



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Συγκριτική μελέτη μεθοδολογικών επιλογών γεωδαιτικής
ανάλυσης δεδομένων GNSS με διαφορετικά ανοικτά λογισμικά**

Συντάξας: Χατζή Αμαρίλντο

Επιβλέπων καθηγητής: Δεληκαράογλου Δημήτριος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2020



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF RURAL AND SURVEYING
ENGINEERING
DEPARTMENT OF TOPOGRAPHY
LABORATORY OF HIGHER GEODESY

THESIS

**Comparative study of methodological options for geodetic analysis
of GNSS data with different open source software's**

Author: **Haxhi Amarildo**

Supervisor: **Delikaraoglou Dimitrios**

Professor N.T.U.A

Athens, October 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΚΑΙ ΔΟΥΦΟΡΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Συγκριτική Μελέτη μεθοδολογικών επιλογών γεωδαιτικής
ανάλυσης δεδομένων GNSS με διαφορετικά ανοικτά λογισμικά**

Συντάξας: Χατζή Αμαρίλντο

Παρουσιάστηκε δημόσια, εξετάσθηκε και εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική
επιτροπή στις 14/10/2020:

Δουλάμης Νικόλαος
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

**Δεληκαράογλου
Δημήτριος**
Καθηγητής Ε.Μ.Π
(Επιβλέπων)

Γκίκας Βασίλειος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Η επίβλεψη της εργασίας έγινε στο σύνολό της από τον κ. Δεληκαράογλου ωστόσο, η εξεταστική επιτροπή τροποποιήθηκε για τυπικούς λόγους λόγω αποχώρησης του επιβλέποντος λόγω συνταξιοδότησης.

Copyright © Χατζή Αμαρίλντο, 2020

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, εκπαιδευτικό ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναγράφεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

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

Αφιερωμένο στην Ελένη και στην Άννα

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Δημήτρη Δεληκαράογλου που μου έδωσε το έναυσμα για την ενασχόληση μου με το ταχεία εξελισσόμενο πεδίο των GNSS, εμβαθύνοντας σε νέες/εναλλακτικές μεθόδους προσδιορισμού θέσης, όπως είναι η μέθοδος Precise Point Positioning, αλλά και για τις συμβουλές που παρείχε κατά την διάρκεια διεκπεραίωσης της διπλωματικής εργασίας και για την κατανόηση που έδειξε όλο αυτό το χρονικό διάστημα. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την διδακτορική φοιτήτρια του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου του τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Μαρία Κασελίμη για τις συμβουλές και παρατηρήσεις της στην δημιουργία της εφαρμογής GAMPG και τον μεταπτυχιακό φοιτητή Πέτρο Κατσικαδάκο του Πανεπιστημίου Πειραιώς, που με βοήθησε στα πρώτα μου βήματα στην γλώσσα προγραμματισμού C# και στο ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης Visual Studio της Microsoft.

Στην συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον ερευνητή Feng Zhoy για την δημιουργία του GAMP και διανομή του ως λογισμικό ανοιχτού κώδικα, πάνω στο οποίο βασίστηκε η παρούσα διπλωματική αλλά και την Microsoft για την ελεύθερη διανομή του Visual Studio Community, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του Graphical User Interphase GAMPG του προγράμματος GAMP.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την ιστοσελίδα Stack Overflow, C# Corner, Dot Net Perls και GeeksforGeeks για την βοήθεια που παρείχαν στην κατανόηση και αντιμετώπιση διάφορων ζητημάτων κατά την διάρκεια υλοποίησης του προγράμματος GAMPG.

Ακολούθως, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υπηρεσία IGS και το πιλοτικό πρόγραμμα GNSS για την παροχή των απαραίτητων δεδομένων, καθιστώντας εφικτή την διερεύνηση των δυνατοτήτων του προγράμματος GAMP/GAMPG, εφαρμόζοντας την μέθοδο Precise Point Positioning για πολλαπλά συστήματα GNSS.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για όλη την υποστήριξη και κατανόηση που έδειξαν τα τελευταία χρόνια.

Χατζή Αμαρίλντο

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

Περίληψη

Ο εκσυγχρονισμός των υφιστάμενων και η ολοκλήρωση των νέων σχηματισμών GNSS τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων λογισμικών ανοιχτού κώδικα για την επεξεργασία παρατηρήσεων GNSS εφαρμόζοντας την μέθοδο Precise Point Positioning, όπως το PPPH, το goGPS και το MG_APP. Στα λογισμικά αυτά συμπεριλαμβάνεται και το GAMP υλοποιημένο σε ANSI C και βασισμένο στο πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα RTKLIB.

Σε αντίθεση με τα περισσότερα από τα προαναφερθέντα λογισμικά προσδιορισμού θέσης, το GAMP εκτός από τον γραμμικό συνδυασμό ελευθέρως ιονόσφαιρας εφαρμόζει και το μοντέλο των αδιαφοροποίητων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων κώδικα και φάσης σε μία ή δύο συχνότητες. Στις παρατηρήσεις αυτές εμπεριέχονται όλα τα σφάλματα που επηρεάζουν τον προσδιορισμό θέσης στον χώρο, όπως σφάλματα που οφείλονται στο hardware του δέκτη και του δορυφόρου, σφάλματα που οφείλονται στην ατμόσφαιρα και σφάλματα που οφείλονται σε άλλους παράγοντες. Για την αντιμετώπιση τους το GAMP χρησιμοποιεί είτε διορθώσεις προερχόμενες από εξωτερικές πηγές, είτε διάφορα μοντέλα διόρθωσης ή εκτίμησης τους στην διαδικασία της επίλυσης.

Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών του GAMP, η παρούσα διπλωματική εμβαθύνει στο ιονοσφαιρικό σφάλμα και στα σφάλματα που οφείλονται στο hardware του δορυφόρου και του δέκτη, ενώ οι υπόλοιπες πηγές σφαλμάτων αναφέρονται περιληπτικά. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι υφιστάμενοι τρόποι αντιμετώπισης της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης για παρατηρήσεις GNSS μίας ή δύο συχνοτήτων στην μέθοδο Precise Point Positioning. Όσον αφορά τα σφάλματα λόγω hardware (biases) του δορυφόρου και του δέκτη, περιγράφονται οι ιδιότητες και τρόποι αντιμετώπισής τους όταν χρησιμοποιούνται πολλαπλά σήματα από έναν σχηματισμό GNSS (Differential Code Biases), πολλαπλά σήματα για παραπάνω από ένα σχηματισμό (Inter System Biases) και σήματα που διαμορφώνονται με την προσέγγιση FDMA για την μετάδοση τους (Inter Frequency Biases).

Στην συνέχεια, επειδή το GAMP σε αντίθεση με τα υπόλοιπα προγράμματα επεξεργασίας σημάτων GNSS για τον προσδιορισμό θέσης αποτελεί command line πρόγραμμα, το μειονέκτημα μίας διεπαφής είναι εμφανές. Για την βελτίωση του GAMP η διεπαφή αυτή θα πρέπει, να δημιουργεί τα απαραίτητα αρχεία για την εκτέλεση του, να αποτελεί μεσολαβητή μεταξύ του command prompt και του GAMP, να διαθέτει εργαλεία επεξεργασίας και γραφικής αναπαράστασης των αποτελεσμάτων της εκάστοτε επίλυσης και τέλος να είναι εύκολη στην χρήση. Για τους παραπάνω λόγους δημιουργήθηκε το Graphical User Interphase GAMPG για Windows, χρησιμοποιώντας το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης Visual Studio σε C#. Επιπλέον, από τις εκτιμώμενες παραμέτρους ιονοσφαιρικής καθυστέρησης που εξάγει το GAMP, προστίθεται στην διεπαφή GAMPG ο υπολογισμός της κατακόρυφης πυκνότητας ηλεκτρονίων στο σημείο διάτρησης της ιονόσφαιρας, υιοθετώντας το μονοστρωματικό ιονοσφαιρικό μοντέλο. Οι παράμετρος αυτή είναι χρήσιμη για τα μοντέλα πρόβλεψης της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης χρησιμοποιώντας μοντέλα βαθιάς εκμάθησης.

Τέλος, για την αξιολόγηση του GAMPG και των μοντέλων που εφαρμόζει, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία παρατηρήσεων GNSS για την περίοδο 2017/09/01 έως 2017/09/30, χρησιμοποιώντας τα δορυφορικά συστήματα GPS, GLONASS, Galileo και BeiDou για στατικό και κινηματικό Precise Point Positioning, σχετικά ως προς τον χρόνο σύγκλισης και τα RMS των διαφορών σεναρίων.

Λέξεις κλειδιά: GNSS, biases, Precise Point Positioning (PPP), GAMP, GAMPG

Abstract

The modernization of the legacy and the completion of the new GNSS constellations in recent years has led to the development of new open source software's for processing GNSS observations using the Precise Point Positioning method, such as PPPH, goGPS and MG_APP. In these software's it is also included the open source software GAMP, a secondary development based on RTKLIB, written in ANCI C.

In contrast with most the above software's, GAMP besides the ionosphere free combination it implements the model of the undifferenced and uncombined single or dual frequency observations in Precise Point Positioning. In this model all errors are present in the phase and code observations which affect the accuracy of the positioning. These errors can be categorized into errors due to the satellites and receiver hardware, the propagation of the signal in the atmosphere and to errors that are independent of the previous two categories. To deal with them GAMP applies external corrections or correction models or estimation models in the resolution process.

Because of those features of GAMP, this thesis delves in the ionospheric error and in the errors due to satellite and receiver hardware, while the other error sources are analyzed briefly. Specifically, the existing methods of handling the ionospheric delay in PPP for single or double frequency GNSS observations for Precise Point Positioning are presented. Regarding satellite and receiver delays due to hardware, their characteristics are analyzed when multiple signals are used from one GNSS constellation (Differential Code Biases), when multiple signals are used from more than one constellation (Inter-System Biases) and when FDMA signals are used form a GNSS system (Inter Frequency Biases).

Then, because GAMP in contrast with the rest of the GNSS positioning software's is a command line program the disadvantage of not having an interphase is obvious. To improve GAMP the interphase should create the necessary configuration file to run it, it should provide tools for statistical processing and visualization of the results provided by GAMP and it should be easy to use. For the aforementioned reasons, the graphical user interphase GAMPG was created using the integrated development environment Visual Studio for Windows in C#. Moreover, from the estimated slant total electron content from GAMP, the calculation of the vertical electron content in the ionospheric pierce point is implemented in GAMPG using the thin layer ionospheric model. This parameter is useful for predicting ionospheric delays using deep learning models.

Finally, to evaluate GAMP/GAMPG and the models that it applies, an analysis is performed using GNSS observations from GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou for the period 2017/09/01 to 2017/09/30 for static and kinematic PPP regarding to the convergence time and RMS of different schemes.

Keywords: GNSS, biases, Precise Point Positioning (PPP), GAMP, GAMPG

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	vi
Περίληψη	viii
Abstract	x
Ακρωνύμια	xvi
Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 1	2
1.1 GNSS	2
1.2 Τμήμα διαστήματος	2
1.2.1 GPS	3
1.2.2 GLONASS	4
1.2.3 Galileo	5
1.2.4 BeiDou	6
1.2.5 QZSS	7
1.2.6 IRNSS/NavIC	7
1.3 IGS Multi-GNSS Project	8
Κεφάλαιο 2	11
2.1 Βασικές παρατηρήσεις GNSS	11
2.1.1 Παρατήρηση Ψευδοαπόστασης	11
2.1.2 Παρατήρηση Φάσης	12
2.1.3 Γραμμικοποιημένες σχέσεις ψευδοαπόστασης και φάσης	13
Κεφάλαιο 3	16
3.1 Precise Point Positioning	16
3.1.1 Μοντέλο αδιαφοροποίητων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων μίας συχνότητας	17
3.1.2 Μοντέλο αδιαφοροποίητων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων δύο συχνοτήτων	19
3.2 Πηγές Σφαλμάτων	20
3.2.1 Εκκεντρότητες του κέντρου φάσης της κεραίας του δορυφόρου	20
3.2.2 Εκκεντρότητες του κέντρου φάσης της κεραίας του δέκτη	21
3.2.3 Phase wind-up	22
3.2.4 Παλίρροιες στερεού φλοιού της Γης	23
3.2.5 Περιοδική αύξηση της μάζας των ωκεανών	24

3.2.6 Πολικές παλίρροιες.....	24
3.2.7 Κίνηση του πόλου.....	25
3.2.8 Τροποσφαιρική καθυστέρηση	26
3.2.9 Επιδράσεις σχετικότητας.....	27
3.2.10 Η επίδραση Sagnac.....	27
3.2.11 Πολυανάκλαση	28
Κεφάλαιο 4	30
4.1 Ιονοσφαιρική καθυστέρηση	30
4.2 Ιονοσφαιρική καθυστέρηση πρώτης τάξης.....	32
4.3 Ιονοσφαιρική καθυστέρηση δεύτερης τάξης	37
4.4 Κατακόρυφη πυκνότητα ηλεκτρονίων.....	38
4.5 Μοντέλα διόρθωσης ιονοσφαιρικής καθυστέρησης	39
4.5.1 Klobuchar	39
4.5.2 Nequick.....	41
4.5.3 NTCM.....	42
4.5.4 Παγκόσμιοι ιονοσφαιρικοί χάρτες.....	44
4.5.5 Μοντέλα Βαθιάς Εκμάθησης	47
4.6 Γραμμικοί συνδυασμοί.....	47
4.6.1 GRAPHIC.....	48
4.6.2 Γραμμικός συνδυασμός ελεύθερας ιονόσφαιρας	49
4.7 Εκτίμηση Ιονοσφαιρικής Καθυστέρησης	50
4.7.1 Δίκτυο PPP-RTK.....	52
Κεφάλαιο 5	56
5.1 Biases	56
5.2 Differential Code Bias.....	57
5.2.1 Time Group Delay	59
5.2.2 Παγκόσμιοι ιονοσφαιρικοί χάρτες.....	61
5.2.3 IGGDBC	63
5.2.3.1 Εξομάλυνση κώδικα μέσω παρατηρήσεων φάσης	65
5.2.3.2 Αδιαφοροποίητες και ασυσχέτιστες παρατηρήσεις σε τρεις συχνότητες.....	69
5.3 Inter System Bias	71
5.3.1 Μοντέλο ελεύθερας ιονόσφαιρας.....	73

5.3.2 Μοντέλο αδιαφοροποίητων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων.....	74
5.3.3 Χαρακτηριστικά των ISB	75
5.4 Inter-Frequency Biases.....	79
5.4.1 Φάσης	81
5.4.2 Κώδικα.....	82
Κεφάλαιο 6	87
6.1 GAMP	87
6.1.1 Διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων	87
6.1.2 Μειονεκτήματα GAMP	90
6.2 Microsoft Visual Studio	90
6.2.1 .Net framework και C#.....	91
6.3 Σχεδιασμός GAMPG (GAMP GUI)	93
6.3.1 Κύριο Interphase.....	93
6.3.2 Υπολογισμός VTEC	93
6.3.3 PLOT	96
6.4 GAMPG	96
6.4.1 Κύριο Interphase.....	96
6.4.2 VTEC.....	101
6.4.3 PLOT	102
6.4.4 Παράδειγμα	103
6.5 Αξιολόγηση GAMP/GAMPG	112
6.5.1 Στατικός εντοπισμός.....	114
6.5.2 Κινηματικός εντοπισμός.....	130
Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	148
Βιβλιογραφία	150
Ευρετήριο Εικόνων.....	153
Ευρετήριο Πινάκων	156
Ευρετήριο Σχημάτων	158

Ακρωνύμια

ACs	Analysis Centers
ANTEX	ANTenna EXchange Format
ARP	Antenna Reference Point
AS	Authorized Services
BGD	Broadcast Group Delay
CCL	Carrier to Code Leveling
CDMA	Code Division Multiple Access
CS	Commercial Service
CIL	Common Intermediate Language
CLR	Common Language Runtime
CME	Coronal Mass Ejections
CL	Class Library
CDDIS	Crustal Dynamics Data Information System
DCB	Differential Code Bias
DCs	Data Centers
DLL	Delay Lock Loop
DLTEC	Deep Learning TEC model
ERP	Earth Orientation Parameters
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GAMP	GNSS Analysis software for Multi-constellation and multi-frequency Precise positioning
GAMPG	GAMP Graphical User Interphase
GCRS	Geocentric Celestial Reference System
GEO	Geostationary Orbit
GMF	Global Mapping Function
GNSS	Global Navigation Satellite System
GRAPHIC	Group and Phase Ionosphere Correction
GTSF	Generalized Triangular Series Function
IF, IF12	Ionosphere Free
IFCB	Inter Frequency Code Bias
IFPB	Inter Frequency Phase Bias
IDE	Integrated Development Environment
IGGDCB	Institute of Geodesy and Geophysics DCB
IGS	International GNSS Service
IGSO	Inclined Geosynchronous Orbit
IPP	Ionospheric Pierce Point
ISBs	Inter-System Biases
ISCs	Inter-Signal Corrections
ISTBs	Inter-System Time Offsets
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
KASI	Korean Astronomy and Space Science Institute
LEX	L-band Experiment
LSTM	Long Short-Term Memory

MEO	Medium-altitude Earth Orbit
MGEX	Multi-GNSS EXperiment
MGWG	Multi-GNSS Working Group
NTCM	Neustrelitz TEC Model
NTCM-BC	Neustrelitz TEC Model Broadcast
OS	Open Service
PCO	Phase Center Offset
PCV	Phase Center Variations
PLL	Phase Lock Loop
PPP	Precise Point Positioning
PPP-RTK	Precise Point Positioning-Real Time Kinematic
PPS	Precise Positioning Service
PRN	Pseudo Random Noise
PRS	Public Regulated Service
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RMS	Root Mean Square
RNN	Recurrent Neural Networks
SIO	Scripps Institution of Oceanography
SPS	Standard Positioning Service
STEC	Slant Total Electron Content
TECU	Total Electron Content Unit
TGD	Time Group Delay
TTF	Time-To-First-Fixed
UC	Undifferenced and Uncombined
UC1	Undifferenced and Uncombined single frequency
UC12	Undifferenced and Uncombined dual frequency
UT	Universal Time
VMF1	Vienna Mapping Function 1
VTEC	Vertical Total Electron Content
WG	Working Groups
ZTD	Zenith Total Delay

Εισαγωγή

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην βελτίωση των υφιστάμενων λογισμικών ανοιχτού κώδικα επεξεργασίας παρατηρήσεων GNSS. Συγκεκριμένα, λόγω της ολοκλήρωσης των νέων σχηματισμών GNSS και της μοντερνοποίησης των υφιστάμενων τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλά λογισμικά κώδικα για επεξεργασία παρατηρήσεων φάσης και κώδικα σε μία ή παραπάνω συχνότητες για πολλαπλά συστήματα GNSS. Ορισμένα από αυτά τα λογισμικά αποτελούν το PPPH, το goGPS, το MG_APP και το GAMP τα οποία εφαρμόζουν την μέθοδο Precise Point Positioning.

Από τα προαναφερθέντα λογισμικά εκείνο που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι το GAMP, διαμορφωμένο σε ANSI C, επειδή αποτελεί command line πρόγραμμα, δηλαδή εκτελείται μέσω του command prompt στην πλατφόρμα των Windows. Παράλληλα, εκτός από γραμμικούς συνδυασμούς παρατηρήσεων κώδικα και φάσης υπάρχει η δυνατότητα επεξεργασίας τους αδιαφοροποίητα και ασυσχέτιστα στη μέθοδο PPP. Επιπλέον, το GAMP είναι αρκετά ευέλικτο στην εφαρμογή μοντέλων αντιμετώπισης διαφόρων σφαλμάτων στην διαδικασία της επίλυσης PPP, όπως είναι τα σφάλματα που οφείλονται στην ατμόσφαιρα, σφάλματα που οφείλονται στο hardware του δορυφόρου και του δέκτη κτλ.

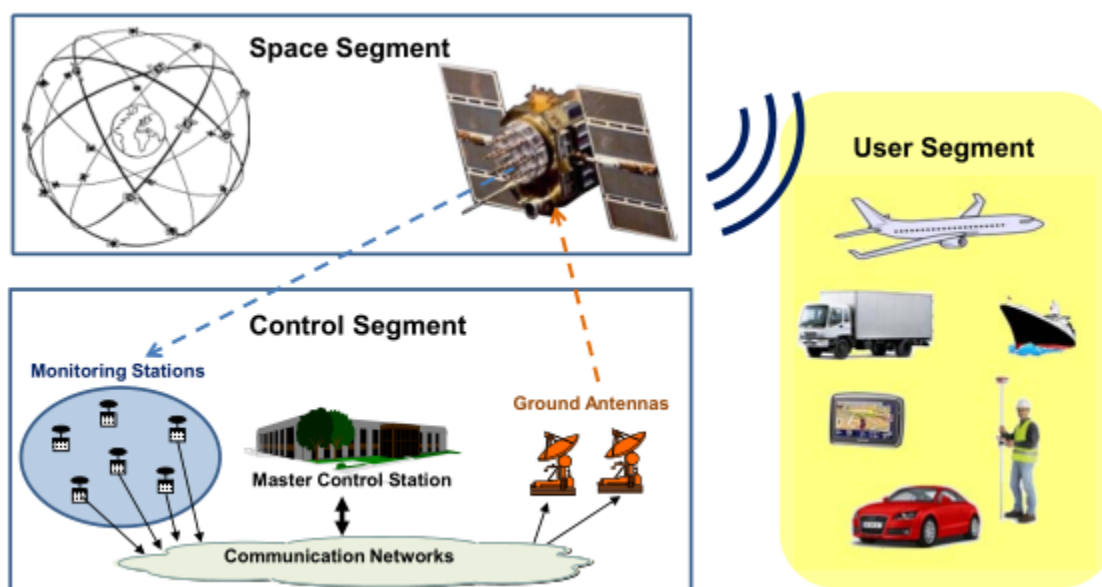
Λαμβάνοντας αυτά υπόψη, αρχικά επιδιώκεται η ανάλυση και περιγραφή των διαφόρων μεθόδων αντιμετώπισης των κυριότερων σφαλμάτων στον εντοπισμό θέσης με την μέθοδο PPP βασισμένη στην διεθνή βιβλιογραφία και στην συνέχεια γίνεται προσπάθεια βελτίωσης του GAMP. Συγκεκριμένα, υλοποιείται σε γλώσσα C# το Graphical User Interphase GAMPG χρησιμοποιώντας το IDE Visual Studio της Microsoft, ώστε το GAMP να γίνει πιο αποδοτικό και εύχρηστο. Στα πλαίσια της υλοποίησης αυτής ενσωματώνεται και ο προσδιορισμός της κατακόρυφης πυκνότητας ηλεκτρονίων στο σημείο διάτρησης της ιονόσφαιρας, παράμετρος σημαντική για την πρόβλεψη της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης χωρικά και χρονικά χρησιμοποιώντας μοντέλα βαθιάς εκμάθησης.

Η παρούσα διπλωματική χωρίζεται σε έξι κεφάλαια. Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται το παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης και ειδικότερα το τμήμα διαστήματος, στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι βασικές παρατηρήσεις GNSS που πραγματοποιεί ένας δέκτης και στο κεφάλαιο 3 αναλύεται η μέθοδος PPP και τα σφάλματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν στην διαδικασία της επίλυσης, εκτός του σφαλμάτων που οφείλονται στην ιονοσφαιρική καθυστέρηση και των καθυστερήσεων που προέρχονται από το hardware του δορυφόρου και του δέκτη. Τα σφάλματα αυτά αναλύονται στα κεφάλαια 4 και 5 αντίστοιχα. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται το GAMP, τα μειονεκτήματά του, ο τρόπος υλοποίησης και χρήσης της διεπαφής GAMPG, αλλά και ένας εσωτερικός έλεγχος των μοντέλων που εφαρμόζει το GAMP/GAMPG ως προς τον χρόνο σύγκλισης και τα RMS, για διάφορα σενάρια.

Κεφάλαιο 1

1.1 GNSS

Το παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης (Global Navigation Satellite System, GNSS) ορίζεται από τρία μέρη (Εικόνα 1). Το πρώτο τμήμα συμβάλει στην μετάδοση των σημάτων στο φάσμα των ραδιοκυμάτων σε δύο τουλάχιστον συχνότητες από τους δορυφόρους και ονομάζεται τμήμα διαστήματος. Το δεύτερο τμήμα είναι υπεύθυνο για την σωστή λειτουργία του συστήματος GNSS και ονομάζεται τμήμα ελέγχου. Οι κύριες αρμοδιότητες του τμήματος ελέγχου είναι ο έλεγχος και η διατήρηση της κατάστασης και των ρυθμίσεων του συστήματος GNSS, η πρόβλεψη της εξέλιξης των εφημερίδων και χρονομέτρων των δορυφόρων, η διατήρηση της κλίμακας χρόνου του συστήματος GNSS χρησιμοποιώντας ατομικά χρονόμετρα και η ενημέρωση των μηνυμάτων ναυσιπλοΐας για όλους τους δορυφόρους. Το τρίτο τμήμα αποτελεί τους χρήστες, όπου χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο εξοπλισμό μπορούν να υπολογίσουν την θέση τους στο χώρο.



Εικόνα 1. Αρχιτεκτονική συστήματος GNSS (Sanz Subirana, et al., 2013)

Στα υπόλοιπα κεφάλαια περιγράφεται μόνο το τμήμα διαστήματος. Περισσότερες πληροφορίες για το τμήμα ελέγχου και το τμήμα χρηστών του συστήματος GNSS μπορούν να αναζητηθούν στην διεθνή βιβλιογραφία.

1.2 Τμήμα διαστήματος

Το σύστημα GNSS αποτελείται από τέσσερα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα το Αμερικάνικο GPS (Global Navigation System), το Ευρωπαϊκό Galileo, το Ρωσικό GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) και το Κινέζικο BeiDou. Εκτός από τα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα υπάρχουν και δύο περιφερειακά δορυφορικά συστήματα, το Ιαπωνικό QZSS και το Ινδικό IRNSS/NavIC (*Navigation with Indian Constellation*) (Εικόνα 2).

Από τα προαναφερθέντα δορυφορικά συστήματα πλήρως λειτουργικά είναι το GPS από τον Ιούνιο του 1995 με 31 δορυφόρους σε τροχιά, έχοντας ξεκινήσει από το 2015 οι διαδικασίες εκσυγχρονισμού του. Το GLONASS από τις 8 Δεκεμβρίου 2018 είναι πλήρως λειτουργικό με 24

δορυφόρους και το IRNSS/NavIC είναι πλήρως λειτουργικό από το 2016 περιλαμβάνοντας 7 δορυφόρους σε τροχιά. Το Galileo και το BeiDou αναμένονται να είναι πλήρως λειτουργικά το 2020 με συνολικά 30 και 35 δορυφόρους αντίστοιχα, ενώ το QZSS αναμένεται να είναι πλήρως λειτουργικό το 2023 με 7 δορυφόρους σε τροχιά. Μέχρι στιγμής 4 δορυφόροι του σχηματισμού QZSS βρίσκονται σε λειτουργία.

System	GPS 	GLONASS 	BeiDou 	Galileo 	QZSS 	IRNSS/NavIC 
Orbit	MEO	MEO	MEO, IGSO, GEO	MEO	IGSO, GEO	IGSO, GEO
Nominal number of satellites	24	24	27, 3, 5	30	3, 1	4, 3
Constellation	6 planes 56° inclination	Walker (24/3/1) 64.8° inclination	Walker (24/3/1) 55° inclination	Walker (24/3/1) 56° inclination	IGSOs with 43° inclination	IGSOs with 29° inclination
Services	SPS, PPS	SPS, PPS	OS, AS, WADS, SMS	OS, CS, PRS	GCS, GAS, PRS, EWS, MCS	SPS, RS
Initial service	Dec 1993	Sep 1993	Dec 2012	2016/2017 (planned)	2018 (planned)	2016 (planned)
Origin	USA	Russia	China	Europe	Japan	India
Coverage	Global	Global	Global	Global	East Asia Oceania region	$-30^\circ < \phi < 50^\circ$ $30^\circ < \lambda < 130^\circ$
Frequency (MHz)	L1 1575.42 L2 1227.60 L5 1176.45	L1 1602.00 L2 1246.00 L3 1202.025	B1 1561.098 B2 1207.14 B3 1268.52	E1 1575.42 E5a 1176.45 E5b 1207.14 E6 1278.75	L1 1575.42 L2 1227.60 L5 1176.45 E6 1278.75	L5 1176.45 S 2492.028

Εικόνα 2. Περιγραφή των διαφόρων δορυφορικών συστημάτων (Teunissen & Montenbruck, 2017)

1.2.1 GPS

Το GPS για την παροχή υπηρεσιών προσδιορισμού θέσης χρησιμοποιεί σήματα στις συχνότητες L1 (1575.42 MHz) και L2 (1227.6 MHz) εμπεριέχοντας τον κρυπτογραφημένο μετρητικό κώδικα P (ή Y κώδικα) ή τον κρυπτογραφημένο μετρητικό κώδικα M που παρέχει καλύτερη προστασία στους χρήστες από παρεμβολές άλλων σημάτων (jamming). Τόσο ο κώδικας P όσο και ο M χρησιμοποιούνται από εξουσιοδοτημένους χρήστες αποτελώντας την ακριβή υπηρεσία εντοπισμού θέσης (Precise Positioning Service ή PPS). Αντίθετα, στην υπηρεσία απόλυτου εντοπισμού θέσης (Standard Positioning Service ή SPS) χρησιμοποιούνται σήματα μόνο στην συχνότητα L1 εμπεριέχοντας τον ελεύθερο χρήσης κώδικα C/A ή L2C.

Με τον εκσυγχρονισμό του GPS δύο νέα πολιτικά σήματα είναι διαθέσιμα, το σήμα L2C και το σήμα L5 (1176.45 MHz). Το σήμα L5 θα είναι διαλειτουργικό με εκείνα των Galileo, QZSS και IRNSS/NavIC. Το σήμα M-code ανήκει και αυτό στα νέα σήματα που μεταδίδονται από τους νέους δορυφόρους GPS.

Η προσέγγιση που ακολουθεί το GPS για την μετάδοση των σημάτων του είναι η προσέγγιση CDMA (Code Division Multiple Access), όπου κάθε δορυφόρος εκπέμπει στην ίδια συχνότητα έναν μοναδικό κώδικα ψευδοτυχαίου θορύβου (Pseudo Random Noise, PRN). Εκτός από το

σύστημα GPS, την προσέγγιση αυτή ακολουθούν και τα συστήματα Galileo, BeiDou, QZSS και IRNSS/NavIC.

Πίνακας 1. Επισκόπηση σημάτων GPS (Teunissen & Montenbruck, 2017)

Ζώνη	Σήμα	Συχνότητα (MHz)	Block			
			I/II/IIA/IIR	IIR-M	IIF	III
L1	P(Y)	1575.42	✓	✓	✓	✓
	C/A	1575.42	✓	✓	✓	✓
	L1C	1575.42				✓
	L1C	1575.42				✓
	M	1575.42		✓	✓	✓
L2	P(Y)	1227.60	✓	✓	✓	✓
	L2 CM	1227.60		✓	✓	✓
	L2 CL	1227.60		✓	✓	✓
	M	1227.60		✓	✓	✓
L5	I5	1176.45			✓	✓
	Q5	1176.45			✓	✓

Το GPS αποτελείται από τις σειρές BLOCK I/II/IIA/IIR/IIR-M/GPS III. Από την σειρά BLOCK I κανένας από τους 11 σε σύνολο δορυφόρους βρίσκεται πλέον σε λειτουργία. Όσον αφορά τους δορυφόρους της σειράς BLOCK II-IIA οι πρώτοι 9 ανήκουν στη σειρά II, ενώ οι υπόλοιποι 19 στην σειρά IIA λόγω τροποποιήσεων στα μηχανήματα. Από τους δορυφόρους της σειράς BLOCK II-IIA κανένας δεν βρίσκεται σήμερα σε λειτουργία, ενώ από την σειρά BLOCK IIR βρίσκονται σε λειτουργία 21, εκ των οποίων 8 αναβαθμίστηκαν και πλέον ανήκουν στην σειρά BLOCK IIR-M με την δυνατότητα εκπομπής ενός νέου πολιτικού και στρατιωτικού σήματος στην συχνότητα L5. Η σειρά BLOCK IIF συγκροτείται από 12 δορυφόρους, από τους οποίους παρέχονται όλα τα σήματα πλοήγησης που παρέχονται από το μπλόκο IIR-M συν ένα επιπλέον σήμα το L5. Τέλος, στη σειρά GPS III περιλαμβάνονται επιπλέον 3 δορυφόροι, οι οποίοι θα παρέχουν τα σήματα των προαναφερθέντων σειρών συν ένα τέταρτο πολιτικό σήμα. Τα χαρακτηριστικά των σειρών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

1.2.2 GLONASS

Οι δορυφόροι GLONASS διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, την γενιά GLONASS I/II, την γενιά GLONASS-M και την γενιά GLONASS-K, όπου για την μετάδοση των σημάτων τους

χρησιμοποιούν την προσέγγιση FDMA (Frequency Division Multiple Access). Συγκεκριμένα, κάθε δορυφόρος του GLONASS μεταδίδει το σήμα του σε μοναδική για αυτόν συχνότητα η οποία προκύπτει από τις κύριες συχνότητες L1 και L2 (Κεφάλαιο 5.4). Πέραν από αυτές τις συχνότητες, οι δορυφόροι GLONASS-K1 καθώς και οι πιο καινούργιοι δορυφόροι GLONASS-M, εκπέμπουν και μία νέα CDMA συχνότητα την L3 (1202.025 MHz). CDMA σήματα για της συχνότητες L1 και L2 προβλέπεται για τους δορυφόρους της γενιάς GLONASS-K2.

Πίνακας 2. Επισκόπηση σημάτων GLONASS. Οι δύο πρώτοι χαρακτήρες ορίζουν την ζώνη συχνοτήτων, ενώ οι δύο επόμενοι χαρακτήρες τον τύπο της υπηρεσίας (Ο: ανοιχτή, S: εξουσιοδοτημένη) και της διαμόρφωσης (F:FDMA, C:CDMA) (Teunissen & Montenbruck, 2017)

Δορυφόροι	FDMA		CDMA			Σε λειτουργία
	L1	L2	L1	L2	L3	
GLONASS	L1OF L1SF	L2SF	-	-	-	0
GLONASS-M	L1OF L1SF	L2OF L2SF	-	-	(L3OC)	23
GLONASS-K1	L1OF L1SF	L2OF L2SF	-	-	L3OC	1
GLONASS-K2	L1OF L1SF	L2OF L2SF	L1OC L1SC	L2OC L2SC	L3OC	-

1.2.3 Galileo

Οι δορυφόροι του Galileo μεταδίδουν σήματα σε τρεις ζώνες συχνοτήτων, την E1 (1575.46 MHz), την E6 (1278:75MHz) και την E5 (1191:795MHz). Η E1 χρησιμοποιείται για ανοιχτές υπηρεσίες (Open Service, OS) και ανοιχτές ρυθμιζόμενες υπηρεσίες (Public Regulated Service, PRS). Αντίθετα, η συχνότητα E6 χρησιμοποιείται για εμπορική χρήση (Commercial Service, CS) και για ανοιχτές ρυθμιζόμενες υπηρεσίες. Συγκεκριμένα, το σήμα E6 είναι κατάλληλο για την μετάδοση διορθώσεων τροχιάς και χρονομέτρων δορυφόρων στο μήνυμα πλοήγησης σε ικανοποιητικό βαθμό ανανέωσης (448 ψηφία το δευτερόλεπτο), που επιτρέπει τον προσδιορισμό θέσης με ακρίβεια εκατοστού για εφαρμογές Precise Point Positioning (Κεφάλαιο 3) πραγματικού χρόνου. Στις προαναφερθείσες συχνότητες, αλλά και στην E5, υπάρχει η δυνατότητα μετάδοσης πιλοτικών συχνοτήτων, με την E5 να διασπάται στην E5a (1176.45 MHz) και E5b (1207.14 MHz).

Πίνακας 3. Επισκόπηση σημάτων Galileo (Teunissen & Montenbruck, 2017)

Σήμα	Φέρουσα Συχνότητα (MHz)	Υπό-ζώνη	Συχνότητα Υπό-ζώνης (MHz)	Φέρουσα συχνότητα ευθυγραμμισμένη με
E1	1575.420	-	-	GPS L1 C/A, L1C
E6	1278.750	-	-	-
E5	1191.795	E5b	1207.140	-
		E5a	1176.450	GPS L5

1.2.4 BeiDou

Οι δορυφόροι του BeiDou διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ή καλύτερα σε τρεις φάσεις. Στην πρώτη φάση, ονομαζόμενη BeiDou-1, το BeiDou είχε περισσότερο ρόλο περιφερειακού χαρακτήρα, ενώ στην δεύτερη φάση, ονομαζόμενη BeiDou-2, ο ρόλος του BeiDou αντικαταστάθηκε σε αυτό του παγκόσμιου συστήματος. Παράλληλα, όσοι δορυφόροι εκτοξεύθηκαν από τον Μάρτιο του 2015 και μετά ανήκουν στην φάση τρία, ονομαζόμενη BeiDou-3.

Πίνακας 4. Επισκόπηση σημάτων BeiDou (Teunissen & Montenbruck, 2017)

Ζώνη	Συχνότητα (MHz)	Σήμα	Υπηρεσία
B1	1561.098	B1-I	Ανοιχτή
		B1-Q	Εξουσιοδοτημένη
B2	1207.14	B2-I	Ανοιχτή
		B2-Q	Εξουσιοδοτημένη
B3	1268.52	B3-I	Εξουσιοδοτημένη
		B3-Q	Εξουσιοδοτημένη

Το BeiDou μεταδίδει τα σήματά του σε τρεις ζώνες συχνοτήτων, την B1 με κεντρική συχνότητα 1561.098 MHz, την B2 με κεντρική συχνότητα 1207.14 MHz και την B3 με κεντρική συχνότητα 1268.52 MHz. Σε αυτές τις συχνότητες παρέχονται οι ανοιχτές υπηρεσίες και οι εξουσιοδοτημένες υπηρεσίες (Authorized Services, AS) (Πίνακας 4). Εκτός από τις προαναφερθείσες ζώνες συχνοτήτων, χρησιμοποιούνται και αυτές των ζωνών L1/E1 και L5/E5 από τους δορυφόρους που ανήκουν στην κατηγορία BeiDou-3. Το BeiDou από την στιγμή που θα αποκτήσει πλήρη λειτουργία (2020) θα περιλαμβάνει 5 δορυφόρους σε γεωστατική τροχιά (geostationary orbits,

GEO), 27 δορυφόρους σε μεσαία επί της γης τροχιά (medium-altitude Earth orbit, MEO) και 3 δορυφόρους σε γεωσύγχρονη ελλειπτική τροχιά (inclined geosynchronous orbits, IGSO).

1.2.5 QZSS

Τα σήματα που μεταδίδονται από τους δορυφόρους QZSS είναι 6 σε σύνολο και συμβατά με αυτά των GPS και Galileo (Πίνακας 5). Συγκεκριμένα, αποτελούνται από το σήμα L1-C/A (1575.42 MHz), L1C (1575.42 MHz), L2C (1227.6 MHz), L5 (1176.45 MHz), L1-SAIF (1575.42MHz) και το σήμα, που χρησιμοποιεί την ίδια συχνότητα με αυτή του σήματος LEX (L-band Experiment, 1278.75 MHz) του Galileo. Οι τροχιές των δορυφόρων του QZSS είναι ένα μείγμα από τρεις IGSO δορυφόρους και 1 MEO από το 2018 και έπειτα.

Πίνακας 5. Επισκόπηση σημάτων QZSS (*Teunissen & Montenbruck, 2017*)

Σήμα	Ζώνη	Κεντρική συχνότητα (MHz)
L1-C/A	L1	1575.42
L1C	L1	1575.42
	L1	1575.42
L2C	L2	1227.60
L5	L5 (Κανάλι I)	1176.45
	L5 (Κανάλι Q)	1176.45
L1-SAIF	L1	1575.42
LEX	E6	1278.75

1.2.6 IRNSS/NavIC

Οι ζώνες που χρησιμοποιούνται για την μετάδοση των σημάτων των δορυφόρων του NavIC είναι η L και η S ζώνη στα 1176.45 και 2492.028 MHz αντίστοιχα. Και οι δύο αυτές συχνότητες χρησιμοποιούνται για OS και PRS υπηρεσίες. Το τμήμα διαστήματος του IRNSS/NavIC αποτελείται από τρεις δορυφόρους GEO και τέσσερις δορυφόρους IGSO.

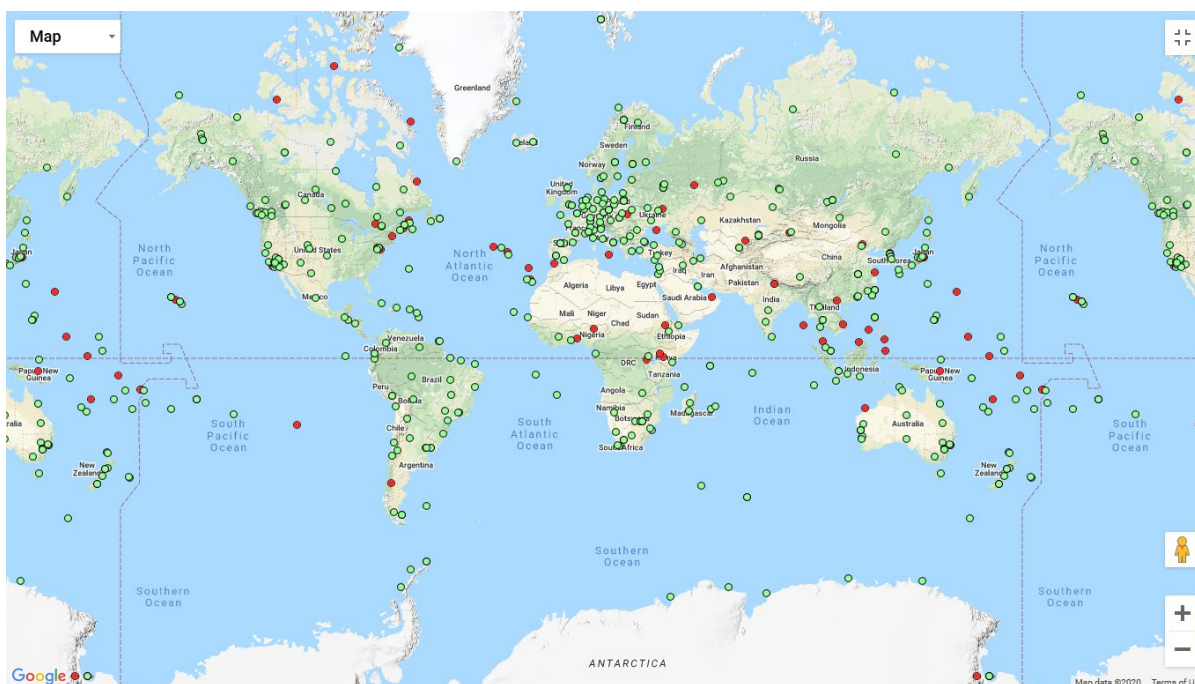
Πίνακας 6. Επισκόπηση σημάτων IRNSS/NavIC (*Teunissen & Montenbruck, 2017*)

Σήμα	Φέρουσα συχνότητα (MHz)	Εύρος ζώνης (MHz)
L5	1176.450	1164-1188.45
S	2492.028	2483.50-2500.00

1.3 IGS Multi-GNSS Project

Για παραπάνω από 20 χρόνια, προϊόντα τροχιών και χρονομέτρων των δορυφόρων για τα συστήματα GPS και GLONASS παράγονται και αναπτύσσονται από την Παγκόσμια Υπηρεσία GNSS (International GNSS Service, IGS). Σύμφωνα με την επίσημη ιστοσελίδα της IGS, ο κύριος σκοπός της είναι (Anon., 2019)

η παροχή, σε μία ανοιχτή διαθέσιμη βάση, η υψηλότερης ποιότητας δεδομένων GNSS, προϊόντων και υπηρεσιών, για την υποστήριξη του επίγειου πλαισίου αναφοράς, προσδιορισμού θέσης, πλοήγησης, συγχρονισμού και άλλων εφαρμογών που επωφελούν την επιστημονική κοινότητα και την κοινωνία



Εικόνα 3. Δίκτυο σταθμών IGS (<http://www.igs.org/network>)

Η υπηρεσία IGS αποτελείται από ένα δίκτυο σταθμών (IGS Network) που παρέχουν παρατηρήσεις για όλους τους σχηματισμούς GNSS (Εικόνα 3). Οι παρατηρήσεις GNSS στην συνέχεια διανέμονται και αποθηκεύονται από τα κέντρα δεδομένων (Data Centers, DCs). Τα κέντρα δεδομένων διακρίνονται σε επιχειρησιακά, περιφερειακά και παγκόσμια. Τα επιχειρησιακά κέντρα δεδομένων μεταδίδουν ηλεκτρονικά τα συλλεγμένα δεδομένα από τους σταθμούς του δικτύου IGS στα περιφερειακά και παγκόσμια κέντρα δεδομένων, αφού έχει προηγηθεί η επικύρωση τους, η μορφοποίηση τους (RINEX), η συμπίεση και η τοπική αρχειοθέτηση τους. Τα περιφερειακά κέντρα δεδομένων πέραν της αρχειοθέτησης των παρεχόμενων δεδομένων από τα τοπικά κέντρα, τα διαθέτουν online και τα μεταδίδουν στα παγκόσμια κέντρα δεδομένων. Τα παγκόσμια κέντρα δεδομένων με την σειρά τους αρχειοθετούν και δημιουργούν αντίγραφα ασφαλείας των δεδομένων και προϊόντων IGS και ανταλλάσσουν τα δεδομένα μεταξύ τους για την εξασφάλιση εξισορρόπησης. Τα παγκόσμια κέντρα δεδομένων είναι

- το Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
- το National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) στη Γαλλία
- το Scripps Institution of Oceanography (SIO) στη Γαλλία
- το Korean Astronomy and Space Science Institute (KASI) στη Κορέα

Για την παραγωγή των προϊόντων GNSS τα συλλεγμένα δεδομένα από το δίκτυο IGS διανέμονται από τα διάφορα κέντρα δεδομένων στα διάφορα κέντρα ανάλυσης (Analysis Centers, ACs) για την αναπαραγωγή διαφόρων προϊόντων GNSS. Τα κύρια προϊόντα IGS που παράγονται είναι

- εφημερίδες δορυφόρων
- παράμετροι προσανατολισμού της Γης
- συντεταγμένες σταθμών
- πληροφορίες χρονομέτρων
- παράμετροι ιονόσφαιρας και τροπόσφαιρας
- εκτιμήσεις συστηματικών μεροληπτικών σφαλμάτων (biases)

Τα προϊόντα αυτά με την σειρά τους αρχειοθετούνται στα παγκόσμια κέντρα δεδομένων, όπου δημιουργούνται αντίγραφα ασφαλείας τους και διανέμονται μεταξύ των παγκόσμιων κέντρων δεδομένων για την εξασφάλιση εξισορρόπησης.

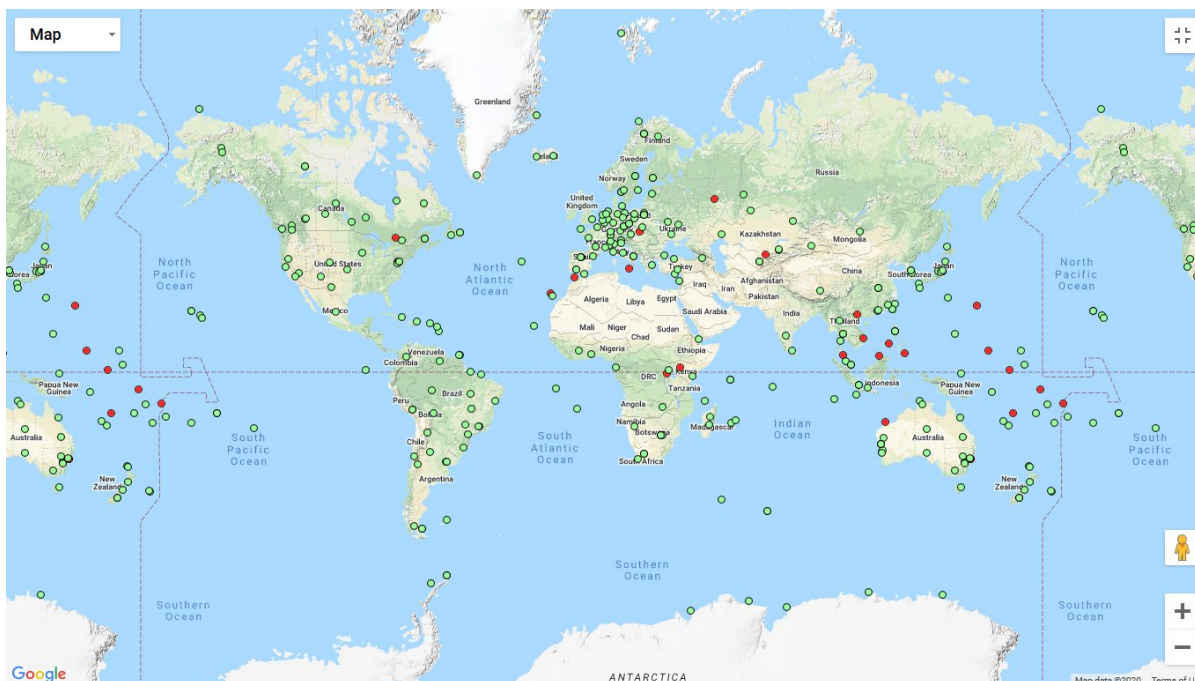
Τέλος η υπηρεσία IGS απαρτίζεται από διάφορες ομάδες (Working Groups, WG), σκοπός των οποίων είναι η τεχνική υποστήριξη και εξειδίκευση σε συγκεκριμένα πεδία για την προώθηση της αναπαραγωγής των προϊόντων IGS και την καθιέρωση νέων δεδομένων και προτύπων επεξεργασίας. Ανάμεσα σε αυτές τις ομάδες συμπεριλαμβάνεται και η ομάδα Multi-GNSS Working Group (MGWG), η οποία σχηματίστηκε από την υπηρεσία IGS λόγω της μοντεροποίησης των υφιστάμενων σχηματισμών και την ανάδυση των νέων σχηματισμών και πολλαπλών σημάτων GNSS. Τα πλεονεκτήματα από την χρήση πολλαπλών συστημάτων και σημάτων GNSS είναι (Teunissen & Montenbruck, 2017):

1. η χρήση εφαρμογών GNSS σε μη επιθυμητό περιβάλλον (πχ πόλεις) λόγω των πολλαπλών σημάτων
2. η αύξηση της ακεραιότητας έναντι παρεμβολών λόγω των αυξανόμενων ζωνών συχνότητας
3. ανεξαρτητοποίηση από ένα μόνο δορυφορικό σύστημα
4. η γρηγορότερη απόκτηση των ασαφειών φάσης στην διαδικασία της επίλυσης
5. η βελτίωση της ακρίβειας προσδιορισμού θέσης

Κύρια δραστηριότητα της MGWG αποτελεί η ίδρυση ενός δικτύου σταθμών, ο χαρακτηρισμός του τμήματος διαστήματος και των εξοπλισμών των χρηστών, η παραγωγή προϊόντων GNSS από την επεξεργασία των νέων σημάτων μέσω των προσαρμοσμένων κέντρων ανάλυσης και η συνεργασία με τις υπόλοιπες ομάδες WG της υπηρεσίας IGS. Για την επίτευξη των στόχων αυτών της οντότητας MGWG τον Φεβρουάριο του 2012 δημιουργήθηκε η υπηρεσία Multi-GNSS EXperiment (MGEX) και από το 2015 έχουν εδραιωθεί συνολικά 130 σταθμοί παγκοσμίως για την παρακολούθηση και συλλογή των σημάτων GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou και QZSS

(Εικόνα 4). Πλέον η υπηρεσία MGEX ορίζεται ως το IGS Multi-GNSS Pilot Project, διατηρώντας όμως την ονομασία κατατεθέν του.

Ημερήσια αρχεία RINEX3 με διάστημα δειγματοληψίας παρατηρήσεων ανά 30 s αρχειοθετούνται στα κέντρα δεδομένων CDDIS, IGN και BKG για κάθε τύπο παρατήρησης και σχηματισμό. Παράλληλα, αρχειοθετούνται και αρχεία παρατηρήσεων με διάστημα συλλογής παρατηρήσεων ανά 1 s (1 Hz). Στην αρχειοθέτηση αυτή συμβάλουν συνολικά έξι κέντρα ανάλυσης (Πίνακας 7). Τα κέντρα ανάλυσης αυτά παρέχουν προϊόντα χρονομέτρων με ρυθμό δειγματοληψίας ανά 30 s, παραμέτρους προσανατολισμού της Γη, εκτιμώμενες συντεταγμένες σταθμών, καθώς και συνδυασμό εκπεμπόμενων εφημερίδων inter system biases και differential code biases για πολλαπλά GNSS.



Εικόνα 4. Δίκτυο σταθμών MGEX (<http://www.igs.org/network>)

Πίνακας 7. Κέντρα ανάλυσης MGEX (*Teunissen & Montenbruck, 2017*)

Ίδρυμα	Σχηματισμοί
CNES/CLS, Γαλλία	GPS+GLO+GAL
CODE, Ελβετία	GPS+GLO+BDS+GAL+QZS
GFZ, Γερμανία	GPS+GLO+BDS+GAL+QZS
JAXA, Ιαπωνία	GPS+QZS
TUM, Γερμανία	GAL+QZS
Wuhan Univ., Κίνα	GPS+GLO+BDS+GAL+QZS

Κεφάλαιο 2

2.1 Βασικές παρατηρήσεις GNSS

Η βασική μέτρηση που πραγματοποιεί ένας δέκτης GNSS είναι η ο χρόνος διάδοσης του σήματος από την στιγμή εκπομπής του από τον δορυφόρο, έως την στιγμή λήψης του από τον δέκτη. Συγκεκριμένα, στον βρόχο παρακολούθησης του δέκτη (Delay Lock Loop, DLL) παράγεται ένα αντίγραφο του κώδικα του σήματος, το οποίο στην συνέχεια ταυτίζεται με το πρωτότυπο που έρχεται από τον δορυφόρο. Επειδή όμως το σήμα χρειάζεται περίπου 70 με 90 ms για να φτάσει από τον δέκτη στον δορυφόρο, τότε αυτό την στιγμή της λήψης του δεν θα ταυτίζεται με το αντίγραφο που παράγει ο δέκτης. Συνεπώς, ο δέκτης καθυστερεί το αντίγραφο που δημιουργεί, ώστε κάθε ψηφίο του αντιγράφου να παράγεται την ίδια στιγμή που λαμβάνεται το πρωτότυπο.

Η καθυστέρηση αυτή, που αποτελεί και τον φαινομενικό χρόνο διάδοσης του σήματος, απαρτίζεται από το σύνολο των ψηφίων (bits) που χρειάστηκαν για την ταύτιση του πρωτότυπου με το αντίγραφο, συν ένα ακέραιο σύνολο επαναλήψεων κώδικα. Για παράδειγμα, ο κώδικας C/A που εκπέμπεται από τους δορυφόρους του συστήματος GNSS, ο οποίος αποτελεί μία ακολουθία 1023 ψηφίων με επαναληπτικότητα 1.023 MHz. Αυτό σημαίνει ότι επαναλαμβάνεται κάθε 1 ms και στο χρονικό διάστημα των 70-90 ms έχει μεταδοθεί 70 με 90 φορές περίπου. Συνεπώς, η ταύτιση του εισερχόμενου C/A κώδικα και του αντιγράφου πραγματοποιείται σε ένα τμήμα του 1 ms. Αν στο τμήμα αυτό συμπεριληφθεί ο συνολικός ακέραιος αριθμός επαναλήψεων του κώδικα και η πληροφορία για τον χρόνο εκπομπής του σήματος από τον δορυφόρο στο μήνυμα πλοήγησης (navigation message), προκύπτει ο φαινομενικός χρόνος διάδοσης του σήματος ή αν πολλαπλασιαστεί με την ταχύτητα του φωτός η ψευδοαπόσταση δορυφόρου-δέκτη. Η απόσταση αυτή ονομάζεται ψευδοαπόσταση λόγω σφαλμάτων των χρονομέτρων των δορυφόρων και δεκτών ως προς τον χρόνο του συστήματος GNSS, καθυστερήσεων στην ατμόσφαιρα κτλ. και η ακρίβεια μέτρησης της από τον δέκτη εξαρτάται από το μήκος του ψηφίου του κώδικα (για των κώδικα C/A είναι 30 cm έως 3 m).

Εκτός από την παρατήρηση κώδικα, ο δέκτης μπορεί να μετρήσει την διαφορά φάσης μεταξύ του φορέα του εισερχόμενου σήματος και του αντιγράφου που παράγεται από τον βρόχο παρακολούθησης της φάσης (Phase Lock Loop, PLL). Η διαφορά φάσης αυτή είναι η μετατόπιση της φάσης του αντιγράφου, ώστε αυτό να ταυτιστεί με την φάση του φέροντος και αντιστοιχεί σε ένα κλασματικό τμήμα ενός κύκλου (0 έως 360°). Στην συνέχεια ο δέκτης μετράει τον συνολικό αριθμό των ακέραιων κύκλων που μεσολαβούν. Όμως, δεν γνωρίζει πόσοι ακέραιοι κύκλοι έχουν παρέλθει από την πρώτη στιγμή παρακολούθησης του σήματος έως την ταύτιση του με το αντίγραφο του, γιατί το φέρον σήμα δεν μεταφέρει πληροφορία χρόνου όπως ο κώδικας. Τέλος, η ακρίβεια της μέτρησης φάσης είναι δύο τάξης καλύτερη από την ακρίβεια μέτρησης κώδικα.

2.1.1 Παρατήρηση Ψευδοαπόστασης

Η πλήρης μορφή της παρατήρησης ψευδοαπόστασης για ένα σύστημα GNSS T, την χρονική στιγμή t , στο σύστημα χρόνου GNSS, για μία συχνότητα $j=1, \dots, f_s$ δίνεται από την σχέση (Teunissen & Montenbruck, 2017)

$$P_{r,j}^s(t) = \rho_r^s(t, t - \tau_r^s) + c \left(dt_r(t) + d_{r,j}^T(t) + \Delta d_{r,j}^s(t) \right) \quad 2.1$$

$$-c \left(dt^s(t - \tau_r^s) - d_j^s(t - \tau_r^s) \right) + T_r^s(t) + \mu_j^T I_{r,1}^s(t) + e_{r,j}^s(t)$$

όπου

r : ο δείκτης που εκφράζει τον δέκτη

s : ο δείκτης που εκφράζει τον δορυφόρο

T : ο δείκτης που εκφράζει το δορυφορικό σύστημα GPS (G), GLONASS (R), Galileo (E), BeiDou (C), QZSS (J) ή IRNSS (I) σύμφωνα με την τυποποίηση RINEX

$P_{r,j}^s$: η παρατήρηση ψευδοαπόστασης (m)

ρ_r^s : η γεωμετρική απόσταση μεταξύ δέκτη-δορυφόρου (m)

τ_r^s : ο χρόνος διάδοσης του σήματος (s)

T_r^s : η τροποσφαιρική καθυστέρηση (m)

c : η ταχύτητα του φωτός (m/s)

dt_r : το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη (s)

dt^s : το σφάλμα του χρονομέτρου του δορυφόρου (s)

$d_{r,j}^T$: το bias hardware κώδικα του δέκτη (s)

$\Delta d_{r,j}^s$: το bias κώδικα μεταξύ των καναλιών (interchannel) (s)

d_j^s : το bias hardware κώδικα του δορυφόρου (s)

$I_{r,1}^s$: η ιονοσφαιρική καθυστέρηση στην συχνότητα $j = 1$ (m)

$\mu_j^T = \left(\frac{f_1^T}{f_j^T} \right)^2$: η ιονοσφαιρική παράμετρος απεικόνισης, εξαρτώμενη από την συχνότητα

$e_{r,j}^s$: ο τυχαίος θόρυβος του κώδικα και της πολυανάκλασης (m)

Στην σχέση 2.1 δεν έχουν συμπεριληφθεί για λόγους απλότητας η σχετικιστική επίπτωση λόγω καμπυλότητας του χωροχρόνου δt_{stc}^{rel} , η σχετικιστική επίδραση δt_{clk}^{rel} , η επίδραση Sagnac, οι εκκεντρότητες των κέντρων φάσης της κεραίας του δέκτη και του δορυφόρου $\xi_{r,j}^s$ και η επίδραση phase-wind up. Η περιγραφή τους και ο τρόπος αντιμετώπισής τους περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.2 .

2.1.2 Παρατήρηση Φάσης

Η πλήρης μορφή της παρατήρησης φάσης για ένα σύστημα GNSS T , την χρονική στιγμή t , στο σύστημα χρόνου GNSS, για μία συχνότητα $j=1, \dots, f_s$ δίνεται από την σχέση (Teunissen & Montenbruck, 2017)

$$\begin{aligned}
\Phi_{r,j}^s(t) = & \rho_r^s(t, t - \tau_r^s) + c \left(dt_r(t) + b_{r,j}^T(t) + \Delta b_{r,j}^s(t) \right) \\
& - c \left(dt^s(t - \tau_r^s) - b_j^s(t - \tau_r^s) \right) - \mu_j^T I_{r,1}^s(t) + T_r^s(t) + \lambda_j^T (N_{r,j}^s) \\
& + \varepsilon_{r,j}^s(t)
\end{aligned} \tag{2.2}$$

όπου

r : ο δείκτης που εκφράζει τον δέκτη

s : ο δείκτης που εκφράζει τον δορυφόρο

T : ο δείκτης που εκφράζει το δορυφορικό σύστημα GPS (G), GLONASS (R), Galileo (E), BeiDou (C), QZSS (J) ή IRNSS (I) σύμφωνα με την τυποποίηση RINEX

$\Phi_{r,j}^s$: η παρατήρηση φάσης (m)

ρ_r^s : η γεωμετρική απόσταση μεταξύ δέκτη-δορυφόρου (m)

τ_r^s : ο χρόνος διάδοσης του σήματος (s)

T_r^s : η τροποσφαιρική καθυστέρηση (m)

c : η ταχύτητα του φωτός (m/s)

dt_r : το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη (s)

$b_{r,j}^T$: το bias hardware φάσης του δέκτη (s)

$\Delta b_{r,j}^s$: το bias φάσης μεταξύ των καναλιών (interchannel) (s)

b_j^s : το bias hardware φάσης του δορυφόρου (s)

$I_{r,1}^s$: η ιονοσφαιρική καθυστέρηση στην συχνότητα $j = 1$ (m)

λ_j^T : το μήκος κύματος (m)

$\mu_j^T = \left(\frac{f_1^T}{f_j^T} \right)^2$: η ιονοσφαιρική παράμετρος απεικόνισης, εξαρτώμενη από την συχνότητα

$N_{r,j}^s$: η ακέραια ασάφεια φάσης (κύκλοι)

$\varepsilon_{r,j}^s$: ο τυχαίος θόρυβος της φέρουσας φάσης και πολυανάκλασης (m)

Όπως και στην εξίσωση της ψευδοαπόστασης, επιπλέον σφάλματα που δεν συμπεριλαμβάνονται στην σχέση 2.2 αναλύονται στο Κεφάλαιο 3.2 .

2.1.3 Γραμμικοποιημένες σχέσεις ψευδοαπόστασης και φάσης

Οι σχέσεις ψευδοαπόστασης (2.1) και φάσης (2.2) δεν είναι γραμμικές ως προς την πραγματική απόσταση δορυφόρου δέκτη $\rho_r^s(t, t - \tau_r^s)$, η οποία ορίζεται ως (Teunissen & Montenbruck, 2017)

$$\begin{aligned}\rho_r^s(t, t - \tau_r^s) &= \|\mathbf{x}^s(t - \tau_r^s) - \mathbf{x}_r(t)\| \\ &= \|\mathbf{x}^s[t_r(t) - dt_r(t) - \tau_r^s] - \mathbf{x}_r[t_r(t) - dt_r(t)]\|\end{aligned}\quad 2.3$$

με,

$$\mathbf{x}_r = [X_r, Y_r, Z_r]$$

$$\mathbf{x}^s = [X^s, Y^s, Z^s]$$

όπου

$\mathbf{x}_r$: το διάνυσμα θέσης του δέκτη

$\mathbf{x}^s$: το διάνυσμα θέσης του δορυφόρου

$\|\cdot\| = \sqrt{(\cdot)^T(\cdot)}$: η νόρμα του διανύσματος, με $(\cdot)^T$ να εκφράζει τον ανάστροφο

Οι γραμμικές σχέσεις προκύπτουν παραγωγίζοντας (θεώρημα Taylor) το διάνυσμα θέσης και την αποχή του χρονόμετρου του δέκτη ως προς τον χρόνο t του συστήματος GNSS

$$\begin{aligned}\rho_r^s(t, t - \tau) &\doteq \rho_r^s(t, t - \tau)|_0 + \Delta\rho_r^s(t, t - \tau_r^s) \\ &= \rho_r^s(t, t - \tau)|_0 - [\mathbf{u}_{r,0}^s(t)]^T \Delta\mathbf{x}_r(t) - \dot{\rho}_{r,0}^s(t) \Delta dt_r(t)\end{aligned}\quad 2.4$$

με

$$\begin{aligned}-\mathbf{u}_{r,0}^s(t) &= \partial\mathbf{x}_r(t) \rho_r^s(t, t - \tau)|_0 = -\frac{[\mathbf{x}^s(t-\tau) - \mathbf{x}_{r,0}(t)]}{\|\mathbf{x}^s(t-\tau) - \mathbf{x}_{r,0}(t)\|}, \\ -\dot{\rho}_{r,0}^s(t) &= \partial dt_r(t) \rho_r^s(t, t - \tau)|_0 = \frac{\partial\rho(t, t - \tau_r^s)}{\partial t} \bigg|_0 \frac{\partial t}{\partial dt_r(t)} \bigg|_0 = -\frac{\partial\rho(t, t - \tau)}{\partial t} \bigg|_0\end{aligned}$$

όπου

$\Delta\rho_r^s$: η αυξητική παράμετρος της απόστασης δέκτη-δορυφόρου

$\mathbf{u}_{r,0}^s$: το μοναδιαίο διάνυσμα μεταξύ δέκτη και δορυφόρου

$\dot{\rho}_{r,0}^s$: ο ρυθμός μεταβολής της απόστασης δέκτη δορυφόρου ως προς τον χρόνο t του συστήματος GNSS

$\Delta(\cdot) = (\cdot) - (\cdot)|_0$: εκφράζει την αυξανόμενη παράμετρο, όπου $(\cdot)$ δηλώνει την πραγματική παράμετρο, ενώ $(\cdot)|_0$ την προσεγγιστική τιμή

Στην προκειμένη περίπτωση το διάνυσμα θέσης του δορυφόρου θεωρείται γνωστό, είτε από το μήνυμα πλοήγησης, είτε από τα προϊόντα ακριβών τροχιών των δορυφόρων που παρέχονται από τα διάφορα κέντρα δεδομένων. Για αυτόν τον λόγω η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου δέκτη δεν γραμμικοποιείται ως προς το διάνυσμα θέσης του δορυφόρου. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη την σχέση 2.4 και θεωρώντας ότι ο ρυθμός μεταβολής της απόστασης δέκτη δορυφόρου είναι

πολύ μικρός σε σχέση με την ταχύτητα του φωτός, οι γραμμικοποιημένες σχέσεις κώδικα και φάσης διαμορφώνονται ως εξής

$$\begin{aligned}\Delta P_{r,j}^s(t) = & -\mathbf{u}_r^s(t)\Delta\mathbf{x}_r(t) + c(\Delta dt_r(t) - \Delta dt^s(t - \tau_r^s)) + \mu_j^T \Delta I_{r,1}^s(t) \\ & + \Delta T_r^s(t) + c(\Delta d_{r,j}^T(t) + \Delta \Delta d_{r,j}^s(t) + \Delta d_j^s(t - \tau_r^s)) + e_{r,j}^{s,T}(t)\end{aligned}\quad 2.5$$

$$\begin{aligned}\Delta \Phi_{r,j}^s(t) = & -\mathbf{u}_r^s(t)\Delta\mathbf{x}_r(t) + c(\Delta dt_r(t) - \Delta dt^s(t - \tau_r^s)) - \mu_j^T \Delta I_{r,1}^s(t) \\ & + \Delta T_r^s(t) + \lambda_j \Delta N_{r,1}^s(t) + c(\Delta b_{r,j}^T(t) + \Delta \Delta b_{r,j}^s(t) + \Delta b_j^s(t - \tau_r^s)) \\ & + \varepsilon_{r,j}^{s,T}(t)\end{aligned}\quad 2.6$$

Στην βιβλιογραφία συνήθως το $\Delta(\cdot)$ δεν συμπεριλαμβάνεται στο δεξί σκέλος των γραμμικοποιημένων εξισώσεων φάσης και κώδικα όταν το μοντέλο επιλύεται με την επαναληπτική μέθοδο Gauss-Newton. Παράλληλα, κάτι που πρέπει να επισημανθεί είναι ότι τα biases κώδικα και φάσης του δορυφόρου στις γραμμικοποιημένες εξισώσεις ή μη των Teunissen και Montenbruck (2017) συμπεριλαμβάνονται με θετικό πρόσημο, ώστε να υπάρχει συνοχή με την σύμβαση που έχει υιοθετηθεί από την IGS, ενώ σε άλλα άρθρα της διεθνούς βιβλιογραφίας αυτά συμπεριλαμβάνονται με αρνητικό πρόσημο (Zhou, et al., 2018), πράγμα που οφείλεται στο πώς ο συγγραφέας ή οι συγγραφείς διαμορφώνουν κάθε φορά τις εξισώσεις των παρατηρήσεων κώδικα και φάσης.

