STK στην οποία αναφέρεται το αρχείο.
- Η μέθοδος για τον υπολογισμό του τόξου από τα σημεία διέλευσης του αρχείου. Υπάρχουν τρεις εναλλακτικές μέθοδοι. Σύμφωνα με την πρώτη, από τις καθορισμένες χρονικές στιγμές του αρχείου προσδιορίζεται από το STK η ταχύτητα σε κάθε χρονική στιγμή. Στη δεύτερη θεωρούνται καθοριστικές η ταχύτητα και η επιτάχυνση που δίνονται κάθε χρονική στιγμή στο αρχείο και υπολογίζεται η χρονική στιγμή που αντιστοιχεί σε κάθε θέση του οχήματος κατά τη δημιουργία της εφημερίδας από το STK. Η τρίτη περίπτωση αφορά στον καθορισμό της ταχύτητας σε κάθε χρονική στιγμή που περιέχεται στο αρχείο και στον προσδιορισμό μέσω αυτής του χρόνου και της επιτάχυνσης καθ' όλη τη διάρκεια κίνησης του οχήματος.
- Η χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στην πρώτη μέτρηση.
- Η μέγιστη διαφορά (σε μοίρες) μεταξύ διαδοχικών σημείων διέλευσης (*Arc Granularity*).
- Το σύστημα αναφοράς των υψομέτρων (WGS84- Μέση Στάθμη της θάλασσας κ.α.).
- Ο συνολικός αριθμός των σημείων διέλευσης που περιέχονται στο αρχείο.

Στη συνέχεια ακολουθεί η λίστα των σημείων διέλευσης. Σε κάθε γραμμή της λίστας αντιστοιχούν 7 στήλες οι οποίες περιλαμβάνουν τις παρακάτω πληροφορίες:

- Τη χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στο σημείο διέλευσης (σε δευτερόλεπτα από την πρώτη μέτρηση).
- Το γεωγραφικό πλάτος του σημείου διέλευσης εκφρασμένο σε μοίρες.
- Το γεωγραφικό μήκος του σημείου διέλευσης εκφρασμένο σε μοίρες.
- Το υψόμετρο του σημείου διέλευσης εκφρασμένο σε μέτρα.
- Την ταχύτητα από το συγκεκριμένο σημείο διέλευσης μέχρι το επόμενο σε m/sec.
- Την επιτάχυνση από το συγκεκριμένο σημείο διέλευσης μέχρι το επόμενο σε m/sec².
- Την καμπυλότητα του τόξου ανάμεσα στο συγκεκριμένο σημείο διέλευσης και το επόμενο σε m.

Για την εφαρμογή, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, είναι επιθυμητό για λόγους συμβατότητας να χρησιμοποιηθούν για τα σημεία διέλευσης του οχήματος τα υψόμετρα του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, όπως προκύπτουν από παρεμβολές στο DEM. Αυτό γίνεται με τον ορισμό της αναφοράς των υψομέτρων στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους (keyword: AltRef Terrain) και την εισαγωγή μηδενικών στοιχείων σε όλα τα στοιχεία της τέταρτης στήλης (στήλη που αντιστοιχεί στα υψόμετρα) της λίστας των σημείων διέλευσης. Στην εικόνα του σχήματος 46 απεικονίζεται η διαδρομή του οχήματος επί του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.



Σχήμα 46: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πορείας του οχήματος επί του ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου. Πέραν του αναγλύφου έχει οπτικοποιηθεί και η χρωματική απεικόνιση του αναγλύφου.

4.3.3 Εισαγωγή του δορυφορικού σχηματισμού GPS

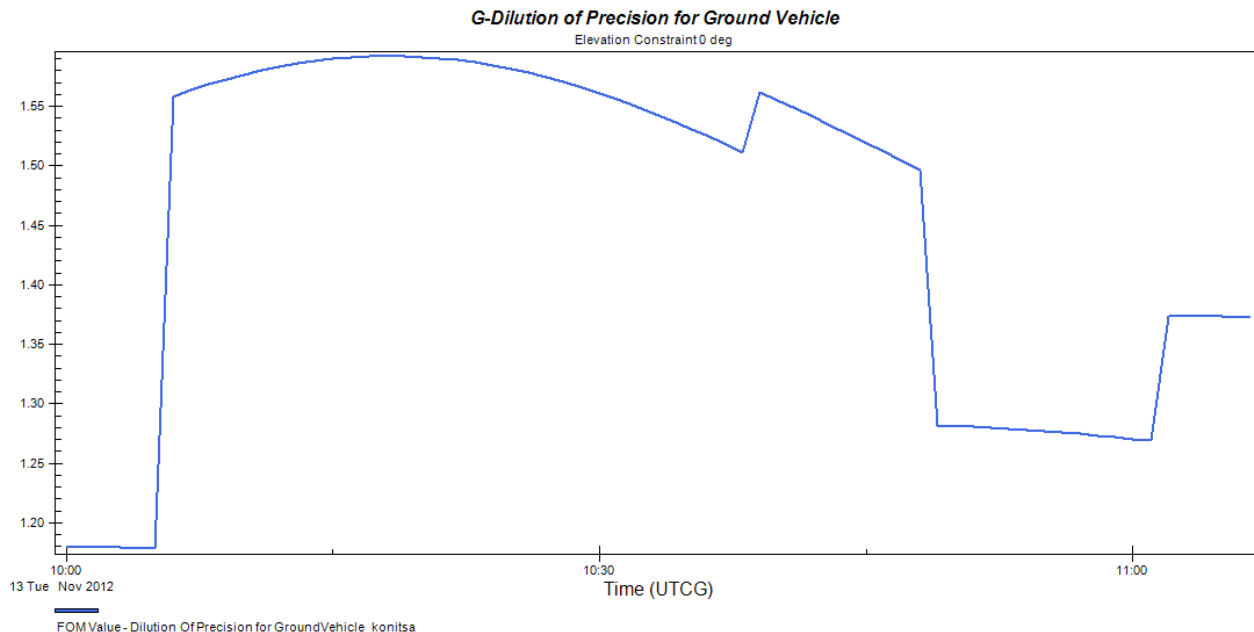
Χρησιμοποιήθηκε ο δορυφορικός σχηματισμός GPS όπως είχε ήδη εισαχθεί από την πρώτη εφαρμογή.

4.3.4 Ανάλυση της ποιότητας κάλυψης που παρέχει στο όχημα ο σχηματισμός GPS

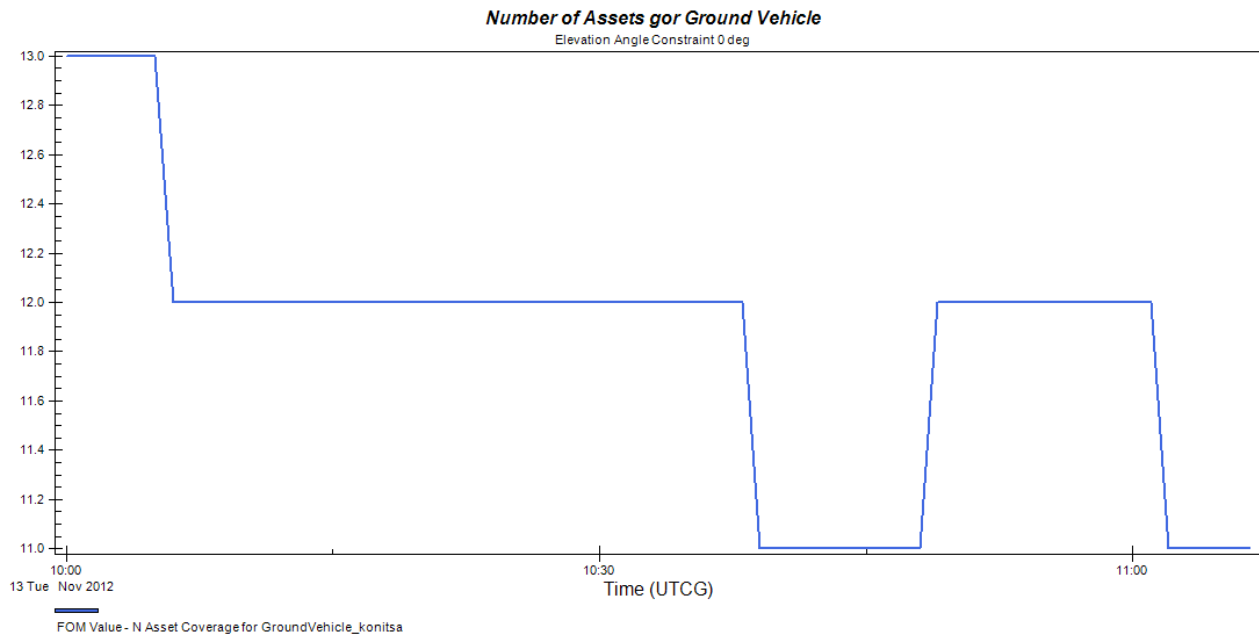
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, θα εξεταστούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν για διαφορετικές προσεγγίσεις της επίδρασης του αναγλύφου στην κάλυψη του οχήματος, δηλαδή την αδιάλειπτη λήψη του σήματος των δορυφόρων κατά τη διάρκεια της διαδρομής. Αρχικά θα εξεταστεί η χρήση γωνιών αποκοπής και στη συνέχεια η χρήση του DEM.

4.3.4.1 Ανάλυση της επίδρασης του αναγλύφου στην ποιότητα κάλυψης με χρήση γωνιών αποκοπής

Αρχικά παράγεται το διάγραμμα του δείκτη GDOP και του δείκτη N asset Coverage χωρίς τη χρήση κανενός περιορισμού, δηλαδή με ανοιχτό ορίζοντα. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα των σχημάτων 47 και 48. Επισημαίνεται ότι Ο δείκτης GDOP υπολογίζεται σε όλες τις περιπτώσεις με χρήση του συνόλου των διαθέσιμων δορυφόρων και όχι των τεσσάρων καλύτερων.

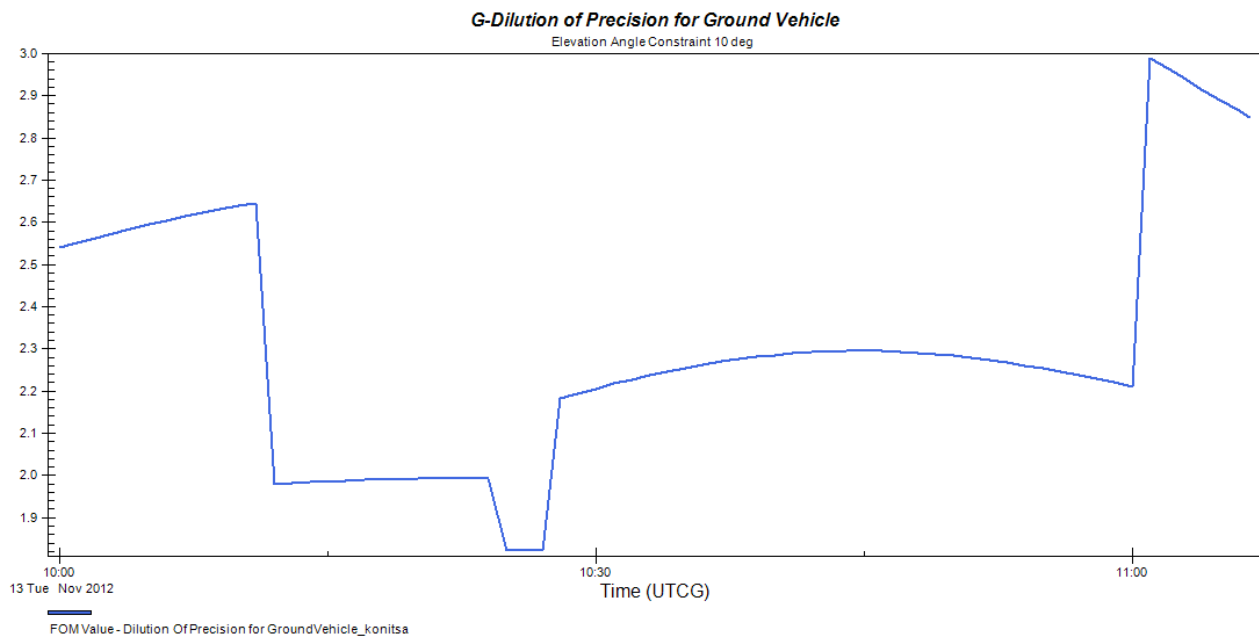


Σχήμα 47: Μεταβολή της τιμής του δείκτη GDOP κατά την εκτέλεση ορεινής διαδρομής από όχημα εδάφους

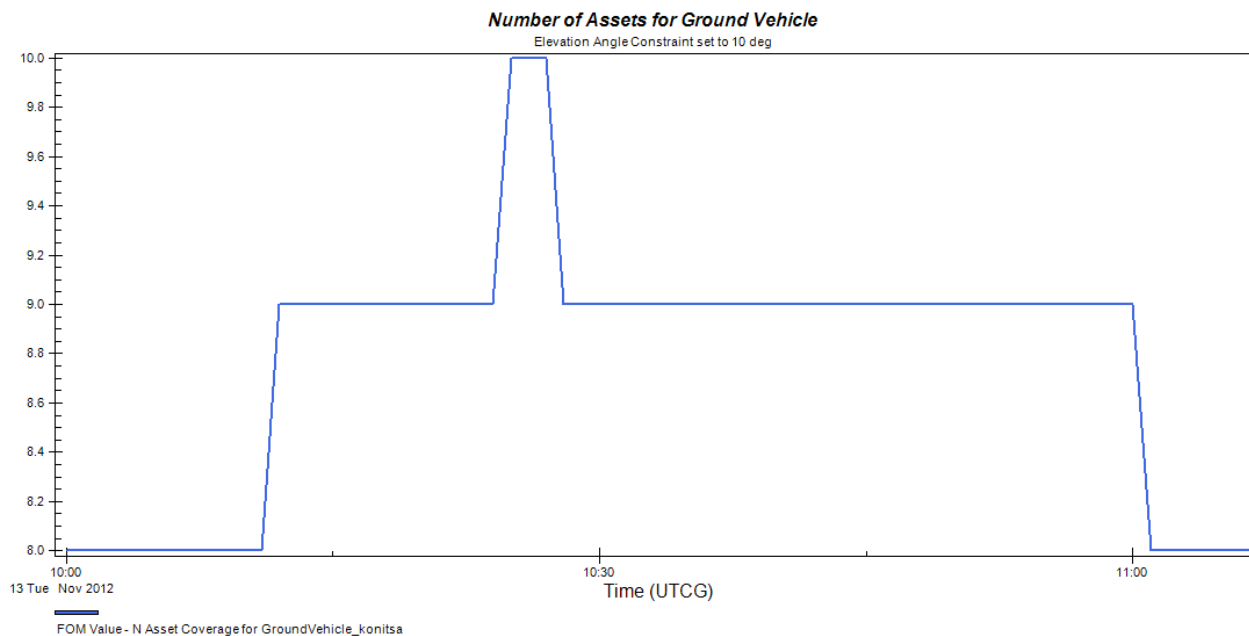


Σχήμα 48: Μεταβολή του αριθμού δορυφόρων του σχηματισμού GPS που έχουν πρόσβαση σε όχημα ενώ αυτό εκτελεί την ορεινή διαδρομή Κόνιτσα- Ιωάννινα.

Εν συνεχεία από την σελίδα ιδιοτήτων του οχήματος, στην ενότητα των βασικών περιορισμών κάλυψης, ορίζουμε ελάχιστη γωνία ύψους ίση με 10 μοίρες. Τα αποτελέσματα ακολουθούν στα διαγράμματα των σχημάτων 49 και 50.

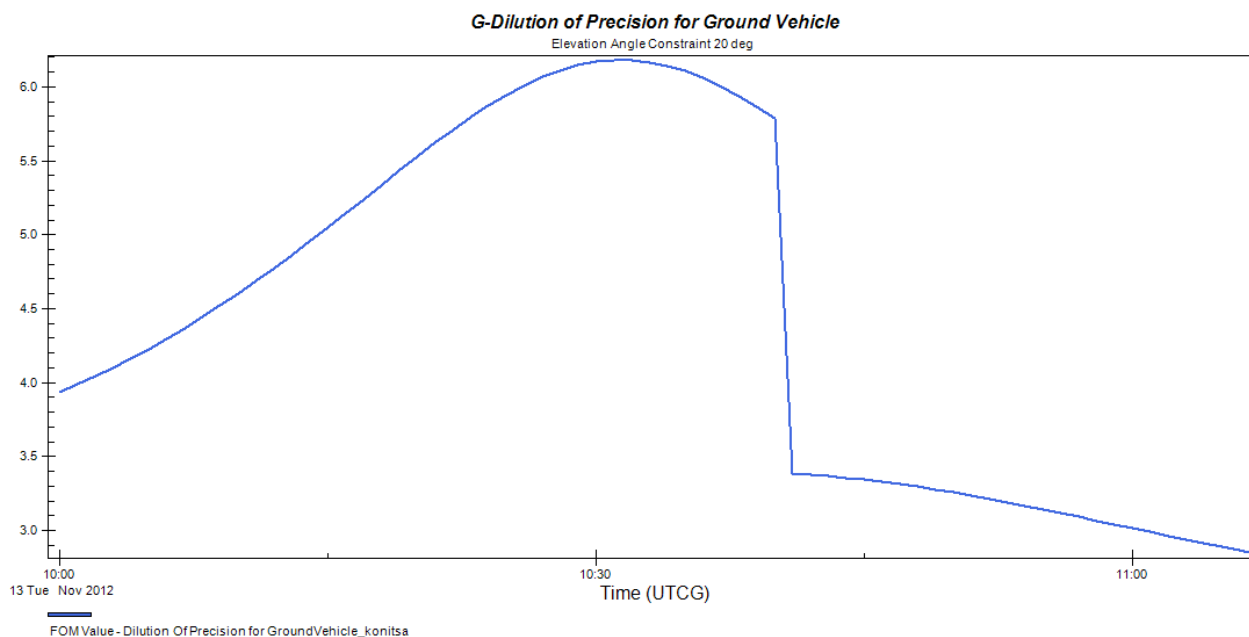


Σχήμα 49: Μεταβολή της τιμής του δείκτη GDOP κατά την εκτέλεση ορεινής διαδρομής από όχημα εδάφους με επιβολή ελάχιστης τιμής της γωνίας ύψους ίσης με 10 μοίρες.

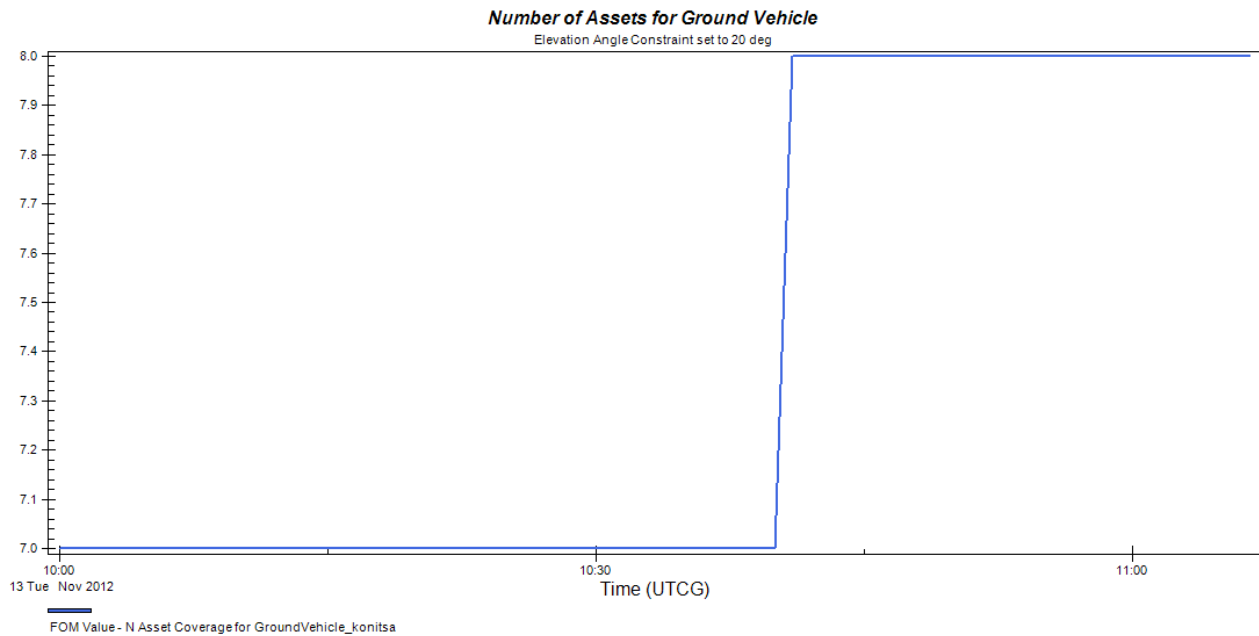


Σχήμα 50: Μεταβολή του αριθμού δορυφόρων του σχηματισμού GPS που έχουν πρόσβαση σε όχημα ενώ αυτό εκτελεί την ορεινή διαδρομή Κόνιτσα- Ιωάννινα με επιβολή ελάχιστης αποδεκτής τιμής της γωνίας ύψους ίση με 10 μοίρες.

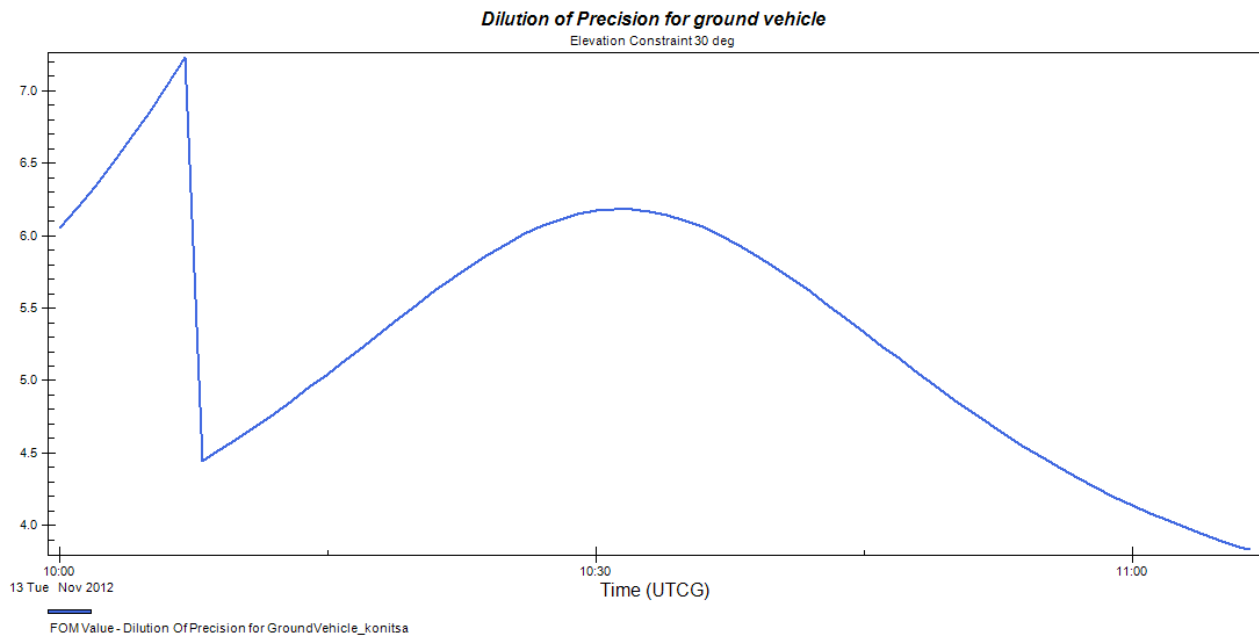
Με αντίστοιχο τρόπο δημιουργούμε τα διαγράμματα μεταβολής του δείκτη DOP και του δείκτη N asset coverage για ελάχιστες γωνίες ύψους ίσες με 20, 30, και 40 μοίρες αντίστοιχα (διαγράμματα σχημάτων 51 έως και 56).



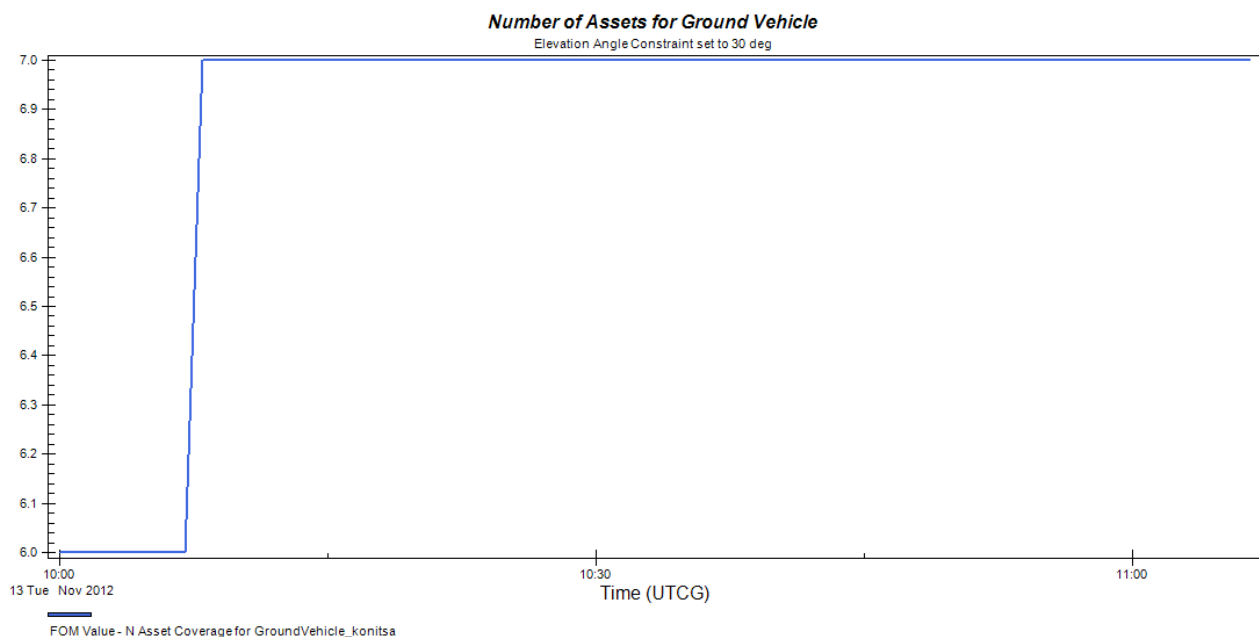
Σχήμα 51: Μεταβολή της τιμής του δείκτη GDOP κατά την εκτέλεση ορεινής διαδρομής από όχημα εδάφους με επιβολή ελάχιστης τιμής της γωνίας ύψους ίσης με 20 μοίρες.



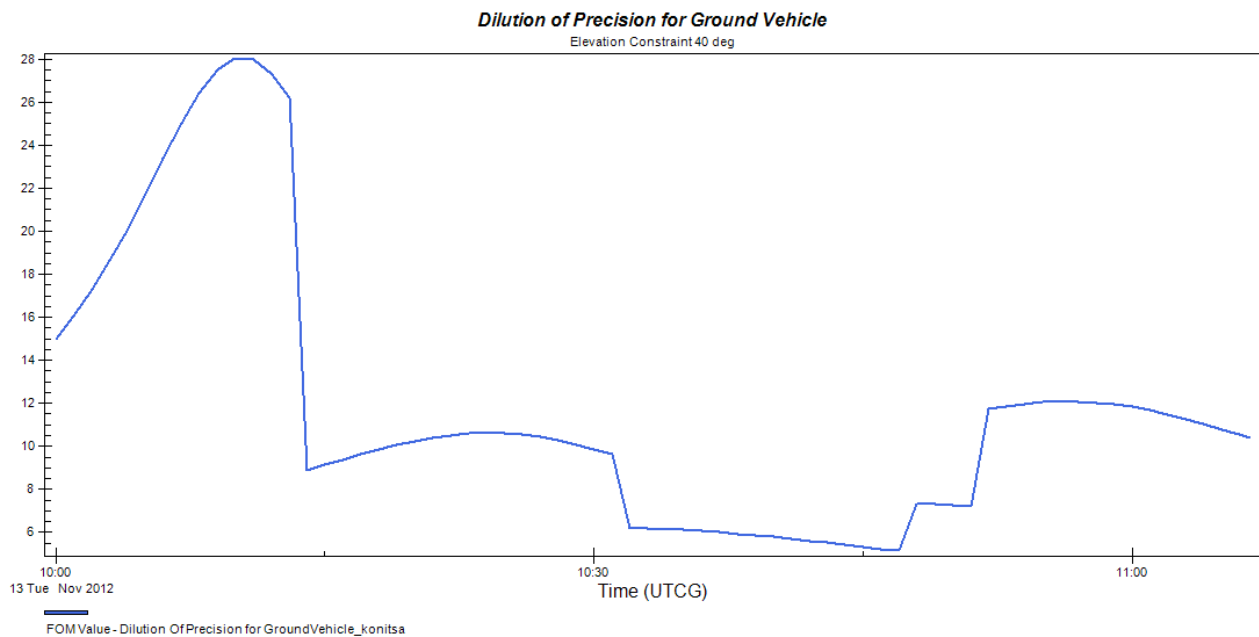
Σχήμα 52: Μεταβολή του αριθμού δορυφόρων του σχηματισμού GPS που έχουν πρόσβαση σε όχημα ενώ αυτό εκτελεί την ορεινή διαδρομή Κόνιτσα- Ιωάννινα με επιβολή ελάχιστης αποδεκτής τιμής της γωνίας ύψους ίση με 20 μοίρες.



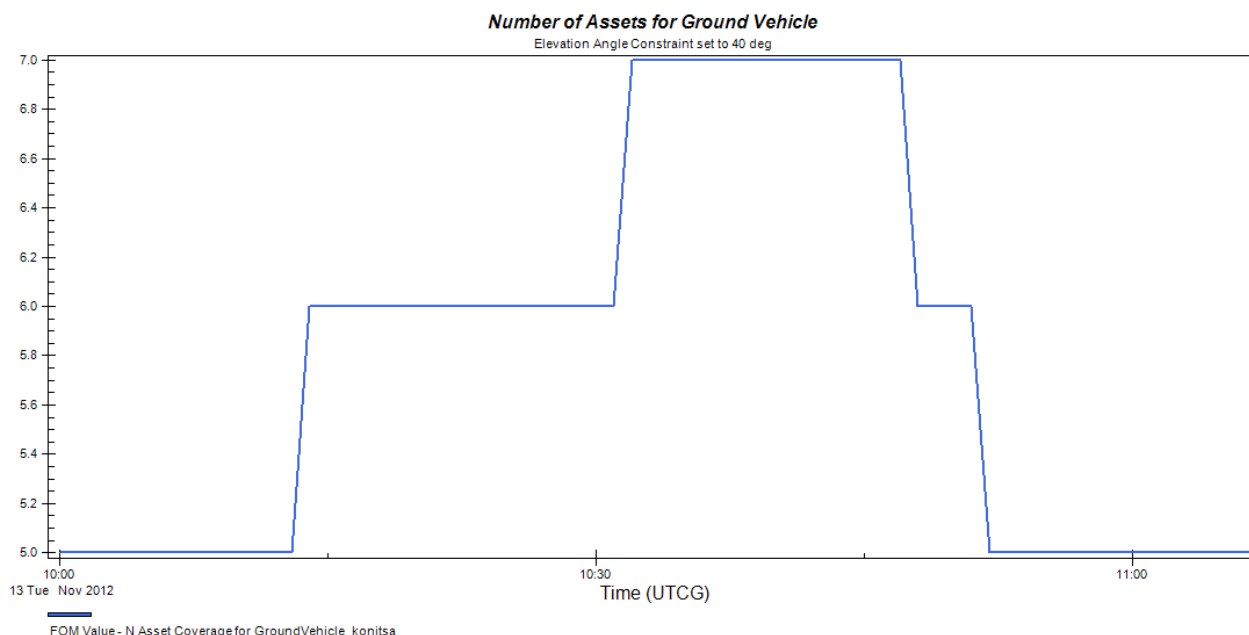
Σχήμα 53: Μεταβολή της τιμής του δείκτη GDOP κατά την εκτέλεση ορεινής διαδρομής από όχημα εδάφους με επιβολή ελάχιστης τιμής της γωνίας ύψους ίσης με 30 μοίρες.



Σχήμα 54: Μεταβολή του αριθμού δορυφόρων του σχηματισμού GPS που έχουν πρόσβαση σε όχημα ενώ αυτό εκτελεί την ορεινή διαδρομή Κόνιτσα- Ιωάννινα με επιβολή ελάχιστης αποδεκτής τιμής της γωνίας ύψους ίση με 30 μοίρες.



Σχήμα 55: Μεταβολή της τιμής του δείκτη GDOP κατά την εκτέλεση ορεινής διαδρομής από όχημα εδάφους με επιβολή ελάχιστης τιμής της γωνίας ύψους ίσης με 40 μοίρες.



Σχήμα 56: Μεταβολή του αριθμού δορυφόρων του σχηματισμού GPS που έχουν πρόσβαση σε όχημα ενώ αυτό εκτελεί την ορεινή διαδρομή Κόνιτσα- Ιωάννινα με επιβολή ελάχιστης αποδεκτής τιμής της γωνίας ύψους ίση με 40 μοίρες.

4.3.4.2 Ανάλυση της επίδρασης της χρήσης DEM στην αξιολόγηση της ποιότητας κάλυψης

Μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση της επίδρασης του αναγλύφου στην κάλυψη του οχήματος από τον δορυφορικό σχηματισμό GPS υπολογίζεται με χρήση περιορισμών ορατότητας που προκύπτουν από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που έχει εισαχθεί στο STK.

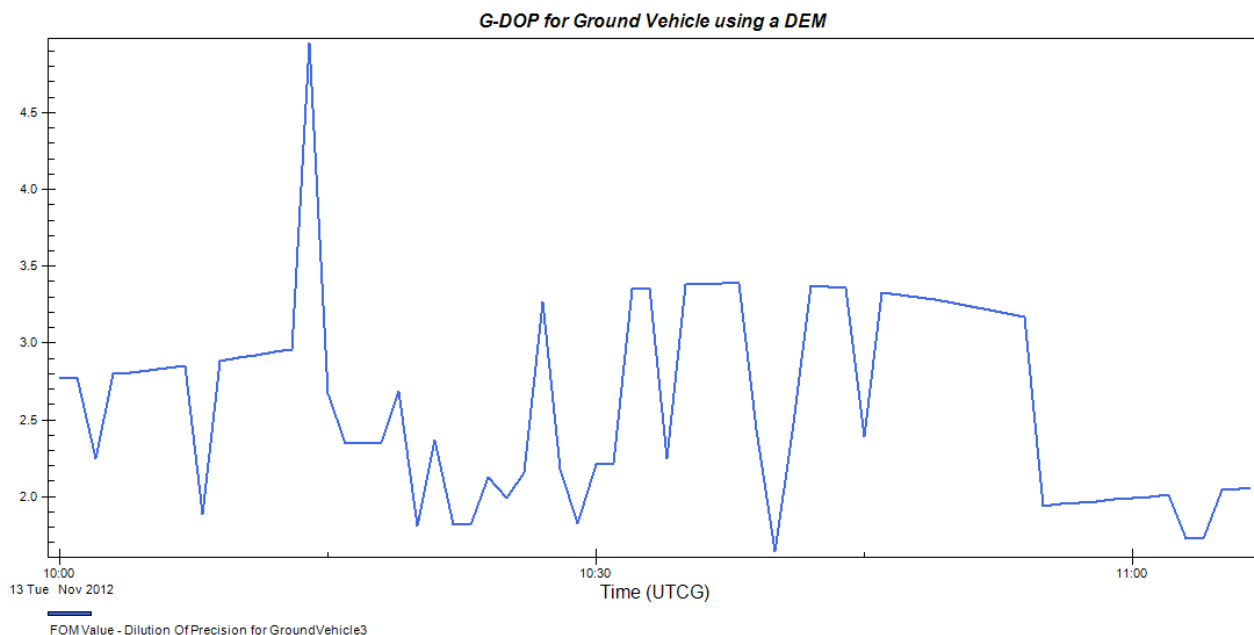
Η χρησιμοποίηση ενός DEM για τον περιορισμό των προσβάσεων των δορυφόρων και την μελέτη της επίδρασής τους στην τιμή του δείκτη GDOP εμφανίζει δύο βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την χρήση γωνίας αποκοπής, όσον αφορά την ρεαλιστικότητα της προσομοίωσης:

1) Η πρόσβαση των δορυφόρων του σχηματισμού GPS στον δέκτη του οχήματος, σε κάθε χρονική στιγμή, προσδιορίζεται από τον ελεύθερο ορίζοντα του οχήματος, ο οποίος περιορίζεται από τυχόν φυσικά εμπόδια που παρεμβάλλονται στην γραμμή ορατότητας μεταξύ του δέκτη και του εκάστοτε δορυφόρου. Με χρήση μίας σταθερής γωνίας αποκοπής αποκλείονται όλες οι προσβάσεις προς δορυφόρους που βρίσκονται κάτω από την καθορισμένη γωνία ύψους για τον δέκτη. Όμως, όπως είναι προφανές, στην πραγματικότητα η ορατότητα του αντικειμένου δεν περιορίζεται κατά τον ίδιο τρόπο προς όλες τις διευθύνσεις, αλλά εξαρτάται από τον περιβάλλοντα χώρο. Επομένως, η χρήση ενός DEM για τον περιορισμό της ορατότητας, αντί της σταθερής γωνίας αποκοπής, προβάλλει ως μία ρεαλιστικότερη προσέγγιση, υπό την προϋπόθεση ότι η περιοχή γύρω από το αντικείμενο δεν είναι πυκνοδομημένη ή με ψηλά δέντρα ή άλλα φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, ώστε η κύρια αιτία περιορισμού της ορατότητας να είναι το ανάγλυφο της περιοχής.

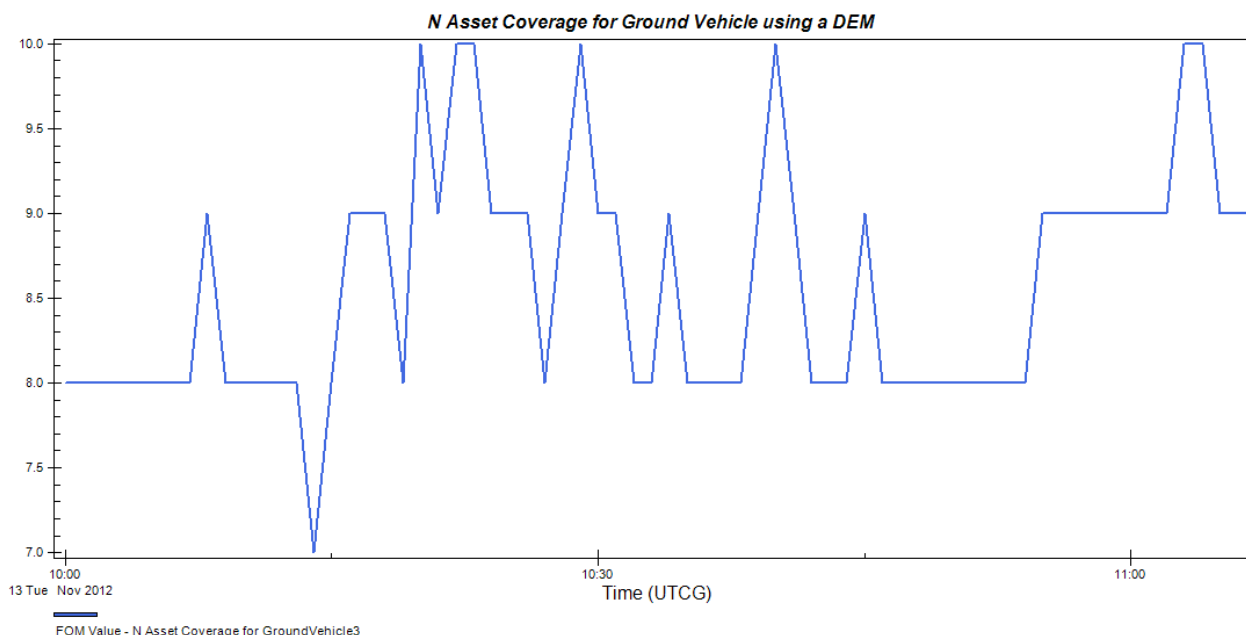
2) Επιπλέον, το γεγονός ότι ο δέκτης (το όχημα) κινείται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης συνεπάγεται ότι ο ελεύθερος ορίζοντας του δέκτη μεταβάλλεται με το χρόνο. Χρησιμοποιώντας μία σταθερή γωνία αποκοπής αγνοείται εντελώς η μεταβολή του περιβάλλοντος χώρου με το χρόνο και κατά συνέπεια η μεταβολή του ελεύθερου ορίζοντα του σημείου. Αντίθετα, με τη χρήση ενός DEM για τον περιορισμό της ορατότητας λαμβάνεται υπόψιν ο διαφορετικός ελεύθερος ορίζοντας σε κάθε θέση του οχήματος, ο οποίος περιορίζεται δυναμικά πλέον από το ανάγλυφο της περιοχής.

Για τον υπολογισμό των προσβάσεων, λαμβάνοντας υπ' όψιν τον περιορισμό λόγω αναγλύφου κάνουμε το εξής: στη σελίδα ιδιοτήτων του οχήματος εδάφους, στην ενότητα Basic Constraints ενεργοποιούμε τις επιλογές 'line of sight' και 'terrain mask' που βρίσκονται στο κάτω μέρος της σελίδας. Με αυτό τον τρόπο κατά τον υπολογισμό κάλυψης το πρόγραμμα ελέγχει τους περιορισμούς ορατότητας σε κάθε σημείο της διαδρομής του οχήματος που οφείλονται στην παρεμβολή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους στην γραμμή ορατότητας μεταξύ του οχήματος και των επιλεγμένων να παρέχουν κάλυψη δορυφόρων.

Τα σχετικά με τη μεταβολή των δεικτών GDOP και N asset Coverage αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα των σχημάτων 57 και 58.



Σχήμα 57: Μεταβολή της τιμής του δείκτη GDOP κατά την εκτέλεση ορεινής διαδρομής από όχημα εδάφους με επιβολή περιορισμού ορατότητας με χρήση DEM



Σχήμα 58: Μεταβολή του αριθμού δορυφόρων του σχηματισμού GPS που έχουν πρόσβαση σε όχημα ενώ αυτό εκτελεί την ορεινή διαδρομή Κόνιτσα- Ιωάννινα με επιβολή περιορισμού ορατότητας με χρήση DEM.

Πρέπει να διευκρινιστεί ότι η διαδικασία οπτικοποίησης του DEM δεν έχει καμία επίδραση στους υπολογισμούς πρόσβασης. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το DEM πρέπει να εισαχθεί στην σελίδα Terrain των ιδιοτήτων του σεναρίου, και εν συνεχεία να εισαχθεί ως περιορισμός κάλυψης για το εκάστοτε αντικείμενο αναφοράς που χρησιμοποιείται. Η οπτικοποίηση ή όχι του ψηφιακού μοντέλου εδάφους είναι μία εντελώς ανεξάρτητη διαδικασία.

4.3.5 Συμπεράσματα

Όπως αναμενόταν, η χρήση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους για τον περιορισμό των προσβάσεων μεταξύ αντικειμένων αποφέρει μια πιο ρεαλιστική εκτίμηση της ποιότητας κάλυψης απ' ότι ο περιορισμός με σταθερές γωνίες αποκοπής (ελάχιστες και μέγιστες τιμές γωνιών ύψους).

Όσον αφορά τις τιμές του GDOP που προέκυψαν με χρήση του DEM, η ελάχιστη και μέση τιμή υποδεικνύουν εξαιρετική ποιότητα κάλυψης, η μέγιστη τιμή υποδηλώνει μία καλή ποιότητα κάλυψης και η ποιότητα κάλυψης βρίσκεται ανάμεσα σε εξαιρετική και καλή (με τιμή 3.3 τείνει προς το εξαιρετική) για το 90% του χρόνου της εφαρμογής (ο χαρακτηρισμός της ποιότητας κάλυψης βασίζεται στον πίνακα 3). Επομένως από γεωμετρικής πλευράς ο σχηματισμός GPS προβλέπεται ότι μπορεί να καλύψει με πολύ καλή ακρίβεια (σχεδόν τη μέγιστη δυνατή) την δυνατότητα παροχής λύσεων πλοήγησης κατά τη διαδρομή του οχήματος στην συγκεκριμένη ορεινή περιοχή.

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας 23 με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του δείκτη GDOP όπως

προέκυψαν με χρήση όλων των διαφορετικών περιορισμών πρόσβασης. Όσον αφορά στον περιορισμό γωνιών ύψους αξίζει να αναφερθεί ότι ακόμη και με αποκλεισμό των δορυφόρων που σχηματίζουν με το όχημα γωνία ύψους μικρότερη των 30 μοιρών, η λύση πλοήγησης που παρέχεται από το σχηματισμό χαρακτηρίζεται ως μέτρια και για τους 4 στατιστικούς δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν. Επομένως ακόμη και με μία τόσο υψηλή γωνία αποκοπής ο σχηματισμός παρέχει την απαιτούμενη ακρίβεια κάλυψης για τον υπολογισμό λύσεων πλοήγησης.

Μέσα από την εφαρμογή παρατηρείται ότι το STK δύναται να προσομοιώσει με ρεαλιστικό τρόπο την πρόσβαση ενός δέκτη στους δορυφόρους του σχηματισμού GPS και την συνεπακόλουθη επίδραση στην ακρίβεια πλοήγησης. Δηλαδή, πέρα από την βασική προσομοίωση που παρουσιάστηκε στην πρώτη εφαρμογή του κεφαλαίου, το STK δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη, με τα κατάλληλα στοιχεία εισόδου, να λάβει υπόψη του στην προσομοίωση και ρεαλιστικά στοιχεία του περιβάλλοντος της εκάστοτε εφαρμογής, όπως είναι το γήινο ανάγλυφο.

Τύπος Περιορισμού	Τιμή δείκτη GDOP				N asset Coverage ≤90%
	Ελάχιστη	Μέση	Μέγιστη	Τιμή ≤90%	
Χωρίς περιορισμό	1.18	1.46	1.59	1.59	11
Elevation Angle 10 (deg)	1.82	2.27	2.89	2.64	8
Elevation Angle 20 (deg)	2.85	4.48	6.18	6.11	7
Elevation Angle 30 (deg)	3.83	5.35	7.23	6.18	6
Elevation Angle 40 (deg)	5.14	11.71	28.05	23.38	5
DEM	1.64	2.61	4.95	3.36	8

Πίνακας 23: Συγκεντρωτικός Πίνακας στατιστικών τιμών του δείκτη GDOP όπως προέκυψε για την πορεία οχήματος σε διαδρομή με έντονο ανάγλυφο, ανάλογα με τον περιορισμό πρόσβασης που επιβλήθηκε. Όπου <90% είναι η τιμή κάτω από την οποία κυμαίνονται οι δυναμικές τιμές του δείκτη για το 90% του χρονικού διαστήματος μελέτης.

4.4 Εφαρμογή 3^η: Σύγκριση πρόβλεψης τροχιάς δορυφόρου με χρήση του SGP4 και του GPS propagator του STK με τις τροχιές ακριβείας της Υπηρεσίας IGS.

Στόχος της εφαρμογής είναι η εξέταση της ακρίβειας των προβλεπόμενων τροχιών που παράγονται από τους αναπαραγωγείς τροχιάς SGP4 και GPS propagator του STK, για ένα χρονικό διάστημα δύο εβδομάδων από την εποχή αναφοράς των αρχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη. Η εκτίμηση του μέτρου της ακρίβειας έγινε μέσω της σύγκρισης των εφημερίδων που προέκυψαν με χρήση των προσομοιωτών του STK, με τα στοιχεία των εφημερίδων ακριβείας της IGS (*International*

GNSS Service) για την αντίστοιχη χρονική περίοδο.

Αρχικά γίνεται παρακάτω μία σύντομη αναφορά στους δύο προσομοιωτές τροχιάς του STK, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εφαρμογή, καθώς και στα αρχεία εισόδου (*input data*) τα οποία είναι απαραίτητα για την προσομοίωση των τροχιών με κάθε προσομοιωτή. Ύστερα γίνεται αναφορά στις ακριβείς τροχιές της IGS, οι οποίες θα χρησιμεύσουν ως μέτρο σύγκρισης της ακρίβειας των δύο διαφορετικών εργαλείων προσομοίωσης και στην περιγραφή του τρόπου παραγωγής των τροχιών, επεξεργασίας των δεδομένων και ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Τέλος παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του κάθε αναπαραγωγέα.

4.4.1 SGP4 propagator

Ο προσομοιωτής SGP4 χρησιμοποιείται με στοιχεία εισόδου τα μέσα τροχιακά στοιχεία που περιέχονται στα TLE αρχεία. Λαμβάνει υπόψη τις μη περιοδικές (*secular*) και περιοδικές μεταβολές λόγω της επιπλάτυνσης της Γης, την ηλιακή και σεληνιακή βαρυτική επίδραση, βαρυτικές επιδράσεις λόγω συντονισμού (*resonance*), και της τροχιακής φθοράς (*orbital decay*) λόγω της ατμοσφαιρικής τριβής (*atmospheric drag*) που υφίσταται ο δορυφόρος.

Ο προσομοιωτής SGP4 δημιουργεί εφημερίδες στο *True Equator Mean Equinox* σύστημα συντεταγμένων βασισμένο στην εποχή αναφοράς του συγκεκριμένου TLE αρχείου. Η εφημερίδα που δημιουργείται είναι γενικά αξιόπιστη για μερικές μέρες πριν και μετά την εποχή αναφοράς. Αυτός είναι και ο λόγος που νέα TLE δημιουργούνται ανά τακτά διαστήματα για κάθε δορυφόρο λόγω αυτού του περιορισμού. Επομένως όταν χρησιμοποιείται ένα TLE αρχείο είναι πολύ σημαντικό να χρησιμοποιείται το σωστό όσον αφορά την εποχή αναφοράς που ανταποκρίνεται στην εφαρμογή.

Στο STK υπάρχει η δυνατότητα να εισαχθούν τα αρχικά στοιχεία για τον προσομοιωτή SGP4 χειροκίνητα, άλλα είναι πολύ πιο απλό και γρήγορο να εισαχθούν τα τροχιακά στοιχεία από ένα αρχείο TLE. Τα TLE αρχεία πρέπει να είναι μορφοποιημένα σε TLE format (*.tce, *.tle), όπως αυτό παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα. Το STK παρέχει αρκετές εναλλακτικές επιλογές για την εισαγωγή και διαχείριση τροχιακών στοιχείων, αποφεύγοντας έτσι την χειροκίνητη εισαγωγή τους.

4.4.2 Αρχεία εισόδου TLE (Two Line Elements)

Τα *two line element sets* (TLE) είναι αρχεία ASCII με συγκεκριμένο μορφότυπο που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση των τροχιακών δεδομένων των δορυφόρων της Γης. Περιέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες για την αναγνώριση του δορυφόρου, τα τροχιακά στοιχεία του για μία δεδομένη εποχή αναφοράς, καθώς και στοιχεία που θα βοηθήσουν στην πρόβλεψη της τροχιάς του (όπως ο B^* drag term). Ο συγκεκριμένος μορφότυπος αρχείων δημιουργήθηκε από τον NORAD (*North American Aerospace Defence Command*) και χρησιμοποιείται κυρίως από τον NORAD και τη NASA. Τα TLE μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το μοντέλο SGP4 (καθώς και τα μοντέλα SGP8, SDP4 και SDP8) για

την δημιουργία προβλεπόμενων τροχιακών εφημερίδων. Ακολουθεί ένα παράδειγμα του format ενός αρχείου TLE:

```
TANDEM X
1 36605U 10030A 12206.92030675 .00000685 00000-0 35828-4 0 8557
2 36605 097.4444 213.1314 0001306 086.5982 333.4199 15.19152808116120
```

Πιο αναλυτικά τα στοιχεία που περιέχονται σε κάθε αρχείο παρατίθενται παρακάτω (Kelso, 1998):

Γραμμή 1	
Στήλες	Περιγραφή
1	Αριθμός της γραμμής του TLE: καθορίζει τον αριθμό της γραμμής και κατ' επέκταση το format που πρέπει να ακολουθεί.
3 με 7	Αριθμός του Δορυφόρου: Πρόκειται για τον αριθμό του αντικειμένου στο οποίο αναφέρονται οι μετρήσεις του αρχείου και αφορά τον NORAD Catalog Number, δηλαδή τον αριθμό που εκχωρεί ο NORAD για κάθε τεχνητό δορυφόρο που περιστρέφεται γύρω από τη γη στον SATCAT (<i>Satellite Catalog</i>).
8	Διαβάθμιση Πληροφορίας (<i>Classification</i>): U για μη διαβαθμισμένο αρχείο TLE (Unclassified) και S για διαβαθμισμένο (Secret). Προφανώς τα αρχεία προς επεξεργασία που παρέχονται στο διαδίκτυο είναι όλα κατηγορίας U.
10 με 11	Διεθνής Αναγνωριστικός Κωδικός (<i>International Designator</i>): τα τελευταία 2 ψηφία της χρονιάς εκτόξευσης
12 με 14	Διεθνής Αναγνωριστικός Κωδικός (<i>International Designator</i>): ο αύξων αριθμός εκτόξευσης της χρονιάς
15 με 17	Διεθνής Αναγνωριστικός Κωδικός, το τμήμα της εκτόξευσης (<i>Piece of launch</i>). Ο Διεθνής Αναγνωριστικός Κωδικός που περιέχεται στα 3 τελευταία πεδία που αποδίδεται στα αντικείμενα από το <i>World Data Center-A for Rockets and Satellites</i> . Η βασική διαφορά ανάμεσα σε αυτόν τον κωδικό και στον <i>NORAD Catalog Number</i> είναι ότι ο μεν πρώτος στηρίζεται αποκλειστικά στην ημερομηνία εκτόξευσης του αντικειμένου, ενώ ο δεύτερος στην ημερομηνία πρώτης παρατήρησής του.
19 με 20	Τα δύο τελευταία ψηφία του έτους αναφοράς (<i>Epoch Year</i>).
21 με 32	Η ημέρα αναφοράς μαζί με το δεκαδικό μέρος της (<i>Epoch Day</i>): Τα δύο τελευταία πεδία αφορούν την εποχή αναφοράς όλων των μεταβλητών με το χρόνο δεδομένων. Ως αρχή κάθε ημέρας αναφοράς θεωρείται η 00 h UT (μεσάνυχτα) και ο χρόνος μετράται σε μέρες ηλιακές (και όχι αστρικές) ημέρες.
34 με 43	Πρώτη παράγωγος ως προς το χρόνο της Μέσης Κίνησης διαιρεμένη δια 2 (σε περιστροφές ανά ημέρα).
45 με 52	Δεύτερη παράγωγος ως προς το χρόνο της Μέσης Κίνησης διαιρεμένη δια 6 (σε περιστροφές ανά ημέρα ³). Οι δύο τελευταίοι όροι δίνουν μία εικόνα για την μεταβολή της μέσης κίνησης με το χρόνο, στοιχείο παρόλα αυτά χρήσιμο μόνο για παλαιότερου

	τύπου και πιο απλοϊκούς προσομοιωτές όπως ο SGP που δεν χρησιμοποιείται από τους προσομοιωτές SGP4 και SDP4. ¹⁷
54 με 61	<i>B-star (B*) drag term</i> : πρόκειται για μία σταθερά που αφορά στην ατμοσφαιρική αντίσταση και χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς του SGP4. Σύμφωνα με την αεροδυναμική θεωρία κάθε αντικείμενο έχει έναν βαλλιστικό- βλητικό (<i>ballistic coefficient</i>) συντελεστή B, που προκύπτει από το γινόμενο της σταθεράς αντίστασης CD επί τη διατομή του αντικειμένου A, διαιρεμένο από τη μάζα του m : $B = C_D A / m$. Ο βλητικός συντελεστής B αντικατοπτρίζει το πόσο ευαίσθητο είναι ένα αντικείμενο στην αντίσταση. Ο όρος B* είναι μία προσαρμοσμένη τιμή του B στην περίπτωση που αναφερόμαστε στην ατμόσφαιρα με πυκνότητα αναφοράς ρ_0 όπου $B^* = C_D \rho_0 / 2$. Οι μονάδες του είναι (ακτίνα της γης) ⁻¹ .**
63	Τύπος Εφημερίδας που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία των δεδομένων. Πρόκειται για στοιχείο εσωτερικής ανάλυσης που έχει να κάνει με τον προσομοιωτή που χρησιμοποιείται. Για όλα τα συνήθη δεδομένα χρησιμοποιείται ο προσομοιωτής SGP4/SDP4 και η τιμή του όρου είναι ίση με 0.
65 με 68	Αριθμός του σετ των στοιχείων (<i>Element Set number</i>): θεωρητικά ο αριθμός θα έπρεπε να βαίνει αυξανόμενος με κάθε νέο σετ που δημιουργείται, στην πράξη όμως υπάρχουν περιπτώσεις όπου επαναχρησιμοποιούνται αριθμοί παλαιότερων στοιχείων ή προσπερνιούνται άλλοι με αποτέλεσμα να μην μπορεί κανείς να κρίνει αν έχει όλα τα παραχθέντα TLE για κάποιο χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος.
69	Checksum (Modulo 10): Είναι ένας απλός τρόπος ελέγχου για τυχόν λάθη στο TLE κατά τον οποίο προστίθενται όλα τα στοιχεία της πρώτης γραμμής, αγνοώντας τα γράμματα, τα συν και τα κενά και προσθέτοντας 1 για κάθε πλην που υπάρχει στη γραμμή. Το checksum είναι το τελευταίο ψηφίο του αθροίσματος. (ουσιαστικά είναι το αποτέλεσμα της πράξης $\text{sum mod } 10$, όπου mod ο γνωστός τελεστής που δίνει το υπόλοιπο της διαίρεσης του αθροίσματος με το 10, δηλαδή ουσιαστικά το τελευταίο ψηφίο). Αυτός ο απλός έλεγχος μπορεί να ανιχνεύσει το 90% των συνολικών σφαλμάτων που μπορεί να υπάρχουν στο αρχείο.
Γραμμή 2	
Στήλες:	Περιγραφή
1	Αριθμός Γραμμής του TLE (2)
3 με 7	Αριθμός Δορυφόρου
9 με 16	Κλίση (σε μοίρες)
18 με 25	Ορθή Αναφορά του Ανιόντος δεσμού (σε μοίρες)
27 με 33	Εκκεντρότητα (Decimal Point Assumed)

¹⁷ Η δεύτερη παράγωγος της μέσης κίνησης ως προς το χρόνο καθώς και ο όρος B* γράφονται σε μία ιδιόμορφη εκθετική μορφή που χρησιμοποιείται στην FORTRAN. Για παράδειγμα ο αριθμός -0.12345*10-6 γράφεται -12345-6.

35 με 42	Μέτρο του περιγείου (σε μοίρες)
44 με 51	Μέση ανωμαλία (σε μοίρες)
53 με 63	Μέση κίνηση (περιστροφές ανά ημέρα)
64 με 68	Αριθμός περιστροφής την εποχή αναφοράς. Καθώς υπάρχουν αρκετές συμβάσεις σχετικές με τον προσδιορισμό του αύξοντα αριθμού των περιστροφής και αυτό το πεδίο απαιτεί διευκρινήσεις. Κατά τη σύμβαση του NORAD, μία περιστροφή ξεκινά όταν ο δορυφόρος βρίσκεται στον ανιόντα δεσμό της τροχιάς του και ορίζεται ως η περίοδος μεταξύ διαδοχικών ανιόντων δεσμών. Η περίοδος από την εκτόξευση μέχρι τον πρώτο ανιόντα δεσμό θεωρείται ως η περίοδος 0 (Rev 0) και η περίοδος 1 ξεκινά όταν ο δορυφόρος φτάσει στον πρώτο ανιόντα δεσμό. Καθώς πολλά σετ στοιχείων παράγονται σε εποχές κατά τις οποίες ο δορυφόρος βρίσκεται κοντά στον ανιόντα δεσμό του είναι σημαντικό να προσδιοριστεί αν ο δορυφόρος έχει φτάσει τον ανιόντα δεσμό κατά τον υπολογισμό του αύξοντα αριθμού περιστροφής.
69	Checksum modulo 10 των στοιχείων της δεύτερης γραμμής.

4.4.3 GPS propagator

Ο προσομοιωτής GPS propagator επιτρέπει στο χρήστη του STK την δημιουργία τροχιών για τους δορυφόρους GPS χρησιμοποιώντας τα στοιχεία (*element sets*) που περιέχονται στα almanacs του GPS. Για τον λόγο αυτό, ολόκληρος ο σχεδιασμός του προσομοιωτή έχει καθοριστεί από το εγχειρίδιο προδιαγραφών ICD-GPS-200.

Η ακτοφυλακή των ΗΠΑ (*US Coast Guard*) καθιστά διαθέσιμα almanacs του GPS σε μορφή (format) SEM σε συνεχή βάση (επί του παρόντος ένα την ημέρα). Η AGI παρέχει αυτά τα αρχεία στους χρήστες του STK μέσω του AGI Online Server (GPS Propagator: Ενότητα 3.4.1).

Κάθε GPS almanac περιέχει τα τροχιακά στοιχεία του ενεργού σχηματισμού GPS για κάποια καθορισμένη ημερομηνία. Οι ημερομηνίες και τα τροχιακά στοιχεία του almanac χρησιμοποιούνται από τον προσομοιωτή για την δημιουργία των τροχιακών εφημερίδων του δορυφόρου. Καθοριστικό ρόλο στην ακρίβεια του τελικού προϊόντος παίζει η χρήση του σωστού almanac όσον αφορά την χρονική περίοδο ενδιαφέροντος. Όπως προκύπτει και από την εφαρμογή η ακρίβεια πρόβλεψης της τροχιάς εξαρτάται άμεσα από το χρονικό διάστημα που διαφέρει η πρόβλεψη σε σχέση με την χρονική στιγμή αναφοράς του almanac.

4.4.4 Αρχεία εισόδου SEM

Τα SEM almanacs αρχεία περιέχουν τις παρακάτω πληροφορίες:

- Τον αριθμό των δορυφόρων για τους οποίους υπάρχει πληροφορία στο συγκεκριμένο αρχείο (*Number of Records*).
- Μία μικρή περιγραφή του αρχείου (*Title*).
- Την εβδομάδα αναφοράς για όλα τα almanacs που περιέχονται στο αρχείο (*GPS Week Number*).
- Τον χρόνο αναφοράς (TOA) για κάθε almanac που περιλαμβάνεται στο αρχείο AL3 (*GPS time of Applicability*).
- Τον αριθμό PRN του δορυφόρου. Είναι ο βασικός τρόπος αναγνώρισης ενός δορυφόρου GPS. Είναι αντίστοιχος του αριθμού SVID (*Space Vehicle Identification*) του δορυφόρου.
- Αριθμός SVN (*Satellite Vehicle Number*)
- Μέσος δείκτης URA (*User Range Accuracy*). Πρόκειται για ένα στατιστικό δείκτη της ακρίβειας που μπορεί να επιτευχθεί στη μέτρηση αποστάσεων από ένα διαστημικό σκάφος. Ο δείκτης URA είναι μία εκτίμηση 1σ του σφάλματος της απόστασης στα δεδομένα πλοήγησης που εκπέμπει ο κάθε δορυφόρος και αφορά μόνο τα σφάλματα που οφείλονται στο δορυφορικό τμήμα και το τμήμα ελέγχου και όχι στα σφάλματα μετάδοσης καθώς και τα σφάλματα του δέκτη.
- Εκκεντρότητα (*Eccentricity*): Η εκκεντρότητα της τροχιάς του κάθε δορυφόρου που περιλαμβάνεται στο αρχείο.
- *Inclination Offset*: Η σχετική κλίση του τροχιακού επιπέδου του δορυφόρου σε ημικύκλια ως προς μία κλίση αναφοράς 0.30 semicircles όπως ορίζεται στο ICD-GPS-200. Στην συγκεκριμένη αναφορά αναφέρεται ως διόρθωση της κλίσης (*correction of the inclination*) δι.
- *Rate of Right Ascension*: Ο ρυθμός μεταβολής της ορθής αναφοράς (πρώτη παράγωγος της ορθής αναφοράς με το χρόνο) σε ημικύκλια ανά δευτερόλεπτο.
- Τετραγωνική ρίζα του μεγάλου ημιάξονα σε $m^{1/2}$.
- *Longitude of the orbital plane*: Πρόκειται για το γεωγραφικό μήκος του ανιόντος δεσμού του τροχιακού επιπέδου (Ω_0) σε ημικύκλια που αναφέρεται στην εποχή της τρέχουσας εβδομάδας. Στην αναφορά ICD-GPS-200 αναφέρεται ως "Longitude of Ascending Node of Orbit Plane at weekly Epoch".
- *Argument of perigee*: Το μέτρο του περιγείου (ω) σε ημικύκλια.
- *Mean Anomaly*: Μέση ανωμαλία στο χρόνο αναφοράς εκφρασμένη σε ημικύκλια.
- Διόρθωση Χρονομέτρου Μηδενικής τάξης σε δευτερόλεπτα (af0).
- Διόρθωση Χρονομέτρου πρώτης τάξης (af1 καθαρός αριθμός).
- Η κατάσταση της "υγείας" του δορυφόρου (*satellite health*).
- *Satellite Configuration*: Πληροφορία που αφορά κυρίως την κατάσταση A-S (*Anti-Spoofing*) του δορυφόρου.

Υπάρχουν αντίστοιχα αρχεία, τα αρχεία YUMA almanacs (Celestrack, 2007) περιέχουν την αντίστοιχη με τα SEM almanacs πληροφορία με ελαφρώς διαφοροποιημένη μορφή.

4.4.5 Εφημερίδες της IGS- Εφημερίδες ακριβείας της IGS

Οι τροχιές της IGS μπορούν να διακριθούν στις εξής παρακάτω:

- τροχιές IGS σε πραγματικό χρόνο (*ultra rapid predicted-half orbits*) με ακρίβεια περίπου 5 cm
- πολύ γρήγορες τροχιές IGS, μετά από 3 ώρες (*ultra rapid observed-half orbits*) με περίπου 3 cm ακρίβεια
- γρήγορες τροχιές IGS, μετά από 17 ώρες (*rapid orbits*) με ακρίβεια καλύτερη από 2.5 cm
- τελικές τροχιές IGS, μετά από 13 ημέρες (*IGS final orbits*) με ακρίβεια καλύτερη των 2.5 cm

Οι τελικές εφημερίδες δίνονται σε format SP3 ως (X,Y,Z) συντεταγμένες για κάθε δορυφόρο ανά 15 λεπτά, από όπου με μεθόδους παρεμβολής προκύπτουν οι συντεταγμένες για τις χρονικές εποχές που ενδιαφέρουν. Χαρακτηρίζονται από την υψηλότερη ακρίβεια σε σύγκριση με όλες τις άλλες τροχιές της IGS. Είναι διαθέσιμες σε εβδομαδιαία βάση, κάθε Πέμπτη με μία καθυστέρηση 12 έως 18 ημερών από το τέλος της ημέρας που έχουμε μετρήσει και για την οποία οι τροχιές μας ενδιαφέρουν. Οι τελικές εφημερίδες ακριβείας ορίζουν στην πράξη τα συστήματα ITRF.

Η βασική μορφή του αρχείου SP3 περιλαμβάνει τις συντεταγμένες P (X,Y,Z) του κάθε δορυφόρου στην εποχή αναφοράς και την αντίστοιχη χρονική διόρθωση του χρονομέτρου του δορυφόρου ως προς το χρόνο GPS. Επίσης περιλαμβάνεται η πληροφορία που αφορά την ταχύτητα V του κάθε δορυφόρου για κάθε συνιστώσα καθώς και ο ρυθμός μεταβολής του σφάλματος του χρονομέτρου.

Η ακρίβεια η οποία διακρίνει τις εφημερίδες των τελικών τροχιών της IGS (<5cm) σε σχέση με την τάξη μεγέθους των διαφορών που θα εξετάσουμε παρακάτω (της τάξης των μερικών χιλιομέτρων) κρίνεται υπεραρκετή ώστε να θεωρήσουμε τα δεδομένα των εφημερίδων ως αληθή και να τα χρησιμοποιήσουμε ως μέτρο σύγκρισης με τις εφημερίδες που προέκυψαν από τους propagators.¹⁸

4.4.6 Εισαγωγή των τροχιακών στοιχείων στο STK- Προσομοίωση Τροχιών

Αρχικά έγινε τυχαία επιλογή του δορυφόρου με PRN 18 του δορυφορικού σχηματισμού GPS και με NORAD Catalog Number: 26690 για την προσομοίωση της τροχιάς του. Ως χρόνος εκκίνησης του σεναρίου ορίστηκε η 26 Αυγούστου 2012 και ώρα 00:00:00 UTCG και ως πέρας του η 8η Σεπτεμβρίου 2012 και ώρα 23:30:00 UTCG.