Κεφάλαιο 3

3.1 Precise Point Positioning

Ο απόλυτος ακριβής εντοπισμός (Precise Point Positioning, PPP) είναι η μέθοδος στην οποία ο χρήστης με έναν μόνον δέκτη μπορεί να προσδιορίσει την θέση του σε παγκόσμιο επίπεδο με ακρίβεια μερικών εκατοστών χρησιμοποιώντας τις παρατηρήσεις ψευδοαπόστασης και φάσης. Βασική προϋπόθεση στην μέθοδο PPP είναι η εφαρμογή των προϊόντων χρόνου και τροχιών υψηλής ακρίβειας που παράγονται από ένα δίκτυο σταθμών GNSS για τους δορυφόρους. Έτσι, ο χρήστης χρησιμοποιώντας έναν δέκτη GNSS μίας ή δύο συχνοτήτων μπορεί να επιτύχει ακρίβεια δεκατόμετρων έως μερικών εκατοστών.

Τα προϊόντα τροχιών και χρονομέτρων υψηλής ακρίβειας για τους δορυφόρους παράγονται χρησιμοποιώντας τον γραμμικό συνδυασμό ελευθέρας ιονόσφαιρας (Κεφάλαιο 4.6.2) με την ιδιότητα το σφάλμα του ρολογιού του δορυφόρου να απορροφά τις μη καλιμπραρισμένες καθυστερήσεις του κώδικα στην πρώτη και στην δεύτερη συχνότητα (ή τις καθυστερήσεις hardware κώδικα) (σχέση 2.7).

$$dt_{IF_{12}}^{s,T} = dt^{s,T} + \alpha_{12}^T \cdot d_1^{s,T} + \beta_{12}^T \cdot d_2^{s,T} = dt^{s,T} + d_{IF_{12}}^{s,T} \quad 3.1$$

με

$$a_{mn}^T = \frac{(f_m^{s,T})^2}{(f_m^{s,T})^2 - (f_n^{s,T})^2}$$
$$\beta_{mn}^T = -\frac{(f_n^{s,T})^2}{(f_m^{s,T})^2 - (f_n^{s,T})^2}$$

όπου

$m, n = 1, 2; m \neq n$: οι δείκτες των συχνοτήτων

s : ο δείκτης που εκφράζει τον δορυφόρο

T : δείκτης που εκφράζει το δορυφορικό σύστημα GPS(G), GLONASS(R), Galileo(E), BeiDou(C), QZSS(J) ή IRNSS(I) σύμφωνα με την τυποποίηση RINEX

$d_{IF_{12}}^{s,T}$: το bias hardware του γραμμικού συνδυασμού ελευθέρας ιονόσφαιρας

a_{mn}^T, β_{mn}^T : παράμετροι εξαρτώμενοι από την συχνότητα

Συγκεκριμένα, η σχέση 3.1 εκφράζει ότι στον γραμμικό συνδυασμό ελευθέρας ιονόσφαιρας πρέπει να οριστεί ένας νέος χρόνος που να έχει σημασία ως προς την νέα παρατήρηση, λαμβάνοντας υπόψη ο σταθμισμένος μέσος των καθυστερήσεων του hardware του δορυφόρου.

Αν στην σχέση 3.1 προστεθεί κατά μέλη η καθυστέρηση hardware κώδικα $d_1^{s,T}$ προκύπτει ότι (Sanz Subirana, et al., 2013)

$$\begin{aligned}
dt_{IF_{12}}^{s,T} &= dt^{s,T} + d_{IF_{12}}^{s,T} \Rightarrow dt_{IF_{12}}^{s,T} = dt^{s,T} + d_{IF_{12}}^{s,T} + d_1^{s,T} - d_1^{s,T} \Rightarrow \\
dt_{IF_{12}}^{s,T} &= dt^{s,T} + \alpha_{12}^T \cdot d_1^{s,T} + \beta_{12}^T \cdot d_2^{s,T} + d_1^{s,T} - d_1^{s,T} \Rightarrow \\
dt_{IF_{12}}^{s,T} &= dt^{s,T} + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} d_1^{s,T} - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} d_2^{s,T} + d_1^{s,T} - \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} d_1^{s,T} \Rightarrow \\
dt_{IF_{12}}^{s,T} &= dt^{s,T} + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (d_1^{s,T} - d_2^{s,T}) + d_1^{s,T} \Rightarrow \\
dt_{IF_{12}}^{s,T} &= dt^{s,T} - \beta_{12}^T \cdot DCB_{P_1 P_2}^{s,T} + d_1^{s,T} \tag{3.2}
\end{aligned}$$

όπου

$DCB_{P_1 P_2}^{s,T}$: διαφορά των hardware biases του δορυφόρου πάνω στις παρατηρήσεις κώδικα δύο συχνοτήτων

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία και για το bias κώδικα $d_2^{s,T}$ προκύπτει η σχέση

$$dt_{IF_{12}}^{s,T} = dt^{s,T} + \alpha_{12}^T \cdot DCB_{P_1 P_2}^{s,T} + d_2^{s,T} \tag{3.3}$$

Τέλος, αντικαθιστώντας τις σχέσεις 3.2 και 3.3 στις γραμμικοποιημένες σχέσεις των παρατηρήσεων κώδικα και φάσης και εφαρμόζοντας τα προϊόντα χρονομέτρων και τροχιών των δορυφόρων, αυτές διαμορφώνονται ως εξής (Zhou, et al., 2018)

$$\begin{cases} p_{r,1}^{s,T} = \mathbf{u}_r^{s,T} \cdot \mathbf{x} + dt_r + d_{r,1}^{s,T} + M_w \cdot Z_w + I_{r,1}^{s,T} - \beta_{12}^T \cdot DCB_{P_1 P_2}^{s,T} + e_{r,1}^{s,T} \\ p_{r,2}^{s,T} = \mathbf{u}_r^{s,T} \cdot \mathbf{x} + dt_r + d_{r,2}^{s,T} + M_w \cdot Z_w + \mu_2^T \cdot I_{r,1}^{s,T} + \alpha_{12}^T \cdot DCB_{P_1 P_2}^{s,T} + e_{r,2}^{s,T} \end{cases} \tag{3.4}$$

$$\begin{cases} \phi_{r,1}^{s,T} = \mathbf{u}_r^{s,T} \cdot \mathbf{x} + dt_r + M_w \cdot Z_w - I_{r,1}^{s,T} + d_{IF_{12}}^{s,T} + \lambda_1^{s,T} \cdot (N_{r,1}^{s,T} + b_{r,1}^{s,T} - b_1^{s,T}) + \varepsilon_{r,1}^{s,T} \\ \phi_{r,2}^{s,T} = \mathbf{u}_r^{s,T} \cdot \mathbf{x} + dt_r + M_w \cdot Z_w - \mu_2^T \cdot I_{r,1}^{s,T} + d_{IF_{12}}^{s,T} + \lambda_2^{s,T} \cdot (N_{r,2}^{s,T} + b_{r,2}^{s,T} - b_2^{s,T}) + \varepsilon_{r,2}^{s,T} \end{cases} \tag{3.5}$$

όπου

M_w και Z_w : εκφράζουν την υγρή συνάρτηση απεικόνισης και την υγρή τροποσφαιρική καθυστέρηση στο ζενίθ αντίστοιχα (Κεφάλαιο 3.2.7)

Όλες οι παραπάνω παράμετροι εκφράζονται σε μέτρα εκτός από τις παραμέτρους $N_{r,j}^{s,T}$, $b_{r,j}^{s,T}$ και $b_j^{s,T}$ που εκφράζονται σε κύκλους.

3.1.1 Μοντέλο αδιαφοροποιήτων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων μίας συχνότητας

Σε μία συχνότητα το μοντέλο PPP για αδιαφοροποιήτες και ασυσχέτιστες παρατηρήσεις κώδικα και φάσης διαμορφώνεται ως εξής

$$\begin{bmatrix} P_{r,1}^{1,T} \\ \Phi_{r,1}^{1,T} \\ \vdots \\ P_{r,1}^{m,T} \\ \Phi_{r,1}^{m,T} \end{bmatrix} = [-\mathbf{u}_r \quad \mathbf{1} \quad \mathbf{M}_W \quad \mathbf{K} \quad \mathbf{R}_1] \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ d\bar{t}_r^T \\ Z_W \\ I_{r,1}^T \\ \bar{\mathbf{N}}_{r,1}^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{r,1}^T \\ \mathbf{e}_{r,1}^T \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_L \quad 3.6$$

με

$$\begin{cases} d\bar{t}_r^T = dt_r + d_{r,1}^T \\ \bar{\mathbf{N}}_{r,1}^{s,T} = \lambda_1^T \cdot (\mathbf{N}_{r,1}^{s,T} + b_{r,1}^{s,T} - b_1^{s,T}) + d_{IF_{12}}^{s,T} - d_{r,1}^T \end{cases}$$

όπου

1: το διάνυσμα 2xm γραμμών και μίας στήλης, στο οποίο κάθε στοιχείο είναι 1 και αντιστοιχούν στην αποχή του χρονομέτρου του δέκτη $d\bar{t}_r^T$

K: ο πίνακας όπου οι τιμές που λαμβάνει είναι 1 και -1 για την αντίστοιχη παρατήρηση ψευδοαπόστασης $P_{r,1}^{s,T}$ και παρατήρηση φάσης $\Phi_{r,1}^{s,T}$

R₁: ο πίνακας που αντιστοιχεί στις ασάφειες φάσης και οι τιμές που λαμβάνει είναι 0 και 1 για τις παρατηρήσεις ψευδοαπόστασης και τις παρατηρήσεις φάσης αντίστοιχα

Q_L: εκφράζει το στοχαστικό μοντέλο των παρατηρούμενων-μείον-υπολογισμένων παρατηρήσεων

Στην παραπάνω παραμετροποίηση το bias κώδικα λόγω hardware του δέκτη απορροφάται από την αποχή του χρονομέτρου του δέκτη. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν δεδομένα ιονοσφαιρικής καθυστέρησης ως περιορισμός, το μαθηματικό μοντέλο PPP διαμορφώνεται ως εξής

$$\begin{bmatrix} P_{r,1}^{1,T} \\ \Phi_{r,1}^{1,T} \\ \vdots \\ P_{r,1}^{m,T} \\ \Phi_{r,1}^{m,T} \\ \tilde{I}_{r,1}^{1,T} \\ \tilde{I}_{r,1}^{m,T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{u}_r & \mathbf{1} & \mathbf{M}_W & \mathbf{K} & \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ d\bar{t}_r^T \\ Z_W \\ I_{r,1}^T \\ \bar{\mathbf{N}}_{r,1}^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{r,1}^{s,T} \\ \mathbf{e}_{r,1}^{s,T} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{r,ion}^{s,T} \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_L, \mathbf{Q}_I \quad 3.7$$

όπου

$\tilde{I}_{r,1}^{s,T}$: ιονοσφαιρική καθυστέρηση στην συχνότητα L1 προερχόμενη από εξωτερικά προϊόντα ιονόσφαιρας

$\boldsymbol{\varepsilon}_{r,ion}^{s,T}$: ο θόρυβος της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης προερχόμενης από εξωτερικά προϊόντα ιονόσφαιρας

O: ο μηδενικός πίνακας

Q_I : το στοχαστικό μοντέλο των εικονικών ιονοσφαιρικών καθυστερήσεων

3.1.2 Μοντέλο αδιαφοροποιήτων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων δύο συχνοτήτων

Για δύο συχνοτήτες το μοντέλο PPP διαμορφώνεται ως εξής

$$\begin{bmatrix} p_{r,1}^{1,T} \\ \Phi_{r,1}^{1,T} \\ \vdots \\ p_{r,2}^{m,T} \\ \Phi_{r,2}^{m,T} \end{bmatrix} = [-\mathbf{u}_r \quad \mathbf{1} \quad \mathbf{M}_W \quad \mathbf{K} \quad \mathbf{R}_1 \quad \mathbf{R}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ d\bar{\mathbf{t}}_r^T \\ Z_W \\ \bar{\mathbf{I}}_{r,1}^T \\ \bar{\mathbf{N}}_{r,1}^T \\ \bar{\mathbf{N}}_{r,2}^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{r,1}^T \\ \mathbf{e}_{r,1}^T \end{bmatrix}, Q_L \quad 3.8$$

με

$$\begin{cases} d\bar{\mathbf{t}}_r^T = dt_r + d_{r,IF_{12}}^T \\ \bar{\mathbf{I}}_{r,1}^{s,T} = I_{r,1}^{s,T} + \beta_{12}^T \cdot (DCB_{r,P_1P_2}^T - DCB_{P_1P_2}^{s,T}) \\ \bar{\mathbf{N}}_{r,1}^{s,T} = \lambda_1^T \cdot (N_{r,1}^{s,T} + b_{r,1}^{s,T} - b_1^{s,T}) + d_{IF_{12}}^{s,T} - d_{r,IF_{12}}^{s,T} + \beta_{12}^T \cdot (DCB_{r,P_1P_2}^T - DCB_{P_1P_2}^{s,T}) \\ \bar{\mathbf{N}}_{r,2}^{s,T} = \lambda_2^T \cdot (N_{r,2}^{s,T} + b_{r,2}^{s,T} - b_2^{s,T}) + d_{IF_{12}}^{s,T} - d_{r,IF_{12}}^{s,T} + \mu_2^T \cdot \beta_{12}^T \cdot (DCB_{r,P_1P_2}^T - DCB_{P_1P_2}^{s,T}) \end{cases}$$

όπου

$\mathbf{R}_2$: ο πίνακας που αντιστοιχεί στις παραμέτρους της ασάφειας φάσης $\bar{\mathbf{N}}_{r,2}^{s,T}$. Οι τιμές που λαμβάνει είναι 0 και 1 για τις παρατηρήσεις ψευδοαπόστασης και τις παρατηρήσεις φάσης αντίστοιχα

$DCB_{r,P_1P_2}^T$: διαφορά των hardware biases του δέκτη πάνω στις παρατηρήσεις κώδικα δύο συχνοτήτων

Στην παραμετροποίηση του μοντέλου PPP για παρατηρήσεις σε δύο συχνοτήτες το bias hardware κώδικα του δέκτη απορροφάται από το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη και από την ιονοσφαιρική καθυστέρηση. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί περιορισμός ιονόσφαιρας το μοντέλο PPP για παρατηρήσεις σε δύο συχνοτήτες διαμορφώνεται ως εξής

$$\begin{bmatrix} p_{r,1}^{1,T} \\ \Phi_{r,1}^{1,T} \\ \vdots \\ p_{r,2}^{m,T} \\ \Phi_{r,2}^{m,T} \\ \tilde{I}_{r,1}^{1,T} \\ \vdots \\ \tilde{I}_{r,1}^{m,T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{u}_r & \mathbf{1} & \mathbf{J} & \mathbf{M}_W & \mathbf{K} & \mathbf{R}_1 & \mathbf{R}_2 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ d\bar{\mathbf{t}}_r^T \\ DCB_{r,P_1,P_2}^T \\ Z_W \\ \bar{\mathbf{I}}_{r,1}^T \\ \bar{\mathbf{N}}_{r,1}^T \\ \bar{\mathbf{N}}_{r,2}^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{r,1}^T \\ \mathbf{e}_{r,1}^T \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{r,ion}^T \end{bmatrix}, Q_L, Q_I \quad 3.9$$

με

$$\begin{cases} \bar{N}_{r,1}^{s,T} = \lambda_1^T \cdot (N_{r,1}^{s,T} + b_{r,1}^{s,T} - b_1^{s,T}) + d_{IF_{12}}^{s,T} - d_{r,IF_{12}}^{s,T} \\ \bar{N}_{r,2}^{s,T} = \lambda_2^T \cdot (N_{r,2}^{s,T} + b_{r,2}^{s,T} - b_2^{s,T}) + d_{IF_{12}}^{s,T} - d_{r,IF_{12}}^{s,T} \end{cases}$$

όπου

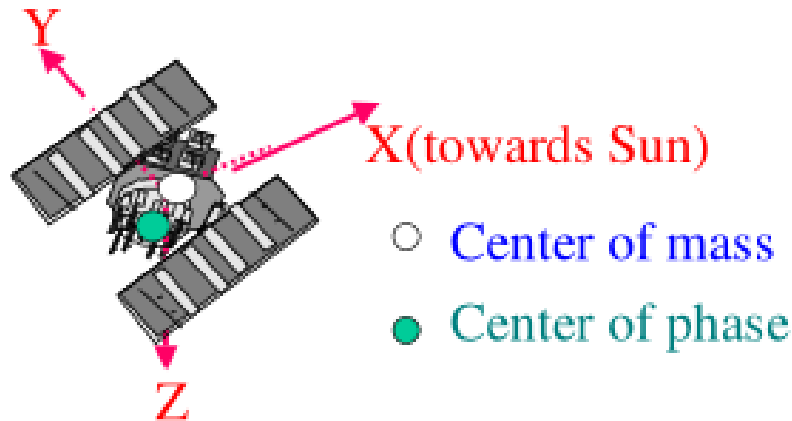
J : ο πίνακας που εμπεριέχει τους συντελεστές των εκτιμώμενων DCB_{r,P_1,P_2}^T . Οι τιμές αυτές είναι ο συντελεστής β_{12}^T για την παρατήρηση κώδικα στην πρώτη συχνότητα $P_{r,1}^{s,S}$ και ο συντελεστής α_{12}^T για την παρατήρηση κώδικα $P_{r,2}^{s,S}$ στην δεύτερη συχνότητα.

3.2 Πηγές Σφαλμάτων

Εκτός από τις διορθώσεις για το σφάλμα του χρονομέτρου και της τροχιάς του δορυφόρου, πραγματοποιούνται και άλλες διορθώσεις που σχετίζονται με τον δορυφόρο, τον δέκτη, την ατμόσφαιρα, την μετατόπιση της τοποθεσίας και άλλες διορθώσεις ανεξάρτητες από αυτές. Τα σφάλματα αυτά περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια, πλην του ιονοσφαιρικού σφάλματος και των biases. Τα σφάλματα αυτά αναλύονται στα Κεφάλαια 4 και 5 αντίστοιχα.

3.2.1 Εκκεντρότητες του κέντρου φάσης της κεραίας του δορυφόρου

Τα προϊόντα υψηλής ακρίβειας αναφέρονται στο κέντρο μάζας των δορυφόρων, ενώ οι μετρήσεις GNSS μεταξύ των κέντρων φάσης των κεραιών δορυφόρου-δέκτη. Η διαφορά μεταξύ του κέντρου μάζας του δορυφόρου και του κέντρου μάζας του δέκτη ονομάζεται Phase Center Offset (PCO) (Εικόνα 5). Επιπλέον, λόγω των πολλαπλών σημάτων, το κέντρο φάσης της κεραίας του δορυφόρου δεν είναι απόλυτο, προκαλώντας μεταβολές στο κέντρο φάσης της κεραίας (Phase Center Variations, PCV).



Εικόνα 5. Σχηματική αναπαράσταση COM και PCO του δορυφόρου (Kouba & Héroux, 2001)

Τα σφάλματα που εμφανίζονται λόγω PCO και PCV κυμαίνονται από 0.5 έως 3 μέτρα (Πίνακας 8) και από 5 έως 15 χιλιοστά (GPS) αντίστοιχα. Για την αντιμετώπιση των σφαλμάτων αυτών απαιτείται η χρήση αρχείων ANTEX (ANTenna EXchange Format) τα οποία εμπεριέχουν μοτίβα PCO και PCV. Τα αρχεία αυτά αποθηκεύονται και διανέμονται μέσω της υπηρεσίας IGS.

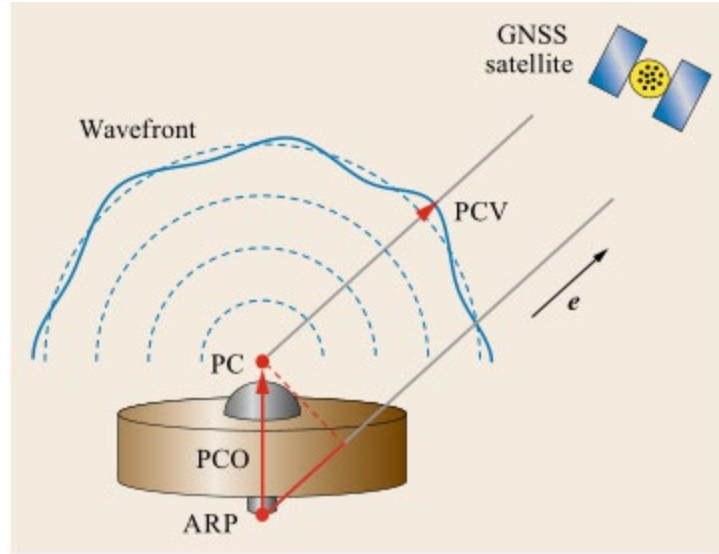
Πίνακας 8. Αντιπροσωπευτικές τιμές των αποχών του κέντρου φάσης της κεραίας από το κέντρο μάζας του δορυφόρου για διάφορους τύπους δορυφόρων του συστήματος GNSS (Teunissen & Montenbruck, 2017)

Σχηματισμός	Τύπος	X(m)	Y(m)	Z(m)
GPS	II/IIA	+0.28	0.00	+2.56
	IIR-A	0.00	0.00	+1.31
	IIR-B/M	0.00	0.00	+0.85
	IIF	+0.39	0.00	+1.60
GLONASS	M	-0.55	0.00	+2.30
	K1	0.00	0.00	+1.76
Galileo	*	-0.20	0.00	+0.60
	**	+0.15	0.00	+1.00
BeiDou-2		+0.60	0.00	+1.10
QZSS	QZS-1	0.00	0.00	+3.20
IRNSS/NavIC		+0.01	0.00	+1.28

* Υπό τροχιακή θεώρηση, **Πλήρη λειτουργική ικανότητα

3.2.2 Εκκεντρότητες του κέντρου φάσης της κεραίας του δέκτη

Το κέντρο φάσης του δέκτη (Phase Center, PC) δεν ταυτίζεται με το κέντρο μάζας της αντένας και ορίζεται ως η αποχή από ένα μηχανικό σημείο πάνω στη αντένα (Antenna Reference Point, ARP). Παράλληλα, προκύπτουν μεταβολές του κέντρου φάσης της κεραίας λόγω ασυμμετριών της αντένας και των υποστηρικτικών δομών που αυτή τοποθετείται, αποτρέποντας έτσι την υπόθεση των σφαιρικών κυμάτων (Εικόνα 6). Τα σφάλματα που εμφανίζονται λόγω PCO και PCV του δέκτη είναι της τάξης των 5-15 εκατοστών και 3 εκατοστών αντίστοιχα . Πληροφορίες για μοτίβα PCO και PCV, όπως και στην περίπτωση των δορυφόρων, αποθηκεύονται και διανέμονται μέσω της μορφής αρχειοθέτησης και διανομής ANTEX που έχει καθιερωθεί από την υπηρεσία IGS.



Εικόνα 6. Σχηματική αναπαράσταση των ARP, PCO και PCV της GNSS κεραίας (Teunissen & Montenbruck, 2017)

3.2.3 Phase wind-up

Ο δορυφόρος κατά την τροχιακή κίνηση του πραγματοποιεί μία περιστροφή για την διατήρηση των ηλιακών πλαισίων του προσανατολισμένα ως προς τον Ήλιο. Η μεταβολή αυτή προκαλεί μία μεταβολή φάσης η οποία αντιλαμβάνεται από τον δέκτη ως μεταβολή στην απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και του δέκτη (Εικόνα 7). Το σφάλμα αυτό ονομάζεται phase wind-up και επηρεάζει μόνο τις παρατηρήσεις φάσης, λόγω της ηλεκτρομαγνητικής φύσης των κυκλικά πολωμένων κυμάτων. Το phase wind-up (σε κύκλους) λαμβάνεται υπόψη από όλα τα κέντρα ανάλυσης και τα παραγόμενα προϊόντα τους, όπως τα προϊόντα τροχιών και χρονομέτρων υψηλής ακρίβειας των δορυφόρων και υπολογίζεται από την σχέση (Sanz Subirana, et al., 2013)

$$\omega = \sin(\gamma) \arccos\left(\frac{\mathbf{d}' \cdot \mathbf{d}}{\|\mathbf{d}'\| \cdot \|\mathbf{d}\|}\right) \quad 3.10$$

με

$$\mathbf{d} = \mathbf{a} - \mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{a}) + \mathbf{k} \times \mathbf{b}$$

$$\mathbf{d}' = \mathbf{a}' - \mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{a}') - \mathbf{k} \times \mathbf{b}'$$

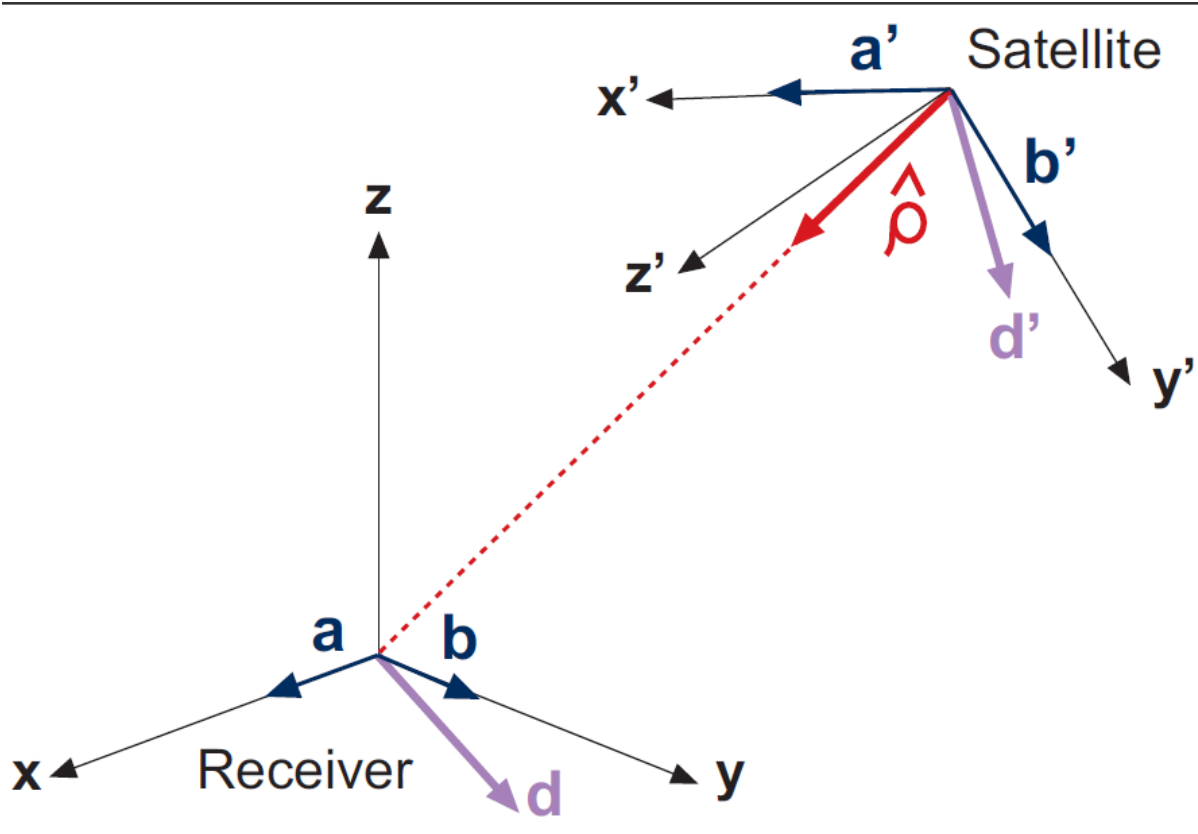
$$\gamma = \mathbf{k} \cdot (\mathbf{d}' \times \mathbf{d})$$

όπου

$\mathbf{d}$: το διάνυσμα θέσης του ταλαντευόμενου ηλεκτρικού διπόλου του δέκτη

$\mathbf{d}'$: το διάνυσμα θέσης του ταλαντευόμενου ηλεκτρικού διπόλου του δορυφόρου

$\mathbf{k}$: το μοναδιαίο διάνυσμα με φορά από τον δορυφόρο στον δέκτη



Εικόνα 7. Διάταξη προσανατολισμού διπόλων για τον υπολογισμό του σφάλματος phase wind-up (Sanz Subirana, et al., 2013)

3.2.4 Παλίρροιες στερεού φλοιού της Γης

Οι μεταβολές λόγω των παλίρροιών του στερεού φλοιού της Γης (solid earth tides) μοντελοποιούνται μέσω σφαιρικών αρμονικών και φυσικών παραμέτρων (αριθμοί Love και Shida) οι οποίοι περιγράφουν την ευαισθησία του στερεού φλοιού της γης στην πιθανότητα δημιουργία παλίρροιας (σχέση 3.11) (Teunissen & Montenbruck, 2017). Οι μεταβολές αυτές αν δεν αντιμετωπιστούν κατάλληλα επιφέρουν σφάλμα της τάξης των 0.4 μέτρων.

$$\Delta \mathbf{x} = \sum_{j=1}^4 \frac{GM_j}{GM_E R_j^3} \left\{ [3I_2(\mathbf{e}_j \cdot \mathbf{e})] \mathbf{e}_j + \left[3 \left(\frac{h_2}{2} - I_2 \right) (\mathbf{e}_j \cdot \mathbf{e})^2 - \frac{h_2}{2} \right] \mathbf{e}_j \right\} + [-0.025 m \sin \varphi \cos \varphi \sin(\theta_g + \lambda)] \mathbf{e} \quad 3.11$$

όπου,

$\mathbf{x}$: το διάνυσμα θέσης του σταθμού

GM_E : η βαρυμετρική σταθερά της γης

GM_S : η βαρυμετρική σταθερά του ήλιου

GM_M : η βαρυμετρική σταθερά της σελήνης

I_2 : ο ονομαστικός αριθμός Love δευτέρου βαθμού

h_2 : ο ονομαστικός αριθμός Shida δευτέρου βαθμού

φ : το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού

λ : το γεωγραφικό μήκος του σταθμού

θ_g : ο μέσος αστρικός χρόνος Greenwich

e_j : το μοναδιαίο γεωκεντρικό διάνυσμα Ηλίου (j=S) και σελήνης (j=M)

e : το μοναδιαίο διάνυσμα του σταθμού

3.2.5 Περιοδική αύξηση της μάζας των ωκεανών

Η περιοδική αύξηση της μάζας των ωκεανών (ocean loading) προκαλείται λόγω των ωκεάνιων παλίρροιών και παραμορφώνει τον φλοιό της Γης. Οι μεταβολές στις τρεις συνιστώσες συντεταγμένων περιγράφονται από αρμονικές σειρές (σχέση 3.12) και αν δεν αντιμετωπιστούν κατάλληλα επιφέρουν σφάλμα της τάξης του 1 έως 10 εκατοστών (Teunissen & Montenbruck, 2017).

$$\Delta c = \sum_{j=1}^{11} A_{cj} \cos(\chi_j(t) - \varphi_{cj}) \quad 3.12$$

όπου,

j : αντιστοιχεί σε μία από τις ημι-ημερήσιες, ημερήσιες και μεγάλης περιόδου παλίρροιας

$\chi_j(t)$: γραμμικός συνδυασμός των βασικών αστρονομικών παραμέτρων

A_{cj}, φ_{cj} : ποσότητες υπολογισμένες από παγκόσμια μοντέλα παλίρροιας

3.2.6 Πολικές παλίρροιες

Η κίνηση του πόλου (pole tide) προκαλεί μικρές περιοδικές μεταβολές στην παραμόρφωση της Γης και μπορεί να επιφέρει σφάλμα της τάξης των 2.5 cm. Οι μεταβολές στις τρεις κύριες διευθύνσεις (East, North, Up) για έναν σταθμό εκφράζονται από τις σχέσεις (Teunissen & Montenbruck, 2017)

$$\Delta r_E = +9 \text{ mm} \cos \theta [m_1 \sin \lambda - m_2 \cos \lambda] \quad 3.13$$

$$\Delta r_N = +9 \text{ mm} \cos 2\theta [m_1 \cos \lambda + m_2 \sin \lambda] \quad 3.14$$

$$\Delta r_U = -33 \text{ mm} \sin 2\theta [m_1 \cos \lambda + m_2 \sin \lambda] \quad 3.15$$

με

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi$$

όπου

λ : το γεωγραφικό μήκος του σταθμού

θ : η συμπληρωματική γωνία του γεωγραφικού πλάτους

φ : το γεωγραφικό πλάτος

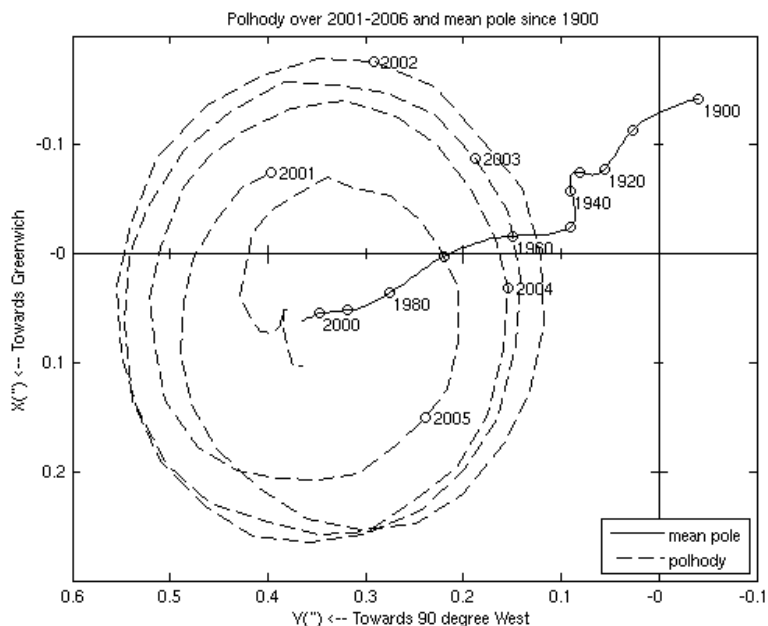
m_1, m_2 : οι συντεταγμένες του άξονα περιστροφής της Γης εκφρασμένες σε δεύτερα

3.2.7 Κίνηση του πόλου

Οι τροχιές των δορυφόρων στα προϊόντα υψηλής ακρίβειας αναφέρονται στο διεθνές επίγειο πλαίσιο αναφοράς (International Terrestrial Reference Frame, ITRF), έπειτα από την μετατροπή τους από το Γεωκεντρικό Ουράνιο Σύστημα Αναφοράς (Geocentric Celestial Reference System, GCRS) χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους περιστροφής της Γης (Earth Orientation Parameters, ERP). Οι παράμετροι περιστροφής της Γης είναι

1. η κίνηση του πόλου
2. το μήκος της ημέρας
3. η κλόνιση (nutation)
4. η μετάπτωση (precession)

Στην περίπτωση που τα αποτελέσματα ενός λογισμικού αναφέρονται σε αδρανειακό σύστημα, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα αρχεία παραμέτρων περιστροφής της Γης, καθώς και μοντέλα ERP που λαμβάνουν υπόψη την ημερήσια διακύμανση των παραμέτρων περιστροφής της (Kouba & Héroux, 2001).



Εικόνα 8. Κίνηση πόλου το χρονικό διάστημα 2001-2006

(<https://www.iers.org/ IERS/EN/Science/EarthRotation/PolarMotionPlot.html?nn=12932>)

3.2.8 Τροποσφαιρική καθυστέρηση

Η τροποσφαιρική καθυστέρηση (tropospheric delay) στην μέθοδο PPP εκφράζεται από την τροποσφαιρική καθυστέρηση στο ζενίθ (Zenith total Delay, ZTD) και από μία συνάρτηση απεικόνισης M εξαρτώμενη από το την γωνία ύψους E του δορυφόρου. Συνήθως, στις εφαρμογές PPP ακριβείας χρησιμοποιούνται οι συναρτήσεις απεικόνισης GMF (Global Mapping Function), VMF1 (Vienna Mapping Function 1) και Niel. Οι προαναφερθείσες συναρτήσεις απεικόνισης εφαρμόζουν συνεχιζόμενα κλάσματα της μορφής (Teunissen & Montenbruck, 2017)

$$M(E, a, b, c) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \left(\frac{b}{1+c}\right)}}{\sin E + \frac{a}{\sin E + \left(\frac{b}{\sin E + c}\right)}} \quad 3.16$$

όπου

a, b, c είναι σταθεροί συντελεστές που παίρνουν διαφορετικές τιμές για την και υγρή συνάρτηση απεικόνισης

Τόσο η καθυστέρηση ZTD όσο και η συνάρτηση απεικόνισης M , εξαρτώμενη από την γωνία ύψους E του δορυφόρου, διαχωρίζονται σε μια υδροστατική παράμετρο h (ZTD_h , $M_h(E)$) και σε μια υγρή παράμετρο w (ZTD_w , $M_w(E)$). Η καθυστέρηση ZTD_h εξαρτάται από τα ξηρά αέρια (dry gases) στην τροπόσφαιρα και οφείλεται για το 90% της συνολικής τροποσφαιρικής καθυστέρησης, επιφέροντας σφάλμα της τάξης των 2.3 μέτρων, ενώ η υγρή καθυστέρηση, που οφείλεται για το 10% της τροποσφαιρικής καθυστέρησης, επιφέρει σφάλμα της τάξης των 0.3 μέτρων. Παράλληλα, η τροποσφαιρική καθυστέρηση εξαρτάται και από το Αζιμούθιο της παρατήρησης. Η μοντελοποίηση των μεταβολών αυτών λόγω του αζιμουθίου (Iwabuchi, 2003) γίνεται μέσω του ‘διανύσματος κλίσης’ $\mathbf{G} = [G_E, G_N]$, όπου οι δείκτες E και N εκφράζουν τις διευθύνσεις East και North αντίστοιχα και της ισοτροπικής απεικόνισης $M_g(E)$, η οποία εξαρτάται μόνο από την γωνία ύψους E . Συνεπώς η τροποσφαιρική καθυστέρηση μπορεί να παραμετροποιηθεί ως εξής (Teunissen & Montenbruck, 2017)

$$T_r^S = M_h(E)ZTD_h + M_w(E)ZTD_w + M_g(E)(G_N \cos A + G_E \sin A) \quad 3.17$$

$$M_g(E) = \frac{1}{(\sin(E) \tan E + 0.0032)} \quad 3.18$$

Χρησιμοποιώντας δεδομένα επιφανειακής πυκνότητας p και στοιχεία θέσης του σταθμού (γεωγραφικό πλάτος φ και υψόμετρο h), η καθυστέρηση ZTD_h μπορεί να υπολογιστεί a-priori εφαρμόζοντας την φόρμουλα Saastamoinen (Teunissen & Montenbruck, 2017)

$$ZTD_h = \frac{0.0022768 \frac{m}{hPa} p}{1 - 0.00266 \cos(2\varphi) - 2.8 \cdot 10^{-7} m^{-1} h} \quad 3.19$$

Αντίθετα η υγρή καθυστέρηση εκτιμάται από δεδομένα GNSS στην επίλυση PPP, καθώς δεν μπορεί να υπολογιστεί αξιόπιστα από κάποιο μοντέλο.

3.2.9 Επιδράσεις σχετικότητας

Οι επιδράσεις σχετικότητας μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά καθυστέρηση του σήματος που οφείλεται στο βαρυτικό δυναμικό, προκαλώντας μία καθυστέρηση λόγω της καμπύλωσης του χωροχρόνου. Η καθυστέρηση αυτή ονομάζεται επίδραση Shapiro και υπολογίζεται από την σχέση

$$\delta t_{stc}^{rel} = \frac{2\mu}{c^3} \ln \left(\frac{\|x^s\| + \|x_r\| + \rho_r^s}{\|x^s\| + \|x_r\| - \rho_r^s} \right) \quad 3.20$$

όπου

μ : η βαρυτική σταθερά της Γης

$\|\cdot\|$: η Ευκλείδεια νόρμα

x^s : το διάνυσμα θέσης της αντένας του δορυφόρου

x_r : το διάνυσμα θέσης της αντένας του δέκτη

ρ_r^s : η γεωμετρική απόσταση μεταξύ κεραίας δορυφόρου και κεραίας δέκτη\

c : η ταχύτητα του φωτός

Η επίδραση Shapiro για έναν χρήστη πάνω στην επιφάνεια της Γης είναι της τάξης των 60 ps (= 6e-12 seconds) για δορυφόρους με τροχιά MEO και 70 ps για δορυφόρους σε τροχιά IGSO.

Η δεύτερη κατηγορία αφορά αποκλίσεις της συχνότητας του χρονομέτρου του δορυφόρου σε σχέση με εκείνων του εδάφους εξαιτίας επιδράσεων σχετικότητας. Συγκεκριμένα, το χρονόμετρο του δορυφόρου επηρεάζεται από την ταχύτητα του αλλά και από την μεταβολή του βαρυτικού δυναμικού, επιπτώσεις που οφείλονται στην γενική και ειδική σχετικότητα. Η διόρθωση αυτή δίνεται από την σχέση

$$\delta t_{clk}^{rel} = -\frac{2}{c^2} (x^s \cdot u^s) \quad 3.21$$

όπου

r^s : το διάνυσμα θέσης της κεραίας του δορυφόρου

u^s : το διάνυσμα ταχύτητας του δορυφόρου

c : η ταχύτητα του φωτός

3.2.10 Η επίδραση Sagnac

Ο δέκτης κατά την μετάδοση του σήματος από τον δορυφόρο δεν παραμένει σε ηρεμία ακόμη και αν είναι στατικός λόγω της περιστροφής της γης. Συνεπώς, η θέση του δέκτη θα διαφέρει από την στιγμή που μεταδίδεται το σήμα από τον δορυφόρο έως την λήψη του από αυτό (Εικόνα 9). Για παράδειγμα, αν ένας παρατηρητής στην Ελλάδα περιστρέφεται με 367 m/s και το σήμα από τον δορυφόρο στον δέκτη χρειαστεί 0.07 sec για να φτάσει, τότε ο δέκτης στο διάστημα αυτό θα έχει μετακινηθεί 27.5 m. Η διόρθωση Sagnac (σχέση 3.22) ορίζεται ως τα s ανά m² της επιφάνειας που

σαρώνεται από το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, καθώς αυτό ταξιδεύει από τον δορυφόρο στον δέκτη, προβαλλόμενη στο επίπεδο του ισημερινού (Teunissen & Montenbruck, 2017; Anon., n.d.).

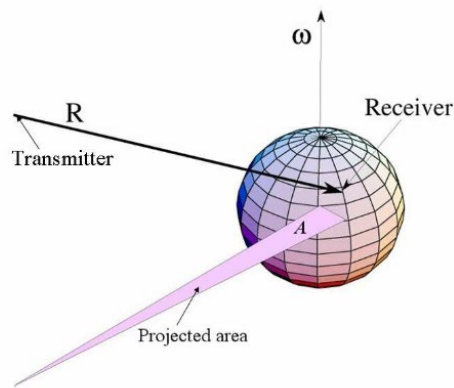
$$\Delta\rho_r^S = \frac{2}{c} \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\omega}_{\oplus} \quad 3.22$$

όπου

$\boldsymbol{\omega}_{\oplus}$: το διάνυσμα γωνιακής ταχύτητας περιστροφής της Γης

$\mathbf{S}$: το χωρίο που σαρώνεται από το διάνυσμα μεταξύ του κέντρου της Γης και του παλμού του σήματος καθώς αυτό διαδίδεται από τον δορυφόρο στον δέκτη

c : η ταχύτητα του φωτός



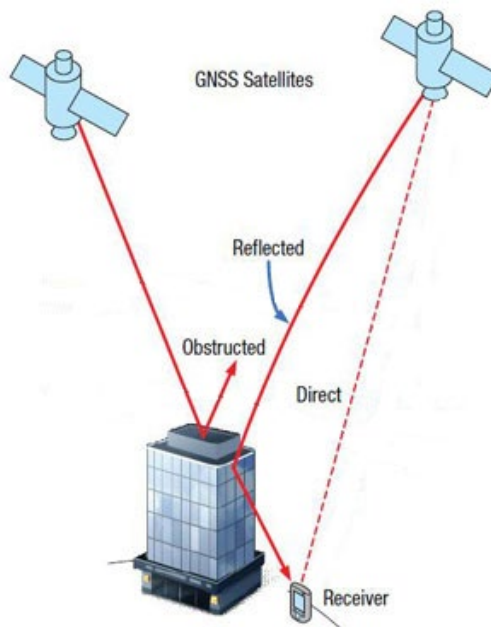
Εικόνα 9. Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου Sagnac (Anon., n.d.)

3.2.11 Πολυανάκλαση

Η πολυανάκλαση (multipath) είναι το φαινόμενο στο οποίο το σήμα ακολουθεί μεγαλύτερη διαδρομή από την κανονική λόγω της γεωμετρίας του περιβάλλοντος χώρου (Εικόνα 10). Συγκεκριμένα, το σήμα αντί να ακολουθήσει ευθεία πορεία αυτό ανακλάται πάνω σε αντικείμενα (πχ κτίρια) με αποτέλεσμα να καθυστερεί να φτάσει στον δέκτη. Το σφάλμα της πολυανάκλασης είναι εντονότερο στις κινηματικές εφαρμογές από ότι στις στατικές και ο τρόπος που ενδείκνυται για τον περιορισμό του είναι η σωστή επιλογή της τοποθεσίας του δέκτη, ο τύπος της κεραίας, ο τύπος του δέκτη και η μετεπεξεργασία των παρατηρήσεων.

Στην επεξεργασία των παρατηρήσεων σε πραγματικό χρόνο, επειδή η πολυανάκλαση είναι περίπου αντιστρόφος ανάλογη της γωνίας ύψους των δορυφόρων, το βάρος των παρατηρήσεων μπορεί να συσχετιστεί με την γωνία ύψους των δορυφόρων στην ελαχιστοτετραγωνική επίλυση ή στο φίλτρο Kalman. Άλλη τεχνική που μπορεί να εφαρμοστεί είναι αυτή που υπολογίζει το μέτρο του θορύβου και της πολυανάκλασης της παρατήρησης λαμβάνοντας την διαφορά μεταξύ της παρατήρησης κώδικα και της εξομαλυμένης παρατήρησης κώδικα μέσω παρατήρησης φάσης (Κεφάλαιο 5.3.2.1). Η μέτρηση αυτή στην συνέχεια χρησιμεύει ώστε να αποδοθούν βάρη στις παρατηρήσεις.

Η προηγούμενη τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί και σε δέκτη που κινείται, σε εφαρμογή μη πραγματικού χρόνου. Αντίθετα, σε στατικό δέκτη μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνική *sidereal filtering*. Η τεχνική αυτή αξιοποιεί δύο πράγματα, πρώτον η πολυανάκλαση τείνει να επαναλαμβάνεται σε σενάρια όπου ο δέκτης και ο περιβάλλον χώρος είναι στάσιμα και δεύτερον τα ίχνη των τροχιών των δορυφόρων επαναλαμβάνονται περίπου κάθε μία αστρική ημέρα, εξού και η ονομασία της τεχνικής.

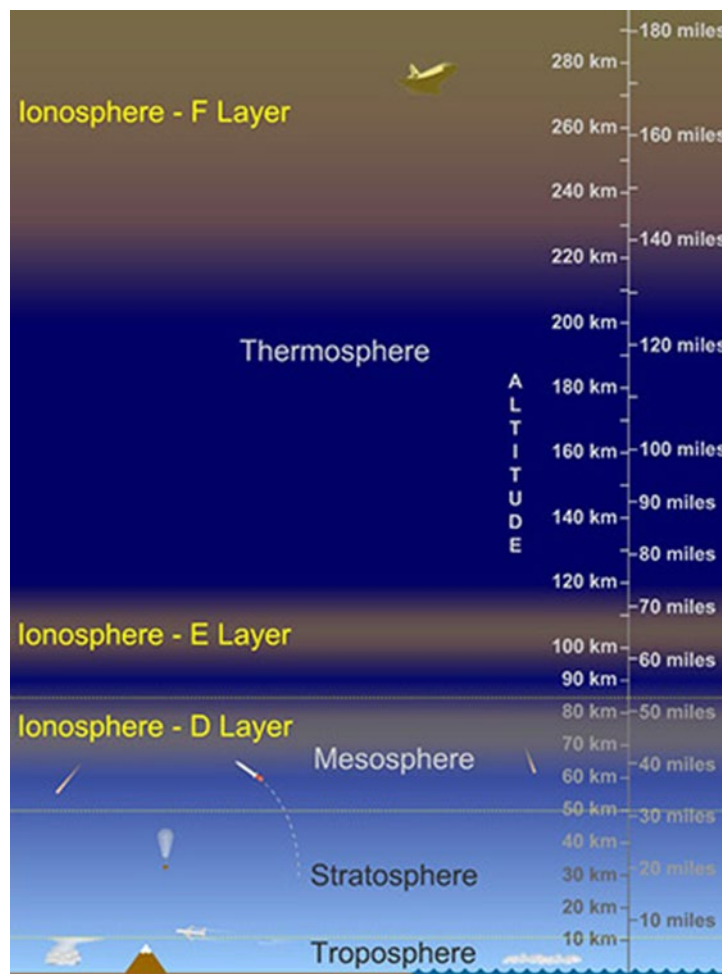


Εικόνα 10. Πολυανάκλαση (<https://www.uavnavigation.com/support/kb/general/general-system-info/global-navigation-satellite-system-gnss-errors>)

Κεφάλαιο 4

4.1 Ιονοσφαιρική καθυστέρηση

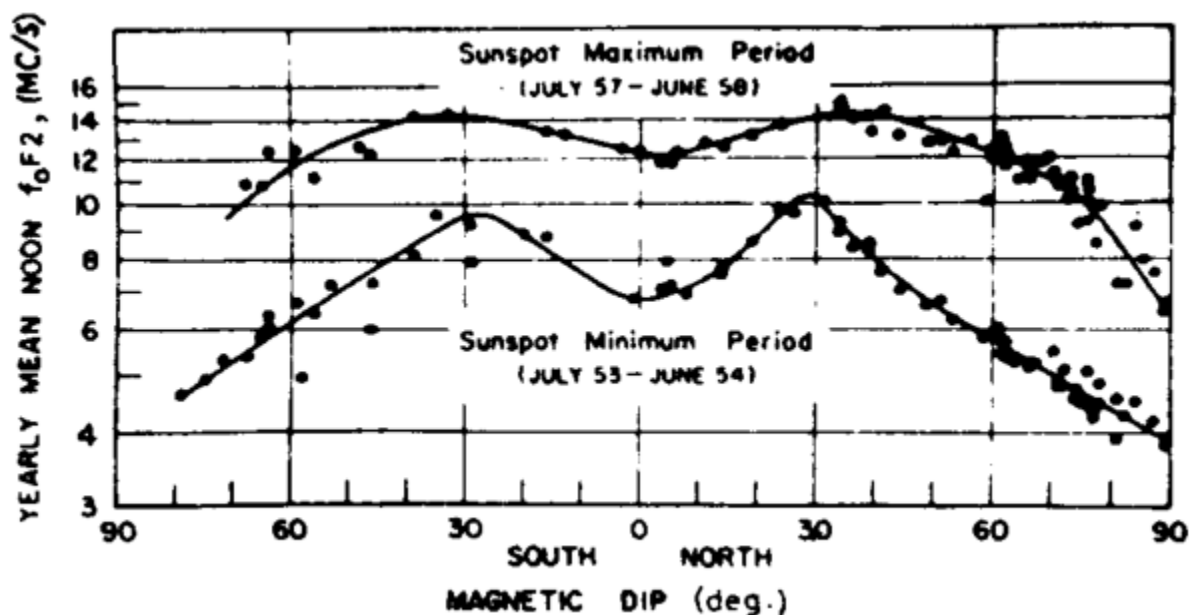
Η ιονόσφαιρα αποτελεί το τμήμα της ατμόσφαιρας που ιονίζεται από την ηλιακή και την κοσμική ακτινοβολία και εκτείνεται σε υψόμετρο 60 – 2000 km πάνω από την επιφάνεια της Γης (Εικόνα 11). Συγκεκριμένα, παράγεται από το ανώτερο στρώμα της επιφάνειας του Ήλιου συνεχόμενη ροή πλάσματος υπερβολικά υπεριώδους ακτινοβολίας (Extreme Ultra Violet) και ακτίνες X, διαδικασία που ιονίζει την ιονόσφαιρα της Γης. Εξαιτίας αυτής της ενέργειας τα άτομα χάνουν τουλάχιστον ένα από τα ηλεκτρόνια τους και φορτίζονται θετικά, με αποτέλεσμα να συμπεριφέρονται σαν ελεύθερα σωματίδια. Η προαναφερθείσα διαδικασία λαμβάνει χώρα κυρίως κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ την νύχτα ο ιονισμός της ιονόσφαιρας οδηγείτε κυρίως από τις κοσμικές ακτινοβολίες, προερχόμενες από το ηλιακό μας σύστημα και γενικότερα το σύμπαν. Οι κοσμικές ακτινοβολίες που προέρχονται από το σύμπαν ιονίζουν την ιονόσφαιρα σε μικρότερη τάξη μεγέθους από τον ιονισμό που προκαλεί ο Ήλιος.



Εικόνα 11. Οι περιοχές D, E, F της ιονόσφαιρας (*The Ionosphere | UCAR Center for Science Education, 2020*)

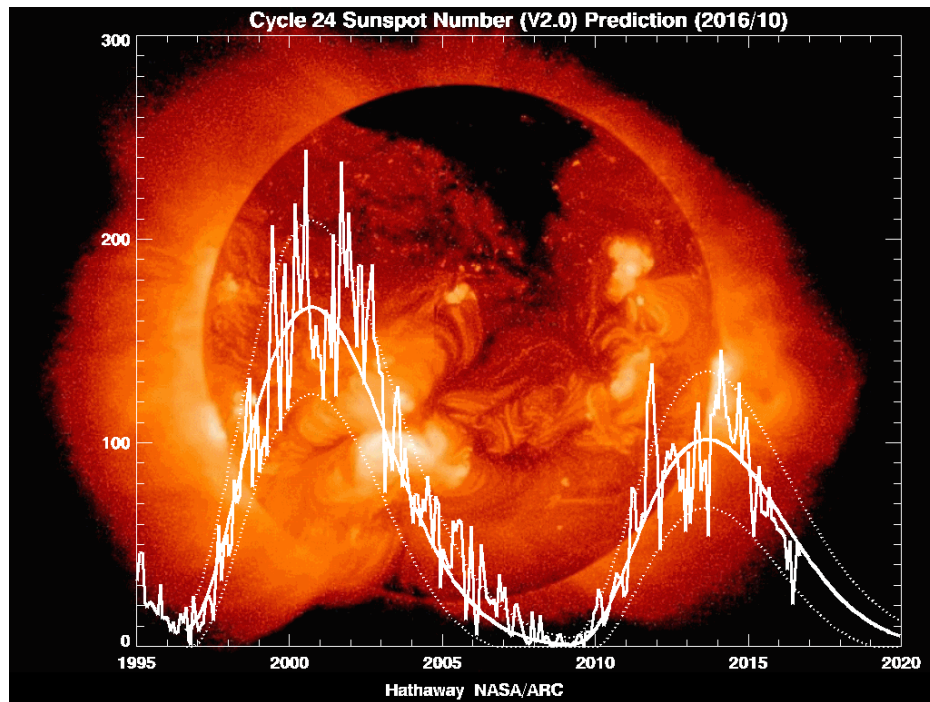
Τα τμήματα που συγκροτούν την ιονόσφαιρα είναι το τμήμα D, το τμήμα E και το τμήμα F (Εικόνα 11). Το πρώτο τμήμα, το τμήμα D ξεκινάει από τα 60 με 70 km και εκτείνεται στα 90 km πάνω από την επιφάνεια της γης. Στην συνέχεια ξεκινάει το ενδιάμεσο τμήμα E, το οποίο εκτείνεται από τα 90 με 100 km έως τα 120 με 150 km πάνω από την επιφάνεια της γης. Το τελευταίο τμήμα, το τμήμα F αποτελεί το τμήμα με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ηλεκτρόνια, ξεκινάει στα 150 km και εκτείνεται έως τα 500 km. Το στρώμα F υπάρχει τόσο την ημέρα, το οποίο διασπάται σε δύο τμήματα, το F₁ και το F₂, όσο και το βράδυ. Αντίθετα, το τμήμα E εξασθενεί το βράδυ, ενώ το τμήμα D εξαφανίζεται εντελώς.

Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ηλεκτρόνια βρίσκεται ± 20 μοίρες από το μαγνητικό ισημερινό όπου εντοπίζεται η γεωμαγνητική ανωμαλία, δηλαδή η εμφάνιση ενός κοιλώματος στο τμήμα F₂ στον ισημερινό και μιας μεγιστοποίησης στις 17 μοίρες γεωμαγνητικού πλάτους στο τμήμα F₂ (Εικόνα 12).

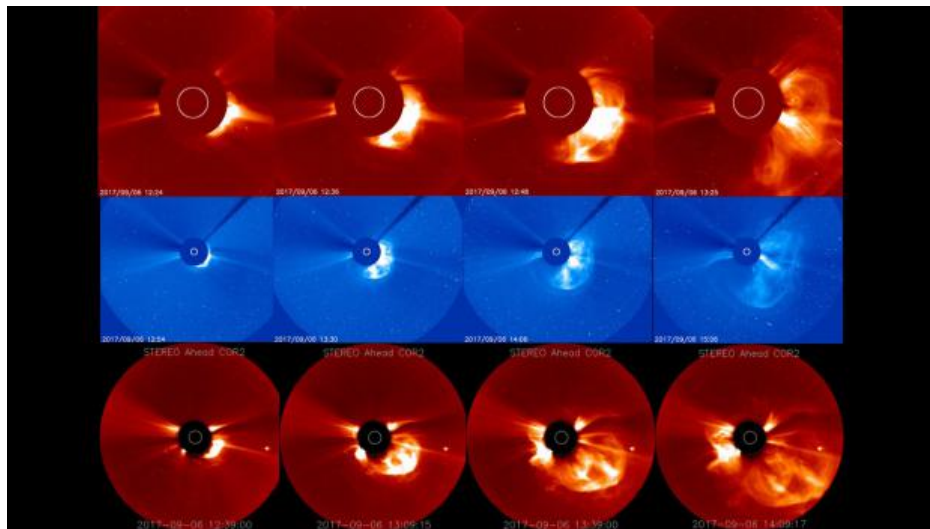


Εικόνα 12. Μεταβολές της ισημερινής ανωμαλίας κατά πλάτος, για περίοδο μεγίστου και ελαχίστου ηλιακών κηλίδων (Sastri, 1990)

Υπό κανονικές συνθήκες η δραστηριότητα του Ήλιου παραμένει σταθερή/ήρεμη, ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις που η ενέργεια που δέχεται η γη από τον ήλιο διαταράσσεται σημαντικά μεταβάλλοντας την κατανομή των ηλεκτρονίων στην ιονόσφαιρα. Οι διαταραχές αυτές οφείλονται σε ηλιακές εκλάμψεις και λαμβάνουν χώρα στις ηλιακές κηλίδες πάνω στην ηλιακή επιφάνεια. Οι ηλιακές κηλίδες αυξάνονται μέχρι ένα μέγιστο και στη συνέχεια μειώνονται κάθε 11 χρόνια περίπου. Η χρονική περίοδος αυτή ονομάζεται ενδεκαετής ηλιακός κύκλος ή ενδεκαετής κύκλος της ηλιακής δραστηριότητας (Εικόνα 13). Εκτός από τις ηλιακές κηλίδες η ιονόσφαιρα επηρεάζεται και από τις στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας (Coronal Mass Ejections, CME) στην κορόνα του Ηλίου. Οι στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας αποτελούν μεγάλες αποβολές πλάσματος και μαγνητικού πεδίου, οι οποίες όταν φτάσουν στην ιονόσφαιρα μπορεί να προκαλέσουν ιονοσφαιρικές καταιγίδες (Εικόνα 14).



Εικόνα 13. Προβλέψεις κύκλου ηλιακών κηλίδων
(https://solarscience.msfc.nasa.gov/images/ssn_predict_1.gif)



Εικόνα 14. Στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας
(https://solarscience.msfc.nasa.gov/images/ssn_predict_1.gif)

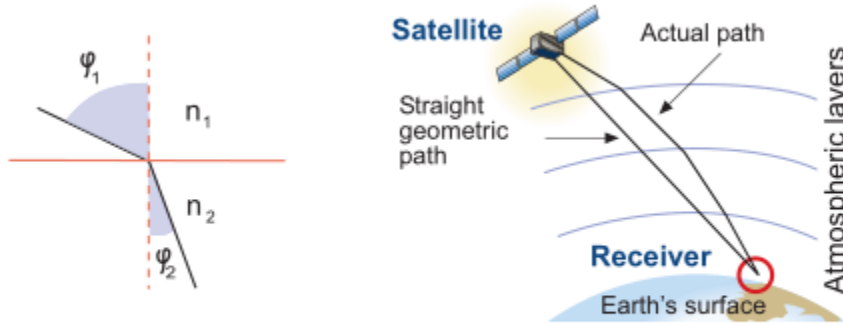
4.2 Ιονοσφαιρική καθυστέρηση πρώτης τάξης

Το πόσο εύκολα διαδίδεται το φως σε ένα μέσο εκφράζεται από τον δείκτη διάθλασης, όπου αποτελεί τον λόγο της ταχύτητας του φωτός στο κενό ως προς την ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο εκάστοτε μέσο (σχέση 4.1).

$$n = \frac{c}{u}$$

4.1

Η ατμόσφαιρα μέσα στην οποία διαδίδονται τα σήματα GNSS αποτελεί ένα μέσο ανομοιογενές με μεταβαλλόμενη πυκνότητα αέρα και πλάσματος. Συνεπώς, τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα GNSS δεν μεταδίδονται με την ίδια ταχύτητα που μεταδίδονται στο κενό, άρα ο δείκτης διάθλασης δεν είναι ίσος με την μονάδα. Αυτή η μεταβολή του δείκτη διάθλασης προκαλεί και μεταβολή στην μετρούμενη γεωμετρική απόσταση, δηλαδή τη διαδρομή που πραγματοποιεί το σήμα μέσα στην ατμόσφαιρα (Εικόνα 15).



Εικόνα 15. Νόμος του Snell και οι επιπτώσεις του κατά την διαδρομή της ακτίνας (Sanz Subirana, et al., 2013)

Σύμφωνα με τον νόμο του Snell, όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα διέρχεται από ένα μέσο A με δείκτη διάθλασης n_A και μια γωνία φ_A , τότε αν το μέσο B έχει δείκτη διάθλασης n_B αυτό θα εξέλθει από το A με γωνία φ_B (σχέση 4.2).

$$n_A \sin \varphi_A = n_B \sin \varphi_B$$

4.2

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εκτός από τις ιδιότητες του μέσου όπου διαδίδονται μπορεί να εξαρτώνται και από την συχνότητα του κύματος. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται διασπορά και εμφανίζεται στα διαμορφωμένα κύματα GNSS όπου η ταχύτητα διάδοσης τους στην ιονόσφαιρα εξαρτάται από τις συχνότητες των συνιστωσών κυμάτων που τα συγκροτούν.

Από την σύνθεση δύο ημιτονοειδών κυμάτων, με ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων GNSS, προκύπτει ότι το διαμορφωμένο κύμα μπορεί να ταξιδέψει με δύο ταχύτητες. Η πρώτη ταχύτητα είναι η ταχύτητα φάσης u_{ph} (σχέση 4.3) με την οποία διαδίδονται οι εσωτερικές ταλαντώσεις του κύματος και η δεύτερη ταχύτητα είναι η ταχύτητα ομάδας (σχέση 4.4) u_{gr} με την οποία διαδίδεται το περίβλημα του κύματος.

$$u_{ph} = \frac{\omega}{k}$$

4.3

$$u_{gr} = \frac{d\omega}{dk} \quad 4.4$$

όπου

ω : η γωνιακή συχνότητα

k : ο κυματικός αριθμός

Στα σήματα GNSS το φέρον κύμα μεταδίδεται με την ταχύτητα φάσης και ο διαμορφωμένος κώδικας με την ταχύτητα ομάδας. Η ταχύτητα φάσης με την ταχύτητα ομάδας ισούνται όταν η ταχύτητα φάσης είναι ανεξάρτητη του κυματικού αριθμού. Τότε, το μέσο ονομάζεται μέσο μη-διασποράς, ενώ στην αντίθετη περίπτωση το μέσο ονομάζεται μέσο διασποράς. Αναλυτικότερα, λύνοντας την σχέση 4.3 ως προς ω και αντικαθιστώντας την στην 4.4 προκύπτει η σχέση

$$u_{gr} = \frac{d\omega}{dk} = u_{ph} + k \frac{du_{ph}}{dk} \quad 4.5$$

όπου, για να ισχύει $u_{gr} = u_{ph}$, θα πρέπει $\frac{du_{ph}}{dk} = 0$. Στη συνέχεια παραγωγίζοντας την ταχύτητα φάσης και το μήκος κύματος ως προς τον κυματικό αριθμό προκύπτει η σχέση

$$u_{gr} = u_{ph} - k \frac{du_{ph}}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dk} = u_{ph} - k \frac{du_{ph}}{d\lambda} \left(-\frac{2\pi}{k^2} \right) = u_{ph} - \lambda \frac{du_{ph}}{d\lambda} \quad 4.6$$

Η εξίσωση 4.6 μπορεί να αναλυθεί περισσότερο αν ληφθεί υπόψη ότι

$$dc = \lambda df + f d\lambda = 0 \Leftrightarrow \lambda = (-d\lambda/df)f \quad 4.7$$

με

$$c = \lambda f$$

οπότε, αντικαθιστώντας την 4.7 στην 4.6 η ταχύτητα ομάδας δίνεται από την σχέση

$$u_{gr} = u_{ph} + f \frac{du_{ph}}{df} \quad 4.8$$

Παράλληλα, σύμφωνα με την σχέση 4.1 για την ταχύτητα φάσης και την ταχύτητα ομάδας μπορεί να οριστεί ένας δείκτης διάθλασης n_{ph} που αφορά την ταχύτητα φάσης u_{ph} (σχέση 4.9) και ένας δείκτης διάθλασης που αφορά την ταχύτητα ομάδας u_{gr} (σχέση 4.10).

$$n_{ph} = \frac{c}{u_{ph}} \quad 4.9$$

$$n_{gr} = \frac{c}{u_{gr}} \quad 4.10$$

Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις 4.9 και 4.10, η σχέση 4.5, με την προσέγγιση ότι $\frac{1}{(1-a)} = 1 + a$, μπορεί να γραφτεί σύμφωνα με την σχέση 4.11, η οποία υποδεικνύει την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από την συχνότητα.

$$n_{gr} = n_{ph} + f \frac{dn_{ph}}{df} \quad 4.11$$

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η ιονόσφαιρα αποτελεί μέσω διασποράς και η σχέση που συνδέει την γωνιακή ταχύτητα ω και τον κυματικό αριθμό k είναι αυτή της διασποράς της ιονόσφαιρας (Crawford, 1968)

$$\omega^2 = c^2 k^2 + \omega_p^2 \quad 4.12$$

με

$$\omega_p = 2\pi f_p$$

$$f_p = 8.98 \sqrt{N_e} \Lambda$$

όπου

ω_p : η κρίσιμη γωνιακή συχνότητα του πλάσματος της ιονόσφαιρας

f_p : η κρίσιμη συχνότητα του πλάσματος της ιονόσφαιρας (Hz)

N_e : η πυκνότητα των ηλεκτρονίων $\left(\frac{e^-}{m^3}\right)$ η οποία ισούται περίπου με 10^{11} έως $10^{12} e^- /m^3$ για 300–500 km

Σύμφωνα με την σχέση 4.12, ένα σήμα μπορεί να περάσει μέσα από την ιονόσφαιρα αν η συχνότητα είναι μεγαλύτερη της f_p . Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 4.3, 4.12 και την προσέγγιση $\sqrt{1-a^2} \cong 1 - \frac{1}{2}a^2$, η ταχύτητα φάσης και ο δείκτης διάθλασης της ορίζονται ως εξής

$$u_{ph} = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}}} \quad 4.13$$

$$n_{ph} = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}} \cong 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{f_p^2}{f^2} \right) = 1 - \frac{40.3}{f^2} N_e \quad 4.14$$

Για τον ορισμό του δείκτη διάθλασης της ταχύτητας ομάδας παραγωγίζεται η σχέση 4.12 ως προς τον κυματικό αριθμό k χρησιμοποιώντας την προσέγγιση $(1 - a^2)^{-1/2} \cong 1 + \frac{1}{2}a^2$

$$n_{gr} = 1 + \frac{40.3}{f^2} N_e \quad 4.15$$

Η καθυστέρηση του σήματος GNSS στην ιονόσφαιρα προκύπτει σύμφωνα με την αρχή του Fermat ως η διαφορά του ολοκληρώματος του δείκτη διάθλασης κατά μήκος της πορείας της ακτίνας και του ολοκληρώματος της ευκλείδειας απόστασης μεταξύ δορυφόρου και δέκτη (σχέση 4.16).

$$\Delta = \int_{ray\ path} n dl - \int_{straight\ line} dl \cong \int_{straight\ line} (n - 1) dl \quad 4.16$$

Αντικαθιστώντας λοιπόν τις σχέσεις 4.14 και 4.15 στην σχέση 4.16 προκύπτουν οι ιονοσφαιρικές καθυστερήσεις φάσης (σχέση 4.17) και κώδικα (σχέση 4.18).

$$\Delta_{ph,f}^{iono} = -\frac{40.3}{f^2} \int N_e dl \quad 4.17$$

$$\Delta_{gr,f}^{iono} = +\frac{40.3}{f^2} \int N_e dl \quad 4.18$$

$$STEC = \int N_e dl \text{ (μονάδες TECU)} \quad 4.19$$

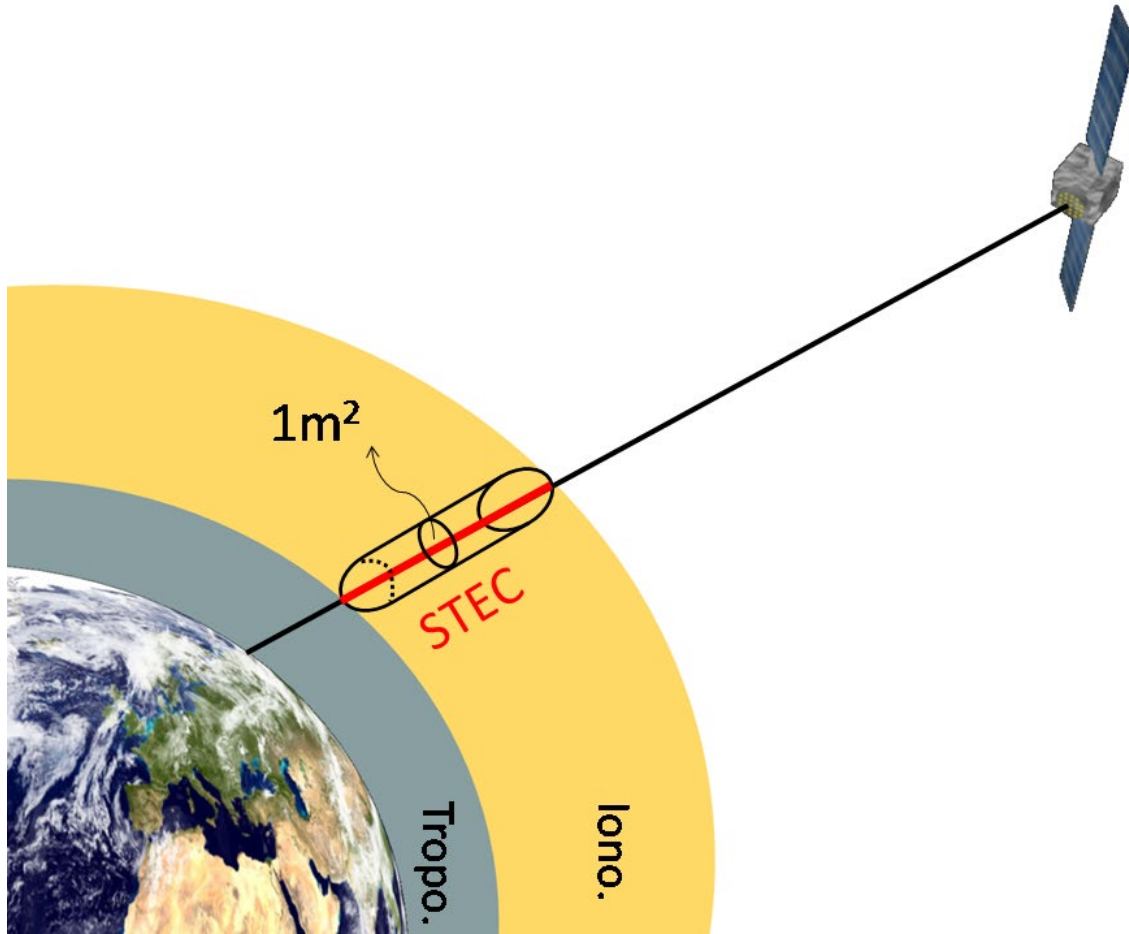
$$\alpha_f = \frac{40.3 \cdot 10^{16}}{f^2} \text{ σε μονάδες } \frac{m}{TECU} \text{ και } f \text{ σε μονάδες Hz} \quad 4.20$$

Και για τις δύο εξισώσεις αυτές, η σχέση 4.19 εκφράζει το slant total electron content (STEC), δηλαδή το άθροισμα της πυκνότητας των ηλεκτρονίων κατά μήκος της πορείας της ακτίνας και η παράμετρος α_f την καθυστέρηση του σήματος στην συχνότητα f σε μέτρα ανά μονάδα TECU. Αυτό υποδεικνύει ότι η διάθλαση των σημάτων GNSS εξαρτάται από την συχνότητα τους και συγκεκριμένα είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ιονοσφαιρική καθυστέρηση σε μονάδες μήκους (m) για την ταχύτητα φάσης και ομάδας δίνεται από τις σχέσεις

$$I_{R,f} \equiv \Delta_{gr,f}^{iono} = +\alpha_f STEC \quad 4.21$$

$$I_{\Phi,f} \equiv \Delta_{ph,f}^{iono} = -\alpha_f STEC \quad 4.22$$

Τέλος, από την εξίσωση 4.21 που δίνει την ιονοσφαιρική διάθλαση της φάσης έπεται ότι η μέτρηση φάσης προηγείται όταν διέρχεται από την ιονόσφαιρα, ενώ από την εξίσωση 4.22 που δίνει την ιονοσφαιρική διάθλαση του κώδικα προκύπτει ότι η μέτρηση κώδικα υφίσταται μία καθυστέρηση.



Εικόνα 16. STEC http://gnss.be/ionosphere_tutorial.php

4.3 Ιονοσφαιρική καθυστέρηση δευτέρης τάξης

Αν στην εξίσωση 4.12 συμπεριληφθούν και οι όροι που εκφράζουν την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μαγνητικό πεδίο, τότε εμφανίζονται όροι υψηλότερου βαθμού ιονοσφαιρικής καθυστέρησης, στους οποίους όμως καταλογίζεται λιγότερο από το 1% της συνολικής ιονοσφαιρικής καθυστέρησης. Η καθυστέρηση αυτή ονομάζεται ιονοσφαιρική καθυστέρηση δευτέρου βαθμού και δίνεται από την σχέση 4.23 και την σχέση 4.24 για παρατηρήσεις φάσης και κώδικα αντίστοιχα.

$$I2_{\phi,f} = -\frac{7527c}{2f_1^3} \int_r^s N_e B \cos \theta dl \quad 4.23$$

$$I2_{p,f} = -2 \cdot I2_{\phi,f} \quad 4.24$$

όπου

B : η ένταση του μαγνητικού πεδίου της Γης

θ : η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης διάδοσης και του μαγνητικού πεδίου

4.4 Κατακόρυφη πυκνότητα ηλεκτρονίων

Στο κεφάλαιο 4.2 αναφέρθηκε η σημασία του STEC, δηλαδή το άθροισμα της πυκνότητας των ηλεκτρονίων κατά μήκος της πορείας της ακτίνας μέσα από την ιονόσφαιρα. Αυτό όμως σημαίνει ότι το TEC θα εξαρτάται από την πορεία αυτή του σήματος μέσω της ιονόσφαιρας, αλλά και από το ύψος του δορυφόρου. Συνεπώς, πρέπει να οριστεί ένα άλλο μέγεθος που να εκφράζει την πυκνότητα των ηλεκτρονίων κατακόρυφα πάνω από ένα σημείο στην γήινη επιφάνεια. Το νέο αυτό μέγεθος ονομάζεται vertical total electron content (VTEC).

Ο ορισμός του VTEC πραγματοποιείται εφαρμόζοντας το μονοστρωματικό ιονοσφαιρικό μοντέλο (Single Thin Layer Model). Στο μοντέλο αυτό γίνεται η υπόθεση ότι όλα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια βρίσκονται σε ένα στρώμα απειροστού πάχους σε υψόμετρο H πάνω από την επιφάνεια της Γης. Έτσι το VTEC υπολογίζεται σε κάθε σημείο διάτρησης της ιονόσφαιρας (ionospheric pierce point, IPP). Το IPP αποτελεί την τομή του σήματος GNSS με το ιονοσφαιρικό στρώμα ύψους $H=350$ km (Εικόνα 17). Συνεπώς η σχέση που δίνει το VTEC είναι

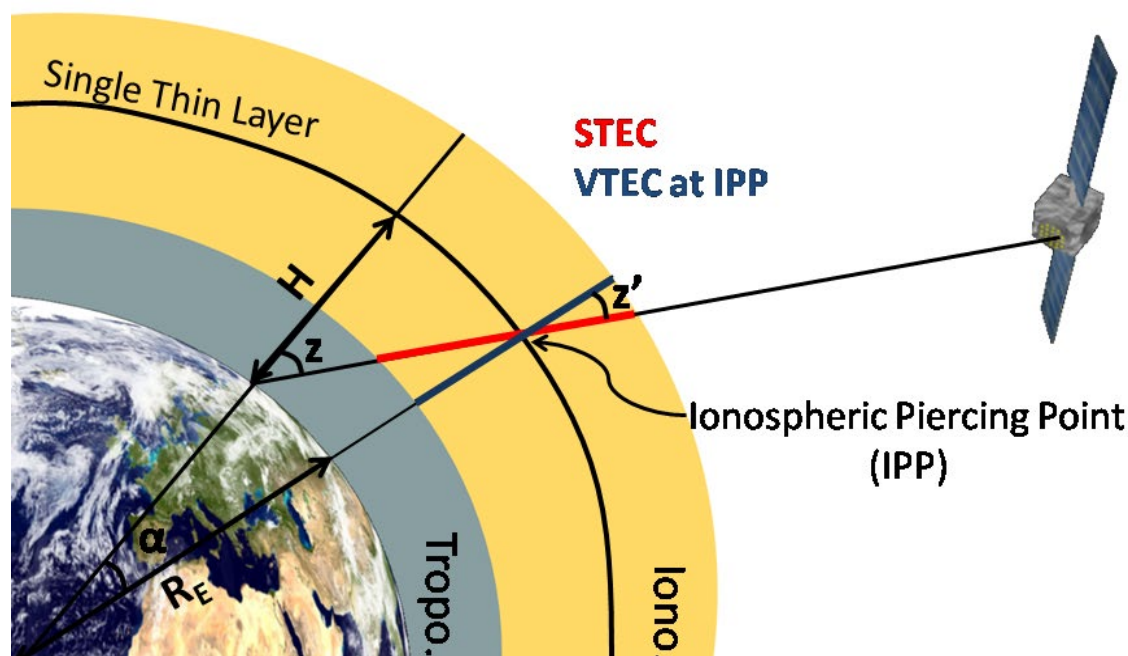
$$VTEC = \left(1 - \left(\frac{R_E}{R_E + H} \cos z \right)^2 \right)^{1/2} \cdot STEC \quad 4.25$$

όπου

R_E : η μέση ακτίνα της Γης

z : η κατακόρυφη γωνία μεταξύ δέκτη-δορυφόρου

H : το υψόμετρο του μονοστρωματικού ιονοσφαιρικού μοντέλου πάνω από την επιφάνεια της Γης



Εικόνα 17. STEC vs VTEC (http://gnss.be/ionosphere_tutorial.php)

4.5 Μοντέλα διόρθωσης ιονοσφαιρικής καθυστέρησης

Τα μοντέλα διόρθωσης ιονοσφαιρικής καθυστέρησης εφαρμόζονται από τους χρήστες μίας συχνότητας και ειδικότερα στην περίπτωση του απόλυτου εντοπισμού όπου εφαρμόζονται μόνο οι παρατηρήσεις ψευδοαπόστασης. Στην μέθοδο PPP τα μοντέλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ιονοσφαιρικοί περιορισμοί στην διαδικασία της επίλυσης.

4.5.1 Klobuchar

Η ιονοσφαιρική καθυστέρηση, για χρήστες που χρησιμοποιούν παρατηρήσεις σε μία συχνότητα, διορθώνεται χρησιμοποιώντας εκπεμπόμενες εφημερίδες των δορυφόρων. Συγκεκριμένα εκπέμποντας τις 8 παραμέτρους του μοντέλου, χρησιμοποιώντας παράλληλα το γεωδαιτικό μήκος και πλάτος της αντένας GNSS, τον χρόνο GPS, το αζιμούθιο και την γωνία ύψους του παρατηρούμενου δορυφόρου, υιοθετώντας την υπόθεση ότι η πυκνότητα ηλεκτρονίων είναι συγκεντρωμένη σε ένα λεπτό στρώμα ύψους 350 km (GPS) ή 375 km (BeiDou), η καθυστέρηση κατά μήκος της πορείας του σήματος GNSS υπολογίζεται από την κατακόρυφη καθυστέρηση στο σημείο IPP. Το μοντέλο αυτό ονομάζεται μοντέλο Klobuchar και παρά την απλότητα και την πρακτικότητα των υπολογισμών του είναι αποδοτικό μόνο για μέσες τιμές του γεωγραφικού πλάτους και η ακρίβεια διόρθωσης της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης είναι μικρή. Ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης σε δευτερόλεπτα ως προς της συχνότητες L1 και B1 του GPS και του BeiDou περιλαμβάνει τα εξής βήματα (Sanz Subirana, et al., 2013)

$$\psi = \frac{\pi}{2} - E - \arcsin\left(\frac{R_E}{R_E + h} \cos E\right)$$

$$\varphi_I = \arcsin(\sin \varphi_u \cos \psi + \cos \varphi_u \sin \psi \cos A)$$

$$\lambda_I = \lambda_u + \frac{\psi \sin A}{\cos \varphi_I}$$

$\varphi_m = \arcsin(\sin \varphi_I \sin \varphi_p + \cos \varphi_I \cos \varphi_p \cos(\lambda_I - \lambda_p))$, με $\varphi_p = 78.3^\circ$ και $\lambda_p = 291.0^\circ$ οι συντεταγμένες του γεωμαγνητικού βορά

$$t = \frac{43200\lambda_I}{\pi} + t_{GPS}, \text{ με } \lambda_I \text{ σε δευτερόλεπτα και } t \text{ σε δευτερόλεπτα}$$

$$A_I = \sum_{n=0}^3 a_n \left(\frac{\varphi_m}{\pi}\right)^n \text{ (σε δευτερόλεπτα) αν } A_I < 0, \text{ τότε } A_I = 0$$

$$P_I = \sum_{n=0}^3 \beta_n \left(\frac{\varphi_m}{\pi}\right)^n \text{ (σε δευτερόλεπτα) αν } P_I < 72000, \text{ τότε } P_I = 72000$$

$$X_I = \frac{2\pi(\tau - 50400)}{P_I}$$

$$F = \left[1 - \left(\frac{R_E}{R_E + h} \cos E \right)^2 \right]^{-1/2} \text{ (σε ακτίνια)}$$

$$I_1 = \begin{cases} [5 \cdot 10^{-9} + A_I \cos X_I] \times F, & |X_I| < \frac{\pi}{2} \\ 5 \cdot 10^{-9} \times F, & |X_I| \geq \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

όπου,

ψ : η γεωκεντρική γωνία

φ_I : γεωγραφικό πλάτος IPP

λ_I : γεωγραφικό μήκος IPP

E : γωνία ύψους δορυφόρου

t : τοπικός χρόνος στο IPP ($0 \leq t \leq 86400$)

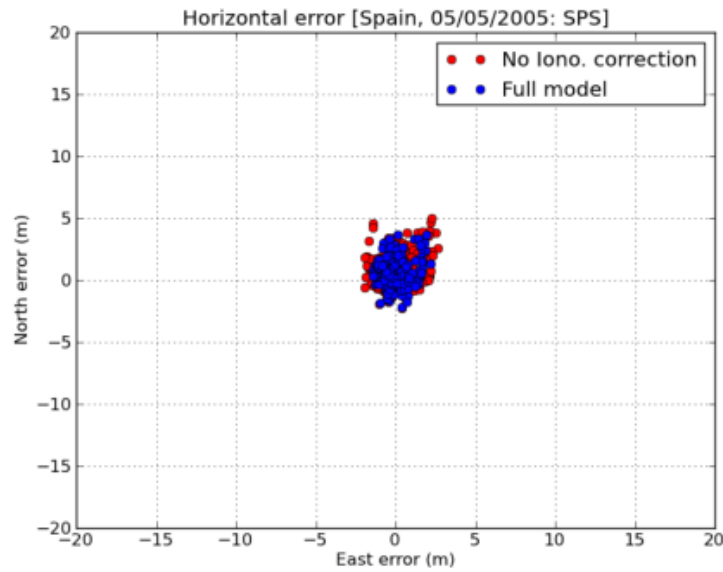
A_I : το εύρος της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης

P_I : περίοδος ιονοσφαιρικής καθυστέρησης

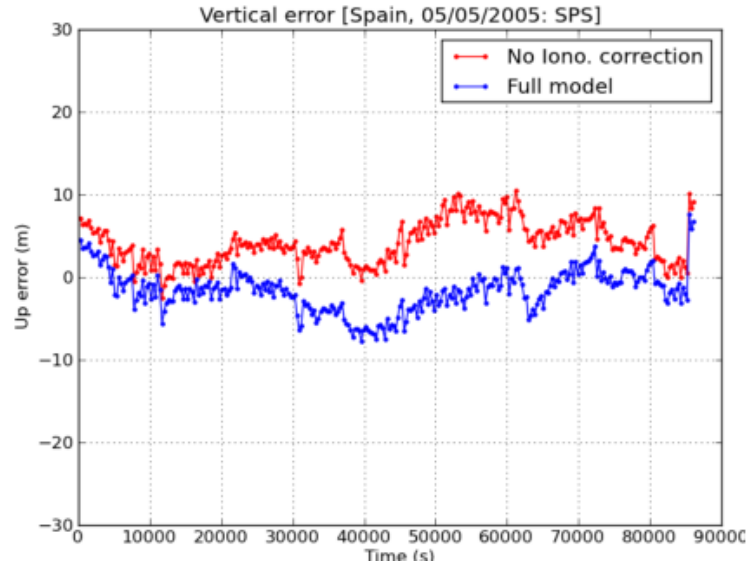
X_I : φάση ιονοσφαιρικής καθυστέρησης

F : Συντελεστής κλίσης

I_1 : Ιονοσφαιρική καθυστέρηση σε μονάδες χρόνου



Εικόνα 18. Επιπτώσεις εφαρμογής (κόκκινο) και μη (μπλε) μοντέλου Klobuchar για τον δυσδιάστατο εντοπισμό θέσης (Sanz Subirana, et al., 2013)



Εικόνα 19. Επιπτώσεις εφαρμογής (κόκκινο) και μη (μπλε) μοντέλου Klobuchar για την κατακόρυφη διεύθυνση (*Sanz Subirana, et al., 2013*)

Τέλος, το μοντέλο Klobuchar μπορεί να εφαρμοστεί και για τα δορυφορικά σήματα των συστημάτων GLONASS και Galileo λαμβάνοντας υπόψη ότι η ιονοσφαιρική καθυστέρηση είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας. Στις εικόνες 18 και 19 απεικονίζονται τα σφάλματα στις συνιστώσες East-North και Up αντίστοιχα εφαρμόζοντας το μοντέλο Klobuchar (μπλε χρώμα) και όταν αυτό δεν εφαρμόζεται (κόκκινο χρώμα).

4.5.2 Nequick

Το μοντέλο Nequick εφαρμόζεται στους δορυφόρους του Galileo για διορθώσεις πραγματικού χρόνου μίας συχνότητας και αποτελεί τρισδιάστατο μοντέλο, χρονικά εξαρτώμενο από την πυκνότητα ηλεκτρονίων στην ιονόσφαιρα. Ακόμη, αν οριστεί κατάλληλα η συχνότητα στην σχέση του πέμπτου βήματος του αλγορίθμου Nequick, αυτό μπορεί να εφαρμοστεί για οποιαδήποτε σύστημα.

Οι παράμετροι που καθορίζουν το μοντέλο Nequick είναι οι γεωδαιτικές συντεταγμένες της GNSS αντένας, ο χρόνος GPS και η ημερήσια ηλιακή δραστηριότητα Az . Η ημερήσια ηλιακή δραστηριότητα υπολογίζεται από τρεις εκπεμπόμενες παραμέτρους που συμπεριλαμβάνονται στις εκπεμπόμενες εφημερίδες του Galileo (σχέση 4.26).

$$Az = a_0 + a_1\mu + a_2\mu^2 \quad 4.26$$

με

$$\tan \mu = \frac{I}{\sqrt{\cos \varphi}}$$

όπου,

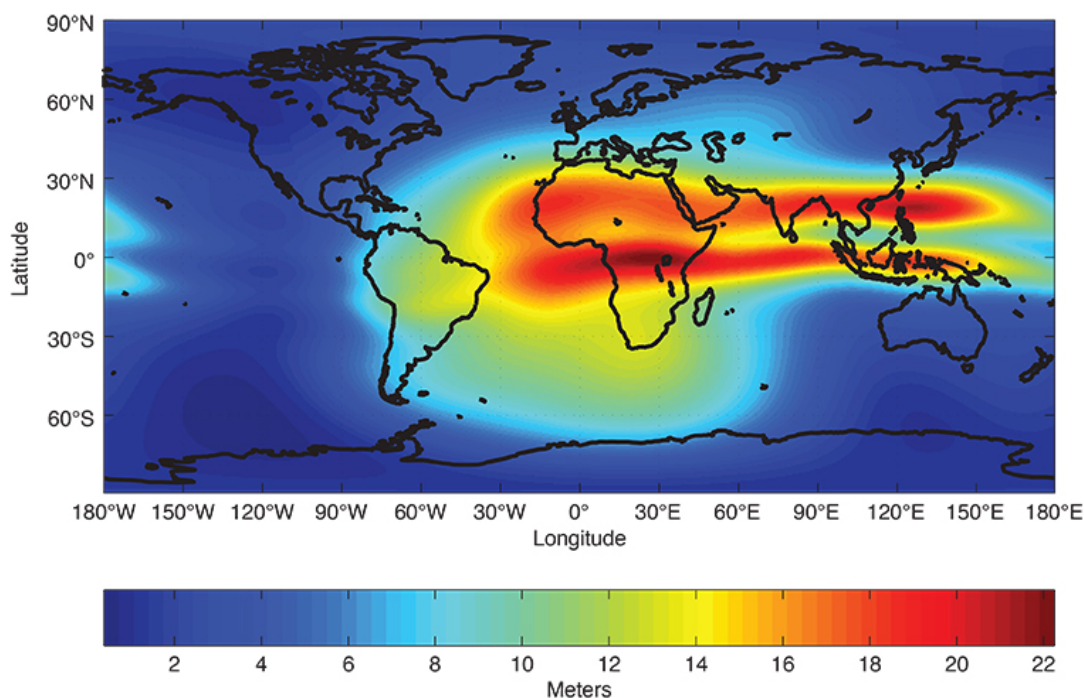
I : η πραγματική μαγνητική κλίση

φ : το γεωγραφικό πλάτος του δέκτη

μ : παράμετρος η οποία εκφράζει την εξάρτηση του Az από το γεωμαγνητικό πεδίο και το γεωγραφικό πλάτος

Ο αλγόριθμος του μοντέλου Nequick περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα (Arbesser-Rastburg, B., 2006):

1. Υπολογισμός της παραμέτρου MODIP μέσω του πίνακα DIPLATS από το μοντέλο Nequick, που εμπεριέχει πληροφορίες για το μαγνητικό πεδίο της Γης και στην συνέχεια της παραμέτρου Az συναρτήση του μ και των εκπεμπόμενων παραμέτρων a_0, a_1 και a_2 .
2. Κατά μήκος της διεύθυνσης δορυφόρου δέκτη υπολογίζεται για ένα σημείο η πυκνότητα ηλεκτρονίων αντικαθιστώντας την τιμή F10.7 με την παράμετρο Az .
3. Επανάληψη των προηγούμενων δύο βημάτων για επιπλέον διακριτά σημεία.
4. Ενσωμάτωση όλων των τιμών πυκνότητας ηλεκτρονίων για την απόκτηση του STEC.
5. Διόρθωση ψευδοαποστάσεων μέσω του STEC, μετατρέποντας το σε μέτρα για ιονοσφαιρική καθυστέρηση σχετικά ως προς την συχνότητα L1.



Εικόνα 20. Παγκόσμιος χάρτης VTEC παραγόμενος από το μοντέλο NeQuick στις 13 h UT τον Απρίλιο για $Az=193$ (https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/NeQuick_Ionospheric_Model)

4.5.3 NTCM

Το μοντέλο NTCM (Neustrelitz TEC Model) αποτελεί ένα εμπειρικό μοντέλο για την εκτίμηση των σφαλμάτων κατά την μετάδοση των ραδιοκυμάτων στην ιονόσφαιρα, χρησιμοποιώντας 12 παραμέτρους προσδιορισμένες με μη γραμμική προσαρμογή από δεδομένα TEC μιας δεκαετίας (1998-2007) σε παγκόσμιο επίπεδο (Jakowski, et al., 2011). Στο μοντέλο αυτό η συνολική πυκνότητα ηλεκτρονίων εξαρτάται από τον τοπικό χρόνο, την γεωγραφική και γεωμαγνητική

θέση, την ηλιακή ραδιενέργεια, και την ηλιακή ακτινοβολία (σχέση 4.27). Η μόνη ανεξάρτητη μεταβλητή του μοντέλου είναι η ηλιακή ροή F10.7, που αποτελεί τη βασική ένδειξη ηλιακής δραστηριότητας και επιπέδου ακτινοβολίας που προέρχεται από τον ήλιο. Η ηλιακή ροή μετρείται σε μονάδες SFU και εκφράζει το μέγεθος του θορύβου της ακτινοβολίας που εκπέμπεται σε μια συχνότητα 2800 MHz (10.7 cm).

$$TEC_{NTCM-GL}^{vert} = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5 \quad 4.27$$

όπου

F_1 : εκφράζει την μεταβολή του TEC ημερήσια, ημι-ημερίσια, ανά τρεις φορές την ημέρα και την εξάρτηση από την ζενίθια ηλιακή γωνία

F_2 : εκφράζει την ετήσια και εξαμηνιαία μεταβολή του TEC

F_3 : εκφράζει την εξάρτηση του TEC από το μαγνητικό πεδίο

F_4 : εκφράζει την εξάρτηση του TEC από το γεωμαγνητικό πεδίο

F_5 : εκφράζει την εξάρτηση του TEC από την ηλιακή δραστηριότητα

Σύγκριση του μοντέλου NTCM με το μοντέλο NeQuick για υψηλή και χαμηλή ηλιακή δραστηριότητα ως προς αλτιμετρικά δεδομένα TOPEX/Poseidon, ανέδειξε και για τα δύο μοντέλα RMS της τάξης των 5 και 11 TECU αντίστοιχα (N. Jakowski et. al). Σύγκριση εκτιμήσεων VTEC από το μοντέλο NTCM και το μοντέλο NeQuick ως προς τα αλτιμετρικά δεδομένα Topex/Poseidon για τον μήνα Μάιο του 2002 και για τον μήνα Δεκέμβριο του 2006, προκύπτει παρόμοια απόδοση και για τα δύο μοντέλα.

Το 2015 οι συντελεστές του μοντέλου NTCM επαναπροσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας δεδομένα TEC από το κέντρο ανάλυσης CODE για την περίοδο 2002-2015. Επιπλέον η δραστηριότητα της ηλιακής ακτινοβολίας αυτήν την φορά αντιπροσωπεύεται από την ποσότητα Klobpar (Hoque, et al., 2017). Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται από τις ιονοσφαιρικές καθυστερήσεις στα σημεία με γεωγραφικές συντεταγμένες $\phi_A=10^\circ N$, $\lambda_A=90^\circ W$ και $\phi_B=10^\circ S$, $\lambda_B=90^\circ W$ για τη χρονική στιγμή 14 UT μέσω του μοντέλου Klobuchar. Έπειτα, το άθροισμα της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης μεταξύ των δύο προαναφερθέντων σημείων, σε μονάδες TECU, δίνει την παράμετρο Klobpar (σχέση 4.28). Συνεπώς, για την εφαρμογή του μοντέλου NTCM δεν απαιτείται η εξωτερική σύνδεση με δεδομένα ηλιακής δραστηριότητας.

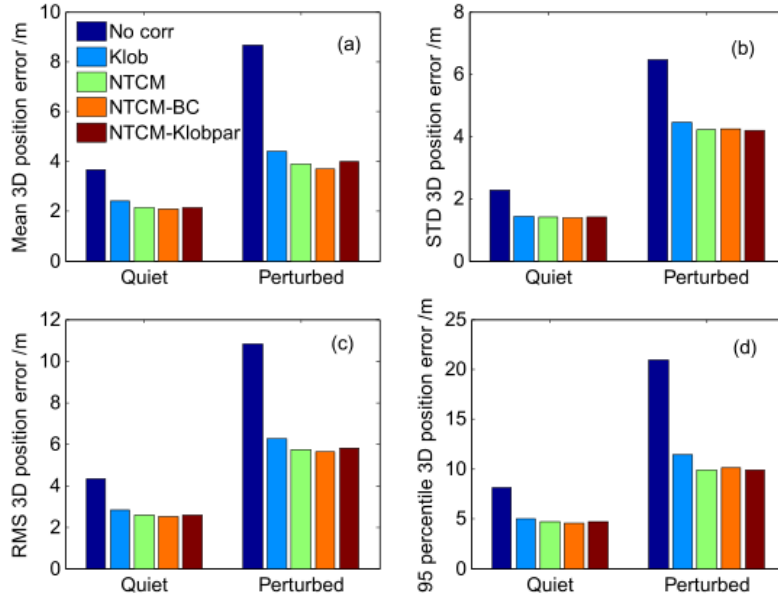
$$Klobpar = TEC_A + TEC_B = (I_{iono}^A + I_{iono}^B) \cdot c \cdot \frac{(1575.42 \times 10^6)^2}{40.3 \times 10^{16}} \quad 4.28$$

Βασισμένο στο NTCM, το NTCM-BC (Neustrelitz TEC Model Broadcast) αποτελεί ένα εκπαιδωμένο ιονοσφαιρικό μοντέλο (Hoque & Jakowski, 2014). Συγκεκριμένα ανάλογα με την ημερήσια υφιστάμενη ιονοσφαιρική δραστηριότητα προσαρμόζονται και οι παράμετροι του μοντέλου, δηλαδή το μοντέλο NTCM-BC είναι έγκυρο για ένα χρονικό διάστημα 24 ωρών. Συνεπώς, στις εκτιμώμενες παραμέτρους του μοντέλου δεν λαμβάνεται υπόψη η ετήσια και ημι-ετήσια διακύμανση του TEC και οι διακυμάνσεις του TEC λόγω του ενδεκαετή ηλιακού κύκλου. Έτσι οι εκτιμώμενες παράμετροι του μοντέλου NTCM-BC μειώνονται στις εννιά, σε αντίθεση με

τις 12 του μοντέλου NTCM και εκτιμώνται από παρατηρήσεις TEC της προηγούμενης ημέρας σε σταθμούς του τμήματος ελέγχου του συστήματος GNSS. Η σχέση που περιγράφει το μοντέλο NTCM-BC είναι

$$TEC_{NTCM-BC}^{vert} = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \quad 4.29$$

Σύγκριση των μοντέλων NTCM, NTCM-Klobuchar και NTCM-BC μεταξύ τους (Hoque, et al., 2018) υπολογίζοντας το μέσο σφάλμα, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) και την τυπική απόκλιση (STD) των σφαλμάτων θέσης (3D) αλλά και το ποσοστό (95%) των σφαλμάτων θέσης που βρίσκονται κάτω από μία τιμή, χρησιμοποιώντας αρχεία SINEX για περισσότερους από 30 σταθμούς παγκοσμίως, για περιόδους με ήσυχη αλλά και διαταραγμένη ιονοσφαιρική δραστηριότητα, έδειξε ότι τα μοντέλα NTCM, NTCM-Klobpar και NTCM-BC αποδίδουν καλύτερα ως προς το μοντέλο Klobuchar (Εικόνα 21). Παράλληλα, το μοντέλο NTCM-BC αποδίδει καλύτερα από τι τα μοντέλα NTCM και NTCM-Klobuchar. Αυτό οφείλεται στο ότι το εκπεμπόμενο μοντέλο NTCM-BC χρησιμοποιεί μεταβλητούς συντελεστές ώστε αυτοί να προσαρμόζονται στις ημερήσιες συνθήκες που επικρατούν στην ιονόσφαιρα.



Εικόνα 21. Σύγκριση μοντέλων για μέσο, STD, RMS και 95% των 3D σφαλμάτων θέσης για ήσυχη και διαταραγμένη κατάσταση ιονόσφαιρας (Hoque, et al., 2018)

4.5.4 Παγκόσμιοι ιονοσφαιρικοί χάρτες

Η δημιουργία των παγκόσμιων ιονοσφαιρικών χαρτών γίνεται μέσω της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης, πληροφορία που μπορεί να εξαχθεί αν εφαρμοστεί ο γραμμικός συνδυασμός ελευθέρας γεωμετρίας για διπλές διαφορές (Schäfer, et al., 1995). Στον συνδυασμό αυτόν περιλαμβάνονται μόνο οι ιονοσφαιρικοί όροι, και οι παράμετροι της ασάφειας (σχέση 4.30).

$$\Delta\Delta(\Phi_4) + u_4 = -4.03 \cdot 10^{17} \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \Delta\Delta(M(z) \cdot VTEC) + B_4 \quad 4.30$$

όπου

$\Delta\Delta(\dots)$: ο τελεστής διπλής διαφοράς

$\Phi_4 = \Phi_1 - \Phi_2$: η παρατήρηση φάσης ελευθέρας γεωμετρίας σε μέτρα

u_4 : το αντίστοιχο υπόλοιπο

f_1, f_2 : οι συχνότητες που αντιστοιχούν στις φέρουσες L1 και L2

$M(z)$: η συνάρτηση απεικόνισης εξαρτώμενη από την ζενίθια γωνία του δορυφόρου

$VTEC$: η κατακόρυφη πυκνότητα ηλεκτρονίων σε TECU

$B_4 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$: είναι ένα σταθερό σφάλμα, σε μέτρα, λόγω των ασαφειών φάσης N_1 και N_2 και των αντίστοιχων μηκών κύματος των φερουσών L_1 και L_2

Η συνολική περιεκτικότητα σε ηλεκτρόνια, η οποία εξαρτάται από το γεωκεντρικό πλάτος και το πραγματικό ηλιακό χρόνο, αναπτύσσεται σε μια σειρά από σφαιρικές αρμονικές έως και όγδοου βαθμού, υιοθετώντας το μονοστρωματικό ιονοσφαιρικό μοντέλο, σε υψόμετρο 400 km πάνω από την επιφάνεια της Γης, σε ένα ηλιοκεντρικό σύστημα αναφοράς για να προσδιοριστεί ένα σύνολο συντελεστών του VTEC (σχέση 4.31). Με αυτόν τον τρόπο προσεγγίζεται η μέση διανομή των VTEC σε παγκόσμιο επίπεδο.

$$E(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \beta) \cdot (a_{nm} + \cos ms + b_{nm} \sin ms) \quad t \in [t_i, t_{i+1}] \quad 4.31$$

με

$$s = t + \lambda - \pi$$

$$\tilde{P}_{nm} = \Lambda(n, m) \cdot P_{n,m}$$

$$t \in [t_i, t_{i+1}]$$

όπου

n_{max} : ο μέγιστος βαθμός των σφαιρικών αρμονικών

β : το γεωκεντρικό πλάτος του σημείου IPP

s : πραγματικός ηλιακό χρόνος σημείου IPP

t : ο παγκόσμιος χρόνος (Universal Time, UT) σε ακτίνια

λ : το γεωγραφικό μήκος του σημείου IPP

$[t_i, t_{i+1}]$ η καθορισμένη περίοδος ισχύος

$\tilde{P}_{nm}$: γενικευμένες συναρτήσεις Legendre βαθμού n και τάξης m

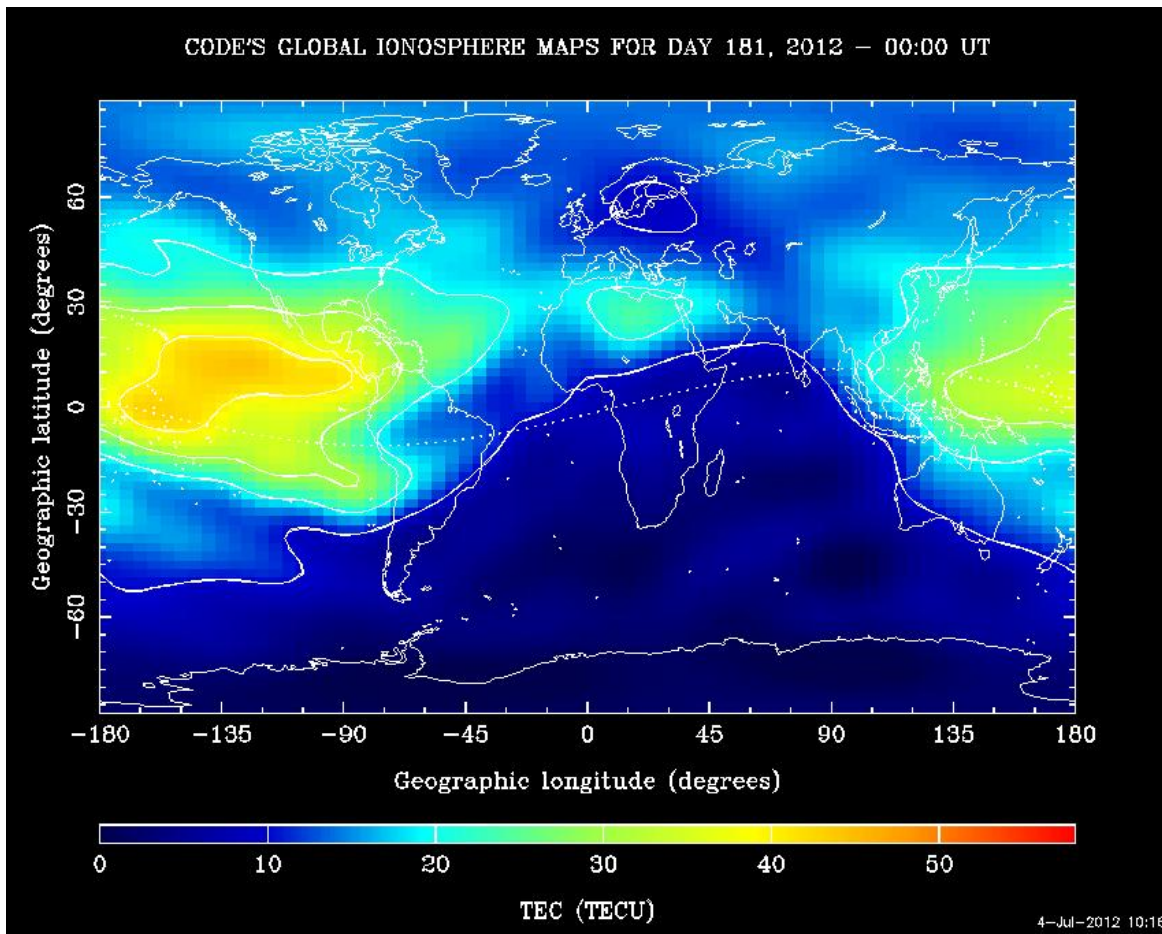
a_{nm}, b_{nm} : οι παράμετροι του παγκόσμιου ιονοσφαιρικού μοντέλου που πρέπει να εκτιμηθούν

Οι παγκόσμιοι αυτοί ιονοσφαιρικοί χάρτες παρέχουν δεδομένα VTEC στο σημείο IPP σε συγκεκριμένα σημεία κανάβου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε πραγματικό χρόνο από τα προβλεπόμενα δεδομένα, είτε σε μετέπειτα επεξεργασία από τα μετρημένα δεδομένα (Hoque, et al., 2018). Για την ανάκτηση του VTEC στο σημείο ενδιαφέροντος απαιτείτε χωρική και χρονική παρεμβολή μεταξύ τεσσάρων σημείων συνάρτηση του γεωκεντρικού πλάτους β , του μήκους λ και του παγκόσμιου χρόνου UT (Εικόνα 22). Ένας απλός αλγόριθμος παρεμβολής προκύπτει θεωρώντας ότι τα τέσσερα σημεία VTEC ανήκουν σε ένα σύστημα συντεταγμένων στις θέσεις (0,0), (0,1), (1,0) και (1,1)

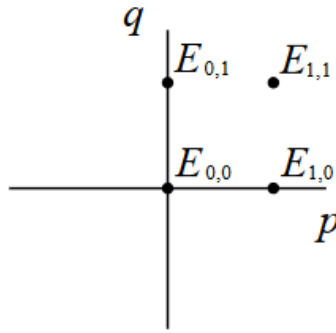
$$E(\lambda_0 + p\Delta\lambda, \beta_0 + q\Delta\beta) = (1 - p)(1 - q)E_{0,0} + p(1 - q)E_{1,0} + q(1 - p)E_{0,1} + pqE_{1,1}$$

$$0 \leq p < 1 \text{ και } 0 \leq q < 1$$

όπου, τα $\Delta\lambda$ και $\Delta\beta$ αναπαριστούν τις αποστάσεις μεταξύ των γεωγραφικών πλατών και μηκών.



Εικόνα 22. Παγκόσμιος ιονοσφαιρικός χάρτης από το κέντρο ανάλυσης CODE για την ημέρα 181, 2012 και παγκόσμιο χρόνο 00:00 UTC (https://www.aiub.unibe.ch/research/code_analysis_center/global_ionosphere_maps_produced_by_code/index_eng.html)



Εικόνα 23. Γραμμική παρεμβολή χρησιμοποιώντας τις τέσσερις πλησιέστερες τιμές E_{ij} (Schaer & Gurtner, 2015)

4.5.5 Μοντέλα Βαθιάς Εκμάθησης

Ένας τρόπος αντιμετώπισης της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης αποτελεί η πρόβλεψη της κατάστασης της ιονόσφαιρας μεταξύ του δέκτη και του δορυφόρου σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Για την εκτίμηση της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης χωρικά και χρονικά στο μέλλον απαιτούνται δεδομένα από προηγούμενες καταστάσεις της. Για να εξαχθεί αυτή η μελλοντική κατάσταση της ιονόσφαιρας θα πρέπει να υλοποιηθεί ένα μοντέλο μέσα από την εκπαίδευση ενός αλγορίθμου, το οποίο θα δέχεται από τον χρήστη ως δεδομένα εισόδου παραμέτρους που σχετίζονται με την ιονοσφαιρική καθυστέρηση και ως δεδομένα εξόδου την ιονοσφαιρική καθυστέρηση, ώστε να βρεθεί η γενική σχέση που συνδέει τα δεδομένα εισόδου και με τα δεδομένα εξόδου.

Για την υλοποίηση του μοντέλου αυτού μπορούν να εφαρμοστούν μοντέλα βαθιάς εκμάθησης (Deep Learning Models). Στα μοντέλα αυτά συμπεριλαμβάνεται η αρχιτεκτονική των ανατροφοδοτούμενων νευρωνικών δικτύων (Recurrent Neural Networks, RNN) με μακρά βραχυπρόθεσμη μνήμη (Long Short-Term Memory, LSTM). Η αρχιτεκτονική LSTM ενδείκνυται για μοντελοποίηση εξαρτήσεων μεγάλης εμβέλειας και στην προσπάθεια εύρεσης συσχετίσεων στις χρονικές σειρές, καθιστώντας την ιδανική για την μοντελοποίηση της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης. Υλοποίηση μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής αποτελεί το μοντέλο DLTEC (Deep Learning TEC model) για την πρόβλεψη του VTEC χωρικά και χρονικά στο μέλλον (Kaselimi, et al., 2020) με ακρίβεια 1.5 TECU, η οποία είναι λίγο καλύτερη από την ακρίβεια των GIMs (2.0-3.0 TECU).

4.6 Γραμμικοί συνδυασμοί

Για να δημιουργηθεί ένας γραμμικός συνδυασμός μεταξύ παρατηρήσεων κώδικα ή μεταξύ παρατηρήσεων φάσης, ουσιαστικά υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος επιλέγοντας αυθαίρετες σταθερές, ώστε να δοθούν βάρη στις παρατηρήσεις. Έστω οι παρατηρήσεις κώδικα P1, P2 και P5, η νέα παρατήρηση κώδικα P διαμορφώνεται ως εξής (Xu, 2007)

$$P = \frac{n_1 P_1 + n_2 P_2 + n_5 P_5}{n_1 + n_2 + n_5} \quad 4.32$$

Η τυπική απόκλιση της νέας παρατήρησης ,αν εφαρμοστεί στην σχέση 4.32 νόμος μετάδοσης σφαλμάτων, είναι

$$\sigma_c^2 = \frac{1}{(n_1 + n_2 + n_5)^2} (n_1^2 \sigma_1^2 + n_2^2 \sigma_2^2 + n_5^2 \sigma_5^2) \quad 4.33$$

με

$$\sigma_c^2 \geq m \cdot \min\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_5^2\}, \quad m = 2,3 \quad 4.34$$

σχέση που προκύπτει να ληφθεί υπόψη η ανισότητα για τον αριθμητικό και τετραγωνικό μέσο όρο (Bronštejn, 2007). Επιπλέον ο γραμμικός συνδυασμός μεταξύ παρατηρήσεων φάσης φ_1 , φ_2 και φ_5 δίνεται από την σχέση

$$\varphi = \frac{n_1 \varphi_1 + n_2 \varphi_2 + n_5 \varphi_5}{n_1 + n_2 + n_5} \quad 4.35$$

ή

$$\Phi = \frac{n_1 f_1 \lambda_1 \Phi_1 + n_2 f_2 \lambda_2 \Phi_2 + n_5 f_5 \lambda_5 \Phi_5}{f^2} \quad 4.36$$

με

$$f = n_1 f_1 + n_2 f_2 + n_5 f_5 \quad 4.37$$

Χρησιμοποιώντας τον νόμο μετάδοσης σφαλμάτων στην σχέση που δίνει την μέτρηση φάσης σε μέτρα προκύπτει η τυπική απόκλιση της νέας παρατήρησης

$$\sigma_p^2 = \frac{m_1^2 f_1^2 \sigma_1^2 + m_2^2 f_2^2 \sigma_2^2 + m_5^2 f_5^2 \sigma_5^2}{f^2} \quad 4.38$$

με

$$\sigma_p^2 \geq k \cdot \min\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_5^2\}, \quad k = 2,3 \quad 4.39$$

σχέση που προκύπτει να ληφθεί υπόψη η ανισότητα για τον αριθμητικό και τετραγωνικό μέσο όρο (Bronštejn, 2007). Συνεπώς, από τις σχέσεις 4.34 και 4.39 συνεπάγεται ότι στους συνδυασμούς των παρατηρήσεων φάσης και κώδικα ο θόρυβος αυξάνεται.

4.6.1 GRAPHIC

Στις αδιαφοροποίητες και ασυσχέτιστες παρατηρήσεις σε μία συχνότητα η ιονοσφαιρική καθυστέρηση απαλείφεται χρησιμοποιώντας ως παρατήρηση τον μέσο όρο μεταξύ της παρατήρησης κώδικα και φάσης (Su, et al., 2019). Συγκεκριμένα, επειδή η ιονοσφαιρική καθυστέρηση είναι θετική στις μετρήσεις φάσης και αρνητική στις μετρήσεις κώδικα οι δύο όροι απαλείφονται (σχέση 4.40).

$$I_{f,\phi} + I_{f,P} = 0 \Rightarrow -\frac{A_1}{f_j^2} + \frac{A_1}{f_j^2} = 0 \quad 4.40$$

με

$$A_1 = \int 40.3 N_e dl$$

Προσθέτοντας λοιπόν τις γραμμικοποιημένες εξισώσεις φάσεις και κώδικα μεταξύ τους και λαμβάνοντας τον μέσο όρο τους, προκύπτει ο παρακάτω συνδυασμός ανεξάρτητος της ιονόσφαιρας (Su, et al., 2019)

$$\begin{bmatrix} \frac{(p_{r,1}^{s,1} + \Phi_{r,1}^{s,1})}{2} - \tilde{\rho}_r^s \\ \vdots \\ \frac{(p_{r,1}^{s,m} + \Phi_{r,1}^{s,m})}{2} - \tilde{\rho}_r^s \end{bmatrix} = [-\mathbf{u}_r^s \quad \mathbf{1} \quad M_W \quad \mathbf{R1}] \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ d\bar{t}_r \\ Z_W \\ \bar{N}_{r,1}^s \end{bmatrix} + \varepsilon_{P,\phi}^s, \mathbf{Q}_L \quad 4.41$$

με

$$\begin{cases} d\bar{t}_r = dt_r + \frac{d_{r,1}^s}{2} + \lambda_1 \cdot \frac{b_1^s}{2} \\ \bar{N}_{r,1}^s = 0.5 \cdot (\lambda_1 (N_{r,1}^s - b_1^s) + d_{IF_{12}}^s / \lambda_1) \end{cases}$$

όπου

$\varepsilon_{P,\phi}^s$: ο συνδυασμένος θόρυβος και η πολυανάκλαση των παρατηρήσεων ψευδοαπόστασης και φάσης.

Ο παραπάνω γραμμικός συνδυασμός ονομάζεται Group and Phase Ionosphere Correction (GRAPHIC). Πλεονέκτημα του συνδυασμού είναι ότι μειώνονται κατά έναν συντελεστή 0.5 τα σφάλματα και biases της ψευδοαπόστασης, ενώ ως μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η εισαγωγή των σφαλμάτων της παρατήρησης φάσης με έναν συντελεστή βάρους 0.5 (Teunissen & Montenbruck, 2017).

4.6.2 Γραμμικός συνδυασμός ελευθέρων ιονόσφαιρας

Στις παρατηρήσεις κώδικα και φάσης σε δύο συχνότητες πολλαπλασιάζοντας την ιονοσφαιρική καθυστέρηση με το τετράγωνο της αντίστοιχης συχνότητας και έπειτα αφαιρώντας τους νέους όρους που προκύπτουν για κάθε συχνότητα (σχέσεις 4.42 και 4.43), μπορεί να απαλειφθεί το σφάλμα της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης τόσο στις παρατηρήσεις φάσης όσο και στις παρατηρήσεις κώδικα (Xu, 2007).

$$f_1^2 I_{1,\phi} - f_2^2 I_{2,\phi} = 0 \quad 4.42$$

$$f_1^2 I_{1,P} - f_2^2 I_{2,P} = 0 \quad 4.43$$

Για να έχουν οι παραπάνω συνδυασμοί την έννοια της παρατήρησης κώδικα και φάσης αντίστοιχα, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο σταθμισμένος μέσος, δηλαδή

$$\frac{f_1^2 I_{1,\Phi} - f_2^2 I_{2,\Phi}}{f_1^2 - f_2^2} = 0 \quad 4.44$$

$$\frac{f_1^2 I_{1,P} - f_2^2 I_{2,P}}{f_1^2 - f_2^2} = 0 \quad 4.45$$

με συχνότητα και μήκος κύματος της νέας παρατήρησης

$$f = \frac{f_1^2 f_1 - f_2^2 f_2}{f_1^2 - f_2^2}$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Συνεπώς, ο γραμμικός συνδυασμός ελευθέρων ιονόσφαιρας (Ionosphere-free combination) (Su, et al., 2019) για παρατηρήσεις κώδικα και φάσης εκφράζεται από την σχέση

$$\begin{bmatrix} a_{mn}^s \cdot P_{r,1}^{s,1} + \beta_{mn}^s \cdot P_{r,2}^{s,1} - \tilde{\rho}_r^s \\ a_{mn}^T \cdot \Phi_{r,1}^{s,1} + \beta_{mn}^s \cdot \Phi_{r,2}^{s,1} - \tilde{\rho}_r^s \\ \vdots \\ a_{mn}^s \cdot P_{r,1}^{s,m} + \beta_{mn}^s \cdot P_{r,2}^{s,m} - \tilde{\rho}_r^s \\ a_{mn}^T \cdot \Phi_{r,1}^{s,m} + \beta_{mn}^s \cdot \Phi_{r,2}^{s,m} - \tilde{\rho}_r^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -u_r^s & 1 & M_W & R1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ d\bar{t}_r \\ Z_W \\ \bar{N}_{r,1}^{s,T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon \\ e \end{bmatrix}, Q_L \quad 4.46$$

με

$$\begin{cases} d\bar{t}_r = dt_r + d_{r,IF12} \\ \bar{N}_{r,IF} = (a_{mn}^s \cdot \lambda_1^s \cdot N_{r,1}^s + \beta_{mn}^s \cdot \lambda_2^s \cdot N_{r,2}^s + b_{r,IF}^s - b_{IF}^s - d_{r,IF}^s + d_{IF}^s) / \lambda_1^s \end{cases}$$

Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί ότι ο θόρυβος των παρατηρήσεων μπορεί να αυξηθεί κατά έναν παράγοντα 3 ή 2.6 για σήματα που έχουν μεγάλο διαχωρισμό μεταξύ τους στις συχνότητες, όπως είναι για παράδειγμα τα σήματα L1/L2 του συστήματος GPS ή τα σήματα E1/E5a του συστήματος Galileo αντίστοιχα (Teunissen & Montenbruck, 2017). Στην περίπτωση όμως που οι συχνότητες των σημάτων δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ τους, τότε ο θόρυβος της παρατήρησης αυξάνεται περίπου κατά έναν παράγοντα 16.6 και 27.5 για τις συχνότητες L2/L5 και E5a/E5b των συστημάτων GPS και Galileo αντίστοιχα (Teunissen & Montenbruck, 2017). Οι προηγούμενοι αυξητικοί παράγοντες μπορούν να αποδειχθούν εύκολα αν για παράδειγμα θεωρηθεί η ίδια τυπική απόκλιση σ και για τις δύο συχνότητες και στην συνέχεια εφαρμοστεί νόμος μετάδοσης σφαλμάτων στην σχέση 4.45.

$$\sigma_{IF} = \sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}} \sigma \quad 4.47$$

4.7 Εκτίμηση Ιονοσφαιρικής Καθυστέρησης

Η ιονοσφαιρική καθυστέρηση μπορεί να εκτιμηθεί εφαρμόζοντας την μέθοδο PPP (Ge et al. 2017) και χρησιμοποιώντας το μοντέλο των αδιαφοροποιήτων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων κώδικα και

φάσης σε μία ή δύο συχνότητες. Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι ο θόρυβος των παρατηρήσεων δεν αυξάνεται όπως στην περίπτωση των γραμμικών συνδυασμών.

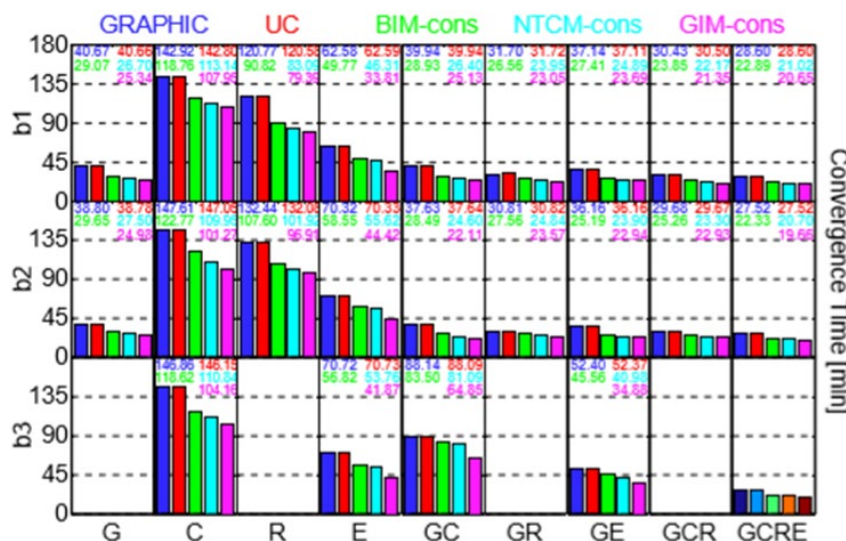
Συγκεκριμένα, εφαρμόζοντας τις σχέσεις 3.6-3.7 του Κεφαλαίου 3, οι μη βαθμονομημένες καθυστερήσεις του κώδικα για τον δέκτη απορροφώνται από το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη για το μοντέλο των αδιαφοροποίητων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων κώδικα και φάσης σε μία συχνότητα.

Αντίθετα, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 3.8-3.9 του Κεφαλαίου 3 για παρατηρήσεις κώδικα και φάσης σε δύο συχνότητες, οι μη βαθμονομημένες καθυστερήσεις κώδικα του δέκτη απορροφώνται από το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη και από την ιονοσφαιρική καθυστέρηση. Το τελευταίο όμως, αποτελεί και μειονέκτημα ως προς την ανάκτηση του VTEC χωρίς την συμβολή των DCBs του δέκτη και του δορυφόρου (σχέση 4.48). Για να είναι δυνατή η ανάκτηση του VTEC αμερόληπτα, τότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί εξωτερική πληροφορία για τα DCBs του δορυφόρου και του δέκτη.

$$\bar{I}_{r,1}^{s,T} = I_{r,1}^{s,T} + \beta_{12}^T \cdot (DCB_{r,P_1P_2}^T - DCB_{P_1P_2}^{s,T}) \quad 4.48$$

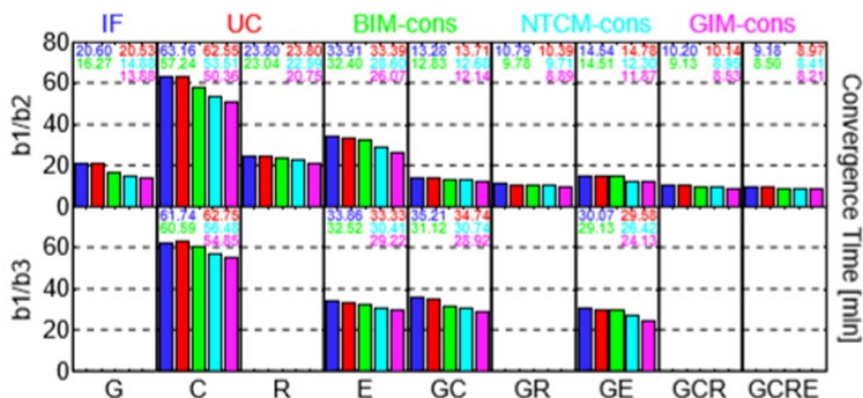
Σύγκριση των μεθόδων UC (αδιαφοροποίητες και ασυσχέτιστες παρατηρήσεις κώδικα και φάσης), GRAPHIC και IF (γραμμικός συνδυασμός ελευθέρως ιονόσφαιρας) από δεδομένα 10 σταθμών του δικτύου MGEX για την περίοδο 1 έως 30 Σεπτεμβρίου (Su, et al., 2019), ανέδειξε τα εξής συμπεράσματα

PPP σε μία συχνότητα: Επίτευξη παρόμοιας απόδοσης χρησιμοποιώντας τις μεθόδους UC και GRAPHIC. Οι μέσοι χρόνοι σύγκλισης μειώνονται κατά 15.2%, 24,8% και 28.6% αν χρησιμοποιηθούν ιονοσφαιρικά μοντέλα BIM, NTCM και GIM αντίστοιχα, σχετικά ως προς την μέθοδο UC. Επίσης, η μέθοδος UC χρησιμοποιώντας το ιονοσφαιρικό μοντέλο GIM ως ιονοσφαιρική δέσμευση επιτυγχάνει την καλύτερη απόδοση στην ακρίβεια θέσης.



Εικόνα 24. Μέσος χρόνος σύγκλισης διαφόρων σεναρίων για PPP σε μία συχνότητα για δεδομένα τριάντα ημερών από δέκα σταθμούς (Su, et al., 2019)

PPP σε δύο συχνότητες: Επίτευξη παρόμοιας απόδοσης για τις μεθόδους UC και IF. Οι μέσοι χρόνοι σύγκλισης μειώνονται κατά 5.2%, 6.2% και 8.5% για τα ιονοσφαιρικά μοντέλα BIM, NTCM και GIM αντίστοιχα, ως προς την μέθοδο UC. Επίσης, η μέθοδος UC χρησιμοποιώντας ιονοσφαιρικό μοντέλο GIM ως ιονοσφαιρική δέσμευση επιτυγχάνει την καλύτερη απόδοση στην ακρίβεια θέσης.

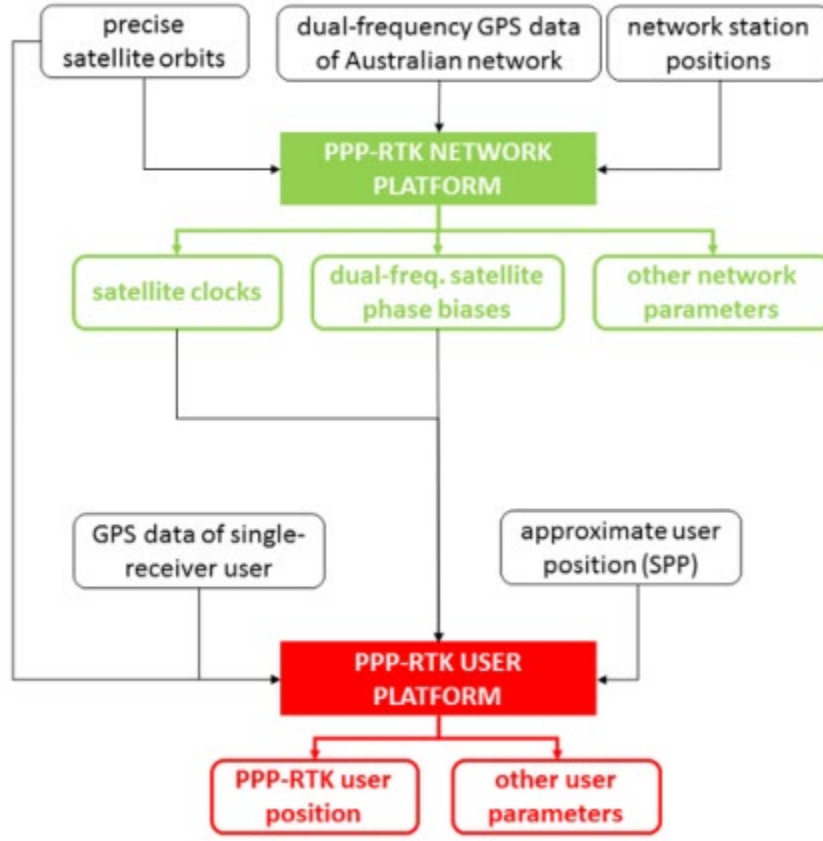


Εικόνα 25. Μέσος χρόνος σύγκλισης διαφόρων σεναρίων για PPP σε δύο συχνότητες για δεδομένα τριάντα ημερών από δέκα σταθμούς (Su, et al., 2019)

4.7.1 Δίκτυο PPP-RTK

PPP-RTK (Precise Point Positioning-Real Time Kinematic) είναι η μέθοδος στην οποία η ακέραια επίλυση των ασαφειών φάσης επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό θέσης στον χώρο (Psychas, et al., 2018). Συγκεκριμένα, μέσα από ένα δίκτυο σταθμών παρέχονται στον χρήστη όχι μόνο ακριβή προϊόντα τροχιών και χρονομέτρων του δορυφόρου αλλά και δεδομένα bias φάσης δορυφόρου, ιονόσφαιρας και τροπόσφαιρας (Σχήμα 1). Με αυτόν τον τρόπο οι ασάφειες φάσης από την πλευρά του χρήστη που χρησιμοποιεί το ίδιο μοντέλο με αυτό του δικτύου PPP-RTK μπορούν να επιλυθούν γρήγορα ή και στιγμιαία επιτυγχάνοντας ακρίβεια μερικών εκατοστών.