Στη συνέχεια εισήχθη ο δορυφόρος με PRN18 με χρήση του SGP4 propagator, ενώ το αρχείο TLE που χρησιμοποιήθηκε ανακτήθηκε από τον server της AGI. Ακολούθησε η εισαγωγή του ίδιου δορυφόρου με χρήση του GPS propagator του STK, ενώ και πάλι η ανάκτηση του αρχείου έγινε από τον κατάλογο

¹⁸ Πέρα των εφημερίδων ακριβείας της IGS, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν οι εφημερίδες ακριβείας της υπηρεσίας NGA με αντίστοιχα αποτελέσματα. Οι διαφορές στις τελικές συντεταγμένες μεταξύ των 2 εφημερίδων για τις ημέρες διεξαγωγής του πειράματος κυμαίνονται από 12.3 μέχρι 15.8cm (Πηγή: NGA orbit comparison page <http://earth-info.nga.mil/GandG/sathtml/ngaigscompare.html>), διαφορές ανεπαίσθητες σε σχέση με την τάξη μεγέθους των διαφορών που παρατηρούνται παρακάτω.

του server της AGI. Και στις δύο περιπτώσεις ως χρόνος διάδοσης της τροχιάς ορίστηκε η χρονική περίοδος του σεναρίου.

Από τη σελίδα της IGS έγινε λήψη των εφημερίδων ακριβείας για τις δύο εβδομάδες GPS, 1703 και 1704, σε ημερήσια βάση. Στη συνέχεια τα 14 αρχεία εφημερίδων που ανακτήθηκαν εισήχθησαν στο STK με χρήση του GPS propagator σαν ανεξάρτητοι δορυφόροι.

Η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών τροχιών του δορυφόρου που προέκυψαν από τους δύο προσομοιωτές (στο STK έχουν εισαχθεί σαν διαφορετικοί δορυφόροι) έγινε σε δύο διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων. Στην πρώτη περίπτωση οι θέσεις του δορυφόρου στις εφημερίδες που δημιουργήθηκαν αναφέρονται στο ουρανογραφικό πλαίσιο αναφοράς ICRF και στην δεύτερη στο σύστημα συντεταγμένων RIC (στο οποίο γίνεται αναφορά στο Παράρτημα Α).

4.4.7 Δημιουργία Εφημερίδων σε STK format με τις συντεταγμένες τους στο ICRF

Στην πρώτη περίπτωση για την εξαγωγή των εφημερίδων ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: στο STK, στην επιλογή του βασικού μενού Utilities επιλέγουμε Export → Ephemeris/ Attitude. Στο μενού που εμφανίζεται επιλέγουμε τον δορυφόρο, ως τύπο αρχείου εξόδου του STK την εφημερίδα με τον μορφότυπο του STK και ως πλαίσιο αναφοράς των συντεταγμένων το ICRF με κέντρο του συστήματος αναφοράς το κέντρο της γης (Central Body → Earth). Ορίζουμε το χρονικό βήμα στα 1800 sec και απενεργοποιούμε την επιλογή 'include interpolation boundaries' ώστε να έχουμε κοινό χρονικό βήμα σε όλα τα αρχεία, το οποίο θα βοηθήσει στην ευκολότερη μετέπειτα επεξεργασία τους. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου δημιουργήσουμε ένα αρχείο εξόδου και για τα 16 αρχεία του δορυφόρου.

4.4.8 Δημιουργία Εφημερίδων του δορυφόρου στο R.I.C. (Radial, In-track, Cross-track) σύστημα συντεταγμένων

Η διαφορά των συντεταγμένων των διαφορετικών προβλεπόμενων τροχιών του δορυφόρου με την θεωρητικά πραγματική θέση του, εκφρασμένη στο ICRF, και κυρίως η διαφορά ανάμεσα στα διανύσματα θέσης του δορυφόρου, μπορεί να μας δώσει μία ποσοτική πληροφορία σε σχέση με την ακρίβεια στην πρόβλεψη της τροχιάς για κάθε χρονική στιγμή. Παρόλα αυτά ο προσανατολισμός των αξόνων του συστήματος δεν μας δίνει την απαραίτητη πληροφορία που αφορά στον τρόπο κατά τον οποίο η προβλεπόμενη τροχιά αποκλίνει από την πραγματική. Μία πολύ καλύτερη προσέγγιση επί του θέματος μπορεί να γίνει αν χρησιμοποιήσουμε το σύστημα συντεταγμένων R.I.C. Έτσι θα γνωρίζουμε το μέγεθος απόκλισης της πρόβλεψης κατά μήκος της τροχιάς, κάθετα σε αυτή αλλά και σε σχέση με την ακτίνα της από το κέντρο της Γης.

Το STK μας δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε αυτό το σύστημα συντεταγμένων. Από την επιλογή Analysis του κεντρικού μενού επιλέγουμε τον report and graph manager. Ως object type ορίζουμε τον δορυφόρο και επιλέγουμε τον δορυφόρο, του οποίου ζητάμε τις συντεταγμένες. Στη

συνέχεια επιλέγουμε την αναφορά RIC. Πριν την υλοποίηση της αναφοράς μας ζητείται από το πρόγραμμα να ορίσουμε τον δορυφόρο ως προς τον οποίο θα υπολογιστούν οι συντεταγμένες του αρχικά επιλεγμένου δορυφόρου. Ως δορυφόρο αναφοράς ορίζουμε κάθε φορά έναν από τους 14 που δημιουργήθηκαν κατά την εισαγωγή των τροχιών ακριβείας στο STK, έναν για κάθε ημέρα, και επαναλαμβάνουμε την διαδικασία 14 φορές για τον δορυφόρο που προέκυψε από τον SGP4 propagator και άλλες τόσες για τον δορυφόρο που προέκυψε από τον GPS propagator και τις εφημερίδες πρόβλεψης, έτσι ώστε τελικά να έχουν δημιουργηθεί 28 αρχεία.

4.4.9 Επεξεργασία

4.4.9.1 Στην περίπτωση εξαγωγής των συντεταγμένων της εφημερίδας στο σύστημα ICRF

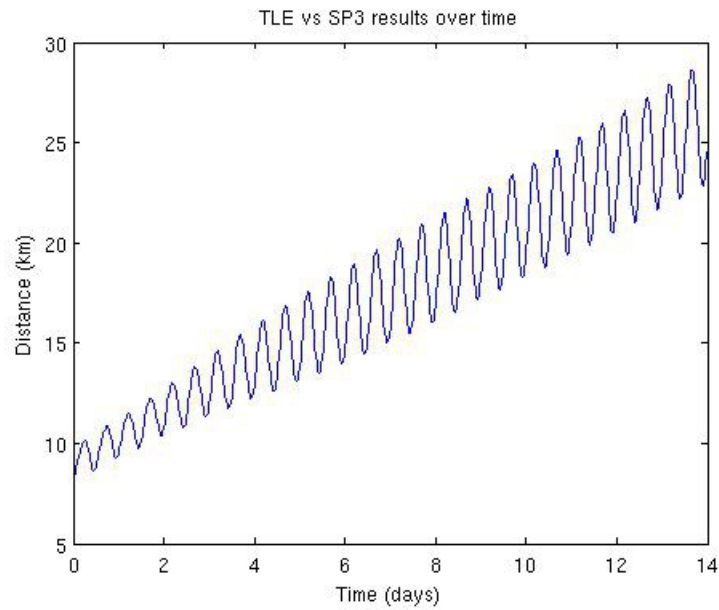
Με χρήση του μαθηματικού πακέτου MATLAB εισάγουμε όλα τα δημιουργηθέντα αρχεία και δημιουργούμε ένα κοινό αρχείο από τις 14 εφημερίδες ακριβείας. Υπολογίζουμε την διαφορά μεταξύ των διανυσμάτων θέσης της εφημερίδας που προέκυψε από τον SGP4 propagator και της εφημερίδας ακριβείας που δημιουργήσαμε για κάθε χρονική στιγμή από τον γνωστό τύπο:

$$\Delta \vec{r} = \sqrt{(X_{tle} - X_{sp3})^2 + (Y_{tle} - Y_{sp3})^2 + (Z_{tle} - Z_{sp3})^2} \quad (34)$$

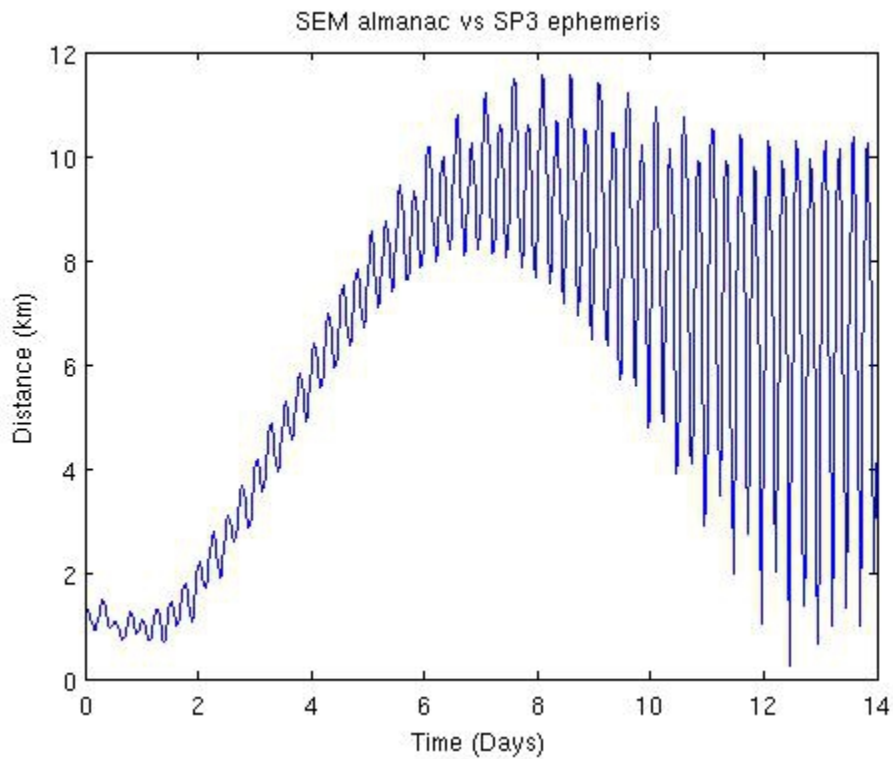
Έτσι τελικά προκύπτει ένας πίνακας 672x2 (όσος και ο αριθμός των μετρήσεων), ο οποίος έχει στην πρώτη στήλη την χρονική στιγμή σε δευτερόλεπτα από την εκκίνηση της εφημερίδας και στην δεύτερη την διαφορά μεταξύ των διανυσμάτων θέσης των δύο εφημερίδων τη δεδομένη χρονική στιγμή.

Με αντίστοιχο τρόπο δημιουργείται και ο πίνακας που αφορά στην διαφορά του μέτρου των διανυσμάτων θέσης μεταξύ της εφημερίδας που προέκυψε από τον GPS propagator και από την εφημερίδα ακριβείας της IGS.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα των σχημάτων (59) και (60) που απεικονίζουν την μεταβολή της απόστασης μεταξύ των δύο δορυφόρων με τον χρόνο, γίνεται σαφές ότι πέρα από τις περιοδικές μεταβολές της τιμής του διανύσματος που οφείλονται στην μη πλήρη περιγραφή του γήινου δυναμικού από τους αναπαραγωγείς τροχιάς, η απόσταση μεταξύ της θέσης που προέκυψε με χρήση του SGP4 propagator και της αντίστοιχης "αληθούς" θέσης που προέκυψε από την εφημερίδα ακριβείας της IGS φαίνεται να μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με τον χρόνο. Αντίθετα στην περίπτωση της αναπαραγωγής τροχιάς με χρήση almanacs παρατηρείται μία ραγδαία μείωση της ακρίβειας μετά τις πρώτες δύο μέρες από την εποχή αναφοράς των αρχείων, και η απόσταση μεταξύ της προβλεπόμενης και της ακριβούς τροχιάς μεταβάλλεται με έναν πιο σύνθετο τρόπο απ' ό,τι στην περίπτωση του SGP4 propagator.



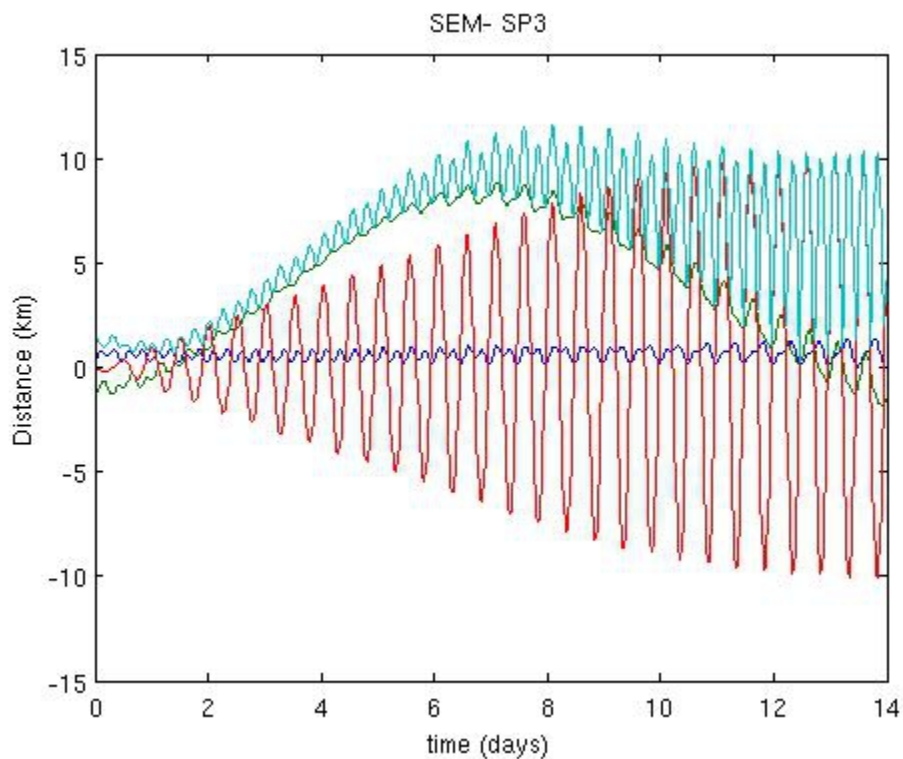
Σχήμα 59: Μεταβολή του μέτρου του διανύσματος της διαφοράς ανάμεσα στη θέση του δορυφόρου GPS με PRN18, όπως προέκυψε από τον SGP4 propagator και από την εφημερίδα ακριβείας της IGS, με το χρόνο.



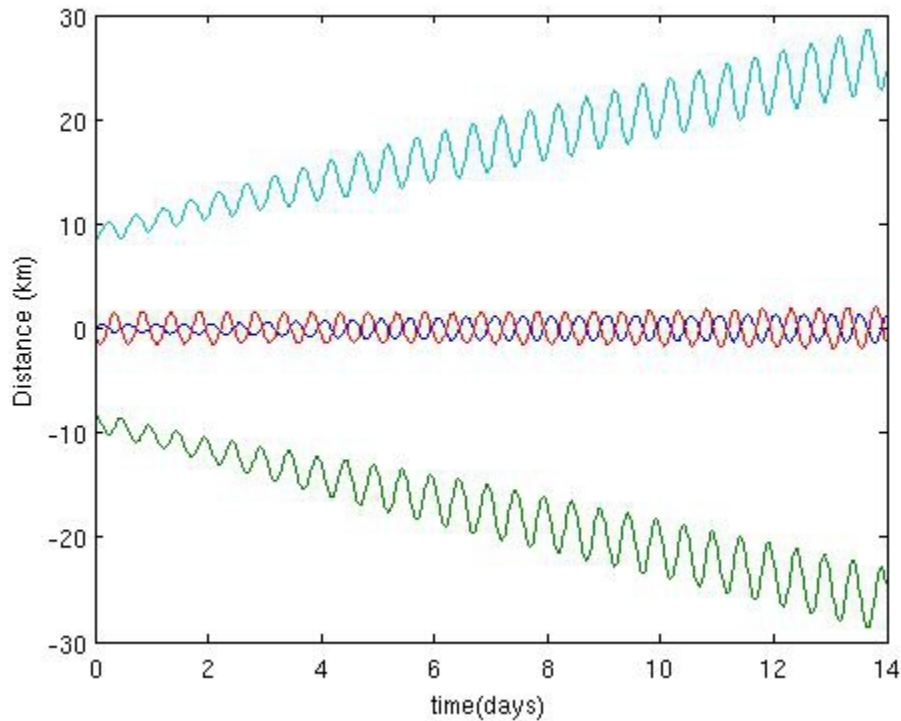
Σχήμα 60: Μεταβολή του μέτρου του διανύσματος της διαφοράς ανάμεσα στη θέση του δορυφόρου GPS με PRN18, όπως προέκυψε από τον GPS propagator με χρήση almanac και από την εφημερίδα ακριβείας της IGS, με το χρόνο.

4.4.9.2 Στην περίπτωση εξαγωγής των συντεταγμένων της εφημερίδας στο σύστημα RIC

Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται μόνο η συνένωση των ημερήσιων αρχείων για την δημιουργία του τελικού πίνακα της εφημερίδας ο οποίος αναφέρεται στη συνολική περίοδο μελέτης. Τα γραφήματα που προέκυψαν παρατίθενται παρακάτω:



Σχήμα 61: Μεταβολή των συντεταγμένων: Radial (μπλε), In-Track (πράσινο) και Cross-Track (κόκκινο) μεταξύ της θέσης του δορυφόρου με PRN 18, όπως προέκυψαν με εισαγωγή του δορυφόρου με χρήση του GPS propagator και με εισαγωγή του με χρήση της IGS εφημερίδας ακριβείας, με το χρόνο. Επίσης παρουσιάζεται η μεταβολή του σχετικού διανύσματος θέσης μεταξύ των ταυτόχρονων συντεταγμένων των “δύο δορυφόρων”.



Σχήμα 62: Μεταβολή των συντεταγμένων: Radial (μπλε), In-Track (πράσινο) και Cross-Track (κόκκινο) μεταξύ της θέσης του δορυφόρου με PRN 18, όπως προέκυψαν με εισαγωγή του δορυφόρου με χρήση του SGP4 propagator και με εισαγωγή του με χρήση της IGS εφημερίδας ακριβείας, με το χρόνο. Επίσης παρουσιάζεται η μεταβολή του σχετικού διανύσματος θέσης μεταξύ των ταυτόχρονων συντεταγμένων των "δύο" (-ουσιαστικά πρόκειται για τον ίδιο) δορυφόρων (γαλάζιο).

4.4.10 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατηρούμε ότι:

- Σε αμφότερους τους δύο propagators παρατηρούνται περιοδικές ταλαντώσεις στις διαφορές που προέκυψαν, οι οποίες είναι αποτέλεσμα της αναντιστοιχίας μεταξύ των απλοποιημένων μοντέλων αναπαραγωγής τροχιών που χρησιμοποιούνται στα almanacs και τα TLE σε σύγκριση με την επίδραση του πλήρους γεωδυναμικού μοντέλου που ενυπάρχει στις ακριβείς εφημερίδες. Σε αντίστοιχο συμπέρασμα καταλήγει και ο Kelso (2007).
- Όσον αφορά τον GPS Propagator το σφάλμα κατά μήκος της τροχιάς (In-Track Error) είναι το κυρίαρχο σφάλμα με την μεγαλύτερη μεταβολή (και εξάρτηση) από το χρόνο. Ακολουθεί το κάθετο στη διεύθυνση της τροχιάς σφάλμα (Cross-Track Error) στο οποίο παρατηρείται μία αύξηση του μέγιστου της ταλάντωσης όσο απομακρυνόμαστε χρονικά από την εποχή αναφοράς του αρχείου. Το ακτινικό σφάλμα (Radial Error) είναι το μικρότερο σε τιμή, ενώ οι περιοδικές αποκλίσεις της τιμής του είναι πάντα πολύ κοντά στην τιμή που προέκυψε από την εφημερίδα

ακριβείας (<1km).

- Όσον αφορά τον SGP4 propagator το σφάλμα εγκάρσια της τροχιάς είναι και πάλι το κυρίαρχο και βαίνει αυξανόμενο καθώς απομακρυνόμαστε χρονικά από την εποχή αναφοράς του TLE. Το εγκάρσιο στην τροχιά καθώς και το ακτινικό σφάλμα έχουν σαφώς μικρότερες τιμές από το κατά μήκος και δείχνουν να μην επηρεάζονται από την χρονική απομάκρυνση από την εποχή αναφοράς του TLE.
- Τα αποτελέσματα που προκύπτουν με τη χρήση almanacs εμφανίζουν μικρότερες διαφορές από την πραγματική θέση του δορυφόρου σε κοντινό χρονικό διάστημα με την εποχή αναφοράς (μίας-δύο ημερών), όσο όμως απομακρυνόμαστε από την εποχή αναφοράς το σφάλμα στην πρόβλεψη αυξάνεται απότομα και χωρίς να φαίνεται να ακολουθεί κάποιο μοτίβο. Αντίθετα με χρήση του SGP4 τα αποτελέσματα είναι χειρότερα απ' ό,τι με την χρήση του GPS propagator για την πρώτη μία- μιάμιση ημέρα από την εποχή αναφοράς, αλλά στη συνέχεια φαίνεται να αυξάνονται γραμμικά (με σταθερό ρυθμό) σε σχέση με το πέρασμα του χρόνου, επομένως έχουν πιο προβλέψιμη συμπεριφορά σε σχέση με αυτά που προέκυψαν με χρήση των almanacs αρχείων.¹⁹

4.5 Εφαρμογή 4^η: Εισαγωγή και επεξεργασία δορυφορικών αποστολών Formation Flying γεωδαιτικού ενδιαφέροντος στο STK

Στην παρούσα εφαρμογή πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή, οπτικοποίηση και βασική ανάλυση δορυφορικών αποστολών ιδιαίτερου γεωδαιτικού ενδιαφέροντος. Συγκεκριμένα αξιοποιώντας τις δυνατότητες του STK μελετήθηκαν βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού των αποστολών GRACE, TerraSAR-X και TANDEM-X, με κύριο ωστόσο στόχο την εξέταση ορισμένων ακόμη βασικών δυνατοτήτων του προγράμματος STK και όχι την σε βάθος μελέτη των συγκεκριμένων αποστολών

Παρακάτω, σε κάθε υποενότητα της εφαρμογής, που θα αφορά σε κάθε δορυφορική αποστολή ξεχωριστά, αρχικά γίνεται μία σύντομη αναφορά στον σκοπό, τον τρόπο λειτουργίας, τα κύρια χαρακτηριστικά και στα τελικά προϊόντα της κάθε δορυφορικής αποστολής και στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία εισαγωγής και ανάλυσης του σχηματισμού, τα αποτελέσματα της ανάλυσης καθώς και τα εκάστοτε συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση στο STK.

4.5.1 Δορυφορική Αποστολή GRACE

Το 2002, η NASA και η γερμανική υπηρεσία διαστήματος (*German Space Agency*) έθεσαν σε λειτουργία την αποστολή *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) αποτελούμενη από ένα ζεύγος πανομοιότυπων δορυφόρων με βασικό στόχο τη λεπτομερή χαρτογράφηση του γήινου πεδίου βαρύτητας και την καλύτερη κατανόηση των χωροχρονικών αλλαγών του. Η αποστολή όπως είχε

¹⁹ Ας σημειωθεί πως στην αντίστοιχη έρευνα που διενήργησε ο Kelso (Kelso 2007) προκύπτει ότι τα αποτελέσματα της αναπαραγωγής επιδεικνύουν αντίστοιχη συμπεριφορά και στην περίπτωση που η τροχιά του δορυφόρου προεκτείνεται χρονικά προς τα πίσω ως προς την εποχή αναφοράς του almanac ή του TLE. Όσον αφορά την τάξη μεγέθους της διαφοράς, μεταβάλλεται κατά αρκετά km ανάλογα με τον δορυφόρο που εξετάζεται.

σχεδιαστεί με τους δίδυμους δορυφόρους είχε τη δυνατότητα πραγματοποίησης μετρήσεων πολύ μεγαλύτερης ακρίβειας από αυτές που ήταν εφικτό με επίγειες μεθόδους ή με την χρήση ενός μόνο δορυφόρου με κατάλληλα όργανα μέτρησης της βαρύτητας.

Η κατασκευή ενός πιο ακριβούς χάρτη βαρύτητας της Γης έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της ακρίβειας πολλών τεχνικών που χρησιμοποιούνται για τη παρατήρηση της Γης ως σύστημα με τη χρήση διαστημικών οργάνων. Αυτές οι τεχνικές -όπως η δορυφορική αλτιμετρία, η συμβολομετρία ραντάρ και τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους που καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις γης ή πάγων- παρέχουν κρίσιμα δεδομένα σε πολλά επιστημονικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην ωκεανογραφία, την υδρολογία, την μελέτη μεταβολής της κατανομής των πάγων, την γεωλογία και άλλα σχετικά επιστημονικά πεδία.

Καθώς περιστρέφονται γύρω από τη γη 16 φορές την ημέρα, οι δορυφόροι της αποστολής επηρεάζονται από τις ελκτικές δυνάμεις που ασκούν σε αυτούς οι επιφανειακές μάζες της Γης που βρίσκονται από κάτω τους και καταγράφουν τις αντίστοιχες μικρές μεταβολές που αυτές προκαλούν στο γήινο βαρυτικό πεδίο. Οι μικρές διακυμάνσεις στο βαρυτικό πεδίο υπολογίζονται σε σχέση με την μετρούμενη με πολύ υψηλή ακρίβεια απόσταση μεταξύ των δύο δορυφόρων. Όταν το πεδίο βαρύτητας είναι ισχυρότερο στην περιοχή μπροστά (ή πίσω) από το ζεύγος των δορυφόρων, ο μπροστινός δορυφόρος επιταχύνει (ο ουραγός δορυφόρος επιβραδύνει), με αποτέλεσμα την αύξηση της απόστασης μεταξύ τους. Όταν η βαρύτητα είναι αυξημένη στην περιοχή ανάμεσα στο ζεύγος των δορυφόρων τότε η μεταξύ τους απόσταση μειώνεται. Βασισμένοι στις μετρήσεις της συνεχώς μεταβαλλόμενης απόστασης μεταξύ των δύο δορυφόρων και συνδυάζοντας τα δεδομένα που προκύπτουν με ακριβείς μετρήσεις προσδιορισμού της θέσης των δίδυμων δορυφόρων από τον σχηματισμό GPS οι επιστήμονες έχουν στη διάθεσή τους όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την σύνταξη λεπτομερέστατων χαρτών του γήινου πεδίου βαρύτητας.

Η αποστολή GRACE είναι η πρώτη αποστολή από μια σειρά ειδικών δορυφόρων παρακολούθησης της γης (*Earth monitoring Mission*), της οποίας οι βασικές μετρήσεις δεν προκύπτουν από ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς οι οποίοι ανακλώνται από την γήινη επιφάνεια, αλλά από ένα μικροκυματικό σύστημα (*microwave ranging system*) που μετρά με πολύ μεγάλη ακρίβεια αλλαγές στην ταχύτητα και την απόσταση μεταξύ των δύο πανομοιότυπων δορυφόρων που βρίσκονται σε πολική τροχιά και σε απόσταση περίπου 220 km μεταξύ τους, 500 km πάνω από την γήινη επιφάνεια. Το σύστημα μέτρησης είναι τόσο ακριβές που μπορεί να εντοπίσει μεταβολές της τάξης των 10 microns (περίπου το 1/10 του πλάτους μίας ανθρώπινης τρίχας!) σε απόσταση 220km.

Ένα επιπλέον όργανο πάνω στους δορυφόρους που ονομάζεται *atmospheric limb sounder* μετρά το ποσοστό κατά το οποίο τα σήματα των δορυφόρων GPS στρεβλώνονται λόγω της γήινης ατμόσφαιρας. Συμβάλλοντας έτσι στην μελέτη της σύνθεσης της ατμόσφαιρας και στη βελτίωση της ακρίβειας των ατμοσφαιρικών μοντέλων, που χρησιμεύουν κυρίως στην πρόβλεψη του καιρού.

4.5.1.1 Στοιχεία της Αποστολής

Εκτόξευση:	17 Μαΐου 2002
Αρχικά Προβλεπόμενη Διάρκεια Αποστολής:	5 χρόνια, (ήδη την έχει ξεπεράσει κατά 6 περίπου χρόνια)
Υψόμετρο Τροχιάς:	500km
Κλίση Τροχιάς (γωνία με Ισημερινό επίπεδο):	89 μοίρες (σχεδόν πολική τροχιά)
Απόσταση μεταξύ δίδυμων δορυφόρων:	220 km +/- 50 km

4.5.1.2 Μέτρηση των μεταβολών του γήινου Πεδίου Βαρύτητας

Οι μεταβολές του γήινου βαρυτικού πεδίου μπορούν να διαχωριστούν θεωρητικά σε δύο κατηγορίες

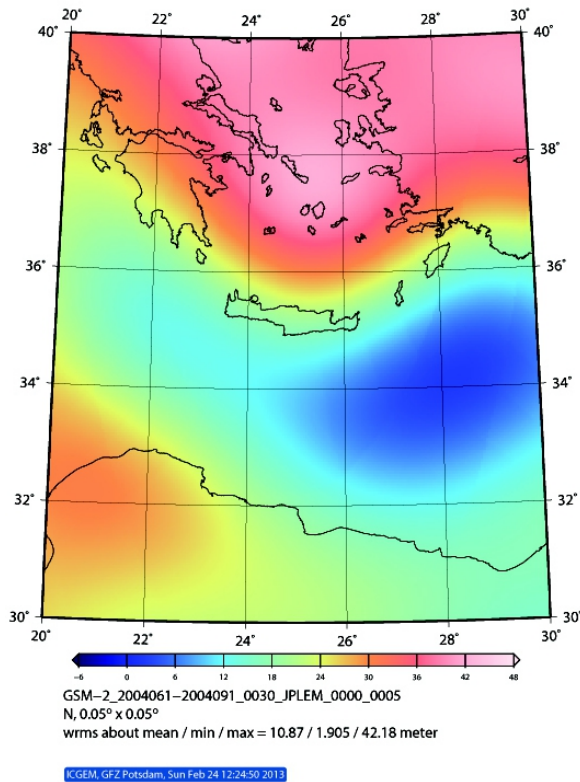
- Σε ένα μέσο βαρυτικό πεδίο (*long term average gravity field*) που οφείλεται στις κατανομές των στερεών μαζών στη λιθόσφαιρα και στο φλοιό της Γης και το οποίο παραμένει σχεδόν αμετάβλητο για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα (ή αλλιώς μεταβάλλεται με πολύ αργούς ρυθμούς).
- Σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο βαρυτικό πεδίο (*time variable gravity field*) που οφείλεται σε μεταβολές μαζών σε πολύ μικρότερη χρονική κλίμακα και κυρίως στις υδάτινες μάζες καθώς το νερό ανακυκλώνεται μεταξύ τις ατμόσφαιρας, των ωκεανών των ηπείρων των παγετώνων και των πάγων (*glaciers- ice caps*).

Η μελέτη του μέσου βαρυτικού πεδίου είναι χρήσιμη για την κατανόηση της δομής της στέρεας Γης καθώς και την αποκάλυψη άγνωστων μέχρι σήμερα πτυχών της ωκεάνιας κυκλοφορίας. Η μελέτη του χρονικά μεταβαλλόμενου πεδίου βαρύτητας από την άλλη συμβάλει στην μελέτη των μεταβολών της αποθήκευσης υδατικών μαζών στις ηπείρους, την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, τα βαθιά ωκεάνια ρεύματα, την πίεση στον πυθμένα των ωκεανών, καθώς και την ροή θερμότητας στους ωκεανούς, με ότι αυτά συνεπάγονται για τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

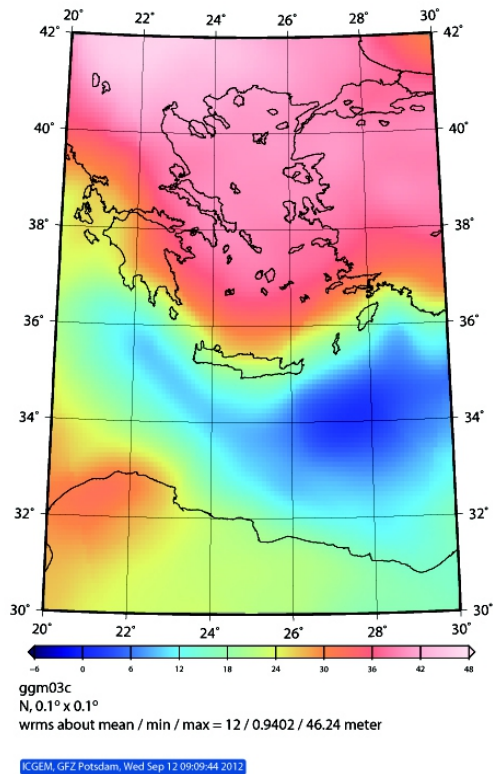
4.5.1.3 Προϊόντα της Αποστολής GRACE

Μετά την συλλογή των δεδομένων από τους σταθμούς εδάφους, τα δεδομένα περνούν από στάδια επεξεργασίας (Level 0, 1 και 2), ώστε μετά από την συνόρθωσή τους να κατασκευαστούν παγκόσμια μοντέλα βαρύτητας, τα οποία είτε μπορεί να αφορούν σε πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα συλλογής δεδομένων, είτε μπορεί να αναφέρονται σε μικρότερα χρονικά διαστήματα της τάξης του ενός μήνα και να στοχεύουν στην μελέτη των μεταβολών του πεδίου βαρύτητας με το χρόνο. Τέλος, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα δεδομένα αυτά για το βαρυτικό πεδίο μπορούν να

χρησιμεύσουν σε μελέτες πολλών εφαρμογών που αφορούν στην υδρολογία, την ωκεανογραφία, την μελέτη της κλιματικής αλλαγής και άλλες επιστήμες.



Σχήμα 63: Χάρτης που απεικονίζει την αποχή του γεωειδούς από το ελλειψοειδές του WGS84 σύμφωνα με το μοντέλο RL05, βαθμού 90, το οποίο προέκυψε από συνόρθωση των δεδομένων της αποστολής GRACE την περίοδο μεταξύ των ημερών 061 και 091 του 2004.



Σχήμα 64: Οπτικοποίηση του γεωειδούς όπως προκύπτει από το μοντέλο GGM03C, βαθμού 360, που έχει προκύψει από τη συνόρθωση τετραετών παρατηρήσεων (Ιανουάριος 2003 με Δεκέμβριος 2006) σε συνδυασμό με βαρυτικές παρατηρήσεις στο έδαφος

Στα σχήματα 63 και 64 απεικονίζεται η αποχή του γεωειδούς από το ελλειψοειδές του WGS84 για ένα μηνιαίο και σε ένα μέσο βαρυτικό πεδίο που προέκυψε από συνόρθωση τετραετών παρατηρήσεων αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 63 παρουσιάζεται ένας χάρτης που απεικονίζει την αποχή του γεωειδούς από το ελλειψοειδές του WGS84 σύμφωνα με το μοντέλο RL05, βαθμού 90, το οποίο προέκυψε από συνόρθωση των δεδομένων της αποστολής GRACE την περίοδο μεταξύ των ημερών 061 και 091 του 2004. Η επίλυση έγινε από το εργαστήριο JPL της NASA- τα μοντέλα RL05 κατασκευάστηκαν με αφορμή τη συμπλήρωση 10 χρόνων λειτουργίας της αποστολής GRACE). Η εικόνα δημιουργήθηκε στο website του International Centre for Global Earth Models (ICGEM). Στο σχήμα 64 παρουσιάζεται ένας χάρτης που απεικονίζει την αποχή του γεωειδούς όπως

προκύπτει από το μοντέλο GGM03C, βαθμού 360, που έχει προκύψει από τη συνόρθωση τετραετών παρατηρήσεων (Ιανουάριος 2003 με Δεκέμβριος 2006), σε συνδυασμό με βαρυτικές παρατηρήσεις στο έδαφος. Οι χάρτες δημιουργήθηκαν στο website του *International Centre for Global Earth Models* (ICGEM). Από απλή και μόνο παρατήρηση των δύο σχημάτων διαπιστώνεται ότι υπάρχουν μικρές διαφορές μεταξύ του μέσου και του βραχυπρόθεσμου γεωειδούς (πχ νοτιοδυτικά της Κρήτης).

4.5.1.4 Παρόν και Μέλλον της Αποστολής

Τον Μάρτιο του 2012 η αποστολή έκλεισε τα 10 χρόνια λειτουργίας της, ξεπερνώντας τον αρχικό στόχο που είχε τεθεί κατά 5 χρόνια. Όμως, από τον Δεκέμβριο του 2010 οι μπαταρίες της αποστολής δεν είναι σε θέση να διατηρήσουν μία πλήρη φόρτιση λόγω ηλικίας. Για την επέκταση του χρόνου ζωής των μπαταριών δεν συλλέγεται πληροφορία όταν οι δορυφόροι της αποστολής είναι επισκιασμένοι και δεν μπορούν να συλλέξουν ηλιακή ενέργεια. Όταν οι δορυφόροι βρίσκονται σε απευθείας επαφή με το φως του Ήλιου συλλέγουν κανονικά πληροφορία (PODAAC NASA JPL, n. d.).

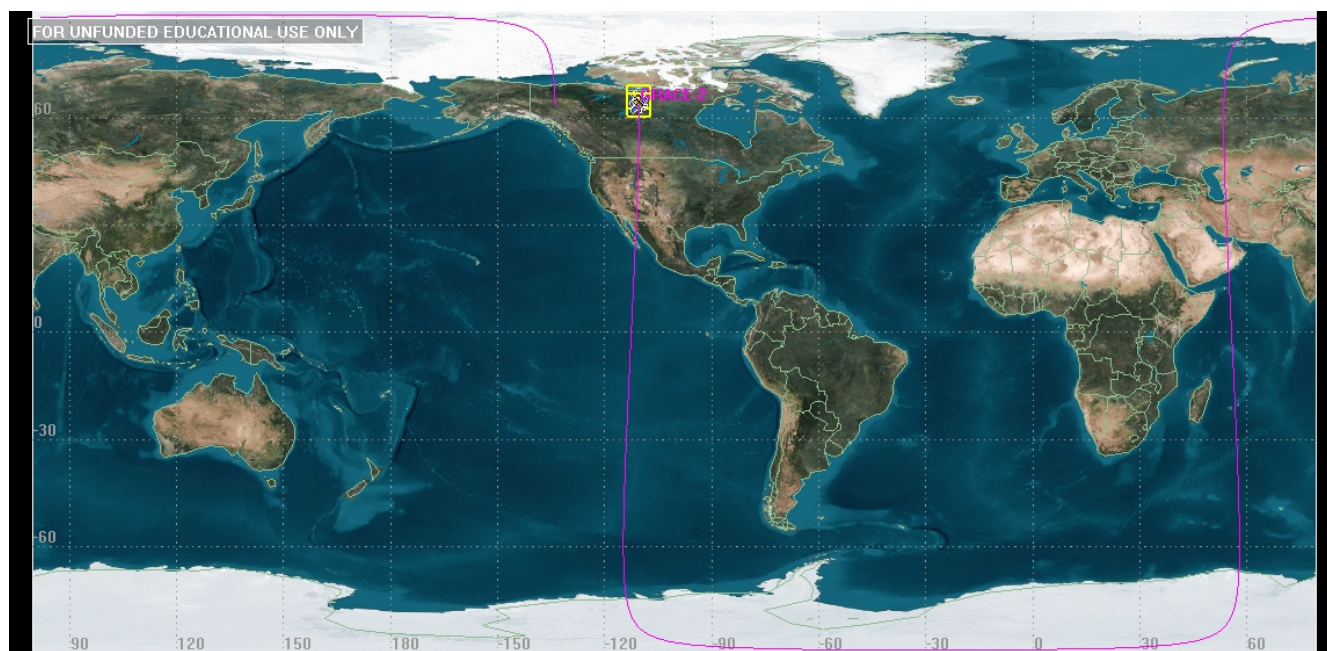
Επίσης ήδη προγραμματίζεται η αποστολή *GRACE Follow-On* (GRACE FO) με αναμενόμενη εκτόξευση μέχρι το 2017 για την συνέχιση της σύνταξης μηνιαίων παγκόσμιων μοντέλων του πεδίου βαρύτητας, η οποία προβλέπεται να έχει αντίστοιχα τεχνικά και τροχιακά χαρακτηριστικά με την αποστολή GRACE. Η μόνη βασική τεχνική διαφορά αφορά στο σύστημα μέτρησης της μεταβολής της απόστασης μεταξύ των δορυφόρων που προβλέπεται να είναι πλέον *Laser Ranging Interferometer*. Όσον αφορά τα βασικά τροχιακά στοιχεία προβλέπονται $a=490\pm 10\text{km}$, $i=89,5\pm 0,05\text{deg}$ και $e<0.0025$ (Fletcher et al, 2012).

4.5.1.5 Εφαρμογή στο STK

Στόχος της εφαρμογής είναι η διερεύνηση της επίδρασης που έχει στην συλλογή βαρυτιμετρικών δεδομένων η αδυναμία πλήρους φόρτισης των μπαταριών του κάθε δορυφόρου, λόγω του μεγάλου χρονικού διαστήματος που έχει παρέλθει από το 2002, όταν και τέθηκαν σε λειτουργία οι δορυφόροι της αποστολής. Για το λόγο αυτό, και προκειμένου να παραταθεί η “ζωή” της μπαταρίας (*battery life*), οι δορυφόροι της αποστολής δεν συγκεντρώνουν στοιχεία όταν οι ηλιακοί συλλέκτες τους δεν έχουν πρόσβαση στο ηλιακό φως (PODAAC NASA JPL, n. d.). Στην εφαρμογή, αφού γίνει μία μικρή εισαγωγή στα τροχιακά στοιχεία και η απαραίτητη οπτικοποίηση της τροχιάς των δορυφόρων της αποστολής, εξετάζεται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο οι δορυφόροι έχουν πρόσβαση στο ηλιακό φως και επομένως συλλέγουν κανονικά τα βαρυτιμετρικά δεδομένα. Στη συνέχεια, συγκρίνεται το χρονικό διάστημα λειτουργίας της αποστολής με το συνολικό χρόνο που έχει περάσει και που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα συλλογής δεδομένων από την αποστολή πριν το 2010.

Η περίοδος μελέτης που τέθηκε στο σενάριο για την μελέτη της αποστολής GRACE ξεκινά στις 17 Σεπτεμβρίου 2012 και ολοκληρώνεται στις 17 Οκτωβρίου 2012, με σκοπό να εξεταστεί η συμπεριφορά του σχηματισμού για το διάστημα ενός μήνα, διάστημα συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των βραχυπρόθεσμων μοντέλων του γήινου πεδίου βαρύτητας.

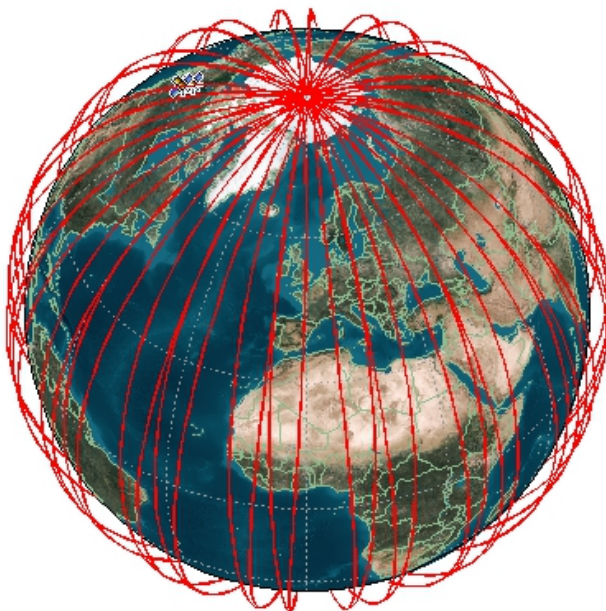
Η εισαγωγή των δύο δορυφόρων του σχηματισμού GRACE πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη δορυφορική βάση δεδομένων (satellite Data Base) της AGI. Η αναπαραγωγή της τροχιάς γίνεται με χρήση αρχείων TLE. Γενικά ως προεπιλογή στο πρόγραμμα, σε περιπτώσεις που για τη χρονική περίοδο μελέτης υπάρχουν στη βάση περισσότερα TLE για το δορυφόρο, η εποχή αναφοράς των οποίων επικαλύπτει την διάρκεια μελέτης, γίνεται αυτόματη ανανέωση του αρχείου TLE με το αρχείο εκείνο του οποίου η εποχή αναφοράς απέχει το μικρότερο χρονικό διάστημα από την χρονική στιγμή προσομοίωσης της τροχιάς, με στόχο την μικρότερη δυνατή απόκλιση της προβλεπόμενης από την πραγματική θέση του δορυφόρου. Τα τροχιακά στοιχεία του σχηματισμού όπως προκύπτουν από το πρώτο αρχείο TLE που χρησιμοποιήθηκε για κάθε δορυφόρο παρουσιάζονται στον πίνακα 24. Το επίγειο ίχνος των δορυφόρων του σχηματισμού κατά την πρώτη περιστροφή τους απεικονίζεται στο σχήμα 65. Επίσης, στην εικόνα του σχήματος 69 απεικονίζεται το ζεύγος των δορυφόρων της αποστολής GRACE στο 3D Graphics Window του STK. Τα ψηφιακά μοντέλα των 2 δορυφόρων ανακτήθηκαν αυτόματα από την ψηφιακή βάση της Agi.



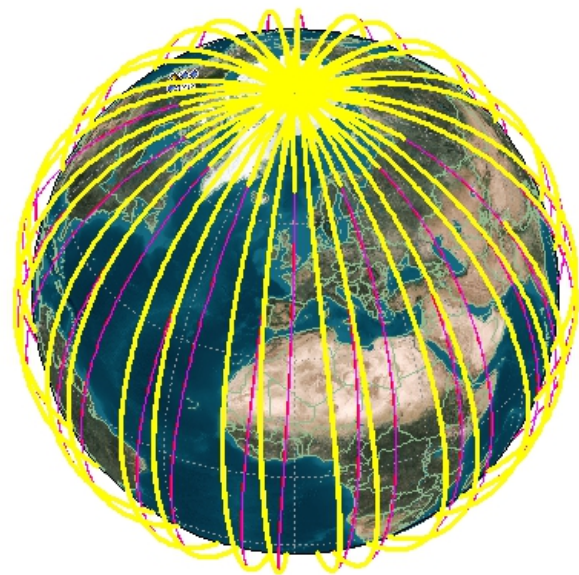
Σχήμα 65: Επίγειο ίχνος των δορυφόρων της αποστολής GRACE σε μία ισαπέχουσα κυλινδρική προβολή.

Τροχιακά Στοιχεία	Δορυφόρος GRACE 1	Δορυφόρος GRACE 2
Εποχή Αναφοράς	17 Sep 2012 02:16:08.174 UTCG	17 Sep 2012 02:15:34.737 UTCG
Μέση Κίνηση (Ω)	0.0641755 deg/sec	0.0641755 deg/sec
$d\Omega/dt$	0.00005246 deg/sec ²	0.00003832 deg/sec ²
Εκκεντρότητα	0.0015567	0.0015879
Κλίση	89.0223 deg	89.019 deg
Όρισμα του Περιγείου	141.398 deg	144.678 deg
Ορθή Αναφορά του Ανιόντος Δεσμού (RAAN)	203.334 deg	203.358 deg
Μέση Ανωμαλία	218.84 deg	215.552 deg
*Αύξων Αριθμός Περιστροφής	58765	58765

Πίνακας 24: Τροχιακά Στοιχεία των δορυφόρων GRACE1 και GRACE2 όπως προέκυψαν από τα TLE με την πιο κοντινή εποχή αναφοράς στην χρονική στιγμή εκκίνησης του σεναρίου.



Σχήμα 66: Ορθογραφική Προβολή (με κέντρο $\varphi=45^\circ$ και $\lambda=0^\circ$) της τροχιάς της αποστολής GRACE.

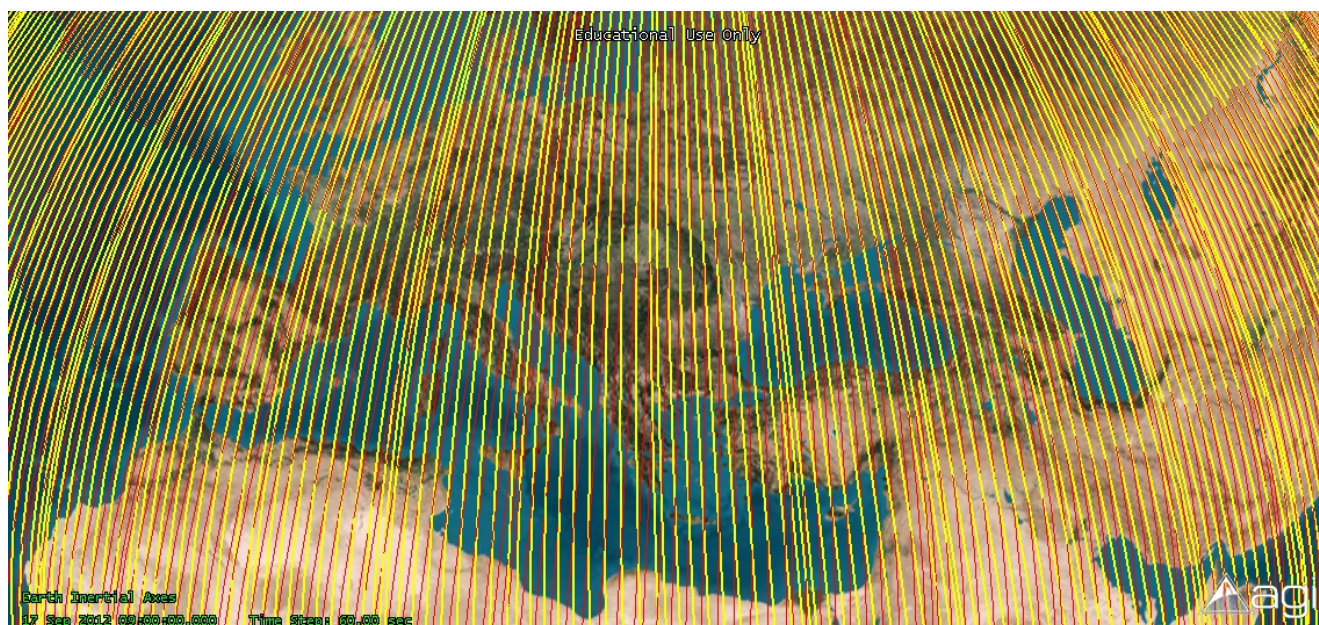


Σχήμα 67: Διαχωρισμός του τμήματος της τροχιάς στο οποίο οι δορυφόροι έχουν πρόσβαση στο ηλιακό φως (κίτρινο), και στο τμήμα που οι δορυφόροι βρίσκονται υπό σκιά (μωβ).

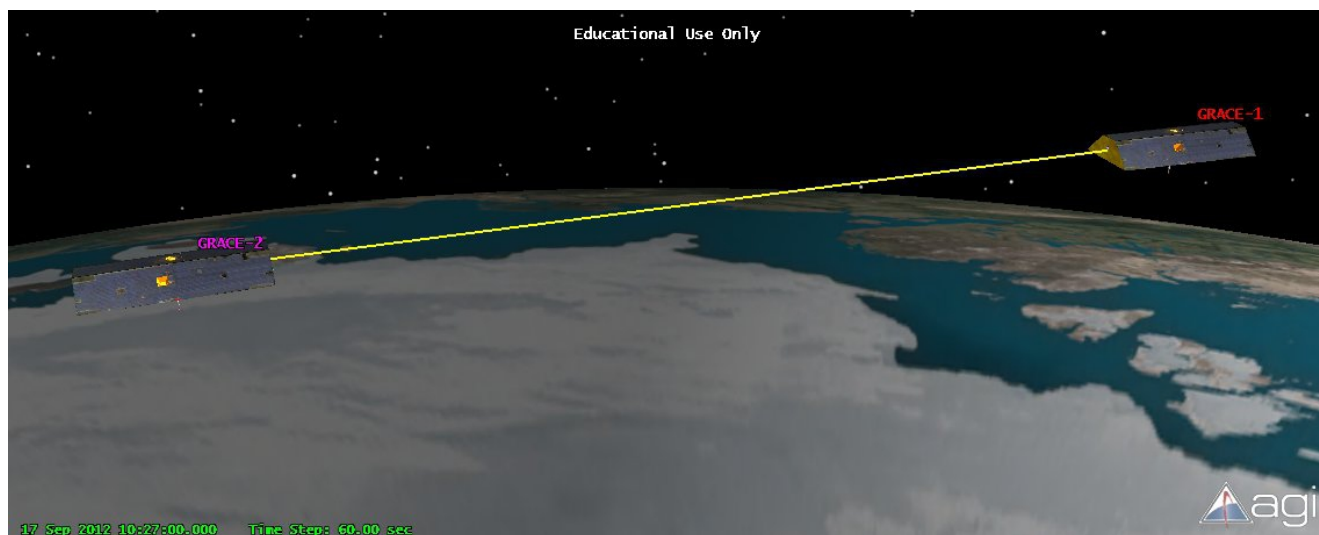
Στα σχήματα 66 και 80 απεικονίζονται οι τροχιές των δορυφόρων GRACE-1 και GRACE-2 για χρονικό διάστημα δύο ημερών (κάθε δορυφόρος έχει ολοκληρώσει περί τις 30 περιστροφές) όπως παρατηρούνται από έναν παρατηρητή σταθερό ως προς τη Γη (σύστημα ECF). Στο σχήμα 80 γίνεται διάκριση μεταξύ του τμήματος της τροχιάς στο οποίο οι ηλιακοί συλλέκτες του δορυφόρου έχουν πρόσβαση στο ηλιακό φως, και το οποίο απεικονίζεται με κίτρινο χρώμα, και του τμήματος της τροχιάς όπου ο δορυφόρος διέρχεται υπό σκιά (*umbra*), και απεικονίζεται με μοβ χρώμα. Επί της ουσίας, το κίτρινο τμήμα της τροχιάς απεικονίζει και το τμήμα της τροχιάς στο οποίο ο σχηματισμός συλλέγει βαρυτιμετρικά δεδομένα.

Στο σχήμα 68 απεικονίζεται το ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου GRACE-2 πάνω στην 3D Globe του STK για το συνολικό χρονικό διάστημα μελέτης των 30 ημερών. Παρουσιάζονται δηλαδή οι διελεύσεις των δορυφόρων της αποστολής στις οποίες συγκεντρώνονται οι μετρήσεις για την σύνταξη των μηνιαίων χαρτών του πεδίου βαρύτητας της Γης. Το σχήμα 68 απεικονίζει την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, τμήμα της Βόρειας Ευρώπης και της Δυτικής Ασίας. Αντίστοιχα, στο σχήμα 70 απεικονίζεται το ίχνος της τροχιάς στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου.

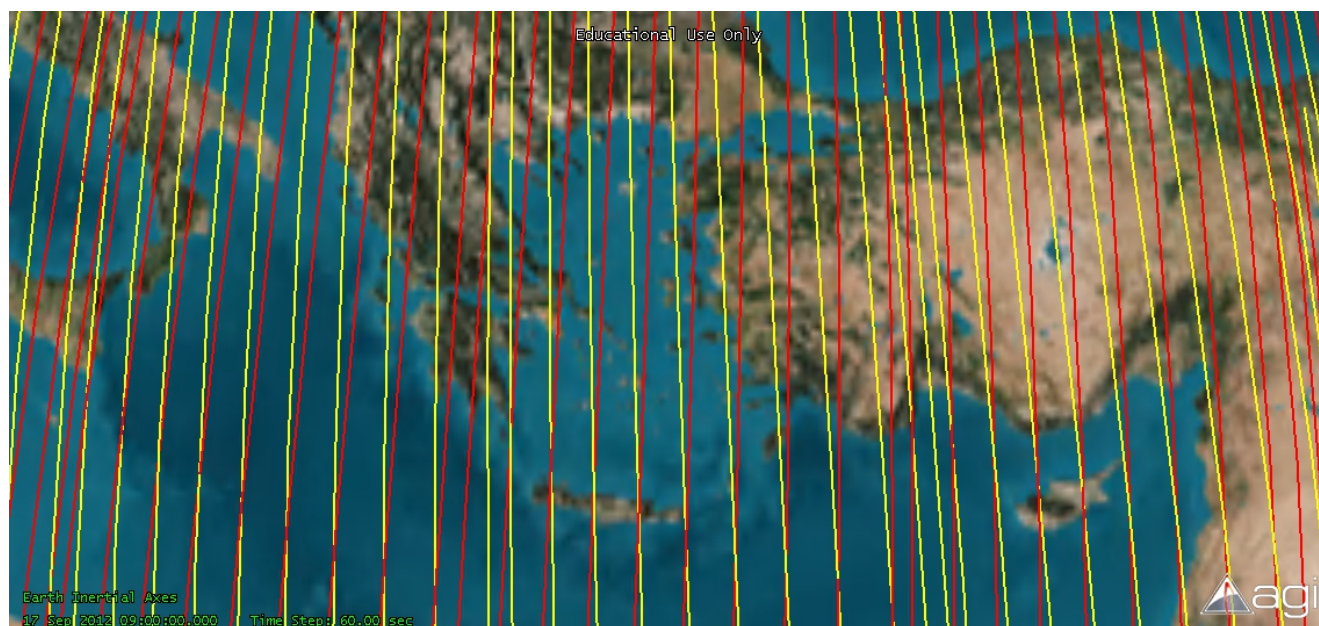
Στη συνέχεια υπολογίζεται, με χρήση των αναφορών και των γραφημάτων που παράγονται από τον Report and Graph Manager του STK, το χρονικό διάστημα κατά το οποίο οι δορυφόροι είναι σε θέση να συλλέξουν δεδομένα, δηλαδή βρίσκονται σε επαφή με το ηλιακό φως. Ο πίνακας 25 αφορά στα συγκεντρωτικά στοιχεία που προέκυψαν από την στατιστική επεξεργασία της αναφοράς Lighting Times του STK. Στο διάγραμμα του σχήματος 71 παρουσιάζονται τα διαστήματα πρόσβασης στο ηλιακό φως, σκιάς και ημίφωτος για τον δορυφόρο GRACE-1 και την πρώτη ημέρα της περιόδου μελέτης του σεναρίου (από 17 Σεπτεμβρίου 2012 και ώρα 09:00:00 UTCG έως 18 Σεπτεμβρίου 2012 και ώρα 09:00:00). Τέλος, στο σχήμα 72 παρουσιάζεται γραφικά το συνολικό χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο δορυφόρος GRACE-2 έχει πρόσβαση στο ηλιακό φως σε δευτερόλεπτα αλλά και ως ποσοστό επί του συνολικού ποσοστού μελέτης. Μεταφράζοντας το συνολικό χρόνο πρόσβασης στο ηλιακό φως, που συμπίπτει με τον χρόνο συλλογής δεδομένων από τους δορυφόρους της αποστολής, σε ποσοστό επί του συνολικού χρονικού διαστήματος μελέτης, προσδιορίζεται η μείωση του χρόνου συλλογής δεδομένων σε σχέση με το χρόνο συλλογής δεδομένων πριν το 2010, όταν οι δορυφόροι συνέλεγαν δεδομένα σε συνεχή βάση. Δηλαδή είναι ένας τρόπος προσδιορισμού του ποσοστού μείωσης στη συλλογή δεδομένων σε σχέση με την περίοδο πλήρους λειτουργίας της αποστολής.



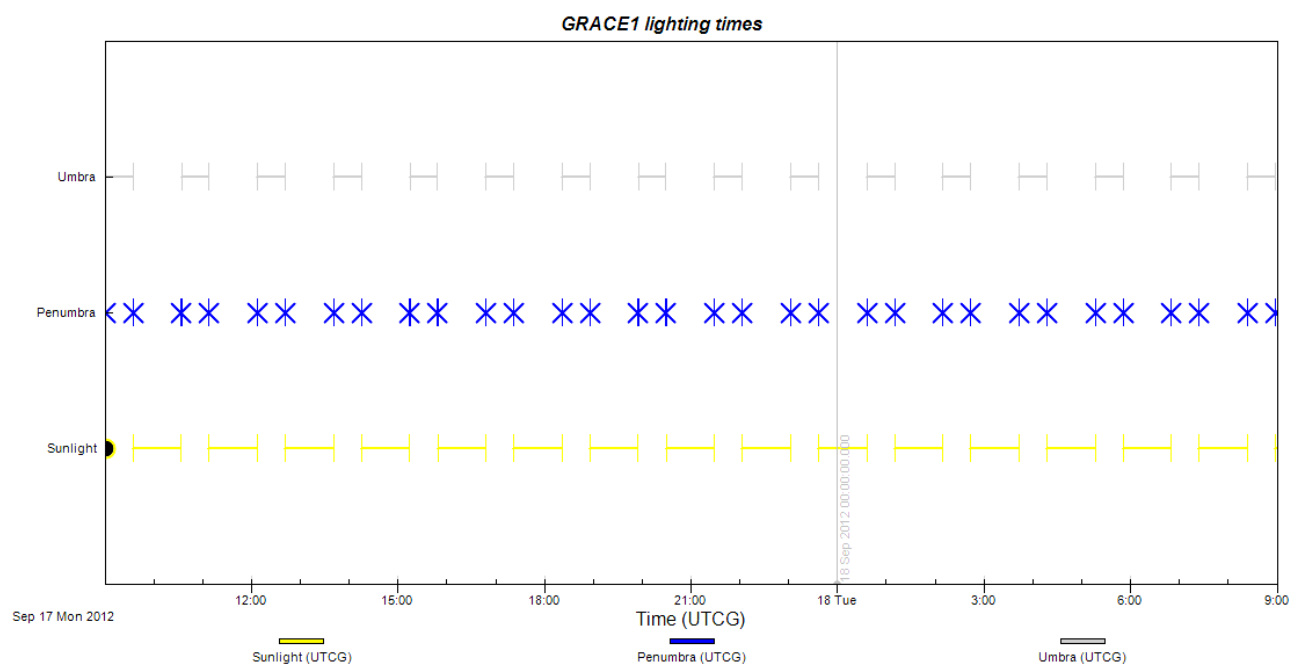
Σχήμα 68: Τα επίγεια ίχνη της τροχίας του σχηματισμού GRACE όπως εμφανίζονται στην 3D Globe, όπου με κίτρινο χρώμα απεικονίζονται τα ίχνη κατά τα οποία ο δορυφόρος έχει πρόσβαση στο ηλιακό φως (άρα είναι λειτουργικός) και με κόκκινο εκείνα στα οποία δεν έχει πρόσβαση.



Σχήμα 69: Στιγμιότυπο του δορυφορικού σχηματισμού GRACE, όπως απεικονίζεται στο 3D Graphics Window του STK. Σημειώνεται ότι η κλίμακα των μοντέλων των δορυφόρων έχει τετραπλασιαστεί για λόγους εποπτικότητας.



Σχήμα 70: Ίχνη με πρόσβαση (κίτρινο χρώμα) ή χωρίς πρόσβαση (κόκκινα) στο ηλιακό φως.



Σχήμα 71: Χρονικά Διαστήματα Πρόσβασης στο ηλιακό φως, σκιάς και ημίφωτος.

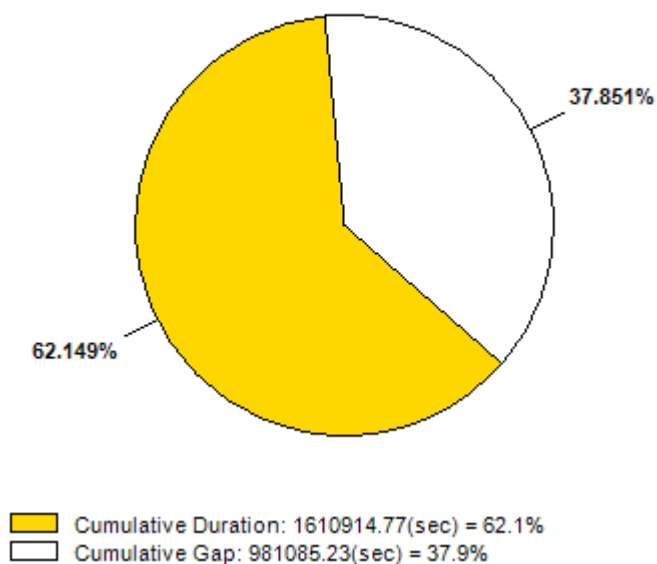
Όσον αφορά τα αποτελέσματα, από τον πίνακα 25 και το διάγραμμα του σχήματος 72 προκύπτει ότι ο χρόνος πρόσβασης του δορυφόρου GRACE-2 στο ηλιακό φως προσεγγίζει το 62% του συνολικού χρονικού διαστήματος μελέτης. Επομένως, οι δορυφόροι της αποστολής ακόμη και μετά από 11 χρόνια λειτουργίας (ενώ ο αρχικός στόχος ήταν τα 5 χρόνια λειτουργίας) συνεχίζουν να συλλέγουν βαρυτιμετρικά δεδομένα για το 62% του αρχικού χρόνου συλλογής, όταν οι δορυφόροι ήταν πλήρως

επιχειρησιακοί και λειτουργούσαν 24 ώρες το εικοσιτετράωρο.

GRACE1 Lighting Times (Units: sec)				
Duration	Min	Max	Mean	SUM
Sunlight	18.247	3555.885	3479.298	1610914.77
Penumbra	8.348	9.548	8.673	8013.601
Umbra	2037.942	2134.756	2106.216	973071.632

Πίνακας 25: Συγκεντρωτικά Στοιχεία που αφορούν τις περιόδους λειτουργίας του σχηματισμού GRACE και σχετίζονται με την γραμμή ορατότητας των ηλιακών συλλεκτών των δορυφόρων με τον Ήλιο.

GRACE Cumulative Sunlight Duration



Σχήμα 72: Συνολικό Διάστημα πρόσβασης των δορυφόρων στο ηλιακό φως

4.5.2 Δορυφορικές Αποστολές TERRASAR-X και TanDEM-X

4.5.2.1 TERRASAR-X

Πρόκειται για έναν γερμανικό δορυφόρο παρακολούθησης της Γης (*Earth Observation Satellite*) που τέθηκε σε τροχιά στις 15 Ιουνίου του 2007 με προβλεπόμενη διάρκεια λειτουργίας τα 5 έτη. Το βασικό όργανο που φέρει είναι ένας X-Band αισθητήρας Radar που διαθέτει πολλαπλούς τρόπους λειτουργίας οι οποίοι του επιτρέπουν την καταγραφή εικόνων με διαφορετικά πλάτη σάρωσης (*swath widths*), διαφορετικές αναλύσεις και πολικότητες (*polarizations*). Στόχος της αποστολής είναι η παροχή δεδομένων ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (*Synthetic Aperture Radar- SAR*) (με χρήση ηλεκτρομαγνητικών παλμών της ζώνης X του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος- X-Band) καθώς και η δημιουργία εικόνων ραντάρ υψηλής ευκρίνειας, συμβάλλοντας έτσι στην έρευνα και την ανάπτυξη τόσο επιστημονικών όσο και εμπορικών εφαρμογών (DLR, 2009).

Ο σχεδιασμός του δορυφόρου προέβλεπε την τοποθέτηση του σε μία σχεδόν πολική, ηλιοσύγχρονη τροχιά με κλίση του τροχιακού επιπέδου ίση με 97.44° . Το επίγειο ίχνος της τροχιάς του δορυφόρου επαναλαμβάνεται κάθε 11 ημέρες με μία απόκλιση της τάξης των 250m. Κατά τη διάρκεια μίας περιόδου επανάληψης του τροχιακού ίχνους ο δορυφόρος έχει πραγματοποιήσει 167 περιστροφές. Το ύψος της τροχιάς ανέρχεται σε 515 km (Roth, 2004).

Χρησιμοποιώντας την ενεργή²⁰ (*active*) κεραία ραντάρ του (*radar antenna*), το σύστημα είναι σε θέση να δημιουργήσει εικονιστικά δεδομένα με ανάλυση έως και ένα μέτρο, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν, την νεφοκάλυψη ή την απουσία ηλιακού φωτός. Ο δορυφόρος είναι πλήρως λειτουργικός από τις 7 Ιανουαρίου του 2008. Η δέσμη ραντάρ που εκπέμπεται μπορεί να στραφεί σε ένα εύρος 20 με 60 μοιρών κάθετα στην πορεία της πτήσης, χωρίς να χρειαστεί να μετακινηθεί ο δορυφόρος. Το πλεονέκτημα είναι προφανές: επιτρέπει στο ραντάρ να εστιάσει σε πολύ περισσότερους στόχους εδάφους από την τροχιά του δορυφόρου απ' ό,τι θα ήταν δυνατό με χρήση ενός μη στρεφόμενου ραντάρ.

Τον Ιούνιο του 2010 τέθηκε σε τροχιά και ο δίδυμος δορυφόρος του TERRASAR-X, ο TanDEM-X (*TERRASAR-X add-on for Digital Elevation Measurement*). Σε έναν κοντινό σχηματισμό πτήσης (*close formation flight*) θα συλλέγουν μεμονωμένα δεδομένα για την αποστολή TERRASAR-X και από κοινού τα δεδομένα της αποστολής TanDEM-X.

Οι χρονικές ρυθμίσεις καθώς και οι ρυθμίσεις στόχευσης (*timing and pointing*) του οργάνου μπορούν να προγραμματιστούν ποικιλοτρόπως. Από τις πολλές τεχνικά δυνατές λύσεις έχουν επιλεγεί και σχεδιαστεί τέσσερις βασικοί τρόποι απεικόνισης (*imaging modes*) οι οποίοι υποστηρίζουν ένα εύρος εφαρμογών, οι απαιτήσεις των οποίων κυμαίνονται από μέσης ανάλυσης πολωμένες (*polarimetric imaging*) εικόνες μέχρι και χαρτογράφηση υψηλής ανάλυσης. Λόγω της μικρής- κοντής κεραίας (*short antenna*) το σύστημα ευνοεί την παροχή πολύ υψηλής ανάλυσης στη διεύθυνση του αζιμουθίου.

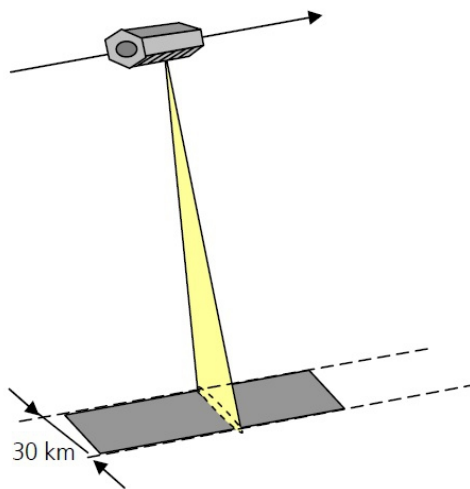
²⁰ Παράγει το ίδιο το όργανο το H/M κύμα που χρησιμοποιεί για τις μετρήσεις και δεν εξαρτάται από άλλες πηγές H/M ακτινοβολίας (όπως η φωτογραφική μηχανή που χρησιμοποιεί το ανακλώμενο από τα αντικείμενα ηλιακό φως).

Κατά συνέπεια η συχνότητα επανάληψης του παλμού (*Pulse Repetition Frequency- PRF*) πρέπει να είναι υψηλή, γεγονός που περιορίζει το μέγιστο πλάτος της δέσμης (*swath*).

Για την παραγωγή των βασικών προϊόντων της αποστολής ορίστηκαν οι τέσσερις παρακάτω βασικοί τρόποι απεικόνισης (*imaging modes*):

- Stripmap Mode in Single or Dual Polarization
- Spotlight Mode
- High Resolution Spotlight Mode in Single or Dual Polarization
- Spotlight Mode in Single or Dual Polarization (Eineder et al, 2010).

Καθότι στην ανάπτυξη της εφαρμογής που ακολουθεί χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι της stripmap mode παρατίθενται το σχήμα 73, που απεικονίζει σχηματικά την λειτουργία της stripmap mode, και ο πίνακας 26, που απεικονίζει τις τιμές των βασικών παραμέτρων της συγκεκριμένης λειτουργίας.



Σχήμα 73: Απεικόνιση του Stripmap Mode, (Πηγή: Eineder et al, 2010).

Parameter	Value
Swath width (ground range)	30 km single pol. 15 km dual pol.
Nom. L1b product length	50 km
Full performance incidence angle range	20° - 45°
Data access incidence angle range	15° - 60°
Number of elevation beams	27 (12 full perf.)
Azimuth resolution	3.3 m (6.6 m dual pol.)
Ground range resolution	1.70 m - 3.49 m (@ 45°.. 20° incidence angle)
Polarizations	HH or VV (single) HH/VV, HH/HV, VV/VH (dual)

Πίνακας 26: Βασικές Παράμετροι της Stripmap Mode (Πηγή: Eineder et al, 2010).

4.5.2.2 TANDEM-X

Το όνομα της αποστολής αποτελεί συντομογραφία του *TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurements* και η βασική ιδέα αφορά στην επέκταση της αποστολής TerraSAR-X με την εισαγωγή ενός δεύτερου σχεδόν πανομοιότυπου δορυφόρου.

Από την κατασκευή του ο δορυφόρος TSX είχε εφοδιαστεί με τον απαραίτητο εξοπλισμό (X-Band antennas για τον συγχρονισμό της φάσης εκπομπής των δύο δορυφόρων, δέκτης GPS δύο συχνοτήτων για ακριβή προσδιορισμό θέσης, εξαιρετική σταθερότητα της φάσης στο όργανο SAR-excellent RF phase stability of the SAR instrument, και συντονισμός της συχνότητας εκπομπής παλμών (PRF) με χρήση του χρόνου GPS ως χρόνου αναφοράς) προκειμένου να είναι σε θέση να λειτουργήσει συνεργατικά με τον TDX.

Ο δεύτερος δορυφόρος (TDX) αποτελεί μία ανακατασκευή του TSX με μικρές μόνο διαφοροποιήσεις, όπως η προσθήκη ενός συστήματος προώθησης ψυχρού αερίου (*cold gas propulsion system*) και ενός επιπλέον δέκτη (S-Band receiver) που επιτρέπει την λήψη της εκπεμπόμενης πληροφορίας του TSX, που αφορά στην κατάσταση και την θέση (όπως προκύπτει από μετρήσεις στον σχηματισμό GPS) του δορυφόρου που σκοπό έχουν τον καλύτερο συντονισμό του δορυφορικού σχηματισμού.

Ο δορυφόρος TDX έχει σχεδιαστεί με προβλεπόμενη διάρκεια ζωής τα 5 χρόνια, από τα οποία για τουλάχιστον 3 θα είναι σε παράλληλη λειτουργία με τον TSX.

Στόχος της αποστολής

Ο βασικός στόχος της αποστολής TanDEM-X είναι η δημιουργία ενός παγκόσμιου και υψηλής ακρίβειας ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου (DEM) που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση σε μία πληθώρα πεδίων επιστημονικής έρευνας, παράλληλα όμως να αξιοποιηθεί και εμπορικά. Επιπλέον η αποστολή έχει ως δευτερεύοντα στόχο την εφαρμογή και ανάδειξη καινοτόμων τεχνικών SAR για πρώτη φορά στο διάστημα.

Κύριος Στόχος- Πεδία εφαρμογών των αποστολών TerraSAR-X και TanDEM-X

Τα ψηφιακά μοντέλα αναγλύφου (DEM) αποτελούν δεδομένα ζωτικής σημασίας για ένα εύρος επιστημονικών και εμπορικών εφαρμογών. Για παράδειγμα επιστήμες όπως η υδρολογία, η δασοκομία, η γεωλογία, η ωκεανογραφία, η μελέτη των παγετώνων απαιτούν ακριβείς και πρόσφατα ενημερωμένους (up to date) ψηφιακούς χάρτες που αφορούν την επιφάνεια της Γης και την τοπογραφία της. Οι ψηφιακοί χάρτες είναι επίσης ένα προαπαιτούμενο για την βελτίωση των εφαρμογών πλοήγησης με χρήση δορυφορικών συστημάτων GNSS. Δορυφορικές αποστολές όπως η SRTM παλιότερα, και η TerraSAR-X και TanDEM-X (με μεγαλύτερη ακρίβεια και μεγαλύτερη κάλυψη της γήινης επιφάνειας) στις μέρες μας, κατασκευάστηκαν για να προσφέρουν ομοιογενή και αξιόπιστα DEM που να καλύπτουν το σύνολο σχεδόν της γήινης επιφάνειας.

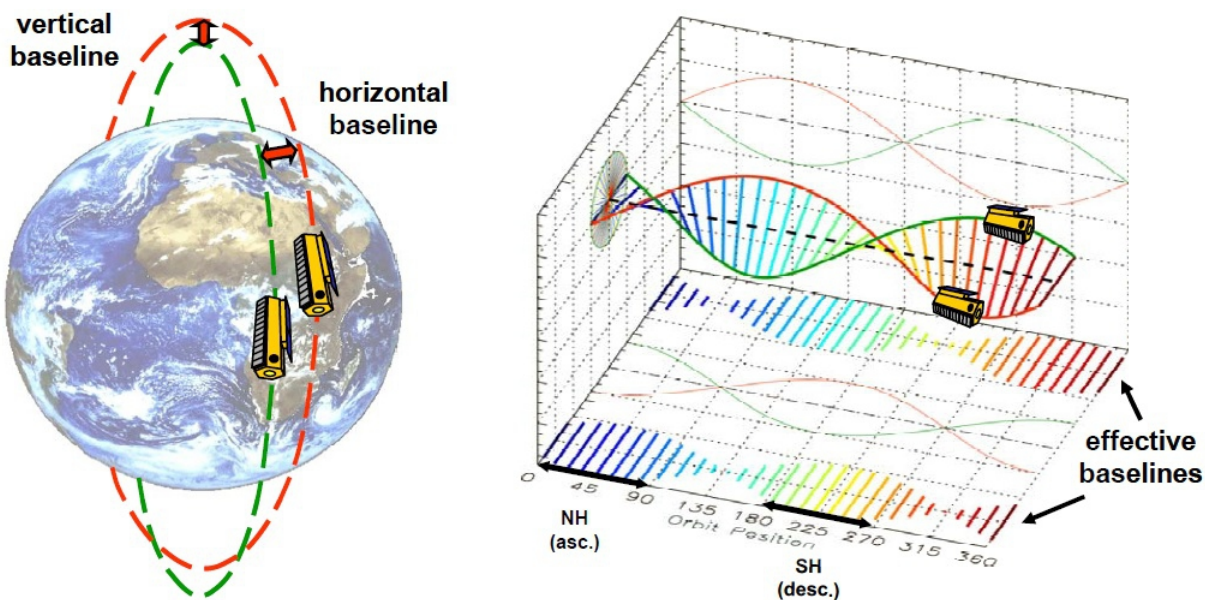
Πλεονεκτήματα στην ακρίβεια του DEM λόγω της χρήσης δύο δορυφόρων για την ταυτόχρονη δημιουργία εικόνων SAR

Οι υψηλές προδιαγραφές ακρίβειας της αποστολής TanDEM-X επιτυγχάνονται μέσω της απόκτησης (acquisition) συμβολογραμμάτων (*interferograms*) εξαιρετικής ακρίβειας, παράλληλων και κάθετων (along, across-track) στην τροχιά των δορυφόρων του σχηματισμού, τα οποία δεν υποβάλλονται στους περιορισμούς ακριβείας της συμβολομετρίας πολλών περασμάτων (*repeat passes interferometry*), που οφείλονται στη μη χρονική συσχέτιση (*temporal decorrelation*) και σε ατμοσφαιρικές διαταραχές (*atmospheric disturbances*).

Διαμόρφωση Τροχιάς

Το σενάριο λειτουργίας του TanDEM-X απαιτεί την συντονισμένη λειτουργία δύο δορυφόρων σε κοντινό σχηματισμό πτήσης (*close formation*). Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση του σχηματισμού είναι: η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των επιπέδων των ανιόντων δεσμών (*nodal line angle*), η γωνία μεταξύ των περιγείων (*angle between the perigees*), οι εκκεντρότητες των δύο τροχιών και η απόσταση (*phasing*) μεταξύ των 2 δορυφόρων.

Με βάση αυτές τις παραμέτρους ο τελικός σχεδιασμός της αποστολής κατέληξε σε έναν ελικοειδή σχηματισμό (*helix formation*) που παρουσιάζεται στο σχήμα 74. Αυτός ο σχηματισμός παρουσιάζει μία οριζόντια (*out-of-plane/ horizontal*) μετατόπιση μεταξύ των τροχιακών επιπέδων μέσω διαφορετικών ανιόντων δεσμών σε συνδυασμό με μία ακτινική/ κάθετη (*radial/ vertical*) μετατόπιση με χρήση διαφορετικής εκκεντρότητας σε κάθε τροχιακό επίπεδο, με αποτέλεσμα μία σχετική -ελικοειδή (*helix-like*)- κίνηση των δορυφόρων κατά μήκος της τροχιάς. Καθώς δεν υπάρχουν τομές (*crossings*) ανάμεσα στα τροχιακά επίπεδα των δορυφόρων δίνεται η δυνατότητα μεταβολών στη θέση των δορυφόρων κατά μήκος της τροχιάς τους, χωρίς να υπάρχει η πιθανότητα σύγκρουσης. Έτσι δίνεται η δυνατότητα ανάλογα με την εφαρμογή να μεταβάλλεται με ασφάλεια η κατά μήκος της τροχιάς απόσταση μεταξύ των δορυφόρων. Για παράδειγμα στην cross-Track Interferometry προτιμώνται βάσεις λήψης κατά μήκος της τροχιάς (*along track baselines*) όσο το δυνατό μικρότερες, ενώ στην Along-Track και σε πειραματικές εφαρμογές συμβολομετρίας απαιτούνται βάσεις που το μήκος τους κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες μέτρα μέχρι μερικά χιλιόμετρα.



Σχήμα 74: Ελικοειδής Σχηματισμός Πτήσης του TanDEM-X. Αριστερά: Διάταξη των τροχιών όπως παρουσιάζονται σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Δεξιά: Μεταβολή της βάσης λήψης κάθετα στην τροχιά (cross-Track baseline) ως συνάρτηση της θέσης επί της τροχιάς. (Πηγή: Hajnsek et al, 2010)

Στο σχήμα 74 οι θέσεις αντιστοιχούν σε μία ολόκληρη τροχιακή περιστροφή όπου NH και SH αντιστοιχούν στο Βόρειο και Νότιο ημισφαίριο αντίστοιχα. Ο ελικοειδής σχηματισμός επιτρέπει την απεικόνιση με χρήση της συμβολομετρίας SAR (*interferometric mapping*) του συνόλου της γήινης επιφάνειας με ένα σταθερό υψόμετρο ασάφειας (*height of ambiguity*) και με πολύ μικρό αριθμό επιπλέον ρυθμίσεων του σχηματισμού. Τα Νότια και Βόρεια γεωγραφικά πλάτη μπορούν να χαρτογραφηθούν με τον ίδιο σχηματισμό χρησιμοποιώντας ανιούσες τροχιές για το ένα ημισφαίριο και κατιούσες για το άλλο όπως απεικονίζεται και στο γράφημα στα δεξιά.

Χάρη στη ταυτόχρονη χρήση δύο δορυφόρων της αποστολής TanDEM-X είναι δυνατή η ανάπτυξη νέων μεθόδων μέτρησης, ή μεθόδων μέτρησης οι οποίες αν και είναι γνωστές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αποστολές μεμονωμένων δορυφόρων, αλλά απαιτούν την συγχρονισμένη λειτουργία ενός ζεύγους δορυφόρων. Οι τρεις βασικές κατηγορίες λειτουργιών οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην αποστολή TanDEM-X περιγράφονται παρακάτω:

- **Across-track SAR Interferometry:** Η συμβολομετρία με λήψεις κάθετα στην διεύθυνση της τροχιάς των δορυφόρων είναι μία καθιερωμένη μέθοδος για την μέτρηση του αναγλύφου. Η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής βασίζεται στην εκτίμηση της διαφοράς φάσης που παρατηρείται στις μετρήσεις 2 ξεχωριστών κεραιών SAR, οι οποίες χωρίζονται από μία καθορισμένη βάση.
- **Along-Track SAR Interferometry:** Η συμβολομετρία με λήψεις κατά μήκος της τροχιάς των δορυφόρων είναι μία καθιερωμένη τεχνική για την μέτρηση των ταχυτήτων κινούμενων αντικειμένων. Η εφαρμογή αυτής της τεχνικής βασίζεται στην μέτρηση της διαφοράς φάσης όπως και στην Across-track SAR Interferometry, όπου οι δύο κεραίες SAR συλλέγουν σύνθετες εικόνες

SAR της ίδιας εδαφικής περιοχής με μικρή χρονική υστέρηση η μία από την άλλη. Κατ' αυτό τον τρόπο οι 2 κεραίες SAR απεικονίζουν την ίδια περιοχή με την ίδια γεωμετρία, αλλά με μία σαφώς καθορισμένη χρονική μετατόπιση, δίνοντας έτσι την δυνατότητα ανίχνευσης κινούμενων αντικειμένων στο έδαφος.

- **New SAR Techniques:** Η αποστολή έχει ως στόχο να αναδείξει τις δυνατότητες χρήσης (feasibility) νέων τεχνικών SAR που δεν έχουν ακόμη ή έχουν μόνο μερικώς χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές εδάφους ή σε εφαρμογές με χρήση αεροσκάφους. Κεντρικός στόχος είναι η εφαρμογή, ο έλεγχος και η εξακρίβωση/επαλήθευση (verification) καινοτόμων τεχνικών και αλγορίθμων για την ανάπτυξη νέων προϊόντων και τεχνολογιών (Moreira et al, 2004, Hajnsek et al, 2010).

Formation Geometry			
	Bistatic	Alternating Bistatic	Pursuit Monostatic
Across-track baseline	<4km	<4km	<4km
Along-track baseline	<1km	<1km	any

Πίνακας 27 Γεωμετρία του σχηματισμού για τις λειτουργίες Bistatic, Alternating Bistatic και Pursuit Monostatic (Πηγή: Hajnsek, 2010).

Από τα προηγούμενα είναι προφανές ότι η συνδυασμένη χρήση των δύο δορυφόρων θα προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα. Δεδομένου ότι τα ραντάρ των δύο δορυφόρων θα βλέπουν την ίδια περιοχή της Γης υπό ελαφρώς διαφορετική γωνία, περίπου όπως λειτουργούν τα ανθρώπινα μάτια, σημαίνει ότι οι δίδυμοι δορυφόροι θα διαθέτουν στερεοσκοπική «όραση». Κατά συνέπεια, στην περίοδο κοινής λειτουργίας τους που έχει σχεδιαστεί για τουλάχιστον τρία χρόνια, θα μπορεί να δημιουργηθεί ένα ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο του πλανήτη με κατακόρυφη ακρίβεια καλύτερη των δύο μέτρων και οριζόντια ανάλυση περίπου 30 εκατοστών. Αυτό θα είναι μια σημαντική βελτίωση σε σχέση με τους αντίστοιχους χάρτες που προσέφερε η Αποστολή Τοπογραφίας Ραντάρ (STRM) που ολοκλήρωσε η NASA το 2000.

4.5.2.3 Δημιουργία του Σεναρίου στο STK

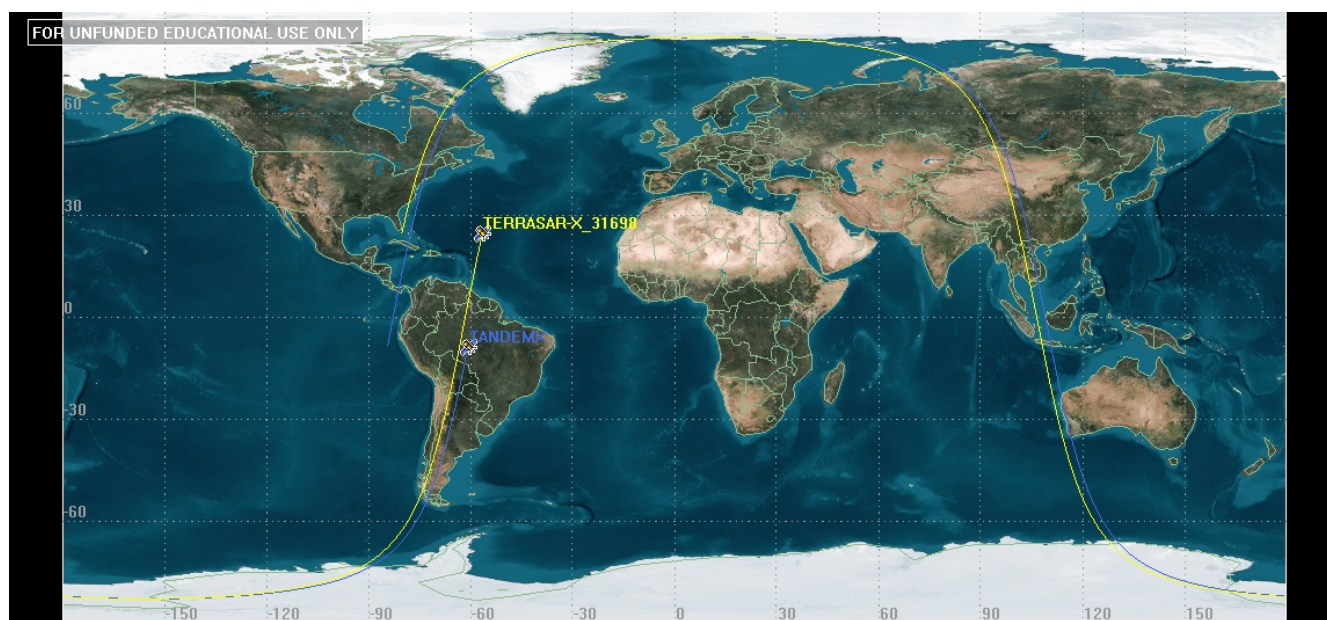
Με βάση τα προηγούμενα στοιχεία αναφορικά με τις λειτουργικές αρχές των δορυφόρων TerraSAR-X και TerraDEM-X επιχειρήθηκε στο STK ένα περισσότερο σύνθετο σενάριο μελέτης βασικών θεμάτων σχεδιασμού και αξιοποίησης των μετρήσεων από τους συγκεκριμένους δορυφόρους. Μετά την εισαγωγή των δορυφόρων και την προσομοίωση των χαρακτηριστικών του βασικού αισθητήρα τους, έγινε η προσπάθεια προσδιορισμού του χρόνου που χρειάζεται προκειμένου ο αισθητήρας του δορυφόρου να έχει εκ νέου στο οπτικό του πεδίο οποιοδήποτε σημείο της γήινης επιφάνειας (χρόνος επανεπίσκεψης). Επίσης υπολογίστηκε η πιθανότητα κάλυψης από το σχηματισμό ενός σημείου, οποιαδήποτε τυχαία χρονική στιγμή μπορεί αυτό να απαιτείται. Η πιθανότητα αυτή υπολογίστηκε για 7 σημεία του ελλαδικού χώρου και προσδιορίζει το πόσο γρήγορα μπορεί το σύστημα να αποτυπώσει μία περιοχή ενδιαφέροντος και να παρέχει στοιχεία απαραίτητα κατά την διαχείριση κρίσεων, όπως η περίπτωση καταγραφής των ζημιών ενός σεισμού, η μελέτη της πιθανότητας

υπερχείλισης μίας λεκάνης απορροής, ή η παρακολούθηση της εξάπλωσης μίας πετρελαιοκηλίδας.

Ως χρόνος εκκίνησης της μελέτης ορίστηκε η 1η Φεβρουαρίου 2012 και ώρα 10:00:00 UTCG και ως χρόνος λήξης του σεναρίου η 20η Φεβρουαρίου 2012 και ώρα 10:00:00 UTCG.

Εισαγωγή των τροχιών του δορυφορικού Σχηματισμού TanDEM-X στο STK

Στη συνέχεια ακολούθησε η εισαγωγή των τροχιών των 2 δορυφόρων για την δεδομένη περίοδο μελέτης. Οι δορυφορικές τροχιές μπορούν να εισαχθούν με χρήση του SGP4 propagator από την Satellite Database του AGI Server. Στη βάση δεδομένων της AGI ήταν καταχωρημένος μόνο ο δορυφόρος TSX-1, του οποίου έγινε και η εισαγωγή της τροχιάς, με ενεργοποιημένη την επιλογή ανανέωσης των τροχιακών στοιχείων, βάσει της εποχής αναφοράς των διαθέσιμων αρχείων TLE.



Σχήμα 75: Επίγειο Ίχνος των τροχιών του ζεύγους των δορυφόρων της αποστολής TanDEM-X.

Όσον αφορά τον δορυφόρο TDX-1 δεν υπήρχε καταχωρημένος στην δορυφορική βάση της AGI και έτσι τα TLE αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εισαγωγή της τροχιάς του δορυφόρου προέρχονται από τον ιστότοπο www.celestrack.com του *Center for Space Standards and Innovation* (CSSI). Χρησιμοποιήθηκαν όλα τα διαθέσιμα αρχεία TLE με εποχή αναφοράς που ανήκει στη χρονική περίοδο μελέτης.

Εισαγωγή αισθητήρα για την απεικόνιση και προσομοίωση της περιοχής λήψης

Προκείμενου να υπάρξει μία πιο σαφής εικόνα αναφορικά με την περιοχή που καλύπτεται από τον δορυφόρο TanDEM-X έγινε εισαγωγή ενός αισθητήρα που να προσομοιώνει την περιοχή απεικόνισης από την κεραία του δορυφόρου για κάθε χρονική στιγμή.

Μετά την εισαγωγή του αισθητήρα ακολουθεί η ρύθμιση των παραμέτρων του στην σελίδα ιδιοτήτων του. Προκειμένου να προσομοιώνει την βασική stripmap mode του οργάνου σάρωσης, της οποίας η λειτουργία αναφέρεται σε παραπάνω ενότητα και τα χαρακτηριστικά στον πίνακα 26, ο τύπος του αισθητήρα ορίζεται ως ορθογώνιος (rectangular) και στο ήμισυ του γωνιακού ανοίγματος του αισθητήρα, του παράλληλου με τη τροχιά του δορυφόρου, τίθεται μία μικρή τιμή (ώστε να προσομοιώνεται η πολύ στενή λωρίδα σάρωσης που αντιστοιχεί σε κάθε χρονική στιγμή μέτρησης του οργάνου) ίση με 0.5 deg. Όσον αφορά στο ήμισυ του καθέτου στη τροχιά γωνιακού ανοίγματος του αισθητήρα, αυτό προκύπτει ίσο με $((45 - 20)/2 \text{ deg} = 12.5 \text{ deg})$ 12.5 deg για την περιοχή πλήρους απόδοσης και 22.5 μοίρες για την ευρύτερη περιοχή απεικόνισης του σαρωτή αντίστοιχα.

Με τις μέχρι τώρα ρυθμίσεις ο σαρωτής είναι προσανατολισμένος παράλληλα με το ζενίθ του δορυφόρου. Πρέπει λοιπόν να εφαρμοστεί και μία στροφή προκειμένου να προσανατολιστεί.

Εισαγωγή αισθητήρα SAR

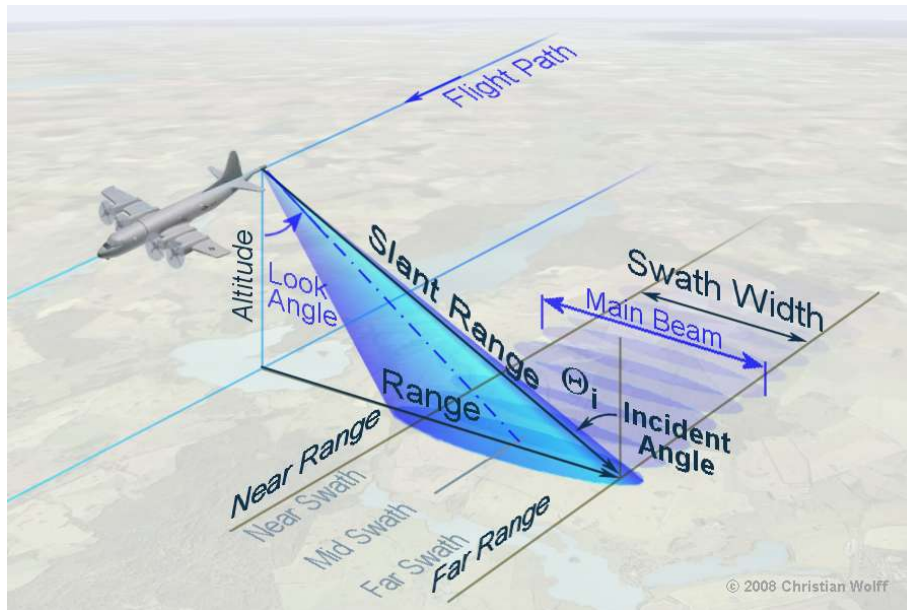
Προκειμένου η προσομοίωση να δώσει μία πιο σαφή εικόνα αναφορικά με την περιοχή που καλύπτεται από τον δορυφόρο TanDEM-X έγινε εισαγωγή ενός αισθητήρα που να προσομοιώνει την περιοχή απεικόνισης από την κεραία του δορυφόρου για κάθε χρονική στιγμή.

Από τον κατάλογο αντικειμένων (Insert → Object Catalog) επιλέγεται ένας αισθητήρας (sensor) ως αντικείμενο εισαγωγής. Ο αισθητήρας αποτελεί ένα υποαντικείμενο του γονικού αντικειμένου (parent object) που είναι ο δορυφόρος TerraSAR-X. Στη συνέχεια από την βασική σελίδα Ορισμού στις ιδιότητες του αισθητήρα (Properties → Basic → Definition) επιλέγεται ως τύπος του αισθητήρα (Sensor Type) το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR). Στη συνέχεια πρέπει να καθοριστεί το οπτικό πεδίο του αισθητήρα μέσω του γωνιακού εύρους δέσμης. Το γωνιακό εύρος δέσμης προσδιορίζεται από την ελάχιστη και την μέγιστη γωνία ύψους (elevation angle- Σχήμα 76), έστω e_{min} και e_{max} , που αντιστοιχούν στο απώτερο και στο εγγύτερο σημείο πάνω στην επιφάνεια της γης, τα οποία έχει τη δυνατότητα να συλλέξει ο δορυφόρος. Στον πίνακα 26 δίνονται η μέγιστη και η ελάχιστη γωνία πρόσπτωσης (incidence angle- Σχήμα 76), έστω i_{max} και i_{min} οι οποίες είναι προφανώς συμπληρωματικές των e_{min} και e_{max} αντίστοιχα. Έτσι προκύπτουν οι τελικές τιμές που εισάγονται στο πρόγραμμα:

Όσον αφορά το γωνιακό εύρος της κάλυψης κατά μήκος της τροχιάς του δορυφόρου, αυτό καθαρά για λόγους εποπτικότητας ορίζεται ίσο με 2°, ορίζοντας γωνίες αποκλεισμού μπροστά και πίσω από το δορυφόρο ίσες με 89°, ενώ στην πραγματικότητα η γωνία θα έπρεπε να αντιστοιχεί στην διακριτική ικανότητα του οργάνου κατ' αξιμούθιο. Παρόλα αυτά η συγκεκριμένη προσέγγιση δεν δημιουργεί διαφοροποιήσεις στην ανάλυση που θα ακολουθήσει.

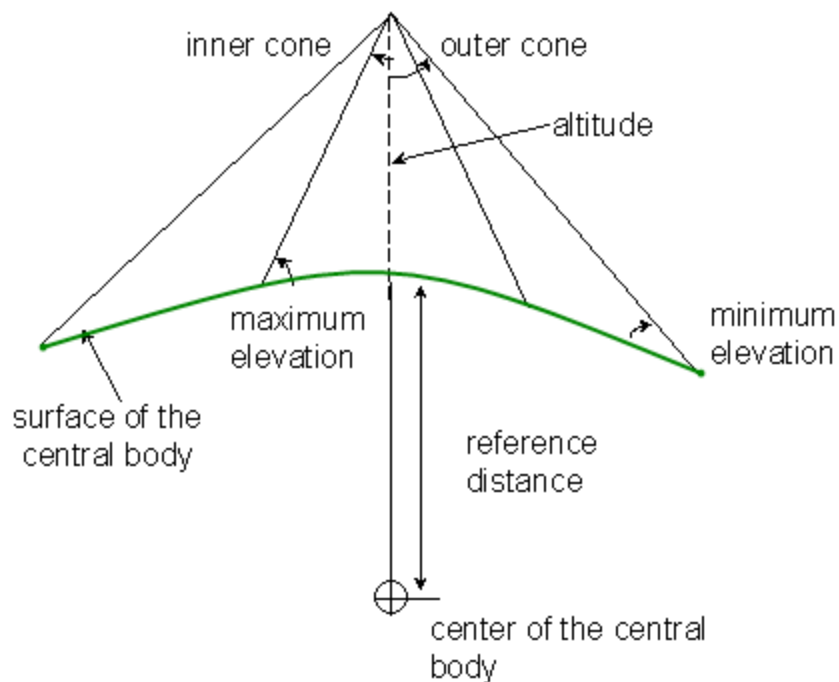
Στο σχήμα 76 η μέγιστη γωνία πρόσπτωσης (incident angle) θ_i είναι εκείνη που σχηματίζεται στο σημείο που βρίσκεται στην απώτερη πλευρική απόσταση (Far Range) και η ελάχιστη στο σημείο που βρίσκεται στην εγγύτερη πλευρική απόσταση (near range) και η οποία δεν απεικονίζεται στο σχήμα. Η απόσταση στο έδαφος μεταξύ του σημείου εγγύτερης πλευρικής απόστασης και απώτερης

πλευρικής απόστασης ορίζει το πλάτος της λήψης (*swath width*). Η πλευρική απόσταση του εδάφους (*ground range*) είναι η απόσταση επί του εδάφους οποιουδήποτε στόχου από το σημείο ναδύρ του ραντάρ. (Καραθανάση, 2012). Αντίστοιχα η πραγματική απόσταση μεταξύ του σημείου και του ραντάρ ονομάζεται κεκλιμένη απόσταση (*slant range*) (Wolff, n.d.).

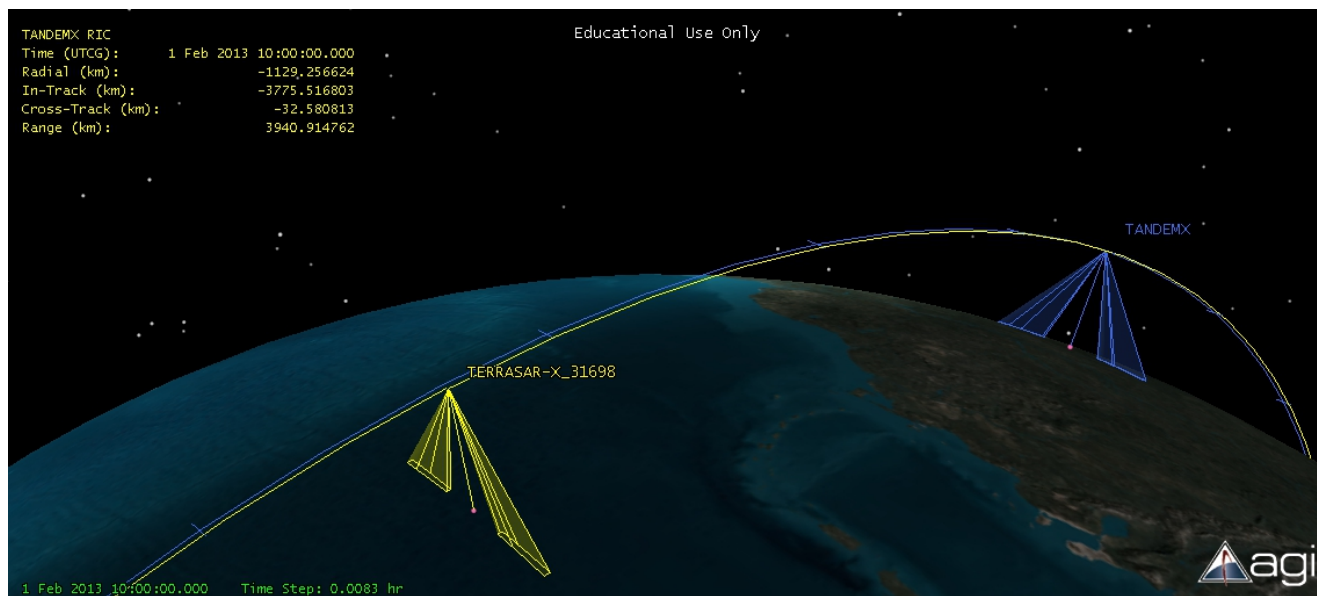


Σχήμα 76: Βασικές Γεωμετρικές Παράμετροι προσδιορισμού ενός συστήματος ραντάρ πραγματικού ανοίγματος SLAR (Side Looking Aperture Radar), κοινές και σε ένα σύστημα SAR. (Πηγή: <http://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab06.en.html>)

Μετά τη ρύθμιση του αισθητήρα, το αντικείμενο αντιγράφεται και προστίθεται και στον δεύτερο δορυφόρο. Η τρισδιάστατη οπτικοποίηση των αισθητήρων, όπως προκύπτει μετά τις βασικές ρυθμίσεις του συστήματος στο STK παρουσιάζεται στο σχήμα 78.



Σχήμα 77: Η μέγιστη και η ελάχιστη γωνία ύψους που ορίζονται για τον προσδιορισμό του οπτικού πεδίου ενός αισθητήρα τύπου SAR στο STK. (Πηγή: STK Desktop Application Help).



Σχήμα 78: Στιγμιότυπο που απεικονίζει το οπτικό πεδίο των 2 δορυφόρων. Οι δέσμες απεικονίζουν την δυνατότητα κάλυψης από το σύστημα SAR του δορυφόρου και όχι την πραγματική στιγμιαία κάλυψη, κατά την οποία το γωνιακό εύρος δεν ξεπερνά τις 2.5° και το πλάτος της λήψης (swath) τα 30 km.

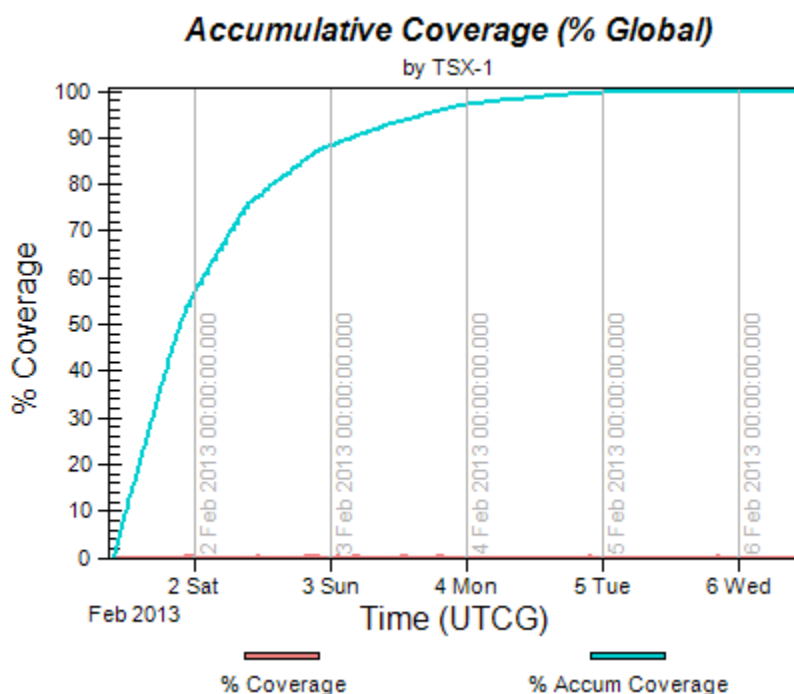
4.5.2.4 Ανάλυση στο STK

Η ανάλυση που ακολούθησε στο STK έχει ως βάση την εξέταση του ποσοστού κάλυψης της γήινης επιφάνειας με το χρόνο καθώς και του χρόνου ανταπόκρισης του δορυφόρου για κάλυψη ενός τυχαίου στόχου στην επιφάνεια της Γης. Ο χρόνος ανταπόκρισης του δορυφόρου ενδιαφέρει κυρίως για εφαρμογές που αφορούν στην συνεισφορά του συστήματος στην διαχείριση κρίσεων, όπως για παράδειγμα η όσο το δυνατό πιο γρήγορη χαρτογράφηση μίας περιοχής που έχει πληγεί από έναν σεισμό ή η παρακολούθηση της εξάπλωσης μίας πετρελαιοκηλίδας, πληροφορίες ιδιαίτερα χρήσιμες στην διαδικασία διαχείρισης των εν λόγω καταστροφών.

Διαδικασία στο STK

Αρχικά δημιουργήθηκε ένα πλέγμα σημείων, στα οποία και εξετάστηκε η κάλυψη που παρέχεται από τον σχηματισμό των δύο δορυφόρων. Από τον κατάλογο αντικειμένων επιλέχθηκε για εισαγωγή η περιοχή κάλυψης (Coverage Definition). Ως περιοχή ενδιαφέροντος ορίστηκε το σύνολο της γήινης επιφάνειας και η γωνιακή απόσταση μεταξύ διαδοχικών σημείων του πλέγματος ορίστηκε ίση με 2 deg. Ως αντικείμενα ενδιαφέροντος (αντικείμενα που παρέχουν την κάλυψη) καταχωρήθηκαν οι αισθητήρες των δύο δορυφόρων. Ως χρονικό διάστημα των υπολογισμών τέθηκε η περίοδος μελέτης του σεναρίου. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι προσβάσεις των δορυφόρων σε κάθε σημείο για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης.

Το STK δίνει την δυνατότητα παραγωγής αναφοράς ή γραφήματος στο οποίο παρουσιάζεται η αθροιστική κάλυψη της γήινης επιφάνειας ως συνάρτηση του χρόνου μέσω του Report and Graph Manager. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 79.

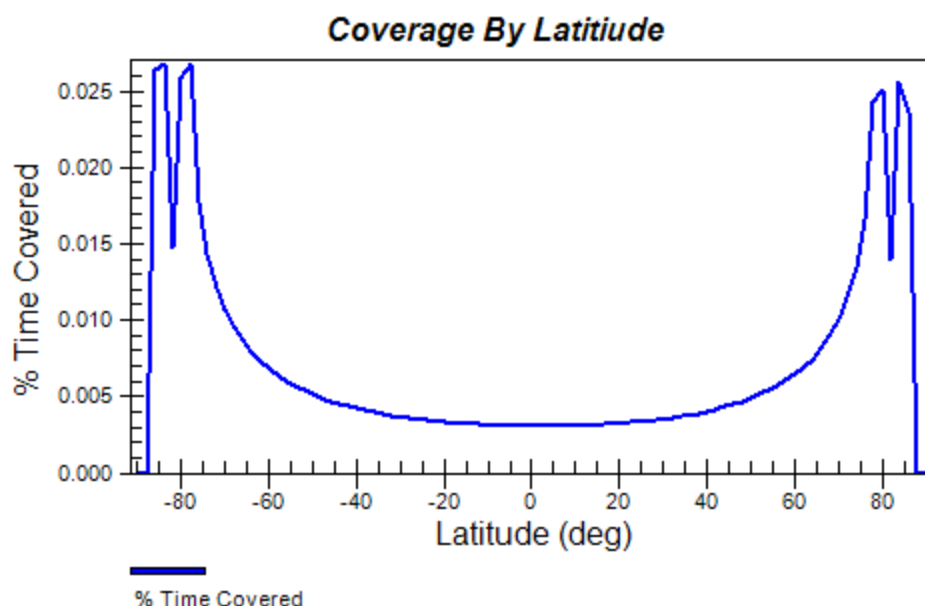


Σχήμα 79: Αθροιστική Κάλυψη (Accumulative Coverage) ως συνάρτηση του χρόνου.

Προσεκτικότερη ανάγνωση του σχήματος 79 δείχνει ότι στις πρώτες 14 ώρες από την εκκίνηση του σεναρίου ο σχηματισμός έχει ήδη καλύψει το 60% της γήινης επιφάνειας (όπως αυτή "υλοποιείται" από το πλέγμα των σημείων του Coverage Definition), ενώ περίπου ένα εικοσιτετράωρο αργότερα η αθροιστική κάλυψη προσεγγίζει το 90% (στις 3 February 00:00 UTCG, δηλ. 38 ώρες από την εκκίνηση του σεναρίου → Accumulated Coverage=88.45%). Στο επόμενο εικοσιτετράωρο ο σχηματισμός έχει καλύψει το 97% της γήινης επιφάνειας (4 February 00:00 UTCG (62 ώρες από την εκκίνηση του σεναρίου) → Accumulated Coverage=97.08%). Μετά από ακόμη ένα εικοσιτετράωρο (5 February 00:00 UTCG- 86 ώρες μετά) η αθροιστική κάλυψη έχει φτάσει το 99.6%, ενώ και μέχρι το τέλος της εφαρμογής δεν θα ξεπερνάει το 99.86%. Πρέπει να αποσαφηνιστεί ότι τόσο το γωνιακό εύρος της δέσμης των αισθητήρων όσο και η αθροιστική καμπύλη κάλυψης της γήινης επιφάνειας υπολογίζονται βάσει της λογικής εκτίμησης της δυνατότητας καταγραφής μίας περιοχής από τους αισθητήρες του σχηματισμού. Στην πραγματικότητα το γωνιακό εύρος της δέσμης του δορυφόρου είναι 2-2.5 deg και ο δορυφόρος λόγω τεχνικών περιορισμών δεν μπορεί να καταγράφει συνεχόμενα πληροφορίες για περισσότερο από 50 km. Αυτό συνεπώς που εξετάζεται με το συγκεκριμένο σενάριο είναι το πόσος χρόνος απαιτείται ώστε ο δορυφόρος, κινούμενος στην τροχιά του και χωρίς την πραγματοποίηση κάποιου ελιγμού είναι σε θέση να παρατηρήσει ένα σημείο με οποιεσδήποτε γεωγραφικές συντεταγμένες.

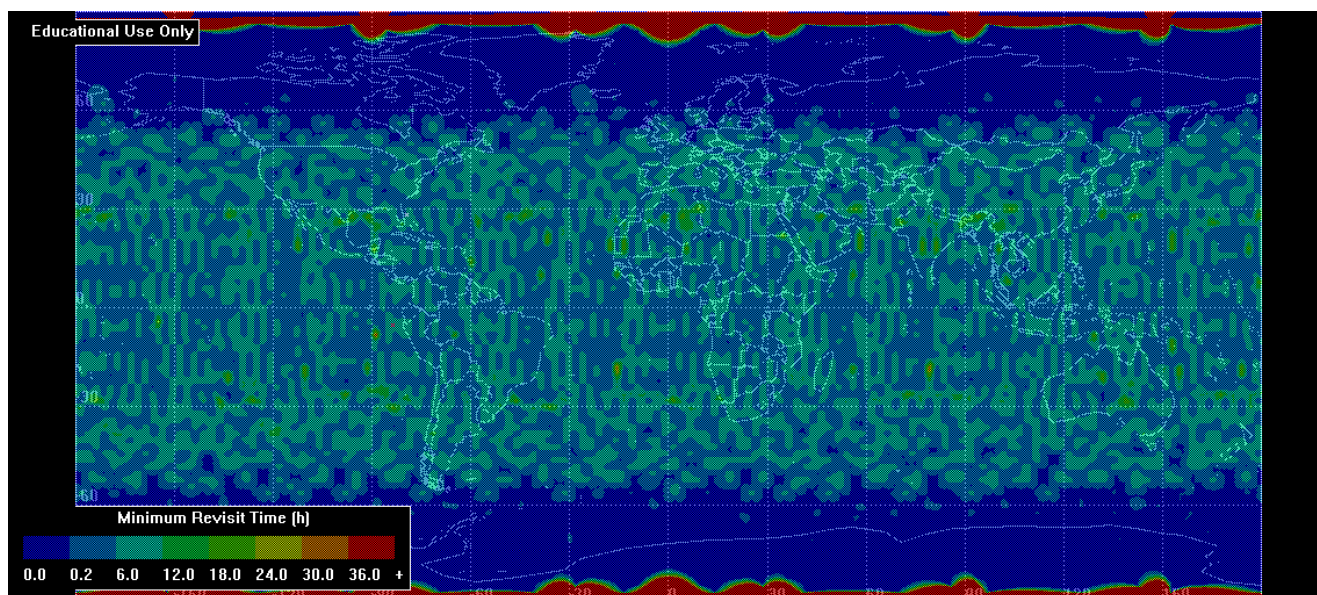
Ο δείκτης ποιότητας κάλυψης (FOM) εισήχθη ως υποαντικείμενο του Coverage Definition που δημιουργήθηκε προηγούμενα. Ως τύπος του δείκτη επιλέχθηκε ο χρόνος εκ νέου επίσκεψης (Revisit Time), ο οποίος αφορά στον προσδιορισμό των χρονικών κενών κάλυψης του κάθε σημείου του

πλέγματος. Πρόκειται για τον χρόνο που απαιτείται ώστε ένας δορυφόρος ή ένας αισθητήρας να διέλθει εκ νέου από το ίδιο σημείο. Ο χρόνος εκ νέου επίσκεψης προσδιορίζει το χρονικό διάστημα για το οποίο δεν υπάρχει πρόσβαση σε κάποιο καθορισμένο αντικείμενο (κενό κάλυψης- *coverage gap*) ή σημείο από το αντίστοιχα ορισμένο αντικείμενο ενδιαφέροντος (πχ έναν δορυφόρο του σχηματισμού TERRASAR-X). Κατά τον υπολογισμό των κενών κάλυψης δεν έχουν χρησιμοποιηθεί τα κενά κάλυψης που βρίσκονται στα άκρα του χρονικού διαστήματος ανάλυσης, αλλά η διαδικασία υπολογισμού των κενών στο εκάστοτε σημείο ξεκινά μετά από την πρώτη διέλευση του αισθητήρα από το κάθε σημείο, ώστε να προκύψουν ορθά συμπεράσματα όσον αφορά τα ελάχιστα κενά κάλυψης. Οι στατιστικές τιμές που υπολογίστηκαν ήταν η μέγιστη, η ελάχιστη και ο μέσος όρος, από τις οποίες προέκυψαν και οι χάρτες και τα διαγράμματα που ακολουθούν.



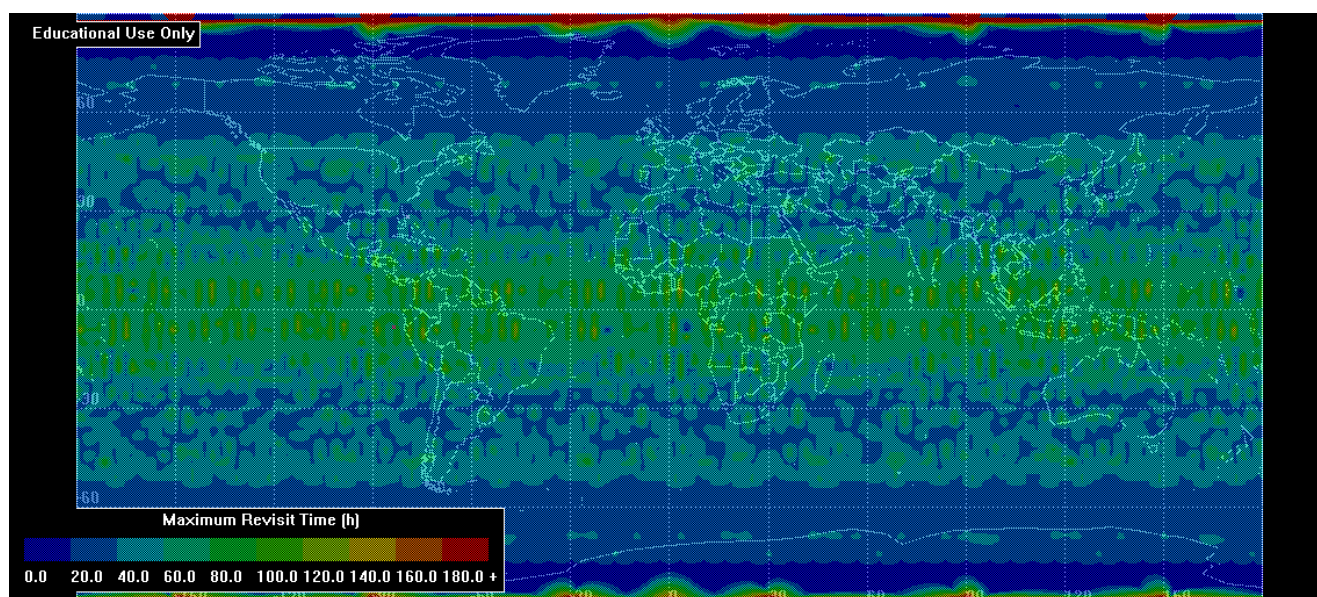
Σχήμα 80: Κάλυψη ως ποσοστό % του συνολικού χρόνου που παρέχεται από το σχηματισμό ανά γεωγραφικό πλάτος.

Στο σχήμα 80 παρουσιάζεται η κάλυψη ως συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους. Η τιμή που παρουσιάζεται αφορά τον μέσο όρο των τιμών που προέκυψαν για το σύνολο των σημείων του πλέγματος που βρίσκονται στον ίδιο παράλληλο. Τόσο από το σχήμα 80 όσο και από την αντίστοιχη τεχνική αναφορά που παρέχει το STK ότι η κάλυψη είναι μηδενική σε γεωγραφικά πλάτη μεγαλύτερα των 86 μοιρών και για αυτό το λόγο η ζώνη $[-86^{\circ}, 86^{\circ}]$ στην επιφάνεια της Γης είναι αυτή που επιλέχθηκε ως περιοχή ενδιαφέροντος και εξετάζεται σε όλα τα παρακάτω διαγράμματα.



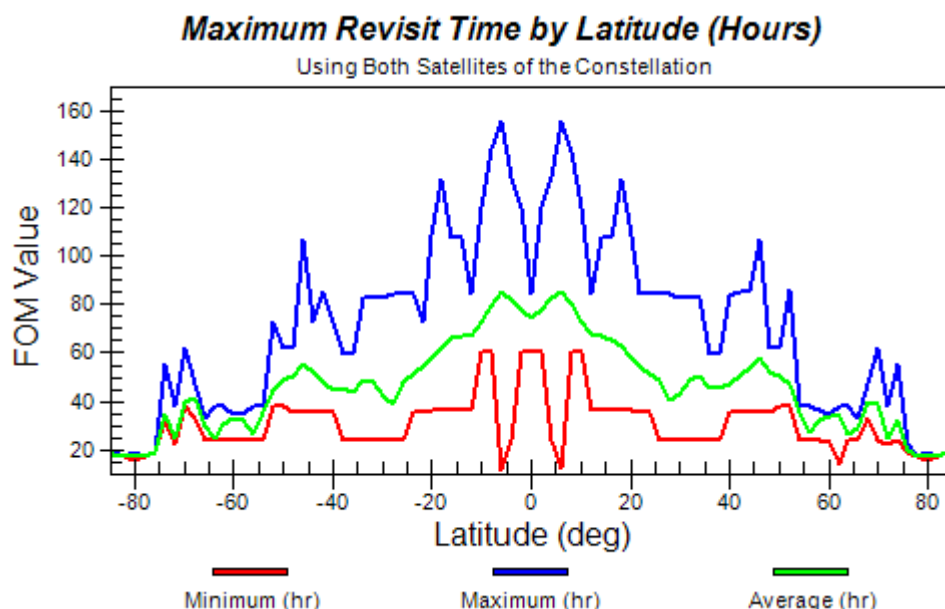
Σχήμα 81: Χάρτης που παρουσιάζει τον ελάχιστο χρόνο εκ νέου επίσκεψης για το σύνολο της γήινης επιφάνειας.

Στο Σχήμα 81 παρατηρούμε ότι για τα γεωγραφικά (με $\phi > 60\text{deg}$ ή $\phi < -60\text{deg}$) ο δεύτερος δορυφόρος υπερίπταται πάνω από το ίδιο σημείο 12 λεπτά μετά από τον πρώτο δορυφόρο και τα ίχνη του οπτικού πεδίου των αισθητήρων των δύο δορυφόρων επικαλύπτονται, κάτι το οποίο δεν ισχύει για τα γεωγραφικά πλάτη από -60deg μέχρι $+60\text{deg}$, όπου λόγω της πολύ μεγάλης απόστασης των δορυφόρων κατά μήκος της τροχιάς τους (περίπου 6km όπως φαίνεται από το σχήμα 85) και λόγω της περιστροφής της Γης τα ίχνη των αισθητήρων των δύο δορυφόρων να μην επικαλύπτονται, με αποτέλεσμα ο ελάχιστος χρόνος εκ νέου επίσκεψης να κυμαίνεται από 6 μέχρι και 12 και πλέον ώρες.



Σχήμα 82: Χάρτης που παρουσιάζει τον μέγιστο χρόνο επανεπίσκεψης από το σχηματισμό για το σύνολο της αποστολής.

Στο χάρτη του σχήματος 82 απεικονίζεται ο μέγιστος χρόνος εκ νέου πρόσβασης του αισθητήρα ενός εκ των δύο δορυφόρων του σχηματισμού σε κάθε σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος, που παρατηρήθηκε στο σύνολο του χρονικού διαστήματος μελέτης. Πρόκειται για το καθαυτό μέγεθος που ενδιαφέρει για την διαχείριση κρίσεων, καθώς προσδιορίζει τον μέγιστο χρόνο που θα χρειαστεί για να επισκεφθεί ένας δορυφόρος του σχηματισμού εκ νέου ένα σημείο. Επομένως εάν η ανάγκη για κάλυψη της περιοχής προκύψει λίγα δευτερόλεπτα αφού ο δορυφόρος διέλθει από το σημείο, αυτός είναι ο μέγιστος χρόνος που θα χρειαστεί για να γίνει η συλλογή της πληροφορίας. Όπως αναμενόταν οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται κοντά στον Ισημερινό (λόγω του σφαιρικού σχήματος της γης) και στους πόλους της Γης (λόγω της απόκλισης της κλίσης της τροχιάς από τις 90 deg- περίπου 97.5 deg), ενώ στις ενδιάμεσες περιοχές η τιμή του δείκτη βαίνει μειούμενη από τον ισημερινό προς τους πόλους (τουλάχιστον μέχρι τις 80 deg).



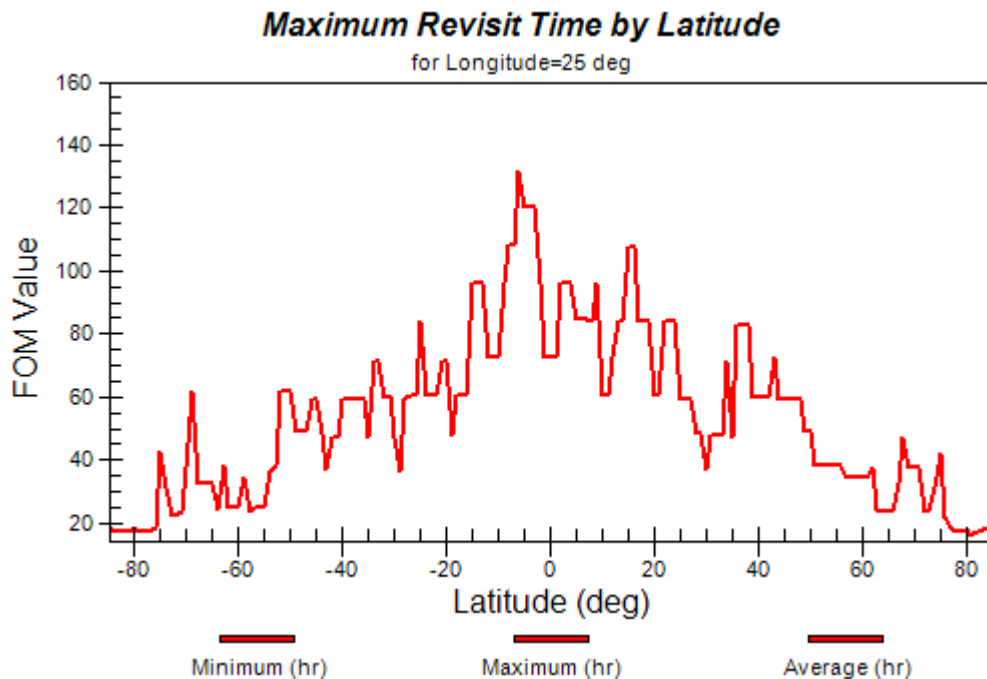
Σχήμα 83: Η ελάχιστη, μέγιστη και μέση τιμή του μέγιστου χρόνου επανεπίσκεψης, που αφορά στο σύνολο των σημείων που βρίσκονται στο ίδιο γεωγραφικό πλάτος.

Τα συμπεράσματα προκύπτουν παρατηρώντας το σχήμα 83, όπου απεικονίζονται η μέση, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του δείκτη εκ νέου επίσκεψης που παρατηρούνται σε όλα τα σημεία ίδιου γεωγραφικού πλάτους και στο σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης. Η μέση τιμή του δείκτη κυμαίνεται από 80 ώρες σε μηδενικά γεωγραφικά πλάτη έως και 20 με 30 ώρες σε πλάτη μεταξύ 75 και 80 μοιρών. Η μέγιστη τιμή που συναντάται προσεγγίζει τις 160 ώρες και η ελάχιστη τις 12 ώρες.

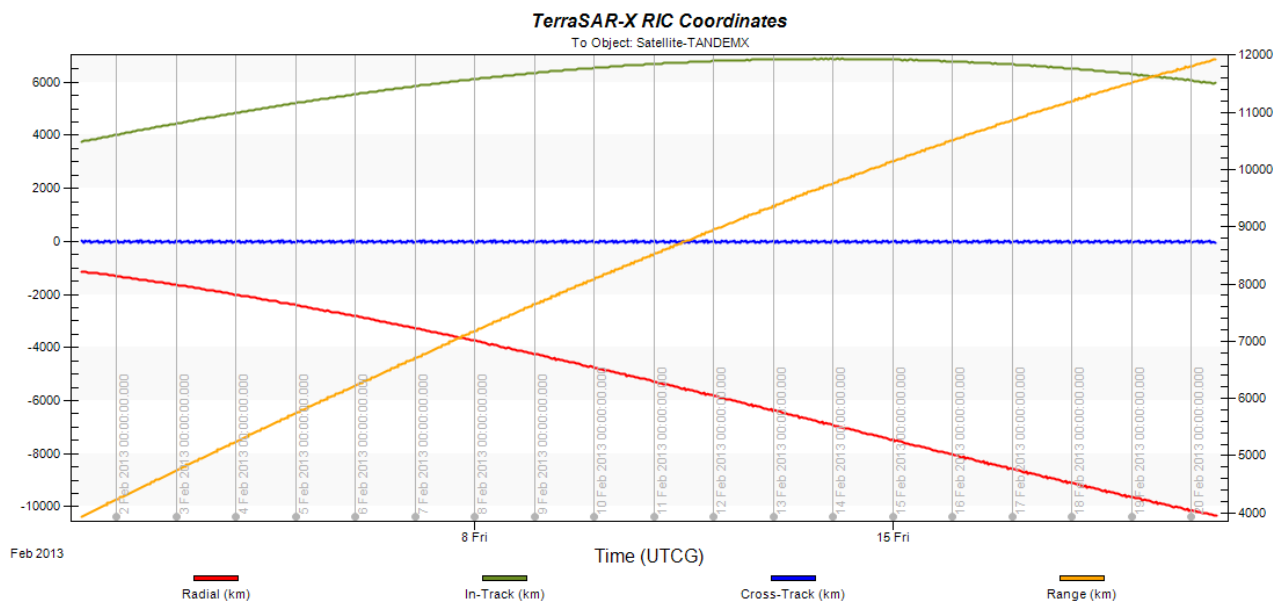
Στο σχήμα 84 απεικονίζεται η μεταβολή του μέγιστου χρόνου εκ νέου επίσκεψης των αισθητήρων του σχηματισμού TanDEM-X με το γεωγραφικό πλάτος, για τον μεσημβρινό με $\lambda=25^\circ$.

Στο σχήμα 85 απεικονίζονται οι διαφορές στην απόσταση μεταξύ των δορυφόρων στο σύστημα RIC (βλ. Παράρτημα Α) και η μεταβολή τους με το χρόνο. Παρατηρείται ότι η απόσταση κατά μήκος της

τροχιάς μεταξύ των δορυφόρων κυμαίνεται από 4 έως περίπου 6000 km, ενώ η απόσταση στην κάθετη στην τροχιά διεύθυνση κυμαίνεται από 0 έως 30 km. Σύμφωνα τώρα με τα στοιχεία του πίνακα 27 προκύπτει ότι οι δορυφόροι δεν λειτουργούν πλέον σαν ζεύγος, αλλά ο καθένας συλλέγει δεδομένα ξεχωριστά. Όπως παρατηρήθηκε και από το σχήμα 81 η απόστασή μεταξύ τους τόσο κάθετα όσο και παράλληλα στη διεύθυνση της τροχιάς έχει οδηγήσει στο να μην υπάρχει επικαλυπτόμενο επίγειο ίχνος του πεδίου ορατότητας των αισθητήρων των δύο δορυφόρων για πλάτη μικρότερα των 60° .



Σχήμα 84: Απεικονίζεται η μεταβολή του μέγιστου χρόνου επανεπίσκεψης σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος για τον μεσημβρινό με $\lambda=25^\circ$. Και σε αυτό το γράφημα παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές στη ζώνη γύρω από τον ισημερινό οι οποίες βαίνουν μειούμενες μέχρι το γεωγραφικό πλάτος $\varphi=85^\circ$ και $\varphi=-85^\circ$ αντίστοιχα.



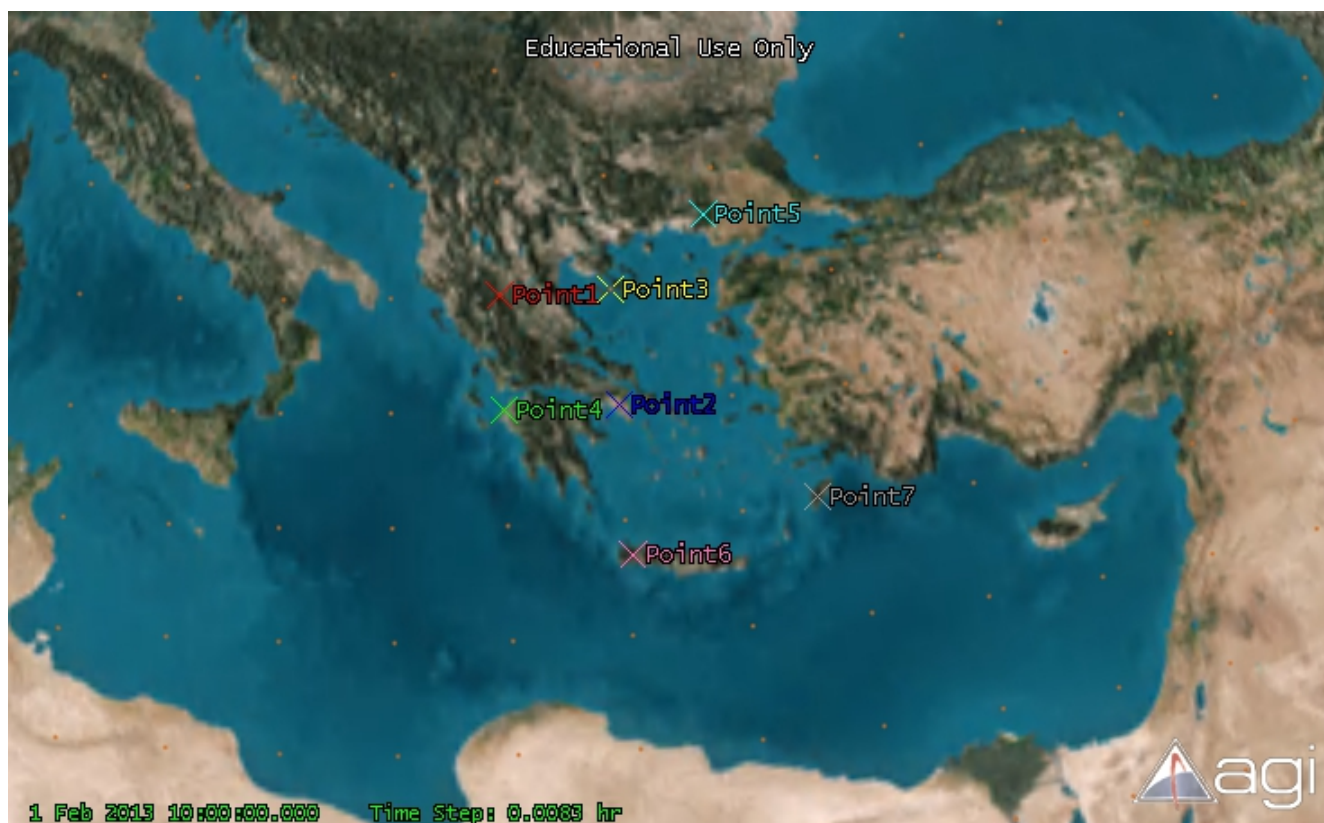
Σχήμα 85: Διάγραμμα που απεικονίζει τις συντεταγμένες του συστήματος RIC μεταξύ των 2 δορυφόρων της αποστολής TanDEM-X, καθώς και την μεταξύ τους απόσταση (μπλε χρώμα, άξονας τιμών είναι ο άξονας των y στα δεξιά).

4.5.2.5 Πιθανότητα κάλυψης Σημείου (Point Probability of Coverage)

Σε ένα επόμενο στάδιο της ανάλυσης, το προηγούμενο σενάριο επεκτάθηκε προκειμένου να εξεταστεί η μεταβολή συναρτήσει του χρόνου της πιθανότητας κάλυψης επτά σημείων που ανήκουν στον ελλαδικό χώρο. Τα σημεία παρουσιάζονται στον πίνακα 28 και στο χάρτη του σχήματος 86.