Η επιλογή του δικτύου PPP-RTK γίνεται για τους εξής δύο λόγους. Πρώτον, λόγω της ικανότητας της μεθόδου PPP-RTK να επιλύει τις ασάφειες φάσεις στην ακέραια τιμή τους η εκτίμηση των ιονοσφαιρικών καθυστερήσεων είναι πιο ακριβής (Psychas, et al., 2018). Στην ακρίβεια αυτή συμβάλει και η χρήση, ως βάση της μεθόδου PPP-RTK, το μοντέλο των αδιαφοροποίητων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων κώδικα και φάσης, σε δύο συχνότητες $f = 1, 2$ για ένα πλήθος δεκτών $r = 1, 2, \dots, n$ και δορυφόρων $s = 1, 2, \dots, m$, που είναι πιο ακριβής από άλλες μεθόδους, όπως για παράδειγμα η μέθοδος CCL. Δεύτερον, στην περίπτωση που ιονοσφαιρικές διορθώσεις (ακρίβειας 5 cm) μεταδίδονται στον χρήστη PPP-RTK ως εξωτερική πληροφορία (fixed-ιονοσφαιρικό μοντέλο), ο χρόνος που απαιτείται για την ανάκτηση αξιόπιστων ακέραιων ασαφειών φάσης (Time-To-First-Fixed, TTFF) με ένα διάστημα εμπιστοσύνης 99.5% από την μεριά του χρήστη PPP-RTK, μειώνεται σε μεγάλο βαθμό (Psychas, et al., 2018).



Σχήμα 1. Σχηματική αναπαράσταση δικτύου PPP-RTK

Για να είναι δυνατή η εκτίμηση των ακέραιων ασαφειών φάσης μαζί με τις ιονοσφαιρικές καθυστερήσεις και τα bias φάσης των δορυφόρων θα πρέπει κάποιες παράμετροι να απεικονιστούν σε κάποιες άλλες, καθώς δεν μπορούν να εκτιμηθούν όλες οι άγνωστες παράμετροι ανεξάρτητα λόγω αδυναμία συστήματος. Η αδυναμία αυτή του συστήματος των εξισώσεων παρατήρησης μπορεί να αναγνωριστεί και να απομακρυνθεί εφαρμόζοντας την θεωρία S-system (Odijk, et al., 2016) και οι μη εκτιμώμενες παράμετροι του μοντέλου εκφράζονται από την βάση S (Common Clocks Receiver S-basis).

Η νέα παραμετροποίηση των εκτιμώμενων παραμέτρων καθώς και αυτές που δεν εκτιμώνται (S-basis) του δικτύου PPP-RTK παρουσιάζεται στον Πίνακα 9. Οι όροι d_{GF} , και d_{IF} , δηλαδή το bias κώδικα του δέκτη ή δορυφόρου λόγω του συνδυασμού ελευθέρας γεωμετρίας και λόγω του συνδυασμού ελευθέρας ιονόσφαιρας αντίστοιχα, προκύπτουν από την σχέση 4.49 που δίνει το bias κώδικα ως συνδυασμό του bias κώδικα ελευθέρας ιονόσφαιρας και ελευθέρας γεωμετρίας.

$$d_{j,j} = d_{IF} - \mu_j d_{GF} = \left(\frac{\mu_2}{\mu_2 - \mu_1} d_{,1} - \frac{\mu_2}{\mu_2 - \mu_1} d_{,2} \right) - \left[\mu_j \left(\frac{1}{\mu_2 - \mu_1} \right) (d_{,1} - d_{,2}) \right] \quad 4.49$$

Πίνακας 9. Εκτιμώμενες παράμετροι του δικτύου PPP-RTK για δύο συχνότητες χρησιμοποιώντας το CC-R S-basis, με το σύμβολο p να εκφράζει τον δέκτη/δορυφόρο αναφοράς (*Psychas, et al., 2018*)

Εκτιμώμενες παράμετροι	Ερμηνεία	Συνθήκες
Χρονόμετρο δέκτη	$d\bar{t}_r = (dt_r + d_{r,IF}) - (dt_p + d_{p,IF})$	$\forall j, r \neq p$
Χρονόμετρο δορυφόρου	$d\bar{t}^s = (dt^s + d_{,IF}^s) - (dt_p + d_{p,IF})$	$\forall j, s$
Ιονοσφαιρική καθυστέρηση	$\bar{I}_r^s = I_r^s + d_{r,GF} - d_{GF}^s$	$\forall j, r, s$
Bias φάσης δέκτη	$\bar{b}_{r,j} = \left(b_{r,j} - \frac{1}{\lambda_j} [d_{r,IF} - \mu_j d_{r,GF}] + a_{r,j}^p \right) - \left(b_{p,j} - \frac{1}{\lambda_j} [d_{p,IF} - \mu_j d_{p,GF}] + a_{p,j}^p \right)$	$\forall j, r \neq p$
Bias φάσης δορυφόρου	$\bar{b}_j^s = \left(b_j^s - \frac{1}{\lambda_j} [d_{IF}^s - \mu_j d_{r,GF}] + a_{p,j}^p \right) - \left(b_{p,j} - \frac{1}{\lambda_j} [d_{p,IF} - \mu_j d_{p,GF}] - a_{p,j}^s \right)$	$\forall j, s$
Ασάφεια φάσης	$\bar{a}_{r,j}^s = (a_{r,j}^s - a_{r,j}^p) - (a_{p,j}^s - a_{p,j}^p)$	$\forall j, r \neq p, s \neq p$
S-basis	$dt_p, d_{r,j}, d_j^s, b_{p,j}, a_{r,j}^p, a_{p,j}^s$	$\forall j, r, s$

Εφαρμόζοντας στην συνέχεια ο χρήστης του δικτύου PPP-RTK την ίδια παραμετροποίηση με αυτήν του Πίνακα 9, ενώ λαμβάνει παράλληλα τις εξωτερικές διορθώσεις χρονομέτρων και bias φάσης των δορυφόρων από το δίκτυο, το σύστημα των εξισώσεων θα γίνει πλήρη βαθμού, δηλαδή οι ασάφειες φάσης μπορούν να επιλυθούν στην ακέραια τιμή τους (σχέσεις 4.50 και 4.51).

$$\bar{\Phi}_{r,j}^s = \Phi_{r,j}^s + u_r^{s,T} x + d\bar{t}^s + \lambda_j \bar{b}_j^s = u_r^{s,T} x + d\bar{t}_r + m_r^s T_r - \mu_j \bar{I}_r^s + \lambda_j (\bar{b}_{r,j} + \bar{a}_{r,j}^s) \quad 4.50$$

$$\bar{P}_{r,j}^s = P_{r,j}^s + u_r^{s,T} x + d\bar{t}^s = u_r^{s,T} x + d\bar{t}_r + m_r^s T_r + \mu_j \bar{I}_r^s \quad 4.51$$

Μετάπειτα η ιονόσφαιρα, χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις ιονόσφαιρας από η δέκτες του δικτύου PPP-RTK, μοντελοποιείται εφαρμόζοντας το άθροισμα ενός πολωνύμου δύο διαστάσεων ως συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους και του τοπικού χρόνου και μία πεπερασμένη σειρά Fourier

συναρτήσει του τοπικού χρόνου (Κεφάλαιο 5.2.3). Πρώτα πρέπει να γίνει η υπόθεση του μονοστρωματικού ιονοσφαιρικού μοντέλου, ώστε το STEC να εκφράζεται ως το προϊόν μεταξύ του VTEC και της συνάρτησης απεικόνισης $M(E)$ στο σημείο διάτρησης IPP (Κεφάλαιο 4.4). Αυτό γίνεται για να είναι δυνατή η ταυτόχρονη εκτίμηση του VTEC και των DCBs δορυφόρου-δέκτη.

$$\bar{I}(i) = M(i)A(i)w(i) - \frac{\mu_1}{\mu_2 - \mu_1} [(I_n \otimes e_m)d_r - (I_n \otimes e_m)d^s] \quad 4.52$$

με

$$\bar{I} = [\bar{I}_1, \dots, \bar{I}_n]^T$$

$$\bar{I}_r = [\bar{I}_r^1, \dots, \bar{I}_r^m]^T$$

$$\bar{d}_r = [\bar{d}_1, \dots, \bar{d}_n]$$

$$\bar{d}^s = [\bar{d}_1, \dots, \bar{d}_m]$$

όπου

w : ο πίνακας των εκτιμώμενων παραμέτρων του τοπικού μοντέλου VTEC

A_r^s : ο πίνακας με τους συντελεστές των εκτιμώμενων παραμέτρων του μοντέλου VTEC (εποχή i)

M : ο διαγώνιος πίνακας $m \times l$ που περιλαμβάνει τις συναρτήσεις απεικόνισης για κάθε εποχή i

$\bar{d}_r$: τα εκτιμώμενα DCBs των δεκτών

$\bar{d}^s$: τα εκτιμώμενα DCBs των δορυφόρων

e_n : ο πίνακας $1 \times n$ με τιμές την μονάδα

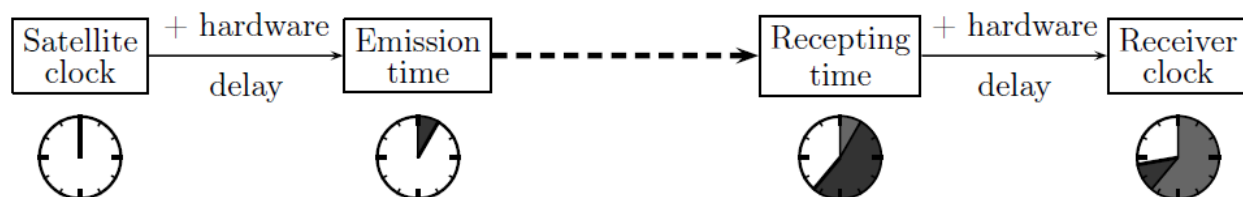
I_n : ο μοναδιαίος πίνακας τάξης n

$\otimes$: εξωτερικό γινόμενο

Κεφάλαιο 5

5.1 Biases

Το hardware των συστημάτων GNSS αποτελεί πηγή συστηματικών σφαλμάτων λόγω των ατελειών και των φυσικών περιορισμών τους. Τα σφάλματα αυτά, τα οποία αναφέρονται ως bias, εμποδίζουν την ταυτόχρονη πραγματοποίηση γεγονότων κατά την μετάδοση του σήματος από τον δορυφόρο ή κατά την λήψη του σήματος από τον δέκτη, επηρεάζοντας τις παρατηρήσεις κώδικα και φάσης (Εικόνα 26).



Εικόνα 26. Καθυστερήσεις λόγω hardware του δορυφόρου και του δέκτη (https://www.aiub.unibe.ch/research/gnss_research/handling_of_gnss_biases/index_eng.html)

Το bias του δορυφόρου οφείλεται στην διαδικασία αναπαραγωγής και μετάδοσης του σήματος, οι οποίες διαφέρουν για κάθε σήμα, ενώ το bias του δέκτη οφείλεται στις διαφορετικές διαδρομές που ακολουθεί το κάθε σήμα κατά την διαδικασία της λήψης και της συσχέτισης του σήματος. Για αυτούς τους λόγους χρησιμοποιείται και ο δείκτης j στις παραμέτρους $d_{r,j}^T(t)$ και $d_j^S(t)$ των παρατηρήσεων κώδικα και φάσης (2.1 και 2.2 αντίστοιχα), για να εκφραστεί αυτή η εξάρτηση από την συχνότητα. Ο δείκτης T εκφράζει την εξάρτηση των biases hardware του δέκτη από το δορυφορικό σύστημα ακόμη και για φέρουσες συχνότητες που ανήκουν σε διαφορετικά συστήματα αλλά σε επικαλυπτόμενες ζώνες συχνοτήτων, όπως συμβαίνει με την συχνότητα L1 του συστήματος GPS και την συχνότητα E1 του συστήματος Galileo. Επίσης, τα biases κώδικα του δέκτη και του δορυφόρου εξαρτώνται, λόγω της μεταβολής των ιδιοτήτων των μηχανημάτων του δορυφόρου και του δέκτη, από την θερμοκρασία.

Το bias κώδικα του δέκτη θεωρείται ίδιο για όλα τα παρακολουθούμενα σήματα του ίδιου τύπου από ένα δορυφορικό σύστημα και το bias του δορυφόρου θεωρείται ίδιο για κάθε δέκτη που παρακολουθεί το αντίστοιχο σήμα.

Η τελευταία αυτή υπόθεση συνεπάγει την διαχωριστικότητα του bias σε έναν όρο εξαρτώμενο από τον δέκτη και σε έναν όρο εξαρτώμενο από τον δορυφόρο, με τους αντίστοιχους περιορισμούς βέβαιοι. Συγκεκριμένα, η υλοποίηση διαφορετικών συσχετιστών μεταξύ των δεκτών μπορεί να ανταποκριθεί διαφορετικά σε τυχόν παραμορφώσεις του σήματος στον δορυφόρο προκαλώντας διαφορετικές μεταβολές στις καθυστερήσεις των μηχανημάτων του δέκτη, οι οποίες δεν μπορούν να μετριάσουν από μία κοινή παράμετρο.

Επιπλέον, τα biases κώδικα διαφέρουν ανάλογα με το ποια προσέγγιση ακολουθείται για την μετάδοση των σημάτων GNSS. Οι δορυφόροι των σχηματισμών που υιοθετούν την προσέγγιση FDMA δεν μεταδίδουν τα σήματα τους στην ίδια συχνότητα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να προκαλούνται διαφορετικές καθυστερήσεις λόγω των φίλτρων και των διαφόρων τμημάτων της

αλυσίδας επεξεργασίας των σημάτων (αντένα, καλώδια κτλ.). Επίσης, αυτό που κάνει πιο ενδιαφέρον αυτά τα biases είναι η δυσκολία διαχωρισμού τους σε έναν όρο εξαρτώμενο από τον δορυφόρο και έναν εξαρτώμενο από τον δέκτη, καθώς η μεταβλητότητα τους λόγω χαρακτηριστικών εξαρτημάτων και θερμοκρασίας τα κάνουν να διαφέρουν ακόμη και σε δέκτες του ίδιου τύπου.

Όσον αφορά τα biases φάσης, ισχύουν αυτά που αναφέρθηκαν για τα bias κώδικα. Το κύριο πρόβλημα που προκύπτει από αυτά είναι ότι αποτρέπουν την επίλυση των ασαφειών φάσης στην ακέραια τιμή τους, καθώς το δεκαδικό μέρος των biases φάσης ενώνεται με τις ακέραιες ασάφειες. Τα biases φάσης γενικά μπορούν να αντιμετωπιστούν εφαρμόζοντας διπλές διαφορές ως προς έναν σταθμό αναφοράς στον ακριβή εντοπισμό ή να εκτιμηθούν από ένα περιφερειακό ή παγκόσμιο δίκτυο αναφοράς. Παρόλα αυτά όμως, τα biases φάσης για τα σήματα FDMA δεν μπορούν να απαλειφθούν στις σχετικές μεθόδους καθώς παρουσιάζουν διαφορετικές μεταβολές σε δέκτες διαφορετικών τύπων. Σε αντίθεση όμως με τα biases κώδικα των σημάτων FDMA αυτά δεν εξαρτώνται από την θερμοκρασία και τα εξαρτήματα, αλλά από το τμήμα ψηφιακής επεξεργασίας των σημάτων.

Τέλος, τα biases δεν μπορούν να εκτιμηθούν στην απόλυτη τιμή τους, αλλά μπορούν να εκτιμηθούν διαφορές των καθυστερήσεων των σημάτων σχετικά ως προς την καθυστέρηση ενός σήματος αναφοράς.

5.2 Differential Code Bias

Ο γραμμικός συνδυασμός ανεξάρτητος της γεωμετρίας (Κεφάλαιο 5.2.2) έχει την ιδιότητα να απαλείφει τους όρους της γεωμετρικής απόστασης, των σφαλμάτων των ρολογιών και της τροποσφαιρικής καθυστέρησης, αφού προκύπτει από την διαφορά μεταξύ δύο σημάτων που συλλέγονται από τον ίδιο δορυφόρο.

Στον γραμμικό συνδυασμό αυτόν, υπάρχει ένας όρος (σχέση 5.1) που εκφράζει την χρονική καθυστέρηση μεταξύ δύο σημάτων που μεταδίδονται από τον ίδιο δορυφόρο (Håkansson, et al., 2016). Η καθυστέρηση αυτή αποτελεί έναν συνδυασμό καθυστερήσεων του hardware του δορυφόρου και του hardware του δέκτη κατά την διαδικασία της μετάδοσης και της λήψης των σημάτων αντίστοιχα.

$$DCB = d_{r,2}^{s,T} - d_2^{s,T} - d_{r,1}^{s,T} + d_1^{s,T} \quad 5.1$$

Ο όρος αυτός ονομάζεται Differential Code Bias (DCB) και οφείλεται στην διαφορετική δομή μεταξύ των σημάτων αλλά και στην διαφορετική φέρουσα συχνότητα που χρησιμοποιεί το κάθε σήμα. Αναλυτικότερα τέτοια χρονική καθυστέρηση παρατηρείται μεταξύ των κωδίκων C/A και P χρησιμοποιώντας την φέρουσα συχνότητα του μήκους κύματος L1.

Ο όρος DCB μπορεί να διακριθεί σε ένα όρο που σχετίζεται με τον δέκτη (σχέση 5.3) και σε έναν όρο που σχετίζεται με τον δορυφόρο (σχέση 5.4).

$$DCB = DCB_{r,P_1P_2}^{s,T} - DCB_{P_1P_2}^{s,T} \quad 5.2$$

$$DCB_{r,P_1P_2}^{s,T} = d_{r,2}^{s,T} - d_{r,1}^{s,T} \quad 5.3$$

$$DCB_{P_1P_2}^{s,T} = d_2^{s,T} - d_1^{s,T} \quad 5.4$$

όπου

$DCB_{r,P_1P_2}^{s,T}$: η διαφορά μεταξύ των διαφορετικών καθυστερήσεων hardware κώδικα των διαφορετικών σημάτων στον δέκτη

$DCB_{P_1P_2}^{s,T}$: η διαφορά μεταξύ των διαφορετικών καθυστερήσεων hardware κώδικα των διαφορετικών σημάτων στον δορυφόρο

Το bias αυτό εμφανίζεται στις εκτιμώμενες αποχές των χρονομέτρων των δορυφόρων που εκπέμπονται στο μήνυμα ναυσιπλοΐας ή στα προϊόντα χρόνου ακριβείας που μεταδίδονται από την υπηρεσία IGS (Teunissen & Montenbruck, 2017). Συγκεκριμένα, τα προϊόντα αυτά προκύπτουν από την διαφορά χρόνου μεταξύ του χρονομέτρου του δορυφόρου και του συστήματος χρόνου του σχηματισμού. Ο χρόνος συστήματος αναφέρεται σε ένα σήμα αναφοράς ή ένα συνδυασμό σημάτων, όπου ο συνδυασμός αυτός αντιστοιχεί στον γραμμικό συνδυασμό ελεύθερας ιονόσφαιρας. Τα bias των σημάτων αυτών όμως, επειδή δεν μπορούν να εκτιμηθούν, ενώνονται με τα προϊόντα χρονομέτρων των δορυφόρων (σχέση 5.5).

$$dt_{IF_{12}}^{s,T} = dt^{s,T} + (\alpha_{12}^T \cdot d_1^{s,T} + \beta_{12}^T \cdot d_2^{s,T}) = dt^{s,T} + \left[d_j^{s,T} + \frac{\mu_j^T}{\mu_2^T - \mu_1^T} \cdot \overbrace{(d_1^{s,T} - d_2^{s,T})}^{DCB_{12}^{s,T}} \right] \quad 5.5$$

Στην περίπτωση που ο χρήστης PPP χρησιμοποιεί τα ίδια σήματα που εφαρμόζονται για την δημιουργία των προϊόντων χρόνου των δορυφόρων, δεν χρειάζεται να ληφθούν περαιτέρω καθυστερήσεις κώδικα. Στην αντίθετη περίπτωση πρέπει να εφαρμοστούν DCBs δορυφόρων, ώστε να ληφθούν υπόψη διαφορές καθυστερήσεων μεταξύ των λαμβανόμενων σημάτων από τον δέκτη και των σημάτων αναφοράς των προϊόντων χρόνου.

Για παράδειγμα τα σήματα αναφοράς των προϊόντων χρόνου του συστήματος GPS είναι τα L1 P(Y) και L2P(Y). Αν ο χρήστης επεξεργάζεται παρατηρήσεις κώδικα L1 C/A(=C1C) και L1 P(Y)(=C1W), εφαρμόζοντας τον γραμμικό συνδυασμό ελεύθερας ιονόσφαιρας, τότε ένα επιπλέον bias πρέπει να ληφθεί υπόψη (σχέση 5.6) για να μπορούν να είναι συμβατά τα προϊόντα χρόνου των δορυφόρων ως προς τα χρησιμοποιούμενα σήματα (Teunissen & Montenbruck, 2017).

$$\frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} DCB_{C1C-C1W}^s \quad 5.6$$

Επιπλέον όπως αναλύθηκε και στο κεφάλαιο 5, επειδή η ιονοσφαιρική καθυστέρηση και τα DCBs εξαρτώνται από την συχνότητα, στην διαδικασία της επίλυσης εκτιμάται ο ενιαίος όρος τους λόγω αυτής της συσχέτισης τους. Στην περίπτωση που επιδιώκεται η εκτίμηση του VTEC πρέπει να διαχωριστούν σε δύο αυτοτελείς όρους, γιατί DCB της τάξης των 10 ns ισοδυναμεί περίπου με σφάλμα 30 TECU.

Συνοπτικά τα DCBs μπορούν να εκτιμηθούν

- χρησιμοποιώντας την παράμετρο Time Group Delay (TGD)
- χρησιμοποιώντας τους παγκόσμιους ιονοσφαιρικούς χάρτες
- με από κοινού εκτίμηση αυτών και της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης.

5.2.1 Time Group Delay

Time Group Delay (TGD) είναι η παράμετρος που εκφράζει την μη ταυτόχρονη διάδοση των διαφορών σημάτων από την κεραία του δορυφόρου λόγω καθυστερήσεων hardware. Επειδή οι εκπεμπόμενες διορθώσεις χρόνου του συστήματος GPS βασίζονται στον γραμμικό συνδυασμό ελεύθερας ιονόσφαιρας, η παράμετρος TGD εκφράζεται από μία κλιμακώμενη τιμή των DCBs των σημάτων L1P(Y) και L2P(Y). Η τιμή της παραμέτρου αυτής για το σύστημα GPS υπολογίζεται για το σήμα L2P(Y) σχετικά ως προς το σήμα L1P(Y) και μεταδίδεται ως διόρθωση στους χρήστες ψευδοαποστάσεων σε μία συχνότητα και ορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (Håkansson, et al., 2016; Wang, et al., 2019)

$$TGD_{L1P(Y),L2P(Y)} = \frac{1}{1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}} (t_{L1P(Y)} - t_{L2P(Y)}) \quad 5.7$$

Ο όρος $t_{L1P(Y)} - t_{L2P(Y)}$ μπορεί να αντικατασταθεί από τον όρο $-DCB_{C1W-C2W}$ στην σχέση 5.7 διαμορφώνοντας την ως εξής

$$DCB_{C1W-C2W} = \left(\frac{f_1^2}{f_2^2} - 1 \right) TGD_{L1P(Y),L2P(Y)} + C \quad 5.8$$

όπου,

t_s : εκφράζει την καθυστέρηση ομάδας του σήματος

C : σταθερά που εκφράζει το $DCB_{C1W-C2W}$ του δέκτη, καθώς μόνο το DCB δέκτη και δορυφόρου ως ενιαίου όρου είναι εφικτό να προσδιοριστεί από παρατηρήσεις GNSS

Παρόλα αυτά, ο διαχωρισμός της ενιαίας παραμέτρου DCB σε DCB δέκτη και DCB δορυφόρου μπορεί να επιτευχθεί αν εισαχθεί επιπλέον συνθήκη στην διαδικασία εκτίμησης, όπως είναι η συνθήκη του μηδενικού μέσου για τα DCBs των δορυφόρων ή αν για κάποιο δορυφόρο το DCB είναι γνωστό a-priori.

Πέρα από την παράμετρο TGD για το σύστημα GPS μεταδίδονται, μέσω του νέου μηνύματος πλοήγησης CNAV και διορθώσεις για το σήμα L1C/A-L5, διαμορφωμένο πάνω στην νέα συχνότητα L5 και το σήμα L2C, διαμορφωμένο πάνω στην συχνότητα L2, σχετικά ως προς το σήμα L1P(Y). Επιπλέον, τέτοιες διορθώσεις παρέχονται και για τα σήματα I και Q τα οποία είναι διαμορφωμένα πάνω στην συχνότητα L5, αλλά δεν λαμβάνονται από τους δέκτες MGEX καθιστώντας μη δυνατή την άμεση αποτίμηση τους. Οι διορθώσεις αυτές ονομάζονται Inter-Signal

Corrections (ISCs) και συνδέονται με τα αντίστοιχα DCBs από τις παρακάτω σχέσεις (Wang, et al., 2019)

$$ISC_{L1C/A} = t_{L1P(Y)} - t_{L1C/A} = -DCB_{C1C-C1W} \quad 5.9$$

$$ISC_{L2C} = t_{L1P(Y)} - t_{L2C} = DCB_{C1C-C2W} + DCB_{C2W-C2L} \quad 5.10$$

$$ISC_{L2I5} = t_{L1P(Y)} - t_{L5I5} \quad 5.11$$

$$ISC_{L5Q5} = t_{L1P(Y)} - t_{L5Q5} = -DCB_{C1C-C1W} + DCB_{C1C-C5Q} \quad 5.12$$

Στο δορυφορικό σύστημα Galileo διορθώσεις διαφοράς χρόνου μεταξύ σημάτων παρέχονται από την παράμετρο BGD (Broadcast Group Delay) μέσω του μηνύματος ναυσιπλοΐας. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι $BGD_{E1,E5a}$ και $BGD_{E1,E5b}$ εκφράζουν διαφορά χρόνου των σημάτων E5a και E5b αντίστοιχα ως προς το σήμα E1 (Teunissen & Montenbruck, 2017; Wang, et al., 2019). Οι σχέσεις που συνδέουν τις παραμέτρους BGD με τα αντίστοιχα DCBs είναι

$$BGD_{E1,E5a} = \frac{t_{E1} - t_{E5a}}{1 - \mu_{E1,E5a}} = \frac{DCB_{C1C-C5Q}}{1 - \mu_{E1,E5a}} \quad 5.13$$

$$BGD_{E1,E5b} = \frac{t_{E1} - t_{E5b}}{1 - \mu_{E1,E5b}} = \frac{DCB_{C1C-C7Q}}{1 - \mu_{E1,E5b}} \quad 5.14$$

Σε αντίθεση με το GPS οι αποχές των χρονομέτρων των δορυφόρων του GLONASS βασίζονται στην συχνότητα L1 (Teunissen & Montenbruck, 2017; Wang, et al., 2019) και διορθώσεις διαφοράς χρόνου μεταξύ σημάτων στις υπό-ζώνες L2 και L1 διατίθενται από το μήνυμα πλοήγησης και εκφράζονται από την παράμετρο $\Delta\tau_N$. Η παράμετρος $\Delta\tau_N$ βρίσκεται σε καλή συμφωνία με την αρνητική τιμή της παραμέτρου $DCB_{C1W-C2W}$ που παρέχεται από την υπηρεσία IGS (σχέση 5.15).

$$\Delta\tau_N = t_{L2} - t_{L1} = -DCB_{C1P-C2P} \quad 5.15$$

Παρόμοια, οι εκπεμπόμενες αποχές χρονομέτρου για το σύστημα BeiDou αναφέρονται στο σήμα B3I (Teunissen & Montenbruck, 2017; Wang, et al., 2019). Συνεπώς, δύο παράμετροι TGD είναι διαθέσιμες, η παράμετρος TGD1 για το σήμα B1I και η παράμετρος TGD2 για το σήμα B2I (σχέσεις 5.16 και 5.17).

$$TGD_1 = t_{B1} - t_{B3} = DCB_{C2I-C6I} \quad 5.16$$

$$TGD_2 = t_{B2} - t_{B3} = DCB_{C7I-C6I} \quad 5.17$$

Οι παράμετροι TGD/BGD και ISC του συστήματος GPS μπορούν να εξαχθούν από συνδυασμένα multi-GNSS αρχεία εκπεμπόμενων εφημερίδων της μορφής brdmddd0.yyp και από τα εκπεμπόμενα CNAV αρχεία εφημερίδων της μορφής brxddd0.yyx αντίστοιχα και είναι διαθέσιμα από την υπηρεσία CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System, <ftp://ftp.cddis.eosdis.nasa.gov/gnss/data/campaign/mgex/daily/rinex3/>). Παράλληλα οι μετατρεπόμενες παράμετροι TGD, BGD και ISC σε DCB παρέχονται σε μορφή Bias-SINEX

format v1.0 (Shraer, 2016) στην αρχειοθέτηση TGD στο ftp του κέντρου ανάλυσης CAS (<ftp://ftp.gipp.org.cn/product/dcb/tgd/>).

Πριν προηγηθεί οποιαδήποτε ανάλυση της ποιότητας των ανακτώμενων DCBs από τις εκπεμπόμενες παραμέτρους TGD/BGD/ISC και εκτιμώμενων DCBs από μετεπεξεργασία, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι συστηματικές αποχές μεταξύ των πρώτων και των τελευταίων λόγω διαφορετικών στρατηγικών επιλύσεων που εφαρμόζονται. Πιο ειδικά, τα εκτιμώμενα DCBs από το κέντρο ανάλυσης CAS εφαρμόζουν την συνθήκη του μηδενικού μέσου ώστε να μπορούν να εκτιμηθούν ανεξάρτητα τα DCBs δέκτη και δορυφόρου, ενώ οι εκπεμπόμενες καθυστερήσεις ομάδας του GPS αναφέρονται σε ένα καλιμπραρισμένο δέκτη αναφοράς. Ακόμη, τέτοιες συστηματικές αποχές μπορεί να εμφανιστούν ακόμη και αν ακολουθείται η ίδια στρατηγική επίλυση για τις εκπεμπόμενες καθυστερήσεις ομάδας και των εκτιμώμενων DCBs λόγω της χρήσης διαφορετικών δορυφόρων. Μία τέτοια περίπτωση αποτελούν οι εκπεμπόμενες παράμετροι BGD του Galileo. Οι αποχές αυτές λαμβάνονται υπόψη χρησιμοποιώντας την μέθοδο επανευθυγράμμισης των DCBs (Wang, Li, Montenbruck and Tang, 2019).

Ποιοτική αξιολόγηση των εκπεμπόμενων καθυστερήσεων ομάδας των συστημάτων GPS, Galileo και BeiDou-2/3 (Wang, et al., 2019) ως προς τα προϊόντα DCB του κέντρου ανάλυσης CAS για χρονική περίοδο 4 ετών (2014-2018) ανέδειξε για τις παραμέτρους TGD, $ISC_{L1C/A}$, ISC_{L5Q5} , συμφωνία της τάξης 0.25, 0.05 και 0.45 ns αντίστοιχα. Για την παράμετρο ISC_{L2C} καλύτερη συμφωνία επιτυγχάνεται για τον κώδικα C2L. Για τις παραμέτρους $BGD_{E1,E5a}$ και $BGD_{E1,E5b}$ προέκυψε συμφωνία της τάξης 0.4 και 0.3 ns για τους δορυφόρους που βρίσκονταν στην φάση επικύρωσης και τους δορυφόρους σε πλήρη επιχειρησιακή λειτουργία αντίστοιχα. Τέλος, για την παράμετρο TGD_1 του συστήματος BeiDou επιτυγχάνεται συμφωνία της τάξης των 0.45 ns και 0.96 ns για ολόκληρο τον σχηματισμό του BeiDou-2 (μετά τα τέλη Ιουλίου του 2017) και το BeiDou-3/3S αντίστοιχα.

5.2.2 Παγκόσμιοι ιονοσφαιρικοί χάρτες

Αν ληφθεί υπόψη η εξίσωση της ψευδοαπόστασης χωρίς τους όρους της πολυανάκλασης και των θορύβων των παρατηρήσεων για δύο διαφορετικά σήματα και συχνότητες S_1, S_2 και f_1, f_2 αντίστοιχα και στη συνέχεια παρθεί η διαφορά τους, προκύπτει ο συνδυασμός ελευθέρων γεωμετρίας (σχέση 5.18), όπου οι όροι που εκφράζουν την ιονοσφαιρική καθυστέρηση αναπτύσσονται σύμφωνα με την σχέση 4.25 του Κεφαλαίου 4.4, υιοθετώντας το μονοστρωματικό ιονοσφαιρικό μοντέλο.

$$\begin{aligned} P_{S_1} - P_{S_2} &= (I_{S_1} - I_{S_2}) + (d_{S_1} - d_{S_2}) \\ &= 40.31 \cdot \left(\frac{1}{f_{S_1}^2} - \frac{1}{f_{S_2}^2} \right) \cdot VTEC \cdot M(z) + DCB_{S_1-S_2} \end{aligned} \quad 5.18$$

Η μέθοδος που ακολουθείτε για την εκτίμηση των DCB περιλαμβάνει πρώτα την εκτίμηση των DCB δορυφόρου-δέκτη ως ενιαίου όρου και στην έπειτα την εκτίμηση κάθε όρου ξεχωριστά (Montenbruck, et al., 2014). Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται ο αριθμητικός μέσος (σχέση 5.19) για όλους τους συνεισφερόμενους σταθμούς και δορυφόρους, για η παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων διορθωμένες από την ιονοσφαιρική καθυστέρηση.

$$DCB_{S_1-S_2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(P_{S_1} - P_{S_2}) - \Delta I]_i \quad 5.19$$

Στην συνέχεια και αφού έχει προηγηθεί η υπόθεση ότι το DCB δορυφόρου (DCB^S) και το DCB του δέκτη (DCB_r) αποτελούν πλήρως ανεξάρτητοι όρους, αυτοί υπολογίζονται εφαρμόζοντας μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (σχέση 5.20). Επειδή όμως προκύπτει αδυναμία συστήματος, το άθροισμα των DCB^S για τους δορυφόρους του ίδιου δορυφορικού συστήματος δεσμεύεται να είναι ίσο με το μηδέν.

$$J = \|\mathbf{z} - \mathbf{A}\mathbf{x}^S - \mathbf{B}\mathbf{x}_r\|^2 \quad 5.20$$

με,

$$\mathbf{z} = (DCB^1, \dots, DCB^l)^T$$

$$\mathbf{x}_k = (DCB_r^1, \dots, DCB_r^m)$$

$$\mathbf{x}^S = (DCB^{S,1}, \dots, DCB^{S,n})$$

όπου,

$\mathbf{z}$: τα παρατηρούμενα DCBs δορυφόρου-συν-δέκτη από την σχέση 5.19

$\mathbf{x}_k$: τα m DCBs για τους παρατηρούμενους δέκτες

$\mathbf{x}^S$: τα n DCBs για τους παρατηρούμενους δορυφόρους

A: εμπεριέχει τους συντελεστές των DCBs των δορυφόρων με λαμβανόμενες τιμές 1 ή 0

B: εμπεριέχει τους συντελεστές των DCBs των δεκτών με λαμβανόμενες τιμές 1 ή 0

Για να ληφθεί υπόψη η μεταβαλλόμενη ακρίβεια των DCB δορυφόρου-συν-δέκτη, οφειλόμενη στα σφάλματα των ψευδοαποστάσεων αλλά και στην μεταβαλλόμενη απόδοση του μονοστρωματικού ιονοσφαιρικού μοντέλου, στην ελαχιστοτετραγωνική επίλυση εντάσσεται ο πίνακας βάρους, ο οποίος εκφράζει τις τυπικές αποκλίσεις των διορθωμένων από την ιονόσφαιρα παρατηρήσεων ψευδοαπόστασης. Τα προϊόντα DCB στα οποία εφαρμόζονται η προαναφερθείσα μέθοδος παράγονται από το κέντρο ανάλυσης IGG CAS και αρχειοθετούνται στο κέντρο δεδομένων CDDIS (<ftp://cddis.nasa.gov/gnss/products/bias/>). Τα σήματα και οι σχηματισμοί που αναλύονται είναι

Πίνακας 10. Σχηματισμοί και σήματα τους που αναλύονται από το κέντρο ανάλυσης DLR

Σχηματισμός	Σήματα
GPS	C1C,C1W,C2L/S/X,C2W,C5Q/X
GLONASS	C1C,C1P,C2C,C2P
Galileo	C1C/X,C5Q/X,C7Q/X,C8Q/X
BeiDou	C2I,C6I,C7I

Σύγκριση των εκτιμώμενων DCB^S έπειτα από εφαρμογή της μεθόδου με τα μηνιαία προϊόντα της CODE για διάφορα σήματα ανέδειξε τα εξής αποτελέσματα (Montenbruck, et al., 2014)

1. $C1W-C2W(=P1-P2)$: Η τυπική απόκλιση της διαφοράς των εκτιμώμενων DCB^S ως προς τα μηνιαία προϊόντα της CODE για τους δορυφόρους του συστήματος GPS είναι της τάξης των 0.2 ns και η ημερήσια διακύμανση των εκτιμώμενων DCB^S σε σύγκριση με τις μηνιαίες μέσες εκτιμώμενες τιμές των DCB^S είναι της τάξης των 0.06-0.08 ns.
2. $C1W-C1C(=P1-C1)$: Η τυπική απόκλιση της διαφοράς των εκτιμώμενων DCB^S ως προς τα μηνιαία προϊόντα της CODE για τους δορυφόρους του συστήματος GPS είναι της τάξης των 0.3 ns, αν και το μέγεθος αυτό μικραίνει αν χρησιμοποιηθούν περισσότεροι σταθμοί IGS. Η ημερήσια διακύμανση των εκτιμώμενων DCB^S σε σύγκριση με τις μηνιαίες μέσες εκτιμώμενες τιμές των DCB^S είναι της τάξης του 0.01 ns λόγω της κοινής συχνότητας καθώς τα εκτιμώμενα DCB^S δεν επηρεάζονται από σφάλματα μοντελοποίησης της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης.

Παράλληλα διαφορές των εκτιμώμενων DCBs των σημάτων L2C και L2P(Y) του συστήματος GPS και των σημάτων E5a/b και E1 του συστήματος Galileo, ως προς τις αντίστοιχες παραμέτρους T_{GD} και BGD, προέκυψαν μικρότερες των 0.2 ns. Αντίθετα, διαφορές των αρκετών ns παρατηρήθηκαν για τα εκτιμώμενα DCBs του συστήματος BeiDou σχετικά ως προς τις αντίστοιχες παραμέτρους T_{GD} .

Όσον αφορά τα εκτιμώμενα DCB_k των δεκτών, μέσα στα οποία συμπεριλαμβάνονται και συνεισφορές της αντένας, προέκυψε ότι τα DCBs σημάτων μεταξύ διαφορετικών συχνοτήτων είναι της τάξης των 10-15 ns, ενώ για την ίδια συχνότητα είναι της τάξης του 1ns. Σχετικά ως προς τους δέκτες, DCBs για ίδιο τύπο δέκτη αλλά διαφορετικό τύπο αντένας φτάνουν έως 5 ns, ενώ DCBs για διαφορετικό τύπο δεκτών και σήματα διαμορφωμένα σε ξεχωριστές συχνότητες είναι της τάξης των 20 με 40 ns.

5.2.3 IGGDBC

Η ιονοσφαιρική καθυστέρηση είναι υψηλά συσχετισμένη με τα DCBs καθώς και οι δύο όροι εξαρτώνται από την συχνότητα (Liu, et al., 2018). Το 2012 προτάθηκε από τον Li et al μια από κοινού εκτίμηση της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης και των DCB δορυφόρου-δέκτη. Η προκειμένη

μέθοδος αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο Γεωδαισίας και Γεωφυσικής στη Wuhan (Wuhan Institute of Geodesy and Geophysics) και αναφέρεται ως IGGDCB (Institute of Geodesy and Geophysics DCB).

Στην μέθοδο αυτή η εκτίμηση της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης ή του STEC πραγματοποιείται ακολουθώντας δύο προσέγγισης. Στην πρώτη προσέγγιση (Li, et al., 2012; Wang, et al., 2015) η ιονοσφαιρική καθυστέρηση εκτιμάται εξομαλύνοντας τις παρατηρήσεις κώδικα μέσω των παρατηρήσεων φάσης (Carrier to Code Leveling, CCL), ενώ στην δεύτερη προσέγγιση (Liu, et al., 2018) η ιονοσφαιρική καθυστέρηση εκτιμάται χρησιμοποιώντας αδιαφοροποίητες και ασυσχέτιστες παρατηρήσεις κώδικα και φάσης σε τρεις συχνότητες.

Στην συνέχεια το STEC περιγράφεται ως το προϊόν του VTEC και της συνάρτησης απεικόνισης $M(E)$ στο σημείο διάτρησης της ιονόσφαιρας (Κεφάλαιο 4.4). Το VTEC κάθε σταθμού μοντελοποιείται ξεχωριστά χρησιμοποιώντας συναρτήσεις γενικευμένων τριγωνομετρικών σειρών (generalized triangular series function, GTSF) (σχέση 5.21), οι οποίες έχει αποδειχθεί ότι μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά τις τοπικές μεταβολές του VTEC (Yuan & Ou, 2004), ώστε να είναι δυνατός ο διαχωρισμός των DCBs δορυφόρου-συν-δέκτη από την εκτιμώμενη ιονοσφαιρική καθυστέρηση. Η εκτίμηση των παραμέτρων του τοπικού ιονοσφαιρικού μοντέλου και των DCBs δορυφόρου-συν-δέκτη πραγματοποιείται εφαρμόζοντας μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων.

$$VTEC(\varphi, h) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{m_{max}} \{E_{nm}(\varphi - \varphi_0)^n \cdot h^m\} + \sum_{k=0}^{k_{max}} \{C_k \cos(k \cdot h) + S_k \sin(k \cdot h)\} \quad 5.21$$

όπου

φ : το γεωγραφικό πλάτος σημείου διάτρησης ιονόσφαιρας (IPP)

φ_0 : του γεωγραφικό πλάτος σταθμού

h : ο τοπικός χρόνος στο σημείο IPP

n_{max}, m_{max} : εκφράζουν τους μέγιστους βαθμούς των πολωνύμων

k_{max} : ο μέγιστος βαθμός των σειρών Fourier

E_{nm}, C_k, S_k : οι προς εκτίμηση παράμετροι του μοντέλου

Τέλος, ο διαχωρισμός των DCBs δορυφόρου-συν-δέκτη σε DCB δορυφόρου και DCB δέκτη επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας ελαχιστοτετραγωνική προσαρμογή στις εκτιμώμενες τιμές των DCBs δορυφόρου-συν-δέκτη (Li, et al., 2012; Liu, et al., 2018), από το προηγούμενο στάδιο, με τον περιορισμό ο μέσος όρος των εκτιμώμενων DCBs των δορυφόρων να είναι ίσο με μηδέν (σχέση 5.22).

$$\begin{cases} S = A \cdot X \\ X_{(p1+p2) \times 1} = \begin{bmatrix} X_s^T & X_r^T \\ 1 \times p1 & 1 \times p2 \end{bmatrix}^T \\ C \cdot X = 0, \quad C_{1 \times (p1+p2)} = [e_{1 \times p1} \quad 0_{1 \times p2}] \\ \hat{X} = (A^T D_s^{-1} A + C^T C)^{-1} A^T D_s^{-1} S \\ D_{\hat{X}} = (A^T D_s^{-1} A + C^T C)^{-1} \end{cases} \quad 5.22$$

όπου

S : ο πίνακας με τα εκτιμώμενα DCBs δορυφόρου-συν-δέκτη, με πίνακα μεταβλητότητας-συμεταβλητότητας D_s , για όλους του σταθμούς μετά την μοντελοποίηση GTSF

A : ο πίνακας σχεδιασμού του συστήματος

X : ο πίνακας που εμπεριέχει τον υποπίνακα X_s^T με τα $p1$ DCBs των δορυφόρων και τον υποπίνακα X_r^T με τα $p2$ DCBs των δεκτών

C : ο πίνακας που υλοποιεί την συνθήκη του μηδενικού μέσου

$\hat{X}$: ο πίνακας που περιλαμβάνει τις παραμέτρους προς εκτίμηση, δηλαδή τα $\hat{X}_s^T$ και τα $\hat{X}_r^T$, με πίνακα μεταβλητότητας-συμεταβλητότητας $D_{\hat{X}}$

5.2.3.1 Εξομάλυνση κώδικα μέσω παρατηρήσεων φάσης

Η δημιουργία τοπικού ιονοσφαιρικού μοντέλου πραγματοποιείται εξάγοντας πληροφορίες ιονόσφαιρας για παρατηρήσεις κώδικα σε δύο συχνότητες (Li, et al., 2012; Liu, et al., 2018) μέσω της μεθόδου CCL και όχι μέσω του γραμμικού συνδυασμού ελευθέρας γεωμετρίας. Οι παρατηρήσεις του συνδυασμού ελευθέρας γεωμετρίας είναι επηρεασμένες από πολυανάκλαση και θόρυβο μετρήσεων.

Συγκεκριμένα, εφαρμόζοντας τον γραμμικό συνδυασμό ελευθέρας γεωμετρίας για τις παρατηρήσεις φάσης και κώδικα (Κεφάλαιο 5.2.2) για ένα διάστημα το οποίο απαρτίζεται από t εποχές και στη συνέχεια ληφθεί ο μέσος όρος τους, εξάγεται η σταθερά l η οποία ισούται με

$$l = \frac{\sum_{n=1}^t P_r^s(t_n) + \Phi_s^r(t_n)}{n}$$

με

$$P_r^s(t_n) = d_r - d^s + I_r^s(t_n)$$

$$\Phi_s^r(t_n) = N_r^s - I_r^s(t_n)$$

όπου,

t_n : η εποχή στην οποία αναφέρονται οι παρατηρήσεις

n : το σύνολο των εποχών

Η σταθερά l ισοδυναμεί με $d_r - d^s + N_r^s$ αφού οι παράμετροι αυτές θεωρούνται σταθερές με την πάροδο του χρόνου. Αν στη συνέχεια αφαιρεθεί από την σταθερά l το $\Phi_s^r(t_n)$ προκύπτει για την χρονική στιγμή η ιονοσφαιρική παρατήρηση

$$\bar{I}_r^s(t_n) = I_r^s(t_n) + d_r - d^s = 40.28 \cdot 10^{16} \cdot \left(\frac{1}{f_{S_1}^2} - \frac{1}{f_{S_2}^2} \right) \cdot STEC + d_r - d^s \quad 5.23$$

όπου

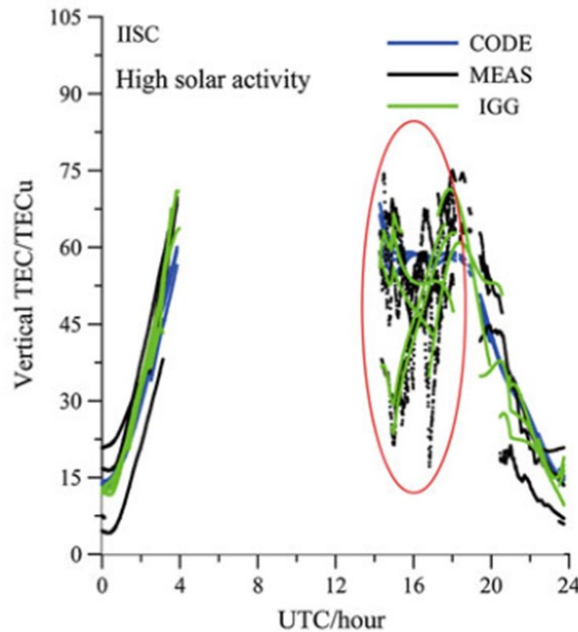
d_r : η διαφορά μεταξύ των διαφορετικών καθυστερήσεων hardware κώδικα των διαφορετικών σημάτων στον δέκτη

d^s : η διαφορά μεταξύ των διαφορετικών καθυστερήσεων hardware κώδικα των διαφορετικών σημάτων στον δορυφόρο

Μειονέκτημα της μεθόδου CCL αποτελεί η βραχυπρόθεσμη μεταβολή των bias κώδικα του δέκτη όταν η παρατήρηση κώδικα υπόκειται σε σφάλματα πολυανάκλασης. Απότοκο αυτών είναι η εμφάνιση των αποκαλούμενων leveling errors στην παράμετρο $\bar{I}_r^s(t_n)$.

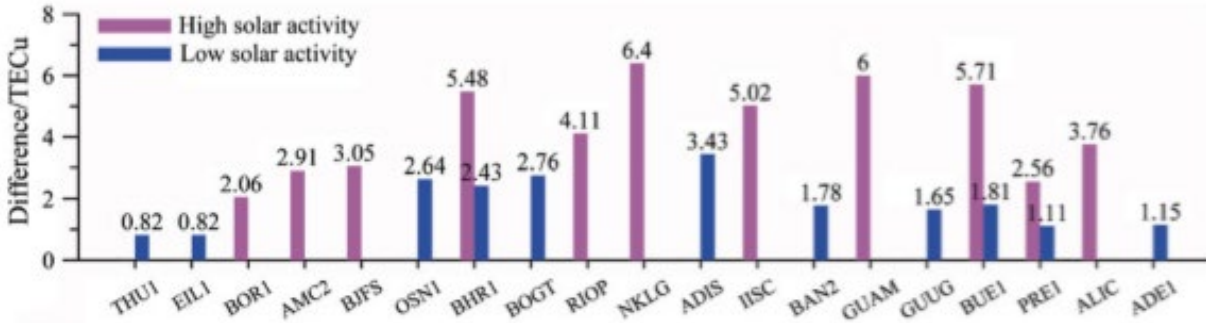
Ανάλυση της ακρίβειας του τοπικού μοντέλου ιονόσφαιρας για σταθμούς παγκόσμια κατανεμημένους για υψηλή και χαμηλή δραστηριότητα ιονόσφαιρας ανέδειξε (Li, et al., 2012):

1. καλύτερο εντοπισμό μεγάλων και απότομων αλλαγών του VTEC για την μέθοδο IGGDCB συγκριτικά τους ιονοσφαιρικούς χάρτες του κέντρου ανάλυσης CODE, σχετικά ως προς τα εκτιμώμενα VTEC της μεθόδου CCL (Εικόνα 26).



Εικόνα 27. Σύγκριση του εκτιμώμενου VTEC από την μέθοδο IGGDCB με αυτών του κέντρου ανάλυσης CODE και των μετρήσεων (Li, et al., 2012)

2. συμφωνία αποτελεσμάτων μεταξύ IGGDCB και CODE για συνθήκες υψηλής και χαμηλής ιονοσφαιρικής δραστηριότητας σε σταθμούς με μεγάλα γεωγραφικά πλάτη ως προς τα υπολογισμένα VTEC της μέθοδο CCL. Αντίθετα, συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων για σταθμούς μεσαίων και χαμηλών γεωγραφικών πλατών υπάρχει μόνο σε συνθήκες χαμηλής ιονοσφαιρικής δραστηριότητας.
3. μεγαλύτερες διαφορές των εκτιμώμενων VTEC μεταξύ των μεθόδων IGGDCB και CCL για σταθμούς σε πολύ χαμηλά πλάτη ασχέτως την κατάσταση που επικρατεί στην ιονόσφαιρα.



Εικόνα 28. Μηνιαίες διαφορές των εκτιμώμενων VTEC από την μέθοδο IGGDCB και των υπολογισμένων VTEC της μεθόδου CCL για σταθμούς κατανεμημένους από νότο προς βορρά στον άξονα x (Li, et al., 2012)

Αξιολόγηση της τεχνικής IGGDCB για διάφορους τύπους DCBs, χρησιμοποιώντας την μέθοδο CCL για την ανάκτηση των ιονοσφαιρικών καθυστερήσεων, για όλους τους σταθμούς παρακολούθησης του δικτύου MGEX (2013 έως 2014) ανέδειξε (Wang et al., 2015):

1. για το GPS και GLONASS ακρίβεια της τάξης των 0.2-0.3 ns (IGGDCB) και 0.5-0.8 ns (DLR) σχετικά ως προς τα προϊόντα της CODE για τους διάφορους τύπους DCBs (Πίνακας 16)
2. για το Galileo και BDS ακρίβεια της τάξης των 0.36 και 0.24 ns αντίστοιχα σχετικά ως προς τα προϊόντα της DLR (Πίνακας 16)
3. για την μηνιαία σταθερότητα των DCBs ως προς τα συστήματα GPS, GLONASS, BDS και Galileo, 0.11, 0.18, 0.17 και 0.14ns αντίστοιχα. Παρόλα αυτά όσον αφορά τα εκτιμώμενα DCBs των συστημάτων GPS και GLONASS, εφαρμόζοντας την μέθοδο IGGDCB παρουσιάζεται η μικρότερη μηνιαία σταθερότητα σε σύγκριση με τα προϊόντα CODE και DLR, λόγω του ότι στα χαμηλά γεωγραφικά πλάτη, ± 20 μοίρες από το γεωμαγνητικό ισημερινό η μοντελοποίηση της ιονόσφαιρας είναι ανακριβής.

Πίνακας 11. RMS (ns) των διαφορών των εκτιμώμενων DCB με τα προϊόντα CODE/DLR για την περίοδο 2013-2014 (Wang, *et al.*, 2015)

Σύστημα	Τύπος Bias	IGG-CODE	DLR-CODE	Σύστημα	Τύπος Bias	IGG-DLR	TGD-DLR
GPS	C1WC1W	0.29	0.24	GPS	C1CC5X	0.22	-
GLO	C1PC2P	0.56	0.84		C1CC5Q	0.29	-
Σύστημα	Τύπος Bias	IGG-DLR	BDG-DLR	Σύστημα	Τύπος Bias	IGG-DLR	TGD-DLR
GAL	C1XC5X	0.22	0.53	BDS	C2IC7I	0.33	1.27
	C1XC7X	0.21	0.56		C2IC6I	0.39	1.38
	C1XC8X	0.22	-		-	-	-
	C1CC5Q	0.26	-		-	-	-
	C1CC7Q	0.26	-		-	-	-
	C1CC8Q	0.27	-		-	-	-

Η μέθοδος αυτή υλοποιείται από το ινστιτούτο IGG (Geodesy and Geophysics) της Κινέζικης Ακαδημίας Επιστημών (Chinese Academy of Sciences, CAS) και τα προϊόντα τους (εκτιμώμενα DCBs) είναι διαθέσιμα είτε από το κέντρο ανάλυσης IGN (<ftp://igs.ign.fr/pub/igs/products/mgex/dcb>) είτε στο κέντρο δεδομένων CDDIS (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/mgex/dcb>) από τον Οκτώβριο του 2015. Οι σχηματισμοί καθώς και τα σήματα που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο είναι

Πίνακας 12. Σχηματισμοί και σήματα τους που αναλύονται από το κέντρο ανάλυσης CAS

Σχηματισμός	Σήματα
GPS	C1C,C1W,C2L/S/X,C2W,C5Q/X
GLONASS	C1C,C1P,C2C,C2P
Galileo	C1C/X,C5Q/X,C7Q/X,C8Q/X), επιπλέον GAL(C6C) από Q2/2017
BeiDou	C2I,C6I,C7I

5.2.3.2 Αδιαφοροποιήτες και ασυσχέτιστες παρατηρήσεις σε τρεις συχνότητες

Η δημιουργία τοπικού ιονοσφαιρικού μοντέλου πραγματοποιείται από την εκτίμηση ιονοσφαιρικών καθυστερήσεων εφαρμόζοντας ασυσχέτιστες και αδιαφοροποιήτες παρατηρήσεις κώδικα και φάσης για πολλαπλά συστήματα GNSS σε τρεις συχνότητες (UC123). Οι αδιαφοροποιήτες και ασυσχέτιστες παρατηρήσεις κώδικα και φάσεις πλεονεκτούν έναντι των άλλων μεθόδων, όπως ο γραμμικός συνδυασμός ελευθέρας γεωμετρίας ή η μέθοδος CCL, διότι δεν ενισχύεται ο θόρυβος των παρατηρήσεων και αποφεύγεται η εμφάνιση των leveling errors.

Για να εκφράζουν οι γραμμικοποιημένες εξισώσεις κώδικα και φάσης, παρατηρήσεις πάνω σε συχνότητα f ($f \geq 3$), διατηρώντας τις εκτιμώμενες παραμέτρους $d\bar{t}_k$ και $\bar{I}_{r,1}^{s,T}$ το ίδιο με την επεξεργασία των παρατηρήσεων φάσης και κώδικα πάνω σε δύο συχνότητες (Κεφάλαιο 2), θα πρέπει να εισαχθεί ένα επιπλέον bias κώδικα, το $\Omega_{r,j}^{s,T}$, ώστε να αντισταθμιστούν οι διαφορετικές καθυστερήσεις hardware κώδικα λόγω της επεξεργασίας παρατηρήσεων πάνω στην επιπλέον συχνότητα (Liu, et al., 2018) (σχέσεις 5.24 και 5.25).

$$P_{r,j}^{s,T} = \mathbf{u}_r^{s,T} \cdot \mathbf{x}_r + c(d\bar{t}_r^T - d\bar{t}^{s,T}) + \mu_j^T \bar{I}_{r,1}^{s,T} + m_r^{s,T} T_r + \kappa \Omega_{r,j}^{s,T} + \varepsilon_{r,j}^{s,T} \quad 5.24$$

$$\Phi_{r,j}^{s,T} = \mathbf{u}_r^{s,T} \cdot \mathbf{x}_r + c(d\bar{t}_r^T - d\bar{t}^{s,T}) - \mu_j^T \bar{I}_{r,1}^{s,T} + m_r^{s,T} T_r + \lambda_j^{s,T} \bar{N}_{r,j}^{s,T} + e_{r,j}^{s,T} \quad 5.25$$

για $j > 3$ $\kappa=1$, αλλιώς $\kappa=0$

με

$$\begin{cases} d\bar{t}_r^T = dt_r + d_{r,IF12}^T \\ \bar{I}_{r,1}^{s,T} = I_{r,1}^{s,T} - \frac{c}{\mu_2^s - \mu_1^s} (DCB_{r,12}^T + DCB_{r,12}^{s,T}) \\ \Omega_{r,f}^{s,T} = \frac{c(\mu_f^T - \mu_1^T)}{\mu_2^T - \mu_1^T} (DCB_{r,12}^T + DCB_{r,12}^{s,T}) - c(DCB_{r,1f}^T + DCB_{r,1f}^{s,T}) \\ \bar{N}_{r,f}^{s,T} = N_{r,f}^{s,T} + \frac{c}{\lambda_f^{s,T}(\mu_2^s - \mu_1^s)} [(\mu_f^T + \mu_1^T)(b_{r,2}^T - b_2^{s,T}) - (\mu_f^T + \mu_2^T)(b_{r,1}^T - b_1^{s,T})] \end{cases}$$

Η παραπάνω παραμετροποίηση είναι αναγκαία για να αποφευχθεί η αδυναμία του γραμμικού συστήματος. Επιπλέον οι παραπάνω εξισώσεις εκφράζουν επεξεργασία παρατηρήσεων με την μέθοδο PPP για ένα δορυφορικό σύστημα. Για να εκφράζουν οι σχέσεις 5.24 και 5.25 επεξεργασία παρατηρήσεων κώδικα και φάσης για πολλαπλά συστήματα GNSS θα πρέπει να εισαχθεί στις εξισώσεις ο όρος ISB (Inter System Bias) (σχέσεις 5.26 και 5.27). Το ISB εκφράζει την διαφορά των hardware biases του δέκτη μεταξύ σημάτων από δύο σχηματισμούς GNSS, συν την αποχή των κλιμάκων χρόνου μεταξύ των δύο συναρτήσεων (Teunissen and Montenbruck, 2017).

$$P_{r,j}^{s,T} = \mathbf{u}_r^{s,T} \cdot \mathbf{x}_r + c(d\bar{t}_r^G - d\bar{t}^{s,T} + ISB_r^T) + \mu_j^T \bar{I}_{r,1}^{s,T} + m_r^{s,T} T_r + \kappa \Omega_{r,j}^{s,T} + \varepsilon_{r,j}^{s,T} \quad 5.26$$

$$\Phi_{r,j}^{s,T} = \mathbf{u}_r^{s,T} \cdot \mathbf{x}_r + c(d\bar{t}_r^G - d\bar{t}^{s,T} + ISB_r^T) - \mu_j^T \bar{I}_{r,1}^{s,T} + m_r^{s,T} T_r + \lambda_j^{s,T} \bar{N}_{r,j}^{s,T} + e_{r,j}^{s,T} \quad 5.27$$

Όσον αφορά τα Inter Frequency Biases (IFBs) του GLONASS αυτά δεν λαμβάνονται υπόψη, καθώς λόγω FDMA δεν μπορούν να αναπαρασταθούν κατάλληλα από τον όρο $d_{r,j}^{s,T}$ (Κεφάλαιο 5.28). Συνεπώς, ο πίνακας των αγνώστων διαμορφώνεται ως εξής

$$\mathbf{X} = \left[\mathbf{x}_r, d\bar{t}_r^G, \mathbf{ISB}_{r,G}^{T(T \neq G)}, T_r, \boldsymbol{\Omega}_{r,3}^{s,T(T \neq R)}, \bar{\mathbf{I}}_{r,1}^{s,T}, \bar{\mathbf{N}}_{r,1}^{s,T}, \bar{\mathbf{N}}_{r,2}^{s,T}, \bar{\mathbf{N}}_{r,3}^{s,T(T \neq R)} \right]^T \quad 5.28$$

με

$$\mathbf{ISB}_{r,G}^{T(T \neq G)} = [\mathbf{ISB}_{r,G}^R, \mathbf{ISB}_{r,G}^E, \mathbf{ISB}_{r,G}^C]$$

$$\boldsymbol{\Omega}_{r,3}^{s,T} = [\Omega_{r,3}^{1,G} \dots \Omega_{r,3}^{n_G,G}, \Omega_{r,3}^{1,E} \dots \Omega_{r,3}^{n_E,E}, \Omega_{r,3}^{1,C} \dots \Omega_{r,3}^{n_C,C}]$$

$$\bar{\mathbf{I}}_{r,1}^{s,T} = [\bar{I}_{r,3}^{1,G} \dots \bar{I}_{r,3}^{n_G,G}, \bar{I}_{r,3}^{1,R} \dots \bar{I}_{r,3}^{n_R,R}, \bar{I}_{r,3}^{1,E} \dots \bar{I}_{r,3}^{n_E,E}, \bar{I}_{r,3}^{1,C} \dots \bar{I}_{r,3}^{n_C,C}]$$

$$\bar{\mathbf{N}}_{r,f}^{s,T} = [\bar{N}_{r,f}^{1,G} \dots \bar{N}_{r,f}^{n_G,G}, \bar{N}_{r,f}^{1,R} \dots \bar{N}_{r,f}^{n_R,R}, \bar{N}_{r,f}^{1,E} \dots \bar{N}_{r,f}^{n_E,E}, \bar{N}_{r,f}^{1,C} \dots \bar{N}_{r,f}^{n_C,C}], \text{ για } f=1 \text{ ή } 2$$

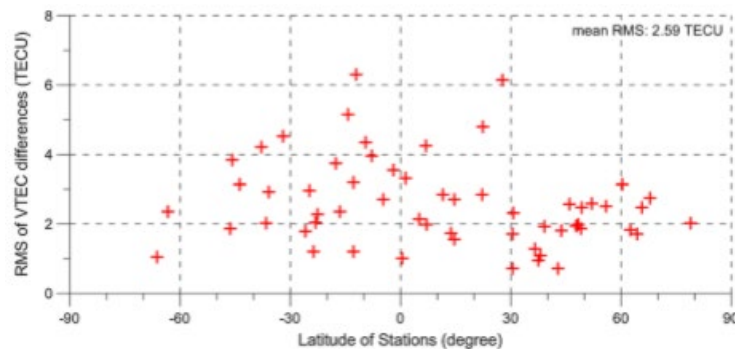
$$\bar{\mathbf{N}}_{r,3}^{s,T(T \neq R)} = [\bar{N}_{r,f}^{1,G} \dots \bar{N}_{r,f}^{n_G,G}, \bar{N}_{r,f}^{1,E} \dots \bar{N}_{r,f}^{n_E,E}, \bar{N}_{r,f}^{1,C} \dots \bar{N}_{r,f}^{n_C,C}]$$

όπου

n_G, n_R, n_E, n_C εκφράζουν τον αριθμό των παρατηρούμενων δορυφόρων για GPS, GLONASS, Galileo και BeiDou αντίστοιχα.

Αξιολόγηση του τοπικού ιονοσφαιρικού μοντέλου χρησιμοποιώντας αδιαφοροποίητες και ασυσχέτιστες παρατηρήσεις κώδικα και φάσης σε τρεις συχνότητες για σταθμούς GNSS καταναμημένους παγκόσμια ανέδειξε (Liu, et al., 2018):

4. ακριβέστερη παροχή ιονοσφαιρικών καθυστερήσεων χρησιμοποιώντας την μέθοδο PPP για παρατηρήσεις σε τρεις συχνότητες απ' ότι χρησιμοποιώντας της μέθοδο CCL.
5. μέσο RMS 2.59 TECUs για τις διαφορές των μοντελοποιημένων VTEC μέσω τριγωνομετρικών συναρτήσεων και των προερχόμενων VTEC από τους παγκόσμιους χάρτες του κέντρου ανάλυσης CODE και μέγιστο RMS 6 TECUs των προαναφερθεισών διαφορών για σταθμούς με χαμηλό γεωγραφικό πλάτος (Εικόνα 28).



Εικόνα 29. RMS όλων των σταθμών για τις διαφορές μεταξύ των εκτιμώμενων VTEC της μεθόδου IGGDCB και των VTEC από τα GIM του κέντρου ανάλυσης CODE (Liu, et al., 2018)

Συνεπώς, μοντελοποιώντας τοπικά το VTEC από εκτιμώμενες ιονοσφαιρικές καθυστερήσεις μέσω αδιαφοροποιήτων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων κώδικα και φάσης σε 3 συχνότητες και εφαρμόζοντας μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, εισάγοντας τον περιορισμό του μηδενικού μέσου για τα DCBs των δορυφόρων, τα DCBs δορυφόρου–συν-δέκτη μπορούν να εκτιμηθούν ως δύο ανεξάρτητοι όροι. Επιπλέον χρησιμοποιώντας τα εκτιμώμενα DCBs των δορυφόρων ($D\hat{C}B_{12}^{s,T}$) και των δεκτών ($D\hat{C}B_{r,12}^T$) από το προηγούμενο βήμα, είναι εφικτή η εκτίμηση των DCBs του δορυφόρου ($DCB_{13}^{s,T}$) και του δέκτη ($DCB_{13}^{s,T}$) μεταξύ της πρώτης και τρίτης συχνότητα (σχέση 6.29). Όπως και για τα DCBs δορυφόρου-συν-δέκτη επιβάλλεται η συνθήκη του μηδενικού μέσου για την παράμετρο $DCB_{13}^{s,T}$, ώστε να μπορούν να εκτιμηθούν οι όροι $DCB_{r,13}^{s,T}$ και $DCB_{13}^{s,T}$ ανεξάρτητα.

$$DCB_{13}^{s,T} + DCB_{r,13}^{s,T} = \frac{\mu_3^T - \mu_1^T}{\mu_2^T - \mu_1^T} (D\hat{C}B_{r,12}^T + D\hat{C}B_{12}^{s,T}) - \frac{\Omega_{r,3}^{s,T}}{c} \quad 6.29$$

Αξιολόγηση των εκτιμώμενων DCBs από τον για 60 σταθμούς MGEX τον μήνα Φεβρουάριο του 2017 με προϊόντα DCB από τα κέντρα ανάλυσης CODE, CAS και DLR (Liu, et al., 2018) υποδεικνύει ότι η μέθοδος IGGDCB, εκτός του ότι τα αποτελέσματα της είναι σε καλή συνοχή με τα προϊόντα DCB των προαναφερμένων κέντρων ανάλυσης, αυτά υπερσχύουν των προϊόντων του κέντρου ανάλυσης DLR για τα DCBs των σημάτων C1PC2P. Επιπλέον τα αποτελέσματα αυτά προκύπτουν από την χρήση λιγότερων σταθμών σε σχέση με τους σταθμούς που χρησιμοποιούνται για τα κέντρα ανάλυσης CODE, CAS και DLR (Πίνακας 13).

Πίνακας 13. Συνοχή των εκτιμώμενων DCB σε σύγκριση με τα προϊόντα CODE/DLR/CAS για τον μήνα Φεβρουάριο 2017 για 60 σταθμούς του δικτύου MGEX (RMS ns) (Liu, et al., 2018)

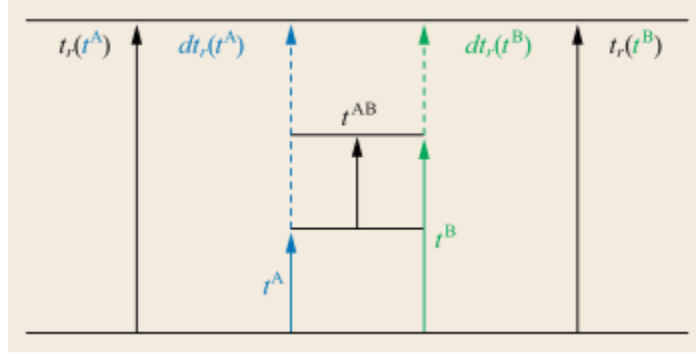
Σύστημα	Τύπος Bias	IGG-CODE	DLR-CODE	CAS-CODE	Σύστημα	Τύπος Bias	IGG-DLR	IGG-CAS
GPS	C1WC2W	0.09	0.24	0.07	GPS	C1WC5W	0.31	0.25
		-	-	-		C1WC5Q	0.19	0.15
GLO	C1PC2P	0.33	0.68	0.49	GAL	C1XC5X	0.16	0.20
		-	-	-		C1XC7X	0.13	0.14
		-	-	-	BDS	C2IC7I	0.32	0.25
		-	-	-		C2IC6I	0.34	0.41

5.3 Inter System Bias

Πλέον στον προσδιορισμό της θέσης στον χώρο χρησιμοποιούνται παραπάνω από ένα δορυφορικά συστήματα, το καθένα από τα οποίο εκφράζει τις αποχές των δορυφόρων στην δικιά του κλίμακα χρόνου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζεται μία αποχή χρόνου μεταξύ των συστημάτων (Inter-System Time Offsets (biases), ISTBs). Η αποχή αυτή δεν θα χρειάζεται να

λαμβάνεται υπόψη στην διαδικασία της επίλυσης καθώς τα προϊόντα χρόνου MGEX θα αναφέρονται στο σύστημα χρόνου του GPS. Παράλληλα, τα σήματα που λαμβάνονται από τον δέκτη υφίστανται διαφορετικές καθυστερήσεις στα μηχανήματά του λόγω της διαφορετικής δομής που υλοποιείται από σύστημα σε σύστημα, ακόμη και αν τα σήματα διαμορφώνονται στην ίδια φέρουσα συχνότητα. Τα biases αυτά που οφείλονται μόνο στο hardware του δέκτη ονομάζονται Inter-System Biases (ISBs).

Η αποχή μεταξύ των κλιμάκων χρόνου δύο συστημάτων A και B μπορεί να γίνει αντιληπτή από την παρακάτω εικόνα



Εικόνα 30. Σχέσεις μεταξύ πλαισίων χρόνου, χρόνου δέκτη, αποχής χρονομέτρου του δέκτη και αποχή μεταξύ των κλιμάκων χρόνου των συστημάτων A και B (Teunissen & Montenbruck, 2017)

και η λήψη του σήματος B στον χρόνο του δέκτη t_r δίνεται από την σχέση

$$t_r(t^B) = t^B + dt_r(t^B) = t^B + dt_r(t^A) - t^{AB} \quad 6.30$$

με

$$t^{AB} = t^B - t^A$$

όπου

t^{AB} : η αποχή μεταξύ των κλιμάκων χρόνου των σχηματισμών A και B. Η παράμετρος αυτή εκπέμπεται ως μέρος του μηνύματός ναυσιπλοΐας και είναι αρκετά σημαντική καθώς αν αγνοηθεί μπορεί να επιφέρει σφάλμα δεκάδων μέτρων, αφού πολλαπλασιάζεται με την ταχύτητα του φωτός

Τότε οι εξισώσεις ψευδοαπόστασης (σχέση 2.1) για τα συστήματα A (με δείκτη δορυφόρων s) και B (με δείκτη δορυφόρων q) μπορούν να γραφτούν ως

$$P_{r,j}^s(t^A) = \rho_r^s(t^A, t^A - \tau_r^s) + c \left(dt_r(t^A) + d_{r,j}^A(t^A) + \Delta d_{r,j}^s(t^A) \right) - c \left(dt^s(t^A - \tau_r^s) - d_j^s(t^A - \tau_r^s) \right) + T_r^s(t^A) + \mu_j^A I_{r,1}^s(t^A) + e_{r,j}^s(t^A) \quad 6.31$$

$$P_{r,j}^q(t^B) = \rho_r^q(t^B, t^B - \tau_r^q) + c \left(dt_r(t^A) - t^{AB} + d_{r,j}^B(t^B) + \Delta d_{r,j}^q(t^B) \right) \quad 6.32$$

$$-c \left(dt^q(t^B - \tau_r^q) - d_j^q(t^B - \tau_r^q) \right) + T_r^q(t^B) + \mu_j^B I_{r,1}^q(t^B) + e_{r,j}^q(t^B)$$

Η αποχή του χρονομέτρου του δέκτη για την εξίσωση κώδικα του σχηματισμού B εκφράζεται ως προς την κλίμακα χρόνου του A μαζί με την αποχή των κλιμάκων χρόνου μεταξύ των συστημάτων A και B. Ο όρος ISB μπορεί να εμφανιστεί στην σχέση 6.32 αν εισέλθει στην εξίσωση το bias hardware του δέκτη για το σήμα του συστήματος A ($d_{r,j}^S(t^A)$) διαμορφώνοντας την ως εξής

$$\begin{aligned} P_{r,j}^q(t^B) &= \rho_r^q(t^B, t^B - \tau_r^q) + c \left(dt_r(t^A) + d_{r,j}^A(t^A) + \Delta d_{r,j}^S(t^A) \right) \\ &+ c \left(ISB_{r,j}^{AB}(t^A, t^B) - t^{AB} \right) - c \left(dt^q(t^B - \tau_r^q) - d_j^q(t^B - \tau_r^q) \right) \\ &+ T_r^q(t^B) + \mu_j^B I_{r,1}^q(t^B) + e_{r,j}^q(t^B) \end{aligned} \quad 6.33$$

με

$$ISB_{r,j}^{AB}(t^A, t^B) = [d_{r,j}^B(t^B) - d_{r,j}^A(t^A)] + [\Delta d_{r,j}^q(t^B) - \Delta d_{r,j}^S(t^A)]$$

Στην περίπτωση που ο σχηματισμός A ή/και B χρησιμοποιεί την προσέγγιση CDMA τότε ο όρος $\Delta d_{r,j}^S(t^T)$ δεν λαμβάνεται υπόψη και το ISB εξαρτάται μόνο από τον δέκτη. Στην αντίθετη περίπτωση που εφαρμόζεται η προσέγγιση FDMA, τότε ο όρος $\Delta d_{r,j}^S(t^T)$ δεν απαλείφεται και το ISB είναι εξαρτώμενο από τον δορυφόρο.

Πλεονέκτημα της εισαγωγής της παραμέτρου ISB όταν χρησιμοποιούνται πολλαπλά συστήματα GNSS έγκειται στην επεξεργασία των εξισώσεων 6.29 και 6.30 σαν να προέρχονταν από τον ίδιο σχηματισμό.

5.3.1 Μοντέλο ελευθέρας ιονόσφαιρας

Το μαθηματικό μοντέλο εκτίμησης των ISB μπορεί να εκφραστεί από τον γραμμικό συνδυασμό ελευθέρας ιονόσφαιρας. Συγκεκριμένα, για το σύστημα GPS οι γραμμικοποιημένες παρατηρήσεις φάσης και κώδικα ορίζονται ως (Hong et al. 2019)

$$P_{IF}^G(t) = \rho^G(t) + cd\bar{t}_r^G(t) - cd\bar{t}^{S,G}(t) + T^G + e_{P,IF}^G(t) \quad 6.34$$

$$\Phi_{IF}^G(t) = \rho^G(t) + cd\bar{t}_r^G(t) - cd\bar{t}^{S,G}(t) + \lambda_{IF}^{S,G} \bar{N}_{IF}^G + T^G + \varepsilon_{L,IF}^G(t) \quad 6.35$$

ενώ για τα υπόλοιπα συστήματα (GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS)

$$P_{IF}^G(t) = \rho^T(t) + cd\bar{t}_r^G(t) - cd\bar{t}^{S,T}(t) + ISB_G^T + T^T + e_{P,IF}^T(t) \quad 6.36$$

$$\Phi_{IF}^G(t) = \rho^T(t) + cd\bar{t}_r^G(t) - cd\bar{t}^{S,T}(t) + ISB_G^T + \lambda_{IF}^T \bar{N}_{IF}^T + T^T + \varepsilon_{L,IF}^T(t) \quad 6.37$$

όπου,

$d\bar{t}_r^G$: το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη σχετικά ως προς το GPS, στο οποίο εμπεριέχονται τα biases των καθυστερήσεων του hardware για την ψευδοαπόσταση

λ_{IF}^T : το μήκος κύματος του γραμμικού συνδυασμού ελευθέρας ιονόσφαιρας

$\bar{N}_{r,IF}^T$: η ασάφεια φάσης μέσα στην οποία συμπεριλαμβάνονται τα bias φάσης δέκτη και δορυφόρου του γραμμικού συνδυασμού ελευθέρας ιονόσφαιρας, καθώς και τα bias κώδικα δορυφόρου του γραμμικού συνδυασμού ελευθέρας ιονόσφαιρας που εμφανίζονται λόγω των ακριβή προϊόντων χρόνου των δορυφόρων

ISB_G^{sys} : bias μεταξύ των δορυφορικών συστημάτων GLONASS, Galileo, BeiDou και QZSS ως προς το GPS βασισμένο στο χρονόμετρο του δέκτη σε μονάδες χρόνου

Το ISB_G^T στις σχέσεις 6.36 και 6.37 περιγράφεται από την σχέση

$$ISB_G^T = d\bar{t}_r^G - d\bar{t}_r^T = cdt_r^G - cdt_r^T + d_{r,IF}^G - d_{r,IF}^{sys} = TO_r^{G,T} + d_{r,IF}^G - d_{r,IF}^T \quad 6.38$$

όπου

$TO_r^{G,T}$: η διαφορά χρόνου για τα διαφορετικά χρονόμετρα αναφοράς των προϊόντων των διαφορετικών κέντρων ανάλυσης, καθώς και η διαφορά χρόνου μεταξύ των εφαρμοσμένων συστημάτων χρόνου στα διαφορετικά δορυφορικά συστήματα

$d_{r,IF}^{S,G}$: το bias hardware του δέκτη λόγω γραμμικού συνδυασμού ελευθέρας ιονόσφαιρας για το σύστημα GPS

$d_{r,IF}^{S,T}$: το bias hardware του δέκτη λόγω γραμμικού συνδυασμού ελευθέρας ιονόσφαιρας για το τα υπόλοιπα δορυφορικά συστήματα Όσον αφορά τα IFBs του GLONASS, αυτά απορροφώνται από το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη και τις ασάφειες φάσης. Συνεπώς, ο πίνακας των εκτιμώμενων παραμέτρων διαμορφώνεται ως εξής

$$X = [x, y, z, d\bar{t}_r^G, ISB_G^C, ISB_G^R, ISB_G^E, \bar{N}_{IF}^C, \bar{N}_{IF}^R, \bar{N}_{IF}^E] \quad 6.39$$

5.3.2 Μοντέλο αδιαφοροποίητων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων

Ένα από τα μοντέλα που εφαρμόζεται για την εκτίμηση των ISB, χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις κώδικα και ψευδοαπόστασης για πολλαπλά δορυφορικά συστήματα GNSS, είναι αυτό των αδιαφοροποίητων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων κώδικα και φάσης. Επιλέγοντας το σύστημα του GPS ως σύστημα αναφοράς για την αποχή του χρονομέτρου του δέκτη, οι γραμμικοποιημένες εξισώσεις κώδικα και φάσης διαμορφώνονται ως εξής (Zhou, et al., 2019)

$$P_{r,j}^{S,T} = \mathbf{u}_r^{S,T} \cdot \mathbf{x}_r + d\bar{t}_r^{S,T} + ISB_{r,GPS}^T + M_W \cdot ZTD_W + \mu_j^T \cdot \bar{I}_{r,1}^{S,T} + \Delta d_{r,j}^{S,T} + e_{r,j}^{S,T} \quad 6.37$$

$$\Phi_{r,j}^{S,T} = \mathbf{u}_r^{S,T} \cdot \mathbf{x}_r + d\bar{t}_r^{S,T} + ISB_{r,GPS}^T + M_W \cdot ZTD_W - \mu_j^T \cdot \bar{I}_{r,1}^{S,T} + \lambda_j^{S,T} \bar{N}_{r,j}^{S,T} + \varepsilon_{r,j}^{S,T} \quad 6.38$$

με

$$d\bar{t}_r^{S,T} = (dt_r + dD^T) + d_{r,IF_{12}}^{S,T}$$

$$\bar{I}_{r,1}^{S,T} = I_{r,1}^{S,T} + \beta_{12}^{S,T} \cdot (DCB_{r,P_1P_2}^{S,T} - DCB_{P_1P_2}^{S,T})$$

$$\bar{N}_{r,j}^{S,T} = \lambda_j^{S,T} \cdot (N_{r,j}^{S,T} + b_{r,j}^{S,T} - b_j^{S,T}) + d_{IF_{12}}^{S,T} - d_{r,IF_{12}}^T + \mu_j^T \cdot \beta_{12}^{S,T} \cdot (DCB_{r,P_1P_2}^{S,T} - DCB_{P_1P_2}^{S,T})$$

$$ISB_{r,G}^T = (d_{r,IF}^T - d_{r,IF}^G) + (dD^T - dD^G), T \neq G$$

όπου

$\Delta d_{r,j}^{S,T}$: η εξαρτώμενη από την συχνότητα καθυστέρηση κώδικα των δορυφόρων GLONASS

dD^T : bias ανεξάρτητο του δέκτη, ορισμένο από το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείτε κατά την διαδικασία εκτίμησης των ακριβή προϊόντων χρόνου των δορυφόρων και είναι κοινό για όλα τα εκτιμώμενα προϊόντα χρόνου των δορυφόρων του συστήματος GNSS T. Συγκεκριμένα, το σύστημα αναφοράς αυτό αναφέρεται στην συνθήκη/περιορισμό που πρέπει να εισαχθεί στην διαδικασία της εκτίμησης των χρονομέτρων του δέκτη και του δορυφόρου λόγω της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων τους. Συνήθως η συνθήκη που εισάγεται είναι η συνθήκη του μηδενικού μέσου για όλα τα επιλεγμένα χρονόμετρα δορυφόρων για κάθε σύστημα.

Στο μοντέλο των αδιαφοροποίητων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων κώδικα και φάσης το ISB περιγράφεται από δύο διαφορές. Η πρώτη αναφέρεται στις εξαρτώμενες από τον δέκτη καθυστερήσεις hardware μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων GNSS. Αντίθετα, η δεύτερη διαφορά εκφράζει την διαφορά χρόνου λόγω των διαφορετικών συστημάτων χρόνου αναφοράς μεταξύ των προϊόντων χρόνου GNSS. Ο τελικός πίνακας των αγνώστων διαμορφώνεται ως εξής

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}, d\bar{t}_r^G, \mathbf{ISB}_{r,G}^T, \mathbf{ZWD}_r, \bar{\mathbf{I}}_{r,1}^G, \bar{\mathbf{I}}_{r,1}^T, \bar{\mathbf{N}}_{r,j}^G, \bar{\mathbf{N}}_{r,j}^T] \quad 6.39$$

5.3.3 Χαρακτηριστικά των ISB

Πριν πραγματοποιηθεί αναφορά των χαρακτηριστικών των ISBs περιγράφονται συνοπτικά τα στοχαστικά μοντέλα διαμόρφωσης των ISB. Αυτά μπορούν να διακριθούν σε (Hong, et al., 2019; Zhao, et al., 2020):

Απόρριψη: Συγκεκριμένα, στην απόρριψη των ISBs μεταξύ των δορυφορικών συστημάτων το μοντέλο προσδιορισμού θέσης για κάθε δορυφορικό σύστημα διαμορφώνεται και επεξεργάζεται ξεχωριστά, με αποτέλεσμα τα ISB των δορυφορικών συστημάτων ως προς το GPS να αντικατοπτρίζονται στα υπόλοιπα των ψευδοαποστάσεων.

Time constant/Piecewise Constant: Το ISB θεωρείται σταθερό για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, λαμβάνοντας υπόψη την βραχυχρόνια σταθερότητα των ISB και εκτιμάται μόνο την πρώτη εποχή του διαστήματος (σχέση 6.40). Κύριο χαρακτηριστικό του μοντέλου αυτού είναι ότι μειώνει τον αριθμό των παραμέτρων προς εκτίμηση και αυξάνει τον πλεονασμό των παρατηρήσεων.

$$ISB(i + 1) = ISB(i) \quad 6.40$$

White noise: Τα ISB σε κάθε εποχή θεωρείται ότι ακολουθούν την κατανομή Gauss με μέσο 0 και διακύμανση σ_w^2 (σχέση 6.41). Συγκεκριμένα, το ISB εκτιμάται σε κάθε εποχή όπως συμβαίνει και με το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη και για παρακείμενες εποχές τα ISB θεωρούνται ασυσχέτιστα μεταξύ τους. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη σε περιπτώσεις που δεν γνωστό το πώς θα μεταβληθεί το ISB.

$$ISB(i + 1) = N(0, \sigma_w^2) \quad 6.41$$

Random walk: Κάθε ISB χρησιμοποιεί το εκτιμώμενο ISB από την προηγούμενη εποχή με την διακύμανση του να αυξάνει γραμμικά με τον χρόνο (σχέση 6.42). Το μοντέλο αυτό ενδείκνυται για την περιγραφή των χαρακτηριστικών των μεταβολών των ISB με την πάροδο του χρόνου.

$$ISB(i + 1) = ISB(i) + \omega_{ISB}, \omega_{ISB} \sim N(0, \sigma_{\omega_{ISB}}^2) \quad 6.42$$

Χαρακτηριστικά των ISB χρησιμοποιώντας ως μοντέλο τον γραμμικό συνδυασμό ελευθέρων ιονόσφαιρας για την εκτίμηση τους, μπορούν να διακριθούν στις εξής κατηγορίες (Hong, et al., 2019):

Εκτίμηση ίδιου τύπου ISB

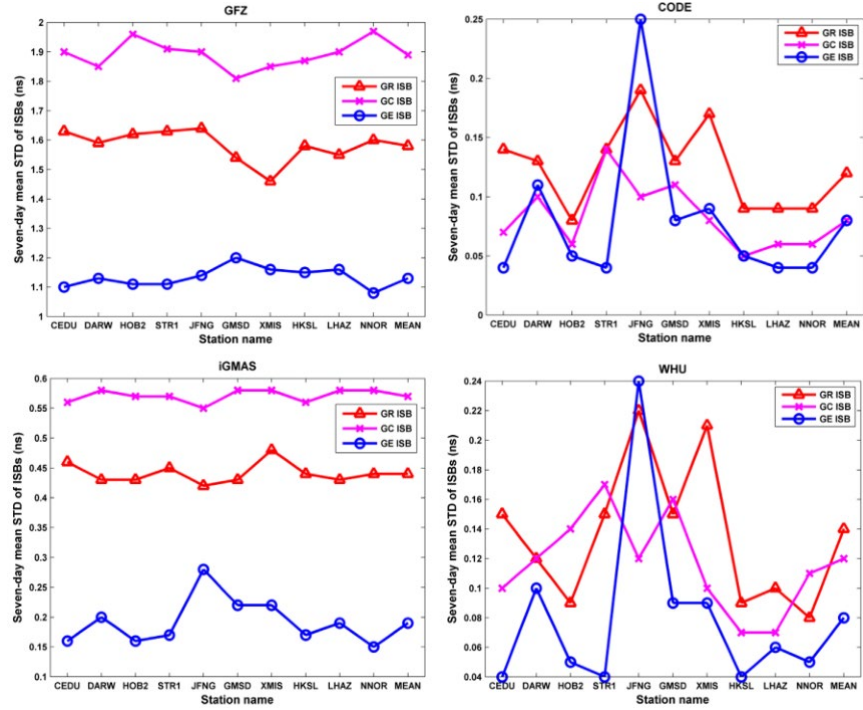
- Διαφορετικό για διαφορετικούς σταθμούς, χρησιμοποιώντας προϊόντα από ίδια κέντρα ανάλυσης. Παρόλα αυτά, οι ημερήσιες και οι εβδομαδιαίες τυπικές αποκλίσεις τους είναι σχεδόν ίσες, υπονοώντας ότι η σταθερότητα των ISB εντός της εβδομάδας και εβδομαδιαίως για διαφορετικούς σταθμούς είναι σε καλή συνοχή.
- Διαφορετικό για τον ίδιο σταθμό χρησιμοποιώντας προϊόντα από διαφορετικά κέντρα ανάλυσης.
- Διαφορετικό για τον ίδιο σταθμό χρησιμοποιώντας προϊόντα από ίδια κέντρα ανάλυσης.

Σφάλματα μεταξύ προϊόντων χρόνου υψηλής ακρίβειας παραγόμενα από διαφορετικά κέντρα ανάλυσης

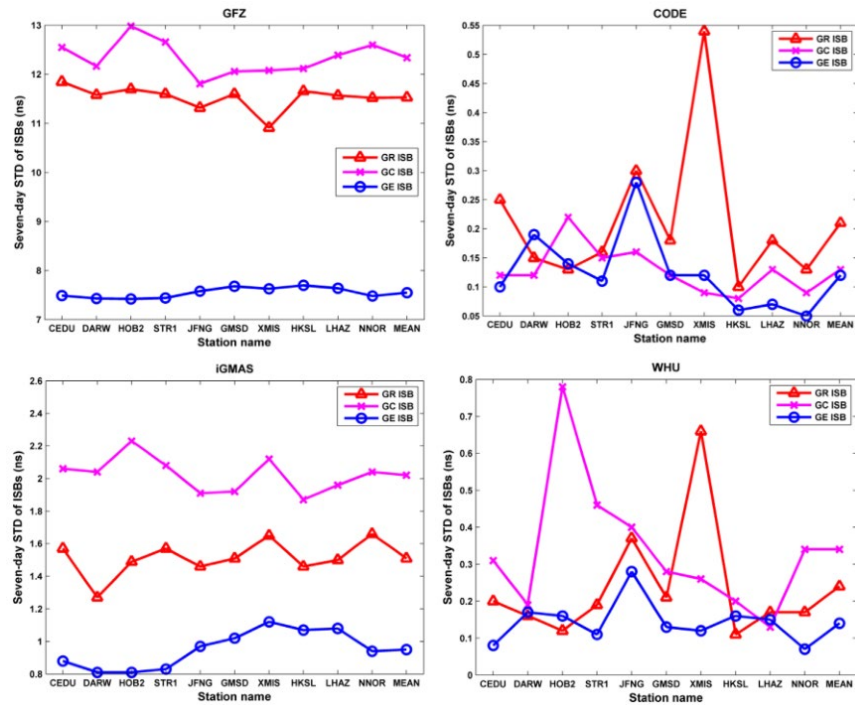
- Συστηματικές αποκλίσεις μεταξύ προϊόντων του ίδιου δορυφορικού συστήματος προερχόμενα από διαφορετικά κέντρα ανάλυσης, οι οποίες όμως είναι σταθερές σε εβδομαδιαία βάση.
- Συστηματικές αποκλίσεις των διαφορετικών δορυφορικών συστημάτων διαφέρουν για το ίδιο κέντρο ανάλυσης και για διαφορετικά κέντρα ανάλυσης.

Βραχυχρόνια και μακροχρόνια σταθερότητα των ISBs εκτιμώμενα από προϊόντα διαφορετικών κέντρων ανάλυσης

- Μεγαλύτερη σταθερότητα από τα προϊόντα των κέντρων ανάλυσης WHU και CODE (Εικόνα 31).
- Μικρότερη σταθερότητα από τα προϊόντα του κέντρου ανάλυσης iGMAS, ενώ οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις εμφανίζονται χρησιμοποιώντας τα προϊόντα του κέντρου ανάλυσης GFZ (Εικόνα 31).
- Οι μακροχρόνιες μεταβολές είναι μεγαλύτερες από τις βραχυχρόνιες χρησιμοποιώντας προϊόντα από τα κέντρα ανάλυσης GFZ και iGMAS.
- Οι βραχυχρόνιες και μακροχρόνιες μεταβολές είναι σχεδόν ίσες χρησιμοποιώντας προϊόντα από τα κέντρα ανάλυσης CODE και WHU.



Εικόνα 31. Ημερήσια τυπική απόκλιση των εκτιμώμενων ISB GR/GC/GE, χρησιμοποιώντας ακριβή προϊόντα από τα κέντρα ανάλυσης GFZ, CODE, IGMAS και WHU (Hong, et al., 2019)



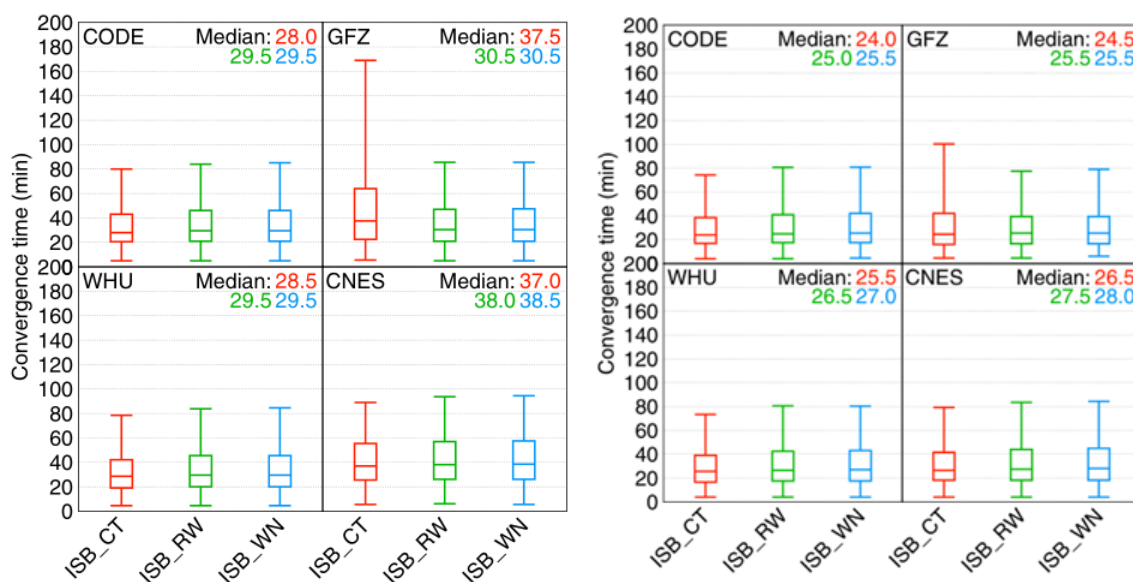
Εικόνα 32. Εβδομαδιαία τυπική απόκλιση των εκτιμώμενων ISB GR/GC/GE χρησιμοποιώντας ακριβή προϊόντα από τα κέντρα ανάλυσης GFZ, CODE, IGMAS και WHU (Hong, et al., 2019)

Απόδοση διαφορετικών στρατηγικών επίλυσης των ISB ανάλογα με τις ημερήσιες διακυμάνσεις τους

- Για το κέντρο ανάλυσης CODE τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται εφαρμόζοντας Time Constant.
- Για το κέντρο ανάλυσης GFZ τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται εφαρμόζοντας 20 minutes Time Constant.
- Για το κέντρο ανάλυσης iGMAS τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται εφαρμόζοντας 1 hour Time Constant.
- Για το κέντρο ανάλυσης WHU τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται εφαρμόζοντας Time Constant.

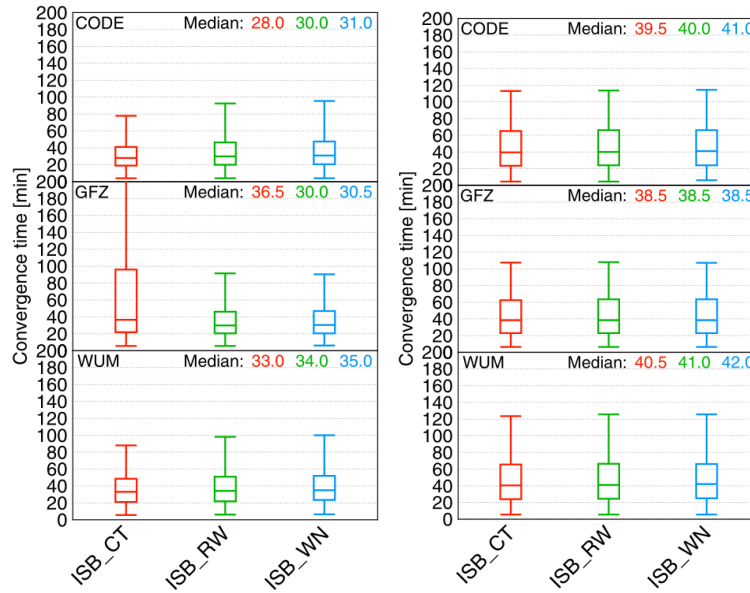
Όσον αφορά την εκτίμηση των διαφορετικών τύπων ISB μέσω αδιαφοροποίητων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων κώδικα και φάσης, για συνδυασμούς διαφορετικών κέντρων ανάλυσης (CODE, CNES ,WHU και GFZ) και στοχαστικών μοντέλων διαμόρφωσης τους (random walk, white noise και random/time constant) ανέδειξε τα εξής συμπεράσματα (Zhou, et al., 2019):

- Συνοχή ως προς τον χρόνο σύγκλισης και ακρίβειας προσδιορισμού θέσης για τα κέντρα ανάλυσης CODE, CNES και WHU ως προς τα στοχαστικά μοντέλα random walk, white noise και random/time constant.
- Όταν χρησιμοποιούνται προϊόντα από το κέντρο ανάλυσης GFZ ενδείκνυται πιο κατάλληλη η επιλογή των στοχαστικών μοντέλων random walk και white noise έναντι του random constant. Συγκεκριμένα, οι χρόνοι σύγκλισης είναι πολύ μεγαλύτεροι έναντι των άλλων κέντρων ανάλυσης, πλην του συνδυασμού GPS και QZSS (Εικόνες 33 και 34). Ως προς την ακρίβεια προσδιορισμού θέσης προκύπτουν πάλι τα ίδια αποτελέσματα, πλην του συνδυασμού GPS-QZSS.



Εικόνα 33. Χρόνος σύγκλισης της μεθόδου PPP για τους συνδυασμούς GPS/GLONASS (αριστερή εικόνα) και GPS/Galileo (δεξιά εικόνα), μεταξύ διαφορετικών σεναρίων διαχείρισης

των ISBs, χρησιμοποιώντας τελικά προϊόντα των κέντρων ανάλυσης CODE, GFZ, CNES και WHU (Zhou, et al., 2019)



Εικόνα 34. Χρόνος σύγκλισης της μεθόδου PPP για τους συνδυασμούς GPS/BeiDou (αριστερή εικόνα) και GPS/QZSS (δεξιά εικόνα), μεταξύ διαφορετικών σεναρίων διαχείρισης των ISBs, χρησιμοποιώντας τελικά προϊόντα από τα κέντρα ανάλυσης CODE, GFZ, CNES και WHU (Zhou, et al., 2019)

5.4 Inter-Frequency Biases

Τα biases κώδικα διαφέρουν ανάλογα με το ποια προσέγγιση ακολουθείτε για την μετάδοση των σημάτων GNSS. Οι δορυφόροι των σχηματισμών που υιοθετούν την προσέγγιση FDMA δεν μεταδίδουν τα σήματα τους στην ίδια συχνότητα. Σε αυτή την κατηγορία υπάγοντα οι δορυφόροι του GLONASS που χρησιμοποιούν την μέθοδο FDMA, δηλαδή κάθε δορυφόρος του GLONASS μεταδίδει το σήμα του σε μοναδική για αυτόν συχνότητα. Κάθε διακριτή συχνότητα προκύπτει από τις κύριες συχνότητες L1 και L2 σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις

$$f_{1,k} = f_{0,1} + k \cdot \Delta f_1 = 1602 + k \cdot 0.5625 \text{ [MHz]} \quad 6.43$$

$$f_{2,k} = f_{0,2} + k \cdot \Delta f_2 = 1246 + k \cdot 0.4375 \text{ [MHz]} \quad 6.44$$

όπου,

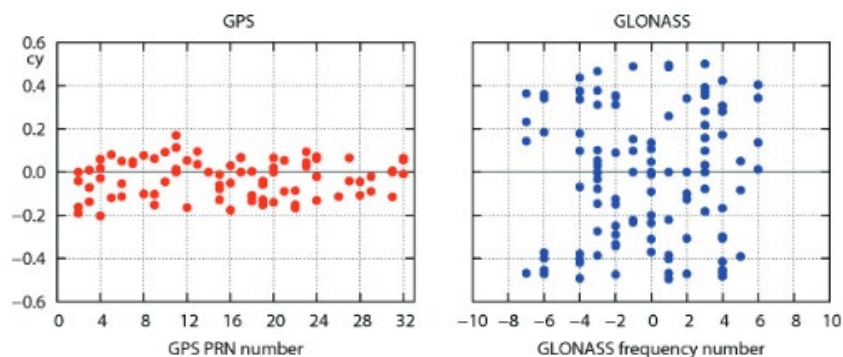
k : ο αριθμός του καναλιού της συχνότητας επιλεγμένος από το εύρος [-7,6]

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, λόγω της προσέγγισης αυτής προκαλείτε μία καθυστέρηση στην αναλογική διάταξη επεξεργασίας των σημάτων και στην ψηφιακή επεξεργασία των σημάτων ονομαζόμενη IFCB (Inter Frequency Code Bias) και IFPB (Inter Frequency Phase Bias) αντίστοιχα. Τα IFCBs όταν λαμβάνονται υπόψη στην διαδικασία της επίλυσης PPP μειώνουν τον χρόνο σύγκλισης, αφού οι παρατηρήσεις κώδικα λαμβάνονται υπόψη με μεγαλύτερο βάρος στην

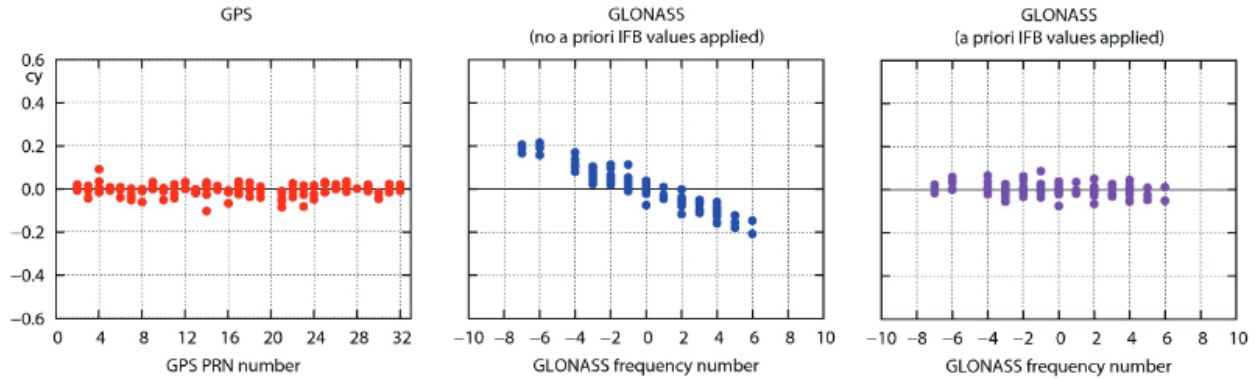
επεξεργασία. Αν τα IFCBs δεν αντιμετωπιστούν κατάλληλα η καθυστέρηση λόγω IFCB μπορεί να ξεπεράσει τα ± 10 ns. Αντίθετα, τα IFPBs είναι απαραίτητα για την επίλυση των ασαφειών φάσης στην ακέραια τιμή τους. Σημαντικό χαρακτηριστικό των IFPBs είναι η γραμμική εξάρτηση τους από την συχνότητα, η οποία είναι σχεδόν ίδια για τις συχνότητες L1 και L2, αλλά διαφορετική για διαφορετικούς τύπους δεκτών της τάξης των 5 cm για γειτονικές συχνότητες και συνεπώς 73 cm για ολόκληρη την ζώνη συχνοτήτων L1 ή L2 (Reussner & Wanning, 2011).

Βέβαια οι ασάφειες φάσεις εκτός από τα IFPBs εξαρτώνται και από τα IFCBs. Συγκεκριμένα, για την επίλυση των ασαφειών φάσης στην ακέραια τιμή τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο γραμμικός συνδυασμός Melbourne-Wübbena για την επίλυση των ασαφειών φάσης του γραμμικού συνδυασμού της ευρείας οδού (Wide Line), χρησιμοποιώντας τις παρατηρήσεις κώδικα του γραμμικού συνδυασμού της στενής οδού (Narrow Lane). Αντίθετα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν ο γραμμικός συνδυασμός Narrow Lane συνοδευόμενος από a-priori τιμές IFPBs (Πίνακας 14) και διορθώσεις ιονόσφαιρας. Οι διορθώσεις ιονόσφαιρας χρειάζονται καθώς σε αντίθεση με τον συνδυασμό Melbourne-Wübbena δεν απαλείφεται το ιονοσφαιρικό σφάλμα (Reussner & Wanning, 2011).

Στην πρώτη προσέγγιση οι ασάφειες φάσης για το GPS μπορούν να επιλυθούν στην ακέραια τιμή τους, επειδή το δεκαδικό μέρος των ασαφειών κυμαίνεται από -0.2 έως 0.2 κύκλους. Για το GLONASS όμως το δεκαδικό μέρος των ασαφειών μεταβάλλεται από -0.5 έως 0.5 κύκλους, δηλαδή τα biases λόγω IFPBs και IFCBs είναι μεγαλύτερα του μήκους κύματος του συνδυασμού Melbourne-Wübbena (Εικόνα 35). Αντίθετα, στην επίλυση των ασαφειών φάσης του GLONASS χρησιμοποιώντας τον γραμμικό συνδυασμό της ευρείας οδού οι ασάφειες φάσης μπορούν να επιλυθούν στην ακέραια τιμή τους (Εικόνα 36), η οποία βέβαια εξαρτάται από την ποιότητα του ιονοσφαιρικού μοντέλου που εφαρμόζεται.



Εικόνα 35. Δεκαδικά μέρη των εκτιμώμενων ασαφειών φάσης της ευρείας οδού (Wide Lane) χρησιμοποιώντας τον γραμμικό συνδυασμό Melbourne-Wübbena στην μέθοδο PPP (Reussner & Wanning, 2011)



Εικόνα 36. Δεκαδικά μέρη των εκτιμώμενων ασαφειών φάσης της ευρείας οδού στην μέθοδο PPP. Στην τρίτη απεικόνιση δεξιά παρουσιάζονται αποτελέσματα του GLONASS εφαρμόζοντας a-priory διορθώσεις IFBs, του Πίνακα 14, στα παρατηρούμενα δεδομένα (Reussner & Wanninger, 2011)

5.4.1 Φάσης

Τα IFBs φάσης στην μέθοδο PPP αντιμετωπίζονται αν χρησιμοποιηθούν a-priory τιμές τους όπως αυτές του πίνακα 14, ώστε να είναι δυνατή η επίλυση των ασαφειών φάσης του GLONASS στην ακέραια τιμή τους (Wanninger, 2011; Reussner & Wanninger, 2011).

Πίνακας 14. IFB φάσης για τις συχνότητες L1 και L2 του συστήματος GLONASS για εννιά διαφορετικούς κατασκευαστές δεκτών (Reussner & Wanninger, 2011)

Κατασκευαστής δεκτών	a-priory διορθώσεις IFB (cm)
Trimble	-0.7
Asheteck(old), Javad, JPS, TPS	0
Asheteck(new)	0.4
Leica, Novatel	2.3
Septentrio	4.9

Οι τιμές αυτές εκφράζουν διορθώσεις IFB φάσης για τις συχνότητες L1 και L2 του συστήματος GLONASS για εννιά διαφορετικούς κατασκευαστές δεκτών και υπολογίζονται χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις φάσης απλών διαφορών μεταξύ δεκτών (Wanninger, 2011) για συνδυασμένη επίλυση GPS/GLONASS (σχέσεις 6.45, 6.46).

$$\Delta\Phi_{a,b}^{s,G} = \Delta\rho_{a,b}^s + c \cdot \Delta t_{a,b}^{s,G} + \lambda \cdot \Delta N_{a,b}^s + \varepsilon_{\Delta\Phi} \quad 6.45$$

$$\Delta\Phi_{a,b}^{i,R} = \Delta\rho_{a,b}^s + c \cdot (\Delta t_{a,b}^{s,G} + k \cdot \Delta\Delta b_{a,b}^R) + \lambda \cdot \Delta N_{a,b}^s + \varepsilon_{\Delta\Phi} \quad 6.46$$

όπου

a, b : δείκτες που εκφράζουν τους δέκτες

$\Delta\rho$: είναι η απλή διαφορά της γεωμετρικής απόστασης δορυφόρου δέκτη

Δdt : η διαφορά μεταξύ των αποχών του χρονομέτρου των δεκτών a και b

$\Delta b_{a,b}^R$: η διαφορά μεταξύ των IFBs φάσης παρακείμενων συχνοτήτων μεταξύ δύο δεκτών

$\Delta N_{a,b}^S$: η ασάφεια φάσης της απλής διαφοράς μεταξύ δεκτών

$\varepsilon_{\Delta\phi}$: το άθροισμα όλων μη λαμβανόμενων συστηματικών και τυχαίων σφαλμάτων της παρατήρησης

Για την απόδοση απόλυτων τιμών στα εκτιμώμενα IFBs των απλών διαφορών, ο μέσος όρος των IFBs ενός τύπου δεκτών πρέπει να θεωρηθεί ίσο με το μηδέν.

5.4.2 Κώδικα

Στην μέθοδο PPP εκτός από τις παρατηρήσεις φάσης χρησιμοποιούνται και οι παρατηρήσεις κώδικα, οι οποίες όμως στις περισσότερες εφαρμογές συμπεριλαμβάνονται με μικρά βάρη μετριάζοντας με αυτόν τον τρόπο της επιπτώσεις των IFCBs. Αποτόκο αυτού είναι ο επηρεασμός του χρόνου σύγκλισης της λύσης, αφού οι παρατηρήσεις ψευδοαπόστασης δεν συμπεριλαμβάνονται στο στάδιο αρχικοποίησης ή συμπεριλαμβάνονται με πολύ μικρά βάρη.

Από την διαμόρφωση των γραμμικοποιημένων σχέσεων 3.4 και 3.5 των αδιαφοροποίητων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων κώδικα και φάσης σε δύο συχνότητες, εφαρμόζοντας παράλληλα τα ακριβή προϊόντα χρόνου και τροχιών για τους δορυφόρους, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- χρησιμοποιώντας τον γραμμικό συνδυασμό ελευθέρως ιονόσφαιρας μπορούν να απαλειφθούν οι μη βαθμονομημένες καθυστερήσεις κώδικα του δορυφόρου, αλλιώς πρέπει να ληφθούν υπόψη τα προϊόντα DCB από τα αντίστοιχα κέντρα δεδομένων.
- οι ασάφειες φάσης απορροφάνε τα $d_{IF_{12}}^{S,T}$, $b_{r,j}^{S,T}$ και $b_j^{S,T}$ οπότε αυτές εκτιμώνται στην δεκαδική μορφή τους.
- για τα $d_{r,1}^{S,T}$ και $d_{r,2}^{S,T}$ εκτιμάτε η διαφορά τους, δηλαδή η παράμετρος $DCB_{r,P_1P_2}^T$, ενσωματωμένη στην ιονοσφαιρική καθυστέρηση.

Στην περίπτωση του GLONASS τα IFCBs μπορούν να εκτιμηθούν με βάση τέσσερις μεθόδους (Zhou, et al., 2017). Η πρώτη μέθοδος απορρίπτει τα IFCBs καθιστώντας το μοντέλο προσδιορισμού θέσης του GLONASS το ίδιο με αυτό του GPS. Συγκεκριμένα, ένα μέρος των IFCBs κώδικα απορροφάτε από την αποχή του χρονομέτρου του δέκτη και την ιονοσφαιρική καθυστέρηση και ένα άλλο μέρος τους από τα υπόλοιπα των ψευδοαποστάσεων.

Η δεύτερη μέθοδος εκτιμάει τα IFBs του GLONASS ως γραμμική συνάρτηση του αριθμού συχνότητας k

$$d_{r,j}^{S,R} = d_{r,j}^R + k^{S,R} \cdot \Delta_{r,j}^R \quad 6.47$$

όπου

$d_{r,j}^R$: το IFCB του δορυφόρου GLONASS με αριθμό συχνότητας 0

$\Delta_{r,j}^R$: το μέρος του IFCB που εξαρτάται από τον αριθμό συχνότητας

και οι εκτιμώμενες παράμετροι του μοντέλου, έπειτα από παραμετροποίηση, διαμορφώνονται ως εξής

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}, cdt_r^G, \Delta_{r,12}^R, Zw, \bar{I}_{r,1}^{s,R}, \bar{N}_{r,1}^{s,R}, \bar{N}_{r,2}^{s,R}] \quad 6.48$$

με

$$cdt_r^R = cdt_r + d_{r,IF_{12}}^R$$

$$\Delta_{r,12}^R = \Delta_{r,2}^R - \mu_2^R \cdot \Delta_{r,1}^R$$

$$\bar{I}_{r,1}^{s,R} = I_{r,1}^{s,R} + \beta_{12}^R DCB_{r,P_1P_2}^G + k^{s,R} \cdot \Delta_{r,1}^R$$

$$\bar{N}_{r,1}^{s,R} = \lambda_1^{s,R} (N_{r,1}^{s,R} + b_{r,1}^R - b_1^{s,R}) + d_{IF_{12}}^{s,R} - d_{r,IF_{12}}^R + k^{s,R} \cdot \Delta_{r,1}^R + \beta_{12}^R \cdot DCB_{r,P_1P_2}^R$$

$$\bar{N}_{r,2}^{s,R} = \lambda_2^{s,R} (N_{r,2}^{s,R} + b_{r,2}^R - b_2^{s,R}) + d_{IF_{12}}^{s,R} - d_{r,IF_{12}}^R + \mu_2^R \cdot k^{s,R} \cdot \Delta_{r,1}^R + \mu_2^R \cdot \beta_{12}^R \cdot DCB_{r,P_1P_2}^R$$

Η τρίτη μέθοδος εκτιμάει τα IFCBs ως πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού του αριθμού συχνότητας k

$$d_{r,j}^{s,R} = d_{r,j}^R + k^{s,R} \cdot \Delta_{r,j}^R + (k^{s,R})^2 \cdot \Omega_{r,j}^R \quad 6.49$$

όπου

$\Omega_{r,j}^R$: το μέρος του IFB που εξαρτάται από το τετράγωνο του αριθμού συχνότητας

και οι εκτιμώμενες παράμετροι του μοντέλου, έπειτα από παραμετροποίηση, διαμορφώνονται ως εξής

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}, cdt_r^G, \Delta_{r,12}^R, \Omega_{r,12}^R, Zw, \bar{I}_{r,1}^{s,R}, \bar{N}_{r,1}^{s,R}, \bar{N}_{r,2}^{s,R}] \quad 6.50$$

με

$$cdt_r^R = cdt_r + d_{r,IF_{12}}^R$$

$$\Delta_{r,12}^R = \Delta_{r,2}^R - \mu_2^R \cdot \Delta_{r,1}^R$$

$$\Omega_{r,12}^R = \Omega_{r,2}^R - \mu_2^R \cdot \Omega_{r,1}^R$$

$$\bar{I}_{r,1}^{s,R} = I_{r,1}^{s,R} + \beta_{12}^R DCB_{r,P_1P_2}^G + k^{s,R} \cdot \Delta_{r,1}^R$$

$$\bar{N}_{r,1}^{s,R} = \lambda_1^{s,R} (N_{r,1}^{s,R} + b_{r,1}^R - b_1^{s,R}) + d_{IF_{12}}^{s,R} - d_{r,IF_{12}}^R + k^{s,R} \cdot \Delta_{r,1}^R + \beta_{12}^R \cdot DCB_{r,P_1P_2}^R$$

$$\begin{aligned} \bar{N}_{r,2}^{s,R} = & \lambda_2^{s,R} (N_{r,2}^{s,R} + b_{r,2}^R - b_2^{s,R}) + d_{IF_{12}}^{s,R} - d_{r,IF_{12}}^R + \mu_2^R \cdot k^{s,R} \cdot \Delta_{r,1}^R + \mu_2^R \cdot (k^{s,R})^2 \cdot \Omega_{r,1}^R \\ & + \mu_2^R \cdot \beta_{12}^R \cdot DCB_{r,P_1P_2}^R \end{aligned}$$

Τέλος, η τέταρτη μέθοδος εκτιμάει τα IFBs για κάθε δορυφόρο του GLONASS ξεχωριστά

$$d_{r,j}^{s,R} = d_{r,j}^R + \Delta d_{r,j}^{s,R} \quad 6.51$$

όπου

$\Delta d_{r,j}^{s,R}$: το μέρος του IFB που εξαρτάται από τον δορυφόρο του GLONASS και την συχνότητα του και οι εκτιμώμενες παράμετροι του μοντέλου, έπειτα από παραμετροποίηση, διαμορφώνονται ως εξής

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}, cdt_r^G, \Delta d_{r,j}^{s,R}, Zw, \bar{\mathbf{I}}_{r,1}^{s,R}, \bar{\mathbf{N}}_{r,1}^{s,R}, \bar{\mathbf{N}}_{r,2}^{s,R}] \quad 6.52$$

με

$$cdt_r^R = cdt_r + d_{r,IF_{12}}^R$$

$$\Delta_{r,12}^R = \Delta_{r,2}^R - \mu_2^R \cdot \Delta_{r,1}^R$$

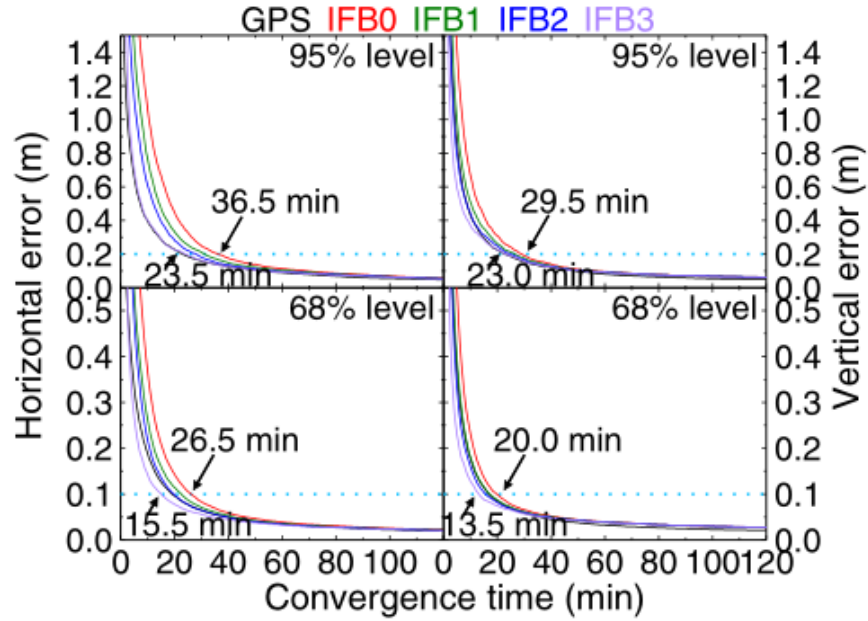
$$\Omega_{r,12}^R = \Omega_{r,2}^R - \mu_2^R \cdot \Omega_{r,1}^R$$

$$\bar{I}_{r,1}^{s,R} = I_{r,1}^{s,R} + \beta_{12}^R DCB_{r,P_1P_2}^G + k^{s,R} \cdot \Delta_{r,1}^R$$

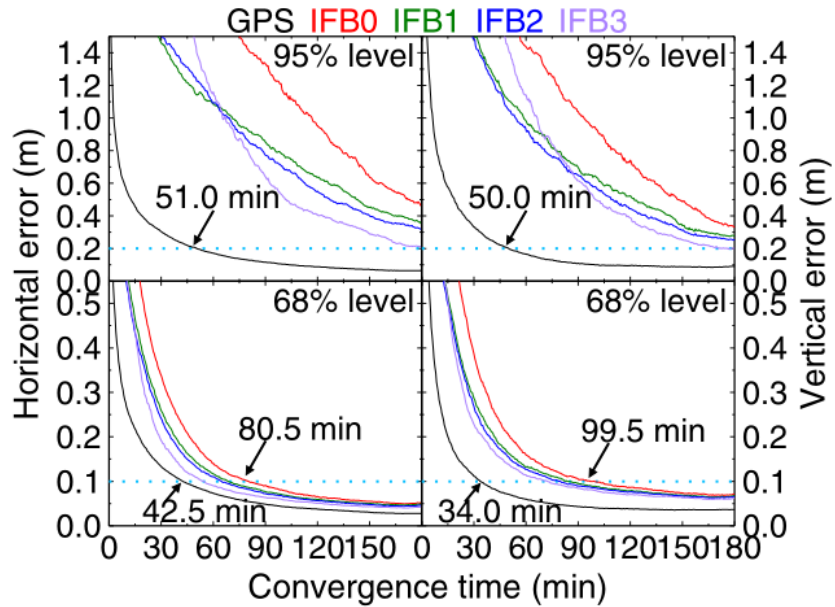
$$\bar{N}_{r,1}^{s,R} = \lambda_1^{s,R} (N_{r,1}^{s,R} + b_{r,1}^R - b_1^{s,R}) + d_{IF_{12}}^{s,R} - d_{r,IF_{12}}^R + \Delta_{r,1}^{s,R} + \beta_{12}^R \cdot DCB_{r,P_1P_2}^R$$

$$\bar{N}_{r,2}^{s,R} = \lambda_2^{s,R} (N_{r,2}^{s,R} + b_{r,2}^R - b_2^{s,R}) + d_{IF_{12}}^{s,R} - d_{r,IF_{12}}^R + \mu_2^R \cdot \Delta_{r,1}^{s,R} + \mu_2^R \cdot \beta_{12}^R \cdot DCB_{r,P_1P_2}^R$$

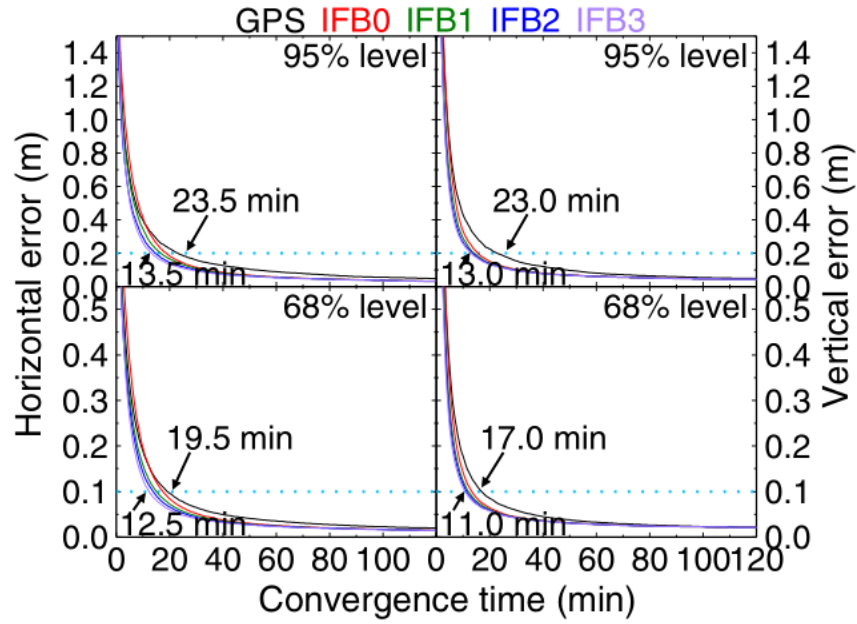
Εφαρμογή των μοντέλων εκτίμησης των IFBs κώδικα του GLONASS (Zhou, et al., 2017) ανέδειξε ότι ο χρόνος σύγκλισης της επίλυσης PPP για GLONASS μόνο ή και για συνδυασμό GPS-GLONASS ελαττώνεται περισσότερο από 20% για στατικό και κινηματικό εντοπισμό (Εικόνες 37 έως 40). Ως προς την απόδοση των μοντέλων εκτίμησης των IFBs κώδικα μεταξύ τους, όλα είναι συγκρίσιμα πλην του κινηματικού εντοπισμού χρησιμοποιώντας μόνο παρατηρήσεις GLONASS. Επιπλέον, ο στατικός εντοπισμός, χρησιμοποιώντας μόνο παρατηρήσεις GPS, αποδίδει καλύτερα έναντι του GLONASS. Τέλος, η μέθοδος που υπερέχει έναντι των άλλων, ως προς το χρόνο σύγκλισης και ακρίβεια θέσης, είναι αυτή που εκτιμάει τα IFBs για κάθε δορυφόρο του GLONASS ξεχωριστά.



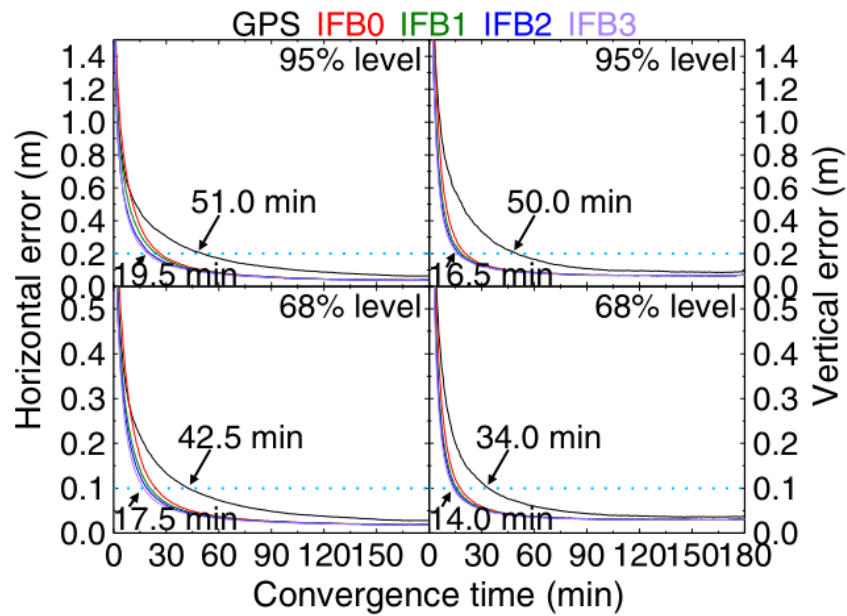
Εικόνα 37. Χρόνος σύγκλισης στατικού PPP, χρησιμοποιώντας GPS-μόνο και GLONASS-μόνο για τα διάφορα μοντέλα εκτίμησης των IFBs (Zhou, et al., 2017)



Εικόνα 38. Χρόνος σύγκλισης κινηματικού PPP, χρησιμοποιώντας GPS-μόνο και GLONASS-μόνο για τα διάφορα μοντέλα εκτίμησης των IFBs (Zhou, et al., 2017)



Εικόνα 39. Χρόνος σύγκλισης στατικού PPP, χρησιμοποιώντας GPS-μόνο και GPS+GLONASS για τα διάφορα μοντέλα εκτίμησης των IFBs (Zhou, et al., 2017)



Εικόνα 40. Χρόνος σύγκλισης κινηματικού PPP, χρησιμοποιώντας GPS-μόνο και GPS+GLONASS για τα διάφορα μοντέλα εκτίμησης των IFBs (Zhou, et al., 2017)

Κεφάλαιο 6

6.1 GAMP

Το GAMP (GNSS Analysis software for Multi-constellation and multi-frequency Precise positioning) αποτελεί ένα command line πρόγραμμα διαμορφωμένο σε γλώσσα προγραμματισμού C, το οποίο μπορεί να τρέξει σε Windows, Unix/Linux και Macintosh, βασισμένο στο λογισμικό ανοιχτού κώδικα RTKLIB (Takasu & Yasuda, 2009). Το GAMP παράλληλα διαθέτει το MatPlot ένα Graphical User Interface (GUI) διαμορφωμένο σε Matlab για την γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων του.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του GAMP είναι (Zhou, et al., 2018):

1. η επεξεργασία αδιαφοροποίητων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων κώδικα και φάσης για PPP χρησιμοποιώντας πολλαπλά συστήματα GNSS σε μία ή σε δύο συχνότητες
2. η αντιμετώπιση των IFBs κώδικα του GLONASS
3. εντοπισμός κύκλων ολίσθησης (cycle slips)
4. επεξεργασία πολλαπλών αρχείων παρατήρησης ταυτόχρονα
5. η ενιαία δομή των αρχείων εξόδου (αρχεία θέσης, συνολικού αριθμού παρατηρούμενων δορυφόρων, γωνίας ύψους δορυφόρων, υπόλοιπα ψευδοαποστάσεων και φερουσών φάσεων, STEC κτλ.)
6. η υιοθέτηση μιας νέας μορφή ανταλλαγής δεδομένων δέκτη η οποία ονομάζεται RCVEX

6.1.1 Διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων

Η επίλυση PPP χρησιμοποιώντας το GAMP προϋποθέτει την συλλογή των απαραίτητων αρχείων και την τοποθέτησή τους σε ένα ενιαίο φάκελο (directory). Συγκεκριμένα, στο directory θα πρέπει να εμπεριέχεται

- αρχείο/αρχεία παρατηρήσεων RINEX 2 ή RINEX 3.
- αρχείο/αρχεία πλοήγησης RINEX 2 ή RINEX 3.
- αρχείο/αρχεία προϊόντων υψηλής ακρίβειας παραγόμενα από τα κέντρα ανάλυσης IGS, ESA, CODE, GFZ, GRG, JPL, GBM, COM, GRM και WUM.
- αρχείο/αρχεία παραμέτρων περιστροφής της Γης.
- αρχείο IGS ANTEX.
- αρχείο/αρχεία SINEX, το οποίο περιλαμβάνει τις εκτιμώμενες συντεταγμένες των σταθμών και επιπρόσθετες βοηθητικές πληροφορίες.
- αρχείο παραμέτρων για ωκεάνιες παλίρροιες (BLQ).
- αρχείο/αρχεία ιονόσφαιρας IONEX με format στα πρότυπα του RINEX 2. Το GAMP χρησιμοποιεί ιονοσφαιρικούς χάρτες παραγόμενους από το κέντρο ανάλυσης CODE.
- αρχείο/αρχεία DCB παραγόμενα από το κέντρο ανάλυσης CAS και CODE.

Τα αρχεία παρατηρήσεων και πλοήγησης RINEX, τα προϊόντα υψηλής ακρίβειας, τα αρχεία SINEX, τα αρχεία IONEX και τα αρχεία DCB του κέντρου ανάλυσης CAS είναι διαθέσιμα από το κέντρο δεδομένων CDDIS

- https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/GNSS_data_and_product_archive.html

, τα αρχεία DCB του κέντρου ανάλυσης CODE είναι διαθέσιμα στην αρχειοθέτηση

- <ftp://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>

και τα αρχεία IGS ANTEX και BLQ είναι διαθέσιμα στην αρχειοθέτηση της υπηρεσίας IGS και στην υπηρεσία παροχής παραμέτρων ωκεάνιων παλιρροιών Chalmers

- <ftp://ftp.igs.org/pub/station/general/>
- <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>

Στην συνέχεια ο χρήστης δημιουργεί ένα αρχείο διαμόρφωσης (configuration file) χρησιμοποιώντας κάποιο κατάλληλο λογισμικό (Notepad, Notepad++), αποθηκεύοντας το στο ίδιο directory με τα προαναφερθέντα αρχεία (Εικόνα 41).

```
# GNSS data Analysis software for Multi-constellation and multi-frequency Precise positioning (GAMP) options

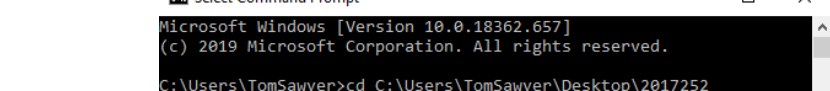
obs file/folder      = 0  %(0:file 1:folder)
                     = D:\2019\grac2450.17o

start_time           = 0  2017/01/01 0:00:00.0      %(0:from obs 1:from inp)
end_time             = 0  2017/01/01 0:00:00.0      %(0:from obs 1:from inp)
posmode              = 7  %(0:spp 6:ppp_kinematic 7:ppp_static)
soltype              = 0  %(0:forward 1:backward 2:combined-bf 3:combined-fb)
navsys               = 1  %(1:gps 4:glo 5:gps+glo 8:gal 16:qzs 32:bds)
gnssib               = 0  %(0:off 1:time constant 2:piece-wise constant 3:random walk process 4:white noise process)
gloicb               = 0  %(0:off 1:linear function of frequency number 2:quadratic polynomial function of frequency number
                          % 3:isb+icb every sat 4:isb+icb every frq)

minelev              = 7  %satellite cut-off elevation (deg)
maxout               = 3
sampleprc            = 0  %(sec)
inpfreq              = 2  % the number of processing frequencies
ioncopt              = 4  %(0:off 1:brdc 2:IF12 3:UCL 4:UC12 5:ion-tec)
ionopnoise            = 1  %(0: static 1: random walk 2: random walk (new) 3:white noise)
ionconstraint         = 1  %(0:off 1:on)
tropopt              = 4  %(0:off 1:saas 3:ztd-est 4:ztdgrad-est)
tropmf               = 1  %(0:nmf 1:gmf)
tidecorr             = 7  %(0:off 1:stl 2:otl 4:ptl 7:stl+otl+ptl)
cycleslip_GF         = 1 0.00  %threshold values for geometry-free (GF) cycle-slip detection (m)
cycleslip_MW         = 1 0.00  %threshold values for Melbourne-W'bbena (MW) cycle-slip detection (c)
errratio(P/L GPS)    = 100.0  %measurement error ratio between pseudorange and carrier phase observations
errratio(P/L GLO)    = 100.0
errratio(P/L BDS)    = 100.0
errratio(P/L GAL)    = 500.0
errratio(P/L QZS)    = 100.0
errmeas(L)           = 0.003  %the precision of carrier phase observations (m)
prcNoise(AMB)        = 1.0e-07  %process noise for ambiguity parameters (m/sqrt(s))
prcNoise(ZTD)        = 1.0e-04  %process noise for tropospheric zenith total delay (ZTD) parameters (m/sqrt(s))
prcNoise(ION)        = 4.0e-02  %process noise of random walk for slant ionospheric delay parameters (m/sqrt(s))
prcNoise(ION_GF)     = 1.0e-03  %process noise of random walk (new) for slant ionospheric delay parameters (m/sqrt(s))

outdir               = result_ERPno
output               = 21  %(sum, 0:off, 1:on)
  pos                = 1
  debug              = 1
  pdop               = 1
  elev              = 1
  dtrp              = 1
  ifamb              = 0
  wlamb_no           = 1
  wlamb_yes          = 1
  gf                 = 1
  amb_cs             = 0
  resc1              = 1
  respl              = 1
  resc2              = 1
  resp2              = 1
  resc3              = 0
  resp3              = 0
  stec               = 1
  isb                 = 1
  ibm                 = 0
  ifb                 = 0
  ippp               = 1
```

Εικόνα 41. Αρχείο διαμόρφωσης (configuration file) GAMP



```

Select Command Prompt
Microsoft Windows [Version 10.0.18362.657]
(c) 2019 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\TomSawyer>cd C:\Users\TomSawyer\Desktop\2017252

C:\Users\TomSawyer\Desktop\2017252> gamp gamp.cfg

```

The screenshot shows a window titled "GUIPlot" with standard window controls (minimize, maximize, close). Inside the window, there is a yellow button labeled "Plot Any". Below it, a section labeled "plot" contains several pink buttons: "Plot PPP", "Plot SPP", "Plot ZTD", "Plot sTEC", "Plot PDOP", "Plot resx", and "Plot wlam". In the center of this section are three input fields for ylim values: "ylim(PPP)" with a value of "1", "ylim(SPP)" with a value of "10", and "ylim(ZTD)" with a value of "0". At the bottom right of the "plot" section is a grey button labeled "Analysis".