Σημείο	φ (deg)	λ (deg)
1	40	21.25
2	38	23.75
3	40	23.75
4	38	21.25
5	41.18	25.97
6	35.39	23.86
7	36.11	27.88

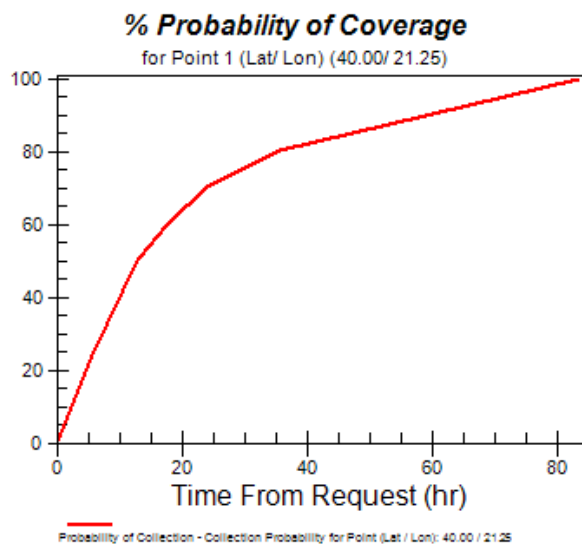
Πίνακας 28: Γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων 1 έως 7.



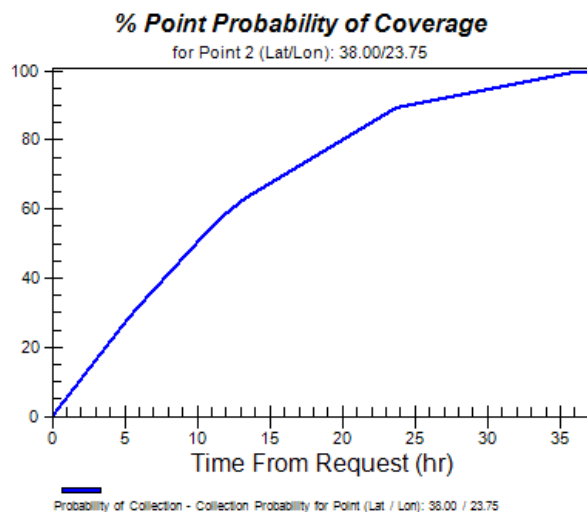
Σχήμα 86: Χάρτης που απεικονίζει την θέση των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της μεταβολής της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει του χρόνου.

Η αναφορά ή το γράφημα του STK που αφορά στην πιθανότητα κάλυψης σημείου παρέχει πληροφορία σχετική με την πιθανότητα κάλυψης ενός προσδιορισμένου σημείου ως συνάρτηση του χρονικού διαστήματος που έχει παρέλθει από τη χρονική στιγμή που διατυπώθηκε το αίτημα (η ανάγκη) για κάλυψη (*Coverage request*). Η πιθανότητα να επιτυγχάνεται κάλυψη την τυχαία στιγμή που πραγματοποιείται το αίτημα ισούται με το ποσοστό επί του συνολικού χρόνου που παρέχεται κάλυψη στο σημείο. Το σημείο έχει 100% πιθανότητα κάλυψης σε χρονικό διάστημα από το αίτημα που ισούται με το μέγιστο κενό κάλυψης για το δεδομένο σημείο. Για παράδειγμα εάν για ένα σημείο της γήινης επιφάνειας, ο αισθητήρας του δορυφόρου TanDEM-X χαρακτηρίζεται από μέγιστο χρόνο εκ νέου επίσκεψης ίσο με 20 ώρες, αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα κάλυψης του σημείου από τον συγκεκριμένο δορυφόρο θα ισούται με 100%, 20 ώρες μετά το αίτημα κάλυψης σε τυχαίο χρονικό διάστημα.

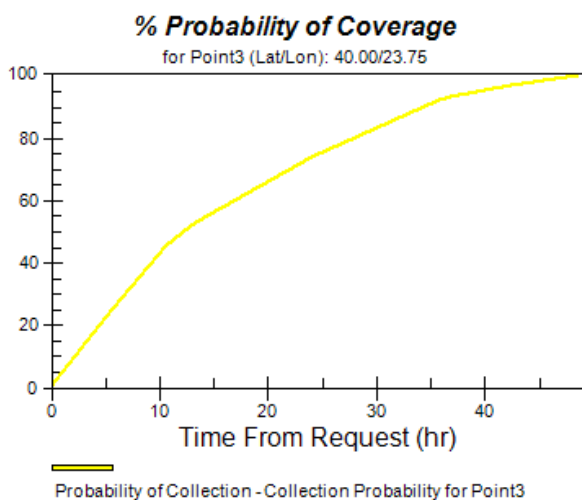
Στα σχήματα 87 με 93 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις μεταβολής της πιθανότητας κάλυψης με το χρόνο για κάθε σημείο ξεχωριστά, ενώ το σχήμα 94 αποτελεί μία συγκεντρωτική απεικόνιση του συνόλου των γραφικών παραστάσεων όλων των σημείων βοηθώντας στην πιο εύκολη αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων.



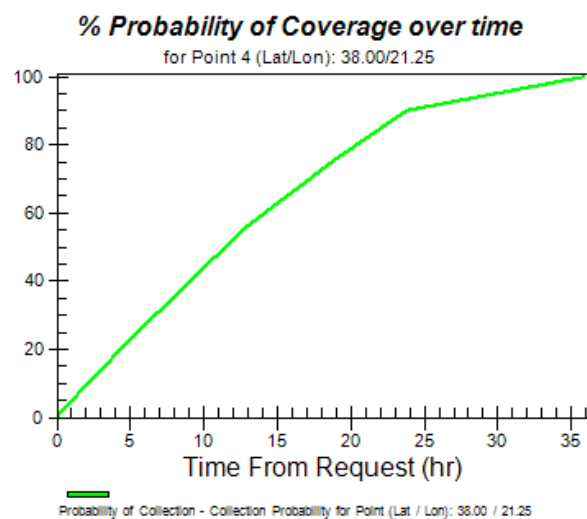
Σχήμα 87: Μεταβολή της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει της παρόδου του χρόνου από τυχαία χρονική στιγμή αιτήματος κάλυψης που αφορά το σημείο 1.



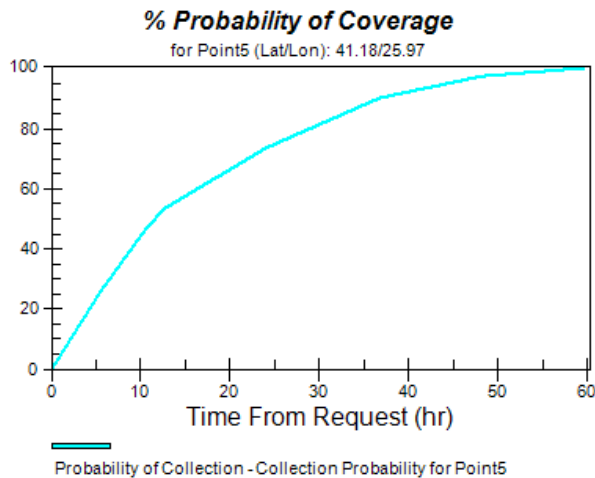
Σχήμα 88: Μεταβολή της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει της παρόδου του χρόνου από τυχαία χρονική στιγμή αιτήματος κάλυψης που αφορά το σημείο 2.



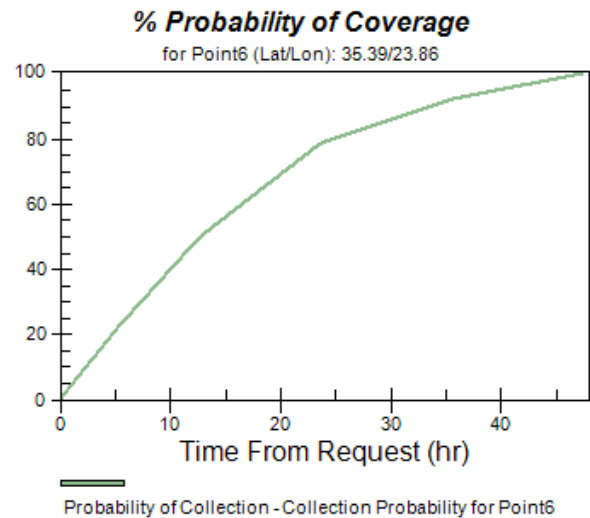
Σχήμα 89: Μεταβολή της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει της παρόδου του χρόνου από τυχαία χρονική στιγμή αιτήματος κάλυψης που αφορά το σημείο 3.



Σχήμα 90: Μεταβολή της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει της παρόδου του χρόνου από τυχαία χρονική στιγμή αιτήματος κάλυψης που αφορά το σημείο 4.

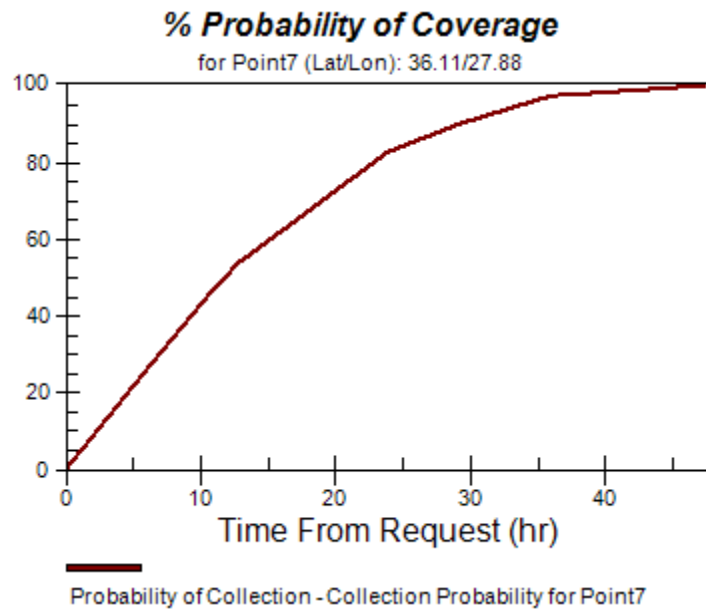


Σχήμα 91: Μεταβολή της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει της παρόδου του χρόνου από τυχαία χρονική στιγμή αιτήματος κάλυψης που αφορά το σημείο 5.

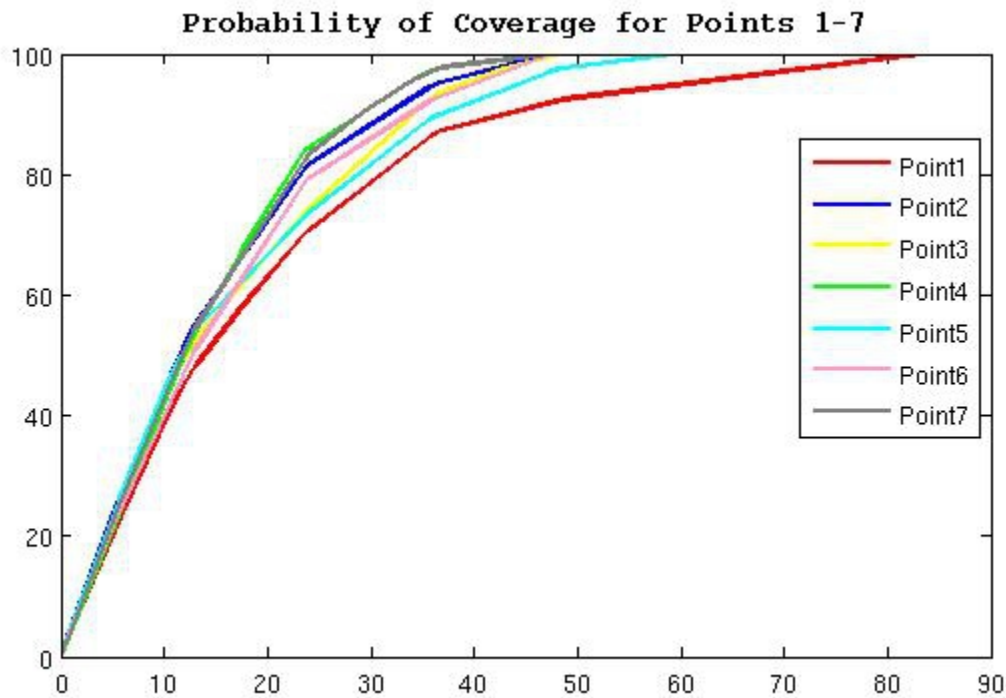


Σχήμα 92: Μεταβολή της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει της παρόδου του χρόνου από τυχαία χρονική στιγμή αιτήματος κάλυψης που αφορά το σημείο 6.

Από το σχήμα 94 συνάγεται ότι για τα περισσότερα σημεία απαιτείται χρονικό διάστημα της τάξης των 45 ωρών, ώστε να υπάρξει κάλυψη από τον αισθητήρα ενός εν των δύο δορυφόρων της αποστολής με πιθανότητα 100%. Αυτό σε πρακτικό επίπεδο σημαίνει ότι σε περίπτωση ενός σεισμού, στην χειρότερη των περιπτώσεων θα χρειαζόταν να περάσουν περίπου 45 ώρες προκειμένου ένας δορυφόρος του σχηματισμού να καταγράψει τμήμα των ζημιών ώστε να χρησιμοποιηθούν στην διαδικασία διαχείρισης της κρίσης.



Σχήμα 93: Μεταβολή της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει της παρόδου του χρόνου από τυχαία χρονική στιγμή αιτήματος κάλυψης που αφορά το σημείο 7.



Σχήμα 94: Συγκεντρωτικό Γράφημα παρουσίασης των γραφικών καμπυλών μεταβολής της πιθανότητας κάλυψης συναρτήσει του χρόνου και για τα 7 σημεία που καλύπτουν τον ελλαδικό χώρο.

5 Εισαγωγή στα Flower Constellations

Η τροχιά κάθε δορυφόρου γύρω από τη Γη καθορίζει σημαντικές παραμέτρους όπως είναι η επιφάνεια κάλυψης, η χρονική καθυστέρηση και η χρησιμοποιούμενη ισχύς του σήματος, το κόστος του συστήματος κλπ, συνεπώς πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη πριν τη σχεδίαση και λειτουργία ενός δορυφορικού συστήματος ή γενικότερα μιας δορυφορικής αποστολής.

Ο σχεδιασμός δορυφορικών συστημάτων που οι δορυφόροι τους λειτουργούν σε κατάλληλους σχηματισμούς είναι γενικά ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα, γιατί κάθε τροχιά έχει έναν άπειρο αριθμό επιλογών για τις έξι τροχιακές παραμέτρους που την καθορίζουν, και έτσι για πολλούς δορυφόρους, το πρόβλημα είναι εξαιρετικά υψηλής διάστασης.

Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο ο σχεδιασμός προηγμένων δορυφορικών συστημάτων σήμερα απαιτεί προηγμένα εργαλεία, όπως το STK, με τη χρήση των οποίων μπορούμε να λύσουμε αυτό το σύνθετο πρόβλημα, χωρίς την ανάγκη να υιοθετήσουμε περιοριστικές παραδοχές που τελικά δεν καταλήγουν σε πρακτικά χρήσιμες λύσεις. Για παράδειγμα, η υπόθεση κυκλικών τροχιών, ενώ απλοποιεί το συγκεκριμένο πρόβλημα από τη μία πλευρά, περιορίζει κατά πολύ τις πιθανές μορφές των τελικών δορυφορικών σχηματισμών που μπορούν να επιλεγθούν ώστε να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία του εκάστοτε δορυφορικού συστήματος.

Προκειμένου να δοκιμάσουμε τις δυνατότητες του STK σε τέτοια προβλήματα, στο παρόν και στο επόμενο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, ασχοληθήκαμε με το πρόβλημα σχεδιασμού των λεγόμενων Flower Constellations. Οι συγκεκριμένοι δορυφορικοί σχηματισμοί βασίζονται σε μια ειδική κατηγορία τροχιών που οφείλουν την ονομασία τους στο ότι οι θέσεις των δορυφόρων, όπως παρατηρούνται σε περιστρεφόμενα πλαίσια αναφοράς, διαγράφουν τρισδιάστατα, συμμετρικά σχήματα πανομοιότυπα με εκείνα ενός μπουκέτου λουλουδιών, όπως θα εξηγηθεί αναλυτικότερα παρακάτω, τα οποία προσδίδουν χαρακτηριστικές ιδιότητες στην κίνηση των δορυφόρων και τα μοτίβα παρατήρησής τους από τη Γη.

Συγκεκριμένα, στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στην λογική σχεδιασμού με χρήση των *Flower Constellations (FC)*, και στους λόγους που οδήγησαν στην ανάγκη χρήσης τέτοιων σχηματισμών, καθώς και μία εκτενής περιγραφή των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν ένα βασικό Flower Constellation, και της επίδρασης που έχει η επιλογή τους στην λειτουργία ολόκληρου του σχηματισμού. Στο τέλος του περιγράφονται κάποιες ειδικές περιπτώσεις Flower Constellations, ενώ

παρουσιάζονται και οι βασικές εφαρμογές στις οποίες ήδη εφαρμόζονται ή θα μπορούσαν να εφαρμοστούν τέτοιοι σχηματισμοί σε γεωδαιτικού ενδιαφέροντος δορυφορικά συστήματα.

5.1 Εισαγωγή

Το σύνολο των δορυφορικών σχηματισμών που φέρουν το όνομα *Flower Constellations (FC)* προέκυψε ως μία γενίκευση των “πολλαπλών στατικών” επικλινών τροχιών (*multi-stationary inclined orbits*), οι οποίες χαρακτηρίζονται από επαναλαμβανόμενα επίγεια ίχνη. Οι σχηματισμοί FC εισήχθησαν για πρώτη φορά στη διεθνή βιβλιογραφία από τους Mortari et al. (2004) σε μία προσπάθεια να δείξουν ότι είναι δυνατόν να δημιουργηθεί ένας κατάλληλος σχηματισμός, ικανός να εξασφαλίζει συνεχή κάλυψη για τα μέσα χαμηλά γεωγραφικά πλάτη της Γης. Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να εισαγάγει τις βασικές έννοιες και την λογική σχεδιασμού ενός Flower Constellation όπως αυτές προκύπτουν από το παραπάνω επιστημονικό άρθρο και άλλες συναφείς έρευνες που ακολούθησαν (Wilkins & Mortari, 2008; Mortari et al, 2004; Wilkins et al, 2004; Park et al, 2004; Mortari et Wilkins, 2008; Wilkins, 2004; Ruggieri et al, 2006 και άλλα).

Αρχικά πραγματοποιείται μία ιστορική αναδρομή και μία σύντομη περιγραφή παρόμοιων δορυφορικών σχηματισμών, η γενίκευση των οποίων οδήγησαν στα τεχνικά χαρακτηριστικά και στις λειτουργικές αρχές των FC. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναπτύσσονται οι βασικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν ένα FC, από τις οποίες ακολουθεί ο τρόπος καθορισμού των βασικών παραμέτρων ενός τέτοιου σχηματισμού: τον αριθμό των ημερών που χρειάζονται για να επαναληφθεί το επίγειο ίχνος του σχηματισμού (N_d), τον αριθμό των πετάλων που σχηματίζονται N_p , τον αριθμό των δορυφόρων που αποτελούν τον σχηματισμό καθώς και το όρισμα του περιγείου (ω), την κλίση του τροχιακού επιπέδου (i) και το ύψος του περιγείου (h_p), οποία είναι κοινά για όλους τους δορυφόρους του σχηματισμού. Τέλος, για την κατανομή των δορυφόρων στα τροχιακά επίπεδα χρησιμοποιούνται ακόμη 2 παράμετροι, οι παράμετροι κατανομής (*phasing parameters*) F_n και F_d .

5.2 Παλαιότεροι Δορυφορικοί σχηματισμοί- Σχετιζόμενα Δορυφορικά Συστήματα

Το βασικό χαρακτηριστικό των FC είναι το επαναλαμβανόμενο επίγειο ίχνος όλων των δορυφόρων του σχηματισμού. Με άλλα λόγια, ανεξαρτήτως του αριθμού των δορυφόρων που απαρτίζουν τον σχηματισμό, ακολουθούν όλοι το ίδιο επίγειο ίχνος ως προς ένα γήινο σύστημα αναφοράς. Η λογική σχεδιασμού δορυφορικών σχηματισμών με επαναλαμβανόμενο επίγειο ίχνος υπάρχει εδώ και αρκετά χρονιά. Παρακάτω γίνεται αναφορά ορισμένων τέτοιων χαρακτηριστικών σχηματισμών, καθώς από την προσπάθεια γενίκευσης της λογικής τους προέκυψαν τα FC.

5.2.1 Το σύστημα Four- Leaf Clover

Ο Ιταλός μηχανικός αεροδιαστημικής Luigi Broglio το 1967 συνέλαβε την ιδέα για το σύστημα Four Leaf Clover (τετράφυλλο τριφύλλι), ένα σχηματισμό ο οποίος αποτελείται από τέσσερις δορυφόρους με τροχιακά στοιχεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα 29, όπου T_s είναι η αστρική περίοδος περιστροφής της Γης και T η περίοδος περιστροφής του δορυφόρου. Για πρώτη φορά ο σχηματισμός αναφέρεται ως τμήμα του San Marco Project του Πανεπιστημίου της Ρώμης και της NASA, ένα φιλόδοξο πρόγραμμα που με επικεφαλής τον Broglio οδήγησε, από το 1961 μέχρι και το 1998, την Ιταλία στο να γίνει μία από τις πρώτες χώρες για να κατασκευάσει, να εκτοξεύσει και να λειτουργήσει το δικό της δορυφόρο (*San Marco 1*).

Satellite	T	$\Omega+\omega$	i	Mo
#1	$T_s/3$	0	0	0
#2	$T_s/3$	$\pi/2$	0	$\pi/2$
#3	$T_s/3$	π	0	π
#4	$T_s/3$	$3\pi/2$	0	$3\pi/2$

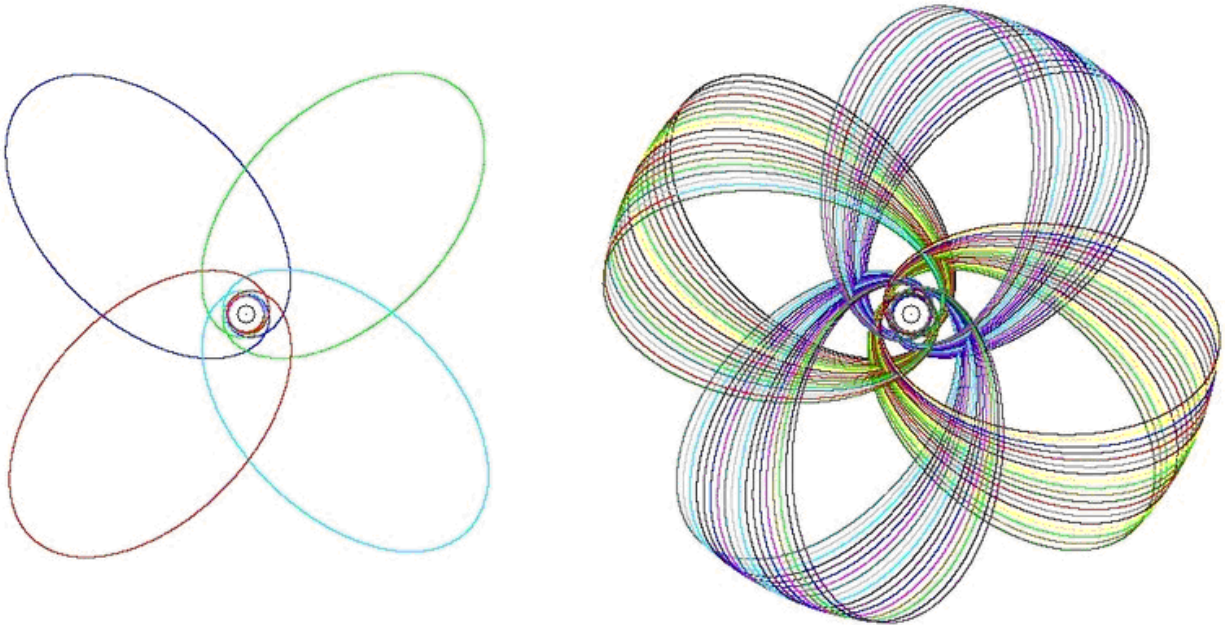
Πίνακας 29: Τροχιακά Στοιχεία των δορυφόρων του Four Leaf Clover (Mortari et al., 2004).

Ο σχηματισμός αρχικά προτάθηκε για μια σειρά δορυφόρων κατάλληλα εξοπλισμένων για την παρακολούθηση και την εξασφάλιση συνεχούς κάλυψης με μετρήσεις του ανώτερου στρώματος της ατμόσφαιρας στην περιοχή του ισημερινού. Στόχος της αποστολής ήταν η εύρεση σχέσεων μεταξύ των φυσικών ιδιοτήτων της τροπόσφαιρας πάνω από τον ισημερινό σε σχέση με την ηλιακή και γεωμαγνητική δραστηριότητα.

Η δυναμική ενός τέτοιου σχηματισμού μπορεί να γίνει καλύτερα αντιληπτή μελετώντας την κίνηση των δορυφόρων ως προς ένα γήινο πλαίσιο αναφοράς (ECF). Κάθε δορυφόρος παραμένει για περίπου 6 ώρες κοντά στο απόγειο και χρειάζεται περίπου άλλες 2 για την διέλευσή του μεταξύ διαδοχικών μεταβάσεων από το απόγειο. Λόγω της κατανομής (*phasing*) των δορυφόρων στις τροχιές τους, πάντα τρεις από τους δορυφόρους βρίσκονται κοντά στο απόγειο, ενώ ο τέταρτος είναι σε μετάβαση προκειμένου να αντικαταστήσει τον δορυφόρο με την μέγιστη μέση ανωμαλία (εκείνον που είναι πιο κοντά στο να μετακινηθεί γρήγορα προς το περίγειο). Τέλος, οι τρεις δορυφόροι που βρίσκονται κοντά στο απόγειο, έχουν ορατότητα μεταξύ τους και μπορούν να παρακολουθήσουν πάνω από το 1/3 της γήινης επιφάνειας ο καθένας.

Έκτοτε έχουν αναπτυχθεί αρκετοί δορυφορικοί σχηματισμοί αντίστοιχοι με την λογική των σχηματισμών Four Leaf Clover. Στο σχήμα 95 δίνονται ενδεικτικά γραφικά παραδείγματα τέτοιων σχηματισμών που απαντώνται σε μελέτες της Αστρομετρίας (Levin & Perez-Giz, 2008). Αριστερά, φαίνεται η ιδεατή τροχιά ενός σωματιδίου γύρω από μια στατική, μη περιστρεφόμενη μαύρη τρύπα. Κάθε «φύλλο», αποτελείται από δύο «στριφογυρίσματα» γύρω από την μαύρη τρύπα και ένα πέρασμα γύρω από το απώτερο σημείο από τη μαύρη τρύπα (το λεγόμενο απάστρον, *apastron*). Δεξιά, απεικονίζεται η τροχιά «τετράφυλλου τριφυλλιού» που επαναλαμβάνεται επ' αόριστον,

εφόσον δοθεί στο σωματίδιο μόνο ένα μικρό επιπλέον ποσό ενέργειας και με την προϋπόθεση ότι η κίνηση του δεν υπόκειται σε άλλες διαταραχές. Η εντύπωση του τρισδιάστατου δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, αλλά είναι απλά οφθαλμαπάτη, δεδομένου η τροχιά παραμένει στο ίδιο επίπεδο.



Σχήμα 95: Ενδεικτικά παραδείγματα σχηματισμών Four Leaf Clover (Levin & Perez-Giz, 2008).

Παρόμοιοι σχηματισμοί βασίζονται σε πολλές από τις κατηγορίες δορυφορικών τροχιών που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα, όπως οι Low Earth Orbits (LEO), οι τροχιές Molniya (που ανήκουν στις τροχιές HEO), οι τροχιές TUNDRA, οι γεωσύγχρονες τροχιές (GEO) και οι τροχιές MIO, από τις οποίες ξεχωρίζουν στην μελέτη για τα Flower Constellations οι τροχιές HEO και MIO. Ορισμένες βασικές λογικές σχεδίασης τέτοιων σχηματισμών (*constellation concepts*) είναι οι σχηματισμοί JOCOS, LOOPUS και COMBRA που, για λόγους πληρότητας και της μετέπειτα καλύτερης κατανόησης των τεχνικών χαρακτηριστικών των FC, περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω. Αυτοί οι σχηματισμοί, λόγω της ικανότητάς τους να ικανοποιούν ορισμένες βασικές ανάγκες, όπως η παγκόσμια ή τοπική τηλεπικοινωνιακή κάλυψη, σήμερα συγκεντρώνουν το ενδιαφέρον των βιομηχανιών αεροδιαστημικής για εφαρμογές στις τηλεπικοινωνίες, για τη χρήση μικροδορυφόρων τηλεπισκόπησης κ.ά.

5.2.2 HEO- MIO

Οι δορυφορικοί σχηματισμοί τροχιών μεγάλης εκκεντρότητας (*Highly Eccentric Orbit- HEO constellations*) στην τυπική περίπτωση έχουν ένα υψόμετρο του περιγείου της τάξης των 500km ή και μεγαλύτερο και υψόμετρα του απόγειου τουλάχιστον 7 φορές μεγαλύτερα της ακτίνας της Γης.

Συνήθως, όπως και στην περίπτωση των τροχιών Molniya, η κλίση των τροχιών επιλέγεται ίση με την κρίσιμη κλίση (*critical inclination*), δηλαδή 63.4° ή 116.6° προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η μετατόπιση του άξονα των αψίδων και να ελαχιστοποιηθούν τα κόστη διαστημικών ελιγμών για την διατήρηση των ονομαστικών τροχιών των δορυφόρων του σχηματισμού.

Η ιδέα χρήσης δορυφόρων σε τέτοιες τροχιές βασίζεται στον δεύτερο νόμο του Kepler, ο οποίος ορίζει ότι η γραμμή που ενώνει το κεντρικό σώμα (π.χ. τη Γη) με το δορυφόρο διαγράφει ίσες επιφάνειες σε ίσους χρόνους. Δηλαδή, ο δορυφόρος κινείται ταχύτερα όσο πλησιάζει τη Γη και επιβραδύνει όσο απομακρύνεται από αυτήν. Συγκεκριμένα ο δορυφόρος αναπτύσσει τη μέγιστη ταχύτητα του όταν περνά από το περίγειο και την ελάχιστη όταν περνά από το απόγειο. Στην προκειμένη περίπτωση, λόγω της μεγάλης τιμής της εκκεντρότητας των συγκεκριμένων τροχιών, ένας δορυφόρος θα περάσει περί τα $2/3$ της περιόδου της τροχιάς του κοντά στο απόγειο και, κατά το χρονικό αυτό διάστημα, θα φαίνεται σχεδόν στατικός, σε έναν παρατηρητή στην Γη.

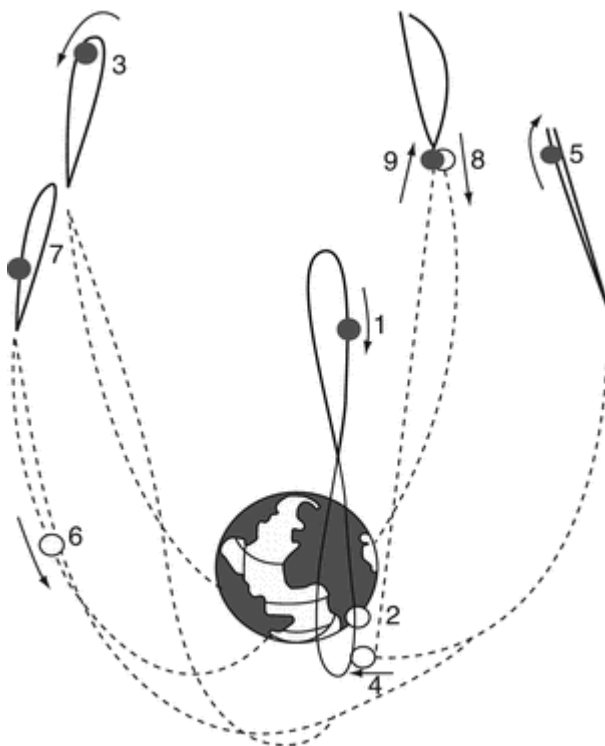
Οι σχηματισμοί MIO (*Multistationary Inclined Orbit Constellations*) είναι προέκταση της λογικής σχεδιασμού των σχηματισμών HEO, υπό την έννοια ότι αναφέρονται σε τροχιές που χαρακτηρίζονται από επαναλαμβανόμενα ίχνη. Το γεγονός, αυτό σε συνδυασμό με τον μεγάλο χρόνο παραμονής των δορυφόρων κοντά στο απόγειο, εξασφαλίζει την δημιουργία σχηματισμών, οι δορυφόροι των οποίων περνούν τα $2/3$ της περιόδου τους πάνω από μία συγκεκριμένη περιοχή της Γης και εξυπηρετούν για αυτή παρόμοιο ρόλο με εκείνο των γεωστατικών δορυφόρων (Mortari, 2004).

5.2.3 JOCOS Constellations

Η λογική του σχηματισμού JOCOS (*Juggler Orbit COntellation*) περιλαμβάνει την χρήση δορυφόρων σε κυκλικές, κεκλιμένες και επαναλαμβανόμενες τροχιές, με περίοδο περιστροφής της τάξης των οχτώ ωρών. Καθώς οι τροχιές είναι κυκλικές, η θέση του απογείου δεν είναι καθορισμένη και έτσι επιλέγεται μία κλίση του τροχιακού επιπέδου της τάξης των 75° ούτως ώστε να μεγιστοποιηθεί η κάλυψη της Γης. Τυπικά, ο εκάστοτε τέτοιος σχηματισμός αποτελείται από έξι δορυφόρους, οι οποίοι έχουν τους δεσμούς τους ομοιόμορφα κατανομημένους στο ισημερινό επίπεδο. Οι μέσες ανωμαλίες των δορυφόρων επιλέγονται έτσι ώστε 3 δορυφόροι του σχηματισμού να βρίσκονται πάνω από το βόρειο ημισφαίριο και 3 πάνω από το νότιο. Καθώς οι 3 βόρειοι (top) δορυφόροι ταυτόχρονα κατεβαίνουν, οι 3 νότιοι θα ανέβουν ταυτόχρονα προκειμένου να τους αντικαταστήσουν. Με αυτό τον τρόπο, εξασφαλίζεται η συνεχής κάλυψη της Γης. Παρόλα αυτά, ο συγκεκριμένος σχεδιασμός αφήνει κάποια κενά στα υψηλότερα σημεία των τροχιών κατά τη διάρκεια της ανταλλαγής και έτσι στην πράξη χρησιμοποιείται ένας ακόμη δορυφόρος προκειμένου να διασφαλιστεί η πλήρης κάλυψη. Για τον λόγο αυτό, ο σχηματισμός JOCOS συχνά αναφέρεται και ως 6+1 JOCOS constellation (Mortari et al., 2004).

5.2.4 LOOPUS Constellations

Οι λεγόμενοι σχηματισμοί LOOPUS (*quasi-geostationary Loops in Orbit Occupied Permanently by Unstationary Satellites*) αποτελούνται από κυκλικές ή τροχιές ΗΕΟ. Η λογική ενός τέτοιου σχηματισμού επικεντρώνει σε λύσεις όπου οι δορυφόροι φαίνονται να ακολουθούν την ίδια φαινόμενη τροχιά, στην οποία οι διαδοχικές θέσεις του δορυφόρου σε συνδυασμό με την περιστροφή της Γης φαίνεται να δημιουργούν κλειστούς βρόχους (*loops*) στην ουράνια σφαίρα. Οι δορυφόροι είναι διατεταγμένοι κατά τέτοιο τρόπο, ώστε δύο δορυφόροι να διέρχονται από την τομή του βρόχου (intersection of the loop) σχεδόν ταυτόχρονα, (ο ένας εισερχόμενος και ο άλλος εξερχόμενος από τον βρόχο). Το 1984 ορίστηκαν από τον Peter Dondl (1984) οι αναγκαίες παράμετροι που περιγράφουν ένα σύστημα LOOPUS: ο αριθμός των θέσεων LOOPUS (n), ο αριθμός των δορυφόρων (m), η περίοδος περιστροφής του δορυφόρου (T_o) και το χρονικό διάστημα παραμονής του δορυφόρου στο βρόχο (dwelling time interval- T_d).

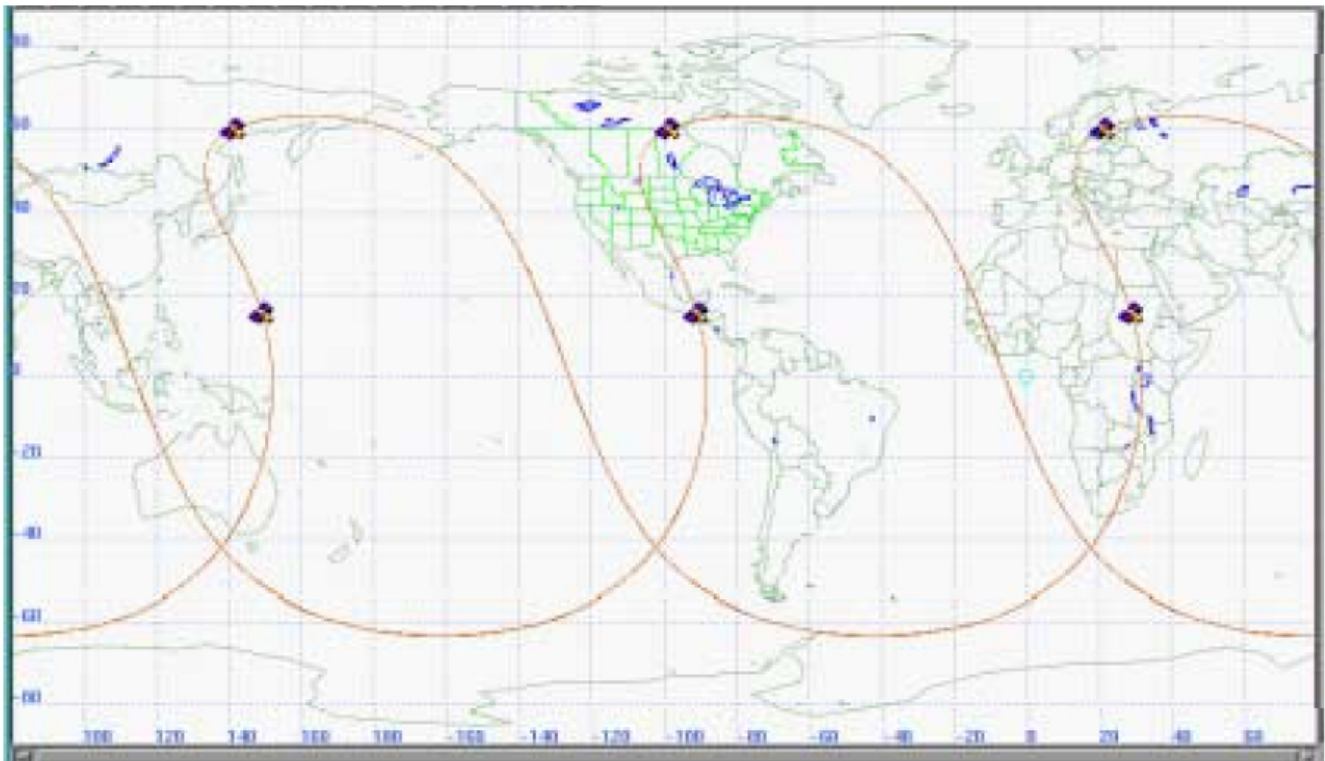


Σχήμα 96: Ενδεικτική LOOPUS τροχιά ενός δορυφόρου, όπου φαίνεται η κίνηση του εξ αιτίας της γήινης περιστροφής από έναν παρατηρητή στη Γη κατά τη διάρκεια 24 ωρών (Pelton, 2013).

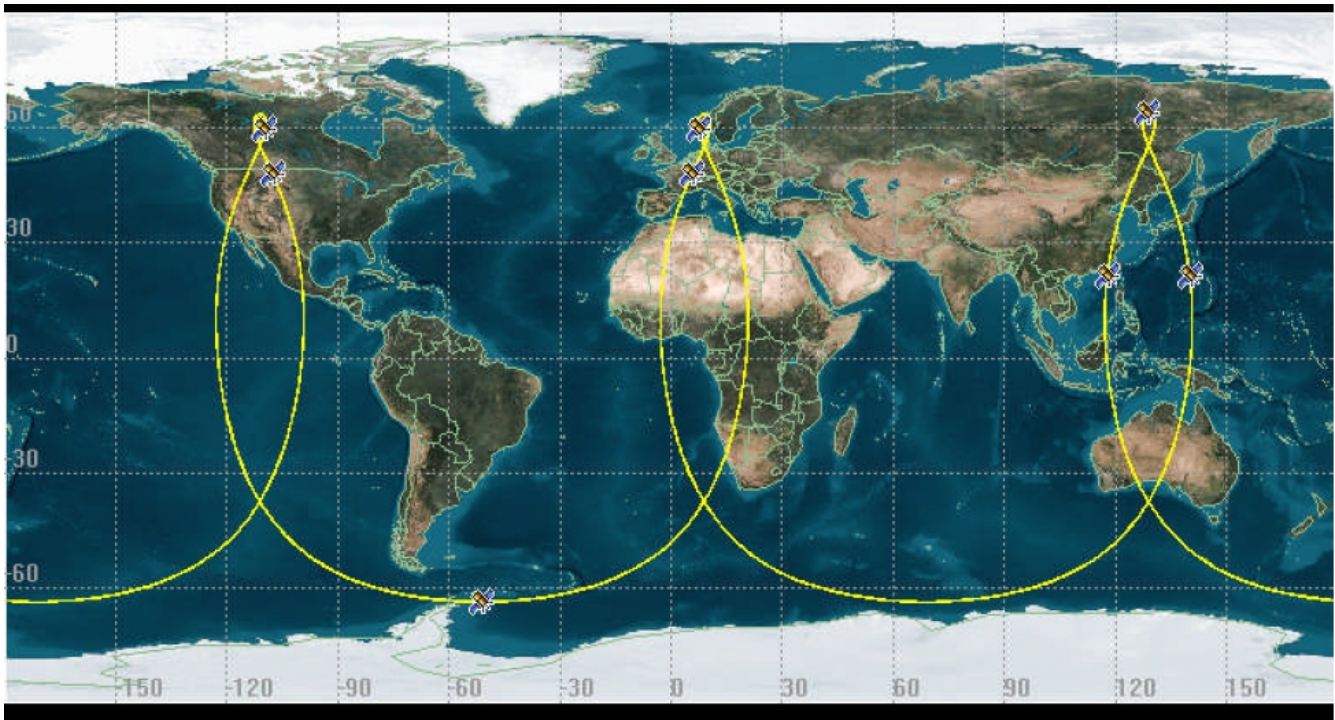
Στη γενική περίπτωση, για μη κυκλικές τροχιές, ως κλίση του τροχιακού επιπέδου επιλέγεται η κρίσιμη τιμή $i=63.4^\circ$. Έτσι, για τιμές των $n=2$, $m=3$, $T_o=12$ hr και $T_d=8$ hr, θα προκύψει ένας σχηματισμός δορυφόρων, οι οποίοι θα βρίσκονται σε τροχιές Molniya και θα έχουν ομοιόμορφα κατανεμημένους δεσμούς στο επίπεδο του ισημερινού ανά 120° .

5.2.5 COMBRA

Ο σχηματισμός COMBRA teardrop (Communications Orbiting Broadband Repeating Arrays) περιλαμβάνει δύο σχηματισμούς MIO όπου το όρισμα του περιγείου δεν έχει τις τιμές 90° ή 270° , τιμές που θα εξασφάλιζαν ότι η θέση του απογείου θα βρισκόταν πάντα πάνω από το νότιο ή το βόρειο ημισφαίριο αντίστοιχα. Επιλέγοντας άλλες τιμές για το όρισμα του περιγείου δημιουργείται μία διαφορετική κλίση στο επίγειο ίχνος (Σχήμα 97). Συνδυάζοντας 2 τροχιές με επαναλαμβανόμενα ίχνη, ένα από τα οποία να έχει ανιούσα κλίση και το άλλο κατιούσα, δημιουργείται ένα σχήμα που προσομοιάζει σε δάκρυ (“teardrop”), το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 98. Τέτοιοι σχηματισμοί χρησιμοποιούνται συνήθως για τους τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους και όπως και στην περίπτωση της λογικής του σχηματισμού LOOPUS, τα σημεία τομής χρησιμοποιούνται για να γίνει η μεταβίβαση των τηλεπικοινωνιακών αρμοδιοτήτων (*telecommunication responsibilities*) μεταξύ των δορυφόρων του σχηματισμού.



Σχήμα 97: Αριστερά κεκλιμένο επίγειο ίχνος ενός σχηματισμού COMBRA αποτελούμενου από 6 δορυφόρους (Draim et al., 2001)



Σχήμα 98 : Σχηματισμός τύπου Droplet αποτελούμενος από 8 δορυφόρους (Draim, 2009).

5.3 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ των FC

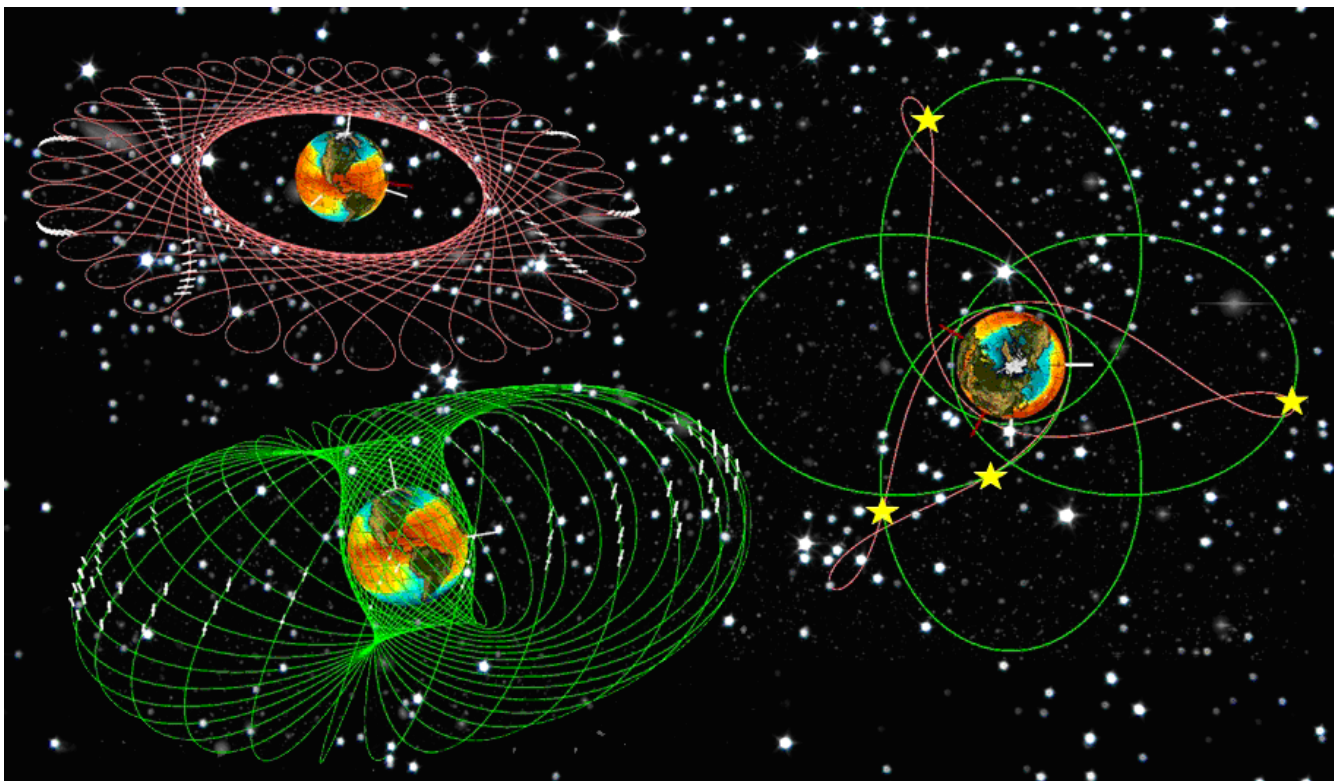
Μελετώντας όλους τους παραπάνω σχηματισμούς οι Mortari et al. (2004) πρότειναν την ενοποίηση του συστήματος Four Leaf Clover και άλλων επιμέρους σχηματισμών όπως οι παραπάνω, εισάγοντας τα Flower Constellations. Τα βασικά χαρακτηριστικά όλων των επιμέρους τροχιών των δορυφόρων που συνθέτουν ένα FC συνοψίζονται στα εξής:

- Έχουν πανομοιότυπο σχήμα τροχιάς, καθορισμένο από την ανωμαλιστική περίοδο (T), το όρισμα του περιγείου (ω), το ύψος του περιγείου (h_p) και την κλίση του τροχιακού επιπέδου (i). Όλοι οι δορυφόροι χαρακτηρίζονται από την ίδια κλίση του τροχιακού τους επιπέδου, η οποία ισούται συνήθως, και για τις ελλειπτικές τροχιές, με μία από τις δύο κρίσιμες τροχιακές κλίσεις (*critical inclinations*) $i=63,4^\circ$ ή $i=116,6^\circ$. Η κρίσιμη κλίση οδηγεί στον μηδενισμό του ρυθμού μεταβολής του ορίσματος του περιγείου με το χρόνο ($\omega'=0$), γεγονός που οδηγεί σε σταθεροποίηση του άξονα των αψίδων (*apsidal line*) ως προς το χρόνο. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της ανάγκης για ελιγμούς των δορυφόρων, που θα απαιτούνταν προκειμένου να μην αποδομηθεί ο σχηματισμός λόγω της περιστροφής της γραμμής των αψίδων του κάθε τροχιακού επιπέδου.
- Όλες οι τροχιές είναι συμβατές μεταξύ τους, που σημαίνει ότι η περίοδος περιστροφής (*orbital period*) επιλέγεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να προκύπτει ένα επακριβώς επαναλαμβανόμενο επίγειο ίχνος του σχηματισμού. Αυτό γίνεται, λαμβάνοντας υπόψη τις διαταραχές στις τροχιές των δορυφόρων (όπως, παραδείγματος χάριν, εξ αιτίας της γήινης επιπλάτυνσης που εκφράζεται

από την επίδραση του αρμονικού όρου J_2 στο ανάπτυγμα του γήινου δυναμικού) και ενσωματώνοντας τες στους υπολογισμούς (περιλαμβάνοντας στις σχέσεις υπολογισμού των επιμέρους τροχιακών στοιχείων, τους ρυθμούς μεταβολής τους με το χρόνο).

- Για ένα συμμετρικό (*axial-symmetric*) FC, οι μεταξύ των δορυφόρων του σχηματισμού γραμμές που συνδέουν τον ανιόντα και τον κατιόντα δεσμό (*nodal lines*) της τροχιάς του κάθε δορυφόρου είναι ομοιόμορφα (*equally*) κατανεμημένες στο ισημερινό επίπεδο. Μη συμμετρικά FCs έχουν δορυφόρους με ορθές αναφορές (RAAN) που είναι ακέραια πολλαπλάσια η μία της άλλης.

Επειδή η προκύπτουσα διαδρομή της τροχιάς (*orbit path*) όπως παρατηρείται από ένα ECF πλαίσιο αναφοράς προσομοιάζει το σχήμα των πετάλων ενός λουλουδιού, οι σχηματισμοί που προκύπτουν ονομάστηκαν από τους συγγραφείς Flower Constellations (Σχήμα 99).



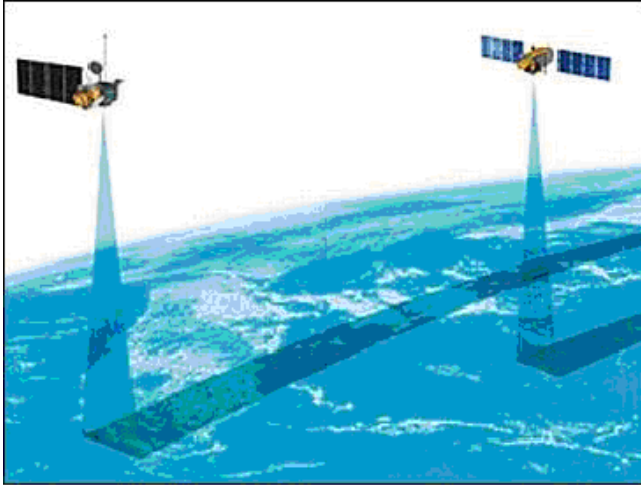
Σχήμα 99: Οι σχετικές τροχιές διαφόρων Flower Constellations όπως απεικονίζονται στον τρισδιάστατο χώρο (αριστερά) και σε μία πολική προβολή (δεξιά) (Πηγή:

<http://mortari.tamu.edu/Flower-Constellations/Flower%20Constellation%20Poster.jpg> και ίδια επεξεργασία).

5.3.1 Επαναλαμβανόμενα επίγεια τροχιακά ίχνη (*Repeat Ground Track*)

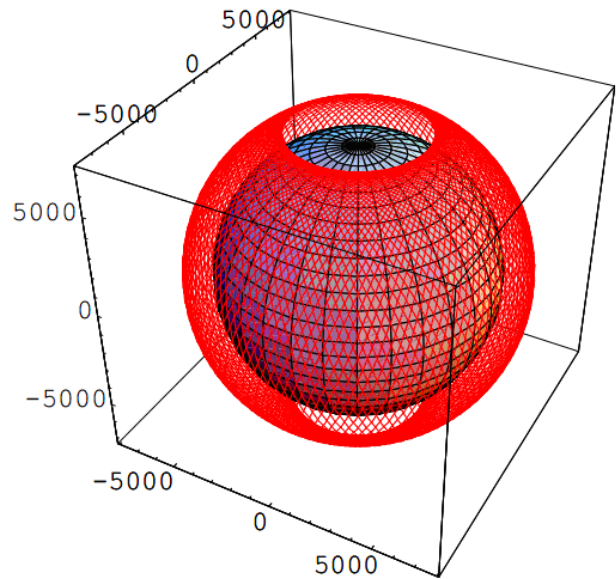
Καθώς ένας δορυφόρος κινείται στη τροχιά του, το ίχνος που διαγράφει το εκάστοτε σημείο της προβολής του δορυφόρου στην επιφάνεια της Γης, αποτελεί ένα καθοριστικό παράγοντα σχεδιασμού

της τροχιάς ενός δορυφόρου. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε διάφορες αποστολές δορυφόρων παρατήρησης της Γης, όπως εκείνες των αλτιμετρικών δορυφόρων (ERS-1 και -2, TOPEX/Poseidon, Geosat, Jason-1 και -2, Envisat, κ.ά.) για τις οποίες το διάστημα επανάληψης του επίγειου ίχνους διασφαλίζει εν πολλοίς και το ποσοστό κάλυψης της γήινης επιφάνειας με μετρήσεις της κατάστασης των θαλασσών, όπως φαίνεται ενδεικτικά στα σχήματα 100 και 101.



Σχήμα 100: Οι δορυφόροι των αποστολών Jason 1 και Topex Poseidon. Πηγή:

http://www.eoportal.org/directory/pres_Jason1AltimetryMission.html



Σχήμα 101: Ονομαστική τροχιά του δορυφόρου TOPEX (Lara & Russel, 2008).

Γενικά, μια τροχιά μπορεί να σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το ίχνος της πάνω στην γήινη επιφάνεια να επαναλαμβάνεται μετά από μία πλήρη περιστροφή της Γης. Σε ιδεατές συνθήκες, αυτό που πρέπει να διασφαλιστεί είναι ότι η δεσμική περίοδος (*nodal period*), δηλαδή το χρονικό διάστημα (T_d) μεταξύ διαδοχικών διελεύσεων του δορυφόρου από το σημείο/δεσμό ανάβασης ή κατάβασης της τροχιάς, ταυτίζεται με την λεγόμενη δεσμική περίοδο του Greenwich, $T_{\Omega G}$, (*Nodal Period of Greenwich*), η οποία εκφράζει το ποσοστό περιστροφής της Γης σε σχέση με το δεσμό ανάβασης ή κατάβασης και υπολογίζεται από την εξίσωση 36 που αναφέρεται αργότερα.

Είναι επίσης δυνατό η τροχιά να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε το τροχιακό επίγειο ίχνος να επαναλαμβάνεται αφότου οι δορυφόροι ολοκληρώσουν έναν ακέραιο αριθμό N_p περιστροφών σε N_d ημέρες. Τότε η περίοδος επανάληψης T_r (*period of repetition*) δίνεται από την σχέση:

$$T_r = N_p \cdot T_{\Omega} = N_d \cdot T_{\Omega G} \quad (35)$$

όπου, στην προκειμένη περίπτωση, ο αριθμός των περιστροφών που θα έχει πραγματοποιήσει ο δορυφόρος ισούται με τον αριθμό των πετάλων (*number of petals*) που εμφανίζονται γύρω από την Γη σε ένα γήινο πλαίσιο αναφοράς (ECF).

Στην πράξη, η διαδικασία προσδιορισμού των τροχιακών στοιχείων που ικανοποιούν αυτές τις συνθήκες για την κίνηση του δορυφόρου ακολουθεί την εξής σειρά:

- Αρχικά πρέπει να προσδιοριστεί μία σχέση ανάμεσα στην ανωμαλιστική περίοδο (T) και την δεσμική περίοδο T_Ω . Η ανωμαλιστική περίοδος ορίζεται ως η χρονική περίοδος μεταξύ διαδοχικών διελεύσεων του δορυφόρου από το περίγειο του, στην διάρκεια της οποίας το περίγειο έχει μετακινηθεί εξ αιτίας των βαρυτικών διαταραχών που προκαλεί η επιπλάτυνση της Γης.
- Αφότου προσδιοριστεί η ανωμαλιστική περίοδος, μετά μπορεί να προσδιοριστεί ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης, a (που είναι κοινός για όλες τις τροχιές). Η εκκεντρότητα της τροχιάς, e , προσδιορίζεται από τον a και ένα επιλεγμένο υψόμετρο του περιγείου, h_p (perigee altitude), που καθορίζεται από το είδος και τις ανάγκες της εκάστοτε αποστολής.

Αφού καθοριστεί και η εκκεντρότητα της τροχιάς, έχει πλέον προσδιοριστεί πλήρως το σχήμα της και απομένει ο προσανατολισμός της στον χώρο.

5.3.2 Εύρεση της Δεσμικής Περιόδου

Ο Carter (1991) ορίζει την δεσμική περίοδο του Greenwich ως:

$$T_{\Omega G} = \frac{2\pi}{\Omega_{ΓΗΣ} - \Omega'} \quad (36)$$

όπου ο όρος $\Omega_{ΓΗΣ}$ είναι ο ρυθμός περιστροφής της Γης που ισούται με $\Omega_{ΓΗΣ} = 7.29211585530 \times 10^{-5}$ rad/sec, και Ω' (nodal regression) είναι η μεταβολή στην ορθή αναφορά εξ αιτίας της μετάπτωσης του τροχιακού επιπέδου του δορυφόρου που οφείλεται στις βαρυτικές διαταραχές που προκαλεί η επιπλάτυνση της Γης.. Καθώς οι τροχιές που πραγματεύονται οι Mortari et al. (2004) επαναλαμβάνονται σε ένα μικρό τμήμα ενός έτους, δεν λαμβάνουν υπόψη τις αντίστοιχες βαρυτικές επιδράσεις στον δορυφόρο εξ αιτίας του Ήλιου και της Σελήνης.

Ακολουθώντας την ανάλυση που παρουσίασε ο Vallado (2001), η δεσμική περίοδος ενός δορυφόρου ως συνάρτηση της ανωμαλιστικής περιόδου του, T, υπολογίζεται από την σχέση:

$$T_{\Omega} = T \cdot \left(1 + \frac{M_o' + \omega'}{n} \right)^{-1} \quad (37)$$

όπου n είναι η μέση κίνηση του δορυφόρου, M_o' είναι ο ρυθμός μεταβολής της μέσης ανωμαλίας λόγω διαταραχών και ω' είναι ο ρυθμός μεταβολής στο όρισμα του περιγείου λόγω διαταραχών στην τροχιά του δορυφόρου.

Επίσης από την θεωρία που αφορά στις βαρυτικές διαταραχές (*geopotential perturbation theory*) μπορούν να βρεθούν οι μαθηματικές εκφράσεις που αφορούν στα M_o' , ω' και Ω' . Εάν ληφθούν υπόψιν μόνο οι δεύτερης τάξης επιδράσεις αρμονικών ζώνης (second order zonal effects) στο ανάπτυγμα του γήινου δυναμικού τότε προκύπτουν οι εκφράσεις:

$$\begin{aligned} \omega' &= \zeta \cdot n \cdot (4 - 5 \sin^2 i) \\ \Omega' &= -2 \cdot \zeta \cdot n \cdot \cos i \\ M_o' &= -\zeta \cdot n \cdot \sqrt{1 - e^2} (3 \sin^2 i - 2) \end{aligned} \quad , \text{ όπου } \zeta = \frac{3 \cdot R_{ΓΗΣ}^2 \cdot J_2}{4 p^2} \quad (38)$$

όπου $R_{ΓΗΣ}=6378.1363$ km είναι η μέση ακτίνα της Γης και $J_2=1.0826269 \times 10^{-3}$ ο δεύτερης τάξης συντελεστής ζώνης που αφορά στην επιπλάτυνση της Γης, p είναι η ημιπαράμετρος (*semi-parameter*) της τροχιάς και i είναι η κλίση του τροχιακού επιπέδου.

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις των ω', Ω' και M_o' των εξισώσεων (38) στην σχέση (37) οδηγούμαστε στην παρακάτω σχέση (39):

$$T_{\Omega} = T \{ 1 + \zeta [4 + 2 \sqrt{1 - e^2} - (5 + 3 \sqrt{1 - e^2}) \sin^2 i] \}^{-1} \quad (39)$$

η οποία συνδέει την ανωμαλιστική με την δεσμική περίοδο (Mortari et al., 2004).

5.3.3 “Πάγωμα” Τροχιών με επαναλαμβανόμενο ίχνος (*Frozen Repeat Groundtrack Orbits*)

Καθώς η γη δεν είναι μία τέλεια σφαίρα, οι δορυφόροι που περιστρέφονται γύρω της, στην πραγματικότητα υποβάλλονται σε ποικίλες άλλες διαταραχές, οι οποίες οδηγούν σε πιο πολύπλοκες μεταβολές των τροχιακών στοιχείων με το πέρασμα του χρόνου και εμποδίζουν το επίγειο ίχνος του δορυφόρου από το να επαναληφθεί επακριβώς. Το δυναμικό του πεδίου βαρύτητας που παράγεται από τη μη σφαιρικότητα της Γης προκαλεί περιοδικές μεταβολές σε όλα τα τροχιακά στοιχεία.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι κύριες επιδράσεις είναι οι μακροπρόθεσμες διαταραχές της τροχιάς εξ αιτίας του εξογκώματος της Γης στον ισημερινό που ουσιαστικά προσθέτει μία επιπλέον συνιστώσα δύναμης λόγω βαρυτικής έλξης που επηρεάζει μόνο το όρισμα του περιγείου (ω), την ορθή αναφορά του ανιόντα δεσμού (Ω) και την μέση ανωμαλία (M) – με κύρια επίπτωση ότι η τροχιά οπισθοδρομεί κατά ένα μικρό ποσοστό με κάθε περιστροφή του δορυφόρου. Η μη περιοδική μεταβολή (*secular effect*) στο καθένα από αυτά τα τροχιακά στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη μόνο την επίδραση του αρμονικού όρου J_2 δίνονται από το σύστημα των εξισώσεων (38). Είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί και πιο εκτεταμένη ανάλυση που να συμπεριλαμβάνει πέρα από τις αρμονικές ζώνης, τεσσαροειδείς αρμονικές και αρμονικές τομέα (Δεληκαράογλου, 2010), μόνο που οι σχέσεις οι σχέσεις που θα προκύψουν θα είναι σαφώς πιο σύνθετες (Kaula, 1966; Tolson, 2005), όπως υποδηλώνεται και από τον Πίνακα 30, και για το λόγο αυτό συνήθως δεν χρησιμοποιούνται καθόλου στην ανάλυση των Flower Constellations.

Στην πράξη, μέσω της σωστής επιλογής των παραμέτρων της τροχιάς είναι δυνατή η εξάλειψη ή έστω η ελαχιστοποίηση της επίδρασης των εν λόγω διαταραχών. Υπό αυτή την έννοια, όταν επιλέγονται εκείνες οι παράμετροι οι οποίες ελαχιστοποιούν ή εξαλείφουν μία γνωστή διαταραχή, τότε λέγεται ότι η τροχιά θεωρείται ως “παγωμένη” (*frozen orbit*).

Table 4.4. Perturbations due to the earth's gravity field

Parameter	Secular	Long-periodic	Short-periodic
a	no	no	yes
e	no	yes	yes
i	no	yes	yes
Ω	yes	yes	yes
ω	yes	yes	yes
M	yes	yes	yes

Πίνακας 30: Διαταραχές λόγω του πεδίου βαρύτητας της Γης. Πηγή: http://www.people.iup.edu/jbenhart/SKMBT_42009010712300.pdf

Για παράδειγμα, η μεταβολή του ορίσματος του περιγείου θα έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση της γραμμής των αψίδων, η οποία με τη σειρά της θα άλλαζε τα άκρα όσον αφορά το γεωγραφικό πλάτος της γήινης περιοχής που καλύπτει η συγκεκριμένη τροχιά. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί εισάγοντας την κατάλληλη κλίση του τροχιακού επιπέδου (μία από τις δύο κρίσιμες τιμές- critical inclination) $i=63.4^\circ$ ή $i=116.6^\circ$, η οποία μηδενίζει τον ρυθμό μεταβολής του ορίσματος $\dot{\omega}=0$.

Για το λόγο αυτό στις περισσότερες περιπτώσεις σχεδιασμού FC οι σχεδιαστές τους χρησιμοποιούν μία από τις 2 κρίσιμες τιμές της κλίσης του τροχιακού επιπέδου. Έτσι η εξίσωση (39) απλοποιείται και γράφεται:

$$T_{\Omega} = T \{ 1 + \zeta [(2 - 3\sin^2 i) \sqrt{1 - e^2}] \}^{-1} \quad (40)$$

Κατά συνέπεια, η αλλαγή στον ανιόντα δεσμό (Ω') θα προκαλέσει μία μετακίνηση στο γεωγραφικό μήκος (longitudinal shift) στο επίγειο ίχνος της τροχιάς. Η επίδραση αυτή μπορεί να εξαλειφθεί πλήρως μέσω της κατάλληλης επιλογής της ανωμαλιστικής περιόδου T . Αντικαθιστώντας την εξίσωση (40) στην εξίσωση (35) προκύπτει:

$$T = \frac{N_d}{N_p} T_{\Omega G} \{ 1 + \zeta [(2 - 3\sin^2 i) \sqrt{1 - e^2}] \} \quad (41)$$

και αντικαθιστώντας την δεσμική περίοδο του Greenwich και μετά από αλγεβρικές πράξεις:

$$T = \frac{2\pi\tau}{\omega_{ΓΗΣ}} \left(1 + 2\xi \frac{n}{\omega_{ΓΗΣ}} \cos i\right)^{-1} \{1 + \xi [(2 - 3\sin^2 i) \sqrt{1 - e^2}]\} \quad (42)$$

όπου $\tau = \frac{N_d}{N_p}$ είναι μία από τις βασικές παραμέτρους για τον σχεδιασμό ενός FC (Wilkins, 2004).