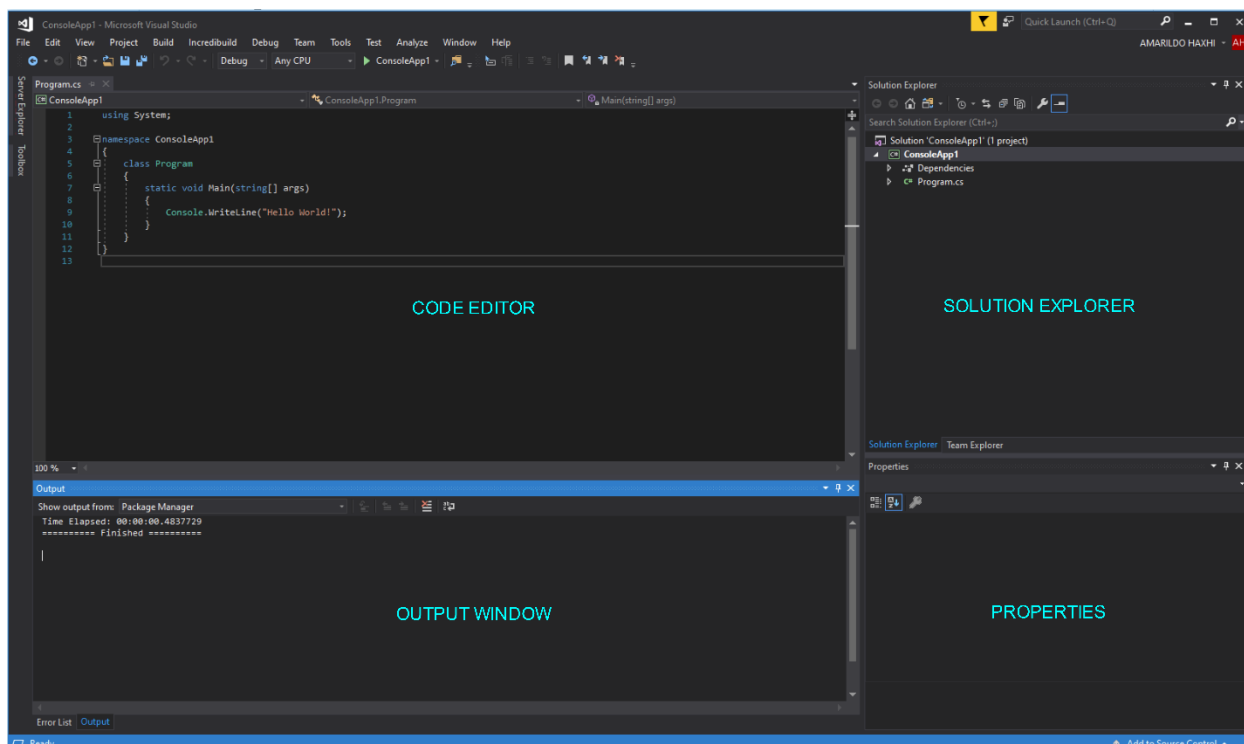
6.1.2 Μειονεκτήματα GAMP

Τα μειονεκτήματα του GAMP σχετίζονται με την εκτέλεση του προγράμματος και την γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων του. Συγκεκριμένα, ο χρήστης για την εκτέλεση του GAMP θα πρέπει κάθε φορά να δημιουργεί το configuration file και στην συνέχεια για την εκτέλεση του να μεταβαίνει στο command prompt. Για την γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων του το GAMP χρησιμοποιεί το MatPlot, το οποίο αποτελεί ξεχωριστό πρόγραμμα. Επιπλέον, στο MatPlot δεν γίνεται αντιπροσωπευτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε ορισμένα αρχεία όπως το αρχείο της επίλυσης θέσης (.pos), καθώς μεταξύ των εποχών όπου δεν υπάρχουν παρατηρήσεις η σύγκλιση της επίλυσης αναπαρίσταται ως ευθεία γραμμή δίνοντας εσφαλμένη εντύπωση. Τέλος, ένα ακόμη μειονέκτημα του MatPlot αποτελεί η μη δυνατότητα επεξεργασίας των παραγόμενων γραφικών αποτελεσμάτων του (zoom in, zoom out, pan κτλ.). Λαμβάνοντας τα παραπάνω μειονεκτήματα υπόψη δημιουργήθηκε για την βελτίωση του GAMP ένα Graphical User Interphase το GAMPG (**GAMP** Graphical User Interphase) χρησιμοποιώντας το Visual Studio σε γλώσσα προγραμματισμού C#.

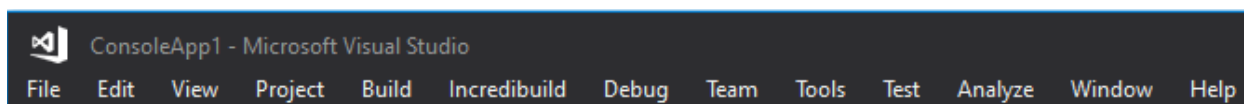
6.2 Microsoft Visual Studio

Το Visual Studio αποτελεί ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (Integrated Development Environment, IDE) από την Microsoft, όπου η κύρια χρήση του έγκειται στην ανάπτυξη προγραμμάτων, ιστοσελίδων (websites), web εφαρμογών, web υπηρεσιών και εφαρμογών για κινητά, το οποίο εκδόθηκε για πρώτη φορά το 1997 με την ονομασία Visual Studio 97. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ τριών εκδοχών του Visual Studio, την Community που είναι δωρεάν και προσβάσιμη για κάθε χρήστη από το 2014, την Professional, εκδοχή η οποία είναι εμπορική, απευθύνεται κυρίως σε μεγάλες εταιρείες και παρέχει κάποιες επιπλέον δυνατότητες από ότι η εκδοχή Community και την Enterprise εκδοχή η οποία προσαρμόζεται στην απαιτούμενη ποιότητα και ανάγκες μιας ομάδας.

Για την υλοποίηση του GAMPG χρησιμοποιήθηκε το Visual Studio 2017 Community, αλλά η τελευταία έκδοση του (έως το 2020) αποτελεί το Visual Studio 2019, το οποίο περιλαμβάνει νέες προσθήκες στην ανάπτυξη, στην συνεργασία και στο debugging ενός προγράμματος. Κατά την έναρξη του Visual Studio εμφανίζεται το κύριο interphase του το οποίο περιλαμβάνει το πεδίο Code Editor, παρέχοντας στον χρήστη την δυνατότητα να γράψει κώδικα, το πεδίο Output Window για την παρουσίαση αποτελεσμάτων στον χρήστη, προειδοποιήσεων του μεταγλωττιστή (compiler), μηνυμάτων σφαλμάτων και πληροφορίες αποσφαλμάτωσης (debugging), το πεδίο Solution Explorer, για την εμφάνιση των αρχείων πάνω στα οποία δουλεύει ο χρήστης και το πεδίο Properties, στο οποίο δίνονται πληροφορίες και περιεχόμενα για τα επιλεγμένα μέρη του έργου (Εικόνα 44). Το κύριο interphase του Visual Studio συγκροτείται επίσης και από τη γραμμή με τα μενού File, στο οποία εμπεριέχονται οι εντολές Create, Open και Save, Edit το οποίο περιλαμβάνει εντολές αναζήτησης και τροποποίησης κώδικα, View για την εμφάνιση των παραθύρων των επιπλέον εργαλείων, Project για την εισαγωγή αρχείων και εξαρτήσεων στο έργο, Tools για την πραγματοποίηση αλλαγών στις ρυθμίσεις και την λειτουργικότητας του Visual Studio μέσω επεκτάσεων αλλά και για την πρόσβαση σε διάφορα εργαλεία του Visual Studio (Εικόνα 45).



Εικόνα 44. IDE Microsoft Visual Studio 2017



Εικόνα 45. Διάφορα μενού του Visual Studio 2017

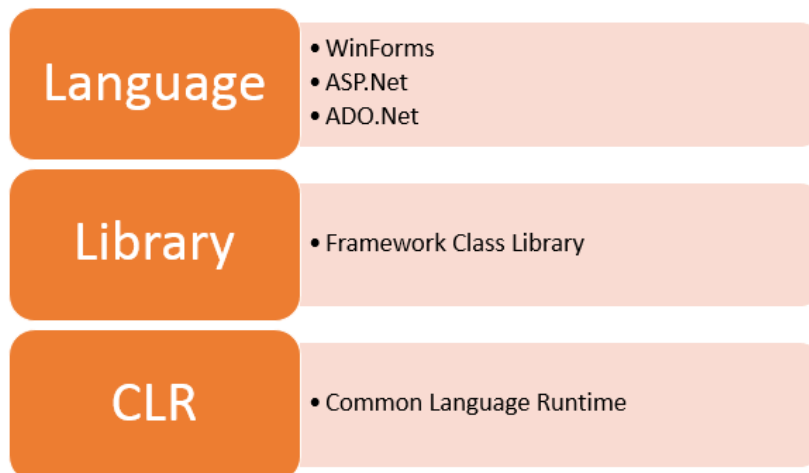
6.2.1 .Net framework και C#

Η γλώσσα προγραμματισμού C# αποτελεί μία αντικειμενοστραφής γλώσσα προγραμματισμού, η οποία αναπτύχθηκε σαν μέρος του .NET Framework από τον Anders Hejlsberg και την ομάδα του. Το .NET Framework αποτελεί ένα πλαίσιο λογισμικού (software framework), δηλαδή είναι ένα επαναχρησιμοποιούμενο σύστημα λογισμικού, αποτελούμενο από προγράμματα και βιβλιοθήκες, για την μεταγλώττιση (compiling) και την εκτέλεση προγραμμάτων γραμμένα σε διαφορετικές γλώσσες όπως η C#, η Visual Basic και η F#. Η πρώτη έκδοσή του .Net Framework ήταν η 1.0 και κυκλοφόρησε το 2002 με την τωρινή του έκδοση (2020) να αποτελεί η 4.8. Το πλαίσιο λογισμικού αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάπτυξη εφαρμογών βασισμένων σε φόρμες και web, ενώ παράλληλα υποστηρίζει διάφορες γλώσσες προγραμματισμού.

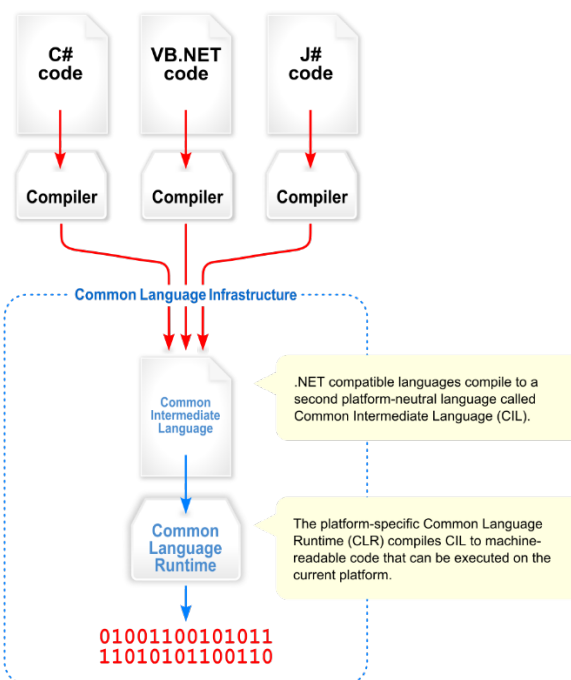
Η αρχιτεκτονική του .Net απαρτίζεται από το Common Language Runtime (CLR) το Class Library (CL) και το Languages (Εικόνα 46). Αναλυτικότερα το CLR αποτελεί το περιβάλλον στο οποίο τρέχει κάποιο πρόγραμμα διαμορφωμένο σε C#, Visual Basic ή F#, αφού πρώτα αυτό έχει μεταγλωττιστεί σε ένα ενδιάμεσο κώδικα ονομαζόμενο Common Intermediate Language (CIL) και παρέχει υπηρεσίες που διευκολύνουν την διαδικασία ανάπτυξης (Εικόνα 47). Το CL είναι μια συλλογή από συναρτήσεις και μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη εφαρμογών και

το Languages εκφράζει τους τύπους των εφαρμογών όπου μπορούν να υλοποιηθούν στο .Net framework. Οι τύποι αυτοί των εφαρμογών διακρίνονται σε:

- Winforms για την ανάπτυξη εφαρμογών που βασίζονται σε φόρμες. Μία φόρμα είναι μια κενή πλάκα η οποία εμπλουτίζεται με αντικείμενα (controls) και κώδικα, για την δημιουργία μιας διεπαφής χρήστη (user interphase) και την διαχείριση δεδομένων αντίστοιχα.
- ASP.Net για την ανάπτυξη εφαρμογών που βασίζονται στο web.
- ADO.Net για την ανάπτυξη εφαρμογών που θα αλληλοεπιδρούν με βάσεις δεδομένων.



Εικόνα 46. Διάγραμμα αρχιτεκτονικής .Net Framework (<https://www.guru99.com/net-framework.html>)



Εικόνα 47. Common Language Runtime (https://en.wikipedia.org/wiki/.NET_Framework)

Η C# αποτελεί μία μετεξέλιξη της C++ καθώς έχει βασιστεί πάνω στην αντικειμενοστρέφια (object oriented) και φιλοσοφία της δεύτερης. Στον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό το αντικείμενο αποτελεί το βασικό στοιχείο του προγράμματος το οποίο συγκροτείται από ιδιότητες και διαδικασίες, με τις δεύτερες να επενεργούν στις ιδιότητες αλλάζοντας τα δεδομένα τους. Το αντικείμενο αποτελεί στιγμιότυπο (instance) του τύπου δεδομένων κλάσης (class). Η κλάση αποτελεί το σχέδιο (blueprint) των δεδομένων και διαδικασιών που επιδρούν πάνω σε μια οποιαδήποτε κατηγορία αντικειμένων, υπαρκτών και μη. Η C# εκτός από αντικειμενοστρεφής είναι απλή, σύγχρονη, γρήγορη, open source, αποτελεσματική, ασφαλής, διαπλατφορμική γλώσσα προγραμματισμού, καθώς οι διάφορες εφαρμογές μπορούν να αναπτυχθούν σε Windows, Linux και Mac και συνεχώς εξελισσόμενη γλώσσα προγραμματισμού. Συγκεκριμένα, από το 1999-2002 έχουν εκδοθεί 11 εκδόσεις της, με την τελευταία να αποτελεί την C# 8.0 (2019). Με την γρήγορη αυτή εξέλιξη της πλέον είναι δυνατή η ανάπτυξη εφαρμογών κονσόλας, cloud και λογισμικά μηχανικής εκμάθησης.

6.3 Σχεδιασμός GAMPG (GAMP GUI)

Ο σχεδιασμός του GAMPG περιλαμβάνει σε πρώτο στάδιο το debugging του προγράμματος GAMP, χρησιμοποιώντας το Microsoft Visual Studio 2017. Στη συνέχεια ο σχεδιασμός του GAMPG διακρίνεται σε τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο καθορίζεται ο σχεδιασμός του κύριου interphase του GAMPG βασισμένο στο configuration file του GAMP, ενώ στο δεύτερο στάδιο διαμορφώνεται η φόρμα για την γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων του GAMPG. Στο τρίτο στάδιο παρουσιάζεται η υλοποίηση της φόρμας για τον υπολογισμό του VTEC.

6.3.1 Κύριο Interphase

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την δημιουργία του GAMPG βασίστηκε στο configuration file που απαιτείται για την εκτέλεση του GAMP. Συγκεκριμένα, η διαδικασία δημιουργίας του configuration file αναμένεται να είναι λιγότερο χρονοβόρα και δυσχερής αν πραγματοποιείται γραφικά μέσω του GUI, όπου ο χρήστης θα επιλέγει τις εκάστοτε παραμέτρους ανάλογα με την επίλυση που θέλει να κάνει. Παράλληλα το GUI πρέπει να κατέχει την θέση του διαμεσολαβητή μεταξύ χρήστη και command prompt ώστε να πραγματοποιείται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων πιο άμεσα με το πάτημα ενός κουμπιού.

6.3.2 Υπολογισμός VTEC

Το GAMP από την αδιαφοροποίητη και ανεπεξέργαστη επεξεργασία των παρατηρήσεων κώδικα και φάσης σε μία ή σε δύο συχνότητες μπορεί να υπολογίσει ιονοσφαιρικές καθυστερήσεις υψηλής ακρίβειας. Το αρχείο που εξάγεται εμπεριέχει τα STEC για κάθε παρατηρούμενο δορυφόρο από το δέκτη. Συγκεκριμένα κάθε γραμμή του αρχείου περιέχει το έτος, τον μήνα, την ημέρα, την ώρα, τα λεπτά, τα δευτερόλεπτα, την εβδομάδα GPS, τα δευτερόλεπτα GPS μέσα στην εβδομάδα και στην συνέχεια ακολουθούν τα εκτιμώμενα STEC για κάθε δορυφόρο του αντίστοιχου συστήματος (Εικόνα 48). Αν σε κάποια χρονική στιγμή δεν υπάρχει παρατήρηση προς κάποιον δορυφόρο το STEC παίρνει την τιμή 99999.

				G01	G02	G03	G04	G05	G06	G07	G08	G09	G10	G11	G12	G13	G14	G15	G16	
2017	09	01	00	00	00	1964	432000.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000
2017	09	01	00	00	30	1964	432030.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000
2017	09	01	00	01	00	1964	432060.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.221 55555.000
2017	09	01	00	01	30	1964	432090.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.206 55555.000
2017	09	01	00	01	00	1964	432120.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.107 55555.000
2017	09	01	00	02	00	1964	432150.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	6.981 55555.000
2017	09	01	00	02	30	1964	432180.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	6.910 55555.000
2017	09	01	00	03	00	1964	432210.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	6.834 55555.000
2017	09	01	00	03	30	1964	432240.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	6.803 55555.000
2017	09	01	00	04	00	1964	432270.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	6.870 55555.000
2017	09	01	00	04	30	1964	432300.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	6.849 55555.000
2017	09	01	00	05	00	1964	432330.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	6.913 55555.000
2017	09	01	00	05	30	1964	432360.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	6.915 55555.000
2017	09	01	00	06	00	1964	432390.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	6.953 55555.000
2017	09	01	00	06	30	1964	432420.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	6.935 55555.000
2017	09	01	00	07	00	1964	432450.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	6.976 55555.000
2017	09	01	00	07	30	1964	432480.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.062 55555.000
2017	09	01	00	08	00	1964	432510.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.122 55555.000
2017	09	01	00	08	30	1964	432540.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.134 55555.000
2017	09	01	00	09	00	1964	432570.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.169 55555.000
2017	09	01	00	09	30	1964	432600.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.193 55555.000
2017	09	01	00	10	00	1964	432630.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.230 55555.000
2017	09	01	00	10	30	1964	432660.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.207 55555.000
2017	09	01	00	11	00	1964	432690.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.172 55555.000
2017	09	01	00	11	30	1964	432720.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.162 55555.000
2017	09	01	00	12	00	1964	432750.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.178 55555.000
2017	09	01	00	12	30	1964	432780.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.186 55555.000
2017	09	01	00	13	00	1964	432810.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.164 55555.000
2017	09	01	00	13	30	1964	432840.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.166 55555.000
2017	09	01	00	14	00	1964	432870.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.167 55555.000
2017	09	01	00	14	30	1964	432900.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.166 55555.000
2017	09	01	00	15	00	1964	432930.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.210 55555.000
2017	09	01	00	15	30	1964	432960.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.227 55555.000
2017	09	01	00	16	00	1964	432990.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.247 55555.000
2017	09	01	00	16	30	1964	433020.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.253 55555.000
2017	09	01	00	17	00	1964	433050.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.268 55555.000
2017	09	01	00	17	30	1964	433080.00	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	55555.000	7.268 55555.000

Εικόνα 48. Μορφή αρχείου STEC

Συνεπώς, υιοθετώντας το μονοστρωματικό ιονοσφαιρικό μοντέλο (Κεφάλαιο 4.4), το STEC μπορεί να απεικονιστεί στο VTEC, διαδικασία η οποία ενσωματώνεται στο GUI. Στην συνάρτηση απεικόνισης χρειάζεται η γωνία ύψους του δορυφόρου την στιγμή της παρατήρησης. Η γωνία αυτή μπορεί να ανακτηθεί από το αρχείο RCVEX (Εικόνα 49). Στο αρχείο αυτό περιλαμβάνεται αρχικά μια επικεφαλίδα στην οποία περιγράφονται διάφορα χαρακτηριστικά της επίλυσης, όπως:

- το όνομα του σταθμού (STA_NAME), ο τύπος του δέκτη (RCV_TYPE) και της αντένας (ANT_TYPE)
- οι ακριβής συντεταγμένες XYZ του δέκτη (STA_POS)
- το διάστημα δειγματοληψίας των παρατηρήσεων σε δευτερόλεπτα (INTERVAL)
- ο τύπος των επιλεγμένων παρατηρήσεων για GPS (GPS_TYPE), GLONASS (GLONASS_TYPE), BDS (BDS_TYPE), Galileo (GALILEO_TYPE) και QZSS (QZSS_TYPE)
- τα τροποσφαιρικά μοντέλα διόρθωσης και οι συναρτήσεις απεικόνισης (TROP MODEL, TROP MAP, ZTD MODEL)
- ο τύπος των προϊόντων των τροχιών (ORBIT TYPE) και των χρονομέτρων (CLOCK TYPE) των δορυφόρων
- οι γωνίες αποκοπής των δορυφόρων (ELEV_MASK)
- οι αριθμοί των καναλιών του GLONASS (GLONASS K)
- η αρχή (START TIME) και το τέλος (END TIME) των παρατηρήσεων

Στα χαρακτηριστικά αυτά εντάχθηκε και το σύνολο των δορυφορικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε κάθε επίλυση (NAV_SYS) ώστε να είναι πιο εύκολη η επεξεργασία του αρχείου RCVEX. Συγκεκριμένα τα επιλεγμένα δορυφορικά συστήματα προκύπτουν από το άθροισμα των δεικτών 1, 4, 8, 16 και 32 που αντιστοιχούν στα δορυφορικά συστήματα GPS, GLONASS, Galileo, QZSS και BeiDou. Αν ο χρήστης στην επίλυση που θέλει να πραγματοποιήσει επιλέξει όλα τα προαναφερθέντα δορυφορικά συστήματα, τότε το NAV_SYS θα πάρει την τιμή 61.

```

+PPP_HEADER
  STA_NAME: GRAC
  RCV_TYPE: LEICA GR25
  ANT_TYPE: TRM57971.00      NONE
  STA_POS: 4581708.1673      556132.8698      4389341.4126 (m)
  INTERVAL: 30.00 (s)
  NAV_SYS: 1
  GPS_TYPE: C1C L1C C2W L2W C5Q L5Q
  GLONASS_TYPE: C1C L1C C(null) L(null)
  BEIDOU_TYPE: C1C L1C C(null) L(null)
  GALILEO_TYPE: C1C L1C C(null) L(null)
  TROP MODEL: GPT
  TROP MAP: GMF
  ZTD MODEL: SAAS
  ORBIT TYPE: Precise
  CLOCK TYPE: Precise
  ELEV. MASK: 0.0 (deg)
  GLONASS K: 1 -4 5 6 1 -4 5 6 -2 -7 0 -1 -2 0 0 -1 4 -3 3 2 4 -3 3 2
  START TIME: 2017/09/01 00:00:00.0 GPST (week 1964 432000.0s)
  END TIME: 2017/09/01 23:59:30.0 GPST (week 1964 518370.0s)
-PPP_HEADER

```

Εικόνα 49. Header αρχείου RCVEX

Με το πέρας της επικεφαλίδας, στο τμήμα των δεδομένων PPP_BLOCK, παρέχονται για κάθε δορυφόρο των αντίστοιχων δορυφορικών συστημάτων της εκάστοτε επίλυσης, πληροφορίες για

- τα PRNs και δείκτης ύπαρξης απώλειας κύκλων
- τις συντεταγμένες θέσης XYZ (SatPosX, SatPosY, SatPosZ) του δορυφόρου και οι αποχές των χρονομέτρων τους σε μέτρα (SatClock)
- τη γωνία ύψους (Elevation) και το αζιμούθιο (Azimuth) σε μοίρες
- τις αρχικές παρατηρήσεις ψευδοαπόστασης (P1, P2, P3) και φέρουσας φάσης (L1, L2, L3)
- την κατακόρυφη τροποσφαιρική καθυστέρηση (Trop Delay) και η υγρή συνάρτηση απεικόνισης (Trop Map)
- το φαινόμενο Sagnac (Sagnac)
- τις παλιρροιακές παραμορφώσεις (Tide Effect), συμπεριλαμβανομένων των παλιρροιών του στερεού φλοιού της Γης, των ωκεανών και του πόλου
- τις διορθώσεις PCO και PCV για κάθε συχνότητα (PCV_L1, PCV_L2)
- το φαινόμενο Wind-up σε κύκλους (Windup)

```

+PPP_BLOCK
*PRN,s:      SatPosX(m),      SatPosY(m),      SatPosZ(m),      SatClock(m),      Elevation(deg),      Azimuth(deg),      P1(m),      P2(m),      P3(m),
> 2017 9 1 0 0 0.0000000 9
G13,0: 16204545.3220,      359083.7478,      20923490.6600,      -27168.9158,      77.8028,      338.6241,      20238385.1200,      20238378.2010,      0.0000,
G15,0: 11110872.1797,      -11405818.8899,      21054500.4061,      -106530.1093,      44.7869,      304.0355,      21634338.5510,      21634332.3920,      0.0000,
G17,0: 14595995.1195,      22133108.0647,      -2282974.5407,      -47979.1232,      10.3633,      123.7239,      24753665.0760,      24753659.9830,      0.0000,
G18,0: -6159807.6661,      -15478917.7863,      21299221.7489,      188419.0177,      5.8077,      325.0511,      25471840.3170,      25471833.0120,      0.0000,
G20,0: 17976619.5880,      -13381012.0319,      14095050.1141,      145436.8450,      44.2889,      266.2077,      21484852.3930,      21484845.6050,      0.0000,
G21,0: -1394371.6931,      -22535336.7889,      14703166.6666,      -144756.8186,      1.8475,      301.2568,      26131445.5210,      26131439.3000,      0.0000,
G24,0: 14601036.7197,      -21235439.5012,      5766230.2717,      -11783.9826,      15.0543,      259.9008,      24035982.1480,      24035979.2220,      24035883.7110,
G28,0: 12437674.6965,      13489155.8881,      19832091.4572,      192472.0787,      53.7613,      68.5046,      21428290.8540,      21428283.6870,      0.0000,
G30,0: 5227735.1209,      17893513.7191,      18871280.3427,      42857.9889,      32.0349,      63.4201,      22556439.0500,      22556434.7720,      22556439.3550,
> 2017 9 1 0 0 30.0000000 9
G13,0: 16237982.5140,      472197.0215,      20896077.5404,      -27168.9667,      78.0042,      339.2520,      20234798.0600,      20234791.1050,      0.0000,
G15,0: 11161681.4698,      -11341509.6450,      21063437.6848,      -106530.1345,      45.0032,      304.0518,      21621087.2390,      21621081.0190,      0.0000,
G17,0: 14595522.4078,      22144702.7430,      -2187211.7115,      -47979.0971,      10.5279,      123.5742,      24737924.0880,      24737918.7990,      0.0000,
G18,0: -6082856.6500,      -15488099.6109,      21314537.3647,      188419.1021,      5.9573,      324.9645,      25455574.8380,      25455567.2820,      0.0000,
G20,0: 18031927.8777,      -13380448.6600,      14025444.2410,      145436.8360,      44.2504,      265.8834,      21487689.7200,      21487682.8620,      0.0000,
G21,0: -1366014.8648,      -22579694.2211,      14633593.6044,      -144756.7315,      1.7774,      301.0780,      26136873.7540,      26136867.1580,      0.0000,
G24,0: 14600775.9009,      -21210511.4752,      5857322.4263,      -11783.9945,      15.2261,      260.0457,      24018561.9050,      24018558.7140,      24018563.3710,
G28,0: 12366258.3915,      13489153.3560,      19878199.8571,      192472.1531,      53.6490,      68.1763,      21435438.9800,      21435431.8000,      0.0000,
G30,0: 5186954.0857,      17953111.8674,      18825422.7403,      42857.9670,      31.8441,      63.5325,      22571765.2570,      22571761.0530,      22571765.6540,

```

Εικόνα 50. Τμήμα δεδομένων (PPP_BLOCK) αρχείου RCVEX (i)

L1(cycles),	L2(cycles),	L3(cycles),	Trop Delay(m),	Trop Map(m),	Sagnac(m),	Tide Effect(m),	PCV_L1(m),	PCV_L2(m),	Windup(cycles)
106353477.0000,	82872814.9950,	0.0000,	2.0317,	1.0231,	1.7473,	-0.0914,	-0.1139,	-0.1071,	0.4852
113689253.8730,	88588979.9510,	0.0000,	2.8156,	1.4187,	14.2142,	-0.0682,	-0.0914,	-0.0868,	-0.4787
130081402.3660,	101362100.9520,	0.0000,	10.4715,	5.4676,	-22.6918,	-0.0097,	-0.0085,	-0.0085,	0.3216
133855412.3720,	104302899.7070,	0.0000,	17.8193,	9.4035,	16.4172,	-0.0221,	-0.0110,	-0.0087,	0.4993
112903672.8200,	87976891.8200,	0.0000,	2.8405,	1.4312,	17.3442,	-0.0583,	-0.0817,	-0.0776,	-0.4446
137321663.3130,	107003923.1170,	0.0000,	38.2785,	22.9859,	24.9259,	-0.0087,	-0.0004,	0.0009,	-0.4682
126309434.0200,	98422925.0000,	94321979.6880,	7.5224,	3.8201,	25.6409,	-0.0153,	-0.0254,	-0.0228,	-0.3910
112606461.4130,	87745276.4030,	0.0000,	2.4607,	1.2394,	-13.3505,	-0.0796,	-0.0908,	-0.0865,	0.4409
118534962.7180,	92364908.8830,	88516384.7070,	3.7324,	1.8825,	-19.2342,	-0.0589,	-0.0642,	-0.0617,	0.4370
106334626.4020,	82858126.2180,	0.0000,	2.0302,	1.0223,	1.6703,	-0.0915,	-0.1141,	-0.1073,	0.4845
113619617.5390,	88534717.8720,	0.0000,	2.8050,	1.4133,	14.1494,	-0.0684,	-0.0918,	-0.0871,	-0.4792
129998682.6770,	101297644.0110,	0.0000,	10.5171,	5.3858,	-22.7048,	-0.0100,	-0.0089,	-0.0089,	0.3222
133769935.8830,	104236294.5840,	0.0000,	17.4444,	9.1888,	16.4379,	-0.0222,	-0.0114,	-0.0091,	0.4992
112918582.7050,	87988509.9140,	0.0000,	2.8424,	1.4322,	17.3511,	-0.0583,	-0.0816,	-0.0776,	-0.4446
137350188.5030,	107026100.6130,	0.0000,	39.0015,	23.5372,	24.9791,	-0.0085,	-0.0002,	0.0011,	-0.4681
126218415.1690,	98352001.2210,	94254011.1070,	7.4423,	3.7786,	25.6131,	-0.0157,	-0.0258,	-0.0232,	-0.3917
112644025.1140,	87774546.8300,	0.0000,	2.4642,	1.2412,	-13.3602,	-0.0795,	-0.0907,	-0.0864,	0.4407
118615502.6760,	92427667.2810,	88576528.1690,	3.7523,	1.8925,	-19.3062,	-0.0586,	-0.0638,	-0.0613,	0.4366

Εικόνα 51. Πεδίο δεδομένων (PPP_BLOCK) αρχείου RCVEX (ii)

6.3.3 PLOT

Με την ολοκλήρωση της επεξεργασίας στο GUI πρέπει να είναι ενσωματωμένα εργαλεία γραφικής αναπαράστασης και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων της επίλυσης. Εκτός από την εξαγωγή των γραφικών αναπαραστάσεων σε μορφή JPEG, PNG και TIFF θα υπάρχει δυνατότητα διαδραστικής προβολής των γραφημάτων, όπως η μεγέθυνση ή η σμίκρυνση του γραφήματος. Επιπλέον, όπου δεν υπάρχουν παρατηρήσεις σε χρονικά διαστήματα αυτά δεν αναπαρίστανται ως γραμμικές παρεμβολές μεταξύ δύο έγκυρων παρατηρήσεων αλλά ως κενά. Τέλος, το PLOT βασίστηκε πάνω στην ανοιχτή βιβλιοθήκη ScottPlot για .NET (Harden, 2019), η οποία ενδείκνυται για διαχείριση μεγάλων όγκων δεδομένων. Όσον αφορά τα εργαλεία στατιστικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων των επιλύσεων αυτά υλοποιήθηκαν στον ήδη υπάρχον κώδικα του MatPlot μετατρέποντας το από Matlab σε C#.

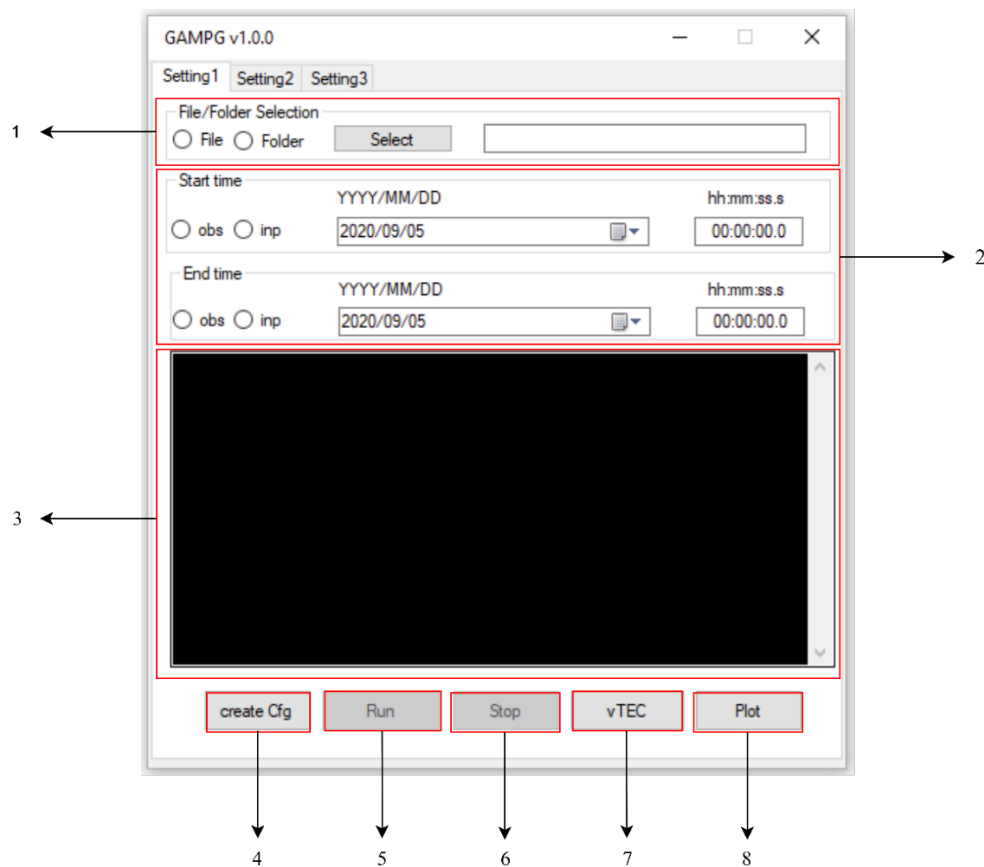
6.4 GAMPG

6.4.1 Κύριο Interphase

Η φόρμα έχει τρία πεδία ονομαζόμενα Setting1, Setting2 και Setting3 (Εικόνα 52). Στα τρία πεδία αυτά ο χρήστης έχει την δυνατότητα να διαμορφώσει το configuration file του gamp ανάλογα με την επίλυση που θέλει να πραγματοποιήσει. Συγκεκριμένα

1. στο Tab Control Setting1 ορίζετε το path του αρχείου των παρατηρήσεων για επεξεργασία ενός αρχείου παρατηρήσεων ή το path του directory που εμπεριέχει όλα τα απαραίτητα αρχεία για πολλαπλή επεξεργασία επιλέγοντας το radio button File ή Folder αντίστοιχα. Συνεπώς, πατώντας το κουμπί Select ανοίγει ένας File Dialog ή ένας Folder Dialog αντίστοιχα.
2. στα Group Box Start time και End time ορίζετε το χρονικό διάστημα επεξεργασίας των παρατηρήσεων, είτε επιλέγοντας τον χρόνο από το αρχείο παρατηρήσεων Rinex, είτε προσθέτοντας τον επιθυμητό χρόνο, επιλέγοντας το Radio Button obs (observations) ή το Radio Button inp (input) αντίστοιχα.
3. το textbox με το μαύρο υπόβαθρο χρησιμοποιείτε για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων του GAMP σε πραγματικό χρόνο.
4. το button create Cfg δημιουργεί το configuration file (.cfg) απαραίτητο για την εκτέλεση του GAMP.

5. το button Run τρέχει το GAMP σύμφωνα με τις παραμέτρους που έχει ορίσει ο χρήστης στα Tab Controls Setting1, Setting2 και Setting3.
6. το button Stop σταματάει την επεξεργασία που πραγματοποιεί το GAMP.
7. το button vTEC ανοίγει την φόρμα vTEC για τον υπολογισμό του vTEC μέσω των παραγόμενων αρχείων sTEC της επίλυσης.
8. το κουμπί Plot ανοίγει ένα καινούργιο Windows Form, το PLOT για την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του GAMP.



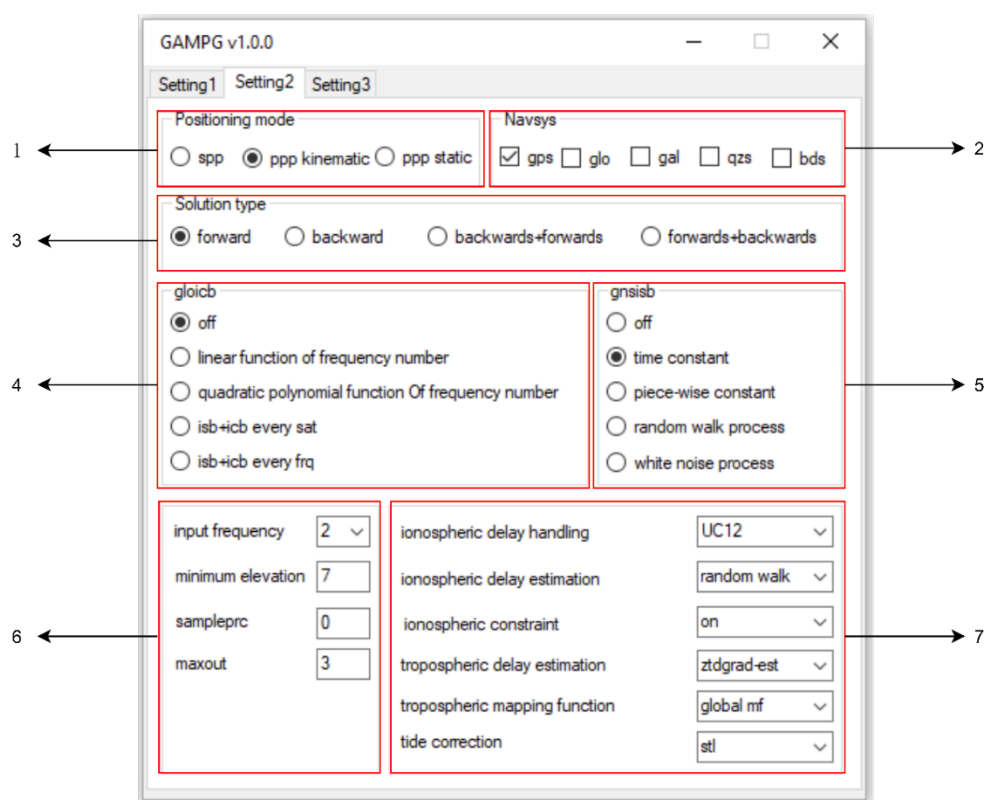
Εικόνα 52. Κύριο Interphase του GAMP

Αντικείμενο	Περιγραφή	Παρατηρήσεις
File/Folder Selection	- File* - Folder**	* Επεξεργασία ενός αρχείου ** Πολλαπλή επεξεργασία αρχείων
Start time	- obs (ο χρόνος εισάγεται από το αρχείο παρατηρήσεων) - inp (ο χρόνος εισάγεται από τον χρήστη)	

End time	- obs (ο χρόνος εισάγεται από το αρχείο παρατηρήσεων) - inr (ο χρόνος εισάγεται από τον χρήστη)	
----------	--	--

Στο tab control Setting2 (Εικόνα 53) ο χρήστης μπορεί να ορίσει:

1. τις παραμέτρους για την μέθοδο προσδιορισμού θέσης
2. τα δορυφορικά συστήματα
3. τον τύπο της επίλυσης
4. την μέθοδο χειρισμού των IFBs του GLONASS
5. την μέθοδο χειρισμού των GNSS ISBs
6. τις συχνότητες ,το ελάχιστο ύψος των παρατηρούμενων δορυφόρων κτλ.
7. τον χειρισμό της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης, την εκτίμηση της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης, την εισαγωγή ιονοσφαιρικού περιορισμού, την εκτίμηση της τροποσφαιρικής καθυστέρησης, την τροποσφαιρική συνάρτηση απεικόνισης και την διόρθωση των παλιρροιών.



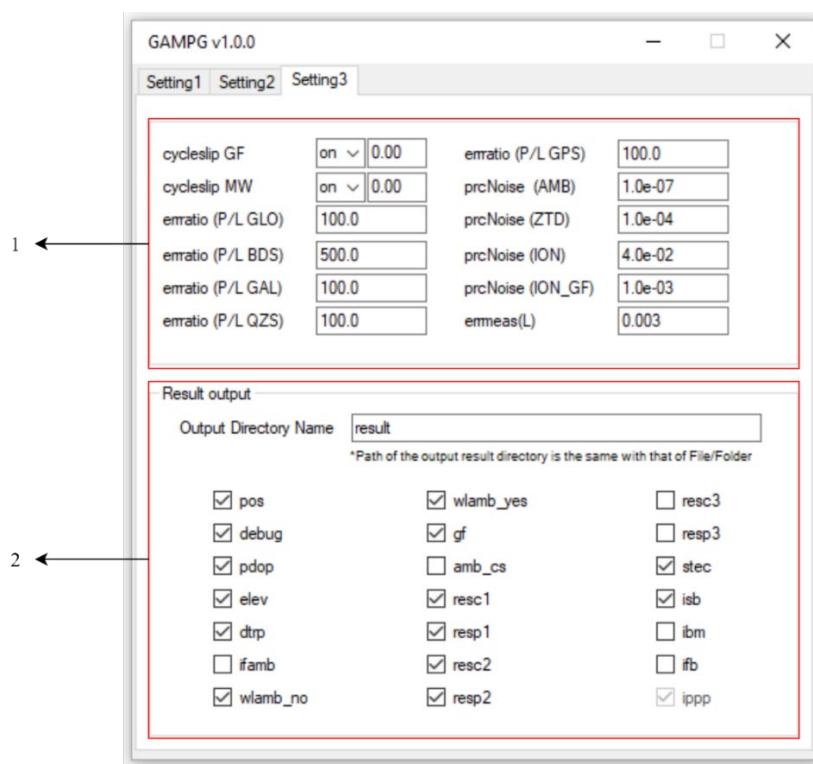
Εικόνα 53. Κύριο Interphase του GAMPG (ii)

Αντικείμενο	Περιγραφή	Παρατηρήσεις
Positioning mode	- spp ⁽¹⁾ - ppp kinematic ⁽²⁾ - ppp static ⁽³⁾	(1) single point positioning (2) precise point positioning -kinematic (3) precise point positioning - static
Navigation systems	-GPS (gps) -GLONASS (glo) -Galileo (gal) -BeiDou (bds) -QZSS (qzs)	
Solution Type	-forward -backward -backward+forward* -forward+backward**	* Δεν εφαρμόζεται ** Δεν εφαρμόζεται
GLONASS IFBs (gloicb)	-off -linear function of frequency number -quadratic polynomial function of frequency number -isb+icb every satellite* -isb+icb every frequency*	*Λόγω της υψηλής συσχέτισης τους με τα ISB, εκτιμώνται ως ενιαίος όρος
GNSS ISBs (gnsisb)	-off -time constant -piece-wise constant -random walk process -white noise process	
	-input frequency -minimum elevation -sample per second -maxout	
Ionospheric delay handling	-off -broadcast* -IF12* -UC1* -UC12** -ion-tec*	* συχνότητα εισόδου: 1 ** συχνότητα εισόδου: 2 IF12: γραμμικός συνδυασμός ελευθέρων ιονόσφαιρας UC1: αδιαφοροποίητες και ασυσχέτιστες παρατηρήσεις σε μία συχνότητα UC2: αδιαφοροποίητες και ασυσχέτιστες παρατηρήσεις σε δύο συχνότητες
Ionospheric delay estimation	-off -random walk -random walk(new) -white noise	

Ionospheric constraint	-on -off	
Tropospheric delay estimation	-off -saas ⁽¹⁾ -ztd-est ⁽²⁾ -ztdgrad-est ⁽³⁾	(1) Saastamoinen model (2) ZTD estimation (3) ZTD and gradients estimation
Tropospheric mapping function	- Niel mf - global mf	
Tide correction	-off -stl ⁽¹⁾ -otl ⁽²⁾ -ptl ⁽³⁾ -stl + otl + ptl	(1) solid (2) ocean (3) pole

Στο tab control Setting 3 (Εικόνα 54) ο χρήστης ορίζει:

1. την μέθοδο υπολογισμού των κύκλων ολίσθησης, λόγους σφαλμάτων, ανοχή θορύβων και ακρίβεια παρατηρήσεων φάσης
2. τα παραγόμενα αρχεία που περιλαμβάνει η εκάστοτε επίλυση. Το όνομα του φακέλου στο οποίο περιλαμβάνονται αυτά τα αρχεία ορίζεται στο Output Directory Name.

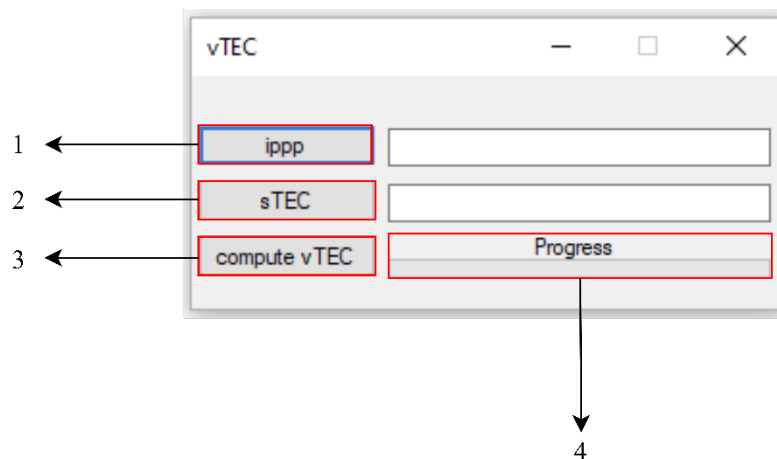


Εικόνα 54.Κύριο Interphase του GAMPG (iii)

Αντικείμενο	Περιγραφή	Παρατηρήσεις
	-cycle slip Geometry Free (cycleslipGF) -cycle slip MW -erratio (P/L GLO) -erratio (P/L BDS) -erratio (P/L GAL) -erratio (P/L QZS) -erratio (P/L GPS) -prcNoise (AMB) -prcNoise (ZTD) -prcNoise (ION) -prcNoise (ION GF)	
Result output	-pos (positioning file) -debug -pdop (position dilution of precision) -elev -dtrp -ifamb -wlamb_no -wlamb_yes -gf -amb_cs -resc 1 -resp 1 -resc 2 -resp 2 -resc 3 -resp3 -stec -isb -ibm -ifb -ippp	

6.4.2 VTEC

Στο αρχικό πρόγραμμα του GAMP πραγματοποιήθηκε η προσθήκη υπολογισμού του Vertical Total Electron Content (Εικόνα 55). Η διαδικασία υπολογισμού του VTEC είναι η εξής. Αρχικά ο χρήστης πρέπει να πατήσει το κουμπί *vTEC* στο tab control Setting 1, ώστε να ανοίξει το windows form *vTEC*. Στην φόρμα *vTEC* corίζεται το path του αρχείου *ippp* και του αρχείου *stec* πατώντας το κουμπί *ippp* και *stec* αντίστοιχα. Εφόσον οριστούν τα paths των αρχείων *ippp* και *stec*, ο υπολογισμός του *vTEC* πραγματοποιείται πατώντας το κουμπί *compute vTEC*. Η διαδικασία υπολογισμού ολοκληρώνεται όταν ο δείκτης Progress γίνει 100% δημιουργώντας το αρχείο *vtec*. Το path του αρχείου αυτού είναι το ίδιο με εκείνο των αρχείων *ippp* και *stec*.

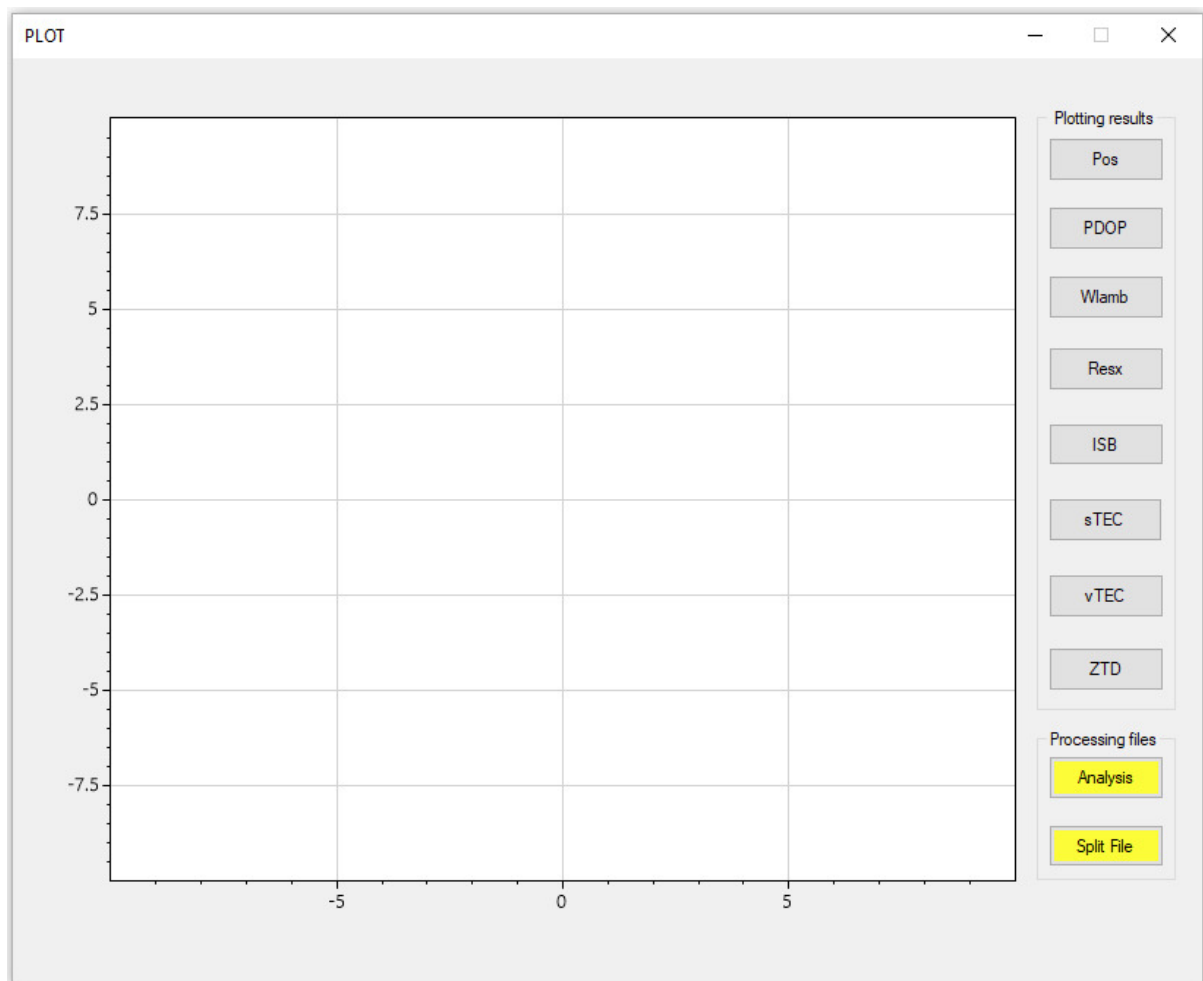


Εικόνα 55. Φόρμα υπολογισμού vTEC

6.4.3 PLOT

Τα GAMP για να απεικονίσει τα παραγόμενα αποτελέσματα του διαθέτει το windows forms PLOT (Εικόνα 56). Η συγκεκριμένη φόρμα ενεργοποιείτε πατώντας το κουμπί Plot στο κύριο interphase του GAMP στο control tab του Setting1. Η φόρμα PLOT περιλαμβάνει τα buttons:

1. Pos για απεικόνιση των αρχείων .pos, που περιλαμβάνουν επιλύσεις single point positioning και precise point positioning.
2. PDOP για την απεικόνιση των αρχείων .pdop.
3. Wlamb για την απεικόνιση αρχείων wlamb_no και wlamb_yes, τα οποία αποτελούν αρχεία μη-εξομαλυσμένων και εξομαλυσμένων ασαφειών Melbourne Wubben.
4. Resx για την γραφική αναπαράσταση των αρχείων .resc1, .resc2, .resp1, .resp2, .resp3.
5. sTEC για την γραφική αναπαράσταση των αρχείων .stec, .stec(G), .stec(R), .stec(E), .stec(J), .stec(C).
6. vTEC για την γραφική αναπαράσταση των αρχείων .vtec, .vtec(G), .vtec(R), .vtec(E), .vtec(J), .vtec(C).
7. ISB για την γραφική αναπαράσταση των αρχείων .isb.
8. Analysis για την εύρεση των χρόνων σύγκλισης και RMS για τις συνιστώσες East, North, Up από τα αρχεία pos δημιουργώντας το αρχείο .ana το οποίο αποθηκεύεται στο path του αρχείου .pos.
9. Split File για τον διαχωρισμό αρχείων stec, vtec, .resc1, .resc2, .resp1, .resp2, .resp3 ως προς το κάθε δορυφορικό σύστημα (G, R, E, J, C).



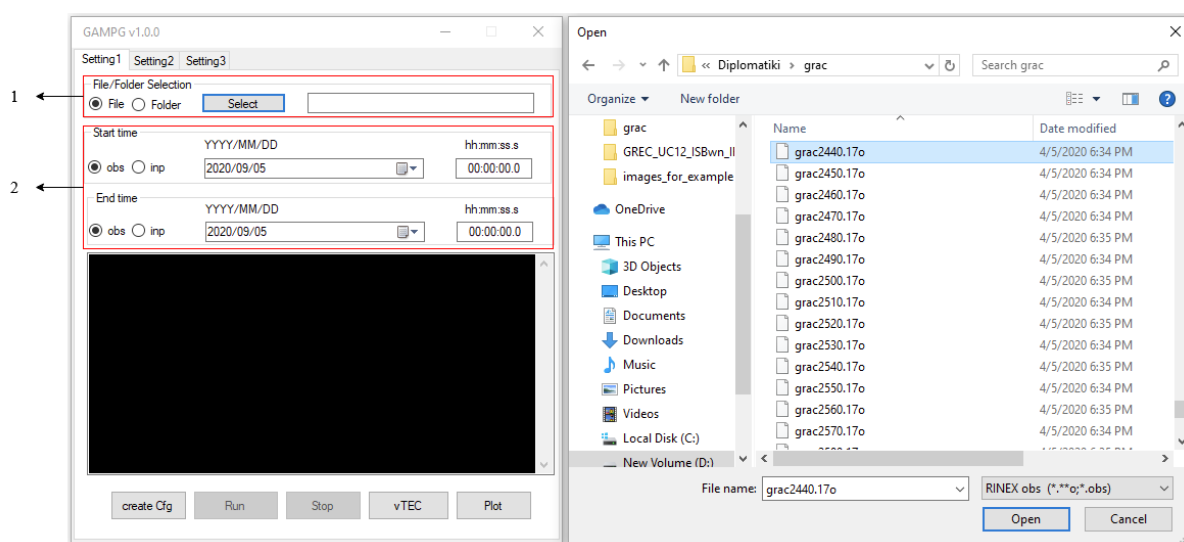
Εικόνα 56. PLOT

6.4.4 Παράδειγμα

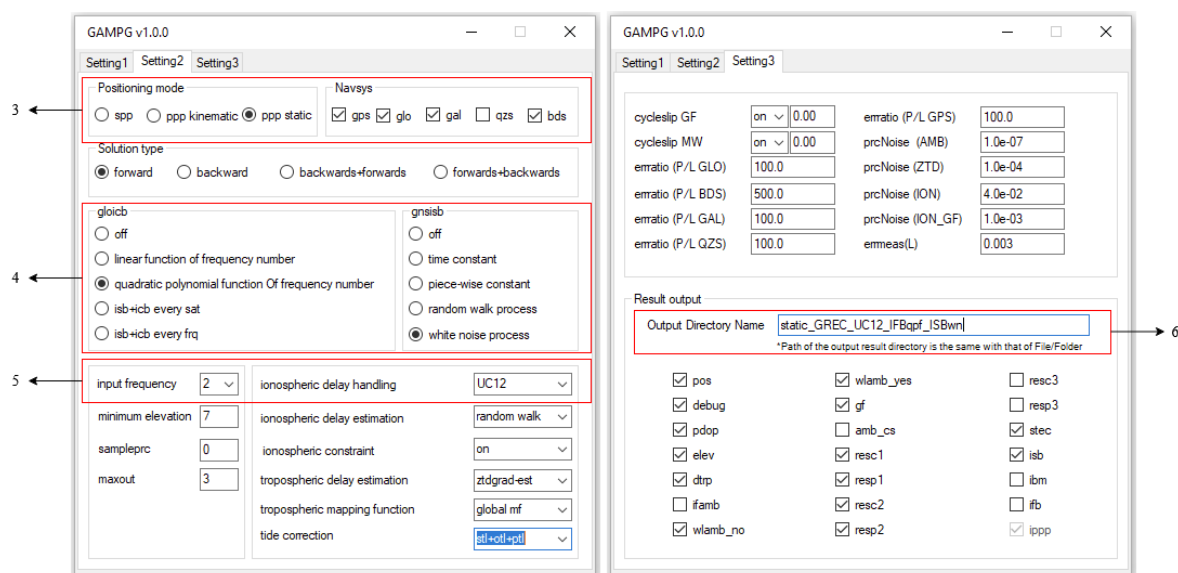
Χρησιμοποιώντας το αρχείο παρατηρήσεων του σταθμού grac για την ημέρα 244 του έτους 2017, θα προσδιοριστεί η θέση του σταθμού χρησιμοποιώντας PPP σε δύο συχνότητες για τα συστήματα GPS, GLONASS, Galileo και BeiDou για στατικό εντοπισμό. Αρχικά και με την προϋπόθεση ότι όλα τα απαιτούμενα αρχεία observation, navigation, precise orbit, precise clock, IGS ANTEX, SINEX, ocean tide loading coefficients, και DCBs βρίσκονται στο ίδιο directory, ο χρήστης μπορεί να ανοίξει την εφαρμογή GAMPG και να ακολουθήσει τα παρακάτω βήματα (Εικόνες 53, 54 και 55):

1. Ορισμός του path του directory στο οποίο βρίσκονται όλα τα προαναφερθέντα αρχεία επιλέγοντας το radio button Folder και στη συνέχεια πατώντας το button Select.
2. Καθορισμός αρχικού και τελικού χρόνου επεξεργασίας των παρατηρήσεων, επιλέγοντας τα radio buttons obs εντός των group box Start time και End Time.
3. Αλλάζοντας tab control και πηγαίνοντας στο Setting2, ως Positioning mode ορίζεται το ppp static και επιλέγονται τα check box των gps, glo, gal και bds στο group box του Navsys.
4. Εκτίμηση των IFBs ως πολωνυμική συνάρτηση του αριθμού συχνότητας και των ISBs ως white noise.

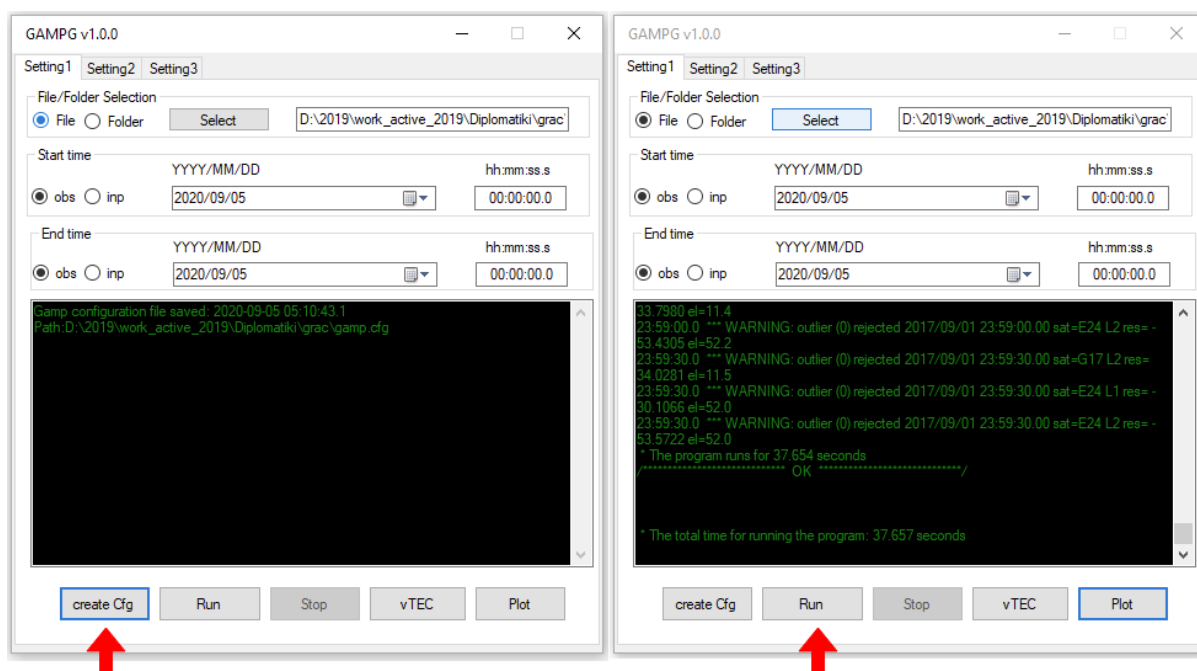
5. Στο combo box του input frequency επιλέγεται το 2 και στο combobox του ionospheric delay handling το UC12.
6. Στο tab control Setting3 γίνεται η επιλογή του ονόματος του φακέλου που δημιουργεί το GAMP.
7. Δημιουργία αρχείου .cfg πατώντας το κουμπί create Cfg.
8. Εκτέλεση του GAMP πατώντας το button Run.



Εικόνα 57. Εκτέλεση GAMP/GAMPG (i)

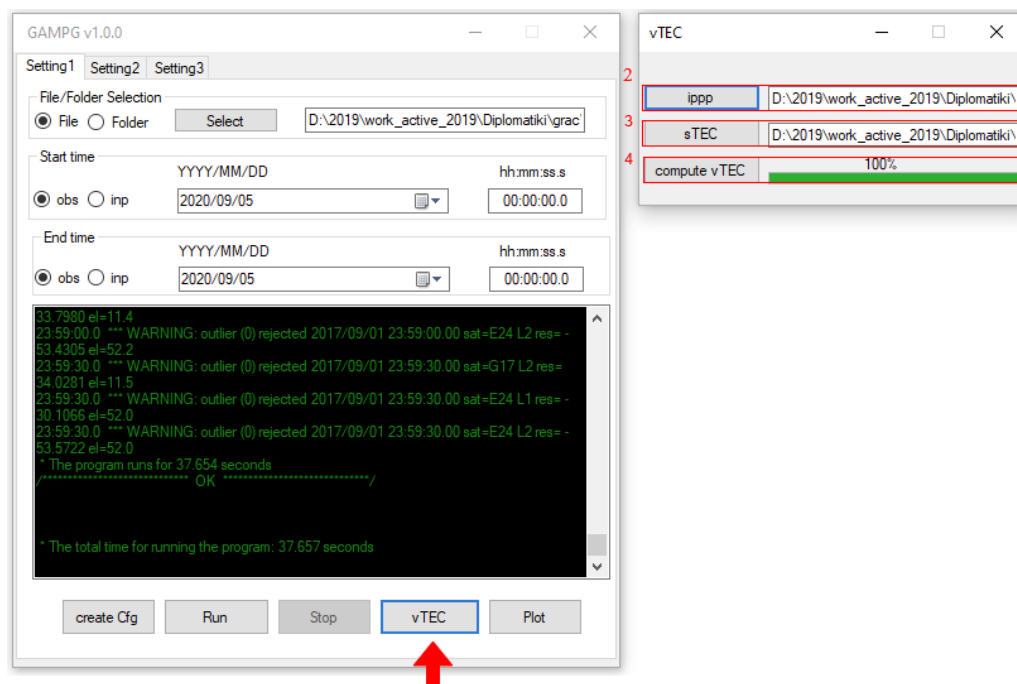


Εικόνα 58. Εκτέλεση GAMP/GAMPG (ii)



Εικόνα 59. Εκτέλεση GAMP/GAMPG (iii)

Πρωτού ο χρήστης προβεί στην διαδικασία της γραφικής αναπαράστασης των αποτελεσμάτων της επίλυσης, έχει την δυνατότητα να υπολογίσει τις τιμές των Vertical Total Electron Content για κάθε παρατηρούμενο δορυφόρο των συστημάτων GPS, GLONASS, Galileo και BeiDou την αντίστοιχη χρονική στιγμή (Εικόνα 60).