5.3.4 Επίλυση των a και e

Θεωρώντας ότι η κλίση του τροχιακού επιπέδου έχει καθοριστεί η εξίσωση (42) είναι ουσιαστικά μία εξίσωση ως προς έναν άγνωστο, τον μεγάλο ημιάξονα της έλλειψης a . Όλες οι άλλες παράμετροι της τροχιάς μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει του a :

$$e = 1 - \frac{R_{ΓΗΣ} + h_p}{a} \quad (43)$$

όπου h_p είναι το ύψος του περιγείου που καθορίζεται ανάλογα με τις ανάγκες και τις προδιαγραφές της αποστολής. Επίσης η ημιπαράμετρος της έλλειψης προκύπτει ίση με:

$$p = a(1 - e^2) = 2(R_{ΓΗΣ} + h_p) - \frac{(R_{ΓΗΣ} + h_p)^2}{a} \quad (44)$$

Η ανωμαλιστική περίοδος και η μέση κίνηση δίνονται από τη σχέση:

$$T = \frac{2\pi}{n} = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \quad (45)$$

όπου $\mu = 398600.4415 \text{ km}^3/\text{sec}^2$. Χρησιμοποιώντας έναν οποιονδήποτε λογισμικό αριθμητικής λύσης (*numerical solver*) είναι δυνατή η επίλυση ως προς τον μεγάλο ημιάξονα a . Μόλις καθοριστεί ο μεγάλος ημιάξονας, προκύπτουν εύκολα η απαιτούμενη εκκεντρότητα και η ανωμαλιστική περίοδος. (D. Mortari, P. Wilkins, 2008)

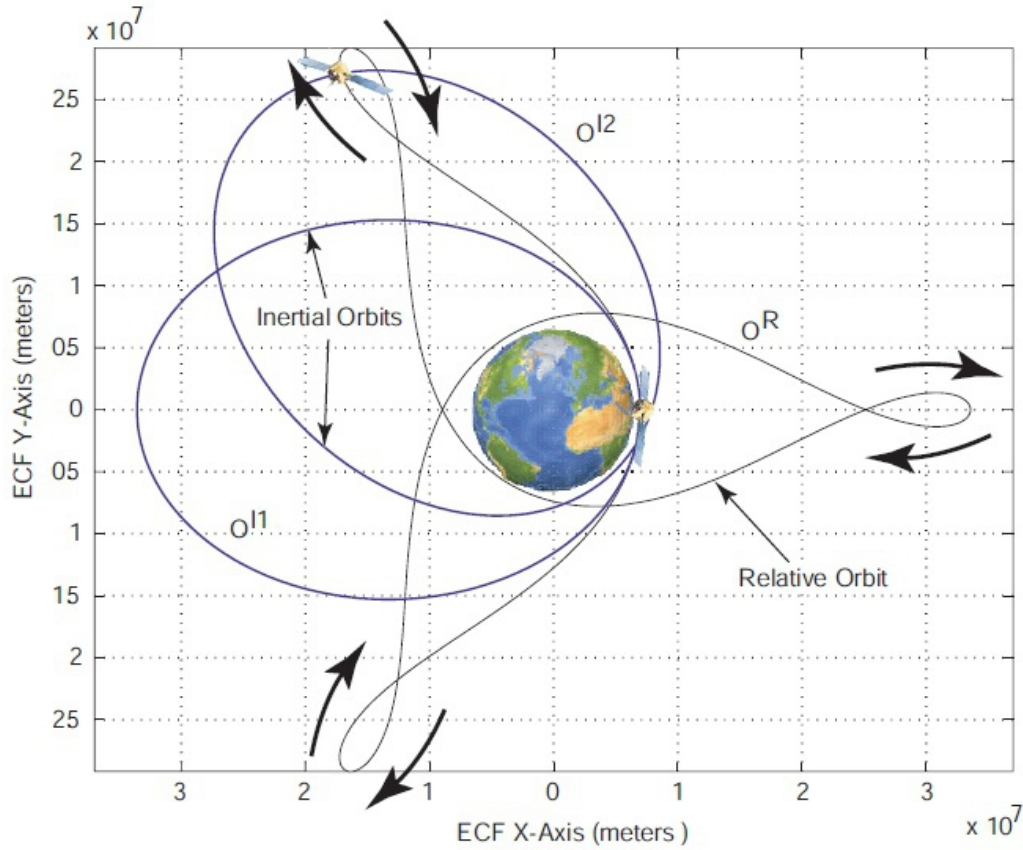
5.3.5 Satellite Phasing

Η ρύθμιση της “φάσης” ή κατανομής των δορυφόρων είναι κρίσιμη προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα και πραγματοποιείται μέσω της εισαγωγής μίας άμεσης σχέσης μεταξύ της ορθής αναφοράς του ανιόντος δεσμού Ω και της Μέσης Ανωμαλίας την αρχική χρονική στιγμή $M(0)$. Αυτή η σχέση είναι η ίδια για οποιονδήποτε δορυφόρο ανήκει στον σχηματισμό.

Προκειμένου να εισαχθεί αυτή η σχέση θα χρησιμοποιηθούν εξίσου η αδρανειακή τροχιά (*inertial orbit*) του δορυφόρου και η λεγόμενη σχετική τροχιά του (*relative orbit*). Συγκεκριμένα, αρχικά προσδιορίζεται η επαναλαμβανόμενη τροχιά O^{I1} του δορυφόρου όπως παρατηρείται σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς (ECI) και χαρακτηρίζεται από τα τροχιακά στοιχεία $\Omega, \omega, i, \alpha, e$. Έστω ότι O^{R1} είναι η σχετική τροχιά του δορυφόρου (όπως παρατηρείται από ένα γήινο σύστημα- ECF) με μία αρχική θέση στην τροχιά που προσδιορίζεται από μία συγκεκριμένη τιμή M_1 της μέσης ανωμαλίας

Ο δορυφόρος θα πρέπει να ανήκει προφανώς και στις 2 τροχιές O^{I1} και O^{R1} . Συνεπώς, ο δορυφόρος θα πρέπει να βρίσκεται σε μία από τις τομές των δύο τροχιών. Ας σημειωθεί ότι σε ένα ECI σύστημα αναφοράς η τροχιά O^{I1} θα απεικονίζεται παγιωμένη, ενώ η τροχιά O^{R1} θα περιστρέφεται αντίθετα με τη φορά του ρολογιού (δηλαδή δυτικόστροφα) με την ταχύτητα περιστροφής της Γης. Αντίστοιχα σε ένα ECF σύστημα αναφοράς η δυναμική της κίνησης του δορυφόρου θα είναι ανεστραμμένη, με την O^{R1} τροχιά να εμφανίζεται παγιωμένη και την O^{I1} να περιστρέφεται σύμφωνα με τη φορά του ρολογιού και με ταχύτητα περιστροφής ίση με την ταχύτητα περιστροφής της Γης.

Ας θεωρήσουμε επιπλέον ακόμη μία τροχιά O^{I2} η οποία είναι παραδεκτή (*admissible*) ως προς την τροχιά O^{I1} , όπου παραδεκτή σημαίνει ότι τα τροχιακά στοιχεία (ω, α, i, e) είναι κοινά για τις δύο τροχιές και ότι διαφέρουν μόνο ως προς την ορθή αναφορά Ω . Εάν δύο τροχιές δεν είναι παραδεκτές δεν υπάρχει καμία περίπτωση να μπορούν να συμπίσουν οι σχετικές τροχιές τους.



Σχήμα 102: Σχετικές και Αδρανειακές τροχιές 1 και 2. (Πηγή: Wilkins, 2004)

Το πρόβλημα, στη συγκεκριμένη περίπτωση, έγκειται στην εύρεση της αρχικής μέσης ανωμαλίας $M_2(0)$ του δορυφόρου που ανήκει στην O^2 τροχιά που παράγει την ίδια σχετική τροχιά ($O^{R2}=O^{R1}$) με εκείνη του δορυφόρου της τροχιάς O^1 με αρχική μέση ανωμαλία $M_1(0)$. Το πρόβλημα είναι αντίστοιχο με την εύρεση της θέσης του δορυφόρου στο ECF σύστημα αναφοράς ούτως ώστε $O^1(t)=O^2(0)$. Έστω ότι Ω_1 και Ω_2 είναι οι ορθές αναφορές (RAAN) των δύο τροχιών O^1 και O^2 αντίστοιχα. Τότε η τροχιά $O^1(\Delta t)$ θα “φτάσει” την τροχιά $O^2(0)$ μετά από χρονικό διάστημα:

$$\Delta t = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\omega_{ΓΗΣ} + \Omega'} \quad (46)$$

όπου Ω' είναι ο ρυθμός μεταβολής της ορθής αναφοράς εξ αιτίας της μετάπτωσης του τροχιακού επιπέδου (nodal precession rate of change). Μετά από χρονικό διάστημα Δt η μέση ανωμαλία θα έχει αυξήσει την τιμή της κατά:

$$\Delta M = (n + M_0') \cdot \Delta t \quad (47)$$

Επομένως, προκειμένου η τροχιά O^1 να είναι παραδεκτή με την τροχιά O^2 θα πρέπει ο δορυφόρος δύο να έχει αρχική μέση ανωμαλία:

$$M_2(0) = M_1(0) + (n + M_0') \Delta t = M_1(0) + (n + M_0') \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\omega_{\Gamma H \Sigma} + \Omega'} \quad (48)$$

Κανείς μπορεί να εξετάσει την δυναμική ενός δορυφόρου που τοποθετείται στα σημεία τομής μεταξύ της σχετικής και της αδρανειακής τροχιάς. Περιστρέφοντας την τροχιά O^{R1} γύρω από την τροχιά O^{I1} , κάθε σημείο τομής έχει την δική του δυναμική, που μπορεί να είναι ή και να μην είναι εφικτή στην πραγματικότητα (physically realizable). Μπορεί ωστόσο να αποδειχτεί ότι, για περίοδο περιστροφής ίση με μία ημέρα, μονάχα ένα από τα σημεία τομής έχει την σωστή δυναμική²¹. Στην πραγματικότητα για κάθε επιπλέον μέρα που απαιτείται για να επαναληφθεί το επίγειο ίχνος υπάρχει ένα επιπλέον σημείο τομής στο οποίο θα ήταν δυνατό να τοποθετηθεί ένας δορυφόρος. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για ένα FC που επαναλαμβάνεται μετά από N_d μέρες δεν μπορούν να τοποθετηθούν περισσότεροι από N_d δορυφόροι σε κάθε τροχιακό επίπεδο. Σε αυτή την περίπτωση, για ένα FC που περιλαμβάνει μία μόνο αδρανειακή τροχιά, η οποία επαναλαμβάνεται κάθε N_d μέρες η σχέση (15) γίνεται:

$$M_{k+1}(0) = M_k(0) + 2\pi \frac{(n + M_0')}{\omega_{\Gamma H \Sigma} + \Omega'}, \quad \text{για } k = 1, 2, \dots, N_d - 1 \quad (49)$$

5.3.5.1 Συμμετρικός Σχεδιασμός

Ο συμμετρικός σχεδιασμός κατανομής (*symmetric phasing scheme*), που έχει υιοθετηθεί προς χρήση από τους δημιουργούς των FC, και αποτελείται από N_s δορυφόρους δίνεται από τις σχέσεις:

$$\Omega_{k+1} = \Omega_k - 2\pi \frac{F_n}{F_d} \quad (50)$$

$$M_{k+1}(0) = M_k(0) + 2\pi \frac{F_n}{F_d} \left(\frac{n + M_0'}{\omega_{\Gamma H \Sigma} + \Omega'} \right) \quad (51)$$

όπου $k = 1, 2, 3, \dots, N_s - 1$, οι παράμετροι F_n και F_d είναι δύο ακέραιες παράμετροι που μπορούν να επιλεγούν ελεύθερα αρκεί το $F_n \in \mathbb{Z}$ και $F_d \in \mathbb{N}$ και οι παράμετροι $M_1(0)$ και $\Omega_1(0)$ (οι οποίες εκχωρούνται από τον σχεδιαστή του FC) υπαγορεύουν την αρχική θέση του πρώτου δορυφόρου και την γωνιακή στροφή της σχετικής τροχιάς αντίστοιχα.

Εκφράζοντας τα n , M_0' και Ω' ως προς τα τροχιακά στοιχεία i.e., p και λαμβάνοντας υπόψη μόνο την διαταραχή J2, μετά από μερικές αλγεβρικές πράξεις και αντικαταστάσεις (βλέπε Wilkins, 2004) η σχέση (46) παίρνει τη μορφή:

²¹ Η γωνιακή ορμή $(\vec{r} \times \vec{v})$ διατηρείται στο σημείο όπως και απαιτείται από το πρόβλημα των δύο σωμάτων.

$$M_{k+1}(0) = M_k(0) + 2\pi \frac{F_n}{\tau F_d} \left\{ \frac{[1 - A(\xi)][1 - \xi \sqrt{1 - e^2} (3 \sin^2 i - 2)]}{1 - 4\xi \cos i / \tau} \right\} \quad (52)$$

$$A(\xi) = \xi [4 + 2\sqrt{1 - e^2} - (5 + 3\sqrt{1 - e^2}) \sin^2 i] \quad (53)$$

Εάν αγνοηθούν εντελώς οι διαταραχές στην τροχιά τότε προκύπτουν οι σχέσεις (54) και (55), οι οποίες εκφράζουν μία πιο απλοποιημένη μορφή των σχέσεων κατανομής (*phasing*) των δορυφόρων:

$$\Omega_{k+1} = \Omega_k + \Delta\Omega, \text{ όπου } \Delta\Omega = -2\pi \frac{F_n}{F_d} \quad (54)$$

$$M_{k+1}(0) = M_k + \Delta M_0, \text{ όπου } \Delta M_0 = 2\pi \frac{F_n}{F_d} \frac{N_p}{N_d} = -\Delta\Omega \frac{N_p}{N_d} \quad (55)$$

5.3.5.2 Μη συμμετρικός σχεδιασμός

Βασισμένοι στην λογική σχεδιασμού σε περιορισμένο διάστημα κατανομής των δορυφόρων (*restricted phasing scheme*) οι σχέσεις καθορισμού της κατανομής προκύπτουν από:

$$\Omega_{k+1} = \Omega_k - \Delta\Omega_k \quad (56)$$

$$M_{k+1}(0) = M_k(0) + \Delta\Omega_k \left(\frac{n + M_o'}{\Omega_{IHS} + \Omega'} \right) \quad (57)$$

όπου από τις σχέσεις 56 και 57 συνεπάγεται ότι η διαφορά στην ορθή αναφορά του ανιόντα δεσμού μεταξύ δύο οποιωνδήποτε δορυφόρων στην ακολουθία τοποθέτησής τους (*placement sequence*) μπορεί να είναι αυθαίρετη, αρκεί στη συνέχεια η μέση ανωμαλία να επιλεγεί καταλλήλως (Wilkins, 2004).

5.3.5.3 Ατελής Σχεδιασμός

Είναι φανερό ότι η αλλαγή του αριθμού των δορυφόρων που απαρτίζουν τον σχηματισμό δεν έχει κάποια ουσιαστική επίδραση στην δυναμική της κίνηση τους μέσα στο σχηματισμό (*overall dynamics*), η οποία καθορίζεται από την συνολική δομή (παράμετροι N_p και N_d) και από την ρύθμιση της κατανομής των δορυφόρων (F_n και F_d). Αφού επιτευχθεί η επιθυμητή δυναμική του σχηματισμού

με την κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού, ο καθορισμός του ελάχιστου επιθυμητού αριθμού των δορυφόρων που απαιτούνται για την επίτευξη του βασικού στόχου της αποστολής είναι μία απλή διαδικασία. Εάν είναι επιθυμητή η αφαίρεση ενός αριθμού δορυφόρων του σχηματισμού, αλλά παράλληλα και η διατήρηση της συνολικής δυναμικής του, τότε αρκεί ο χρήστης να επιλέξει τους περιττούς δορυφόρους και να τους αφαιρέσει από τον σχηματισμό. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει ένας ατελής σχηματισμός FC.

5.3.5.4 Switched Flower Constellations

Κάθε σχηματισμός μπορεί να προκύψει από την γνώση της αρχικής θέσης και της ταχύτητας του κάθε δορυφόρου του κάποια χρονική στιγμή. Αλλάζοντας τα πρόσημα της αρχικής ταχύτητας σε όλους τους δορυφόρους του σχηματισμού, προκύπτει ένας νέος σχηματισμός που είναι κατοπτρικό είδωλο (*mirror image*) του αρχικού. Ο σχηματισμός που προκύπτει θα αποτελείται από *prograde* ή πρόδρομες τροχιές (προς ανατολάς) αν οι τροχιές του αρχικού σχηματισμού ήταν ανάδρομες (*retrograde*- προς δυσμάς) και το αντίστροφο (Wilkins, 2004).

5.4 Επίδραση της τιμής των παραμέτρων του FC στον σχηματισμό

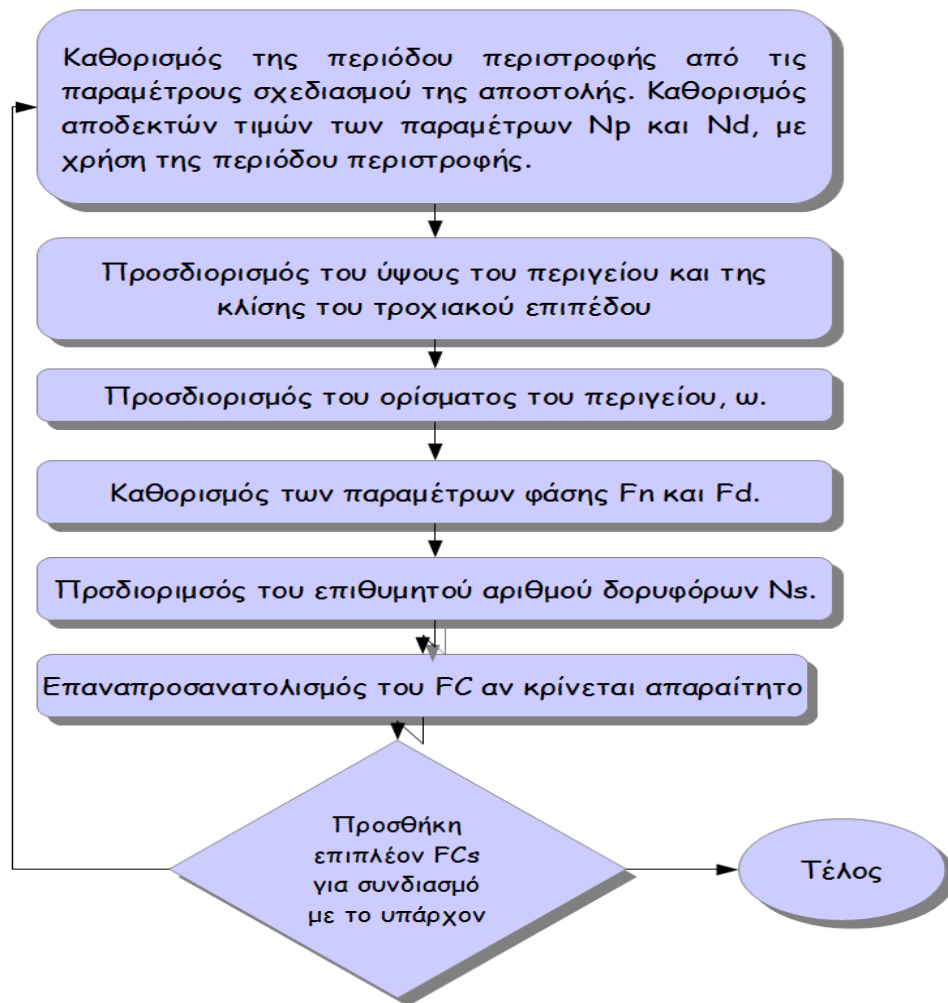
Για να προσδιορίσει κανείς την θέση δύο δορυφόρων που ακολουθούν την ίδια σχετική τροχιά στο διάστημα, με χρήση των παραμέτρων σχεδιασμού ενός FC, είναι απαραίτητος ο καθορισμός έξι παραμέτρων. Οι παράμετροι N_p και N_d προσδιορίζουν τον κοινό μεγάλο ημιάξονα a . Το ύψος του περιγείου σε συνδυασμό με τα N_p και N_d προσδιορίζουν την εκκεντρότητα της τροχιάς. Το όρισμα του περιγείου (ω) και η κλίση του τροχιακού επιπέδου (i) προσανατολίζουν τα τροχιακά επίπεδα. Τέλος προσδιορίζεται η τιμή της ορθής αναφοράς του ανιόντος δεσμού, Ω , για κάθε δορυφόρο, η οποία με τη σειρά της καθορίζει την τιμή της μέσης ανωμαλίας, M , μέσω μίας συναρτησιακής σχέσης (πχ Σχέση 55 για συμμετρικό σχεδιασμό). Ας σημειωθεί ότι οι παράμετροι N_s , F_n , F_d δεν διαδραματίζουν κάποιον ρόλο στην τοποθέτηση των δορυφόρων ενός Flower Constellation. Επίσης ας σημειωθεί ότι για λόγους συντομίας ένα συγκεκριμένο Flower Constellation αναφέρεται ως ένα N_p - N_d - N_s Flower Constellation ή ως ένα N_p - N_d - N_s - F_n - F_d Flower Constellation.

Συνοψίζοντας, ένα Flower Constellation ορίζεται από οχτώ παραμέτρους σχεδιασμού, πέντε από τις οποίες είναι ακέραιες: ο αριθμός των πετάλων N_p , ο αριθμός των αστρικών ημερών που απαιτούνται για την επανάληψη του σχηματισμού N_d , ο αριθμός των δορυφόρων N_s , καθώς και δύο ακέραιους που καθορίζουν την φάση (F_n και F_d), και τρεις τροχιακές παραμέτρους που είναι κοινές για όλους τους δορυφόρους: το όρισμα του περιγείου (ω), η κλίση του τροχιακού επιπέδου (i) και το ύψους του περιγείου (h_p).

Διαδικαστικά, υπάρχουν 4 βασικά στάδια στον σχεδιασμό ενός Flower Constellation. Αρχικά προσδιορίζονται οι τροχιακές παράμετροι (ω, i, h_p). Στην συνέχεια πρέπει να αποφασιστεί η γενική μορφή του σχηματισμού (N_p, N_d). Τρίτον, πρέπει να καθοριστεί η επιθυμητή κατανομή των δορυφόρων (*phasing*) του σχηματισμού (παράμετροι F_n και F_d). Τέλος, εάν είναι επιθυμητό μπορεί να

καθοριστεί ένας νέος άξονας συμμετρίας ως προς τον άξονα περιστροφής της Γης για να προκύψει ένα επαναπροσανατολισμένο FC (*reoriented FC*), χωρίς ωστόσο το βήμα αυτό να είναι απαραίτητο. (Wilkins, 2004)

Στο σχήμα 103 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής που συνοψίζει την βασική διαδικασία που μπορεί να ακολουθεί για τον σχεδιασμό ενός Flower Constellation.



Σχήμα 103: Διάγραμμα Ροής που παρουσιάζει την βασική διαδικασία σχεδιασμού ενός FC (Μεταφρασμένο από Wilkins, 2004)

Παρακάτω γίνεται μία σύντομη περιγραφή της επίδρασης που έχει κάθε μία από τις παραμέτρους σχεδιασμού ενός Flower Constellation στον τελικό σχηματισμό.

5.4.1 Κλίση του τροχιακού επιπέδου (i)

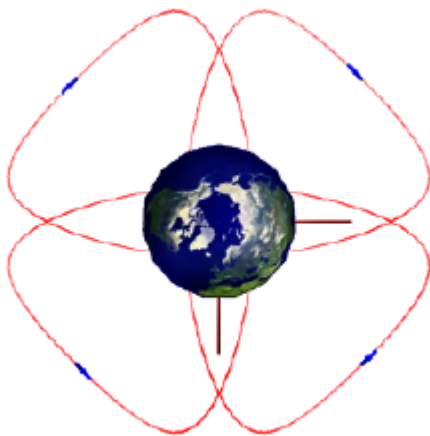
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στις περισσότερες περιπτώσεις, όταν οι τροχιές είναι ελλειπτικές, είναι προτιμότερη η επιλογή μίας από τις κρίσιμες τιμές της κλίσης του τροχιακού επιπέδου προκειμένου να “παγώσει” η τροχιά, δηλαδή να ελαχιστοποιηθεί η μετατόπιση της γραμμής των αψίδων με τον χρόνο.

5.4.2 Όρισμα του περιγείου (ω)

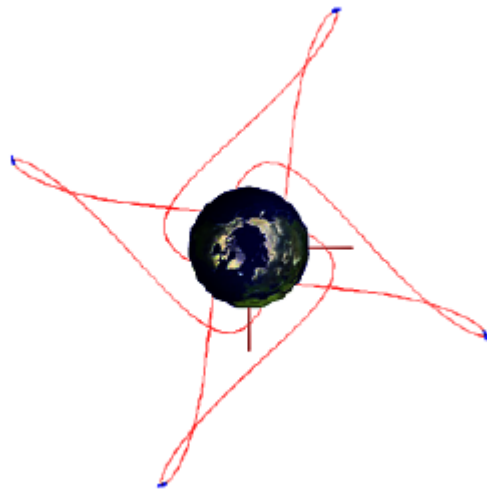
Η προσαρμογή του ορίσματος του περιγείου είναι ένας τρόπος επαναπροσανατολισμού του FC, διατηρώντας όμως ως άξονα συμμετρίας, τον άξονα περιστροφής της Γης. Παρατηρείται ότι διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους ίδιες και μεταβάλλοντας μόνο το ω μεταξύ μερικών “κρίσιμων” τιμών προκύπτει ότι:

- Για $\omega=90^\circ$ ή $\omega=270^\circ$ δημιουργείται ένα FC με τα μεγαλύτερα δυνατά ύψη του απογείου.
- Για $\omega=0^\circ$ ή $\omega=180^\circ$ δημιουργείται ένα FC συμμετρικό ως προς το κάθετο επίπεδο στον άξονα συμμετρίας.
- Για $\omega=45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ ή 315° προκύπτει ένας σχηματισμός με ενδιάμεσα χαρακτηριστικά σε σχέση με τους 2 προηγούμενους (Wilkins et al, 2005).

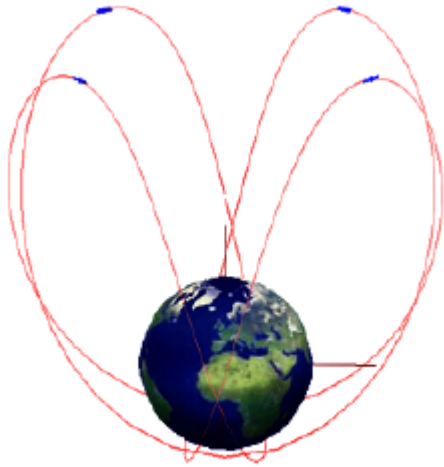
Στα σχήματα 104 έως 107 απεικονίζονται οι σχετικές τροχιές ενός 4-1-4 FC για $\omega=270^\circ$ (σχήματα 104 και 106) και $\omega=225^\circ$ (σχήματα 105 και 107).



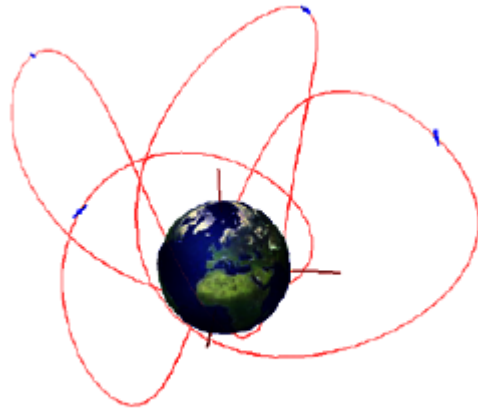
Σχήμα 104: Πολική Προβολή FC με $\omega=270^\circ$ (Wilkins et al, 2005).



Σχήμα 105: Πολική Προβολή FC με $\omega=225^\circ$ (Wilkins et al, 2005).



Σχήμα 106: Ισομετρική Προβολή FC με $\omega=270^\circ$ (Wilkins et al, 2005).



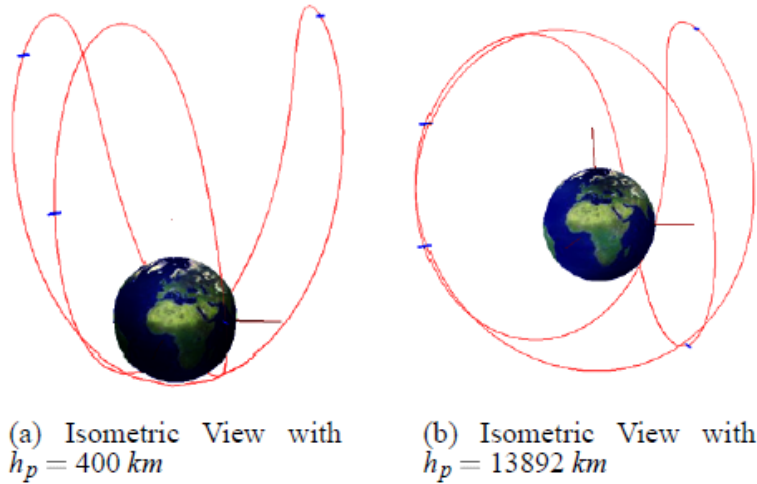
Σχήμα 107: Ισομετρική Προβολή FC με $\omega=225^\circ$ (Wilkins et al, 2005).

5.4.3 Ύψος του περιγείου (h_p)

Το ύψος του περιγείου είναι στενά συνδεδεμένο με τον καθορισμό της εκκεντρότητας της τροχιάς e . Από την ενότητα 5.3.4 υπενθυμίζεται ότι αφού προσδιοριστεί ο ημιάξονας a και ορίζοντας το ύψος του περιγείου προκύπτει από την σχέση (43) η εκκεντρότητα της τροχιάς.

Ουσιαστικά για μία σταθερή τιμή του ημιάξονα a , μειώνοντας την τιμή του h_p προκύπτει μία πιο ελλειπτική τροχιά, ενώ αυξάνοντας την τιμή του το σχήμα της τροχιάς προσεγγίζει περισσότερο έναν κύκλο. Τα FCs τα οποία χαρακτηρίζονται από κυκλικές τροχιές έχουν την σχετική τροχιά τους ισαπέχουσα από την επιφάνεια της Γης, ενώ FCs που χαρακτηρίζονται από ελλειπτικές τροχιές παρουσιάζουν σχετικές τροχιές πιο “στενόμακρες” (*slender and narrow*) με τμήματα της σχετικής τροχιάς να εκτείνονται πολύ μακριά από την επιφάνεια της Γης (Σχήμα 108).

Επιπλέον, η τιμή του h_p έχει επίδραση στην διατήρηση (*maintenance*) της ονομαστικής τροχιάς του δορυφόρου ενός FC, καθώς για μικρές τιμές του h_p η αντίσταση της ατμόσφαιρας (*atmospheric drag*) θα αποτελεί μία βασική αιτία ανησυχίας για την διατήρηση της τροχιάς. Για τον λόγο αυτό προτείνεται από τον Wilkins το h_p να παραμένει πάνω από 600 km προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις της ατμοσφαιρικής αντίστασης.



Σχήμα 108: Η σχετική τροχιά ενός 3-1 FC για $h_p=400\text{km}$ και $h_p=13892\text{km}$. Πηγή: (Wilkins et al,2005)

5.4.4 Επιλογή των N_p και N_d

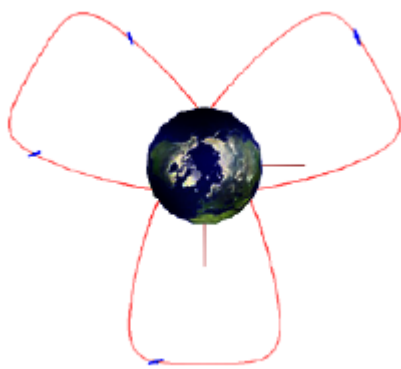
Ο λόγος τ ($\tau = N_p/N_d$) μεταξύ των δύο αέριων παραμέτρων N_p και N_d είναι αυτός που καθορίζει σε γενικές γραμμές τη γενική μορφή του Flower Constellation. Κατά τον σχεδιασμό είναι σημαντικό να διατηρούνται οι τιμές των N_p και N_d σε αναλογία η μία με την άλλη ούτως ώστε ακόμη και εάν επιλεγούν πολύ μεγάλες τιμές για τα N_p και N_d , εφόσον ο λόγος τ διατηρείται σε λογικά πλαίσια, το προκύπτον FC θα είναι φυσικά εφικτό.

Η ελάχιστη αποδεκτή τιμή του τ μπορεί να βρεθεί ως συνάρτηση του ελάχιστου αποδεκτού ύψους του περιγείου h_p , όπως περιγράφεται από την σχέση:

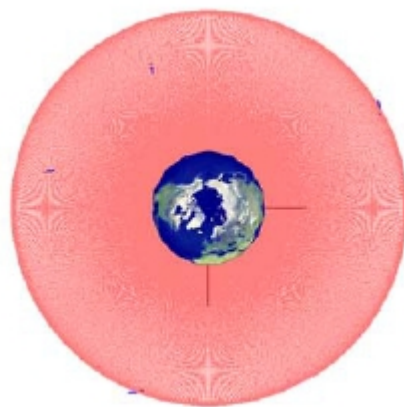
$$\tau \geq \omega_{\text{ΓΗΣ}} \sqrt{\frac{(R_{\text{ΓΗΣ}} + h_{\text{min}})^3}{\mu_{\text{ΓΗΣ}}}} \quad (58)$$

Όπου h_{min} είναι το ελάχιστο επιτρεπτό ύψος του περιγείου.

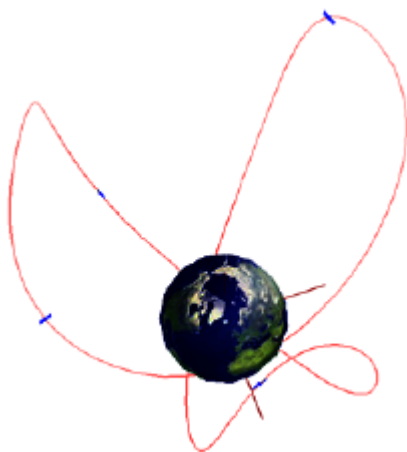
Καθότι τα FC είναι συμμετρικά ως προς τον άξονα συμμετρίας τους, καθώς ο αριθμός των πετάλων αυξάνει, ενώ το N_d μένει σταθερό, τα “πέταλα” αρχίζουν να επικαλύπτουν το ένα το άλλο. Όσο το N_p μεγαλώνει η σχετική τροχιά αρχίζει να προσομοιάζει περισσότερο με μία επιφάνεια. Στο σχήμα 109 απεικονίζονται 2 FC. Στην πρώτη περίπτωση (Case 1) απεικονίζεται ένα FC με $N_p=3$ και $N_d=1$ ($\tau=0.3333$) και στην δεύτερη περίπτωση (Case 2) ένα FC με $N_p=769$, $N_d=257$ ($\tau=0.3342$).



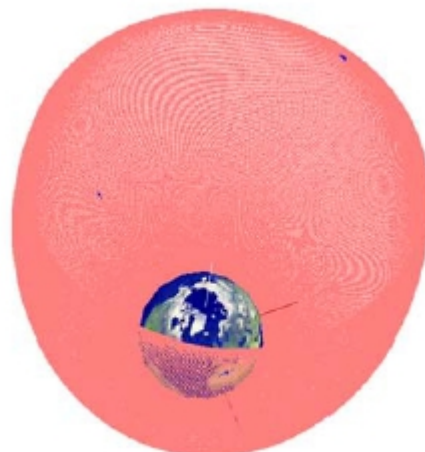
(α) Case 1- Πολική Προβολή



(β) Case 2- Πολική Προβολή



(γ) Case 1- Ισομετρική Προβολή



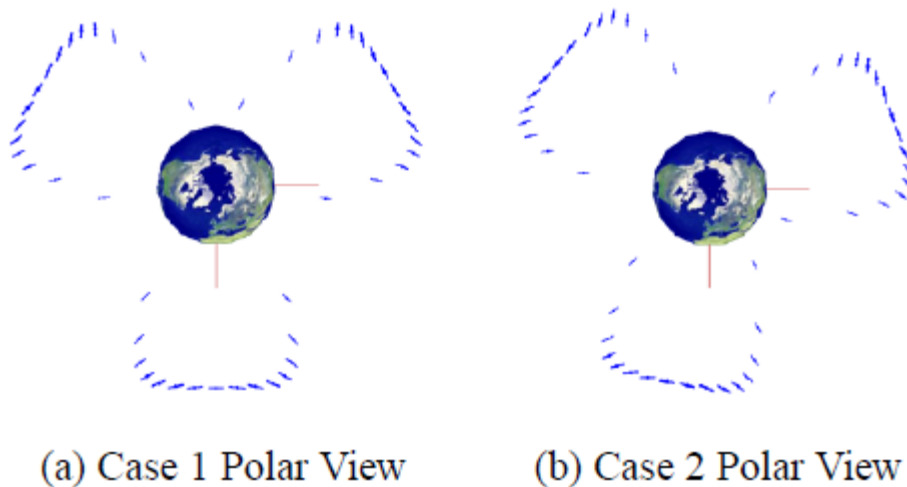
(δ) Case 2- Ισομετρική Προβολή

Σχήμα 109: Σχετικές τροχιές ενός 3-1 FC ((α) και (γ)) και ενός 769-257 FC ((β) και (δ)). (Wilkins, 2004)

Αφαιρώντας τα ίχνη των σχετικών τροχιών από το σχήμα 109 και αυξάνοντας τον αριθμό των δορυφόρων ώστε να απεικονίζουν το μοτίβο των σχηματισμών παρατηρείται ότι οι δύο σχηματισμοί μοιάζουν σχεδόν ίδιοι, όπως απεικονίζονται από μία πολική προβολή (Σχήμα 110). Σημειώνεται ότι κάθε δορυφόρος έχει το δικό του τροχιακό επίπεδο ($F_n/F_d=1/N_s$). Η μόνη διαφορά μεταξύ των σχηματισμών είναι ότι στην περίπτωση του σχηματισμού 1 (case 1) το μοτίβο (*pattern*) ταυτίζεται ακριβώς με την σχετική τροχιά και έτσι είναι μία κλειστή διαδρομή (*closed path*), ενώ στην περίπτωση του σχηματισμού 2 (case 2) ο δορυφόρος ακολουθεί ταυτόχρονα δύο “διαδρομές”: την κλειστή διαδρομή η οποία απεικονίζεται από την σχετική τροχιά του σχήματος 109((β) και (δ)) και η οποία επαναλαμβάνεται κάθε 257 ημέρες, και την δευτερεύουσα διαδρομή του σχήματος 110. Η διαδρομή του σχήματος 110 είναι μία ανοιχτή διαδρομή (*open ended*), δηλαδή ακολουθώντας έναν δορυφόρο από την αρχή έως το πέρας της διαδρομής, το πρώτο με το τελευταίο σημείο δεν συμπίπτουν. Οι δευτερεύουσες διαδρομές που σχηματίζονται μπορεί να είναι είτε ανοιχτές είτε κλειστές διαδρομές. Ανοιχτές δευτερεύουσες διαδρομές προκύπτουν όταν το τ μεταβληθεί ελαφρώς ενώ όλες οι υπόλοιπες παράμετροι του σχηματισμού διατηρηθούν σταθερές. Οι δευτερεύουσες

κλειστές διαδρομές προκύπτουν από τον συνδυασμό του σχήματος του FC και των παραμέτρων που καθορίζουν τη φάση κατανομής (*phasing*) των δορυφόρων (Wilkins, 2004) και θα αναλυθούν περαιτέρω σε επόμενη ενότητα.

Τέλος, είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι μόνο η σχετική τροχιά είναι σταθερή ως προς τη Γη. Για παράδειγμα η δευτερεύουσα διαδρομή του σχήματος 110, και ανεξαρτήτως από το εάν η δευτερεύουσα διαδρομή είναι ανοιχτή ή κλειστή, συνεχώς περιστρέφεται γύρω από τον άξονα συμμετρίας ενώ επικάθεται πάνω από την σταθερή (*fixed*) σχετική τροχιά. Εν γένει, οι δευτερεύουσες διαδρομές περιστρέφονται με σταθερή ταχύτητα γύρω από τον άξονα συμμετρίας του σχηματισμού.



Σχήμα 110: (α) Σχηματισμός 3-1-50 FC και (β) Σχηματισμός 769-257-50 FC.
Και στις δύο περιπτώσεις ισχύει ότι $F_n/F_d=1/N_s$.

5.4.4.1 Ομοιότητα των Flower Constellations

Το σύνολο των πιθανών FC περιλαμβάνει όλες τις θετικές ακέραιες τιμές των παραμέτρων N_p και N_d . Στην πραγματικότητα όμως, υπάρχει μόνο ένα μειωμένο σύνολο μοναδικών FC. Προκειμένου να προσδιοριστεί ποιο σύνολο σχηματισμών είναι μοναδικό πρέπει να εξεταστεί η παράμετρος τ . Εάν η παράμετρος τ είναι η ίδια για οποιαδήποτε δύο FC διαφορετικών N_p και N_d , τότε υπάρχει μονάχα μία μοναδική σχετική τροχιά μεταξύ τους καθώς η περίοδος περιστροφής που προκύπτει και για τους δύο σχηματισμούς είναι η ίδια. Επομένως, ο σχηματισμός με τον ελάχιστο κοινό διαιρέτη είναι ο μόνος μοναδικός σχηματισμός. Για παράδειγμα ένας 6-2 FC θα παράγει μία πανομοιότυπη σχετική τροχιά με τον σχηματισμό 3-1. (Mortari et al, 2004)

5.4.5 Επιλογή των F_n και F_d (Phasing Considerations)

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, υπάρχουν δύο παράμετροι που διέπουν τον τον σχεδιασμό της κατανομής των δορυφόρων ή φάσης (*phasing scheme*) του σχηματισμού, οι F_n και F_d . Ο όρος φάση αναφέρεται στον τρόπο κατανομής των δορυφόρων του σχηματισμού.

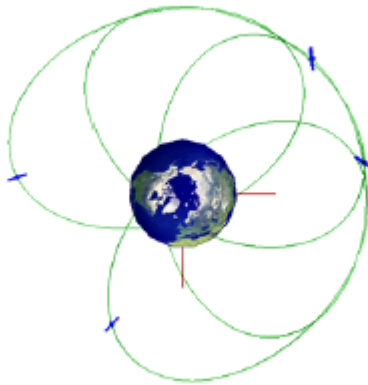
Ο μέγιστος αριθμός των δορυφόρων που μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα FC περιορίζεται από το γινόμενο: $N_s \leq F_s \cdot N_d$. Αυτό σημαίνει ότι προκειμένου να αυξηθεί ο αριθμός των δορυφόρων σε ένα σχηματισμό θα πρέπει είτε να αυξηθεί ο αριθμός των ημερών που χρειάζονται για να επαναληφθεί το τροχιακό ίχνος, είτε να αυξηθεί ο παρονομαστής της εξίσωσης 42, F_d , ούτως ώστε να υπάρξουν περισσότερες διαθέσιμες θέσεις (*available slots*) για την τοποθέτηση δορυφόρων στο FC.

Οι παράμετροι F_n και F_d είναι στενά συνδεδεμένες με την κατανομή της ορθής αναφοράς του ανιόντος δεσμού (RAAN). Από τη σχέση $\Delta\Omega = -2\pi \cdot \frac{F_n}{F_d}$ προκύπτει ότι η παράμετρος F_d καθορίζει τον αριθμό των τροχιών που είναι διαθέσιμες για την τοποθέτηση των δορυφόρων του σχηματισμού, στην περίπτωση που η παράμετρος $F_n=1$. Για παράδειγμα, αν είναι επιθυμητό οι δορυφόροι να τοποθετηθούν σε τέσσερις διαφορετικές τροχιές τότε το $F_d=4$.

Ας σημειωθεί ακόμη ότι όταν οι F_d και F_n είναι σχετικά πρώτοι και ισχύει ότι $F_d \leq N_s$, τότε οι N_s δορυφόροι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε F_d ομοιόμορφα κατανεμημένα τροχιακά επίπεδα.

Στην περίπτωση τώρα, που $N_d=1$ και το $F_d \leq N_s$ από την εξίσωση 54²² τα διαθέσιμα τροχιακά επίπεδα βασισμένα στην τιμή του F_d και ανεξάρτητα από τον αριθμό των δορυφόρων. Για παράδειγμα εάν $F_d=7$ και $F_n=1$ για ένα 3-1-4 FC το αποτέλεσμα που θα προκύψει θα περιλαμβάνει 4 δορυφόρους κατανεμημένους σε 4 ξεχωριστά τροχιακά επίπεδα, κατανεμημένα όμως σαν να υπήρχαν δορυφόροι σε 7 τροχιακά επίπεδα (Σχήμα 111).

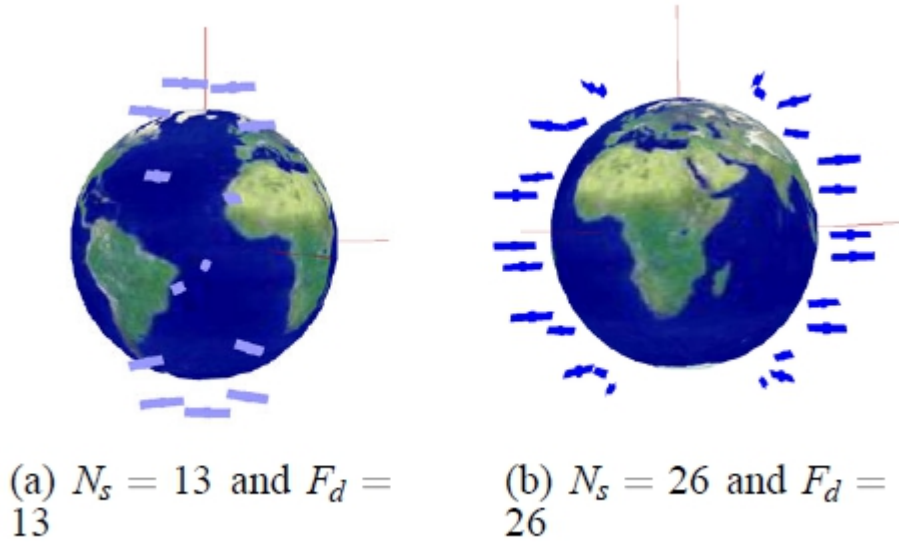
22 $\Omega_{k+1} = \Omega_k - 2\pi \frac{F_n}{F_d}$



Σχήμα 111: Πολική προβολή της σχετικής τροχιάς ενός 3-1-4 FC με $F_n=1$ και $F_d=7$.
Πηγή: (D. Mortari et al, 2004)

Μία επιπλέον θεώρηση αφορά στην πολλαπλότητα των μοτίβων (multiplicity of patterns) της σχετικής τροχιάς του σχηματισμού. Ένα συγκεκριμένο μοτίβο τροχιάς θεωρείται μοναδικό όταν οι παράμετροι N_p και N_d , και οι F_n και F_d είναι σχετικά πρώτοι²³. Ο τρόπος δημιουργίας ενός σχηματισμός που αποτελείται από πολλαπλά στιγμιότυπα του ενός μοναδικού μοτίβου είναι πολύ απλός. Πολλαπλασιάζοντας τόσο τον αριθμό των δορυφόρων N_s , όσο και τη παράμετρο F_d με έναν παράγοντα k , και διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του σχηματισμού ίδια, προκύπτει ένα FC που αποτελείται από k ισοκαταναμημένα μοτίβα γύρω από τον άξονα συμμετρίας. Όσο το k θα μεγαλώνει τα μοτίβα θα αρχίσουν να επικαλύπτονται. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο σχήμα 112, όπου στο (α) παρουσιάζεται το βασικό (unique) μοτίβο ενός 12-1-13 FC με $F_n=1$, $F_d=13$, $i=116,6^\circ$, $h_p=1666\text{km}$ και $\omega=270^\circ$ (πρόκειται για το “basic Figure 8” FC) και στο (b) ένα FC που αποτελείται από δύο βασικά μοτίβα.

²³ Δύο αριθμοί x και y ονομάζονται σχετικά πρώτοι αν ο μέγιστος κοινός διαιρέτης τους είναι η μονάδα.



Σχήμα 112: (α) το βασικό μοτίβο ενός FC, (β) FC με διπλασιασμένο το βασικό μοτίβο. Πηγή: (Wilkins et al., 2005)

5.4.5.1 Καθορισμός του αριθμού των δορυφόρων ανά τροχιά

Έχει ήδη αναφερθεί ότι η παράμετρος N_d προσδιορίζει τον αριθμό των διαθέσιμων θέσεων για την τοποθέτηση ενός δορυφόρου σε οποιοδήποτε από τα τροχιακά επίπεδα (δηλαδή τον μέγιστο αριθμό δορυφόρων ανά τροχιά). Εάν πολλαπλασιαστεί ο αριθμός των δορυφόρων ανά τροχιά με τον συνολικό αριθμό των τροχιών προκύπτει ο συνολικός αριθμός των δορυφόρων του σχηματισμού. Η παραπάνω παρατήρηση εκφρασμένη λίγο διαφορετικά καταλήγει στη σχέση:

$$n_{s/o} = \left\lfloor \frac{N_s}{F_d} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{N_s}{n_o} \right\rfloor \quad (59)$$

όπου n_o είναι ο αριθμός των τροχιακών επιπέδων και $n_{s/o}$ είναι ο αριθμός δορυφόρων ανά τροχιακό επίπεδο. Όπου η συνάρτηση floor function $\lfloor x \rfloor$ επιστρέφει το ακέραιο μέρος του x . Ισχύει ότι: $1 \leq n_{s/o} \leq N_d$ (Wilkins, 2004).

5.4.5.2 Καθορισμός του αριθμού των τροχιακών επιπέδων

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η εξίσωση 54 προσδιορίζει τον τρόπο κατανομής της ορθής αναφοράς του ανιόντος δεσμού στο διάστημα 2π για πλήρη και συμμετρικά Flower Constellations. Υπό τον όρο ότι τα F_n και F_d είναι σχετικά πρώτα, το F_d ορίζει τον αριθμό των επιτρεπόμενων τροχιακών επιπέδων. Αυτό σημαίνει ότι εάν $N_s \geq F_d$ τότε υπάρχει τουλάχιστον ένας δορυφόρος ανά τροχιακό επίπεδο.

Εάν $N_s \leq F_d$ τότε θα υπάρχουν N_s τροχιακά επίπεδα, διατεταγμένα όμως σαν να αποτελείτο ο σχηματισμός από F_d τροχιακά επίπεδα. Ο αριθμός των τροχιών μπορεί να εκφραστεί και ως:

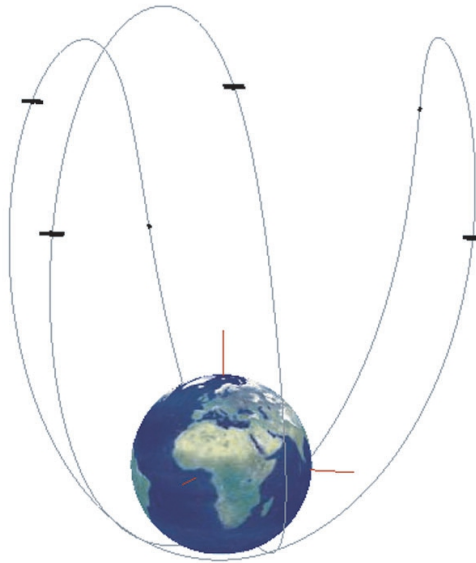
$$n_o = \left\lfloor \frac{N_s}{N_d} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{N_s}{n_{s/o}} \right\rfloor \quad (60)$$

5.4.5.3 Επίπεδα Δορυφόρων (Planes of Satellites)

Όταν ο συντελεστής F_d είναι ίσος ή είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της παραμέτρου N_d , τότε προκύπτει αυτό που αποκαλείται κίνηση σε επίπεδα (*planar motion*) και η επίδραση της διαδοχικής αναδιάταξης των δορυφόρων (*sequential juggling effect*) παύει να ισχύει. Η ιδιότητα αυτή οδήγησε στην δημιουργία ακόμη μίας παραμέτρου, της παραμέτρου ϕ η οποία ισούται με:

$$\phi = \frac{F_d N_d}{F_n N_p} \quad (61)$$

Εάν η παράμετρος ϕ είναι ακέραιος αριθμός, τότε θα προκύψουν ϕ επίπεδα, καθένα από τα οποία θα περιλαμβάνει N_p δορυφόρους. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο σχήμα 113, όπου απεικονίζεται ο σχηματισμός 3-1-6-1-6 FC με $\omega=270^\circ$ και $i=63.4^\circ$. Επιλέγοντας το $F_d=2N_p$, δημιουργήθηκαν δύο επίπεδα, που αποτελούνται από $N_p=3$ δορυφόρους το καθένα (Wilkins, 2004).

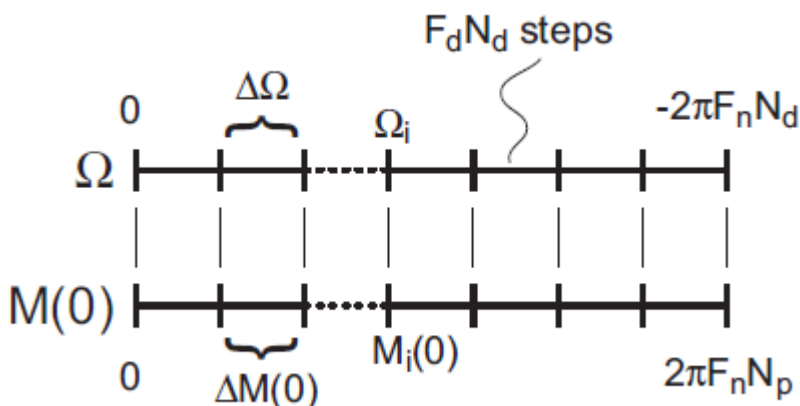


Σχήμα 113: Κίνηση σε επίπεδα. Ο σχηματισμός 3-1-6-1-6 FC. (Πηγή: Wilkins, 2004)

5.4.5.4 Δευτερεύουσες Κλειστές Διαδρομές

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, προκειμένου οι δορυφόροι να έχουν ένα κοινό τροχιακό ίχνος, εκχωρείται σε κάθε δορυφόρο ένα ζεύγος τιμών ορθής αναφοράς του ανιόντος δεσμού και μέσης ανωμαλίας ($\Omega_i, M_i(0)$), ενώ όλες οι άλλες τροχιακές τους παράμετροι (ω, i, a, e) είναι κοινές. Αγνοώντας την επίδραση των διαταραχών στην τροχιά, οι εξισώσεις 54 και 55 καθορίζουν τις επιτρεπόμενες τιμές των ζευγών ($\Omega_i, M_i(0)$).

Από την εξίσωση 55 προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει το $M(0)$ ισούται με $M_f(0) = 2\pi F_n N_p$. Επίσης είναι φανερό ότι υπάρχει ένας μέγιστος αριθμός $F_d N_d$ μοναδικών τιμών του $M(0)$. Επιπλέον, εξετάζοντας την εξίσωση 54 παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της ορθής αναφοράς του ανιόντος δεσμού (RAAN) ισούται με $2\pi F_n$. Ωστόσο, καθώς υπάρχουν και άλλες διαθέσιμες τιμές της μέσης ανωμαλίας προς ανάθεση, η τιμή της RAAN πρέπει να επαναληφθεί από την αρχή μέχρις ότου έχει εκχωρηθεί από μία τιμή σε κάθε αντίστοιχη διαθέσιμη τιμή της μέσης ανωμαλίας. Ως εκ τούτου, η τελική τιμή της ορθής αναφοράς θα ισούται με $\Omega_f = \Delta\Omega F_d N_d = -2\pi F_n N_d$.



Σχήμα 114: Σύγκριση της ακολουθίας των επιτρεπτών τιμών της ορθής αναφοράς του ανιόντος δεσμού και της μέσης ανωμαλίας. (Πηγή: Wilkins et al., 2004)

Κατά τον σχηματισμό των ζευγών, υπάρχει περίπτωση τα ζεύγη της ορθής αναφοράς του ανιόντος δεσμού και της μέσης ανωμαλίας να αρχίσουν να επαναλαμβάνονται πριν εκχωρηθούν οι τελικές τιμές ($\Omega_f, M_f(0)$). Το σύνολο αυτό των μοναδικών ζευγών (unique pairs) καλείται δευτερεύουσα κλειστή διαδρομή (secondary closed path). Εάν συνεχιζόταν κανονικά η τοποθέτηση δορυφόρων στο σχηματισμό, θα τοποθετούνταν ο ένας πάνω στον άλλο, γεγονός που μπορεί να είναι αποδεκτό από μαθηματικής άποψης, αλλά φυσικά είναι μη υλοποιήσιμο. Συνεπώς, μία δευτερεύουσα κλειστή διαδρομή είναι ένα κλειστό μοτίβο δορυφόρων (closed pattern of satellites), το οποίο κείται επί της σχετικής τροχιάς. Ένας δορυφόρος που ανήκει σε μία δευτερεύουσα κλειστή διαδρομή, ανήκει παράλληλα και στο αρχική σχετική τροχιά του σχηματισμού. (Wilkins et al, 2004)

Ένα ζήτημα που προκύπτει είναι η εύρεση των συνδυασμών των τιμών των παραμέτρων που οδηγεί στον σχεδιασμό σχηματισμών που περιλαμβάνουν δευτερεύουσες κλειστές διαδρομές. Ο Wilkins (2004) αναπτύσσει ορισμένα θεωρήματα, τα οποία και αποδεικνύει, προκειμένου να βρει τους εν λόγω συνδυασμούς.

1. Για επαρκώς μεγάλη τιμή του N_p , προκύπτει μία δευτερεύουσα κλειστή διαδρομή όταν το $N_d=1$ ή το $F_n=kN_d$ για $k \in \mathbb{N}$.
2. Για επαρκώς μεγάλη τιμή του N_p , μπορεί επίσης να προκύψει μία δευτερεύουσα κλειστή διαδρομή σε ένα FC όταν το $N_d=rF_n$ για $r \in \mathbb{N}$.
3. Για επαρκώς μεγάλη τιμή του N_p , και υπό την προϋπόθεση ότι το πρώτο θεώρημα ικανοποιείται, τότε η παράμετρος F_d μπορεί να εκφραστεί ως $F_d=AN_d+BN_p$, όπου το F_d είναι φυσικός αριθμός, τα N_p και N_d είναι οι γνωστές πια παράμετροι του FC και τα $A, B \in \mathbb{N}$ αυθαίρετα επιλεγμένα. Τα A και B έχουν φυσικό νόημα και καθορίζουν τον ακέραιο αριθμό των φορών που η μέση ανωμαλία και η ορθή αναφορά του ανιόντος δεσμού είναι διαιρετές με το 2π .

5.4.5.5 Η παράμετρος F_h

Οι πρώτες εμπειρίες σχεδιασμού σχηματισμών FC, ανέδειξαν την ανάγκη στη διαδικασία κατανομής των δορυφόρων σε ένα σχηματισμό FC να προστεθεί μία επιπλέον παράμετρος, η F_h . Η σχέση 55, λαμβάνοντας υπόψη την νέα παράμετρο παίρνει τη μορφή:

$$M_{k+1} = M_k - 2\pi \frac{F_n F_d + F_d F_h}{F_d N_d} \quad (62)$$

Όπου $F_h \in \{0, 1, \dots, N_d - 1\}$ είναι μία ακέραιη παράμετρος η οποία μπορεί να επιλέγεται ελεύθερα και ονομάζεται βήμα κατανομής (*phasing step parameter*) (Mortari & Wilkins, 2008a).

5.5 Οικογένειες των Flower Constellations

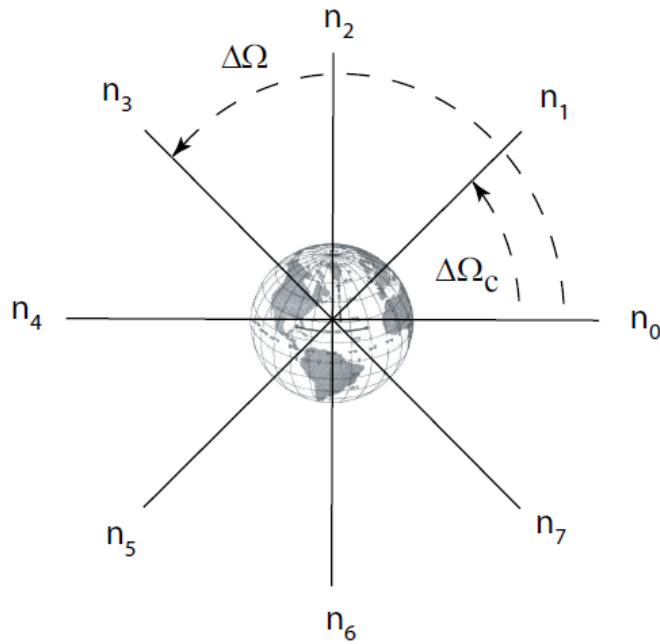
Από την αρχική δημιουργία των Flower Constellations το 2004 έχουν περάσει περίπου 10 χρόνια και πέρα από τον βασικό τρόπο σχεδιασμού τους, έχουν αναπτυχθεί πολλοί ευρηματικοί τρόποι σχεδιασμού FC, τα οποία χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες ιδιότητες που είναι χρήσιμες ανάλογα με το είδος της δορυφορικής αποστολής για την οποία προορίζονται. Παρακάτω αναπτύσσονται εν συντομία ορισμένες από τις βασικότερες οικογένειες των FC που έχουν προκύψει τα τελευταία χρόνια.

5.5.1 Synodic Flower Constellations- Relative Flower Constellations

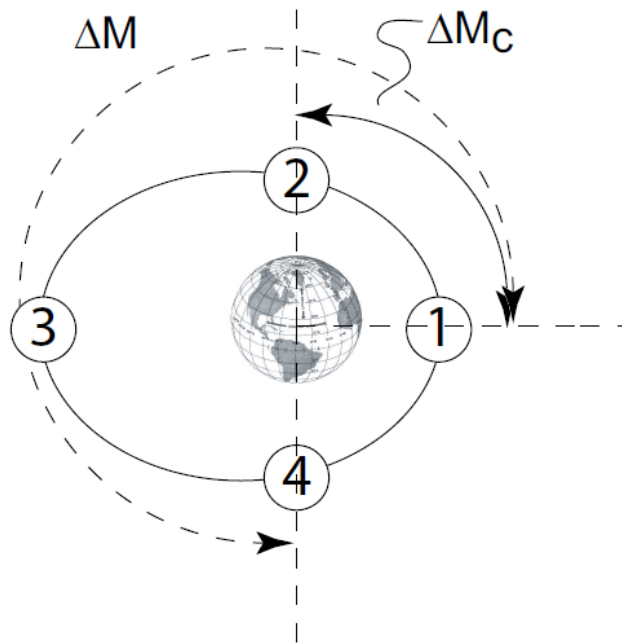
Τα συνοδικά FC (*Synodic FC*) και τα σχετικά FC (*relative FC*) αποτελούν δύο εναλλακτικές μεθοδολογίες για τον σχεδιασμό FC συγχρονισμένων με την κίνηση δύο ουρανίων σωμάτων (πχ δύο πλανητών), τα οποία περιστρέφονται γύρω από την ίδια βαρυτική μάζα (*gravitational mass*). Τα σώματα αυτά μπορεί ακόμη να είναι φυσικοί ή τεχνητοί δορυφόροι που περιστρέφονται γύρω από έναν πλανήτη. Πιο συγκεκριμένα, ένα συνοδικό FC αποτελείται από τροχιές οι οποίες είναι συμβατές με ένα πλαίσιο αναφοράς το οποίο περιστρέφεται με μία περίοδο που έχει προκύψει καταλλήλως από την συνοδική περίοδο των δύο σωμάτων. Ένα σχετικό FC προκύπτει από τροχιές οι οποίες είναι ταυτόχρονα συμβατές με τα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς και των 2 σωμάτων. Πιθανές εφαρμογές των σχηματισμών είναι η σχεδίαση της αρχιτεκτονικής ενός διαστημικού δικτύου (*Space Network Architecture*) για διαπλανητικές επικοινωνίες, η δημιουργία ενός συστήματος πλοήγησης το οποίο να αφορά σε ολόκληρο το ηλιακό σύστημα (*Solar Global Navigation System*), καθώς και εφαρμογές που αφορούν την μελέτη της Γης και του διαστήματος (Mortari et al, 2005).

5.5.2 Contiguous Flower Constellations

Ένα contiguous FC παράγεται από ένα σύνολο στοιχείων $\{d_i\}_{i \in \mathbb{N}}$, όπου $\mathbb{N}$ είναι το σύνολο των θετικών ακεραίων αριθμών. Πρόκειται για μία ολικά διατεταγμένη ακολουθία στοιχείων. Η ολική διάταξη αναφέρεται σε ένα σύνολο τα στοιχεία του οποίου διέπονται από μία συγκεκριμένη σχέση, ούτως ώστε για οποιαδήποτε στοιχεία του σύνολο α, β να ισχύει $\alpha \leq \beta$ ή $\alpha \geq \beta$. Οι συνεχείς κατανομές FCs έχουν την ιδιότητα να κατανέμουν τους διαδοχικούς δορυφόρους σε διαδοχικά τροχιακά επίπεδα. Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η ιδιότητά τους αυτή, παρατίθενται τα σχήματα 115 και 116 που απεικονίζουν την διαφορά στο βήμα κατανομής της ορθής αναφοράς των ανιόντων δεσμών και της Μέσης Ανωμαλίας για ένα βασικό και ένα συνεχές Flower Constellation. Το χαρακτηριστικό αυτό της συνέχειας επιτρέπει την εκτίμηση του ρυθμού περιστροφής (spin rate) των δευτερευουσών διαδρομών αυτού του είδους των σχηματισμών (Mortari & Wilkins, 2006).



Σχήμα 115: Σύγκριση κατά την εκχώρηση τιμών ορθής αναφοράς σε ένα απλό FC και σε ένα contiguous FC με την παράμετρο $F_d=8$.



Σχήμα 116: Βήμα κατανομής των δορυφόρων δορυφόρων για ένα βασικό FC (ΔM) και για ένα συνεχές FC (ΔM_c)

5.5.3 Διπλά Συμβατοί FCs- Dual Compatible Flower Constellations

Πρόκειται για ένα συγκεκριμένο τύπο FC, με την ιδιότητα η τροχιά κάθε δορυφόρου να είναι ταυτόχρονα συμβατή με δύο στρεφόμενα συστήματα αναφοράς.

Μια τροχιά είναι διπλά συμβατή (*dual compatible*) εάν για καθορισμένους τους συντελεστές N_{p1} , N_{d1} , N_{p2} , N_{d2} ισχύει ότι:

$$N_{p1}T = N_{d1}T_1 \text{ και } N_{p2}T = N_{d2}T_2 \quad (63)$$

όπου $T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1}$ και $T_2 = \frac{2\pi}{\omega_2}$ είναι οι περίοδοι περιστροφής των δύο πλαισίων αναφοράς που περιστρέφονται με ταχύτητες ω_1 και ω_2 αντίστοιχα. Με άλλα λόγια ο λόγος της περιόδου περιόδου περιστροφής των δορυφόρων του σχηματισμού προς την περίοδο περιστροφής του κάθε πλαισίου αναφοράς πρέπει να είναι ρητός αριθμός (*rational number*)(Mortari & Wilkins, 2008a).

Το βήμα της ορθής αναφοράς των ανιόντων δεσμών διαδοχικών δορυφόρων του σχηματισμού ισούται με:

$$\Delta\Omega_l = 2\pi \frac{F_h(N_{d2} - N_{d1}) + l N_{d1} N_{d2}}{N_{d1} N_{p2} - N_{d2} N_{p1}}, \quad (64)$$

και το αντίστοιχο βήμα της μέσης ανωμαλίας ισούται με:

$$\Delta M_l = -\Delta\Omega_l \frac{N_{p1}}{N_{d1}} - 2\pi \frac{F_h}{N_{d1}} = -\Delta\Omega_l \frac{N_{p2}}{N_{d2}} - 2\pi \frac{F_h}{N_{d2}} + 2\pi l, \quad (65)$$

όπου l είναι ένας οποιοσδήποτε ακέραιος. Συνοψίζοντας οι τιμές της ορθής αναφοράς του ανιόντος δεσμού και της Μέσης ανωμαλίας του κάθε δορυφόρου του διπλά συμβατού FC δίνονται από τις σχέσεις:

$$\Omega_{k+1} = \Omega_k + \Delta\Omega_l \text{ και } M_{k+1} = M_k + \Delta M_l \quad (66)$$

όπου $k=1,2,3,\dots$, και τα $\Delta\Omega_l$ και ΔM_l δίνονται από τις εξισώσεις 64 και 65 αντίστοιχα (Mortari & Wilkins, 2006).

5.6 Πιθανές Εφαρμογές των Flower Constellations

Η λογική των Flower Constellations μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό σχηματισμών που να προορίζονται για οποιουδήποτε είδους δορυφορική αποστολή. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις αποτελούν οι ηλιοσύγχρονες τροχιές, καθώς και οι *multi- sun synchronous* τροχιές. Οι ηλιοσύγχρονες τροχιές αφορούν την παρατήρηση μίας περιοχής υπό την ίδια γωνία των ηλιακών ακτίνων κάθε φορά, ενώ οι *multi-sun synchronous orbits* αφορούν την παρατήρηση μίας περιοχής υπό διαφορετικές συνθήκες κάθε φορά και στοχεύουν στην μελέτη της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μετρήσεις με δορυφορικά όργανα.

Επίσης πιθανές εφαρμογές αποτελούν σενάρια σχεδιασμού αποστολών σε καθορισμένη διάταξη (*formation flying*) για την παρακολούθηση και την μελέτη της γης (*earth observing missions*), κυρίως χάρη και στην μεγάλη ευελιξία στην επιλογή των παραμέτρων που παρέχει ο σχεδιασμός ενός ή περισσότερων FC (Wilkins, 2005).

Τέλος, η λογική σχεδιασμού των Flower Constellations θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κατά την δημιουργία ενός παγκόσμιου συστήματος προσδιορισμού θέσης (GNSS), εφαρμογή η οποία και θα απασχολήσει το επόμενο και τελευταίο Κεφάλαιο της διπλωματικής.

6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ GNFC, GPS ΚΑΙ GALILEO

6.1 Εισαγωγή

Αντικείμενο του πέμπτου και τελευταίου κεφαλαίου της διπλωματικής είναι η αξιολόγηση δορυφορικών σχηματισμών συστημάτων GNSS, αξιοποιώντας τις δυνατότητες του προγράμματος STK. Συγκεκριμένα, περιγράφονται διεξοδικά τα αποτελέσματα αξιολόγησης της απόδοσης ενός FC που σχεδιάστηκε, αξιοποιώντας τις δυνατότητες που παρέχει το STK, για εφαρμογές GNSS και η σύγκριση του με την αντίστοιχη απόδοση των σχηματισμών GPS και GALILEO. Αρχικά γίνεται μία αναγκαία περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών και των τριών σχηματισμών, ενώ ακολουθεί η αξιολόγηση του καθενός ξεχωριστά και στη συνέχεια γίνεται η σύγκριση της απόδοσης των σχηματισμών GPS και GALILEO με την απόδοση του σχηματισμού *GNFC (Global Navigation Flower Constellation)* και συνάγονται τα σχετικά συμπεράσματα.

6.2 Περιγραφή των Δορυφορικών Σχηματισμών GNFC, GPS και GALILEO

6.2.1 Global Navigation Flower Constellation (GNFC)

Μία βασική εφαρμογή στην οποία μπορεί να γίνει χρήση του τρόπου και της λογικής σχεδιασμού των Flower Constellations είναι τα Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης (GNSS). Η ιδέα ότι το σχήμα της σχετικής τροχιάς των FC, καθώς και ο συμμετρικός σχεδιασμός της κατανομής των δορυφόρων έχουν προταθεί κατά καιρούς ως υποψήφιοι παράγοντες που ενδέχεται να οδηγήσουν στη βελτίωση της ακρίβειας πλοήγησης. Ενδεικτικά αναφέρεται η εργασία των Park et al (2004) όπου χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες θεωρήσεις σχεδιασμού των Flower Constellations προτάθηκε ένας συμμετρικός σχηματισμός FC, ο οποίος προσδιορίζεται από τις παρακάτω παραμέτρους (Πίνακες 31 και 32):

Παράμετροι του Flower Constellation	Τιμές
Np	2
Nd	1 ημέρα
Ns	15
ω	180°
i	70°
hp	20182 km
e	0

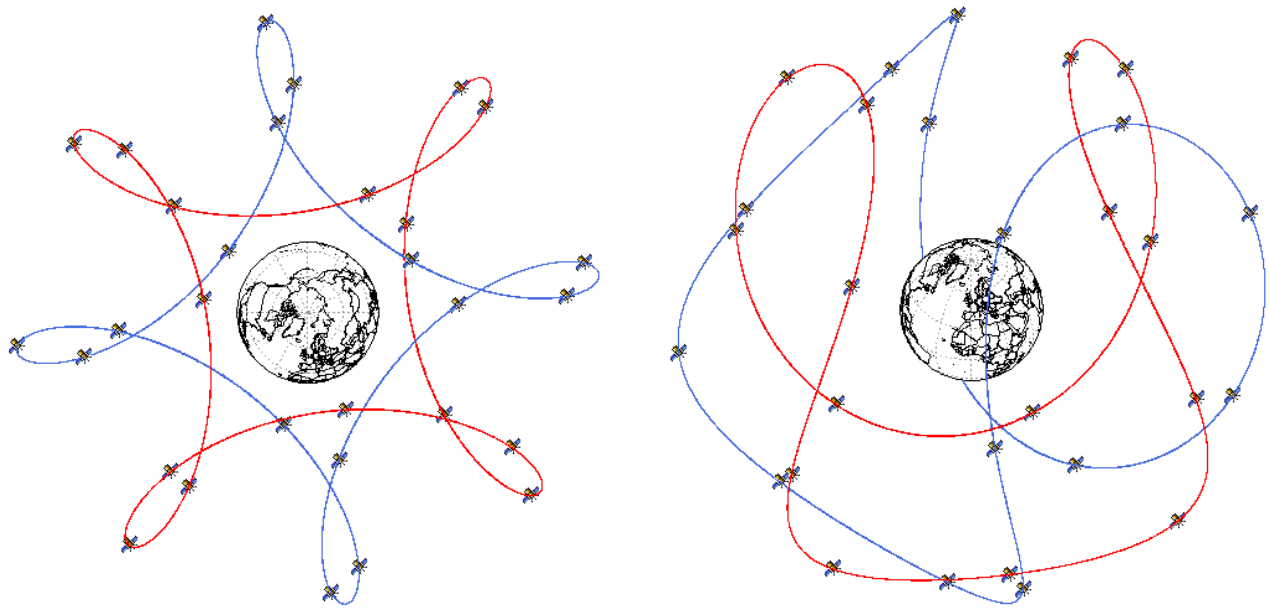
Πίνακας 31: Παράμετροι του Δορυφορικού Σχηματισμού GNFC (Πηγή: Park et al, 2004) και ίδια επεξεργασία).

Οι έξι πρώτες παράμετροι είναι οι παράμετροι που εισήχθησαν από τους Park et al (2004) για την περιγραφή των FC, ενώ η έβδομη προστέθηκε προκειμένου να γίνει σαφές ότι οι τροχιές των δορυφόρων που απαρτίζουν τον σχηματισμό είναι κυκλικές.

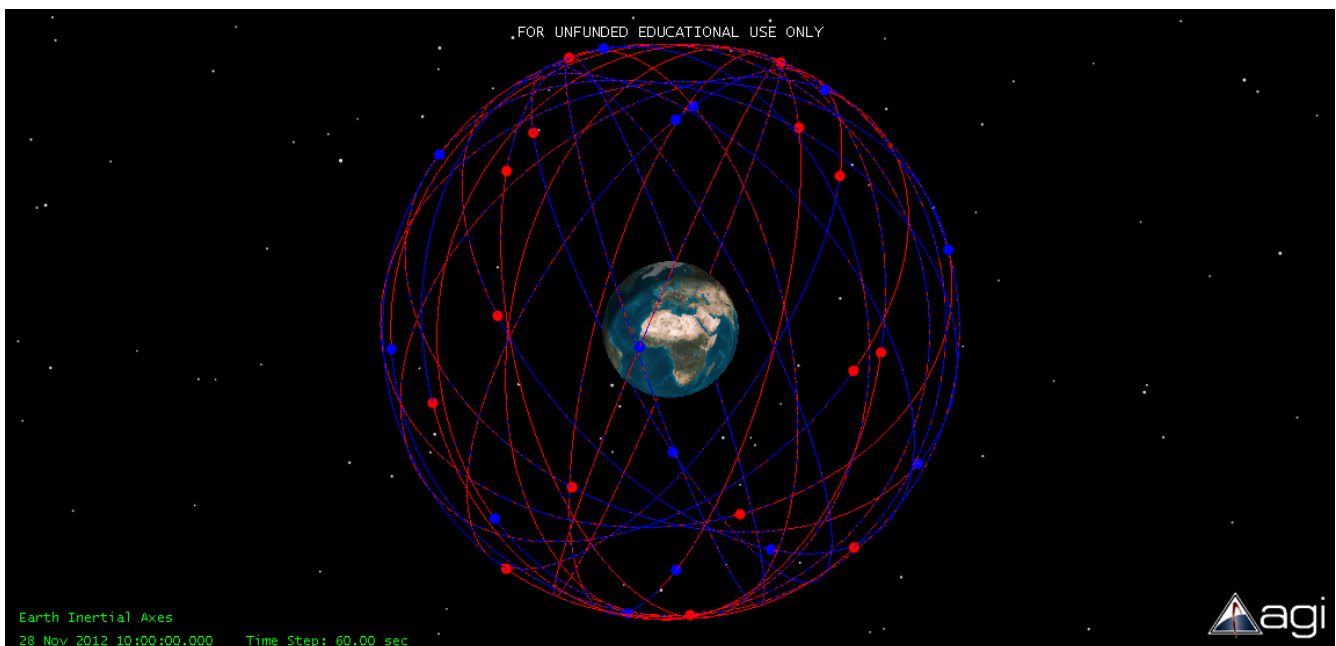
Satellite Number	Ω_k	Mk	Satellite Number	Ω_k	Mk
1	0	0	2	24	311.99
3	48.0	263.99	4	72.00	215.98
5	96.0	167.97	6	120.00	119.96
7	144.0	71.96	8	168.00	23.95
9	192.0	335.94	10	216.00	287.94
11	240.0	239.93	12	264.00	191.92
13	288.0	143.92	14	312.00	95.91
15	336.0	47.90			

Πίνακας 32: Ορθή αναφορά του ανιόντος δεσμού και μέση ανωμαλία των δορυφόρων 1 έως 15 του πρώτου Flower Constellation Πηγή: (Κ. Park et al, 2004)

Ο τελικός σχηματισμός GNFC προκύπτει από τον συνδυασμό δύο όμοιων FC με τα ίδια τροχιακά στοιχεία (από τους πίνακες 31 και 32) και με τη μοναδική διαφορά τους να έγκειται στο όρισμα του περιγείου (ω), το οποίο για τον 2ο σχηματισμό θα ισούται με 90° (αντί των 180°).



Σχήμα 117: Ο σχηματισμός GNFC. Οι σχετικές τροχιές των 2 FCs που τον απαρτίζουν. Η τροχιά του κάθε FC απεικονίζεται με διαφορετικό χρώμα. Αριστερά: Πολική ορθογραφική Προβολή. Δεξιά: ορθογραφική Προβολή με κέντρο $\varphi=45^\circ$ και $\lambda=0^\circ$.



Σχήμα 118: Απεικόνιση των ECI τροχιών των δορυφόρων του GNFC στο 3D Graphics Window. Οι τροχιές απεικονίζονται με κόκκινο ή μπλε ανάλογα με την σχετική τροχιά στην οποία ανήκουν.

6.2.1.1 Σύγκριση Γεωμετρικής Ισχύος του σχηματισμού GNFC με τους Σχηματισμούς GPS και GALILEO

Προκειμένου να εξεταστεί η απόδοση του συγκεκριμένου GNFC όσον αφορά την κάλυψη που παρέχει και την επίδραση της γεωμετρίας του στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης, ο σχηματισμός μελετήθηκε διεξοδικά μέσω του STK και συγκρίθηκε ως προς την απόδοσή του με τους συμβατικούς σχηματισμούς GPS και τον σχηματισμό GALILEO, με κριτήρια την τιμή του δείκτη GDOP και τον ελάχιστο αριθμό δορυφόρων πάνω από την περιοχή μελέτης. Η σύγκριση με το σχηματισμό του συστήματος GLONASS κρίθηκε άσκοπη, καθώς ο σχηματισμός αποτελείται από 24 δορυφόρους, 6 λιγότερους από τον σχηματισμό GNFC και έτσι δεν αποτελεί μέτρο σύγκρισης.

Ακολουθεί η σύντομη περιγραφή των δορυφορικών σχηματισμών GPS και GALILEO, καθώς επίσης και του σχηματισμού Walker, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την εισαγωγή του σχηματισμού GALILEO στο STK, προτού παρουσιαστεί η εκτενής αναφορά της εφαρμογής σύγκρισης.

6.2.2 Εισαγωγή στην γεωμετρία του Σχηματισμού GPS

Ως γνωστόν, το διαστημικό τμήμα (*space segment*) του συστήματος GPS αποτελείται από έναν σχηματισμό δορυφόρων, που εκπέμπουν ραδιοσήματα στους χρήστες. Η πολεμική αεροπορία των ΗΠΑ διαχειρίζεται τον σχηματισμό, προκειμένου να διασφαλίσουν την διαθεσιμότητα τουλάχιστον 24 δορυφόρων GPS για το 95% του χρόνου. Εδώ και μερικά χρόνια, ο σχηματισμός αποτελείται από 31 λειτουργικούς δορυφόρους και άλλους 3-4 ανενεργούς (*Decommissioned*), οι οποίοι παίζουν αναπληρωματικό ρόλο και μπορούν να ενεργοποιηθούν με εντολές από τους επίγειους σταθμούς ελέγχου, αν αυτό χρειαστεί.

Οι δορυφόροι του σχηματισμού GPS είναι διατεταγμένοι σε έξι ισαπέχοντα τροχιακά επίπεδα που περιβάλλουν τη Γη, καθένα από τα οποία περιλαμβάνει τέσσερις θέσεις (*slots*) που καλύπτονται από τους βασικούς δορυφόρους του σχηματισμού (*baseline satellites*). Αυτή η διάταξη εξασφαλίζει ότι τουλάχιστον τέσσερις δορυφόροι είναι ορατοί από πρακτικά οποιοδήποτε σημείο της Γης.

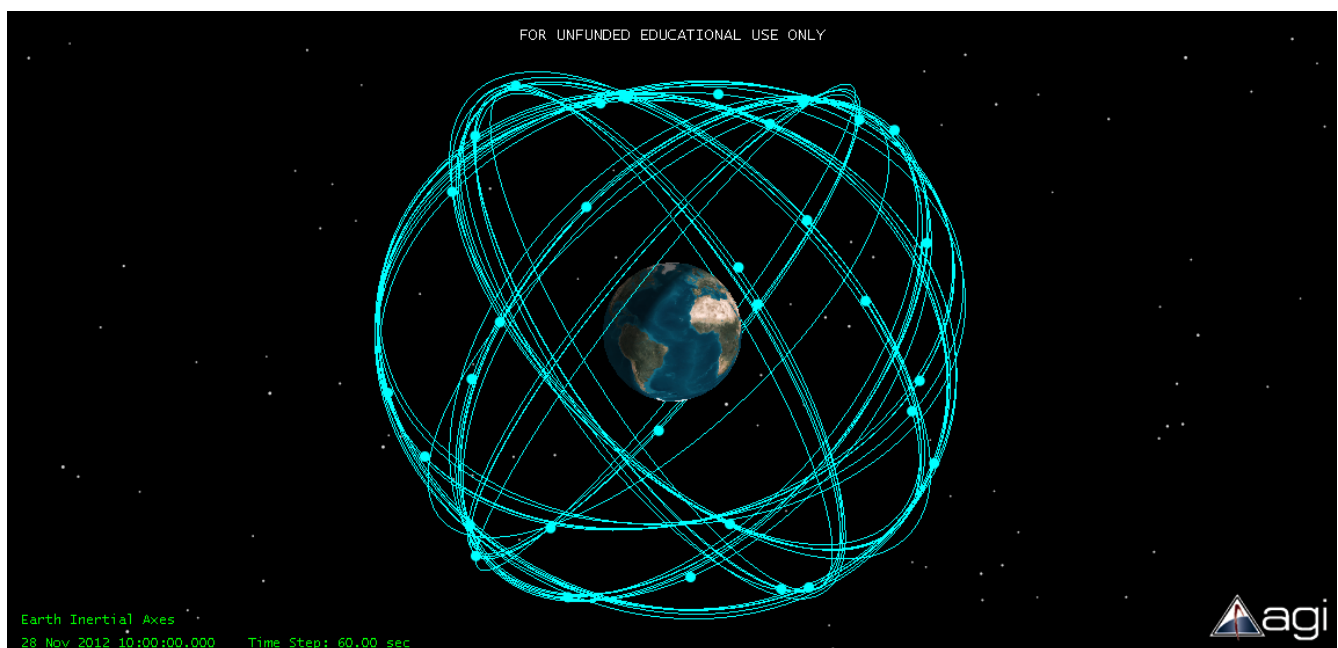
Η πολεμική αεροπορία συνήθως συνεχώς παρακολουθεί περισσότερους από 24 λειτουργικούς δορυφόρους για να διατηρήσει την παγκόσμια κάλυψη. Οι επιπλέον δορυφόροι μπορεί να αυξάνουν την απόδοση του GPS, αλλά δεν νοούνται ως τμήμα του κυρίως σχηματισμού των αρχικά σχεδιασμένων 24 δορυφόρων (*core constellation*).

Τον Ιούνιο του 2011, η πολεμική αεροπορία συμπλήρωσε με επιτυχία μία επέκταση του σχηματισμού GPS, που στα αγγλικά ονόμασαν “*Expandable 24*” configuration. Τρεις από τις 24 θέσεις του σχηματισμού επανακαθορίστηκαν, και έξι δορυφόροι επανατοποθετήθηκαν προκειμένου τρεις από τους επιπλέον δορυφόρους να γίνουν μέρος του βασικού σχηματισμού (*constellation baseline*). Έκτοτε ο βασικός σχηματισμός GPS αποτελείται από 27 δορυφόρους με αποτέλεσμα την βελτιωμένη κάλυψη στις περισσότερες περιοχές του κόσμου (USA DoD, 2008).

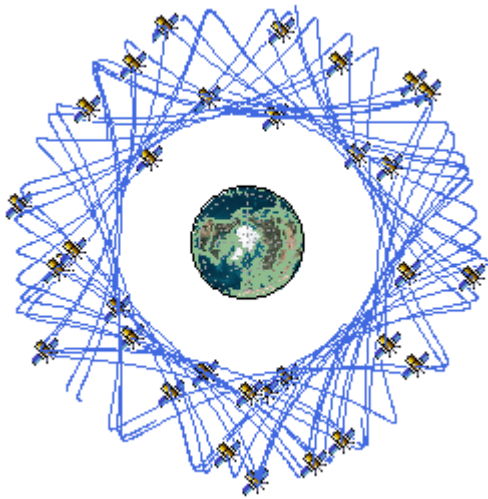
Η κλίση των 6 τροχιακών επιπέδων των σχηματισμών είναι $i=55^\circ$ και με μία ανεκτή απόκλιση $\pm 3^\circ$, η εκκεντρότητα $e=0$ (κυκλικές τροχιές) με μία απόκλιση από 0 μέχρι 0.02 και ο μεγάλος ημιάξονας της τροχιάς $a \approx 26560$ km.

Η περίοδος περιστροφής των δορυφόρων είναι σχεδόν 11 ώρες και 58 λεπτά, ενώ η περίοδος επανάληψης της τροχιάς τους είναι μία αστρική ημέρα (περίπου 23 ώρες και 56 λεπτά), στην οποία ο κάθε δορυφόρος έχει ολοκληρώσει 2 περιστροφές.

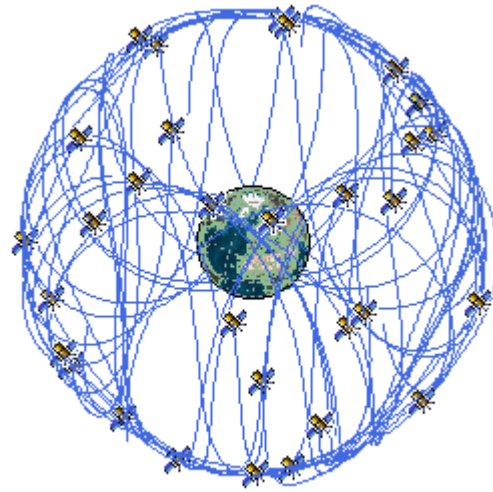
Από τον βασικό σχηματισμό που ισχύει σήμερα και που αποτελείται από 27 δορυφόρους προκύπτει ότι: η τιμή του δείκτη PDOP για επίπεδο εμπιστοσύνης 98% και σε παγκόσμια κλίμακα θα είναι κάτω από 6, ενώ για τις χειρότερες περιοχές από άποψη κάλυψης η πιθανότητα η τιμή του δείκτη PDOP να είναι κάτω από 6 μειώνεται στο 88% (USA DoD, 2008).



Σχήμα 119: Απεικόνιση των αδρανειακών τροχιών των δορυφόρων που απαρτίζουν το σύστημα GPS στο 3D Globe.



(a)



(b)

Σχήμα 120: Προβολές των σχετικών τροχιών των δορυφόρων που απαρτίζουν τον σχηματισμό GPS.
(α): Πολική Προβολή (b): Ορθογραφική προβολή με $\varphi=45^\circ$ και $\lambda=0^\circ$.

6.2.2.1 Ο Αλγόριθμος Walker Delta

Ο Walker (1977) ανέπτυξε έναν τρόπο συμβολισμού για να επισημαίνει τις τροχιές που απαρτίζουν έναν σχηματισμό και που συχνά χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό δορυφορικών σχηματισμών (*Constellation Design*).

Ο όρος 'σε διάταξη Δέλτα' (*Delta patterns*) εφαρμόζεται για εκείνες τις διατάξεις στις οποίες T δορυφόροι βρίσκονται σε κυκλικές τροχιές ίδιας περιόδου, ομοιόμορφα κατανεμημένοι και με την ίδια κλίση ως προς ένα επίπεδο αναφοράς, καθώς και με ομοιόμορφη κατανομή των δορυφόρων μεταξύ και εντός των τροχιακών επιπέδων (Walker, 1977).

Οι παράμετροι που χρειάζονται για να προσδιοριστεί ένας σχηματισμός Walker είναι οι εξής :

- Η κλίση του τροχιακού επιπέδου (i). Όλα τα τροχιακά επίπεδα έχουν την ίδια κλίση (δ) ως προς ένα επίπεδο αναφοράς, το οποίο συνήθως είναι το ισημερινό επίπεδο και επομένως ισχύει $\delta=i$.
- Ο συνολικός αριθμός των δορυφόρων (T),
- Ο συνολικός αριθμός των τροχιακών επιπέδων (P). Ο σχηματισμός περιλαμβάνει συνολικά T δορυφόρους, από τους οποίους S δορυφόροι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε καθένα από τα τροχιακά επίπεδα. Προφανώς ισχύει για τον συνολικό αριθμό των δορυφόρων ότι: $T=S \cdot P$.
- Η σχετική μετατόπιση (*relative spacing*) μεταξύ δορυφόρων σε διαδοχικά τροχιακά επίπεδα (F).

Οι ανιόντες δεσμοί των P διακριτών τροχιακών επιπέδων είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε

διαστήματα ίσα με $S \times PU$ στο επίπεδο αναφοράς. Όπου PU είναι συντομογραφία του όρου “pattern unit”, τον οποίο χρησιμοποιεί ο Walker και ο οποίος ισούται με $360^\circ/T$. Επομένως το γωνιακό βήμα μεταξύ των ανιόντων δεσμών του κάθε τροχιακού επιπέδου θα ισούται με: $360^\circ \cdot S/T = 360^\circ / P$.

Οι σχετικές θέσεις των δορυφόρων που ανήκουν σε διαφορετικά τροχιακά επίπεδα είναι τέτοιες, ώστε τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των διελεύσεων δορυφόρων, που ανήκουν σε παρακείμενα τροχιακά επίπεδα, από τους ανιόντες δεσμούς τους να είναι ίσα. Δηλαδή όταν ένας δορυφόρος ενός τροχιακού επιπέδου διέρχεται από τον ανιόντα δεσμό του, κάποιος δορυφόρος του τροχιακού επιπέδου, που χαρακτηρίζεται από ανιόντα δεσμό που βρίσκεται ανατολικότερα του πρώτου, έχει διανύσει επιπλέον F PU s ($PU=360^\circ/T$) από την στιγμή διέλευσής του από τον αντίστοιχο ανιόντα δεσμό. Όπου η παράμετρος F μπορεί να πάρει τιμές από 1 μέχρι $(P-1)$.

Επομένως κάθε σχηματισμός Walker μπορεί να περιγραφεί από τις 3 βασικές παραμέτρους: τον συνολικό αριθμό των δορυφόρων (T), τον συνολικό αριθμό των τροχιακών επιπέδων (P) και την παράμετρο που ρυθμίζει την φάση (F), στην κωδικοποιημένη για ευκολία μορφή $T/P/F$. Για να έχει περιγραφεί πλήρως απαιτείται ακόμη η τιμή της κλίσης των τροχιακών του επιπέδων με τον ισημερινό (i). Έτσι ο αρχικός σχηματισμός GPS που αποτελείτο από 24 δορυφόρους σε 6 τροχιακά επίπεδα και με $F=1$ γράφεται ως σχηματισμός Walker 24/6/1 με κλίση $i=55^\circ$ (Walker, 1977).

6.2.2.2 Walker Delta Constellation στο STK

Το εργαλείο Walker Tool του STK δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργήσει με ευκολία, χρησιμοποιώντας έναν από τους Two Body, J2, J4 ή SGP4 propagators, έναν δορυφορικό σχηματισμό Walker. Αρχικά χρειάζεται ο καθορισμός ενός δορυφόρου με τα επιθυμητά τροχιακά στοιχεία. Ο δορυφόρος επιλέγεται από τον object browser και από το satellite menu επιλέγεται η εντολή Walker.

Ο αρχικός δορυφόρος που καθορίζεται από τον χρήστη ονομάζεται και δορυφόρος- “γονέας” (seed satellite), ενώ οι παραγόμενοι από το πρόγραμμα δορυφόροι αναφέρονται και ως δορυφόροι- “παιδιά”.

Το STK υπολογίζει τις τροχιακές παραμέτρους όλων των δορυφόρων του σχηματισμού βάσει του δορυφόρου- γονέα (seed satellite) και στη συνέχεια αναπαραγάγει τις τροχιές τους και παρουσιάζει τα γραφικά τους στα 2D και 3D Graphics Windows.

Ο σχηματισμός Walker μπορεί να δημιουργηθεί στο πρόγραμμα είτε ως Walker Delta Constellation, είτε ως modified Walker Delta Constellation.

Walker Delta Constellation

Για τον Walker Delta Constellation όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η σχετική απόσταση κατά μήκος της τροχιάς μεταξύ δύο δορυφόρων που βρίσκονται σε παρακείμενα τροχιακά επίπεδα καθορίζεται από την παράμετρο κατανομής (*phase parameter*), F .

Συνεπώς τα στοιχεία που πρέπει να εισάγει ο χρήστης είναι ο συνολικός αριθμός των δορυφόρων που απαρτίζουν τον σχηματισμό, T , ο συνολικός αριθμός των τροχιακών επιπέδων του σχηματισμού, P , και η παράμετρος της φάσης κατανομής, F .

Επίσης ο χρήστης μπορεί να εισάγει την έκταση της ορθής αναφοράς των ανιόντων δεσμών (*RAAN spread*), δηλαδή την τιμή της γωνίας η οποία διαιρείται με το P , ώστε να προκύψει η διαφορά στην ορθή αναφορά μεταξύ των ανιόντων δεσμών στα γειτονικά τροχιακά επίπεδα. Η παράμετρος “*RAAN spread*” είναι χρήσιμη για μικρούς σχηματισμούς προκειμένου να εμποδίζει την δημιουργία ανεπιθύμητων προσανατολισμών των τροχιακών επιπέδων. Για παράδειγμα, εάν υπάρχουν δύο τροχιακά επίπεδα, με κλίση 90° , μία τιμή της παραμέτρου *RAAN spread* ίση με 180° θα οδηγούσε στη δημιουργία δύο κάθετων μεταξύ τους τροχιακών επιπέδων, ενώ η τιμή 360° θα είχε ως αποτέλεσμα όλοι οι δορυφόροι να βρίσκονται στο ίδιο τροχιακό επίπεδο.

Τέλος ο χρήστης μπορεί να καθορίσει το χρώμα των τροχιών (επιλογή *Color by Plane*) ανάλογα με το τροχιακό επίπεδο, τα ονόματα των δορυφόρων (*create unique names for sub-objects*) και το εάν επιθυμεί να δημιουργηθεί ένας σχηματισμός στο STK, ο οποίος θα αποτελείται από τους δορυφόρους που δημιουργήθηκαν (Επιλογή *Create Constellation*).

Modified Walker Delta Constellation

Το STK παρέχει ακόμη έναν τρόπο για την δημιουργία ενός σχηματισμού Walker, τον *Modified Walker Delta Constellation*. Από τις παραμέτρους ρύθμισης του σχηματισμού ο συνολικός αριθμός των δορυφόρων, ο συνολικός αριθμός των τροχιακών επιπέδων, καθώς και οι επιλογές που αφορούν στην οπτικοποίηση και την δημιουργία σχηματισμού, που αναφέρονται παραπάνω, παραμένουν οι ίδιες.

Αντί όμως για την εισαγωγή της παραμέτρου φάσης F , ο χρήστης εισάγει την διαφορά της αληθούς ανωμαλίας (επιλογή “*True Anomaly Phasing*”) μεταξύ των πρώτων δορυφόρων παρακείμενων τροχιακών επιπέδων. Με άλλα λόγια καθορίζει το διάστημα μεταξύ των πρώτων δορυφόρων γειτονικών τροχιακών επιπέδων κατά την διεύθυνση της τροχιάς τους (*in-track spacing*) σε μοίρες.

Επίσης ο χρήστης εισάγει την παράμετρο “*RAAN increments*”, δηλαδή την διαφορά της ορθής αναφοράς των ανιόντων δεσμών μεταξύ γειτονικών τροχιακών επιπέδων, εκφρασμένη σε μοίρες. (STK Desktop Application Help)

6.2.3 Το σύστημα GALILEO

Το σύστημα GALILEO είναι το πρώτο ευρωπαϊκό δορυφορικό σύστημα πλοήγησης (GNSS), το οποίο στο άμεσο μέλλον έχει σχεδιαστεί να παρέχει υψηλής ακρίβειας και εγγυημένες υπηρεσίες προσδιορισμού θέσης σε παγκόσμια κλίμακα. Έχει σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει διαλειτουργικότητα με τα δύο υπάρχοντα συστήματα GNSS, το NAVSTAR- GPS και το σύστημα GLONASS.

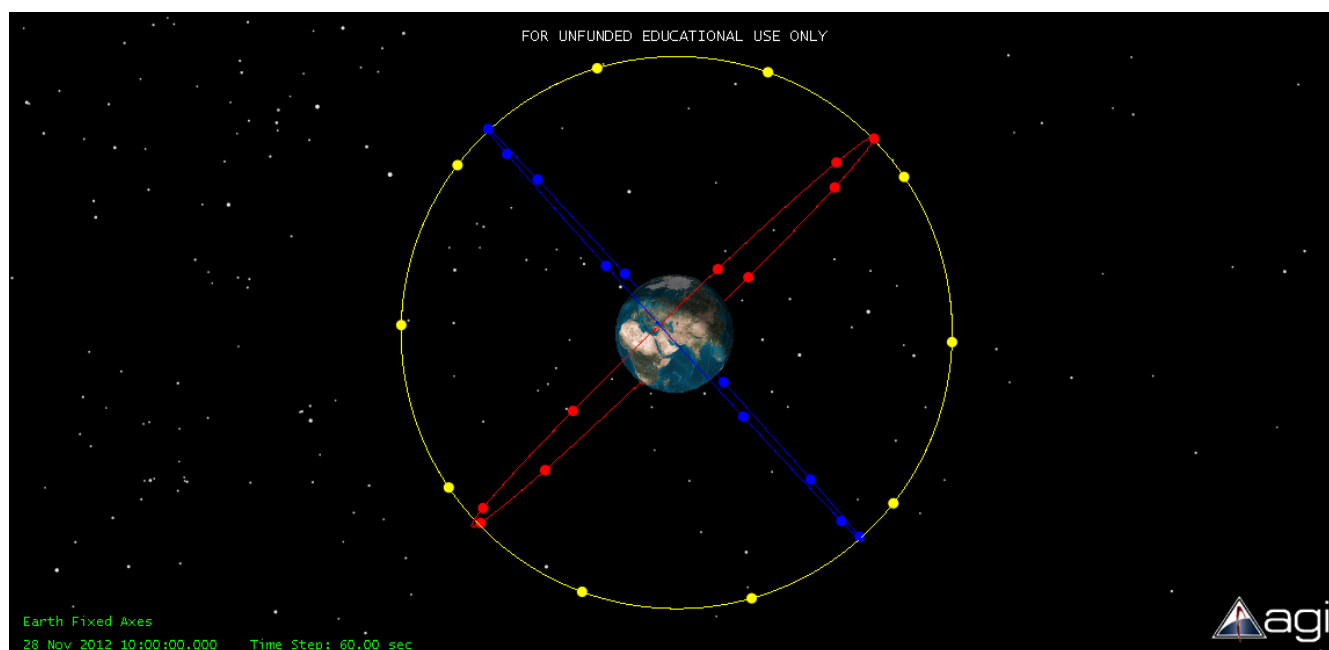
Το σύστημα είναι ακόμη υπό κατασκευή, ενώ αναμένεται να είναι πλήρως λειτουργικό το αργότερο μέχρι το 2020 (ESA, 2013). Αναπτύσσεται σε συνεργασία της Ευρωπαϊκής Ένωσης με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA). Στις 12 Μαρτίου 2013 έγινε για πρώτη φορά προσδιορισμός θέσης με χρήση μόνο των δορυφόρων του σχηματισμού Galileo (European Commission, 2013).

6.2.3.1 Εισαγωγή στην γεωμετρία του Σχηματισμού GALILEO

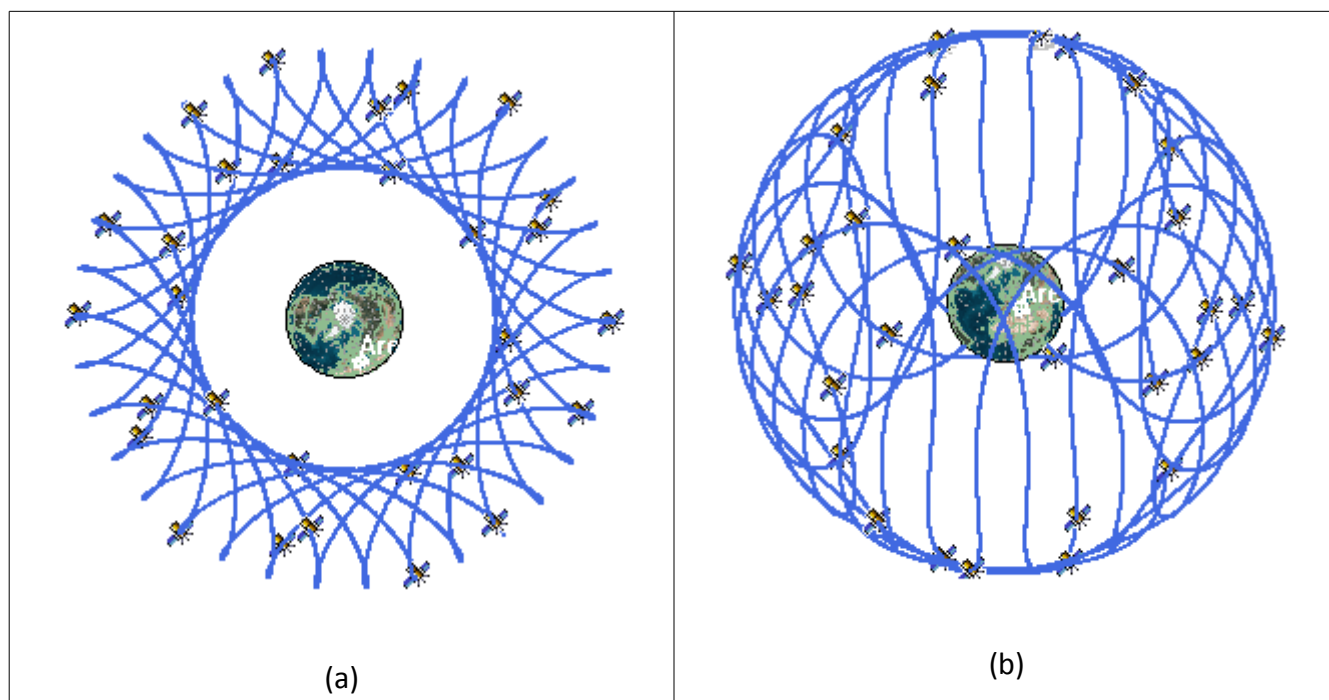
Ο δορυφορικός σχηματισμός αποτελείται από 30 δορυφόρους κατανεμημένους σε 3 τροχιακά επίπεδα, βάσει του αλγόριθμου Walker (όπως αυτός περιγράφεται στην ενότητα 6.2.2.1). Η ονομαστική κλίση των τροχιακών επιπέδων ως προς το ισημερινό επίπεδο ισούται με $i=56^\circ$. Κάθε τροχιακό επίπεδο αποτελείται από 10 δορυφόρους, ομοιόμορφα κατανεμημένους σε αυτό, εκ των οποίων ο ένας θα χρησιμεύει ως εφεδρικός σε περίπτωση βλάβης ενός από τους βασικούς δορυφόρους. Παρόλα αυτά και ο δέκατος θα εκπέμπει κανονικά καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής. Το υψόμετρο των τροχιών ισούται με 23222 km και οδηγεί στη διαμόρφωση ενός σχηματισμού (*constellation configuration*), στον οποίο για τους δορυφόρους η περίοδος επανάληψης της τροχιάς τους είναι 10 ημέρες. Σε αυτή την περίοδο οι δορυφόροι του σχηματισμού (με περίοδο κάθε περιστροφής περίπου 14 ώρες) έχουν ολοκληρώσει 17 περιστροφές γύρω από τη Γη.

Συνοψίζοντας τα στοιχεία του σχηματισμού:

- Κυκλικές τροχιές υψομέτρου 23222 km.
- Κλίση των τροχιακών επιπέδων 56° .
- Τρία ισοκατανεμημένα τροχιακά επίπεδα.
- 9 επιχειρησιακούς δορυφόρους σε κάθε τροχιακό επίπεδο.
- Από έναν επιπλέον εφεδρικό δορυφόρο σε κάθε επίπεδο, ο οποίος όμως θα εκπέμπει κανονικά και σε συνεχή βάση (ESA, 2013b).



Σχήμα 121: Απεικόνιση των αδρανειακών τροχιών των δορυφόρων που απαρτίζουν το σύστημα Galileo στο 3D Globe.



Σχήμα 122: Προβολές των σχετικών τροχιών των δορυφόρων που απαρτίζουν τον σχηματισμό Galileo. (α): Πολική Προβολή (b): Ορθογραφική προβολή με $\varphi=45^\circ$ και $\lambda=0^\circ$.

6.3 Εφαρμογή Σύγκρισης Γεωμετρικής απόδοσης των σχηματισμών με χρήση του STK

6.3.1 Δημιουργία Σεναρίων- Καθορισμός Χρονικού Διαστήματος Μελέτης

Για την σύγκριση μεταξύ του σχηματισμού GNFC και των σχηματισμών GPS και GALILEO δημιουργήθηκαν τέσσερα σενάρια στο STK:

Στα δύο από αυτά η περίοδος μελέτης του σεναρίου ορίστηκε ίση με μία ημέρα, όση και η περίοδος επανάληψης του τροχιακού ίχνους των σχηματισμών GPS και GNFC. Κάθε ένα από τα δύο σενάρια χρησιμοποιήθηκε για την εισαγωγή του ενός από τους δύο σχηματισμούς: στο σενάριο 1 έγινε η εισαγωγή του σχηματισμού GPS και στο σενάριο 2 η εισαγωγή του σχηματισμού GNFC. Ως αρχή της περιόδου μελέτης ορίστηκε τυχαία η 28η Νοεμβρίου 2012 και ώρα UTCG 10:00:00 και ως πέρας η 29η Νοεμβρίου 2012 και ώρα UTCG 10:00:00.

Στα επόμενα δύο σενάρια η περίοδος μελέτης του κάθε σεναρίου ορίστηκε ίση με 10 ημερολογιακές ημέρες, ίση με την περίοδο επανάληψης της τροχιάς του σχηματισμού GALILEO. Στο σενάριο 3 έγινε η εισαγωγή του σχηματισμού GALILEO, ενώ στο σενάριο 4 η εισαγωγή του σχηματισμού GNFC. Ως αρχή της περιόδου μελέτης ορίστηκε τυχαία η 28η Νοεμβρίου 2012 και ώρα UTCG 10:00:00 και ως πέρας η 8η Δεκεμβρίου 2012 και ώρα UTCG 10:00:00.

Η περίοδος του κάθε σεναρίου, καθώς και ο σχηματισμός ο οποίος μελετάται σε κάθε σενάριο παρουσιάζονται στον Πίνακα 33.

Σενάριο	Σχηματισμός	Περίοδος Μελέτης	Propagator	Τρόπος Εισαγωγής
1	GPS	1 ημέρα	SGP4	Agi Database
2	GNFC	1 ημέρα	J4	Πίνακας 32
3	GALILEO	10 ημέρες	J4	Walker 30-3-1
4	GNFC	10 ημέρες	J4	Πίνακας 32

Πίνακας 33: Συγκεντρωτικά Στοιχεία Εισαγωγής των Σεναρίων 1 μέχρι 4.

6.3.2 Εισαγωγή των σχηματισμών στο STK

Κάθε σχηματισμός δημιουργήθηκε με διαφορετικό τρόπο:

6.3.2.1 GPS

Ο σχηματισμός GPS είναι ο μόνος από τους τρεις ο οποίος είναι λειτουργικός στις μέρες μας. Αν και ο βασικός σχηματισμός αποτελείται από 27 δορυφόρους (μετά την επέκτασή του), εδώ και μερικά χρόνια το σύστημα GPS λειτουργεί με 31 δορυφόρους. Ο πιο ρεαλιστικός τρόπος εισαγωγής του σχηματισμού είναι μέσω των αρχείων TLE για κάθε δορυφόρο και με χρήση του αναπαραγωγέα τροχιάς SGP4 propagator.

Από τη βάση δεδομένων της AGI (επιλογή: “select from satellite database”) έγινε εισαγωγή και των 31 δορυφόρων του σχηματισμού.

6.3.2.2 GNFC

Η εισαγωγή του σχηματισμού GNFC έγινε με χρήση του J4 perturbations propagator. Αρχικά δημιουργήθηκε ο πρώτος δορυφόρος του Πίνακα 32, με τροχιακά στοιχεία $\omega=180^\circ$, $i=70^\circ$, $h_p=20182\text{km}$ και $\Omega_k=0$, $M_k=0$. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν 14 αντίγραφα του δορυφόρου στα οποία εκχωρήθηκαν οι τιμές της ορθής αναφοράς του ανιόντος δεσμού (Ω_i) και της Μέσης Ανωμαλίας (M_i) που αντιστοιχούν στους υπόλοιπους 14 δορυφόρους του σχηματισμού του Πίνακα 32. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για να εισαχθεί και ο 2^{ος} σχηματισμός FC με μοναδική διαφορά ότι στον πρώτο δορυφόρο του σχηματισμού το όρισμα του περιγείου είναι ίσο με $\omega=90^\circ$.

Σε κάθε περίπτωση, ως χρονικό διάστημα αναπαραγωγής της τροχιάς ορίζεται προφανώς το συνολικό χρονικό διάστημα μελέτης του σεναρίου (από προεπιλογή).

6.3.2.3 GALILEO

Όσον αφορά τον σχηματισμό GALILEO, η εισαγωγή του έγινε με χρήση του Walker Tool του STK. Αρχικά δημιουργήθηκε ο δορυφόρος που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια ως δορυφόρος-γονέας για τον σχηματισμό. Τα τροχιακά του στοιχεία είναι τα εξής: apogee altitude=23222km, perigee altitude (h_p)=23222km, $i=56^\circ$, $\omega=0^\circ$, $\Omega=0^\circ$, $M=0^\circ$. Ως αναπαραγωγέας τροχιάς επιλέχθηκε και σε αυτή την περίπτωση ο J4 perturbations propagator.

Στη συνέχεια, με χρήση του Walker Tool δημιουργήθηκε ένας σχηματισμός Walker με τις εξής παραμέτρους:

- Συνολικός αριθμός δορυφόρων $T=30$,
- Συνολικός αριθμός τροχιακών επιπέδων $P=3$,
- Παράμετρος φάσης $F=1$ και
- RAAN spread=360° (δηλαδή οι ανιόντες δεσμοί των τριών τροχιακών επιπέδων κατανέμονται στο σύνολο του ισημερινού επιπέδου και όχι σε ένα τμήμα του).

Επί της ουσίας, δημιουργήθηκε ένας σχηματισμός Walker 30/3/1 με $i=56^\circ$.

6.3.3 Καθορισμός της περιοχής ενδιαφέροντος και δημιουργία του πλέγματος σημείων

Ως περιοχή ενδιαφέροντος επιλέχθηκε η ζώνη γεωγραφικού πλάτους από $\phi=70^\circ$ έως και $\phi=-60^\circ$, καθώς αυτή είναι η πιο πυκνοκατοικημένη ζώνη της Γης και σε αυτή τη ζώνη συγκεντρώνεται σχεδόν το σύνολο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

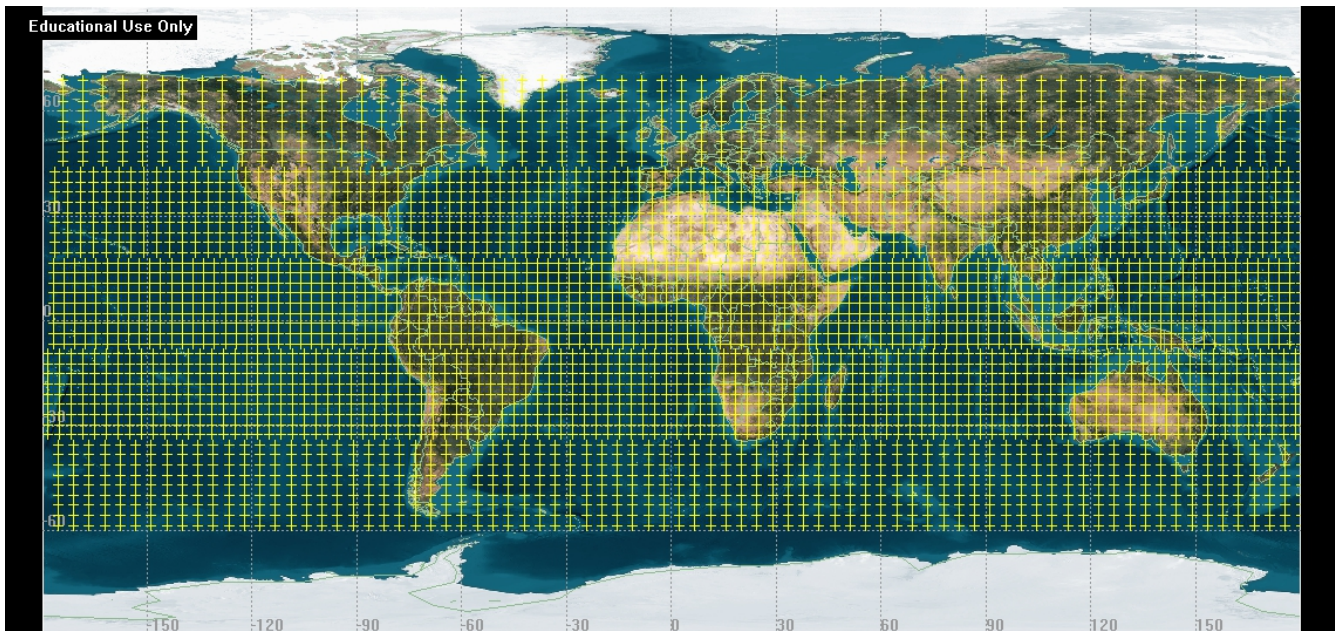
Προκειμένου να εξεταστεί η ποιότητα κάλυψης κάθε σχηματισμού, δημιουργήθηκε ένα πλέγμα σημείων στην ζώνη ενδιαφέροντος με χρήση του αντικειμένου του STK, Coverage Definition.

Στο μενού, που αφορά το πλέγμα της περιοχής κάλυψης, ορίζεται γωνιακή απόσταση μεταξύ των σημείων του πλέγματος ίση με 3° στον ισημερινό. Η απόσταση μεταξύ των σημείων μεταβάλλεται ελαφρά ώστε να διατηρηθεί το εμβαδόν των σημείων του πλέγματος όσο το δυνατόν ίδιο, ανεξάρτητα από το γεωγραφικό πλάτος. Το υψόμετρο των σημείων του πλέγματος επιλέχθηκε κατά τέτοιο τρόπο, ώστε όλα τα σημεία να βρίσκονται πάνω στη μέση στάθμη της θάλασσας. Το πλέγμα αποτελείται από 4212 σημεία. Στο σχήμα 123 απεικονίζεται το πλέγμα των σημείων που εφαρμόστηκε στην περιοχή κάλυψης.

Επίσης εφαρμόστηκε μία γωνία αποκοπής ίση με 10° , όπως συμβαίνει συνήθως και με τις μετρήσεις GPS. Προκειμένου να τεθεί ο παραπάνω περιορισμός στην γωνία ύψους (elevation angle) των σημείων του πλέγματος, δημιουργήθηκε ένας στόχος με περιορισμό στην γωνία ύψους του ίσο με 10° και στη συνέχεια από την επιλογή Grid Constrains (Coverage Definition Properties → Basic Properties → Grid → Grid Constraint Options) ορίστηκε μέσω της επιλογής “Use Object Instance” ο συγκεκριμένος στόχος. Με αυτό τον τρόπο, όλοι οι περιορισμοί που έχουν καθοριστεί για τον εν λόγω στόχο, εφαρμόζονται σε κάθε σημείο του πλέγματος της περιοχής ενδιαφέροντος.

Προφανώς, και στα τέσσερα σενάρια χρησιμοποιήθηκαν η ίδια περιοχή κάλυψης, το ίδιο πλέγμα σημείων και οι ίδιοι περιορισμοί.

Στη συνέχεια, εκχωρούνται ως αντικείμενα ενδιαφέροντος (*assigned coverage assets*) οι δορυφόροι του σχηματισμού που μελετάται, ανάλογα με το σενάριο. Σε κάθε περίπτωση, ως περίοδος μελέτης της κάλυψης ορίζεται η περίοδος μελέτης του αντίστοιχου σεναρίου. Μετά και από αυτό το βήμα έχει ολοκληρωθεί ο καθορισμός των παραμέτρων του Coverage Definition και απομένει ο υπολογισμός της κάλυψης (Compute Access) για κάθε σενάριο.



Σχήμα 123: Το πλέγμα σημείων (coverage definition grid points) που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή.

6.3.4 Υπολογισμός της ποιότητας κάλυψης για τον κάθε σχηματισμό

Η εκτίμηση της ποιότητας κάλυψης έγινε με χρήση των διαθέσιμων δεικτών FOM του STK. Πιο συγκεκριμένα, αποφασίστηκε να γίνει χρήση του δείκτη GDOP και του δείκτη N asset coverage (όπως αυτοί περιγράφονται στις ενότητες 3.6.4.12 και 3.6.4.6 αντίστοιχα).

Πιο συγκεκριμένα, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν στατικές τιμές του δείκτη GDOP που προκύπτουν για κάθε σημείο του πλέγματος. Οι στατικές τιμές που χρησιμοποιούνται είναι:

- Η μέγιστη τιμή του δείκτη GDOP, η οποία είναι η μέγιστη τιμή που παρατηρείται σε κάθε σημείο για το σύνολο της περιόδου μελέτης.
- Η μέση τιμή του δείκτη GDOP, η οποία είναι η μέση τιμή του δείκτη GDOP που παρατηρείται σε κάθε σημείο για το σύνολο της περιόδου μελέτης.
- Η τιμή του GDOP για την οποία ισχύει ότι οι υπολογιζόμενες τιμές του GDOP, για το κάθε σημείο και για το σύνολο της περιόδου μελέτης, είναι μικρότερες από αυτή για το 90% του χρόνου.

Υπενθυμίζεται ότι οι στατικές τιμές του δείκτη GDOP προκύπτουν ως εξής: Αρχικά υπολογίζονται από το STK οι χρονοσειρές με τις τιμές του GDOP για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης και για τα 4212 σημεία που απαρτίζουν το πλέγμα με το επιλεγμένο χρονικό βήμα. Στη συνέχεια υπολογίζεται από την χρονοσειρά του κάθε σημείου η επιλεγμένη από τον χρήστη στατική τιμή.

Ας σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό της τιμής του δείκτη GDOP χρησιμοποιούνται όλοι οι διαθέσιμοι (ορατοί) δορυφόροι (και όχι, για παράδειγμα, οι τέσσερις καλύτεροι).

Επίσης το χρονικό βήμα δειγματοληψίας (*sampling time*) που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των στατικών τιμών επιλέχθηκε να είναι 300sec.

Πέρα από το δείκτη GDOP, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο και ο ελάχιστος αριθμός ορατών δορυφόρων σε κάθε σημείο για το σύνολο της περιόδου μελέτης.

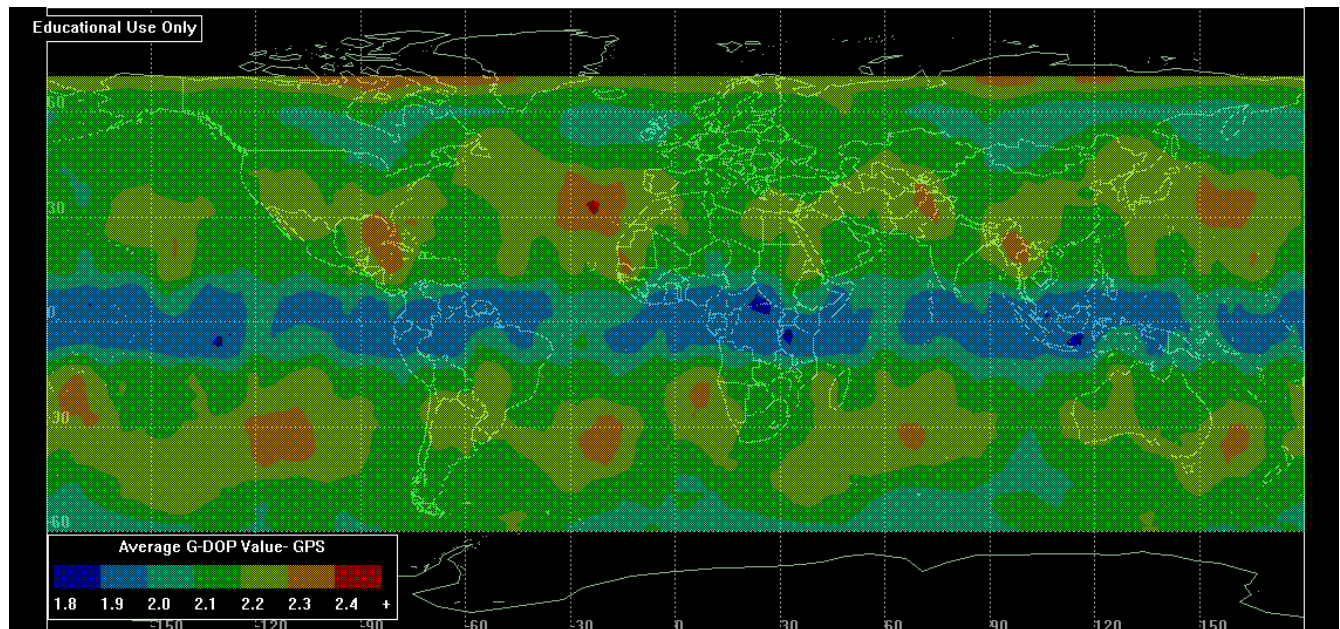
Στην παρακάτω ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το κάθε σενάριο.

6.3.5 Αποτελέσματα του κάθε σεναρίου

6.3.5.1 Σενάριο 1 (GPS)

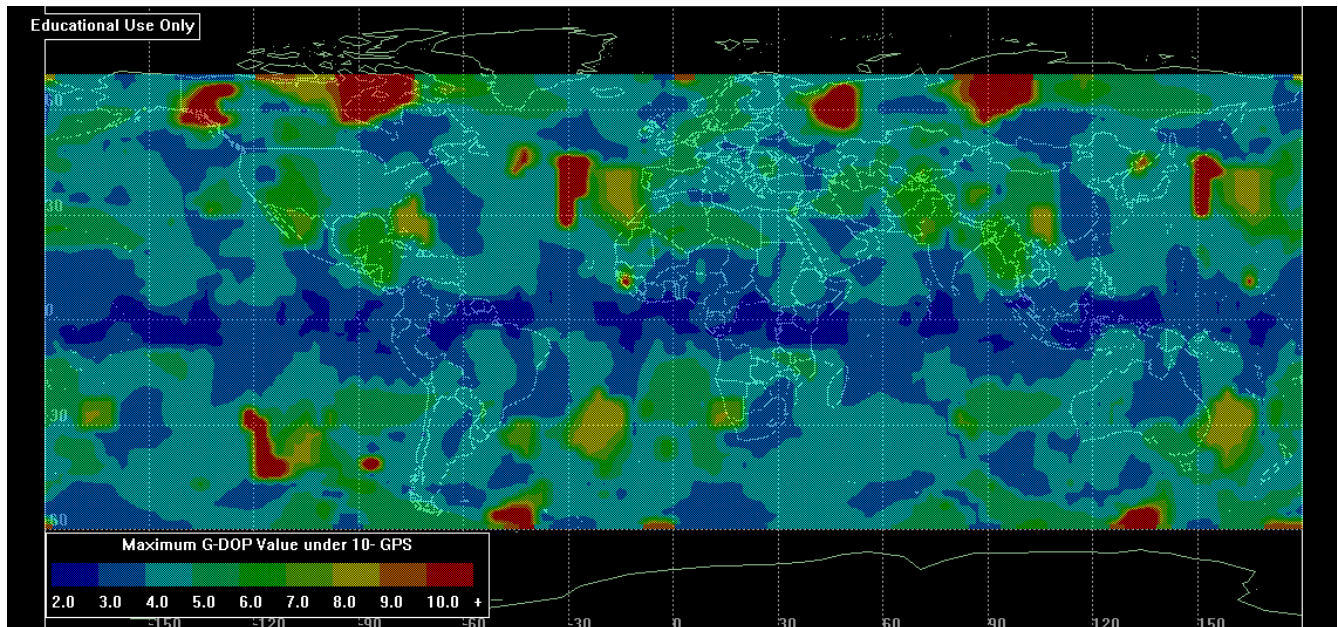
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τον σχηματισμό GPS παρουσιάζονται στα σχήματα 124 μέχρι και 129 και στον Πίνακα 35.

Στον χάρτη του σχήματος 124 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές του δείκτη GDOP για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης. Οι χαμηλότερες τιμές του δείκτη GDOP (από 1.8 έως και 2.1) παρατηρούνται σε μία ζώνη δέκα μοιρών γύρω από τον ισημερινό. Στα μέσα και μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη σε γενικές γραμμές οι στατικές τιμές του δείκτη κυμαίνονται μεταξύ 2.1 και 2.3, ενώ ξεπερνούν το 2.3 σε θαλάσσιες περιοχές των μεγάλων ωκεανών, όπου και δεν είναι απαραίτητη πολύ μεγάλη ακρίβεια κατά την πλοήγηση.



Σχήμα 124: Χάρτης που παρουσιάζει τις μέσες τιμές του δείκτη GDOP για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης που προκύπτει για τον σχηματισμό GPS.

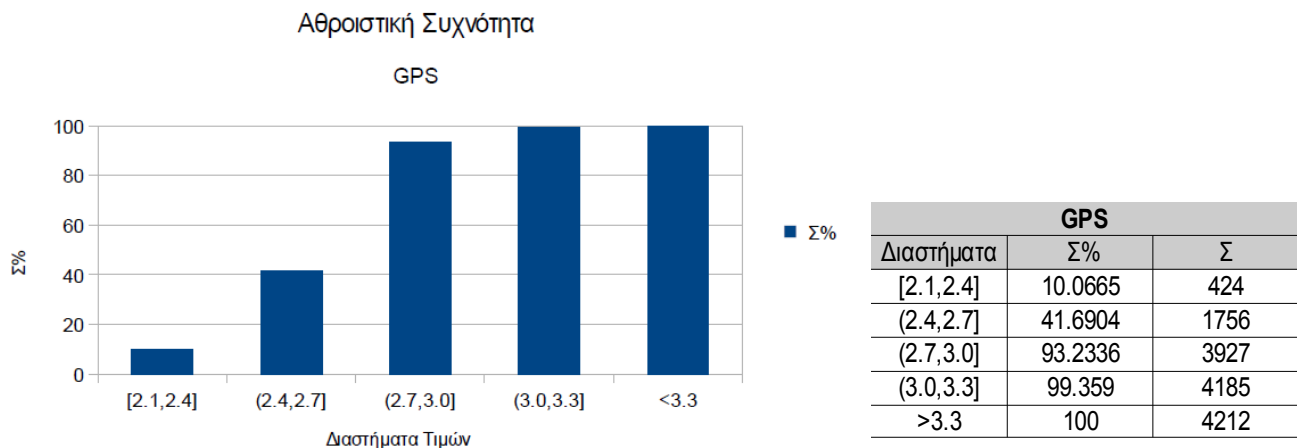
Στο χάρτη του σχήματος 125 απεικονίζονται οι μέγιστες τιμές του δείκτη GDOP που παρατηρούνται σε κάθε σημείο για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης. Για το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης οι μέγιστες παρατηρούμενες τιμές του GDOP δεν ξεπερνούν το έξι. Παρόλα αυτά υπάρχουν τμήματα που παρουσιάζουν μέγιστες τιμές GDOP μεγαλύτερες του 10, αλλά στο σύνολό τους εντοπίζονται είτε στο μέσο ωκεανών, είτε σε αραιοκατοικημένες περιοχές, όπως στην Σιβηρία ή στον Βόρειο Καναδά. Για την Ελλάδα η μέγιστη τιμή που GDOP που παρατηρείται κυμαίνεται μεταξύ 4 και 5.



Σχήμα 125: Χάρτης που παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του δείκτη GDOP για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης που προκύπτει για τον σχηματισμό GPS.

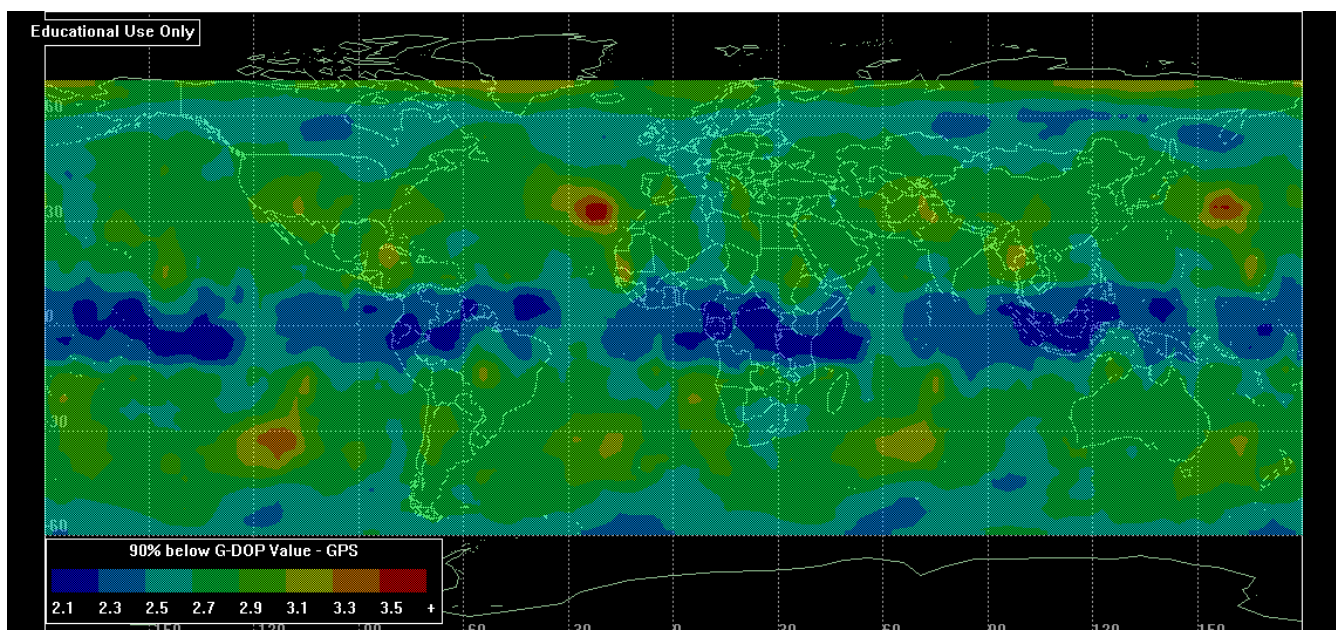
Ίσως ο σημαντικότερος στατικός δείκτης που υπολογίστηκε είναι ο δείκτης που απεικονίζεται στον χάρτη του σχήματος 127. Πρόκειται για την τιμή κάτω από την οποία κυμαίνεται ο δείκτης GDOP για το 90% του χρόνου σε κάθε σημείο. Όπως και στο σχήμα 124, και σε αυτή την περίπτωση η καλύτερη απόδοση παρατηρείται στα μικρά γεωγραφικά πλάτη γύρω από τον ισημερινό. Στις περιοχές που συγκεντρώνεται σχεδόν το σύνολο της ανθρώπινης δραστηριότητας και κατά συνέπεια προκύπτει μεγαλύτερη ανάγκη για ακριβή πλοήγηση η μέγιστη τιμή του δείκτη GDOP για το 90% του χρόνου δεν ξεπερνά το 3. Λόγω της σημασίας του συγκεκριμένου δείκτη, κρίθηκε σκόπιμος ο υπολογισμός της αθροιστικής συχνότητας εμφάνισης των στατικών τιμών του δείκτη στα σημεία που απαρτίζουν το πλέγμα της περιοχής μελέτης. Για τον σκοπό αυτό συντάχθηκε μία κατάλληλη ρουτίνα στο λογισμικό matlab, η οποία υπολογίζει το εύρος τιμών, δημιουργεί τα κατάλληλα διαστήματα τιμών και υπολογίζει την συχνότητα εμφάνισης των τιμών που ανήκουν στο κάθε διάστημα. Τέλος, δημιουργείται ο πίνακας (Πίνακας) και το διάγραμμα αθροιστικής συχνότητας εμφάνισης των τιμών του GDOP (Διάγραμμα).

Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 126 και στον πίνακα 34 για το 93% των σημείων η τιμή του δείκτη GDOP είναι κάτω από 3 για το 90% του χρόνου, ενώ για το 99.35% των σημείων η τιμή του GDOP είναι κάτω από 3.3 για το 90% του χρόνου.



Σχήμα 126: Αθροιστική Συχνότητα Εμφάνισης των τιμών GDOP για το σχηματισμό GPS.

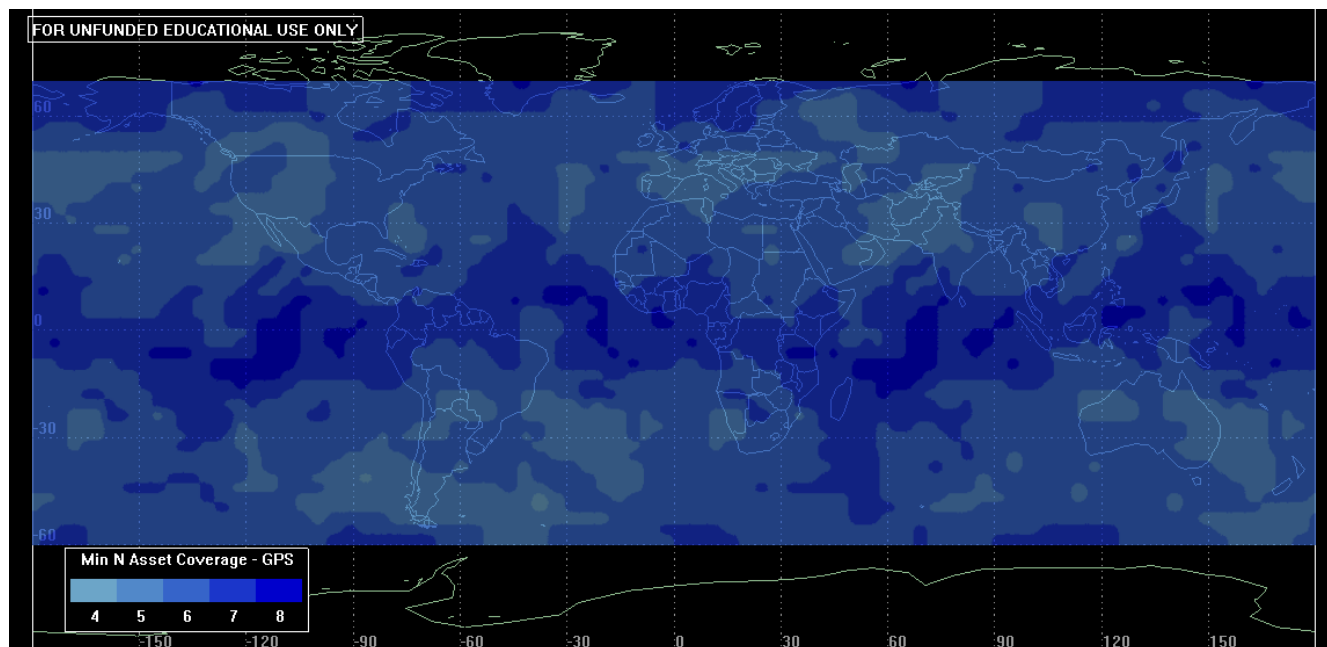
Πίνακας 34 Αθροιστική Συχνότητα Εμφάνισης των τιμών GDOP για το σχηματισμό GPS.