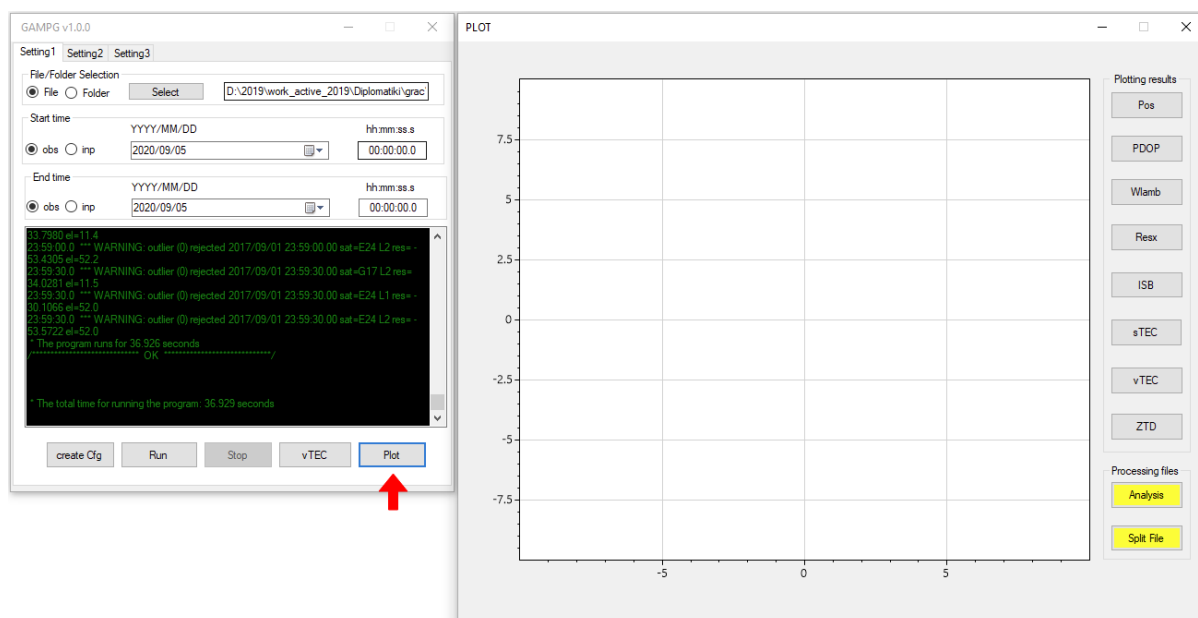
Εικόνα 60. Υπολογισμός VTEC

Συγκεκριμένα:

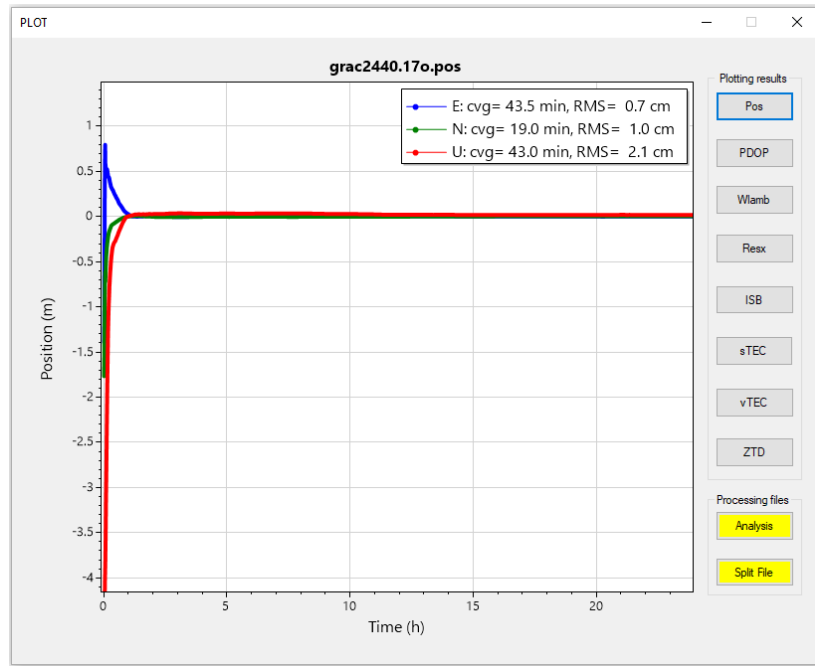
1. Επιλέγεται το κουμπί vTEC για να ανοίξει το windows form του vTEC.
2. Πατώντας το κουμπί iprrp ανοίγει ο file browser για την επιλογή του αρχείου .iprrp.
3. Πατώντας το κουμπί stec ανοίγει ο file browser dialog για την επιλογή του αρχείου .stec.
4. Τέλος κάνοντας κλικ στο button computeVtec δημιουργείται το αρχείο .vtec στον φάκελο που έχει δημιουργήσει ήδη ο χρήστης από την προϋγούμενη επίλυση.

Για την γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων της προηγούμενης διαδικασίας πρέπει να ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα

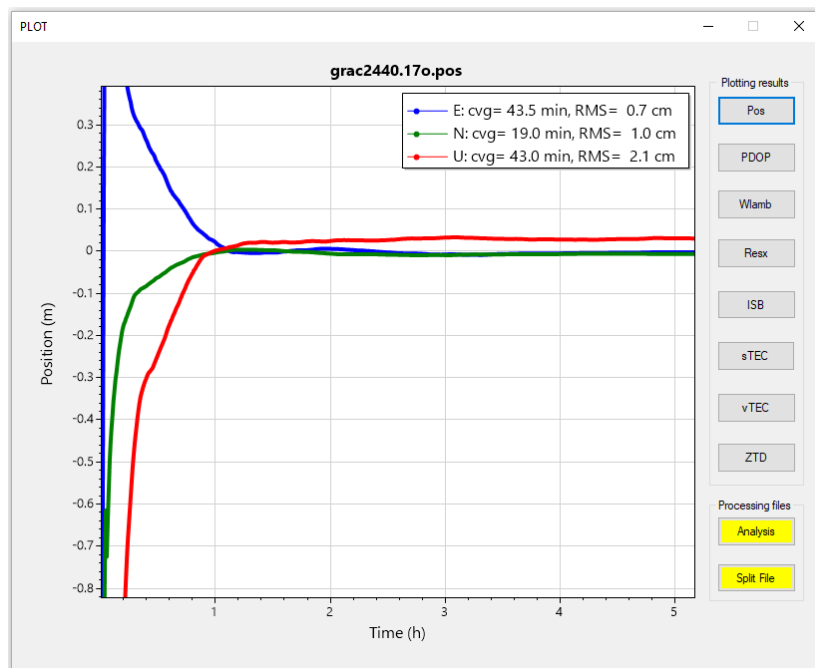
1. Άνοιγμα του Windows Form PLOT πατώντας το κουμπί Plot (Εικόνα 61).
2. Άνοιγμα του file dialog browser πατώντας το κουμπί PPP, ή το κουμπί sTEC ή το κουμπί vTEC.
3. Επιλογή του κατάλληλου αρχείου .pos, .stec, .vtec ανάλογα με την προηγούμενη εντολή. Οι εικόνες 62-63 αναπαριστούν γραφικά τα αρχεία .pos, η εικόνα 64 αναπαριστά γραφικά το αρχείο .isb, η εικόνα 65 αναπαριστά γραφικά το αρχείο .dtrp, η εικόνα 66 αναπαριστά γραφικά το αρχείο .pdop, οι εικόνες 67-70 αναπαριστούν τα αρχεία .stec και vtec και τέλος οι εικόνες 71-74 αναπαριστούν τα αρχεία .resc.
4. Τέλος για την στατιστική ανάλυση των μετρήσεων χρησιμοποιείται το κουμπί Analysis. Στατιστική ανάλυση πραγματοποιείτε και όταν ο χρήστης πραγματοποιήσει γραφική αναπαράσταση των αρχείων .pos με τα αποτελέσματα να εμφανίζονται πάνω δεξιά στον κάρναβο (Εικόνες 62-63).



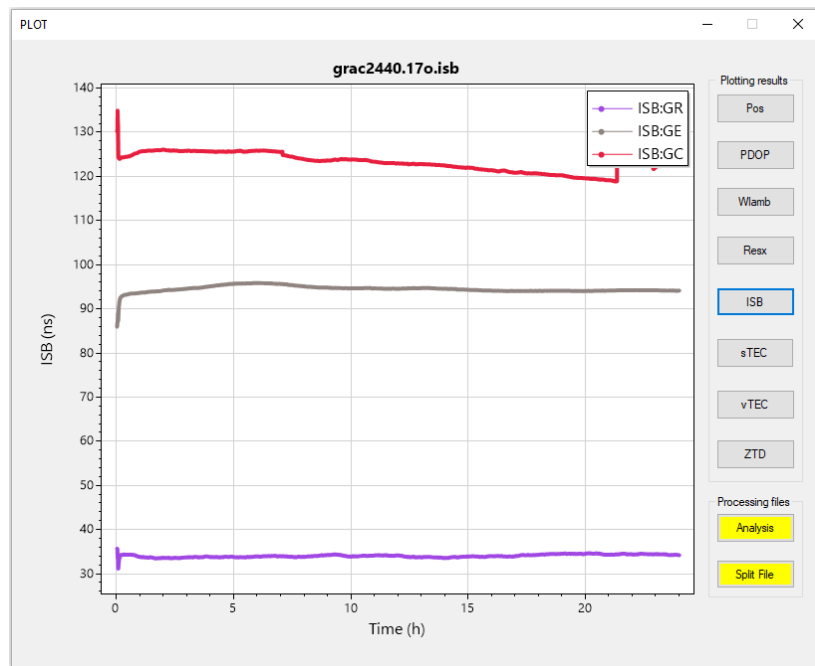
Εικόνα 61. Επεξεργασία και γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων



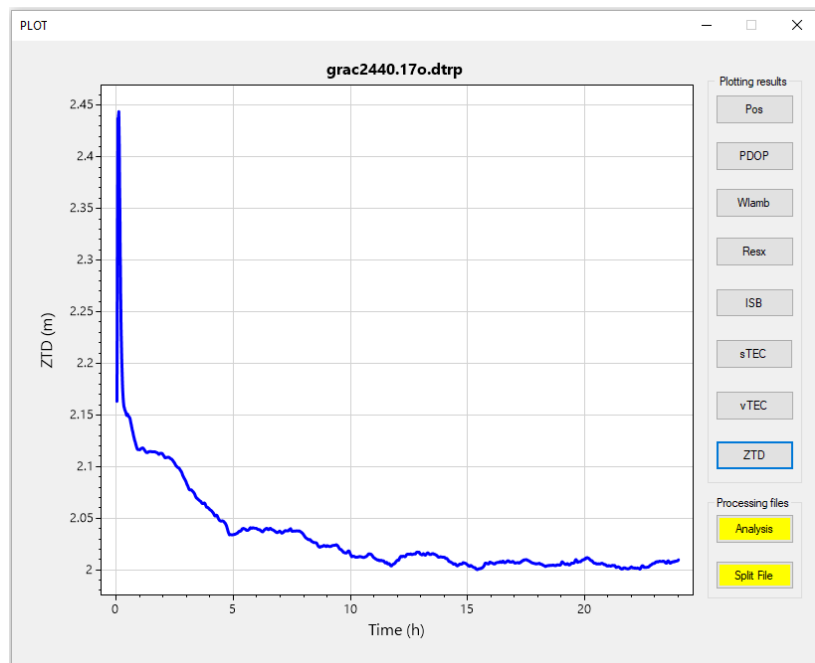
Εικόνα 62. Χρόνοι σύγκλισης και RMS των συνιστωσών East (E), North (N) και Up(U) για την ημέρα του χρόνου 244/2017



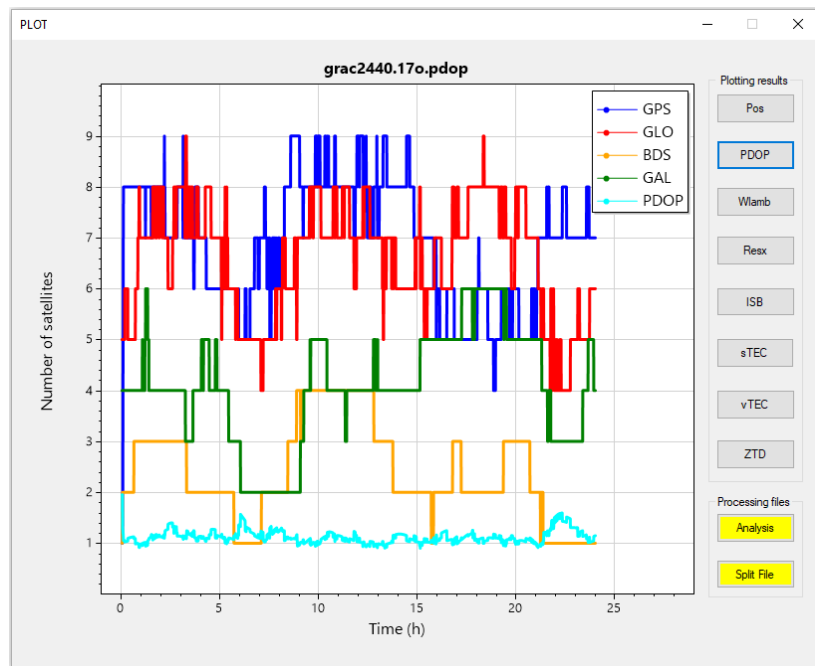
Εικόνα 63. Χρόνοι σύγκλισης και RMS των συνιστωσών East (E), North (N) και Up(U) για την ημέρα του χρόνου 244/2017



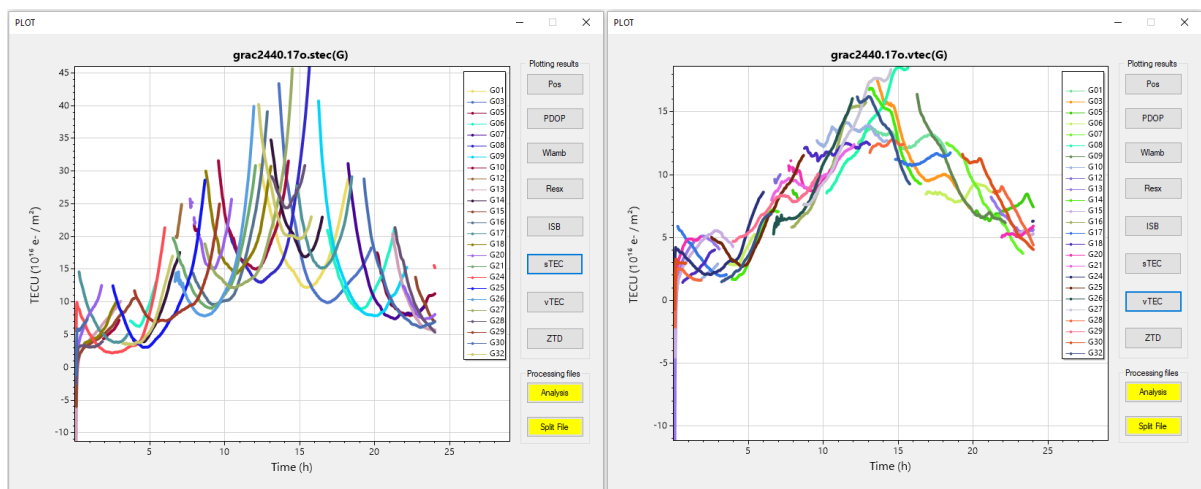
Εικόνα 64. ISB των συστημάτων GLONASS, Galileo και BeiDou ως προς το GPS για την ημέρα του χρόνου 244/2017



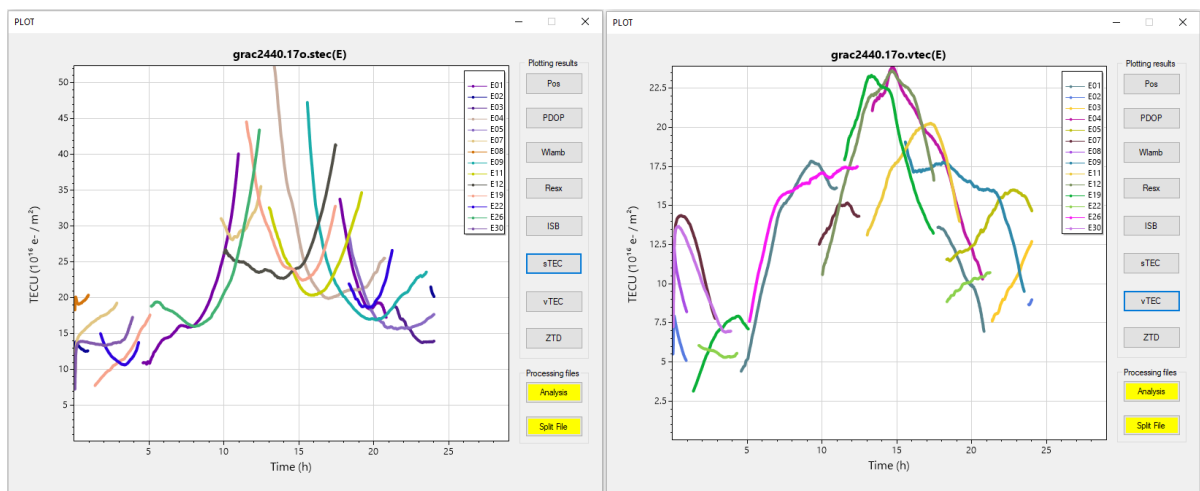
Εικόνα 65. Εκτιμώμενα ZTDs για τον σταθμό grac την ημέρα του χρόνου 244/2017



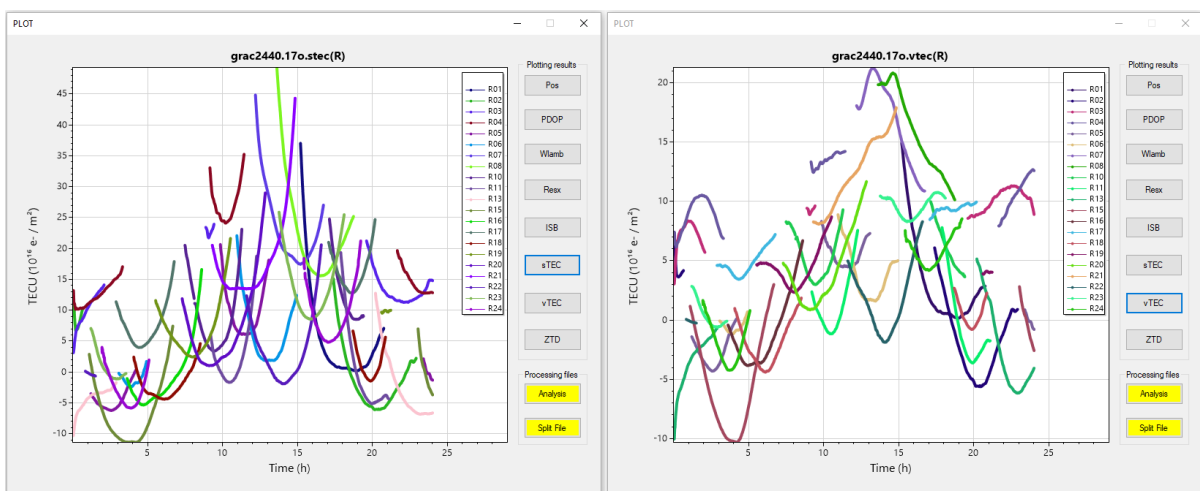
Εικόνα 66. Αριθμός χρησιμοποιούμενων δορυφόρων από κάθε δορυφορικό σύστημα και τιμές PDOP



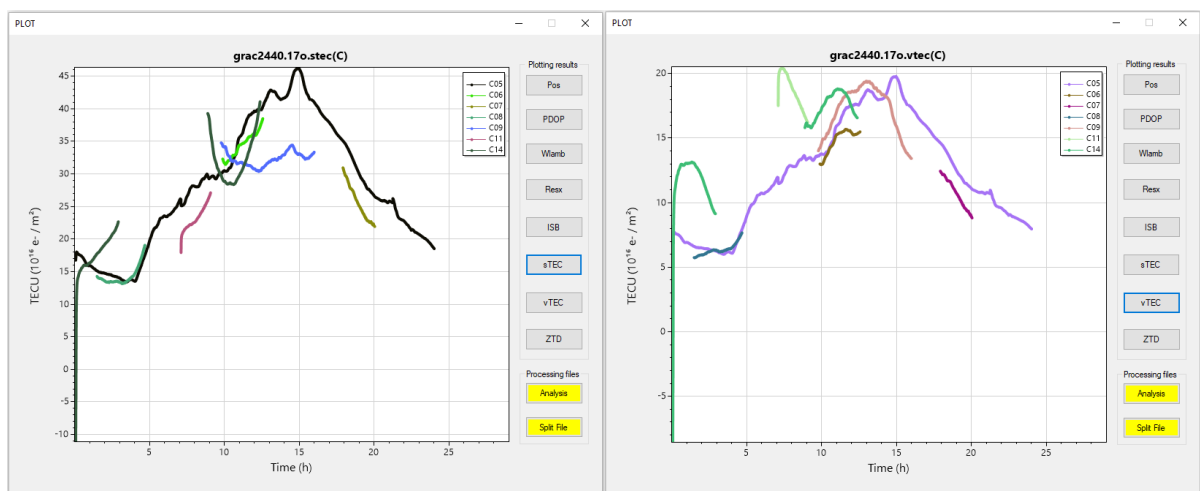
Εικόνα 67. Εκτιμώμενα STEC και VTEC χρησιμοποιώντας τους δορυφόρους GPS για την ημέρα του χρόνου 244/2017



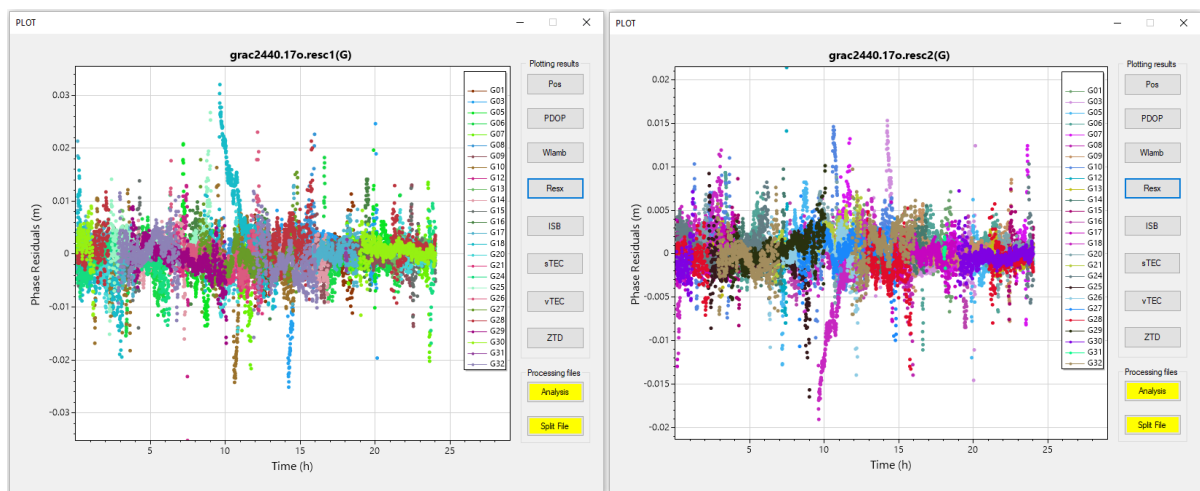
Εικόνα 68. Εκτιμώμενα STEC και VTEC χρησιμοποιώντας τους δορυφόρους Galileo για την ημέρα του χρόνου 244/2017



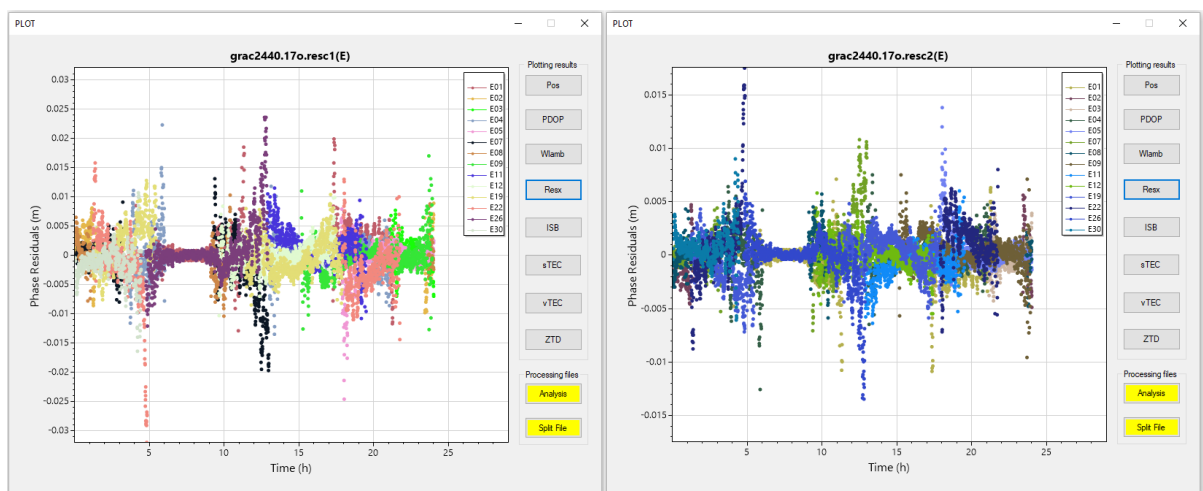
Εικόνα 69. Εκτιμώμενα STEC χρησιμοποιώντας τους δορυφόρους GLONASS για την ημέρα του χρόνου 244/2017



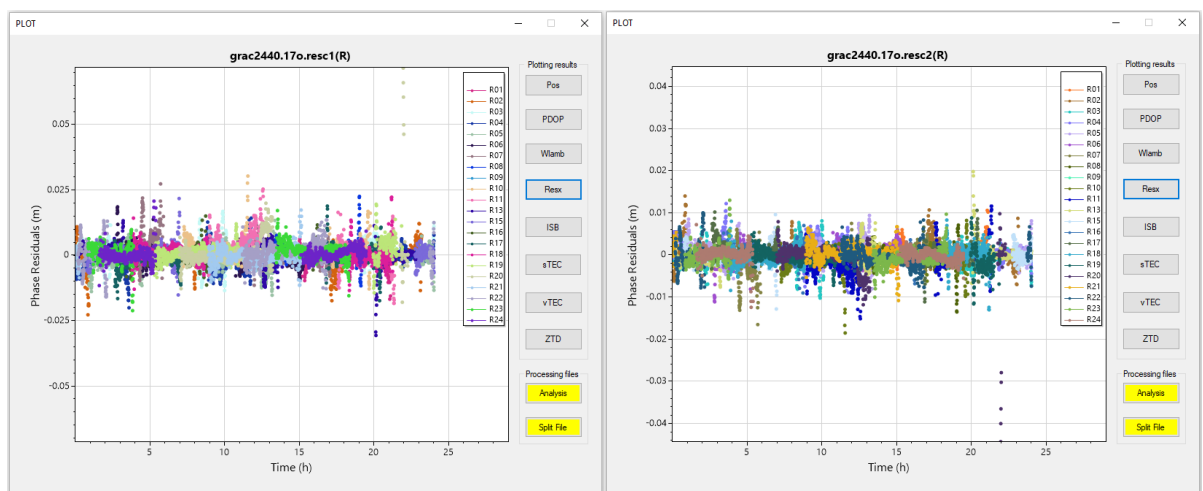
Εικόνα 70. Εκτιμώμενα VTEC χρησιμοποιώντας τους δορυφόρους BeiDou για την ημέρα του χρόνου 244/2017



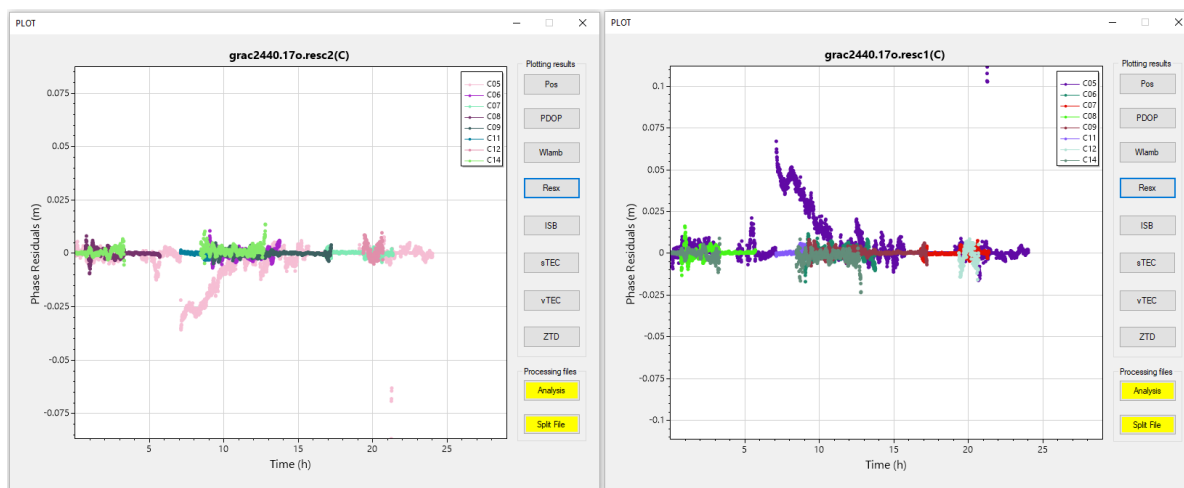
Εικόνα 71. Υπόλοιπα παρατηρήσεων φάσης για την πρώτη (αριστερά) και δεύτερη συχνότητα (δεξιά) των δορυφόρων GPS για την ημέρα 244/2017



Εικόνα 72. Υπόλοιπα παρατηρήσεων φάσης για την πρώτη (αριστερά) και δεύτερη συχνότητα (δεξιά) των δορυφόρων Galileo για την ημέρα 244/2017



Εικόνα 73. Υπόλοιπα παρατηρήσεων φάσης για την πρώτη (αριστερά) και δεύτερη συχνότητα (δεξιά) των δορυφόρων GLONASS για την ημέρα 244/2017



Εικόνα 74. Υπόλοιπα παρατηρήσεων φάσης για την πρώτη (αριστερά) και δεύτερη συχνότητα (δεξιά) των δορυφόρων BeiDou για την ημέρα 244/2017

6.5 Αξιολόγηση GAMP/GAMPG

Για την αξιολόγηση του GAMP /GAMPG πραγματοποιήθηκε εσωτερικός έλεγχος μεταξύ των μοντέλων που εφαρμόζει για την εκτίμηση/αντιμετώπιση της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης, των ISB και των IFB ως προς τον χρόνο σύγκλισης και την ακρίβεια της επίλυσης σε μία ή σε δύο συχνότητες, εφαρμόζοντας στατικό και κινηματικό PPP για τα συστήματα GPS, GLONASS, Galileo και BeiDou. Τα DCBs αντιμετωπίζονται χρησιμοποιώντας τα προϊόντα DCB και BSX από τα κέντρα ανάλυσης CODE και CAS αντίστοιχα. Το GAMP θεωρεί ότι η επίλυση έχει συγκλίνει όταν τα RMS και των τριών συνιστωσών East (E), North(N) και Up (U) βρίσκονται κάτω από 10 cm.

Στην ανάλυση εφαρμόστηκαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των προαναφερθέντων παραμέτρων με κοινή βάση το GPS. Για την σύγκριση των σεναρίων αυτών υπολογίζεται ο ημερήσιος μέσος χρόνος σύγκλισης των επιλύσεων και τα μέσα τετραγωνικά σφάλματα (μέσο RMS) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U). Ο μέσος χρόνος σύγκλισης και τα μέσα RMS των σεναρίων για κάθε μοντέλο αντιμετώπισης της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης συγκρίνεται ως προς τα σενάρια στα οποία δεν λαμβάνονται υπόψη τα ISB (ISBoff) και IFB (IFBoff) (όταν χρησιμοποιούνται παρατηρήσεις ως προς το σύστημα GLONASS) κάθε συνδυασμού των δορυφορικών συστημάτων GNSS. Επιπλέον, τα προηγούμενα σενάρια για τους διάφορους συνδυασμούς των συστημάτων GNSS συγκρίνονται ως προς τον μέσο χρόνο σύγκλισης και τα μέσα RMS των αντίστοιχων μοντέλων αντιμετώπισης της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης της επίλυσης GPS (Πίνακας 15).

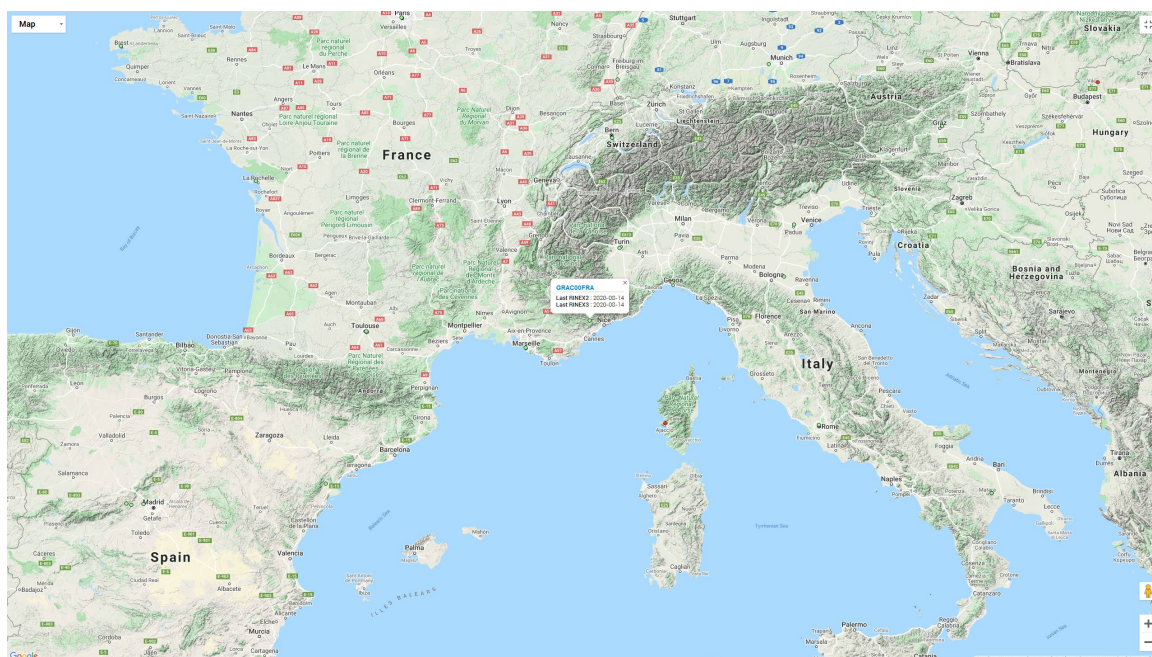
Οι παρατηρήσεις GNSS που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν την περίοδο 244/2017 έως 273/2017 του σταθμού GRAC (εικόνες 75 και 76). Ο σταθμός αυτός βρίσκεται σε ένα μέσο γεωγραφικό πλάτος στην πόλη Gaussols της Γαλλίας και ανήκει στο δίκτυο Multi-GNSS IGS (Πίνακας 16) παρέχοντας παρατηρήσεις GNSS για τα συστήματα GPS, GLONASS, Galileo και BeiDou.

Πίνακας 15. Χαρακτηρίστηκα επεξεργασίας Precise Point Positioning για στατικό (static) και κινηματικό (kinematic) εντοπισμό

Δορυφορικά συστήματα	GPS (G), GLONASS (R), Galileo (E), BeiDou (C)
Αρχεία παρατηρήσεων	RINEX 3.02
Προϊόντα τροχιών και χρονομέτρων	Geo Forschungs Zentrum Potsdam (GFZ)
Αντιμετώπιση ιονοσφαιρικής καθυστέρησης	Undifferenced and Uncombined σε μία (UC1) ή δύο συχνότητες (UC12) Ionosphere free combination (IF12)
Περιορισμός Ιονόσφαιρας	Off (IF12) GIM (UC1,UC12)
Εκτίμηση Τροποσφαιρικής καθυστέρησης	Ztdgrad-est
Τροποσφαιρική συνάρτηση απεικόνισης	Global Mapping Function (GMF)
Μοντελοποίηση IFB	Off (IFBoff) Linear function of frequency number (IFBlff) Quadratic polynomial function of frequency number (IFBqpf) Every satellite (IFBes)
Μοντελοποίηση ISB	Off (ISBoff) Time constant (ISBtc) Piece Wiese Constant (ISBpw) Random walk (ISBrw) White noise (ISBwn)
Αντιμετώπιση DCBs δέκτη και δορυφόρου	CODE CAS
Πραγματικές συντεταγμένες	SINEX
Μετατοπίσεις τοποθεσίας	Solid earth tides, Ocean tide loading, Pole tide
Γωνία αποκοπής δορυφόρων	7°

Πίνακας 16. Στοιχεία και χαρακτηρίστηκα σταθμού GRAC

Δίκτυο	IGS Multi-GNSS
Πόλη	Caussols
Χώρα	Γαλλία
Υπηρεσία	IGN
Γεωγραφικό πλάτος (°)	43.7544861
Γεωγραφικό μήκος (°)	6.9207611
Υψόμετρο (m)	1319.8
Δέκτης	LEICA GR25
Αντέννα	TRM57971.00
Δορυφορικά συστήματα	GPS+GLO+GAL+BDS+SBAS



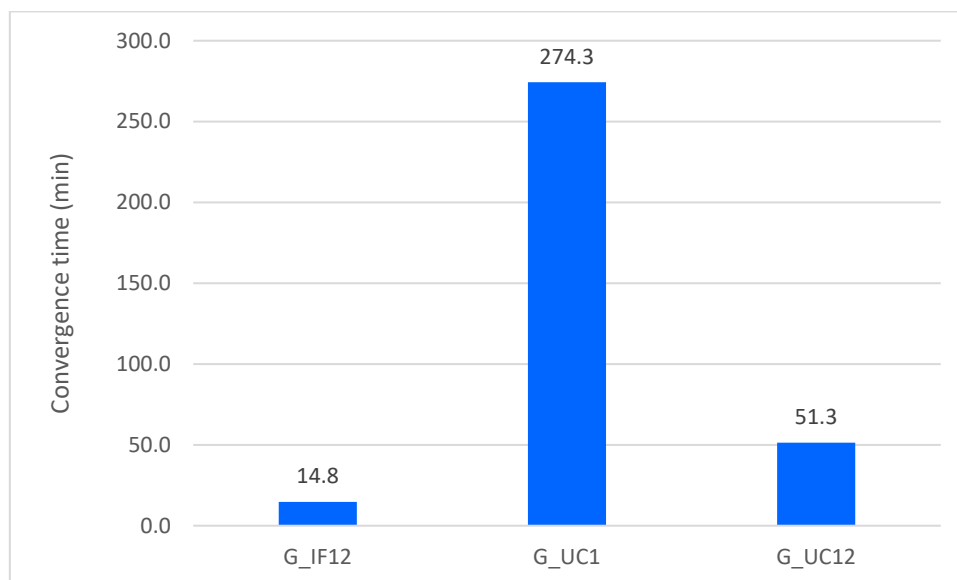
Εικόνα 75. Γεωγραφική θέση σταθμού GRAC

6.5.1 Στατικός εντοπισμός

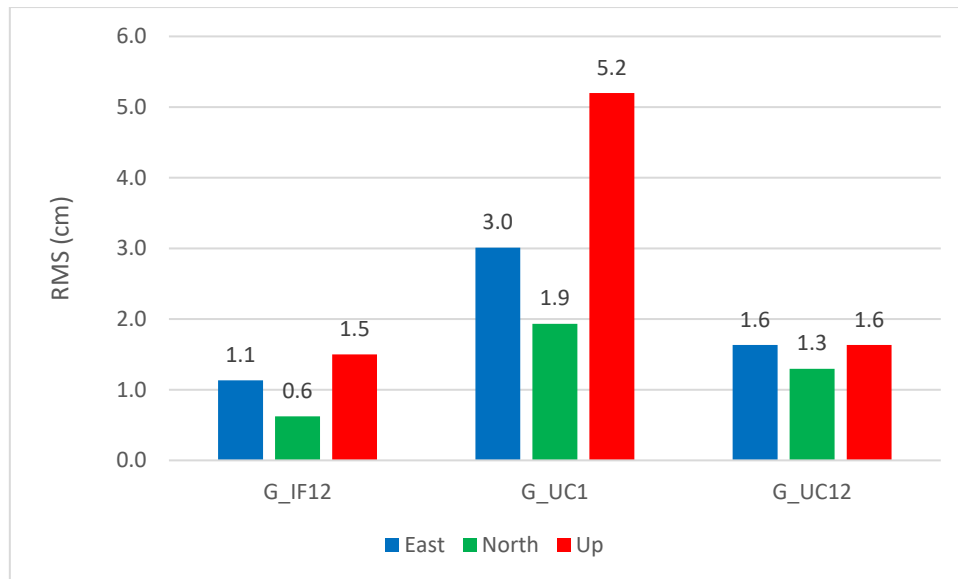
Η ανάλυση στην επίλυση PPP για στατικό εντοπισμό επικεντρώνεται κυρίως στην μεταβολή του χρόνου σύγκλισης και όχι των RMS των συνιστωσών E/N/U καθώς αυτές στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι κάτω του 1 cm. Όμως σημαντικές μεταβολές παρατηρούνται στα RMS των συνιστωσών E/N/U του μοντέλου UC1, οι οποίες και αναφέρονται.

G

Το αποδοτικότερο σενάριο ως προς τον χρόνο σύγκλισης και την ακρίβεια επίλυσης είναι το μοντέλο IF12 σχετικά ως προς τα μοντέλα UC1 και UC12.



Σχήμα 2. Μέσος χρόνος σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης G



Σχήμα 3. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) της επίλυσης G GR

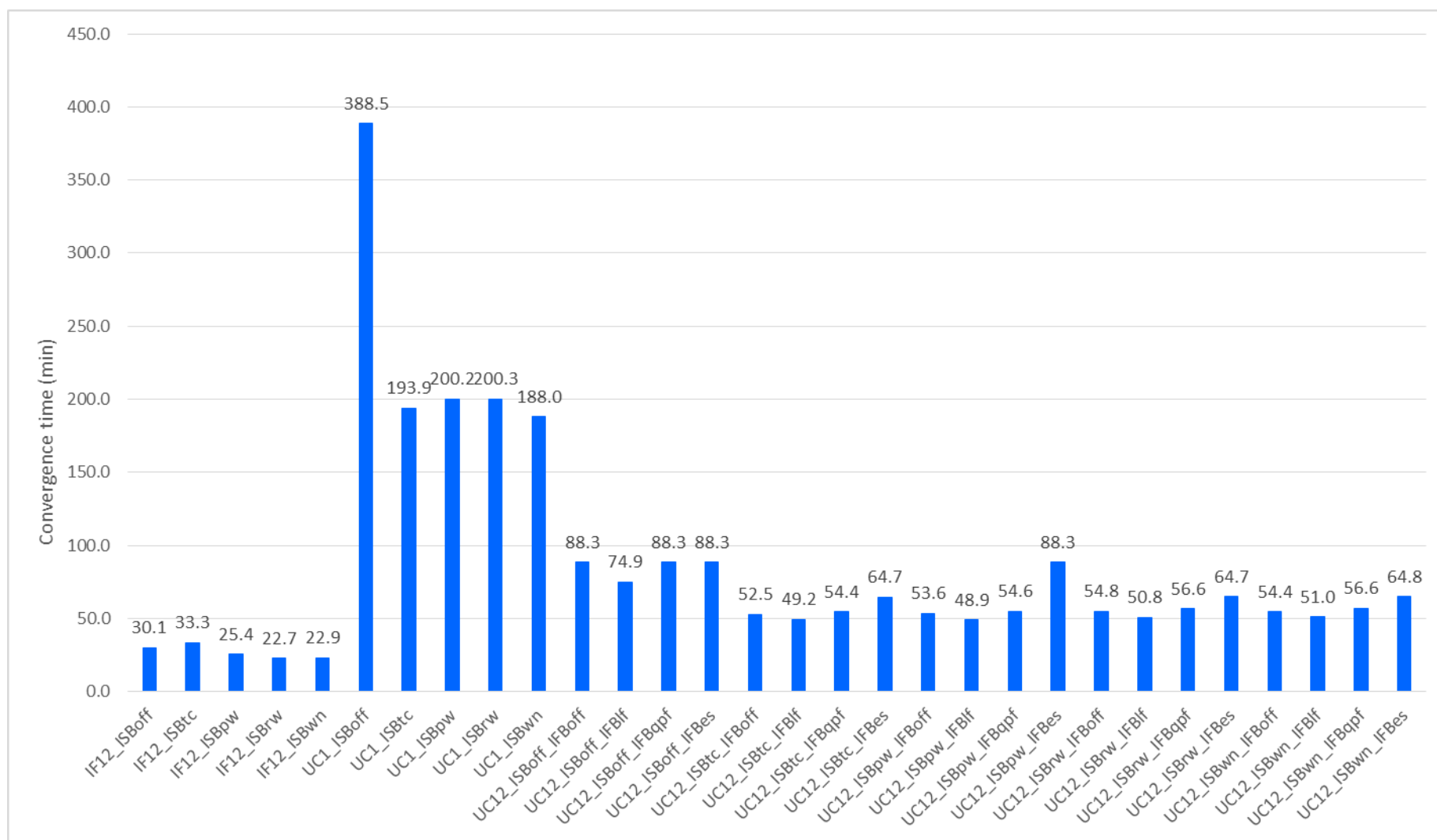
IF12: Παρατηρείται μείωση στον χρόνο σύγκλισης εφαρμόζοντας τα στοχαστικά μοντέλα ISBpw, ISBrw και ISBwn κατά 15.6%, 24.6% και 23.9% αντίστοιχα σχετικά ως προς το μοντέλο ISBoff.

UC1: Ο χρόνος σύγκλισης της επίλυσης βελτιώνεται για τα στοχαστικά μοντέλα εκτίμησης ISBtc, ISBpw, ISBrw, ISBwn κατά 50.1%, 48.4%, 48.4%, και 51.6% αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο ISBoff. Επιπλέον, τα RMS των συνιστωσών E/N/U μειώνονται κατά 52.6/67.9/58.4%, 52.9/69.5/63.6%, 53.3/69.5/63.5% και 50.6/69.6/62.4% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff.

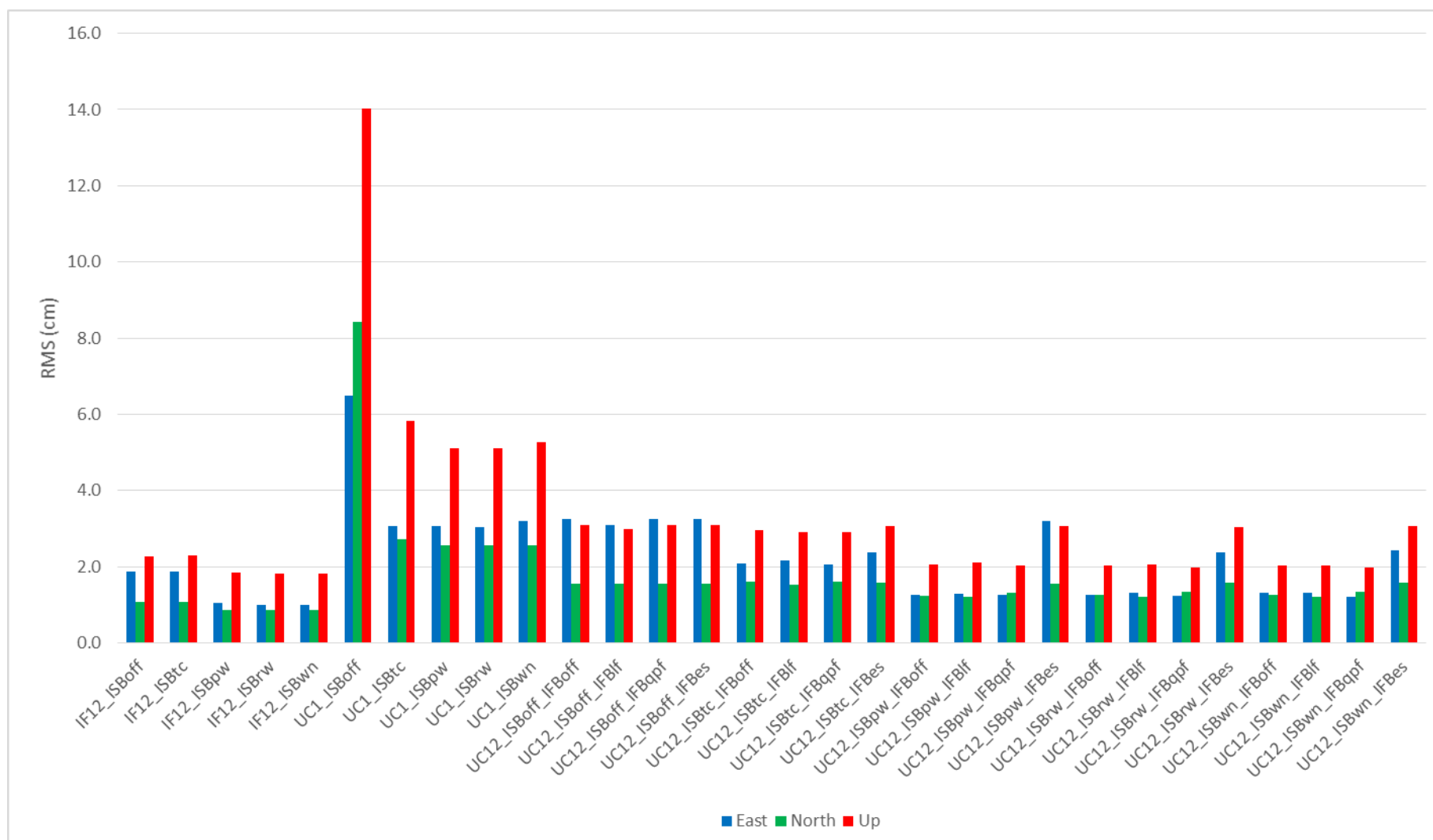
Παράλληλα τα μοντέλα εκτίμησης ISBtc, ISBpw, ISBrw, ISBwn επιτυγχάνουν μείωση στον χρόνο σύγκλισης κατά 29.3%, 27.0%, 27.0% και 31.5% αντίστοιχα, σχετικά ως προς την επίλυση G_UC1, ενώ στα RMS των συνιστωσών E/N/U δεν παρατηρείτε κάποια σημαντική μεταβολή. Αν τα προαναφερθέντα μοντέλα εκτίμησης των ISB δεν εφαρμοστούν, τότε ο χρόνος σύγκλισης και τα RMS των συνιστωσών E/N/U αυξάνονται κατά 41.6% (114.2 min) και 115.5/336.4/169.7% αντίστοιχα, σχετικά ως προς την επίλυση G_UC1.

UC12: Όλοι οι συνδυασμοί διαμόρφωσης των ISB και εκτίμησης των IFB μειώνουν τον χρόνο σύγκλισης της επίλυσης, πλην των σεναρίων ISBoff_IFBqpf, ISBoff_IFBes και ISBpw_IFBes. Οι συνδυασμοί που επιτυγχάνουν την μεγαλύτερη μείωση στον χρόνο σύγκλισης είναι οι συνδυασμοί ISBtc_IFBlf, ISBpw_IFBlf και ISBtc_IFBlf και ISBrw_IFBlf κατά 44.2%, 44.6%, 42.5% και 42.4% αντίστοιχα, σχετικά ως προς το σενάριο ISBoff_IFBoff.

Σύγκριση ως προς την επίλυση UC12_G προκύπτει ότι, αν δεν εφαρμοστεί κάποιος από τους συνδυασμούς εκτίμησης των ISBs και των IFBs ως γραμμική συνάρτηση του αριθμού συχνότητας, τότε ο χρόνος σύγκλισης αυξάνεται κατά 71.9%. Παρόλα αυτά, η βελτίωση στον χρόνο σύγκλισης που παρουσιάζουν τα μοντέλα αυτά είναι πολύ μικρή, της τάξης των 2 λεπτών.



Σχήμα 4. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GR



Σχήμα 5. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GR

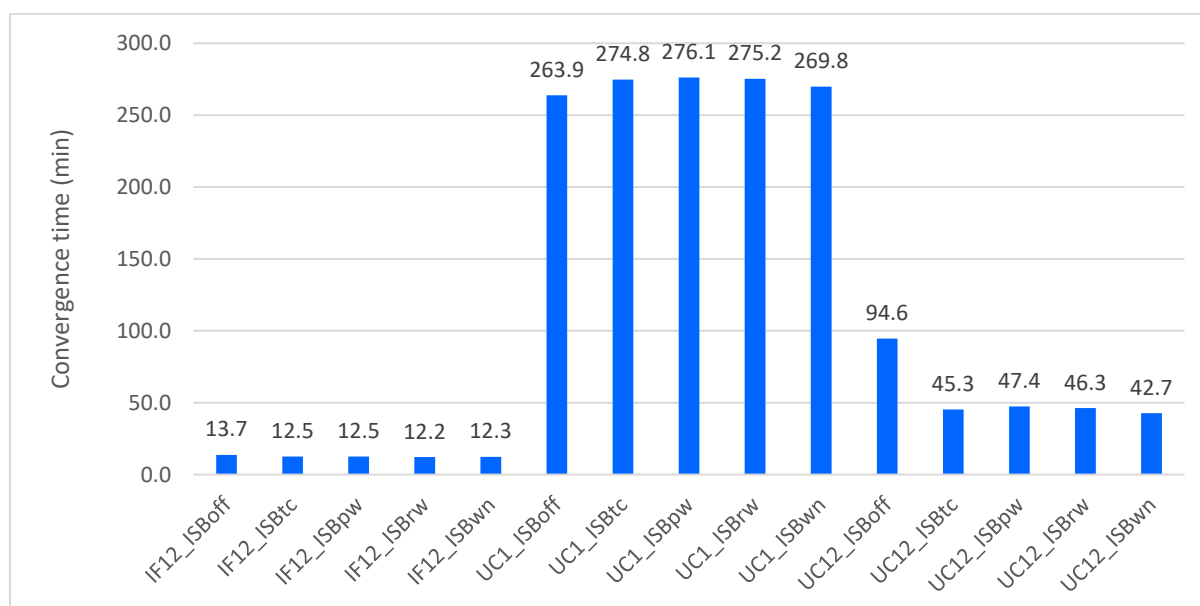
GE

IF12: Παρατηρείτε μείωση στον χρόνο σύγκλισης της λύσης κατά 8.6%, 8.6%, 10.9% και 10.2% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο ISBoff. Ακόμη, τα προαναφερθέντα μοντέλα αλλά και το μοντέλο απόρριψης των ISB μειώνουν τον χρόνο σύγκλισης κατά 7.2%, 15.2%, 15.2%, 17.3% και 16.5% αντίστοιχα, σχετικά ως προς τον χρόνο σύγκλισης της επίλυσης G_IF12.

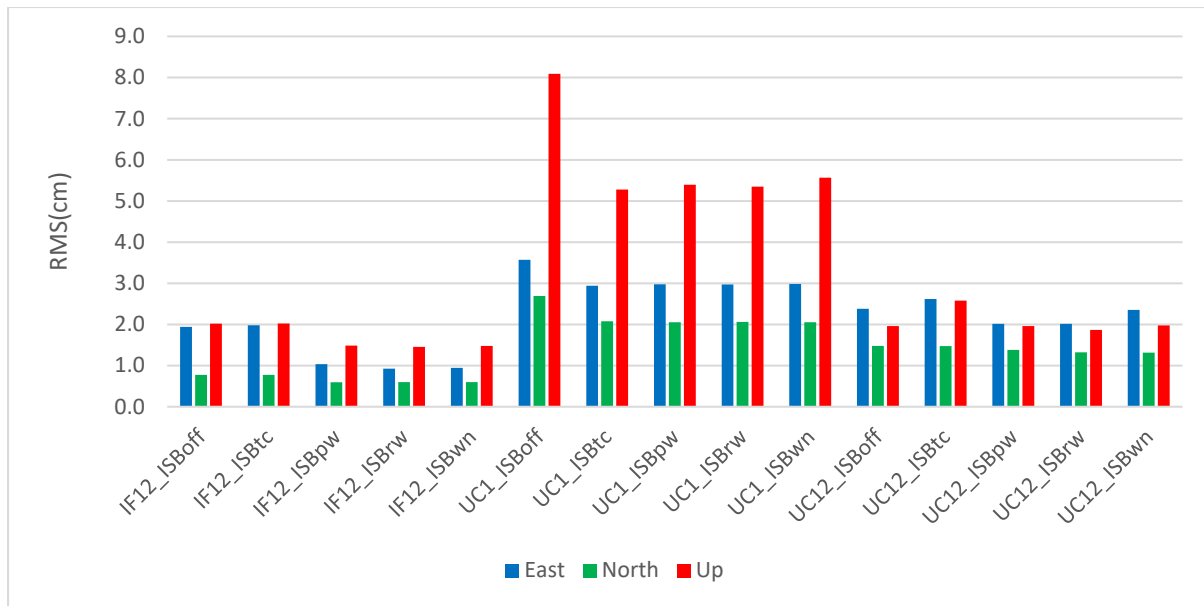
UC1: Για την επίλυση UC1 κανένα από τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn δεν βελτιώνει τον χρόνο σύγκλισης σχετικά ως προς το μοντέλο ISBoff. Παρόλα αυτά, το μέσο RMS της συνιστώσας U κατεβαίνει κάτω από τα 8 cm για τα μοντέλα ISBtc (5.3 cm), ISBpw (5.4 cm), ISBrw (5.4 cm) και ISBwn (5.6 cm).

Επιπλέον, το μοντέλο απόρριψης των ISB και το μοντέλο διαμόρφωσης ISBwn μειώνουν τον χρόνο σύγκλισης της επίλυσης κατά 3.8%(10 min) και 1.6% (4.5 min) σχετικά ως προς τον χρόνο σύγκλισης της επίλυσης G_UC1.

UC12: Ο χρόνος σύγκλισης για τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn μειώνεται κατά 52.1%, 49.9%, 51.1% και 54.9% αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff. Επιπλέον, αν δεν εφαρμοστεί κάποιο από τα μοντέλα εκτίμησης των ISB, τότε ο χρόνος σύγκλισης αυξάνει κατά 84.4% ως προς τον χρόνο σύγκλισης της επίλυσης G_UC12.



Σχήμα 6. Μέσος χρόνος σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GE



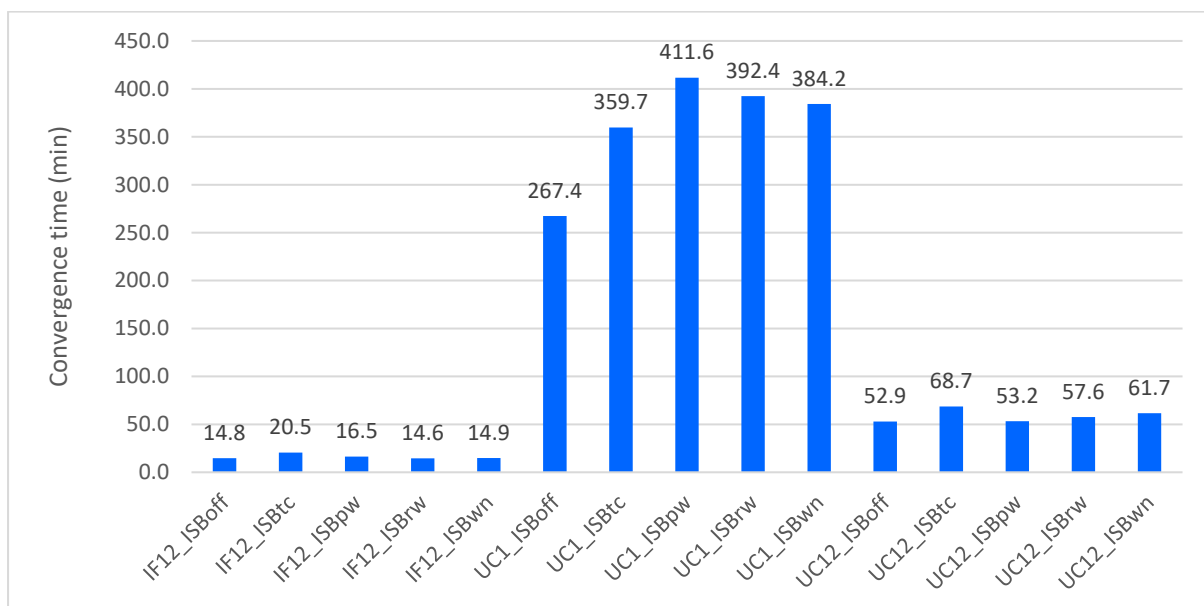
Σχήμα 7. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) της επίλυσης GE

GC

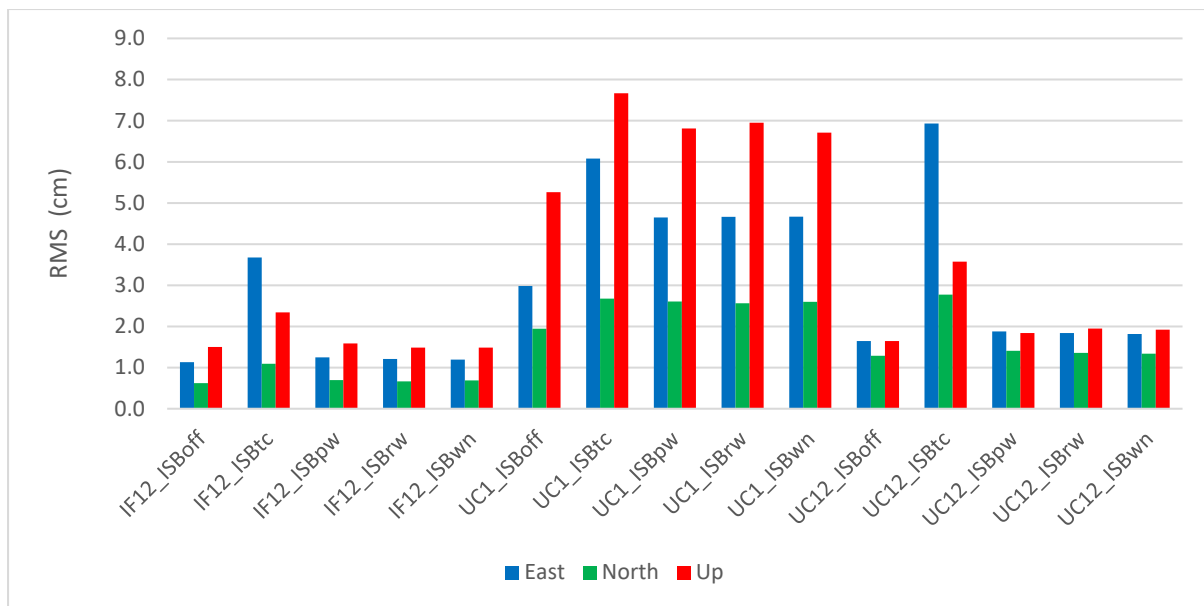
IF12: Τα στοχαστικά μοντέλα ISBrw και ISBwn παρουσιάζουν παρόμοιους χρόνους σύγκλισης σχετικά ως προς το μοντέλο ISBoff, ενώ κανένα μοντέλο εκτίμησης των ISB δεν αποδίδει καλύτερα από την επίλυση G_IF12.

UC1: Κανένα από τα στοχαστικά μοντέλα εκτίμησης των ISBs δεν είναι μικρότερο σε χρόνο σύγκλισης σχετικά ως προς το ISBoff. Παράλληλα, το μοντέλο ISBrw αποδίδει παρόμοια με την επίλυση G_UC1.

UC12: Στην επίλυση UC12 η απόρριψη των ISB (ISBoff) παρέχει καλύτερα αποτελέσματα στον χρόνο σύγκλισης σχετικά ως προς τα μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn, ενώ κανένα μοντέλο εκτίμησης των ISB δεν αποδίδει καλύτερα από την επίλυση G_UC12.



Σχήμα 8. Μέσος χρόνος σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GC



Σχήμα 9. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) της επίλυσης GC

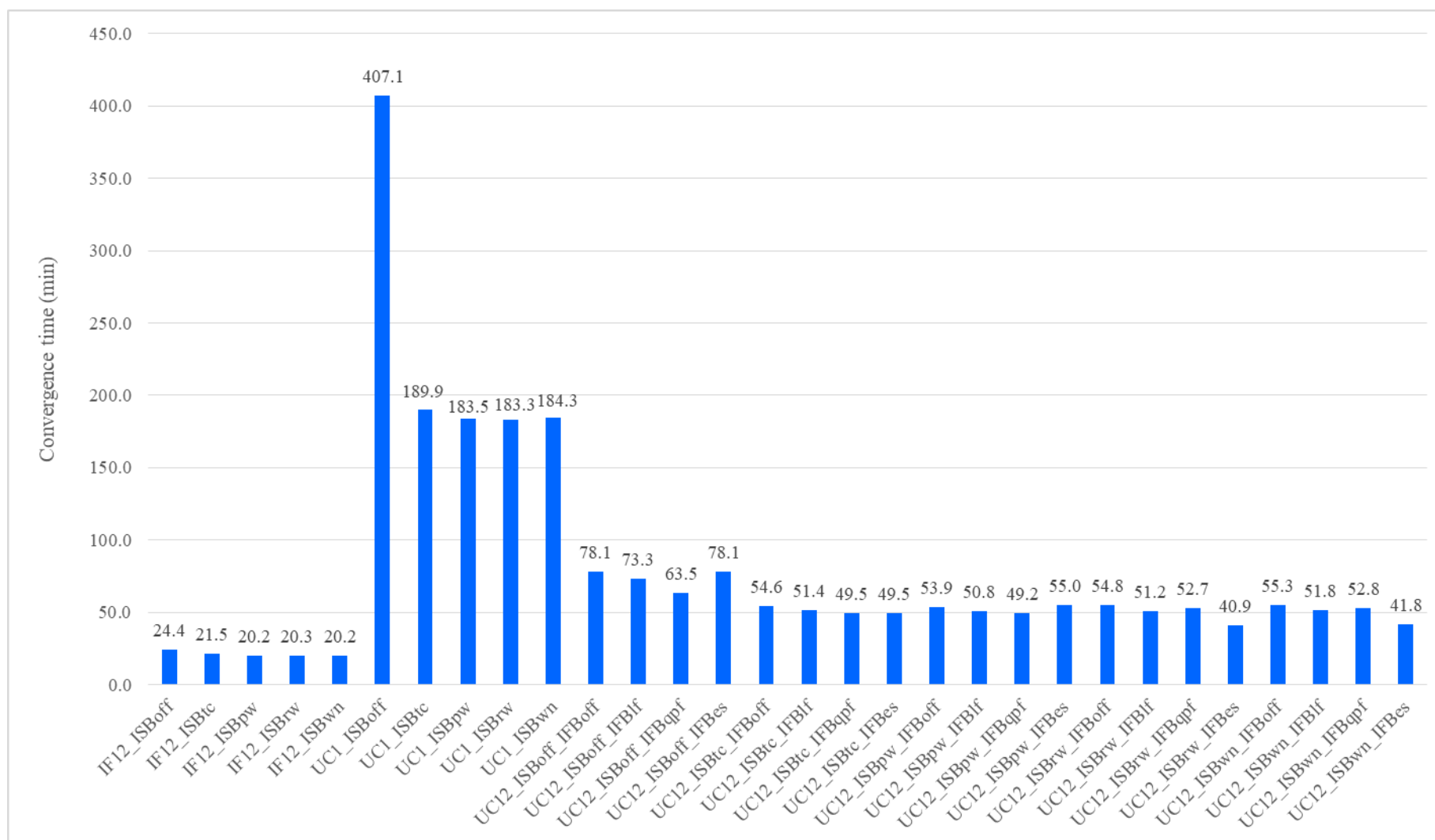
GRE

IF12: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 11.9%, 17.2%, 16.8% και 17.2 % για τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff. Τα RMS των συνιστωσών E/N/U είναι κάτω από 2.5 εκατοστά για όλα τα μοντέλα διαμόρφωσης των ISB. *UC1*: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 53.4%, 54.9%, 55% και 54.7% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff. Επιπλέον, τα RMS των συνιστωσών E/N/U για το μοντέλο απόρριψης είναι 5.8/9.1/14.7 cm, ενώ όταν εφαρμόζονται τα διάφορα στοχαστικά μοντέλα εκτίμησης των ISB τα RMS των τριών συνιστωσών βρίσκονται κάτω από 6 cm. Συγκεκριμένα, η μείωση που προκύπτει για τα RMS των συνιστωσών E/N/U είναι 45.1/69.7/60.8%, 45.5/71.3/63.0%, 45.8/71.2/63.0% και 45.5/71.4/62.5% για τα μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα.