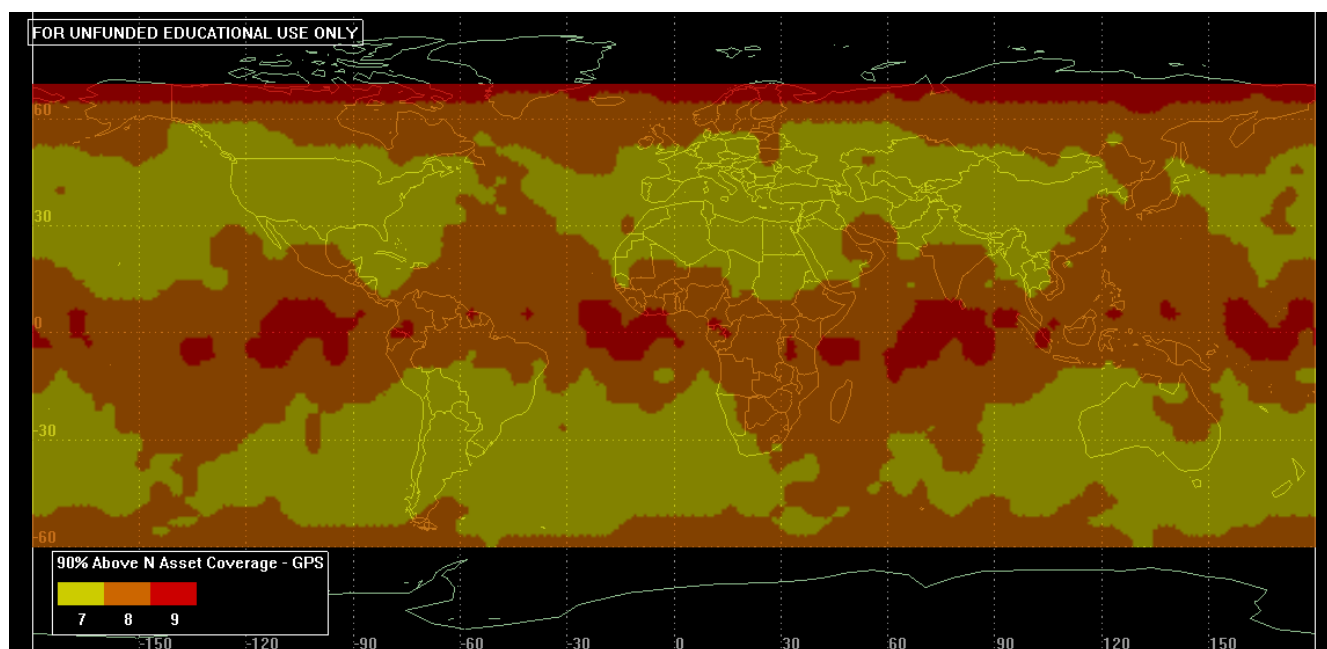
Σχήμα 127: Χάρτης που παρουσιάζει τις τιμές, κάτω από τις οποίες κυμαίνεται ο δείκτης GDOP στο 90% του χρόνου μελέτης, που προκύπτει για τον σχηματισμό GPS.

Στο σχήμα 128 παρουσιάζεται ο ελάχιστος αριθμός ορατών δορυφόρων που παρατηρήθηκε σε κάθε σημείο για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης, ενώ στο χάρτη του σχήματος 129 απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός δορυφόρων που καλύπτουν κάθε σημείο για το 90% του χρόνου μελέτης. Παρατηρείται ότι για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης κάθε σημείο έχει ορατότητα τουλάχιστον προς τέσσερις δορυφόρους του σχηματισμού GPS, τιμή που εμφανίζεται σε ελάχιστα

σημεία σε ωκεάνιες περιοχές. Όσον αφορά το 90% του χρόνου κάθε σημείο έχει ορατότητα σε τουλάχιστον 7 δορυφόρους.



Σχήμα 128: Χάρτης που παρουσιάζει τον ελάχιστο αριθμό ορατών δορυφόρων σε κάθε σημείο, που παρατηρήθηκε κατά το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης για τον σχηματισμό GPS.



Σχήμα 129: Χάρτης που παρουσιάζει τον ελάχιστο αριθμό δορυφόρων που καλύπτουν κάθε σημείο για το 90% του χρόνου για τον σχηματισμό GPS.

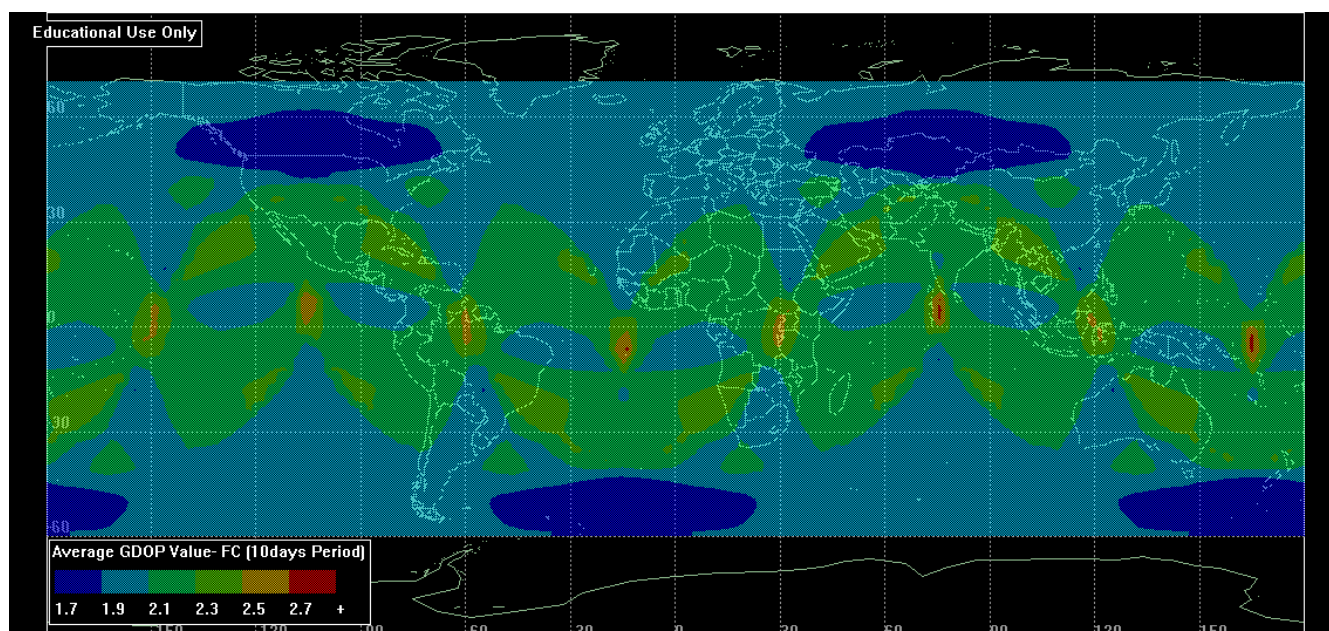
Grid Stats	GPS			
	Average	Maximum	90% Beow	Min Number of Assets
Minimum	1.88	2.44	2.11	4.00
Average	2.14	4.66	2.71	6.20
Maximum	2.41	18.43	3.64	8.00

Πίνακας 35: Στατιστικές Τιμές του δείκτη GDOP που προέκυψαν για τον σχηματισμό του συστήματος GPS.

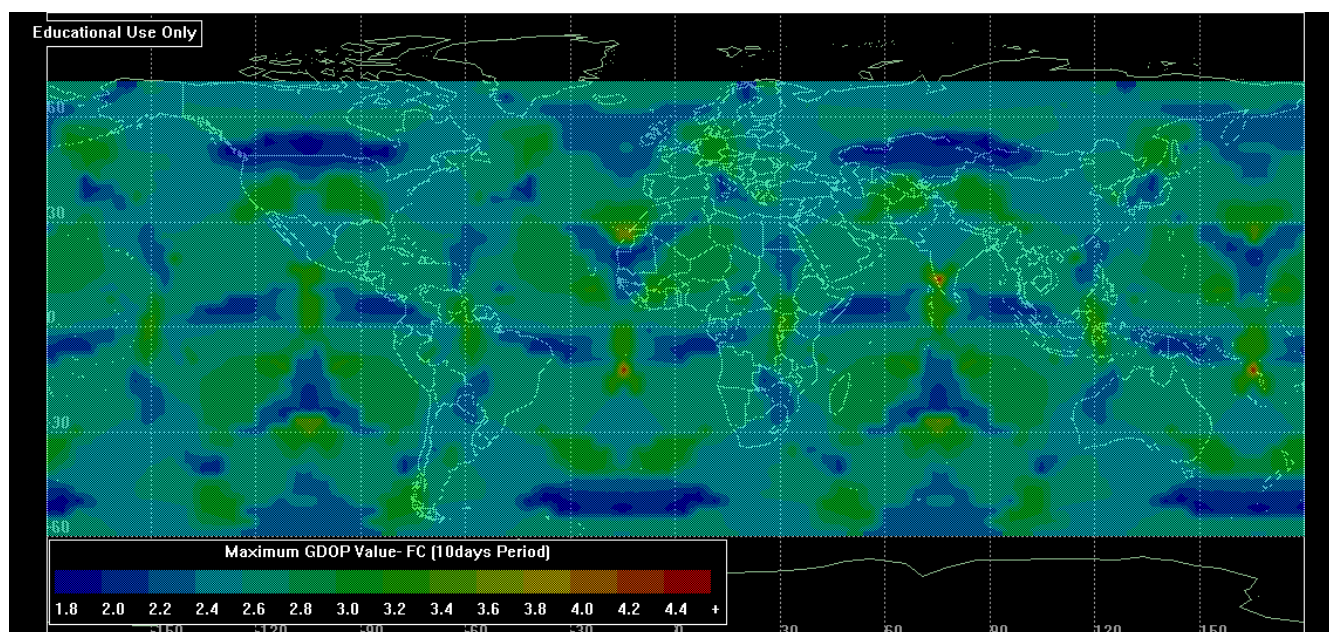
Ο Πίνακας 35 παρουσιάζει τις στατιστικές τιμές του δείκτη GDOP για το σύνολο των σημείων που μελετήθηκαν. Οι στήλες του πίνακα αναφέρονται στις στατικές τιμές του δείκτη GDOP που υπολογίστηκαν για κάθε σημείο και που αφορούν το συνολικό χρονικό διάστημα μελέτης. Οι σειρές αντίστοιχα αναφέρονται στις στατιστικές τιμές που προκύπτουν για το σύνολο των στατικών τιμών όλων των σημείων του πλαισίου. Για παράδειγμα το στοιχείο που αντιστοιχεί στην στήλη Average και στην σειρά Minimum είναι η ελάχιστη τιμή που παρατηρήθηκε στο σύνολο των σημείων του πλέγματος, όπου η στατική τιμή που έχει εκχωρηθεί στο κάθε σημείο είναι ο μέσος όρος των τιμών του δείκτη GDOP που είχε το κάθε σημείο καθ' όλη τη διάρκεια μελέτης.

6.3.5.2 Σενάριο 2 και Σενάριο 4 (GNFC)

Μετά από δοκιμές προέκυψε ότι οι στατικές τιμές του δείκτη GDOP είναι οι ίδιες είτε χρησιμοποιηθεί περίοδος 1 ημέρας, είτε περίοδος 10 ημερών (διαφέρουν στο 4ο δεκαδικό ψηφίο). Το αποτέλεσμα αυτό είναι απολύτως λογικό, εφόσον η περίοδος επανάληψης της τροχιάς του σχηματισμού ισούται με 1 ημέρα και επομένως για περίοδο μελέτης 10 ημερών η γεωμετρία του GNFC απλά επαναλαμβάνεται 10 φορές στο σενάριο 4. Για το λόγο αυτό παρατίθενται μόνο τα αποτελέσματα του σεναρίου 4 στα σχήματα 130 μέχρι 135 και στον Πίνακα 37, ο οποίος έχει συνταχθεί με την ίδια ακριβώς λογική, όπως και ο Πίνακας 35.



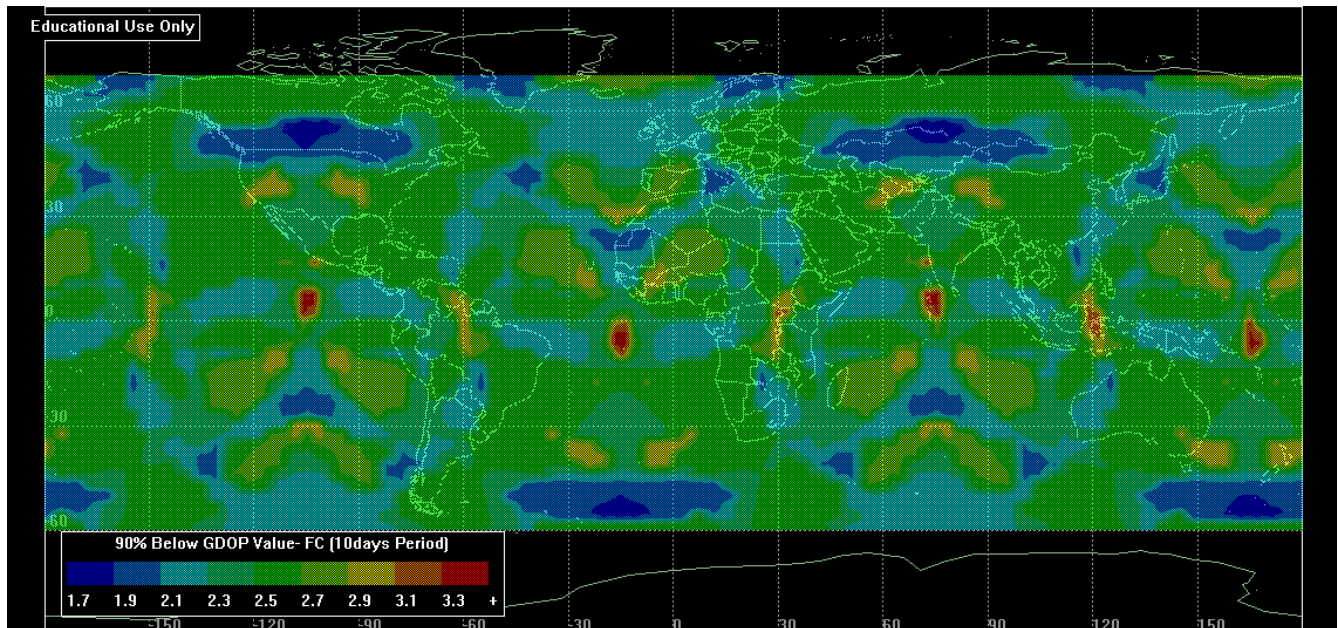
Σχήμα 130: Χάρτης που παρουσιάζει τις μέσες τιμές του δείκτη GDOP για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης που προκύπτει για τον σχηματισμό GNFC.



Σχήμα 131: Χάρτης που παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του δείκτη GDOP για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης που προκύπτει για τον σχηματισμό GNFC.

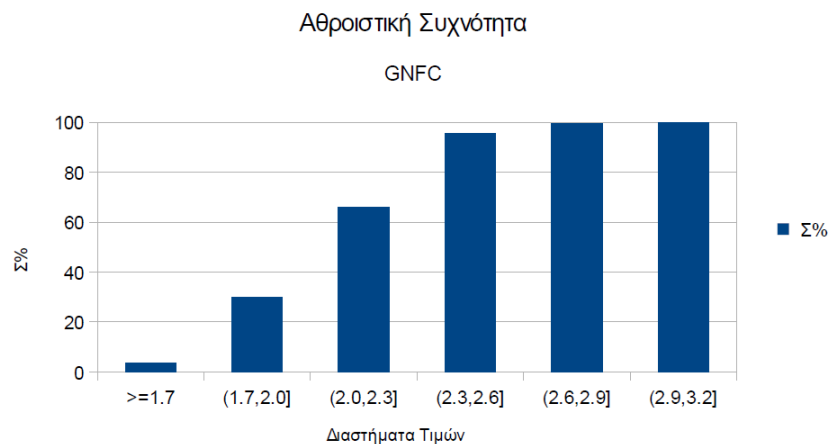
Ο χάρτης του σχήματος 130 απεικονίζει τις μέσες τιμές του δείκτη GDOP για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης. Οι τιμές κυμαίνονται από 1.7 έως και 2.7, με το σύνολο σχεδόν της Ευρώπης να χαρακτηρίζεται από μία μέση τιμή που κυμαίνεται από 1.9 έως και 2.1. Στο χάρτη του σχήματος 131 απεικονίζονται οι μέγιστες τιμές του GDOP που παρατηρούνται για το σύνολο της χρονικής περιόδου

μελέτης. Στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης οι τιμές αυτές δεν ξεπερνούν το 3.4, και σε ελάχιστες περιπτώσεις ξεπερνά το 4 σε θαλάσσιες περιοχές που εντοπίζονται στο μέσο των ωκεανών.



Σχήμα 132: Χάρτης που παρουσιάζει τις τιμές, κάτω από τις οποίες κυμαίνεται ο δείκτης GDOP στο 90% του χρόνου μελέτης, που προκύπτει για τον σχηματισμό GNFC.

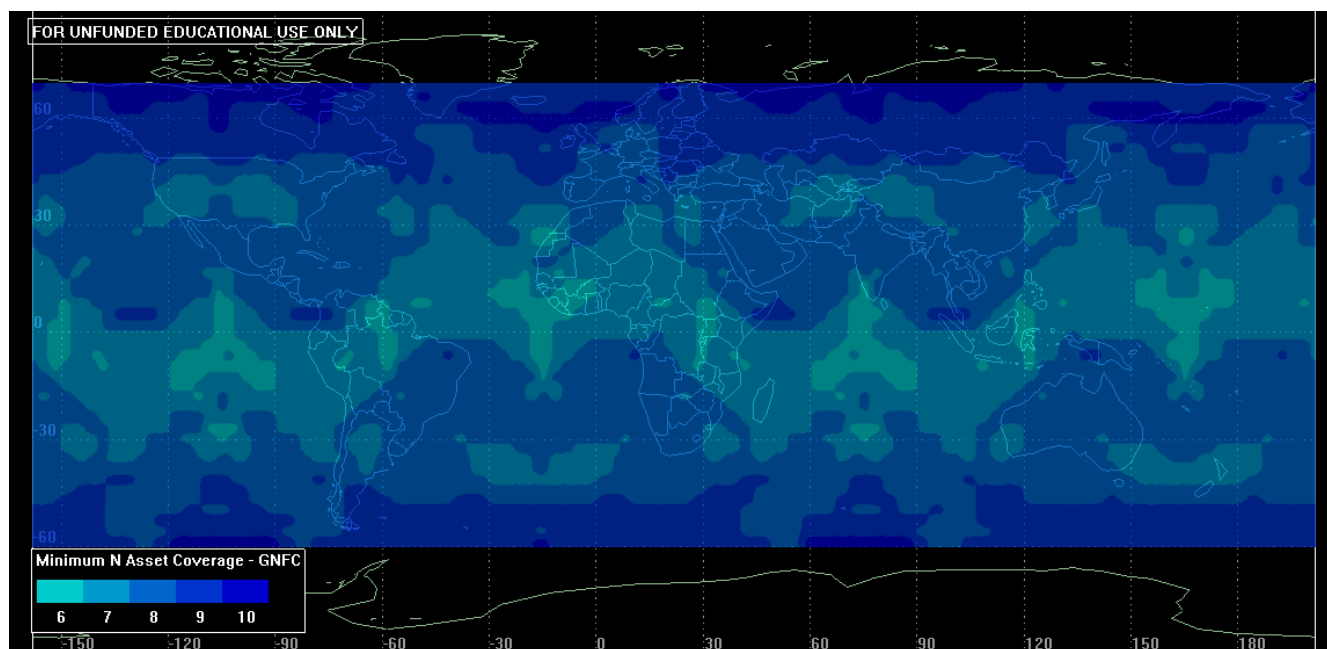
Στο σχήμα 132 παρουσιάζονται οι τιμές, κάτω από τις οποίες κυμαίνεται ο δείκτης GDOP στο 90% του χρόνου μελέτης, με το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης να εμφανίζει τιμές μικρότερες του 2.9. Όπως και στην περίπτωση αξιολόγησης του σχηματισμού GPS, υπολογίστηκε η αθροιστική συχνότητα για τον συγκεκριμένο στατικό δείκτη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 133 και στον πίνακα 36, από τα οποία και προκύπτει ότι για το 95.65% των σημείων η τιμή του δείκτη GDOP δεν υπερβαίνει το 2.9 για το 90% του χρόνου μελέτης, ενώ για το 99.48% των σημείων η τιμή του δείκτη GDOP δεν υπερβαίνει το 3.2 για το 90% του χρονικού διαστήματος μελέτης.



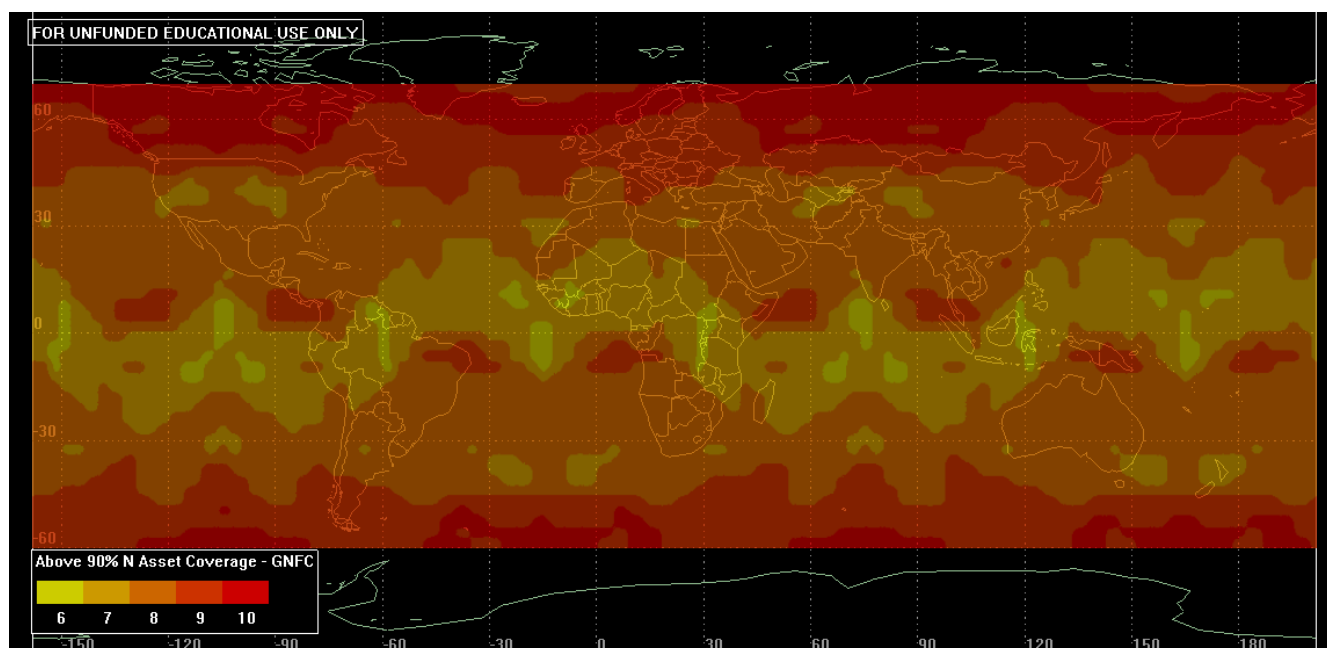
GNFC		
Διαστήματα	Σ%	Σ
(1.7,2.0]	3.5613	150
(2.0,2.3]	29.7483	1253
(2.3,2.6]	66.0256	2781
(2.6,2.9]	95.6553	4029
(2.9,3.2]	99.4777	4190
>3.2	100	4212

Πίνακας 36: Αθροιστική Συχνότητα Εμφάνισης των τιμών GDOP για το σχηματισμό GNFC.

Σχήμα 133: Αθροιστική Συχνότητα Εμφάνισης των τιμών GDOP για το σχηματισμό GNFC.



Σχήμα 134: Χάρτης που παρουσιάζει τον ελάχιστο αριθμό ορατών δορυφόρων σε κάθε σημείο, που παρατηρήθηκε κατά το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης για τον σχηματισμό GNFC.



Σχήμα 135: Χάρτης που παρουσιάζει τον ελάχιστο αριθμό δορυφόρων που καλύπτουν κάθε σημείο για το 90% του χρόνου για τον σχηματισμό GPS.

Στα σχήματα 134 και 135 παρουσιάζονται οι ελάχιστοι ορατοί δορυφόροι από κάθε σημείο για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης και για το 90% του χρόνου μελέτης αντίστοιχα. Σε κάθε σημείο της περιοχής μελέτης υπάρχουν τουλάχιστον έξι ορατοί δορυφόροι στο σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης.

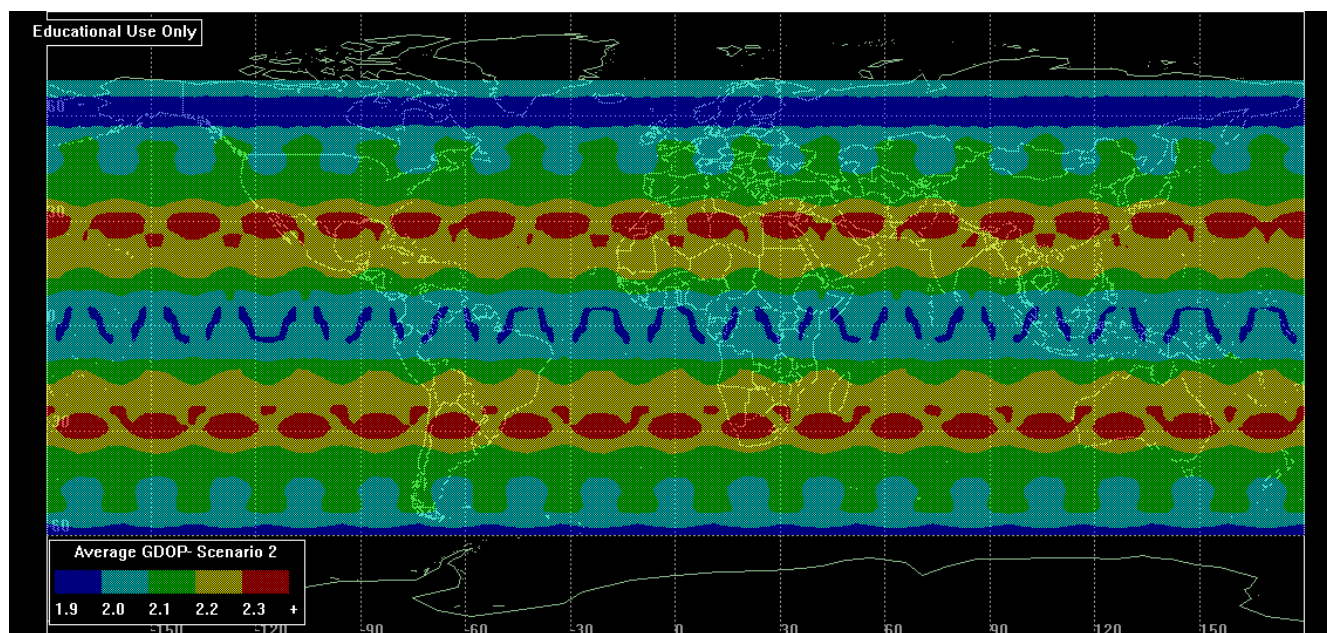
Στο πίνακα 37 παρουσιάζονται οι στατιστικές τιμές που προέκυψαν για το σύνολο του πλέγματος σημείων για κάθε έναν από τους στατικούς δείκτες που παρουσιάζονται στους παραπάνω χάρτες. Επί της ουσίας παρουσιάζονται τα εύρη τιμών και η μέση τιμή για τον κάθε στατική τιμή DOP που χρησιμοποιήθηκε, συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της αξιολόγησης.

Grid Stats	GNFC			
	Average	Maximum	90% Beow	Min Number of Assets
Minimum	1.71	1.85	1.79	6.00
Average	2.09	2.62	2.47	7.80
Maximum	2.79	4.45	3.36	10.00

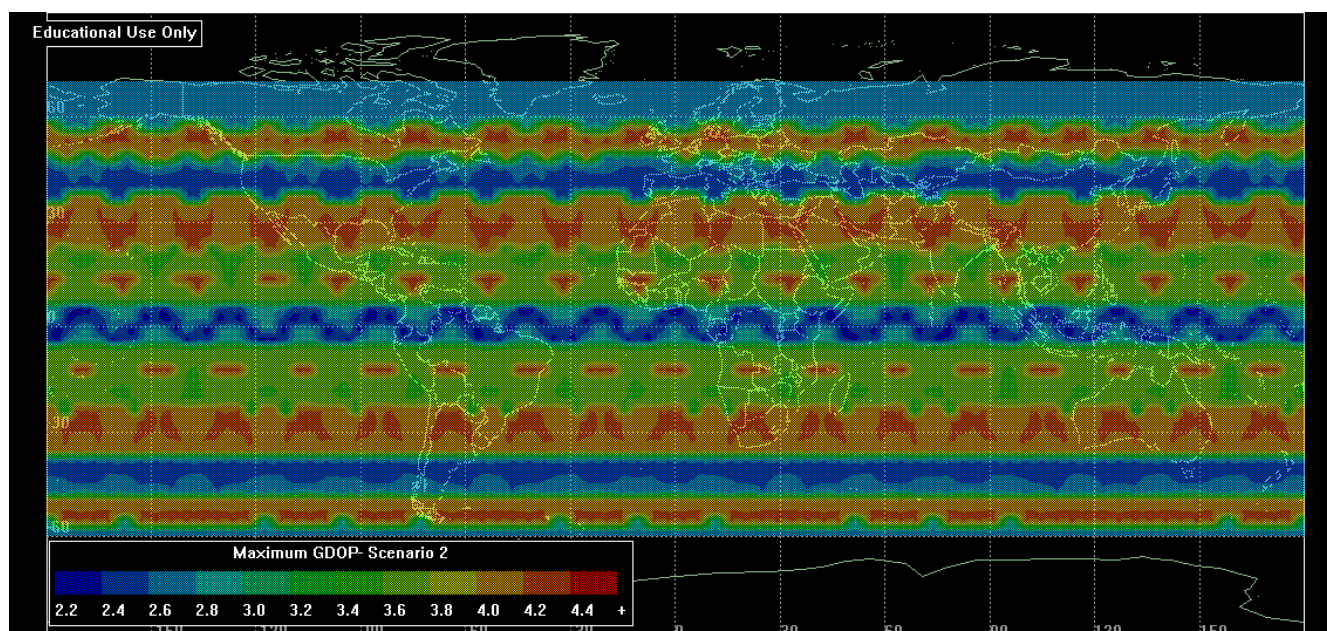
Πίνακας 37: Στατιστικές Τιμές του δείκτη GDOP για τον σχηματισμό του GNFC.

6.3.5.3 Σενάριο 3 (GALILEO)

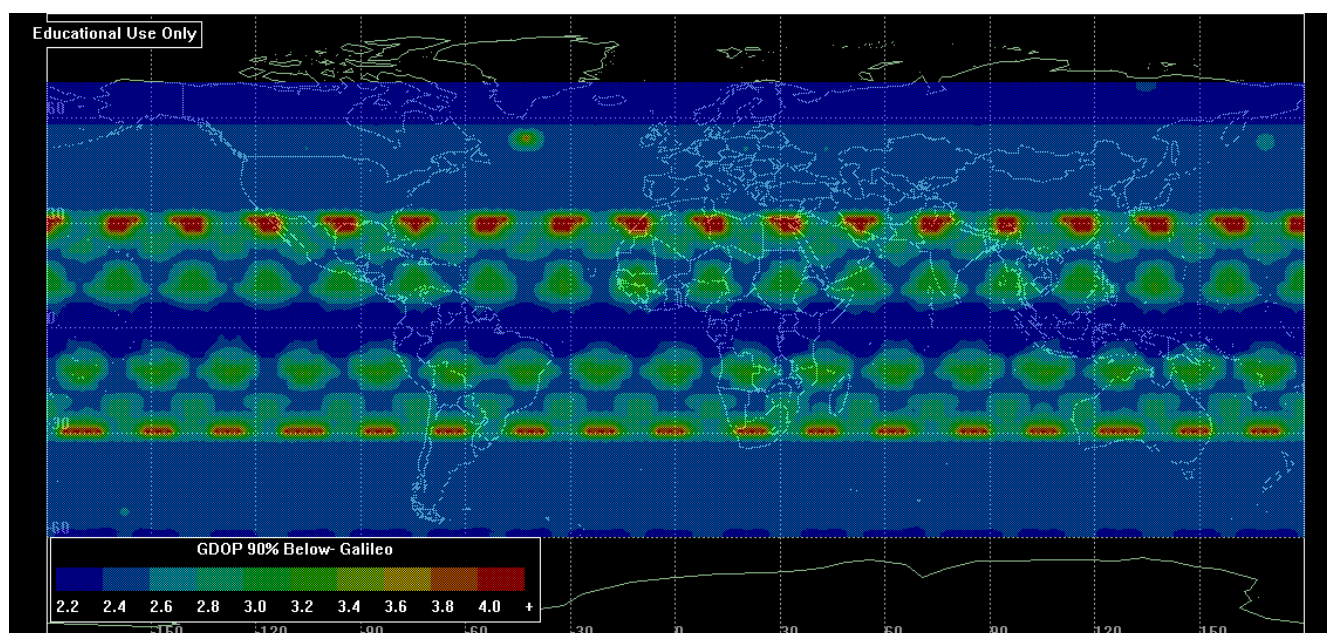
Τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν για το σενάριο 3 παρουσιάζονται στα σχήματα 136 μέχρι 141 και στον πίνακα 29. Στο χάρτη του σχήματος 136 απεικονίζεται η μέση τιμή του δείκτη GDOP κάθε σημείου για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης. Στο σχήμα 137 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές του δείκτη GDOP για το σύνολο της περιόδου μελέτης και στο σχήμα 138 η μέγιστη τιμή που παρατηρείται σε κάθε σημείο για το 90% του χρονικού διαστήματος μελέτης. Στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης, οι στατικές τιμές που προκύπτουν ανήκουν στο ίδιο διάστημα τιμών για παραπλήσια γεωγραφικά πλάτη, ενώ δίνεται η αίσθηση ότι μεταβάλλονται με το γεωγραφικό πλάτος, δημιουργώντας ζώνες παραπλήσιας στατικής τιμής του GDOP κατά μήκος ενός παραλλήλου.



Σχήμα 136: Χάρτης που παρουσιάζει τις μέσες τιμές του δείκτη GDOP για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης που προκύπτει για τον σχηματισμό GALILEO.



Σχήμα 137: Χάρτης που παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του δείκτη GDOP για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης που προκύπτει για τον σχηματισμό GALILEO.



Σχήμα 138: Χάρτης που παρουσιάζει τις τιμές, κάτω από τις οποίες κυμαίνεται ο δείκτης GDOP στο 90% του χρόνου μελέτης, που προκύπτει για τον σχηματισμό GALILEO.

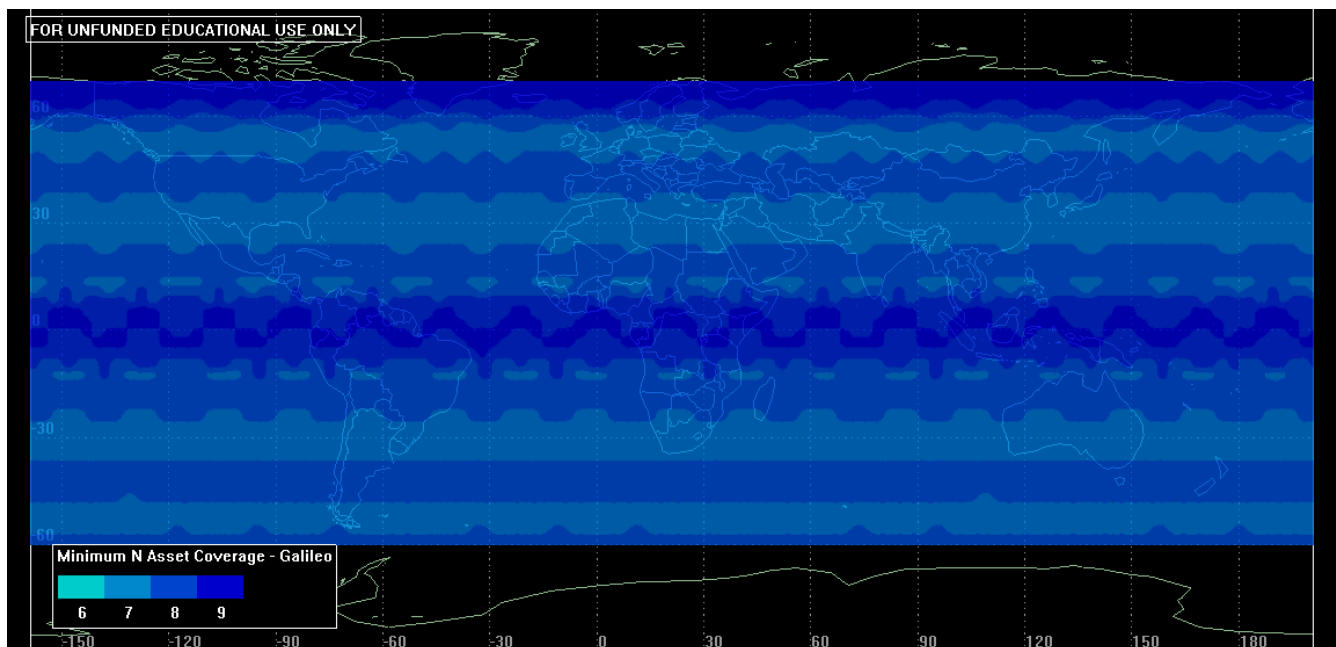
Αθροιστική Συχνότητα

GALILEO

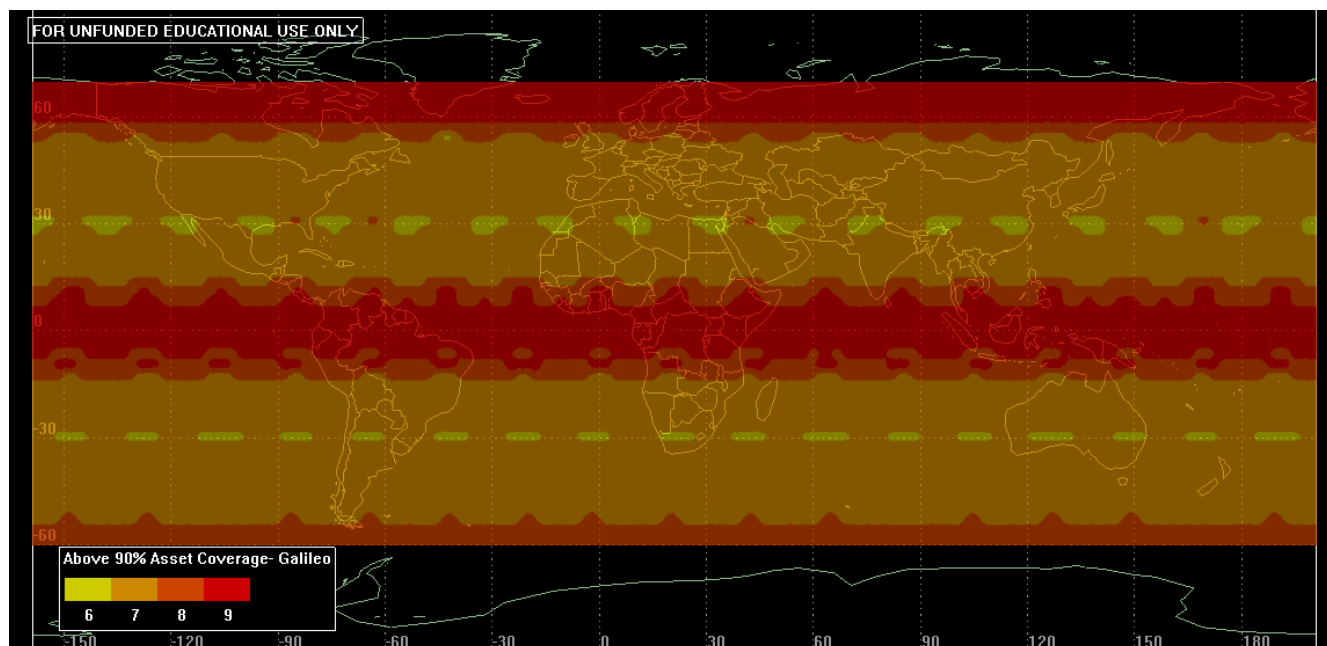
Διαστήματα Τιμών	Σ%
(2.2,2.5]	31.9563
(2.5,2.8]	78.7512
(2.8,3.1]	93.3523
(3.1,3.4]	96.6762
(3.4,3.7]	96.6762
(3.7,4]	96.6999
<4	100

■ Σ%

Πίνακας 38: Αθροιστική Συχνότητα Εμφάνισης των τιμών GDOP για το σχηματισμό GALILEO.



234



Σχήμα 141: Χάρτης που παρουσιάζει τον ελάχιστο αριθμό δορυφόρων που καλύπτουν κάθε σημείο για το 90% του χρόνου για τον σχηματισμό GALILEO.

Grid Stats	GALILEO			
	Average	Maximum	90% Beow	Min Number of Assets
Minimum	1.96	2.27	2.24	6.00
Average	2.15	3.46	2.63	6.96
Maximum	2.39	4.30	4.15	9.00

Πίνακας 39: Στατιστικές Τιμές του δείκτη GDOP για τον σχηματισμό του GALILEO.

Σε όλα τα παραπάνω σενάρια παρατηρούμε ότι οι τιμές του δείκτη GDOP που προκύπτουν για κάθε σχηματισμό αντιστοιχούν σε εξαιρετική (μέχρι 3) ή σε ελάχιστες περιπτώσεις σε καλή γεωμετρία (4-6) του εκάστοτε σχηματισμού. Ήδη από αυτά τα πρώτα αποτελέσματα προκύπτει ότι ο σχηματισμός GNFC είναι κατάλληλος για εφαρμογές πλοήγησης στο σύνολο της περιοχής μελέτης, στα ίδια ή καλύτερα επίπεδα κάλυψης όπως και οι δύο άλλοι σχηματισμοί. Το ζητούμενο όμως είναι η εξέταση της απόδοσης του σε σχέση με τους “συμβατικά” σχεδιασμένους σχηματισμούς GNSS, GPS και GALILEO.

6.3.6 Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των σεναρίων

Τα παραπάνω αποτελέσματα δίνουν μια γενική εικόνα της ποιότητας κάλυψης που παρέχουν οι τρεις σχηματισμοί. Προκειμένου όμως να αξιολογήσουμε την απόδοση του σχηματισμού GNFC, πρέπει να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εξέταση των άλλων δύο σχηματισμών.

Η σύγκριση πραγματοποιείται βάσει των διαφορών των στατικών τιμών των δεικτών GDOP που προέκυψαν για κάθε σχηματισμό. Οι διαφορές μεταξύ των τιμών των αντίστοιχων σημείων υπολογίζονται από έναν σύντομο κώδικα που συντάχθηκε στο matlab, ενώ από τα αρχεία που προέκυψαν, κατασκευάστηκαν χάρτες που απεικονίζουν τις διαφορές, με χρήση του προγράμματος surfer. Το παγκόσμιο υπόβαθρο των ακτογραμμών που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των χαρτών αποκτήθηκε από το site: <http://www.natureearthdata.com>.

Στις δύο ενδεικτικές συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν, υπολογίστηκαν οι διαφορές μεταξύ των διαφόρων στατικών τιμών GDOP που προέκυψαν για τον σχηματισμό GNFC και των στατικών τιμών που προέκυψαν για τους σχηματισμούς GPS και Galileo.

Οι διαφορές υπολογίζονται από την απλή σχέση:

$$\Delta GDOP_i = GDOP_i^{GPS} - GDOP_i^{GNFC} ,$$

όπου $\Delta GDOP_i$ είναι η διαφορά στην τιμή του δείκτη GDOP στο σημείο i, $GDOP_i^{GPS}$ η τιμή του δείκτη GDOP στο σημείο i για τον σχηματισμό GPS και $GDOP_i^{GNFC}$ η τιμή του δείκτη GDOP στο σημείο i για τον σχηματισμό GNFC. Οι διαφορές υπολογίζονται και για τους τρεις τύπους στατικών τιμών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των σχηματισμών που προηγήθηκε, δηλαδή για τις μέσες, μέγιστες και “90% Below” στατικές τιμές που προκύπτουν για το κάθε σημείο.

Αντίστοιχη σχέση ισχύει και για τον υπολογισμό των διαφορών των τιμών GDOP που προέκυψαν για τους σχηματισμούς Galileo και GNFC:

$$\Delta GDOP_i = GDOP_i^{Galileo} - GDOP_i^{GNFC} ,$$

Οι διαφορές αυτές μπορούν πολύ εύκολα να εκφραστούν και ως ποσοστό επί της εκατό της αντίστοιχης τιμής GDOP του σχηματισμού GPS και GALILEO, προκειμένου να παρατηρηθεί κατά πόσο επί τοις % βελτιώνεται ή χειροτερεύει η τιμή του GDOP εάν αντί του σχηματισμού GPS ή GALILEO χρησιμοποιούνταν για τον προσδιορισμό θέσης ο σχηματισμός GNFC. Μαθηματικά εκφρασμένη η διαφορά επί τοις % προκύπτει για τον σχηματισμό GPS:

$$\% \Delta GDOP_i = \frac{GDOP_i^{GPS} - GDOP_i^{GNFC}}{GDOP_i^{GPS}} \cdot 100 ,$$

και αντίστοιχα για τον σχηματισμό GALILEO:

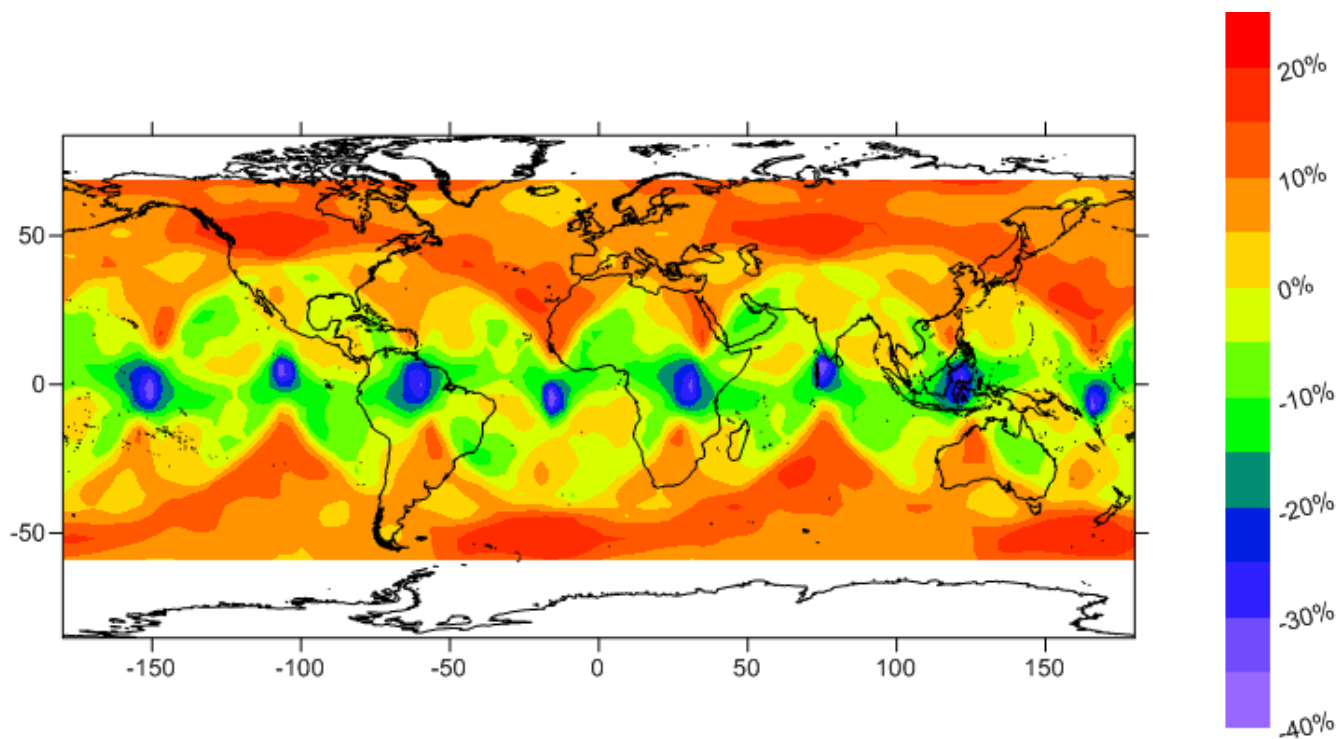
$$\% \Delta GDOP_i = \frac{GDOP_i^{Galileo} - GDOP_i^{GNFC}}{GDOP_i^{Galileo}} \cdot 100 ,$$

Βασισμένοι στους πίνακες που δημιουργήθηκαν με χρήση του λογισμικού MATLAB και αντιστοιχούν κάθε σημείο του πλέγματος με τις διαφορές επί τοις % του δείκτη GDOP στο κάθε σημείο, κατασκευάστηκαν οι χάρτες που παρουσιάζονται στα σχήματα 142 έως και 140.

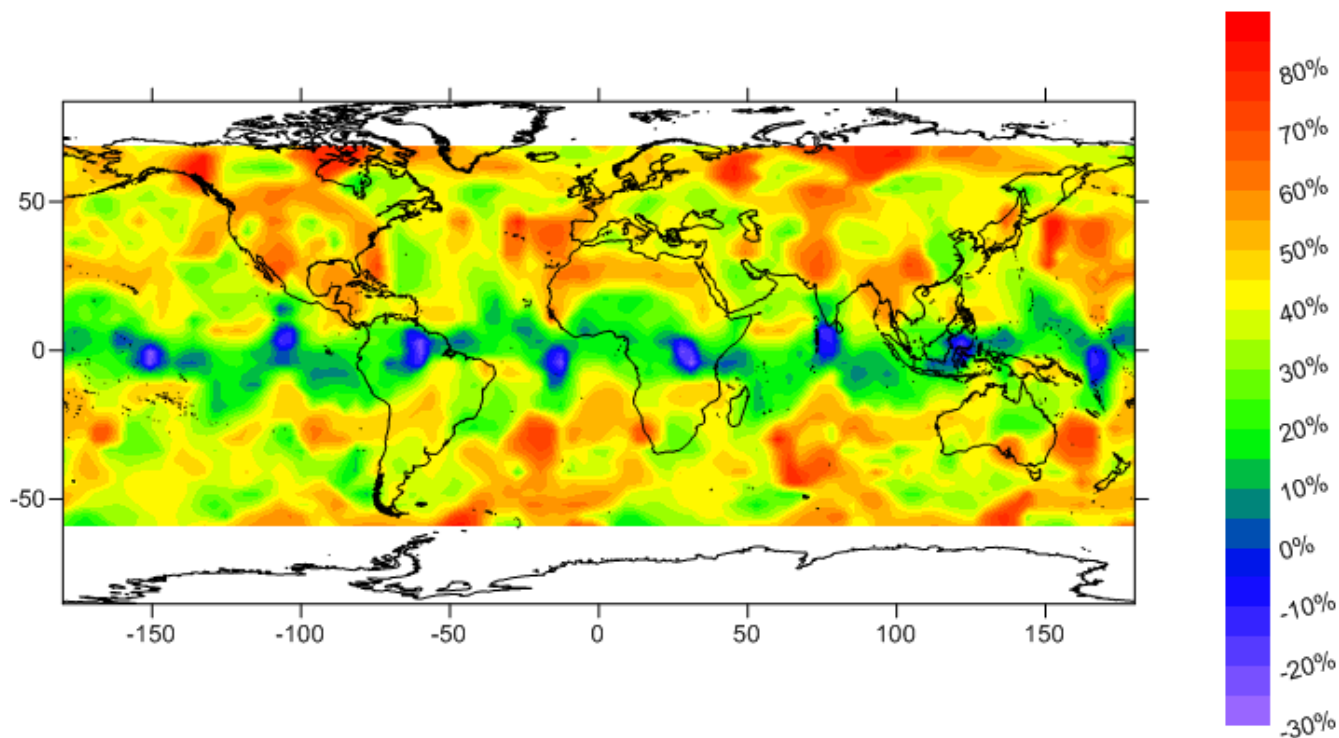
Επισημαίνεται ότι θετικές τιμές των διαφορών υποδηλώνουν μεγαλύτερες τιμές GDOP για τον σχηματισμό GPS και επομένως υπεροχή του σχηματισμού GNFC, καθώς όσο μικραίνει η τιμή του δείκτη GDOP τόσο βελτιώνεται η γεωμετρία των μετρήσεων. Όσον αφορά τον ελάχιστο αριθμό ορατών δορυφόρων, υπεροχή υποδηλώνουν οι αρνητικές τιμές καθώς οι διαφορές προκύπτουν αφαιρώντας από τον ελάχιστο αριθμό προσβάσιμων δορυφόρων του GPS, τον ελάχιστο αριθμό προσβάσιμων δορυφόρων του GNFC.

6.3.6.1 Διαφορές μεταξύ GPS και GNFC

Οι χάρτες των σχημάτων , και αναφέρονται στην σύγκριση μεταξύ των στατικών τιμών του GDOP που προέκυψαν για τους σχηματισμούς GPS και GNFC. Ακολουθώντας, στον πίνακα 40, παρουσιάζονται οι διαφορές στις στατιστικές τιμές των στατικών τιμών του δείκτη GDOP για το σύνολο των σημείων του πλέγματος. Για παράδειγμα, για το πλέγμα που αναφέρεται στον στατικό μέσο όρο του GDOP που προκύπτει για την χρονοσειρά του κάθε σημείου, υπολογίζεται η μέση τιμή που προκύπτει από το σύνολο των σημείων του πλέγματος. Υπολογίζονται επίσης, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που παρατηρούνται στο σύνολο των 4212 σημείων που απαρτίζουν το πλέγμα. Ο πίνακας 41 αναφέρεται στις αντίστοιχες τιμές του πίνακα 40, εκφρασμένες ως ποσοστιαίες διαφορές επί τοις % της αντίστοιχης “αρχικής” τιμής του GDOP που είχε προκύψει για τον σχηματισμό GPS.



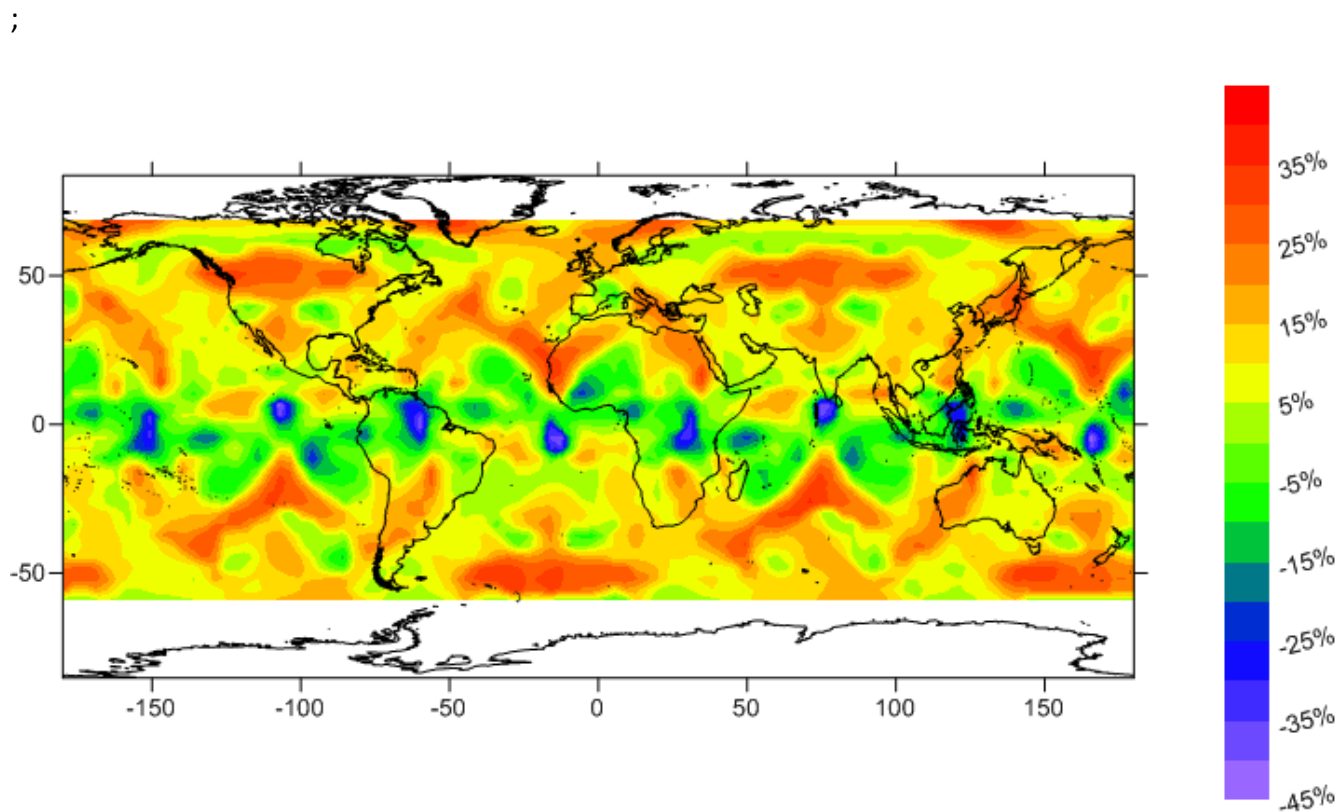
Σχήμα 142: Διαφορές ανάμεσα στις μέσες τιμές του GDOP που προέκυψαν για τους σχηματισμούς GPS και GNFC.



Σχήμα 143: Διαφορές ανάμεσα στις μέγιστες τιμές του GDOP που προέκυψαν για τους σχηματισμούς GPS και GNFC.

Grid Stats	GPS-GNFC			
	Average	Maximum	90% Beow	Min Number of Assets
Minimum	0.171	0.590	0.321	-2.000
Average	0.054	2.035	0.242	-1.602
Maximum	-0.376	13.974	0.283	-2.000

Πίνακας 40: Διαφορές μεταξύ των στατιστικών τιμών, που αναφέρονται στο σύνολο του πλέγματος, για τους σχηματισμούς GPS και GNFC.



Σχήμα 144: Διαφορές μεταξύ τις τιμών, κάτω από τις οποίες κυμαίνεται ο δείκτης GDOP στο 90% του χρόνου μελέτης, για τους σχηματισμούς GPS και GNFC.

Grid Stats	(GPS-GNFC)/GPS * 100%		
	Average	Maximum	90% Beow
Minimum	9.1	24.2	15.2
Average	2.5	43.7	8.9
Maximum	-15.6	75.8	7.8

Πίνακας 41: Διαφορές % μεταξύ των στατιστικών τιμών, που αναφέρονται στο σύνολο του πλέγματος, για τους σχηματισμούς GPS και GNFC.

Και στους 3 παραπάνω χάρτες (σχήματα 142, 143 και 144) παρατηρείται ότι ο σχηματισμός GNFC υπερέχει του GPS σχεδόν στο σύνολο της περιοχής μελέτης και για τους 3 στατικούς δείκτες GDOP που χρησιμοποιήθηκαν. Μόνη εξαίρεση αποτελεί μία ζώνη γύρω από τον ισημερινό, της τάξης των 20° ($\phi \approx (-10^\circ, +10^\circ)$), στην οποία οι τιμές του GDOP εμφανίζονται ελαφρώς υποβαθμισμένες, με την ύπαρξη διεσπαρμένων μικρών περιοχών, όπου η αύξηση της τιμής του GDOP μπορεί να φτάσει και το -40% για την μέση στατική τιμή, το -30% για την μέγιστη παρατηρούμενη τιμή στο συνολικό χρονικό διάστημα μελέτης και το -45% για την μέγιστη τιμή του GDOP που παρατηρείται για το 90% του χρόνου. Όμως, και στις τρεις αυτές περιπτώσεις πρόκειται είτε για αραιοκατοικημένες περιοχές είτε για περιοχές που βρίσκονται στο μέσο των ωκεανών και δεν συγκεντρώνουν έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα, με εξαίρεση μία μικρή ζώνη στο βόρειο τμήμα της λατινική Αμερικής και ένα μικρό τμήμα της Ινδονησίας. Σε κάθε περίπτωση, και σε αυτές τις περιοχές οι στατικές τιμές του δείκτη GDOP παραμένουν στα σημερινά αποδεκτά επίπεδα, όπως παρατηρούμε από τους χάρτες και τους πίνακες των Συναρίων 2 και 4.

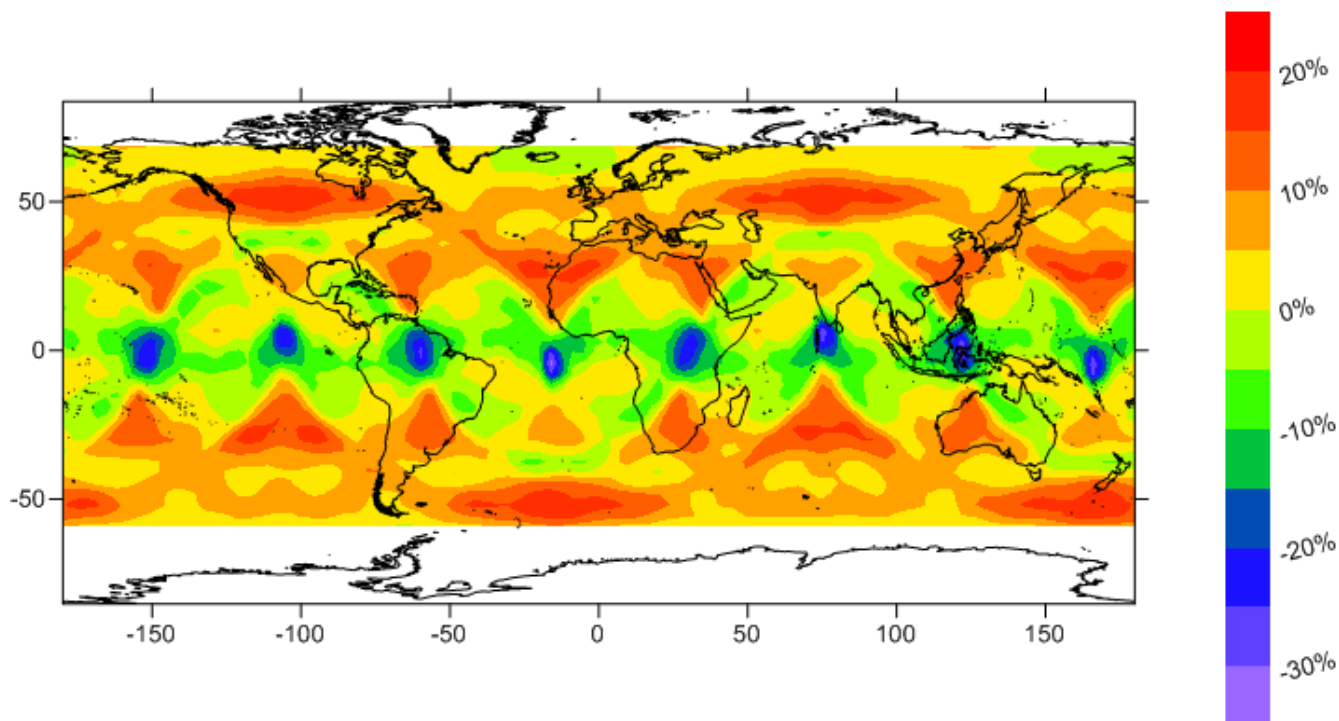
Από τα στοιχεία των πινάκων 40 και 41 παρατηρείται ότι ο σχηματισμός GNFC έχει βελτιώσει όλες τις στατιστικές τιμές που υπολογίστηκαν πλην μίας, της μέγιστης τιμής που παρατηρείται στο πλέγμα των σημείων με τις μέσες ημερήσιες τιμές του δείκτη GDOP. Η παρατηρούμενη αυτή υποβάθμιση προκύπτει και πάλι σε κάποια από τις μεμονωμένες περιοχές στην ζώνη του Ισημερινού, όπου οι τιμές του GDOP που προέκυψαν για τον σχηματισμό GNFC εμφανίζονται αυξημένες σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν για τον σχηματισμό GPS.

6.3.6.2 Διαφορές μεταξύ GALILEO και GNFC

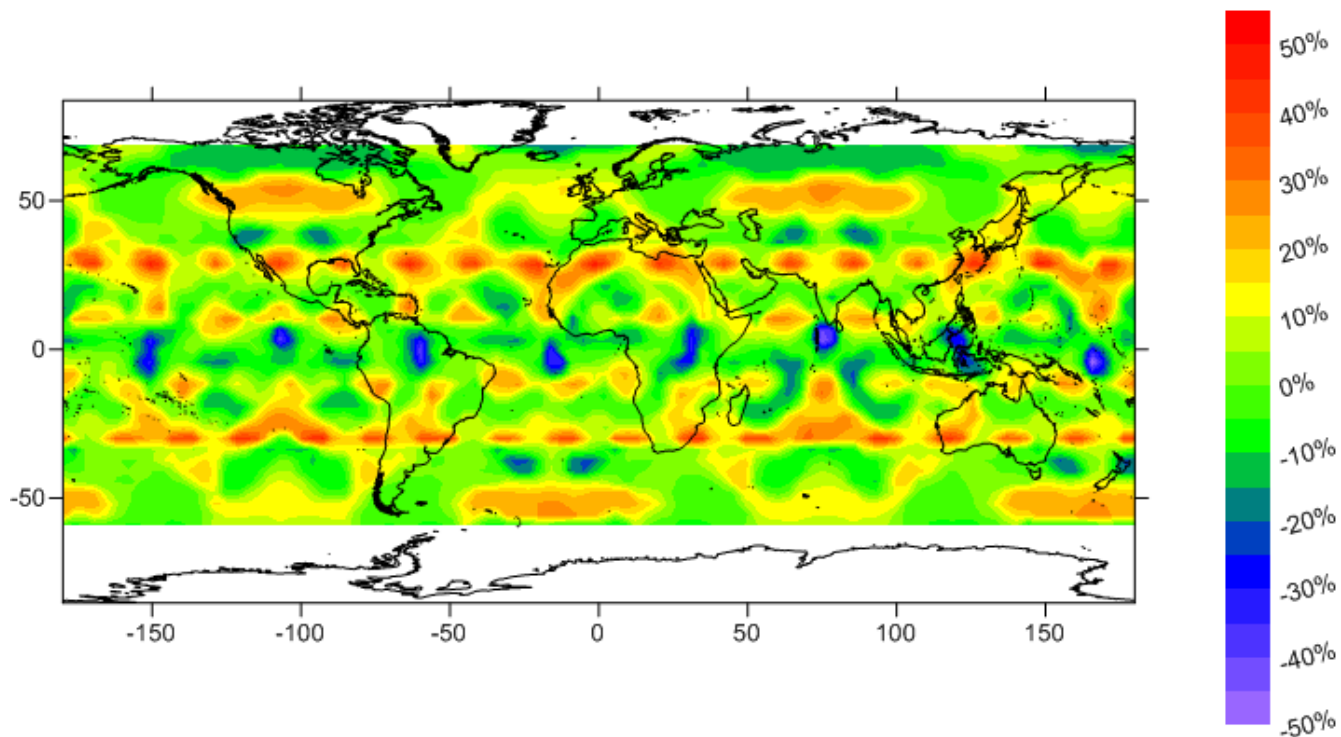
Παρατηρώντας τους χάρτες των σχημάτων 145, 146 και 147 διαπιστώνει κανείς ότι ο σχηματισμός GNFC δείχνει να βελτιώνει την γεωμετρία των μετρήσεων στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης. Όσον αφορά τις μέσες στατικές τιμές, σε μία ζώνη περίπου 20° γύρω από τον ισημερινό ($\phi = (-10^\circ, 10^\circ)$) παρουσιάζονται περιοχές στις οποίες είναι φανερό ότι με τη χρήση του σχηματισμού GNFC το μέτρο των στατικών τιμών του δείκτη GDOP μεγαλώνει, γεγονός που υποδηλώνει υποβάθμιση της γεωμετρίας του σχηματισμού και μεγέθυνση της αβεβαιότητας στον προσδιορισμό της θέσης. Ως επί το πλείστον όμως πρόκειται είτε για αραιοκατοικημένες περιοχές της Γης, είτε για περιοχές που εντοπίζονται στο μέσο των ωκεανών. Στο υπόλοιπο (και μεγαλύτερο) τμήμα της περιοχής μελέτης όμως, οι τιμές του δείκτη GDOP είναι μικρότερες με χρήση του GNFC, γεγονός που υποδηλώνει την βελτίωση της γεωμετρίας και την μεγαλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό θέσης

στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης.

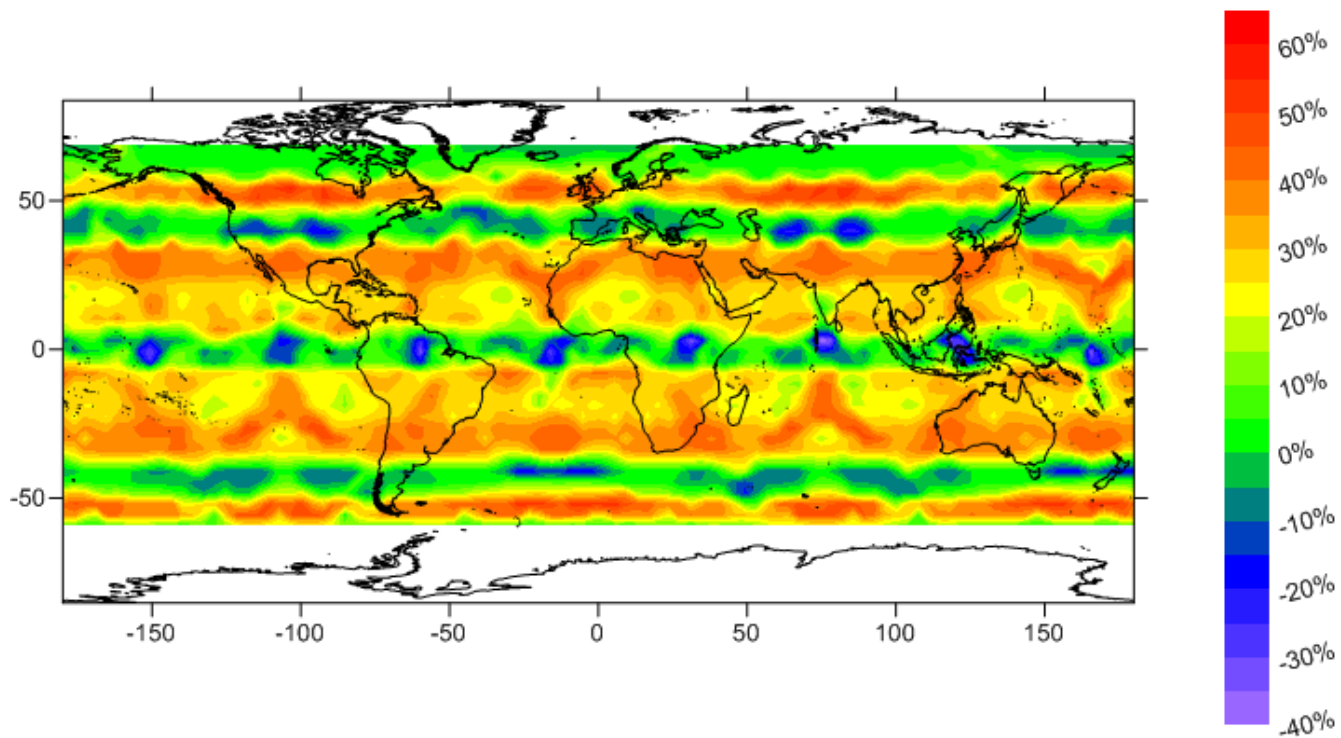
Όσον αφορά τον χάρτη του σχήματος 147 που απεικονίζει τις διαφορές στις μέγιστες παρατηρούμενες στατικές τιμές του δείκτη GDOP για τους δύο σχηματισμούς, παρατηρείται μεταβολή της απόδοσης των δύο σχηματισμών με το γεωγραφικό πλάτος. Ωστόσο, είναι και πάλι εμφανές ότι ο σχηματισμός GNFC βελτιώνει τις τιμές του GDOP στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 145: Διαφορές ανάμεσα στις μέσες τιμές του GDOP που προέκυψαν για τους σχηματισμούς Galileo και GNFC.



Σχήμα 146: Διαφορές μεταξύ τις τιμών, κάτω από τις οποίες κυμαίνεται ο δείκτης GDOP στο 90% του χρόνου μελέτης, για τους σχηματισμούς Galileo και GNFC.



Σχήμα 147: Διαφορές ανάμεσα στις μέγιστες τιμές του GDOP που προέκυψαν για τους σχηματισμούς Galileo και GNFC.

Στο χάρτη του σχήματος 146 παρατηρείται ότι οι μεταβολές είναι της τάξης του $\pm 10\%$ στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης, με το σχηματισμό GNFC να υπερέχει αισθητά στα γεωγραφικά πλάτη $\phi = \pm 25^\circ-35^\circ$ από τον ισημερινό, και να υπολείπεται σε αποτελέσματα σε μεμονωμένες περιοχές που εντοπίζονται και πάλι στην ζώνη $\pm 10^\circ$ γύρω από το ισημερινό επίπεδο.

Στον πίνακα 42 και παρουσιάζονται οι διαφορές των στατιστικών τιμών του συνόλου του πλέγματος για τις διάφορες στατικές τιμές του GDOP που χρησιμοποιήθηκαν. Στον πίνακα 43 παρουσιάζονται οι ίδιες διαφορές, εκφρασμένες ως ποσοστά % της αρχικής τιμής (ως αρχική τιμή νοείται η τιμή του GDOP για τους σχηματισμούς GPS ή Galileo).

Grid Stats	GALILEO-GNFC			
	Average	Maximum	90% Beow	Min Number of Assets
Minimum	0.253	0.427	0.455	0.000
Average	0.058	0.834	0.160	-0.841
Maximum	-0.394	-0.149	0.799	-1.000

Πίνακας 42: Διαφορές μεταξύ των στατιστικών τιμών, που αναφέρονται στο σύνολο του πλέγματος, για τους σχηματισμούς Galileo και GNFC.

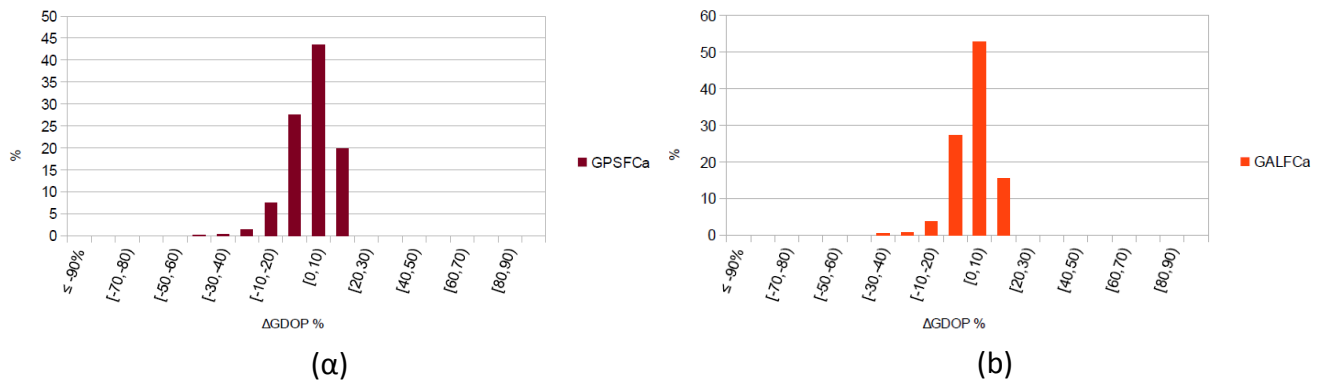
Grid Stats	(GALILEO-GNFC)/GALILEO * 100%		
	Average	Maximum	90% Beow
Minimum	12.88	18.78	20.32
Average	2.69	24.14	6.09
Maximum	-16.47	-3.46	19.23

Πίνακας 43: Διαφορές % μεταξύ των στατιστικών τιμών, που αναφέρονται στο σύνολο του πλέγματος, για τους σχηματισμούς Galileo και GNFC.

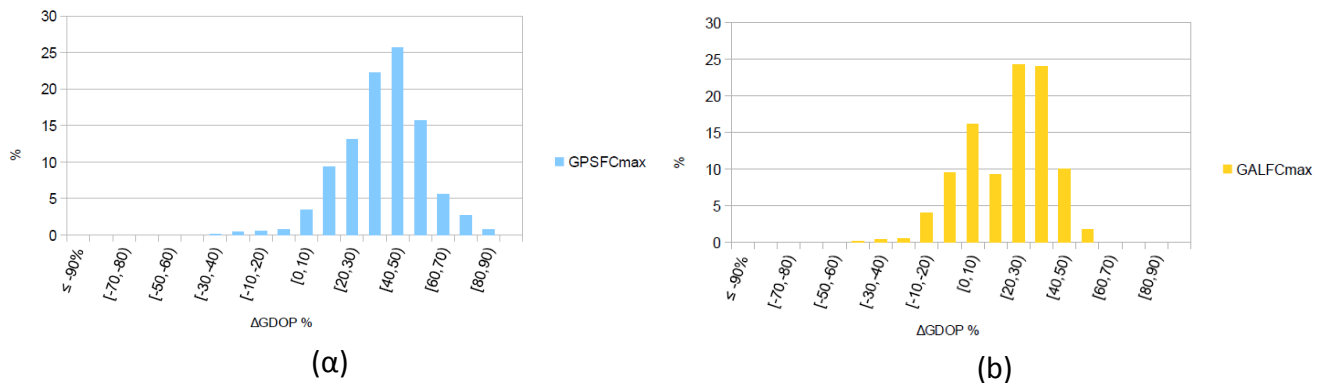
Πέρα από την χρήση των στατιστικών τιμών που αναφέρονται στο σύνολο του πλέγματος των σημείων, ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέταση του ποσοστού των σημείων επί του συνόλου, στα οποία η τιμή των δεικτών GDOP βελτιώνεται και εκείνα στα οποία η τιμή υποβαθμίζεται. Η βελτίωση ή η υποβάθμιση της τιμής του GDOP μπορεί να εκφραστεί είτε απευθείας προσδιορίζοντας την διαφορά μεταξύ της τιμής του GDOP που προέκυψε για τον σχηματισμό GPS (ή Galileo) και της αντίστοιχης που προέκυψε για τον σχηματισμό GNFC, είτε μετατρέποντας αυτή τη διαφορά σε ποσοστό βελτίωσης ή υποβάθμισης της αρχικής τιμής (ως αρχική τιμή θεωρείται η τιμή που προκύπτει για τον σχηματισμό GPS ή τον σχηματισμό GALILEO ανάλογα με την σύγκριση) από τη χρήση του σχηματισμού GNFC.

Η σύγκριση μπορεί να πραγματοποιηθεί δημιουργώντας διαστήματα ποσοστιαίων διαφορών και κατατάσσοντας τα αποτελέσματα σε κατηγορίες. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με χρήση του

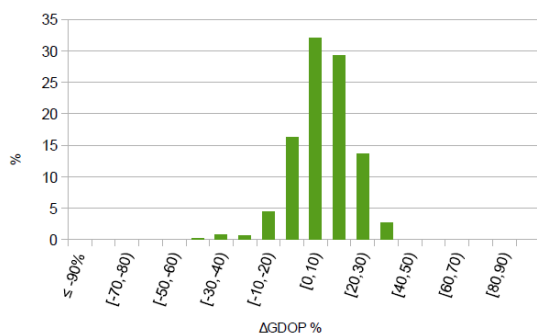
λογισμικού matlab, ενώ τα αποτελέσματα συνοψίζονται στα παρακάτω διαγράμματα. Στα σχήματα 148 (α) και (β) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις μέσες τιμές του δείκτη GDOP για κάθε σημείο στο σύνολο της περιόδου μελέτης. Στα σχήματα 149 (α) και (β) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις μέγιστες τιμές που παρατηρήθηκαν σε κάθε σημείο για το σύνολο της χρονικής περιόδου μελέτης. Τέλος, στα διαγράμματα (α) και (β) του σχήματος 150 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν στις μέγιστες παρατηρούμενες τιμές σε κάθε σημείο για το 90% του χρόνου.



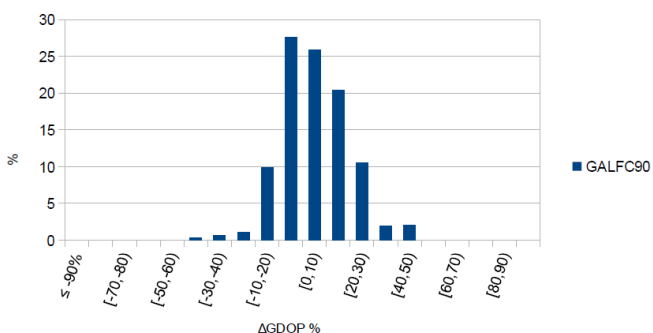
Σχήμα 148: Αποτελέσματα που αναφέρονται στις μέσες τιμές. Ποσοστό % βελτίωσης ή επιδείνωσης των μέσων τιμών του GDOP. (α) GPS- FC (β) Galileo- FC.



Σχήμα 149: Αποτελέσματα που αναφέρονται στις μέγιστες τιμές. Ποσοστό % βελτίωσης ή επιδείνωσης των μέγιστων τιμών του GDOP. (α) GPS- FC (β) Galileo- FC.



(α)



(b)

Σχήμα 150: Αποτελέσματα που αφορούν στις μέγιστες παρατηρούμενες τιμές σε κάθε σημείο για το 90% του χρόνου. Ποσοστό % βελτίωσης ή επιδείνωσης επί του συνόλου των σημείων για τους σχηματισμούς: (a) GPS- FC (b) Galileo- FC.

Στον πίνακα 44 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ των σχηματισμών Galileo και GNFC, και GPS και GNFC. Τα διαστήματα στην στήλη 1 αναφέρονται στις ποσοστιαίες μεταβολές της τιμής του δείκτη GDOP που προέκυψαν για κάθε σημείο με χρήση του σχηματισμού GPS (ή Galileo) και του σχηματισμού GNFC, όπως αυτή υπολογίστηκε προηγουμένως για κάθε στατική τιμή του GDOP. Θετικές τιμές υποδηλώνουν βελτίωση της τιμής του GDOP, ενώ αρνητικές τιμές υποδηλώνουν υποβάθμισή της. Κάθε μία από τις άλλες στήλες αναφέρεται στο ποσοστό επί του συνόλου των σημείων που ανήκουν στο διάστημα της στήλης 1 και αναφέρονται στην εκάστοτε στατική τιμή του δείκτη GDOP.

Παρατηρούμε ότι σε κάθε περίπτωση, το συνολικό ποσοστό των σημείων των, οποίων η τιμή του δείκτη GDOP βελτιώνεται, είναι μεγαλύτερο από το ποσοστό των σημείων, των οποίων η τιμή υποβαθμίζεται. Όσον αφορά τις μέσες τιμές του δείκτη GDOP, σχεδόν το σύνολο των διαφορών εντοπίζεται στο διάστημα $[-20\%, 20\%]$, με το ποσοστό των σημείων που παρουσιάζει βελτίωση να είναι μεγαλύτερο. Το ποσοστό των σημείων, των οποίων η μέγιστη τιμή του GDOP βελτιώνεται, είναι της τάξης του 98% στην περίπτωση σύγκρισης με τον σχηματισμό GPS και του 85% στην περίπτωση σύγκρισης με το σχηματισμό Galileo. Μάλιστα η βελτίωση ξεπερνά το 30% για το 36% των σημείων (δηλαδή 1516 σημεία από τα 4212) στην περίπτωση σύγκρισης με τον σχηματισμό Galileo, και για το 72.5% (δηλαδή 3053 από 4212) στην περίπτωση σύγκρισης με τον σχηματισμό GPS. Τέλος, όσον αφορά την μέγιστη τιμή που παρατηρείται για το 90% της περιόδου μελέτης στην περίπτωση σύγκρισης των σχηματισμών GPS και GNFC, τα ποσοστά των σημείων των οποίων οι τιμές βελτιώνονται αγγίζει το 77.7% (δηλαδή 3273 σημεία από 4212), με το 16.4% να παρουσιάζει βελτίωση μεγαλύτερη του 20% και με μόνο το 1.7% να παρουσιάζει αντίστοιχη μείωση. Το ποσοστό βελτίωσης, στην περίπτωση σύγκρισης των σχηματισμών Galileo και GNFC, είναι ίσο με 60.7%, με το 14.4% να παρουσιάζει βελτίωση μεγαλύτερη του 20%, ενώ το ποσοστό που παρουσιάζει αντίστοιχη μείωση να είναι ίσο με 1.9%.

Συνοψίζοντας, παρατηρούμε ότι για την παρούσα σύγκριση ο σχηματισμός GNFC υπερέχει σε κάθε περίπτωση των δύο αντίστοιχων συμβατικών σχηματισμών.

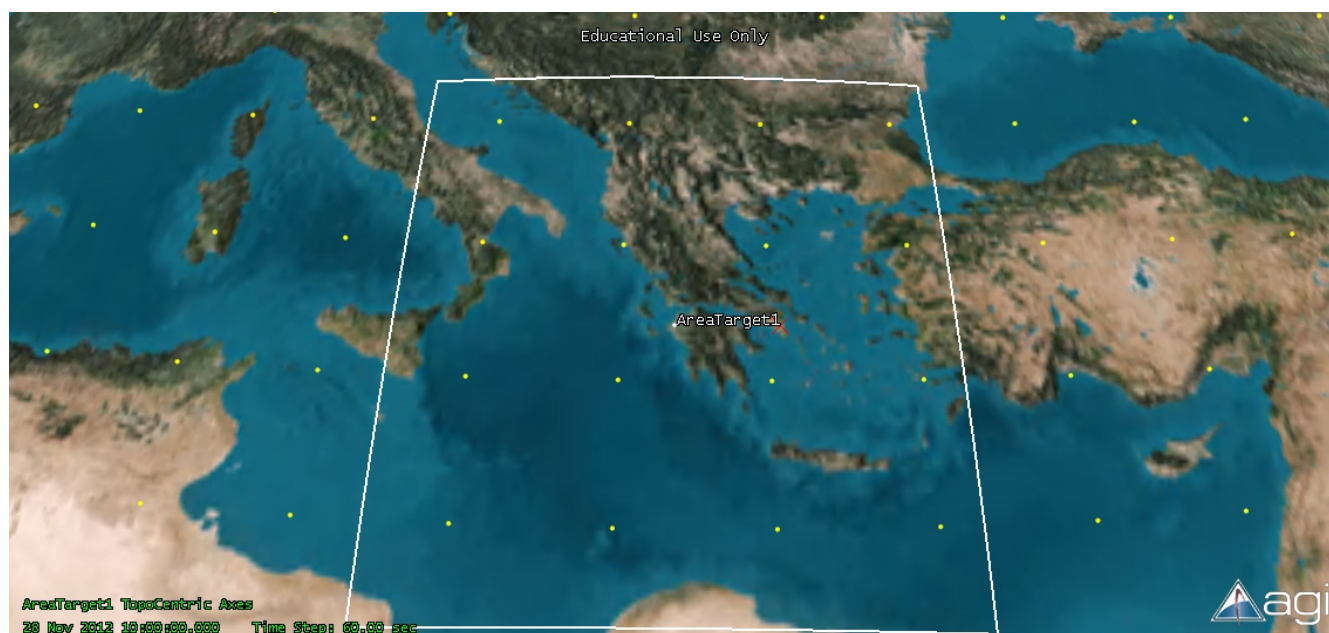
Διαστήματα	GALILEO- GNFC			GPS- GNFC		
	90% below	Average	Maximum	90% Below	GPSFCa	GPSFCmax
≤ -90%	0	0	0	0	0	0
[-80,-90)	0	0	0	0	0	0
[-70,-80)	0	0	0	0	0	0
[-60,-70)	0	0	0	0	0	0
[-50,-60)	0	0	0	0	0	0
[-40,-50)	0.3	0	0.1	0.2	0.1	0
[-30,-40)	0.6	0.3	0.4	0.8	0.4	0.0
[-20,-30)	1.0	0.7	0.6	0.7	1.3	0.4
[-10,-20)	9.8	3.6	4.0	4.4	7.5	0.5
[0,-10)	27.6	27.1	9.6	16.2	27.4	0.7
[0,10)	25.9	52.8	16.1	32.1	43.4	3.4
[10,20)	20.4	15.4	9.2	29.2	19.9	9.3
[20,30)	10.5	0	24.3	13.6	0	13.1
[30,40)	1.9	0	24.0	2.8	0	22.3
[40,50)	2.0	0	10.0	0	0	25.6
[50,60)	0	0	1.7	0	0	15.6
[60,70)	0	0	0	0	0	5.6
[70,80)	0	0	0	0	0	2.6
[80,90)	0	0	0	0	0	0.8
≥ 90%	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 44: Συγκεντρωτικός Πίνακας: Παρουσιάζονται τα ποσοστά των σημείων, στα οποία βελτιώνονται (τιμές μεγαλύτερες του 0) ή υποβαθμίζονται (τιμές μικρότερες του 0) οι τιμές του GDOP με τη χρήση του σχηματισμού GNFC, ανά κατηγορία.

6.3.7 Έλεγχος επαναληψιμότητας των τιμών του GDOP σε ημερήσια βάση

Ένας ακόμη έλεγχος που μπορεί να πραγματοποιηθεί και για τους 3 σχηματισμούς που υλοποιήθηκαν αφορά στο κατά πόσο οι δυναμικές (συνεχώς μεταβαλλόμενες) τιμές του δείκτη GDOP σε κάθε σημείο επαναλαμβάνονται σε ημερήσια βάση, με χρήση του κάθε σχηματισμού ξεχωριστά. Η επαναληψιμότητα της σταθερής απόδοσης ενός σχηματισμού στην ίδια περιοχή, την ίδια ώρα κάθε ημέρας εξασφαλίζει στον χρήστη την *a priori* γνώση της συνεισφοράς της γεωμετρίας του σχηματισμού στον προσδιορισμό της θέσης του και παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε σχηματισμούς που αποτελούνται από λιγότερους δορυφόρους και παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές του δείκτη GDOP, απ' ότι οι εξεταζόμενοι. Παρόλα αυτά, και πάλι μπορεί να πραγματοποιηθεί μία σύγκριση μεταξύ των σχηματισμών σε αυτή τη βάση.

Για την παραπάνω ανάλυση, ορίζεται μία μικρότερη περιοχή μελέτης, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 151 και στον πίνακα 45. Τα σημεία του πλέγματος της νέας περιοχής μελέτης ανήκουν στο αρχικό πλέγμα σημείων που χρησιμοποιήθηκε στα παραπάνω σενάρια και οι γεωδαιτικές τους συντεταγμένες παρουσιάζονται στον πίνακα 45.



Σχήμα 151: Περιοχή μελέτης για τον έλεγχο επαναληψιμότητας των τιμών GDOP σε ημερήσια βάση.

Σημείο	φ (deg)	λ (deg)
1	33.89	16.36
2	33.89	20.00
3	33.89	23.64
4	33.89	27.27
5	36.78	16.36
6	36.78	20.00
7	36.78	23.64
8	36.78	27.27
9	39.67	16.36
10	39.67	20.00
11	39.67	23.64
12	39.67	27.27
13	42.56	16.36
14	42.56	20.00
15	42.56	23.64
16	42.56	27.27

Πίνακας 45: Συντεταγμένες των σημείων του πλέγματος της περιοχής μελέτης

6.3.7.1 Χρήση των δεικτών RMSD και NRMSD

Ο έλεγχος επαναληψιμότητας των τιμών του δείκτη GDOP θα πραγματοποιηθεί με την βοήθεια των δεικτών RMSD και NRMSD. Η απόκλιση της μέσης τετραγωνικής ρίζας, ή αλλιώς το σφάλμα RMSD (Root-mean-Square Error ή Root Mean Square Deviation), συνήθως χρησιμοποιείται για την σύγκριση των τιμών που υπολογίζονται από ένα μοντέλο ή έναν εκτιμητή τιμών με τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές που προέκυψαν από παρατηρήσεις.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως και η παρούσα, το RMSD χρησιμοποιείται για την σύγκριση μεταξύ δύο συνόλων τιμών που μπορεί να διαφέρουν, αλλά κανένα από τα δύο δεν γίνεται αποδεκτό ως το “ορθό” (standard). Όταν εξετάζεται η μέση διαφορά μεταξύ δύο χρονοσειρών $x_{1,t}$ και $x_{2,t}$, η σχέση υπολογισμού του RMSD έχει την μορφή:

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (x_{1,t} - x_{2,t})^2}{n}},$$

όπου t δηλώνει τη χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη παρατήρηση και n είναι ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων.

Πέρα από το RMSD χρησιμοποιείται και η κανονικοποιημένη απόκλιση της μέσης τετραγωνικής ρίζας NRMSD (Normalized Root-mean Square Deviation), η οποία ισούται με την τιμή του RMSD διηρημένη με το εύρος τιμών της μεταβλητής μίας εκ των δύο χρονοσειρών. Το NRMSD σε μαθηματική μορφή γράφεται:

$$NRMSD = \frac{RMSD}{x_{max} - x_{min}},$$

το οποίο συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό, όπου μικρότερες τιμές υποδηλώνουν μικρότερες διαφορές μεταξύ των αντίστοιχων τιμών των χρονοσειρών. (wikipedia, 2013)

6.3.7.2 Αποτελέσματα ελέγχου επαναληψιμότητας

Για κάθε ένα από τα σημεία του πλέγματος υπολογίζεται μία χρονοσειρά, η οποία αναφέρεται στην μεταβολή του GDOP με το χρόνο. Το χρονικό διάστημα μελέτης για την κάθε χρονοσειρά ισούται με 10 μέρες. Το χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται για την δειγματοληψία των αποτελεσμάτων της χρονοσειράς ισούται με 5 λεπτά.

Στη συνέχεια, με χρήση του προγράμματος matlab και ενός σύντομου κώδικα που συντάχθηκε για τις ανάγκες της εν λόγω σύγκρισης, το αρχείο της χρονοσειράς χωρίζεται σε 10 επιμέρους πίνακες, κάθε ένας από τους οποίους περιέχει τα δεδομένα για μία ημέρα μελέτης. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα

που αναφέρονται στην πρώτη ημέρα, με τα αντίστοιχα της δεύτερης, της τρίτης έως και της δέκατης ημέρας, προκύπτει η ζητούμενη πληροφορία.

Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση συντάχθηκε μία συνάρτηση στο λογισμικό matlab, η οποία έχει ως δεδομένα εισόδου της δύο χρονοσειρές και παράγει ως δεδομένο εξόδου τις τιμές του RMSD και του NRMSD που προκύπτουν από την σύγκριση των δύο χρονοσειρών. Με χρήση της συνάρτησης υπολογίζονται για κάθε σημείο οι διαφορές μεταξύ της πρώτης ημέρας με την δεύτερη, την τέταρτη, την όγδοη και την δέκατη.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τους τρεις σχηματισμούς. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες 46, 47 και 48. Στις δύο τελευταίες γραμμές των πινάκων παρουσιάζεται ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση που προέκυψε για το σύνολο των σημείων για κάθε ζεύγος ημερών που συγκρίνεται.

GPS Constellation									
Latitude	Longitude	GPS Day1- Day2		Day1-Day4		Day1-Day8		Day1-Day10	
		DRMS	NDRMS	RMSD	NRMSD	RMSD	NRMSD	RMSD	NRMSD
33.89	16.36	0.6224	0.239	0.6673	0.2563	0.6462	0.2482	0.7191	0.2762
33.89	20	0.6323	0.2083	0.6826	0.2249	0.6442	0.2122	0.7021	0.2313
33.89	23.64	0.6188	0.2181	0.6849	0.2414	0.5855	0.2064	0.6273	0.2211
33.89	27.27	0.6528	0.2066	0.7083	0.2241	0.6188	0.1958	0.6274	0.1985
36.78	16.36	0.6302	0.2317	0.6378	0.2345	0.6466	0.2377	0.7261	0.2669
36.78	20	0.6468	0.2209	0.6837	0.2335	0.6597	0.2253	0.7366	0.2516
36.78	23.64	0.6133	0.2193	0.6627	0.2369	0.5964	0.2132	0.6423	0.2296
36.78	27.27	0.619	0.1951	0.7221	0.2276	0.639	0.2014	0.6566	0.2069
39.67	16.36	0.6609	0.2319	0.6825	0.2395	0.6936	0.2434	0.7345	0.2577
39.67	20	0.6795	0.2397	0.6686	0.2358	0.6778	0.2391	0.7601	0.2681
39.67	23.64	0.641	0.2058	0.6727	0.216	0.6295	0.2021	0.6694	0.2149
39.67	27.27	0.6149	0.1909	0.7079	0.2198	0.6904	0.2143	0.7141	0.2217
42.56	16.36	0.7089	0.2397	0.6673	0.2257	0.6738	0.2279	0.7255	0.2454
42.56	20	0.7044	0.2466	0.6836	0.2393	0.6947	0.2432	0.7118	0.2492
42.56	23.64	0.7108	0.2195	0.6796	0.2098	0.6744	0.2082	0.6944	0.2144
42.56	27.27	0.7224	0.16	0.7249	0.1606	0.6788	0.1504	0.7344	0.1627
Average		0.6549	0.2171	0.6835	0.2266	0.6531	0.2168	0.6989	0.2323
St Dev		0.0383	0.0225	0.0228	0.0209	0.0335	0.0246	0.0417	0.0299

Πίνακας 46: Τιμές των RMSD και NRMSD για τις ημέρες 1-2, 1-4, 1-8, 1-10 όπως προέκυψαν για τον σχηματισμό GPS.

Flower Constellation									
Latitude	longitude	Day1-Day2		Day1-Day4		Day1-Day8		Day1-Day10	
		RMSD	NRMSD	RMSD	NRMSD	RMSD	NRMSD	RMSD	NRMSD
33.89	16.36	0.1401	0.221	0.2475	0.3903	0.2861	0.4512	0.3102	0.4893
33.89	20	0.166	0.2459	0.1978	0.293	0.2276	0.3373	0.2347	0.3477
33.89	23.64	0.2057	0.261	0.2063	0.2619	0.221	0.2805	0.2273	0.2884
33.89	27.27	0.2446	0.3306	0.2756	0.372	0.2934	0.3965	0.2598	0.3511
36.78	16.36	0.1487	0.2187	0.278	0.4088	0.3543	0.5211	0.3093	0.4549
36.78	20	0.1391	0.1795	0.2217	0.2861	0.2217	0.286	0.1862	0.2402
36.78	23.64	0.2054	0.1592	0.2355	0.1825	0.2115	0.164	0.2132	0.1653
36.78	27.27	0.2353	0.1854	0.3384	0.2667	0.2866	0.2259	0.2899	0.2285
39.67	16.36	0.1159	0.2084	0.1736	0.3122	0.2081	0.3743	0.1693	0.3046
39.67	20	0.2074	0.2035	0.2742	0.2691	0.301	0.2954	0.3231	0.3171
39.67	23.64	0.2768	0.2624	0.3549	0.3364	0.3849	0.3648	0.4026	0.3816
39.67	27.27	0.2994	0.3042	0.3005	0.3054	0.3305	0.3358	0.3286	0.3339
42.56	16.36	0.2483	0.219	0.2729	0.2407	0.2549	0.2248	0.2771	0.2444
42.56	20	0.2317	0.2411	0.347	0.3611	0.3589	0.3735	0.4152	0.4321
42.56	23.64	0.2603	0.2624	0.3777	0.3808	0.4148	0.4182	0.4749	0.4787
42.56	27.27	0.2502	0.2619	0.3651	0.3823	0.4058	0.425	0.3947	0.4133
Average		0.2109	0.2353	0.2792	0.3156	0.2976	0.3421	0.3010	0.3419
St Dev		0.0547	0.0452	0.0636	0.0637	0.0708	0.0932	0.0873	0.0956

Πίνακας 47: Τιμές των RMSD και NRMSD για τις ημέρες 1-2, 1-4, 1-8, 1-10 όπως προέκυψαν για τον σχηματισμό GNFC.

Galileo Constellation									
Latitude	Longitude	Day1-Day2		Day1-Day4		Day1-Day8		Day1-Day10	
		RMSD	NRMSD	RMSD	NRMSD	RMSD	NRMS	RMSD	NRMSD
33.89	16.36	0.3478	0.1341	0.5503	0.2122	0.7126	0.2747	0.7484	0.2885
33.89	20	0.27	0.111	0.4525	0.186	0.6485	0.2665	0.6827	0.2806
33.89	23.64	0.2796	0.1084	0.4747	0.1841	0.6649	0.2578	0.6863	0.2661
33.89	27.27	0.3238	0.1287	0.5541	0.2202	0.7209	0.2865	0.7791	0.3096
36.78	16.36	0.1631	0.1631	0.2774	0.2774	0.3827	0.3827	0.4259	0.4259
36.78	20	0.2086	0.0859	0.2892	0.1191	0.3986	0.1641	0.413	0.17
36.78	23.64	0.1578	0.1635	0.2743	0.2843	0.3678	0.3811	0.4116	0.4265
36.78	27.27	0.1641	0.1651	0.2816	0.2833	0.409	0.4115	0.4513	0.454
39.67	16.36	0.1671	0.1772	0.2553	0.2707	0.3492	0.3703	0.363	0.3849
39.67	20	0.1604	0.165	0.2616	0.2692	0.3702	0.3809	0.379	0.3899
39.67	23.64	0.1491	0.1531	0.2582	0.2651	0.3539	0.3633	0.3684	0.3782
39.67	27.27	0.1809	0.1953	0.29	0.3132	0.3873	0.4182	0.4025	0.4347
42.56	16.36	0.1659	0.1633	0.2723	0.268	0.3784	0.3725	0.3861	0.38
42.56	20	0.1668	0.1702	0.2855	0.2913	0.4174	0.4259	0.4105	0.4189
42.56	23.64	0.1614	0.1578	0.2674	0.2614	0.3931	0.3843	0.3947	0.3859
42.56	27.27	0.1632	0.1741	0.2575	0.2748	0.3692	0.394	0.3791	0.4046
Average		0.2019	0.1510	0.3314	0.2488	0.4577	0.3459	0.4801	0.3624
St Dev		0.0651	0.0293	0.1083	0.0508	0.1386	0.0734	0.1487	0.0776

Πίνακας 48: Τιμές των RMSD και NRMSD για τις ημέρες 1-2, 1-4, 1-8, 1-10 όπως προέκυψαν για τον σχηματισμό GALILEO.

Παρατηρώντας τις τιμές που προκύπτουν σε κάθε πίνακα καταλήγουμε σε ορισμένα βασικά συμπεράσματα. Πρώτον, για τους σχηματισμούς GPS και GNFC ενώ ήταν αρχικά αναμενόμενο οι τιμές του RMSD και του NRMSD να είναι πολύ μικρές, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην περίοδο επανάληψης της τροχιάς του δορυφορικού σχηματισμού, η οποία ισούται με μία αστρική ημέρα και η οποία διαφέρει κατά 4 λεπτά από την ημέρα στον χρόνο UTCG που χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργηθούν οι χρονοσειρές ανά ημέρα. Δεύτερον, παρατηρούμε ότι για τον σχηματισμό GNFC οι μέσες τιμές του RMSD για κάθε ζεύγος ημερών που εξετάζεται έχουν μικρότερο μέτρο από τις αντίστοιχες που προκύπτουν για τους συμβατικούς σχηματισμούς GPS και GALILEO. Όσον αφορά τις μέσες τιμές του δείκτη NRMSD, λαμβάνουν τις μικρότερες τιμές στην περίπτωση του σχηματισμού GPS. Για τους άλλους δύο σχηματισμούς οι μέσες τιμές του NRMSD αυξάνονται για ζεύγη ημερών που έχουν μεγαλύτερη χρονική απόσταση μεταξύ τους, ενώ έχουν αντίστοιχο μέτρο και στις 2 περιπτώσεις.²⁴

6.4 Συμπεράσματα

Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν και παρουσιάζονται στο παρόν Κεφάλαιο, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο σχηματισμός GNSS που σχεδιάστηκε με βάση τη λογική των Flower Constellations αποδίδει εξίσου καλά, και στις περισσότερες περιπτώσεις και ακόμα καλύτερα από τους σχηματισμούς των συστημάτων GPS και GALILEO. Με την χρήση του GNFC το μεγαλύτερο ποσοστό των σημείων του πλέγματος της περιοχής μελέτης εμφάνισε μειωμένες στατικές τιμές του δείκτη GDOP σε σχέση με αυτές που εμφάνισε με την χρήση των σχηματισμών GPS και GALILEO.

Όσον αφορά την σύγκριση μεταξύ του σχηματισμού GNFC και του σχηματισμού GPS, ο σχηματισμός GNFC παρουσιάζει βελτιωμένες τιμές του δείκτη GDOP για το 63.3% του συνόλου των σημείων του πλέγματος ως προς την μέση στατική τιμή. Αντίστοιχα, στην σύγκριση μεταξύ του σχηματισμού GNFC και του σχηματισμού GALILEO, ο σχηματισμός GNFC παρουσιάζει βελτιωμένες τιμές για το 68.2% επί του συνόλου των σημείων του πλέγματος, με το 14.4% να παρουσιάζει βελτίωση μεγαλύτερη του 20% ως προς την τιμή του GDOP που είχε προκύψει με χρήση του σχηματισμού GALILEO. Αντίστοιχα αποτελέσματα, με εμφανέστερη την υπεροχή του σχηματισμού GNFC, προέκυψαν και για τις υπόλοιπες στατικές τιμές του δείκτη GDOP που υπολογίστηκαν:

- την μέγιστη παρατηρούμενη τιμή για το σύνολο της περιόδου μελέτης, όπου ο σχηματισμός GNFC παρουσίασε βελτιωμένα αποτελέσματα στο 98.3% των σημείων ως προς τα αποτελέσματα του σχηματισμού GPS και στο 85.3% των σημείων ως προς τα αποτελέσματα του σχηματισμού GALILEO, και
- την τιμή την οποία δεν ξεπερνούσε το GDOP σε κάθε σημείο για το 90% του χρόνου, όπου τα αποτελέσματα του σχηματισμού GNFC ήταν καλύτερα από τα αντίστοιχα του σχηματισμού GPS

²⁴ Επί της ουσίας, οι διαφορές που παρουσιάζονται είναι μικρές και δεν επηρεάζουν την ποιότητα των μετρήσεων με ένα δέκτη GPS, γιατί και οι 3 σχηματισμοί είναι πλήρεις δορυφόρων και σωστά σχεδιασμένοι, αλλά στο πλαίσιο της σύγκρισης μεταξύ τους λαμβάνονται υπόψη και αυτές οι μικρές διαφορές.

στο 77.7% των σημείων του πλέγματος, και από τα αντίστοιχα του σχηματισμού GALILEO στο 60.7% επί του συνόλου των σημείων του πλέγματος.

Όσον αφορά την αξιολόγηση του κάθε σχηματισμού ξεχωριστά προέκυψε ότι η τιμή του δείκτη GDOP για τον σχηματισμό GNFC δεν ξεπερνάει σε κανένα σημείο της περιοχής μελέτης το 3.35 για το 90% του χρόνου, ενώ η αντίστοιχη τιμή για τον σχηματισμό GPS είναι 3.64 και για τον σχηματισμό GALILEO 4.1. Ο ελάχιστος αριθμός ορατών δορυφόρων για το σύνολο της περιοχής μελέτης για τον σχηματισμό GPS ισούται με 4, ενώ για τους σχηματισμούς GNFC και GALILEO ισούται με 6.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσω της περιγραφής της δομής και των βασικών εργαλείων του λογισμικού πακέτου STK, καθώς και από την ανάλυση μίας σειράς εφαρμογών, αναδείχθηκαν ορισμένες από τις δυνατότητες μοντελοποίησης, ανάλυσης, και οπτικοποίησης του STK, οι οποίες είναι πολύτιμες κατά την διαδικασία της προσομοίωσης και αξιολόγησης της λειτουργίας ενός δορυφορικού συστήματος. Το STK παρέχει την δυνατότητα εύκολης εισαγωγής και προσομοίωσης της πορείας πλοίων και οχημάτων εδάφους, τον υπολογισμό των προσβάσεων τους προς τους δορυφόρους ενός δορυφορικού σχηματισμού, και τον προσδιορισμό της ποιότητάς κάλυψής τους μέσω μίας σειράς δεικτών αξιολόγησης (FOM), όπως είναι οι δείκτες DOP και ο δείκτης Navigation Accuracy, στην περίπτωση των σχηματισμών GNSS. Επίσης χάρη στο μεγάλο εύρος περιορισμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την ανάλυση των συστημάτων, όπως για παράδειγμα η χρήση ενός DEM για τον περιορισμό των ορατών δορυφόρων προς ένα όχημα που κινείται σε ορεινή διαδρομή, προκύπτουν ρεαλιστικότερα αποτελέσματα από τις εφαρμογές. Επιπλέον, χάρη στην πολύ μεγάλη βιβλιοθήκη του STK (αλγόριθμοι μετατροπής μεταξύ συστημάτων αναφοράς ή κλιμάκων χρόνου, αναπαραγωγείς τροχιάς, φυσικά και μαθηματικά μοντέλα) το πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την ανάπτυξη περισσότερο θεωρητικών εφαρμογών, όπως για παράδειγμα η σύγκριση των αποτελεσμάτων δύο δορυφορικών εφημερίδων που προέκυψαν με χρήση διαφορετικών αναπαραγωγέων τροχιάς (GPS και SGP4 propagators) με την εφημερίδα ακριβείας της IGS. Οι τελευταίες εφαρμογές είχαν ως στόχο να αναδείξουν την δυνατότητα του προγράμματος να προσομοιώσει υπάρχουσες ή υπό σχεδιασμό δορυφορικές αποστολές, διαφορετικών αντικειμένων (αλτιμετρικές, βαρυτιμετρικές ή αποστολές SAR) και να δώσει την δυνατότητα στον χρήστη να αναλύσει την κάθε αποστολή είτε μέσα από την δισδιάστατη ή τρισδιάστατη οπτικοποίησή της, είτε μέσα από την παραγωγή αναφορών και γραφημάτων που αφορούν κάποιο δείκτη αξιολόγησης ή κάποιο συγκεκριμένο χαρακτηριστικό της αποστολής.

Όσον αφορά την εφαρμογή αξιολόγησης του σχηματισμού GNFC, και των συμβατικών σχηματισμών των συστημάτων GPS και GALILEO προέκυψαν τα εξής:

- Με χρήση του σχηματισμού GNFC οι παρατηρούμενες τιμές του δείκτη GDOP στο 90% του χρονικού διαστήματος μελέτης δεν ξεπερνούν το 2.9 για το 95.65% των σημείων της περιοχής μελέτης και την τιμή 3.35 για το σύνολο της περιοχής μελέτης. Η μέγιστη παρατηρούμενη τιμή του GDOP στην περιοχή μελέτης για το συνολικό χρονικό διάστημα μελέτης ισούται με 4.45, ενώ από κάθε σημείο της περιοχής μελέτης είναι ορατοί κατ' ελάχιστον 6 δορυφόροι του σχηματισμού.
- Με χρήση του σχηματισμού GPS οι παρατηρούμενες τιμές του δείκτη GDOP στο 90% του χρονικού διαστήματος μελέτης δεν ξεπερνούν το 3.0 για το 93.23% των σημείων που απαρτίζουν την περιοχή μελέτης και την τιμή 3.63 για το σύνολο των σημείων της περιοχής. Η μέγιστη παρατηρούμενη τιμή του GDOP στην περιοχή μελέτης για το συνολικό χρονικό διάστημα μελέτης ισούται με 18.42, ενώ από κάθε σημείο της περιοχής μελέτης είναι ορατοί κατ' ελάχιστον 4 δορυφόροι για το συνολικό χρονικό διάστημα μελέτης, με τουλάχιστον 7 ορατούς δορυφόρους από κάθε σημείο για το 90% του χρόνου. Σημειώνεται ότι οι πολύ μεγάλη τιμή του GDOP παρατηρείται για πολύ μικρό αριθμό μεμονωμένων σημείων και για μικρό χρονικό διάστημα,

όπως προκύπτει και από τις υπόλοιπες στατιστικές τιμές που εξετάστηκαν.

- Με χρήση του σχηματισμού GALILEO οι παρατηρούμενες τιμές του GDOP στο 90% του χρονικού διαστήματος μελέτης δεν ξεπερνούν το 3.1 για το 93.35% των σημείων που απαρτίζουν την περιοχή μελέτης και το 4.1 για το σύνολο των σημείων της περιοχής. Η μέγιστη παρατηρούμενη τιμή του GDOP ισούται στην περιοχή μελέτης για το συνολικό χρονικό διάστημα μελέτης ισούται με 4.3, ενώ από κάθε σημείο της περιοχής μελέτης είναι ορατοί κατ' ελάχιστον 6 δορυφόροι του σχηματισμού.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι και οι τρεις σχηματισμοί έχουν ικανοποιητική απόδοση ως προς τις τιμές του δείκτη GDOP και τους ελάχιστους ορατούς δορυφόρους από κάθε σημείο για τουλάχιστον το 90% του χρονικού διαστήματος μελέτης, με τον σχηματισμό GNFC να παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα και τον σχηματισμό του συστήματος GALILEO να ακολουθεί.

Όσον αφορά στην αναλυτική σύγκριση μεταξύ της απόδοσης του σχηματισμού GALILEO με τους σχηματισμούς των συστημάτων GPS και GNFC, ο σχηματισμός GALILEO παρουσιάζει βελτιωμένες τιμές στα περισσότερα σημεία της περιοχής μελέτης για όλες τις στατικές τιμές του δείκτη GDOP που χρησιμοποιήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα:

- Όσον αφορά την σύγκριση μεταξύ των σχηματισμών GNFC και GPS, ο σχηματισμός GNFC παρουσιάζει βελτιωμένες τιμές της μέσης τιμής του GDOP για το 63.3% των σημείων της περιοχής μελέτης, ενώ το ποσοστό των σημείων που παρουσιάζουν βελτίωση στην μέγιστη παρατηρούμενη τιμή ξεπερνά το 98%. Η μέγιστη παρατηρούμενη τιμή του GDOP σε κάθε σημείο για το 90% του χρόνου παρουσιάζει βελτίωση για το 77.7% των σημείων του πλέγματος.
- Τέλος, όσον αφορά την σύγκριση μεταξύ των σχηματισμών GNFC και GALILEO, ο σχηματισμός GNFC παρουσιάζει βελτιωμένες τιμές της μέσης τιμής του GDOP για το 68.2% των σημείων του πλέγματος, ενώ το ποσοστό των σημείων που παρουσιάζουν βελτίωση στην μέγιστη παρατηρούμενη τιμή ξεπερνά το 85%. Η μέγιστη παρατηρούμενη τιμή του GDOP σε κάθε σημείο για το 90% του χρόνου, παρουσιάζει βελτιωμένες τιμές για το 60.7% των σημείων του πλέγματος, με χρήση του σχηματισμού GNFC αντί του σχηματισμού GALILEO.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Από την παραπάνω ανάλυση προέκυψε ότι με χρήση του σχηματισμού GNFC βελτιώνονται οι τιμές του δείκτη GDOP για το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που είχαν προκύψει με χρήση των συμβατικών σχηματισμών GPS και GALILEO. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα πρώτο δείγμα της βελτίωσης που μπορεί να επιφέρει στην απόδοση ενός σχηματισμού GNSS, η χρήση της λογικής σχεδίασης των FC. Η θεωρία και οι πιθανές εφαρμογές των Flower Constellations, παρά τις αρκετές μελέτες που έχουν γίνει πάνω στο αντικείμενο, βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης και μελέτης. Για παράδειγμα θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μία μελέτη που να αφορά την εκτίμηση του κόστους τοποθέτησης των δορυφόρων του σχηματισμού GNFC, και την σύγκρισή του με το αντίστοιχο κόστος του σχηματισμού GALILEO. Η μελέτη θα μπορούσε να αφορά στον μέγιστο αριθμό των δορυφόρων που μπορούν να τοποθετηθούν σε τροχιά, στην ίδια εκτόξευση.

Επίσης, θα μπορούσαν να μελετηθούν με χρήση του STK, ή ενός αντίστοιχου προγράμματος, άλλες πιθανές εφαρμογές των Flower Constellations, όπως είναι ο σχεδιασμός ενός Flower Constellation για την παγκόσμια ή τοπική κάλυψη μίας περιοχής με τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους, ή ο σχεδιασμός ενός Dual Compatible Flower Constellation, το οποίο να έχει συμβατές τροχιές ταυτόχρονα με 2 περιστρεφόμενα πλαίσια αναφοράς.

Όσον αφορά τις δυνατότητες του προγράμματος STK, μία ακόμη πιθανή εφαρμογή θα αφορούσε την μελέτη απώλειας του σήματος των δορυφόρων του σχηματισμού GPS κατά την πλοήγηση οχήματος σε αστική περιοχή, και της επίδρασης της στις προκύπτουσες τιμές του GDOP και στην ακρίβεια της λύσης πλοήγησης. Η προσομοίωση του αστικού περιβάλλοντος με το ρεαλιστικότερο δυνατό τρόπο θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με χρήση ενός αρχείου KML (*Keyhole Markup Language*) με πληροφορίες για τις κτιριακές εγκαταστάσεις μίας περιοχής, το οποίο μπορεί με πολύ εύκολο τρόπο να εισαχθεί στο STK με χρήση της προέκτασης STK Urban Propagator extension, η οποία δεν είναι προς το παρόν διαθέσιμη στο κέντρο γεωπληροφορικής της ΣΑΤΜ. Τα αρχεία KML έχουν αναπτυχθεί από την Keyhole Inc. (σήμερα ανήκει στην Google) και χρησιμοποιούνται για την έκφραση γεωγραφικής και εικονιστικής πληροφορίας σε δισδιάστατους και τρισδιάστατους χάρτες (όπως για παράδειγμα μπορεί να περιλαμβάνουν την θέση, το σχήμα και το ύψος των κτιρίων μίας περιοχής).

AKRONYMIA

BIMP	Bureau International des Poids et Mesures
DEM	Digital Elevation Model
DoD	Department of Defence
DOP	Dilution of Precision
ECEF	Earth Centered Earth Fixed
ECI	Earth Centered Inertial
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ERA	Earth Rotation Angle
ESA	European Space Agency
FC	Flower Constellation
FOM	Figures Of Merit
GAST	Greenwich Apparent Sidereal Time
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GMST	Greenwich Mean Sidereal Time
GNFC	Global Navigation Flower Constellation
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
HEO	High Earth Orbit
IAU	International Astronomical Union
ICRF	International Celestial Reference Frame
IERS	International Earth Rotation Service
IGS	International GNSS Service
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
LEO	Low Earth Orbit
MEO	Medium Earth Orbit
NAVSTAR GPS	Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System
NORAD	North American Aerospace Defense Command
PRF	Pulse Repetition Frequency

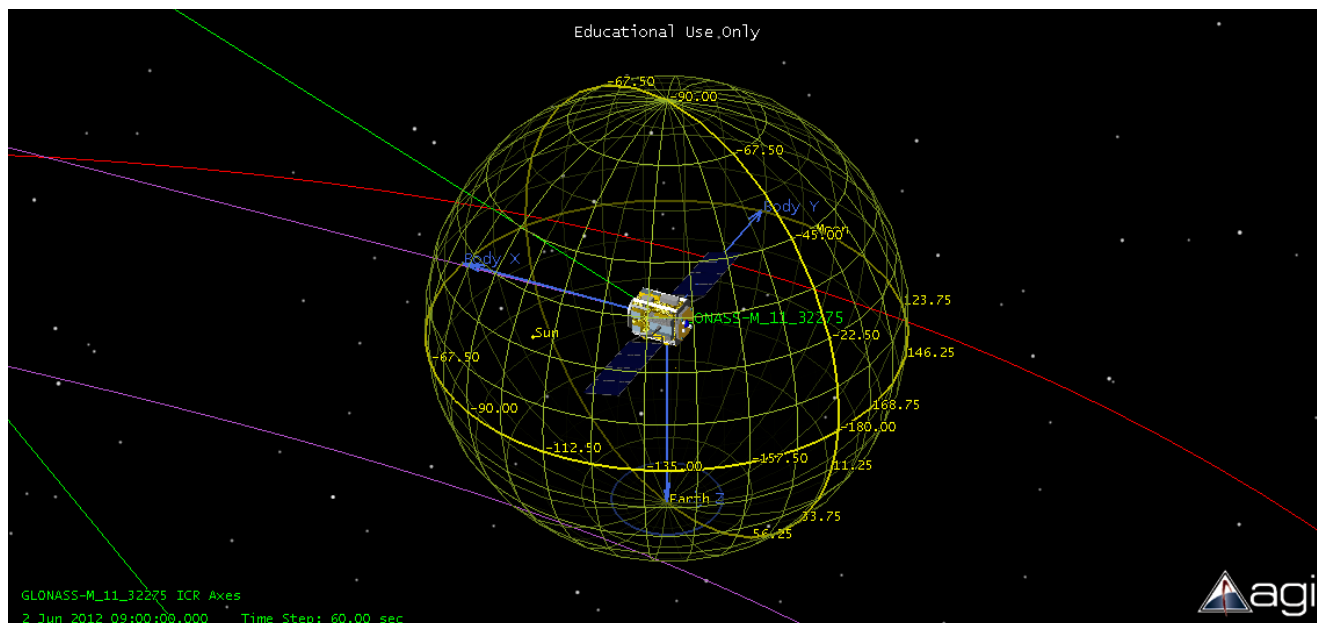
RAAN	Right Ascension of the Ascending Node
RIC	Radial, In-Track, Cross-Track
SAR	Synthetic Apperture Radar
SGP4	Simplified General Perturbations 4 Propagator
STK	Satellite Tool Kit
TAI	Temps Atomique International
TanDEM-X	TERRASAR-X add-on for Digital Elevation Measurement
TLE	Two Line Element Set
TT	Terrestrial Time
UERE	User Equivalent Range Error
UTC	Gregorian Universal Time Coordinated
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS 84	World Geodetic System 1984

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α- Συστήματα Αναφοράς RIC και NTC

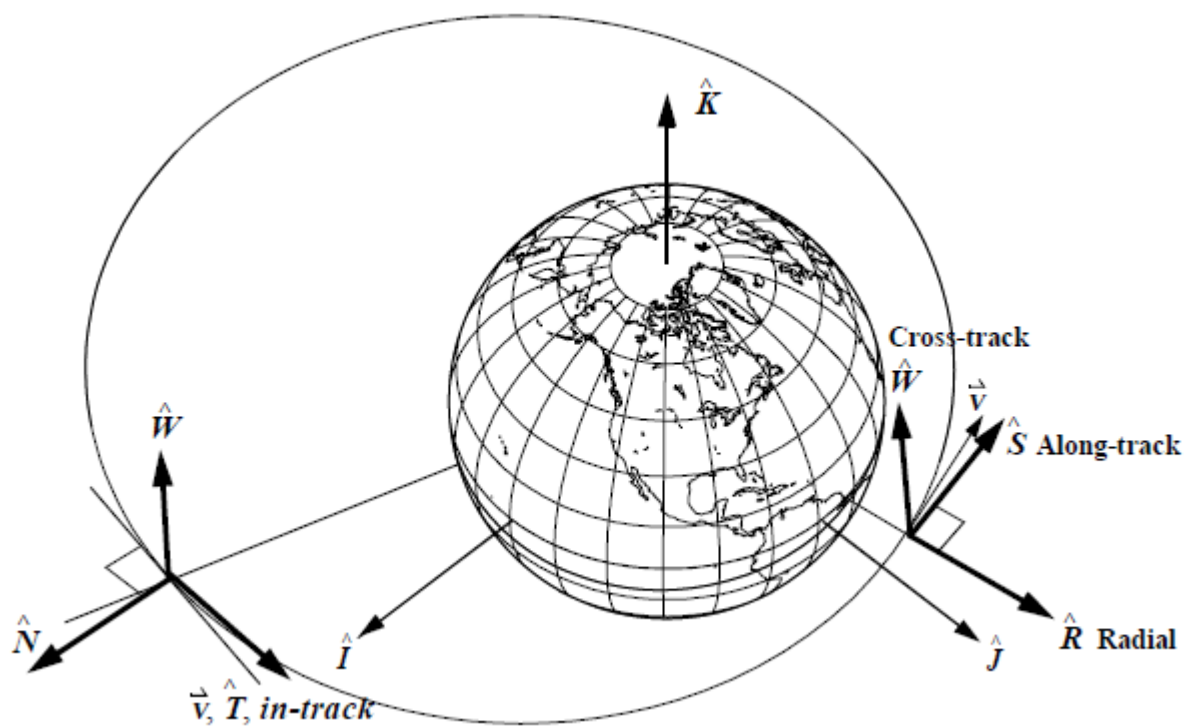
Στο STK δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού της σχετικής εφημερίδας ενός επιλεγμένου δορυφόρου ως προς έναν άλλο δορυφόρο, που αποτελεί το αντικείμενο αναφοράς, η οποία εκφράζεται σε καρτεσιανές συντεταγμένες συναρτήσει του χρόνου. Η σχετική εφημερίδα μπορεί να υπολογιστεί ως προς δύο στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς, το πλαίσιο RIC (Radial, In-Track, Cross-Track) ή αντίστοιχα το πλαίσιο TNC (Tangential, Normal, Cross-Track), τα οποία και καθορίζονται με χρήση της εφημερίδας του αντικειμένου αναφοράς.

Στο σύστημα RIC η κάθετη διεύθυνση στην τροχιά (Cross-Track) αναφέρεται σε μία διεύθυνση η οποία είναι κάθετη στο τροχιακό επίπεδο του δορυφόρου. Η ακτινική συνιστώσα έχει την ίδια διεύθυνση με το διάνυσμα θέσης του δορυφόρου (διάνυσμα με αρχή το κέντρο της Γης και πέρας το κέντρο του δορυφόρου), ενώ η διεύθυνση In-Track είναι κάθετη στις δύο άλλες συνιστώσες με θετική φορά προς την φορά κίνησης του δορυφόρου.

Όσον αφορά το σύστημα TNC, η συνιστώσα Tangential έχει την ίδια διεύθυνση και φορά με το διάνυσμα της ταχύτητας του δορυφόρου, η συνιστώσα Normal κείται επί του τροχιακού επιπέδου και είναι κάθετη στο διάνυσμα της ταχύτητας και η συνιστώσα Cross-Track ορίζεται όπως και στο σύστημα RIC. Στο σχήμα A1 απεικονίζεται το σύστημα RIC για έναν δορυφόρο στο STK, ενώ στο σχήμα A2 απεικονίζονται οι βασικές διευθύνσεις των συστημάτων RIC και TNC (όπου RSW → RIC και TNW → TNC).



Σχήμα A1: Οι βασικές διευθύνσεις του πλαισίου RIC



Σχήμα Α2: Οι βασικές διευθύνσεις των συστημάτων RSW (αντίστοιχο με το RIC) και TNW (αντίστοιχο με το σύστημα TNC).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- A D Vallado (2001) Fundamentals of Astrodynamics and Applications New York: McGraw-Hill 2nd Edition
- A Roth (2004) TerraSAR-X Science Plan DLR
- Ahmed El-Rabbany (2002) Introduction to Gps: The Global Positioning System Artech House
- Alan Ward GRACE Gravity Recovery and Climate Experiment GRACE Brochure, NASA- Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland
- Alberto Moreira, Gerhard Krieger, Irena Hajnsek, David Hounam, Marian Werner (2004) TanDEM-X: A TerraSAR-X Add-On Satellite for Single-Pass SAR Interferometry (IEEE)
- B Hofmann-Wellenhof, H Lichtenegger, J Collins (1992) GPS: Theory and Practice Wien (Austria): J.. Springer- Verlag isbn:3-211-82364-6 and 0-387-82364-6
- BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (2010) BIPM Annual Report on Time Activities Volume 5
- Bureau International des Poids et Mesures (2011) BIMP Annual Report on Time Activities Volume 6
- Caroline Erickson (1992) Investigations of C/A Code and Carrier Measurements and Techniques for Rapid Static GPS Surveys University of Calgary
- C Ma, E F Arias, T M Eubanks and A L Fey, A -M Gontier, C S Jacobs and O J Sovers, B A Archinal, P Charlot (1998) The international celestial reference frame as realized by very long baseline interferometry The Astronomical Journal 116: 516-546
- D Carter (1991) When is the Groundtrack drift rate zero? CSDL Memorandum, Cambridge, MA: Charles Stark Draper Laboratory
- D Delikaraoglou (1989) On Principles, Methods and Recent Advances in Studies Towards a GPS-based Active Control System for Geodesy and Geodynamics NASA Technical Memorandum 100716. Goddard Space Flight Centre, Code 621, Greenbelt, MD.
- D Mortari, M P Wilkins (2008) The Flower Constellation Set Theory Part I: Compatibility and Phasing IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 44: 3. 953–963 July
- D Mortari, O Abdelkhalik, C Bruccoleri (2005) Synodic and Relative Flower Constellations with Applications for Planetary Explorations In: AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting AAS/AIAA

D Mortari, Wilkins (2006) Dual-Compatible Flower Constellations In:AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting Conference AAS/AIAA

Dah-Jing Jwo (2001) Efficient DOP Calculation for GPS with and without Altimeter Aiding THE JOURNAL OF NAVIGATION 54: 269-279 May

Daniele Mortari, Matthew P Wilkins, Christian Bruccoleri (2004) The Flower Constellations AAS The Journal of the Astronautical Sciences 52: 1 and 2. 107- 127 January- June

E Rodriguez, C S Morris, J E Belz, E C Chapin, J M Martin, W Daffer, S Hensley (2005) An Assessment of the SRTM Topographic Products Jet Propulsion Laboratory D-31639.

ESA (2013a) Fact Sheet: What is Galileo?

European Commision (2013) First steps of Galileo - European satellite navigation system achieves its first position fix Brussels, 12 May 2013 [Press Release]

Frank Fletchner, Mike Watkins, Phil Morton, Frank Webb (2012) Status of the GRACE Follow-On Mission Session A2 GRACE-FO, Joint GSTM/ SPP Final Colloquium, 17 September 2012 [Conference Presentations]

Gerard Petit, Brian Luzum (2010) IERS Conventions International Earth Rotation and Reference System Service Technical Note No 32

Gerhard Krieger, Alberto Moreira, Hauke Fiedler, Irena Hajnsek, Michael Eineder, Manfred Zink, Marian Werner TANDEM-X: A SATELLITE FORMATION FOR HIGH RESOLUTION SAR INTERFEROMETRY Microwaves and Radar Institute, German Aerospace Centre (DLR)

Günter Seeber (2003) Satellite Geodesy, 2nd completely revised and extended edition

Hajnsek Irena, Busche Thomas, Fiedler Hauke, Krieger Gerhard, Buckreuss Stefan, Zink Manfred, Moreira Alberto, Wessel Birgit, Roth Achim, Fritz Thomas (2010) TanDEM-X Ground Segment TD-PD-PL-0069 TanDEM-X Science Plan Microwaves and Radar Institute, DLR

IERS Definition and Realization of the International Celestial Reference System by VLBI Astrometry of Extragalactic Objects (1997) No. 23

J E Draim (2009) Sixteen-hour DROPLET constellations for northern hemisphere coverage In:27th IET and AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2009) 332 – 332

J G Walker (1977) Continuous Whole-Earth Coverage by Circular Orbit Satellite Patterns Royal Aircraft Establishment

Janna Levin, Gabe Perez-Giz (2008) A Periodic Table for Black Hole Orbits

John E Draim, Dr Richard Inciardi, Dr Paul Cefola, Dr Ron Proulx, Dr David Carter (2001) Demonstration of the COBRA Teardrop Concept Using Two Smallsats in 8-Hour Elliptic Orbits In:Small Satellite Conference AIAA/ Utah State University

Joseph N Pelton, Scott Madry, Sergio Camacho-Lara (2013) Handbook of Satellite Applications Edited by:Joseph N. Pelton, , Scott Madry and Sergio Camacho-Lara. Springer

Keunjoo Park, Matthew P Wilkins, Daniele Mortari (2004) Uniformly Distributed Flower Constellation Design Study for Global Navigation System In:Space Flight Mechanics Meeting Conference

M Eineder, T Fritz, J Mittermayer, A Roth, E Börner, H Breit, B Bräutigam (2010) TERRASAR-X Ground Segment Basic Product Specification Document Cluster Applied Remote Sensing, DLR

M P Wilkins, D Mortari (2008) The Flower Constellation Set Theory Part II: Secondary Paths and Equivalency IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 44: 3. 964–976 July

M Ruggieri, M D Sanctis, T Rossi, M Lucente, D Mortari, C Bruccoleri, P Salvini, V Nicolai (2006) The Flower Constellation Set and its Possible Applications European Space Agency [Report]

Martin Lara, Ryan P Russell (2008) Fast Design of Repeat Ground Track Orbits in High-Fidelity Geopotentials In:A Symposium Honoring Byron Tapley's 50 Years of Contributions to Aerospace Education, Research, and Service Austin, Texas

Matthew P Wilkins, Daniele Mortari, Christian Bruccoleri (2004) Constellation Design Using Flower Constellations In:Space Flight Mechanics Meeting Conference

Matthew Paul Wilkins (2004) The Flower Constellations,- Theory, Design Process and Applications Texas A & M University [Phd Thesis]

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (2002) GRACE Launch [Press Kit]

National Aeronautics and Space Administration- Goddard Space Flight Center (2003) Studing the Earth's Gravity from Space: The Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) FS-2002-1-029-GSFC.

National Imagery, Mapping Agency (2000) DEPARTMENT OF DEFENSE WORLD GEODETIC SYSTEM 1984 Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems 3rd edition

P Dondl (1984) LOOPUS Opens a Dimension in Satellite Communications International Journal of Satellite Communications 2: 241-255

R H Tolson (2005) Space Flight Mechanics a.k.a. Astrodynamics NC State University

R Yarlagadda, I Ali, N Al-Dhahir, J Hershey (2000) GPS GDOP metric IEEE proc- Radar, Sonar

Navigation 147: 05. Oct

Richard B Langley (1999) Dilution of Precision GPS World May

Stefania Cornara, Theresa W Beech, Miguel Bello- Mora, Guy Janin (2001) Satellite Constellation Mission Analysis and Design Acta Astronautica 48: 5-12. 681-691

T S Kelso (2007) Validation of SGP4 and IS-GPS-200D Against GPS Precision Ephemerides

USA Department Of Defence, GPS NAVSTAR (2008) Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard 4th Edition

Βιβλιογραφία στα ελληνικά

Δεληκαράογλου Δημήτριος (2010) *Φυσική Γεωδαισία Θεωρητικές και Τεχνολογικές Βάσεις* ΕΜΠ Αθήνα [Σημειώσεις]

Δερμάνης Αθανάσιος (1999) *Διαστημική Γεωδαισία και Γεωδυναμική GPS* Εκδόσεις ΖΗΤΗ

Καλλιανού Φ., Επιβλέπων Ρ Κορακίτης (2006) *Συστήματα και πλαίσια αναφοράς στη γεωδαιτική αστρονομία οι διεθνείς συμβάσεις* [Διπλωματικές Εργασίες]

Καραθανάση Βασιλεία (2012) *ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο [Σημειώσεις]

Κατσιγιάννη Γεωργία, Επιβλέπων Δ Δεληκαράογλου (2011) *Ανάλυση Επιδόσεων των Επερχόμενων Συστημάτων GNSS για Κινηματικές Εφαρμογές Εντοπισμού στον Ελληνικό Χώρο* [Διπλωματικές Εργασίες]

Κορακίτης Ρωμύλος (2008) *Σημειώσεις Γεωδαιτικής Αστρονομίας* Ε' έκδοση ΕΜΠ Αθήνα [Σημειώσεις]

Σείδος Γ., Επιβλέπων Δ Δεληκαράογλου (2009) *Από το GPS στο GALILEO Μια Συγκριτική Ανάλυση της Γεωμετρικής Απόδοσης των δύο Συστημάτων Δορυφορικού Εντοπισμού στον Ελλαδικό Χώρο* [Διπλωματικές Εργασίες]

Φωτίου Α.- Πικρίδας Χ. (2008) *GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές* Εκδόσεις ΖΗΤΗ

Πηγές από το Διαδίκτυο

CGIAR Consortium for for Information SRTM 90m Digital Elevation Data, Retrieved 5 July 2013 from <http://srtm.csi.cgiar.org/Index.asp> [Web Site]

Christian Wolff (n.d.) Radartutorial.eu, Retrieved 5 July 2013 from <http://www.radartutorial.eu/index.en.html> [Web Site]

DLR TerraSAR-X - Germany's radar eye in space Retrieved 5 July 2013 from http://www.dlr.de/eo/en/desktopdefault.aspx/tabid-5725/9296_read-15979/ [Web Site]

EGNOS What is GNSS? Retrieved 5 July 2013 from <http://www.egnos-portal.eu/discover-egnos/about-egnos/what-gnss> [Web Site]

ESA "What is EGNOS" Retrieved 5 July 2013 from http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_present_-_EGNOS/What_is_EGNOS [Web Site]

ESA GALILEO: A Constellation of 30 Navigation Satellites Retrieved 5 July 2013 from http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Galileo_a_constellation_of_30_navigation_satellites [Web Site]

Holli Riebeek (2009) Catalog of Earth Satellite Orbits, <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/OrbitsCatalog/page1.php> NASA Earth Observatory [Web Site]

IERS INTERNATIONAL EARTH ROTATION & REFERENCE SYSTEMS SERVICE Retrieved 5 July 2013 from <http://hpiers.obspm.fr/> [Web Site]

International Association of Geodesy International Center for Global Earth Models Retrieved 5 July 2013 from <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/> [Web Site]

Jet Propulsion Laboratory site, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/dataprod.htm> [Web Site]

Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, NASA Jet Propulsion Laboratory (n.d.) GRACE Mission Specifications retrieved July 4 2013, from <http://podaac.jpl.nasa.gov/grace/> [Web Site]

U S Government Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics Retrieved 5 July 2013 from www.gps.gov [Web Site]

University of Texas GRACE retrieved 5 July 2013 from <http://www.csr.utexas.edu/grace/gravity/> [Web Site]