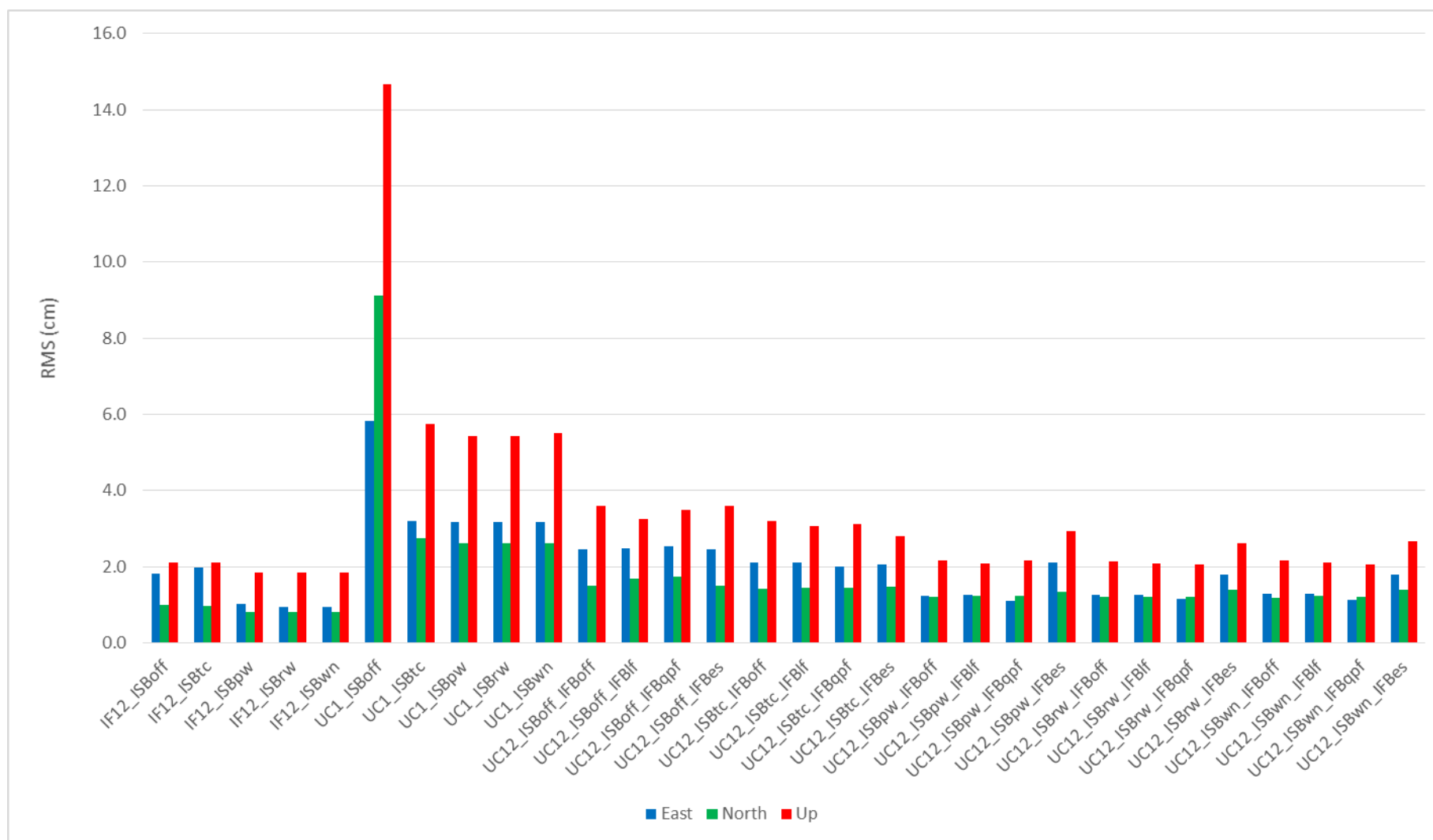
Επιπλέον, όταν εφαρμόζονται τα προαναφερθέντα μοντέλα, ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 30.8%, 33.1%, 33.2% και 32.8% αντίστοιχα, σχετικά ως προς την επίλυση G_UC1. Αν αυτά τα μοντέλα διαμόρφωσης των ISB δεν εφαρμοστούν, τότε ο χρόνος σύγκλισης και τα RMS των συνιστωσών E/N/U αυξάνονται κατά 48.4%(132.8 cm) και 93.6/371.7/182.0% ως προς την επίλυση G_UC12.

UC12: Όλα τα σενάρια επίλυσης παρουσιάζουν καλύτερους χρόνους σύγκλισης σχετικά ως προς το σενάριο ISBoff_IFBoff, πλην του ISBoff_IFBes, με καλύτερα το ISBrw_IFBes και ISBwn_IFBes στα οποία ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 47.6% και 46.5% αντίστοιχα. Παράλληλα, για όλους τους συνδυασμούς μοντελοποίησης των ISBs και IFBs τα RMS των συνιστωσών E/N/U βρίσκονται κάτω από τα 4 cm.

Σύγκριση με την επίλυση G_UC12 ανέδειξε σημαντική μείωση στον χρόνο σύγκλισης κατά 20.3% και 19.7% όταν εφαρμόζονται τα μοντέλα ISBrw_IFBes και ISBwn_IFBes αντίστοιχα. Αν δεν εφαρμοστούν τα μοντέλα αυτά, τότε ο χρόνος σύγκλισης αυξάνεται κατά 52.2% (26.8 min) σχετικά ως προς την επίλυση G_UC12.



Σχήμα 10. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GRE



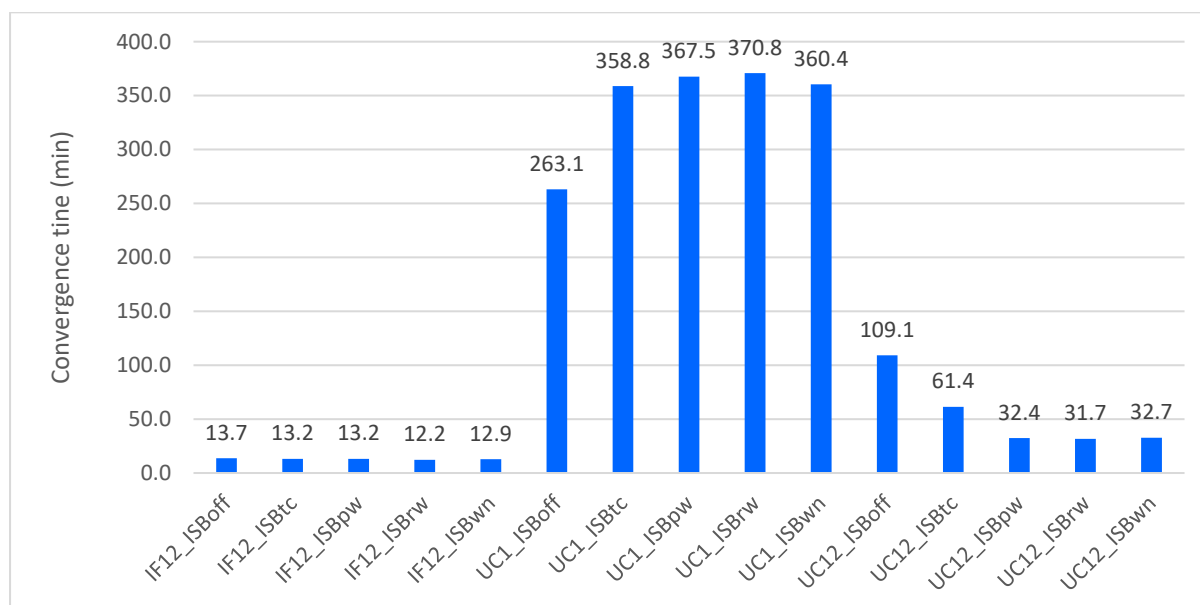
Σχήμα 11. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GRE

GEC

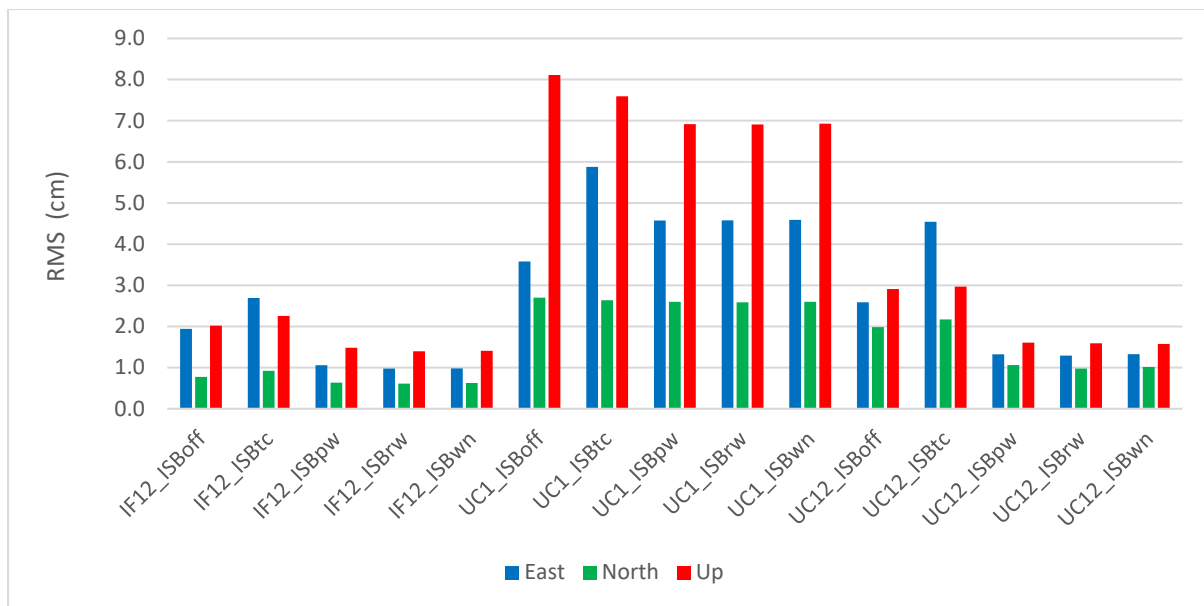
IF12: Ο χρόνος σύγκλισης της λύσης μειώνεται κατά 3.8%, 3.8%, 10.7% και 6.2% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff. Επίσης, οι χρόνοι σύγκλισης μειώνονται για όλα τα μοντέλα εκτίμησης των ISB, ακόμη και για το μοντέλο απόρριψης των ISB, σχετικά ως προς την επίλυση G_IF12. Η μείωση αυτή όμως είναι μικρή της τάξης των 1 με 2 λεπτών.

UC1: Κανένα στοχαστικό μοντέλο εκτίμησης των ISB δεν μειώνει τον χρόνο σύγκλισης των επιλύσεων σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff. Παρόλα αυτά, ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται όταν εφαρμόζεται το μοντέλο απόρριψης των ISB σχετικά ως προς την επίλυση G_UC1 κατά 4.9% (11.2 min).

UC12: Σε αντίθεση με την επίλυση UC1, παρατηρείται μείωση του χρόνου σύγκλισης κατά 43.7%, 70.3%, 70.9% και 70% για τα στοχαστικά μοντέλα εκτίμησης ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff. Παράλληλα, αν τα προαναφερθέντα στοχαστικά μοντέλα, εκτός του ISBtc, δεν εφαρμοστούν, τότε παρατηρείται μία αύξηση στον χρόνο σύγκλισης κατά 112.5% (57.8 min), σχετικά ως προς την επίλυση G_UC12.



Σχήμα 12. Μέσος χρόνος σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GEC



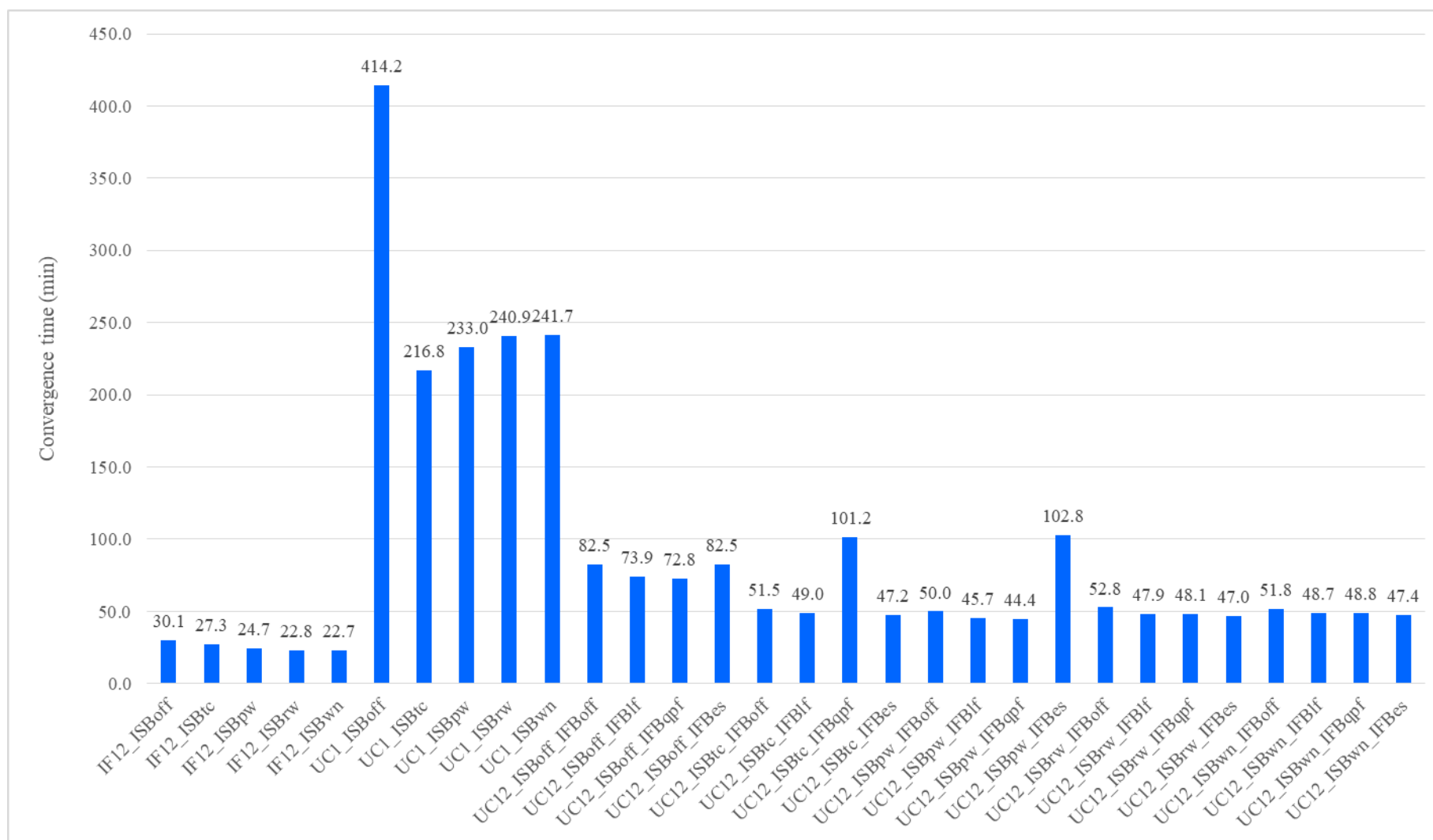
Σχήμα 13. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) της επίλυσης GEC

GRC

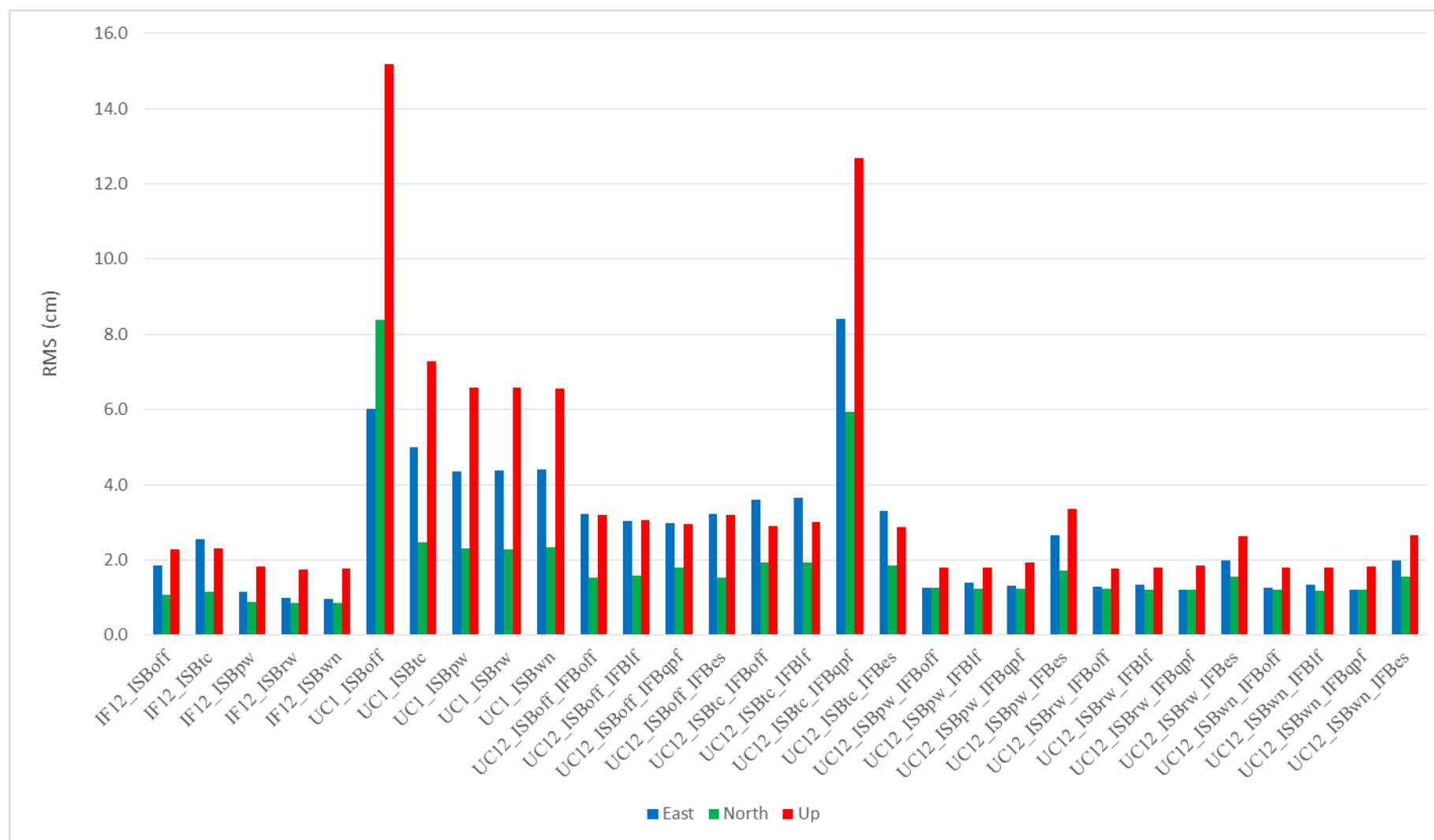
IF12: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 9.3%, 17.9%, 24.3% και 24.6% εφαρμόζοντας τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα σχετικά ως προς το στοχαστικό μοντέλο ISBoff.

UC1: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 47.6%, 43.7%, 41.8% και 41.6% εφαρμόζοντας τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα. σχετικά ως προς το στοχαστικό μοντέλο ISBoff. Το RMS των συνιστωσών E/N/U μειώνονται κατά 16.6/70.2/51.9% και 26.7/72.6/56.6% χρησιμοποιώντας το στοχαστικό μοντέλο ISBtc και τα στοχαστικά μοντέλα ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο ISBoff. Τέλος, αν δεν εφαρμοστεί κάποιο από τα μοντέλα εκτίμησης ISB που αναφέρθηκαν προηγούμενα, ο χρόνος σύγκλισης αυξάνεται κατά 51% (139.9 min) και τα RMS των συνιστωσών E/N/U κατά 100.3/333.4/192.1% (3.0/6.0/10.0 cm), σχετικά ως προς την επίλυση G_UC1.

UC12: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται για όλους τους συνδυασμούς εκτίμησης των ISB και IFB, πλην των συνδυασμών ISBoff_IFBes, ISBpw_ISBes και ISBtc_IFBqpf, σχετικά ως προς τον συνδυασμό ISBoff_IFBoff. Η μεγαλύτερη μείωση στον χρόνο σύγκλισης παρατηρείται για το σενάριο ISBpw_IFBqpf κατά 46.2%. Ως προς τον χρόνο σύγκλισης της επίλυση G_UC12, μείωση πάνω από 10% επιτυγχάνουν μόνο τα μοντέλα ISBpw_IFBlf (11%) και ISBpw_IFBqpf (13.5%). Αναλυτικότερα, αν τα μοντέλα αυτά δεν εφαρμοστούν τότε ο χρόνος σύγκλισης αυξάνει κατά 60.8% (31.2 min).



Σχήμα 14. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GRC



Σχήμα 15. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GRC

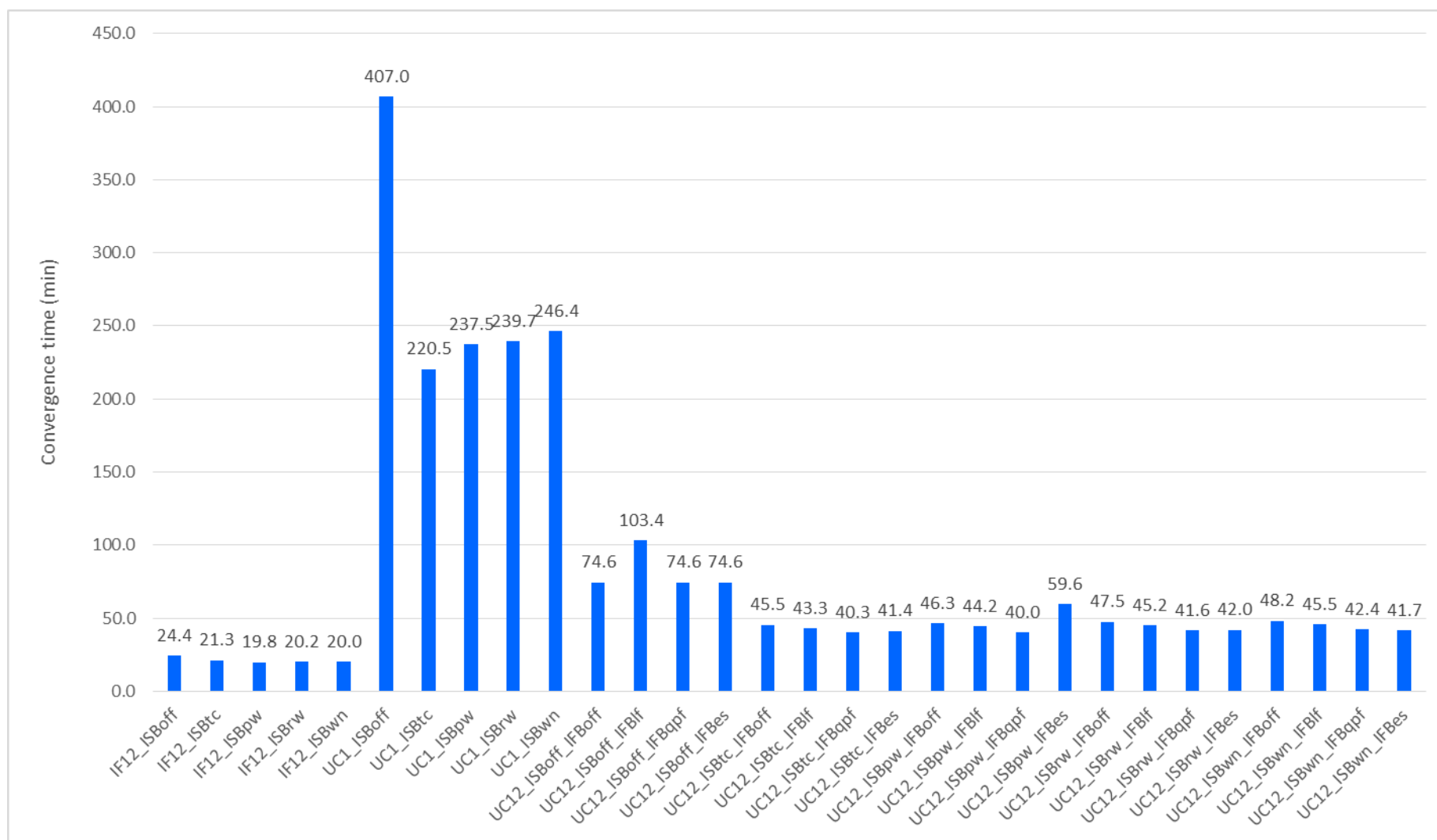
GREC

IF12: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 12.7%, 18.8%, 17.2% και 18% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff.

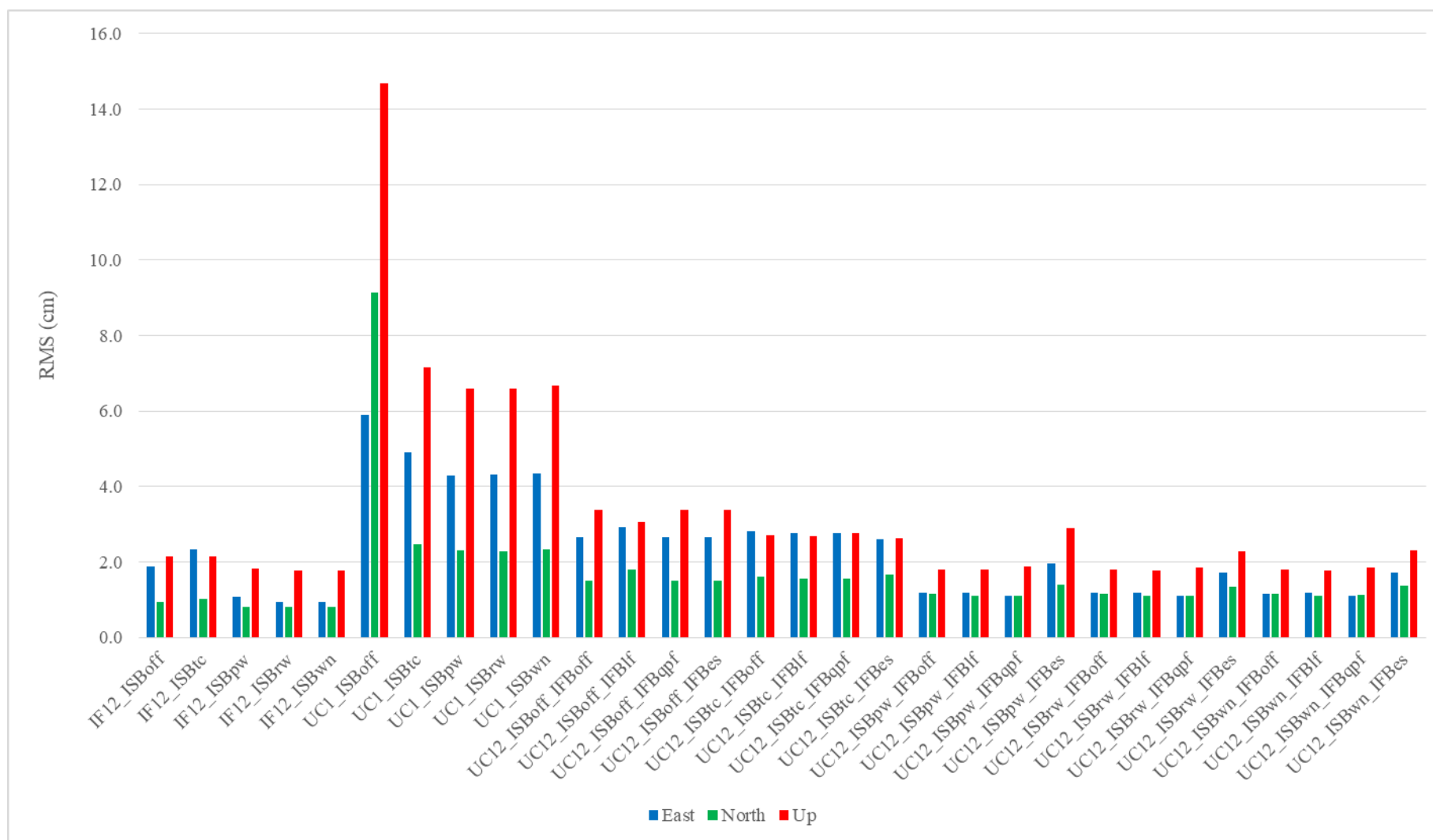
UC1: Ο χρόνος σύγκλισης της επίλυσης μειώνεται κατά 45%, 41.6%, 41.1% και 39.4% εφαρμόζοντας τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα σχετικά ως προς το χρόνο σύγκλισης του μοντέλου απόρριψης ISBoff. Συγκεκριμένα, το RMS για την συνιστώσα E μειώνεται κατά 16.9% χρησιμοποιώντας το στοχαστικό μοντέλο ISBtc και 27.1% χρησιμοποιώντας τα στοχαστικά μοντέλα ISBpw, ISBrw και ISBwn, σχετικά ως προς το μοντέλο ISBoff. Για την συνιστώσα N το RMS μειώνεται κατά 72.5% χρησιμοποιώντας το μοντέλο ISBtc και 74.7% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBpw, ISBrw και ISBwn. Για την συνιστώσα U το RMS μειώνεται κατά 51% χρησιμοποιώντας το μοντέλο ISBtc και 55.1% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBpw, ISBrw και ISBwn. Τέλος, σύγκριση ως προς το σενάριο G_UC1 ανέδειξε ότι αν δεν εφαρμοστεί κάποιο μοντέλο εκτίμησης των ISB ο χρόνος σύγκλισης αυξάνεται κατά 48.4% και τα RMS των συνιστωσών E/N/U κατά 95.6/372.3/182.2%. *UC12*: Ο χρόνος σύγκλισης της επίλυσης μειώνεται για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταξύ των μοντέλων εκτίμησης των ISB και IFB, σχετικά ως προς τον χρόνο σύγκλισης του συνδυασμού ISBoff_IFBoff, πλην των συνδυασμών ISBoff_IFBqpf και ISBoff_IFBes. Η γρηγορότερη σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιούνται τα σενάρια ISBpw_IFBqpf και ISBtc_IFBqpf, όπου αποδίδουν καλύτερα κατά 46% και 46.1% αντίστοιχα. Στον πίνακα 17 παρουσιάζονται διάφοροι συνδυασμοί εκτίμησης των ISB και IFB της επίλυσης GREC_UC12 που επιτυγχάνουν μείωση του χρόνου σύγκλισης μεγαλύτερη του 10% σχετικά ως προς τον χρόνο σύγκλισης της επίλυσης G_UC12. Αναλυτικότερα, αν οι συνδυασμοί αυτοί δεν εφαρμοστούν, τότε ο χρόνος σύγκλισης αυξάνει κατά 45.3% (23.2 min).

Πίνακας 17. Ποσοστιαίες μεταβολές του χρόνου σύγκλισης (Cvg) και των RMS των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U), των διαφόρων μοντέλων διαμόρφωσης των ISB και IFB της επίλυσης GREC_UC12 σχετικά ως προς την επίλυση G_UC12

GREC_UC12	Ποσοστιαία μεταβολή ($\geq 10\%$) ως προς την επίλυση G_UC12%
ISBtc_IFBoff	11.4
ISBtc_IFBlf	15.7
ISBtc_IFBqpf	21.5
ISBtc_IFBes	19.4
ISBpw_IFBoff	9.7
ISBpw_IFBlf	13.9
ISBpw_IFBqpf	22.1
ISBrw_IFBlf	11.9
ISBrw_IFBqpf	19.0
ISBrw_IFBes	18.1
ISBwn_IFBlf	11.3
ISBwn_IFBqpf	17.5
ISBwn_IFBes	18.7



Σχήμα 16. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GREC



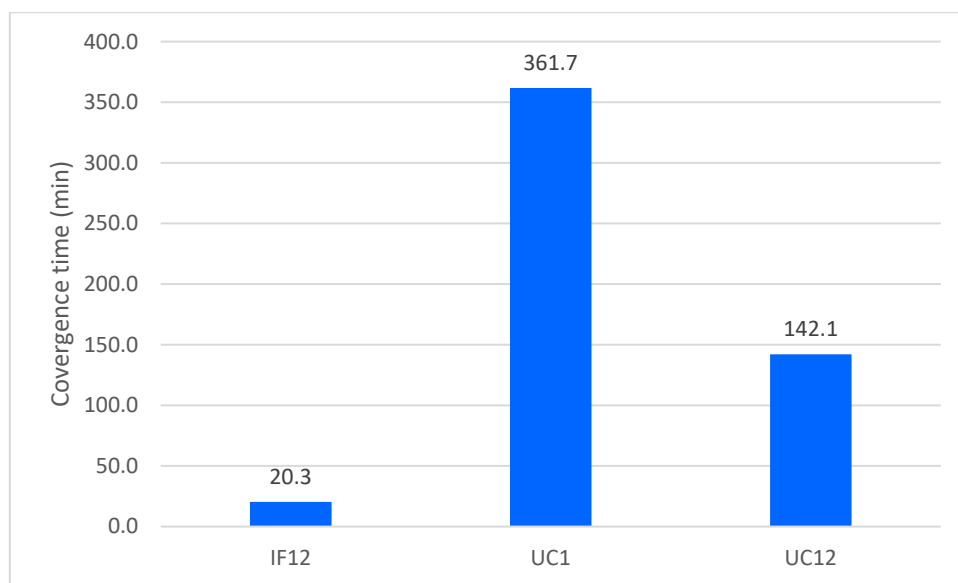
Σχήμα 17. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GREC

6.5.2 Κινηματικός εντοπισμός

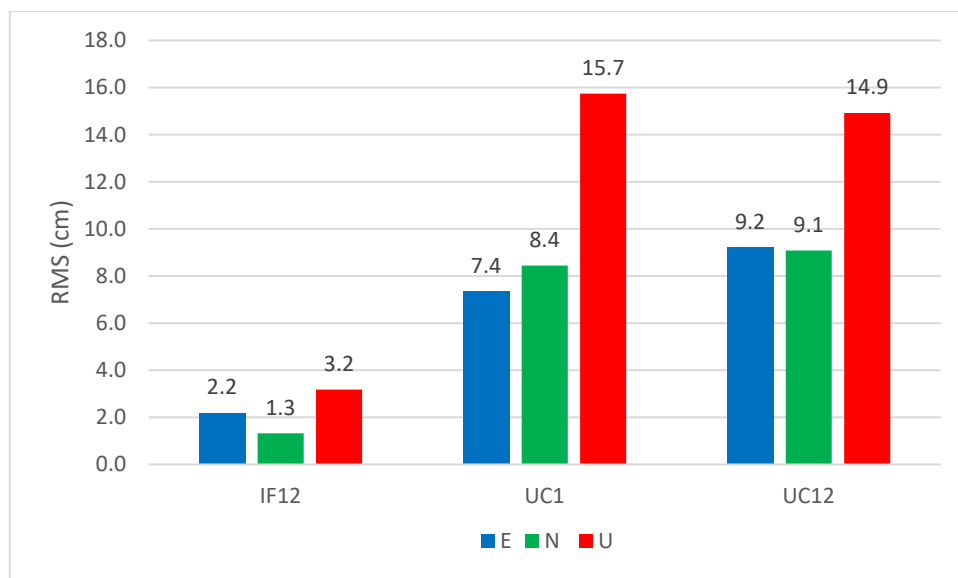
Αντίθετα με τον στατικό εντοπισμό, η ανάλυση πραγματοποιείται για τις μεταβολές του χρόνου σύγκλισης και των RMS των συνιστωσών E/N/U καθώς και στις δύο περιπτώσεις παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές.

G

Το σενάριο IF12 αποδίδει καλύτερα τόσο από άποψη σύγκλισης χρόνου όσο και από ακρίβεια θέσης στις διευθύνσεις E, N και U σχετικά ως προς τα σενάρια UC1 και UC12.



Σχήμα 18. Μέσος χρόνος σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης G



Σχήμα 19. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) της επίλυσης G

GR

IF12: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 34.6%, 41.1% και 40.7% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα σχετικά ως προς το σενάριο απόρριψης των ISB. Παράλληλα, τα μέσα RMS των συνιστωσών E, N και U μειώνονται κατά 63.6%, 67.3% και 68.6% όταν εφαρμόζονται τα μοντέλα ISBpw, ISBrw και ISBwn.

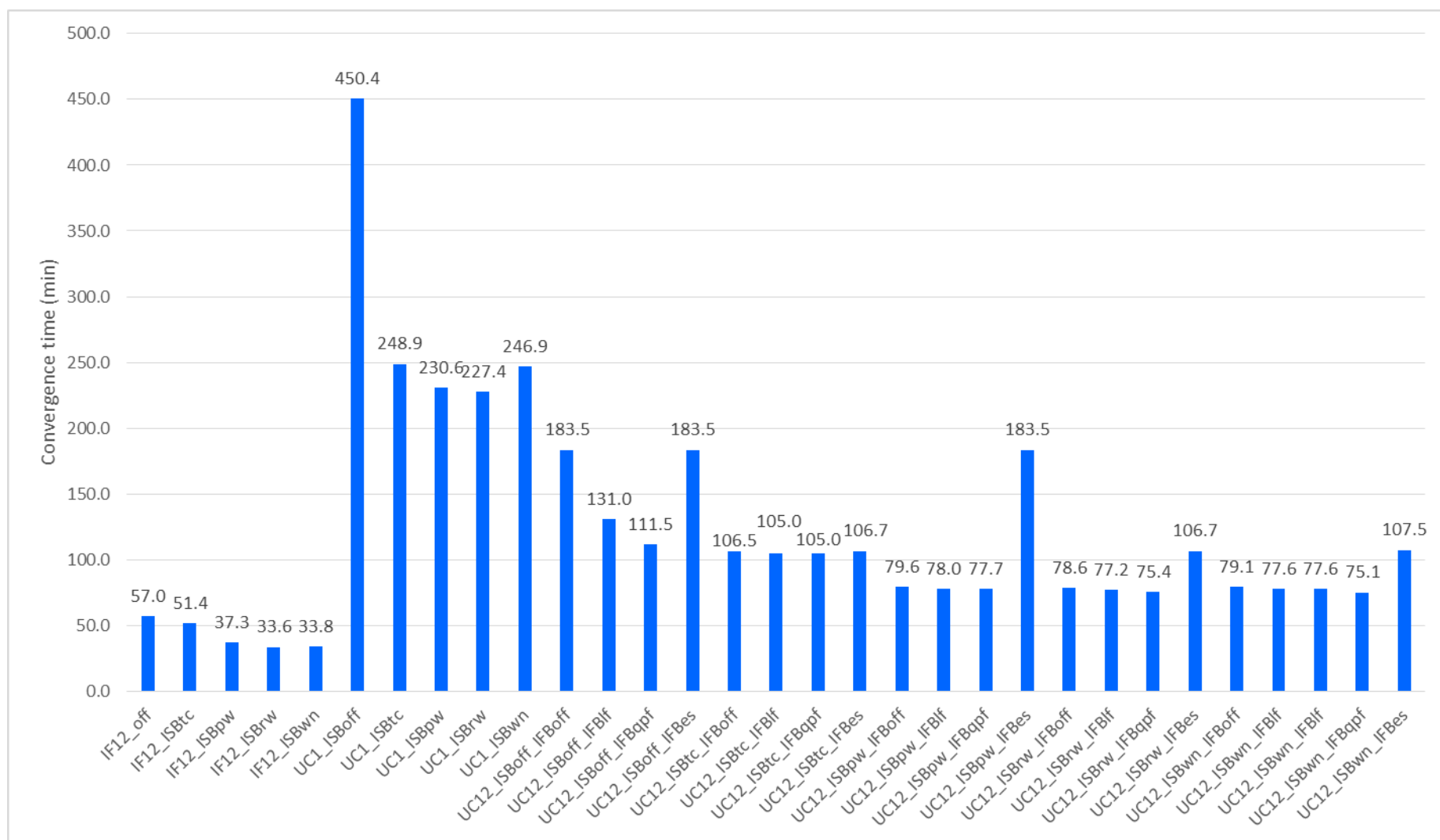
UC1: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 44.7%, 48.8%, 49.5% και 45.2% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης των ISBoff. Παράλληλα, στα μοντέλα αυτά επιτυγχάνεται μία μείωση της τάξης των 65.9%, 63.9% και 68.8% για τα μέσα RMS των συνιστωσών E, N και U αντίστοιχα.

UC12: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται για όλους τους συνδυασμούς ISB και IFB πλην του ISBoff_IFBes, σχετικά ως προς τον συνδυασμό απόρριψης ISBoff_IFBoff. Οι συνδυασμοί στους οποίους επιτυγχάνεται η καλύτερη απόδοση ως προς τον χρόνο σύγκλισης και την ακρίβεια της επίλυσης είναι τα ISBrw_IFBqpf και ISBwn_IFBqpf. Συγκεκριμένα, ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 58.9%-59.1% και τα μέσα RMS των συνιστωσών E/N/U κατά 90.3/82.5/88.9-89.1% αντίστοιχα.

Ως προς το σενάριο G_UC12, αν δεν εφαρμοστούν οι συνδυασμοί των στοχαστικών μοντέλων εκτίμησης των ISBs και των μοντέλων εκτίμησης των IFBs του πίνακα 18 στην επίλυση GR_UC12, τότε ο χρόνος σύγκλισης καθώς και τα RMS των συνιστωσών E/N/U αυξάνονται κατά 29.1% και 213.2/57.4/182.8% αντίστοιχα.

Πίνακας 18. Ποσοστιαίες μεταβολές του χρόνου σύγκλισης (Cvg) και των RMS των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U), των διαφόρων μοντέλων διαμόρφωσης των ISB και εκτίμησης των IFB της επίλυσης GR_UC12 σχετικά ως προς την επίλυση G_UC12

UC12	Cvg %	E %	N %	U %
ISBtc_IFBoff	25.1	4.8	28.9	7.7
ISBtc_IFBlf	26.1	3.2	27.8	7.3
ISBtc_IFBqpf	26.1	4.6	28.1	7.7
ISBpw_IFBoff	44.0	64.9	71.2	66.8
ISBpw_IFBlf	45.1	68.7	71.8	67.9
ISBpw_IFBqpf	45.4	69.9	72.2	67.6
ISBrw_IFBoff	44.7	65.8	71.7	68.2
ISBrw_IFBlf	45.7	69.6	72.8	69.6
ISBrw_IFBqpf	47.0	70.0	73.0	68.9
ISBwn_IFBoff	44.3	66.1	71.7	68.1
ISBwn_IFBlf	45.4	69.4	72.8	69.6
ISBwn_IFBqpf	47.2	69.7	73.1	68.7



Σχήμα 20. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GR



GE

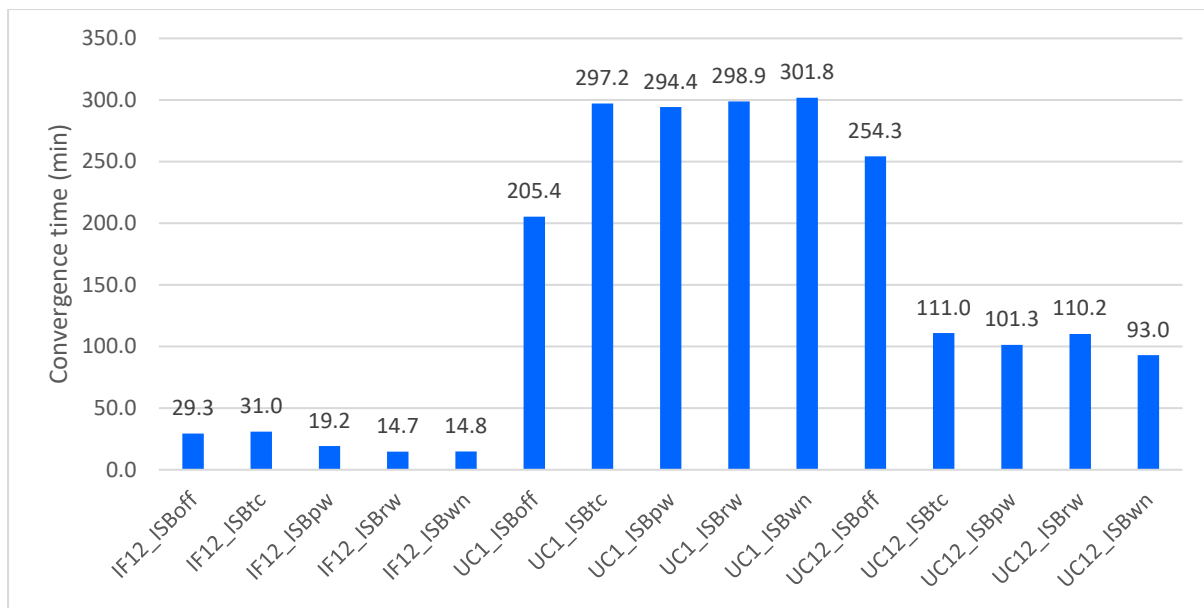
IF12: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 34.5%, 49.8% και 49.5% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBrw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης των ISBoff. Παρόμοια, για τις συνιστώσες E, N και U παρατηρείται μείωση κατά 56.4%, 50% και 53.2% αντίστοιχα, εφαρμόζοντας τα προαναφερθέντα μοντέλα. Επιπλέον, αν τα μοντέλα αυτά δεν εφαρμοστούν στην επίλυση GE_IF12, τότε ο χρόνος σύγκλισης αυξάνεται κατά 44.5% σχετικά ως προς την επίλυση G_IF12.

UC1: Ο χρόνος σύγκλισης αυξάνεται κατά 44.7%, 43.3%, 45.5% και 46.9% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBrw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff. Παρά την αύξηση αυτή στον χρόνο σύγκλισης, παρατηρείται μείωση στις συνιστώσες E/N/U κατά 40.6/20.4/9.1%, 40.1/22.3/10.7%, 40.6/21.4/10.4% και 44.3/27.3/20.3% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBrw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff.

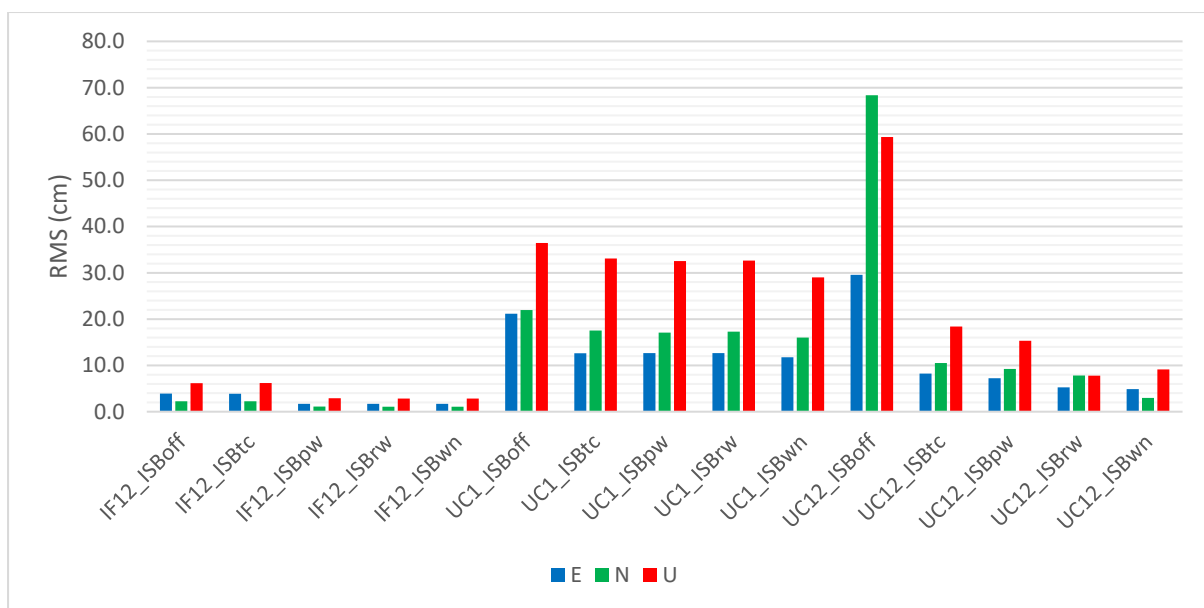
Επιπλέον, ενώ όλα τα προαναφερθέντα μοντέλα εκτίμησης των ISB, μαζί με το μοντέλο απόρριψης τους, αποδίδουν καλύτερα ως προς τον χρόνο σύγκλισης της επίλυσης G_UC1, η ακρίβεια της επίλυσης χειροτερεύει ως προς τα μέσα RMS των συνιστωσών E/N/U.

UC12: Ο μέσος χρόνος σύγκλισης μειώνεται για όλα τα στοχαστικά μοντέλα εκτίμησης των ISB σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff. Το μοντέλο όμως που υπερέχει των υπολοίπων στην σύγκλιση και την ακρίβεια της επίλυσης είναι το στοχαστικό μοντέλο ISBwn. Συγκεκριμένα ο χρόνος της επίλυσης μειώνεται κατά 63.4% και τα μέσα RMS των διευθύνσεων E/N/U κατά 83.4/95.6/84.7% αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff.

Επιπλέον, τα μοντέλα ISBrw και ISBwn μειώνουν τον χρόνο σύγκλισης κατά 22.4% και 34.6% αντίστοιχα και τα RMS των συνιστωσών E/N/U κατά 43.1/13.9/47.9% και 47.1/67.1/38.7% αντίστοιχα, σχετικά ως προς την επίλυση G_UC12. Αν δεν εφαρμοστεί κάποιο από τα στοχαστικά μοντέλα αυτά, τότε ο χρόνος σύγκλισης αυξάνεται κατά 79% και τα RMS των συνιστωσών E/N/U κατά 220.1/653.1/297.7%.



Σχήμα 22. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GE



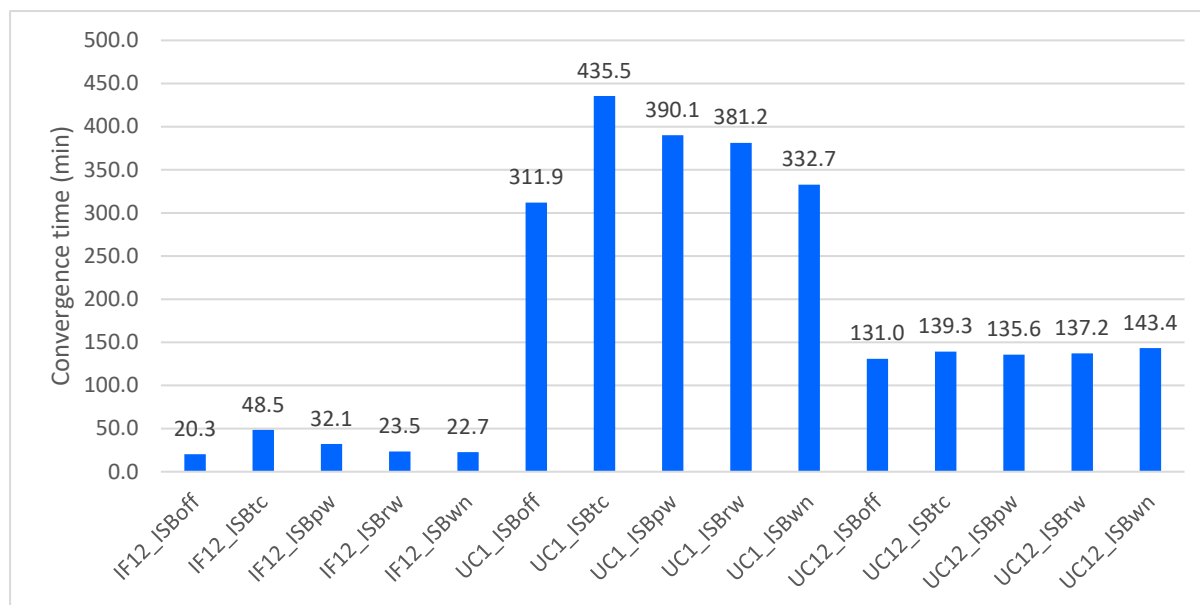
Σχήμα 23. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GE

GC

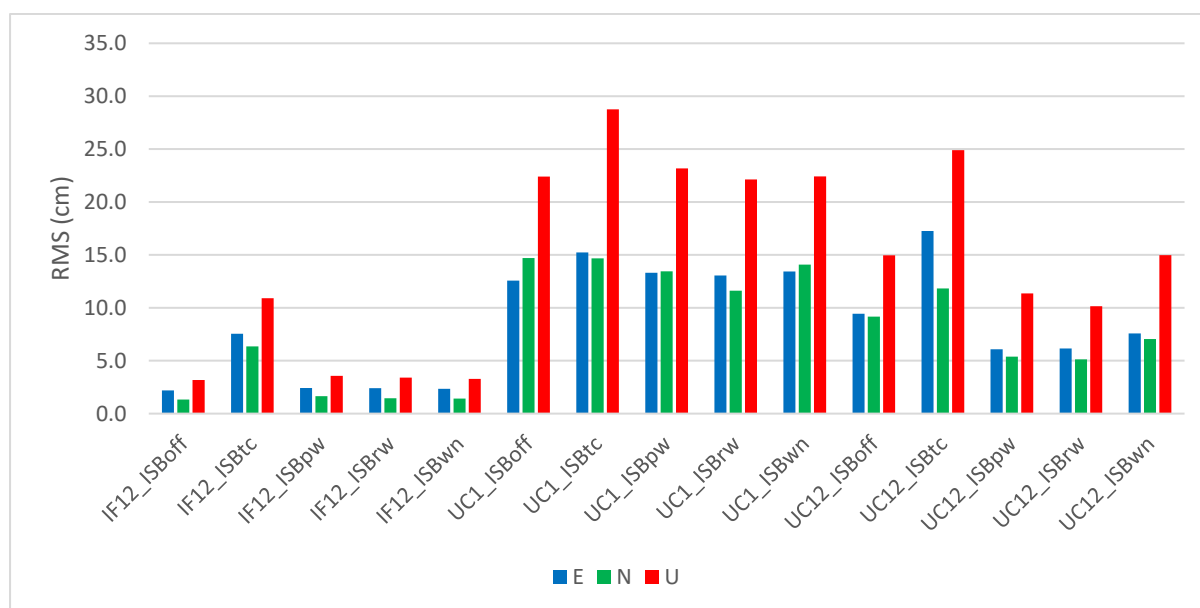
IF12: Κανένα στοχαστικό μοντέλο εκτίμησης των ISB δεν αποδίδει καλύτερα από το μοντέλο απόρριψης τους τόσο στον χρόνο σύγκλισης όσο και στην ακρίβεια της επίλυσης.

UC1: Κανένα στοχαστικό μοντέλο εκτίμησης των ISB δεν αποδίδει καλύτερα από το μοντέλο απόρριψης τους, τόσο στον χρόνο σύγκλισης όσο και στην ακρίβεια της επίλυσης. Παρόλα αυτά παρατηρείται μία μικρή βελτίωση ως προς τον χρόνο σύγκλισης κατά 13.8% για το μοντέλο ISBoff σχετικά ως προς την επίλυση G_UC1. Όμως, τα RMS των συνιστωσών E/N/U αυξάνονται κατά 75.6/38.1/40.8%.

UC12: Κανένα στοχαστικό μοντέλο εκτίμησης των ISB δεν αποδίδει καλύτερα από το μοντέλο απόρριψης τους στον χρόνο σύγκλισης της επίλυσης. Παρόλα αυτά για τα μέσα RMS των συνιστωσών E/N/U παρατηρείται μία βελτίωση της τάξης των 35.1/41.3/24%, 34/44.6/32.7% και 19.1/23.9/0% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBpw, ISBw και ISBwn, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff.



Σχήμα 24. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GC



Σχήμα 25. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GC

GEC

IF12: Τα στοχαστικά μοντέλα ISBpw, ISBw και ISBwn μειώνουν τον χρόνο σύγκλισης κατά 21.2%, 43% και 43.3% αντίστοιχα, σχετικά ως προς το χρόνο σύγκλισης του μοντέλου ISBoff. Τα RMS των συνιστωσών E/N/U για τα μοντέλα αυτά έχουν την ίδια απόδοση και όλα είναι μικρότερα του μοντέλου απόρριψης.

Παράλληλα, τα μοντέλα ISBrw και ISBwn μειώνουν τον χρόνο σύγκλισης κατά 22.4% και 34.6% αντίστοιχα, σχετικά ως προς τον χρόνο σύγκλισης της επίλυσης G_IF12, ενώ η μη εφαρμογή τους οδηγεί σε αύξηση του χρόνου σύγκλισης κατά 44.5% . Για τα RMS των συνιστωσών E/N/U δεν παρατηρείται κάποια σημαντική μεταβολή.

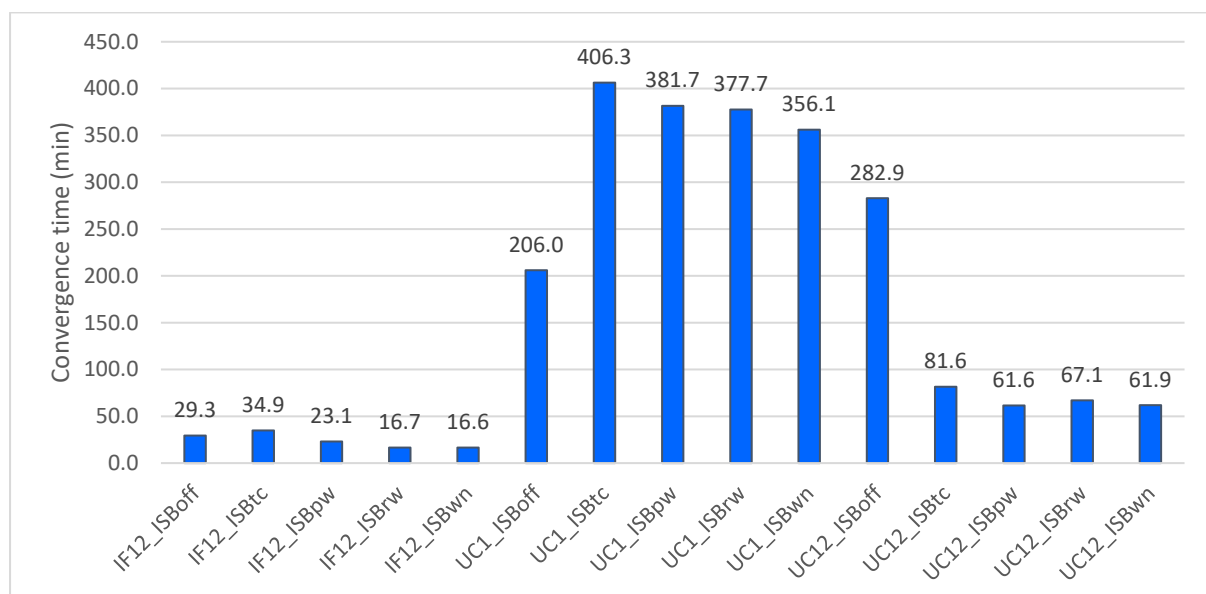
UC1: Ο χρόνος σύγκλισης δεν μειώνεται για κανένα από τα στοχαστικά μοντέλα εκτίμησης των ISB, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψής τους. Παρόλα αυτά παρατηρείται βελτίωση των RMS για τις συνιστώσες E/N/U κατά 34/26/5.5%, 32.5/26.9/4.1% και 37.7/37.9/17.5% όταν εφαρμόζονται τα μοντέλα διαμόρφωσης ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff.

UC12: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 71.2%, 78.2%, 76.3% και 78.1% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff. Όσον αφορά τα RMS των συνιστωσών E/N/U αυτά μειώνονται κατά 74.3/90.5/73.2 %, 90/96.4/90.7%, 89.6/96.6/91.1% και 89.6/96.1/90% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff.

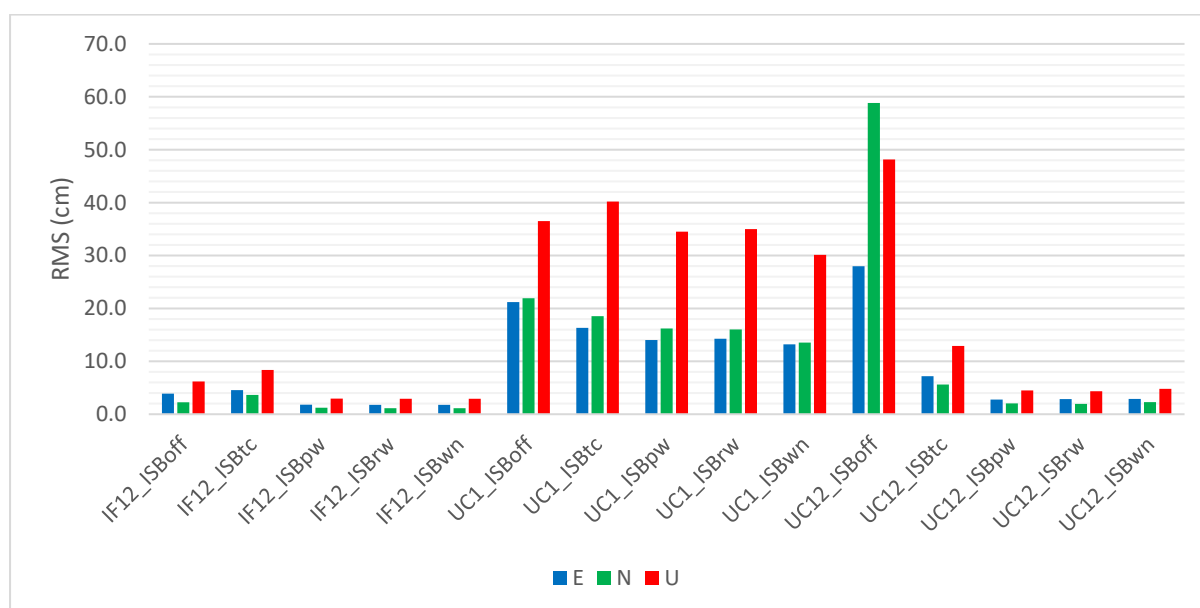
Παράλληλα, τα προαναφερθέντα μοντέλα διαμόρφωσης επιτυγχάνουν καλύτερη απόδοση ως προς τον χρόνο σύγκλισης και τα RMS των συνιστωσών E/N/U, συγκριτικά ως προς την επίλυση G_UC12 (Πίνακας 19). Αν αυτά δεν εφαρμοστούν, τότε ο χρόνος σύγκλισης και τα RMS των συνιστωσών E/N/U αυξάνονται κατά 99.0% και 202.9/548.0/222.7% αντίστοιχα.

Πίνακας 19. Ποσοστιαίες μεταβολές του χρόνου σύγκλισης και των RMS των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U), των διαφόρων μοντέλων διαμόρφωσης των ISB, σχετικά ως προς την επίλυση G_UC12

UC12	Cvg %	E %	N %	U %
ISBtc	42.6	22.1	38.3	13.5
ISBpw	56.7	70.0	77.4	69.8
ISBrw	52.8	69.1	78.5	70.9
ISBwn	56.5	68.7	74.9	67.9



Σχήμα 26. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GEC



Σχήμα 27. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GEC

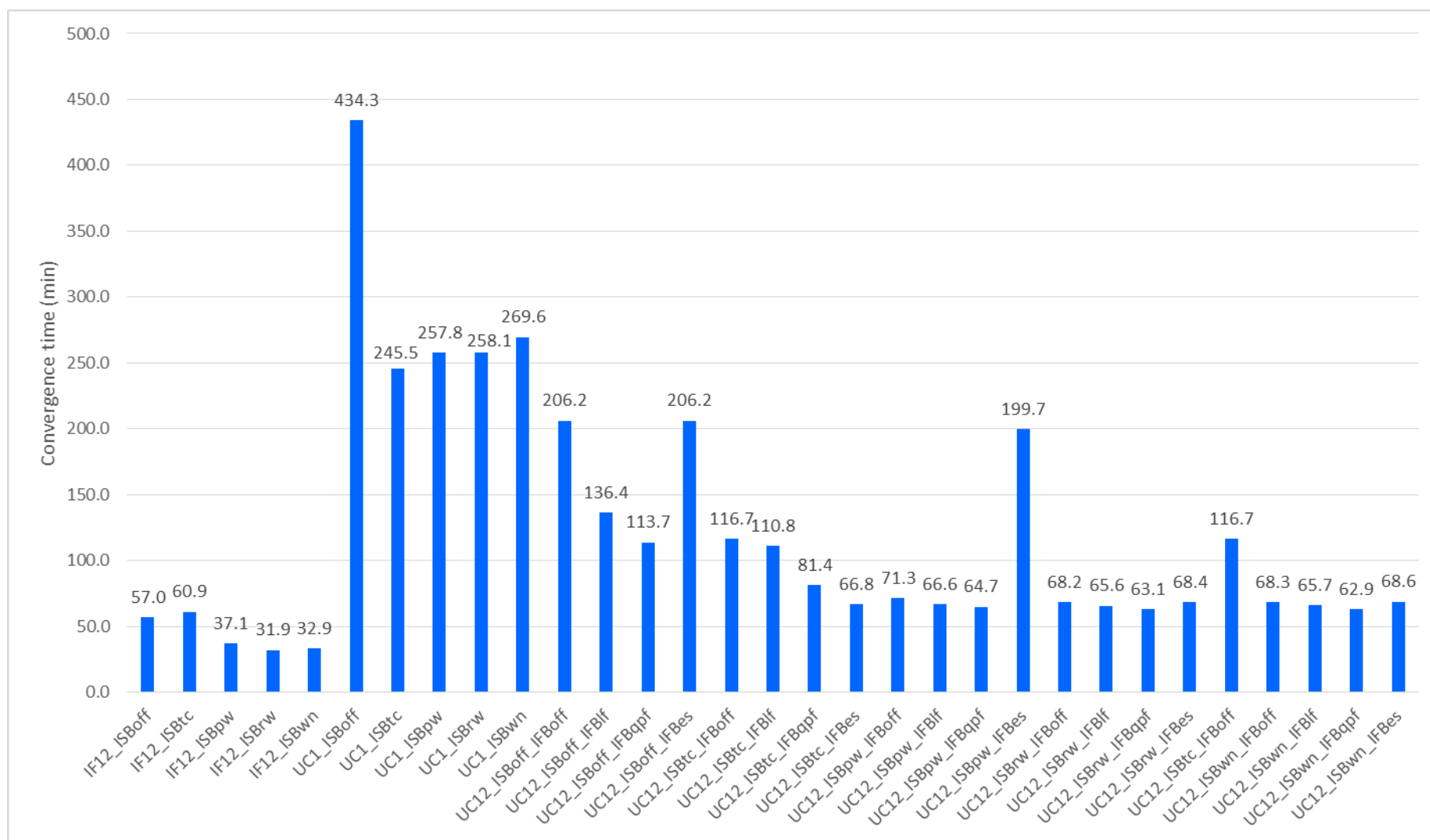
GRC

IF: Τα στοχαστικά μοντέλα ISBpw, ISBrw και ISBwn αποδίδουν καλύτερα ως προς το χρόνο σύγκλισης και την ακρίβεια της επίλυσης, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης των ISBoff. Συγκεκριμένα, ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 34.9%, 44% και 42.3% αντίστοιχα. Παράλληλα, τα RMS των συνιστωσών E/N/U μειώνονται κατά 58.9/65.3/67.9% 64.3/67.3/68.9% και 64.3/65.3/67.9% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBrw και ISBwn αντίστοιχα σχετικά ως προς τα στοχαστικό μοντέλο απόρριψης ISBoff.

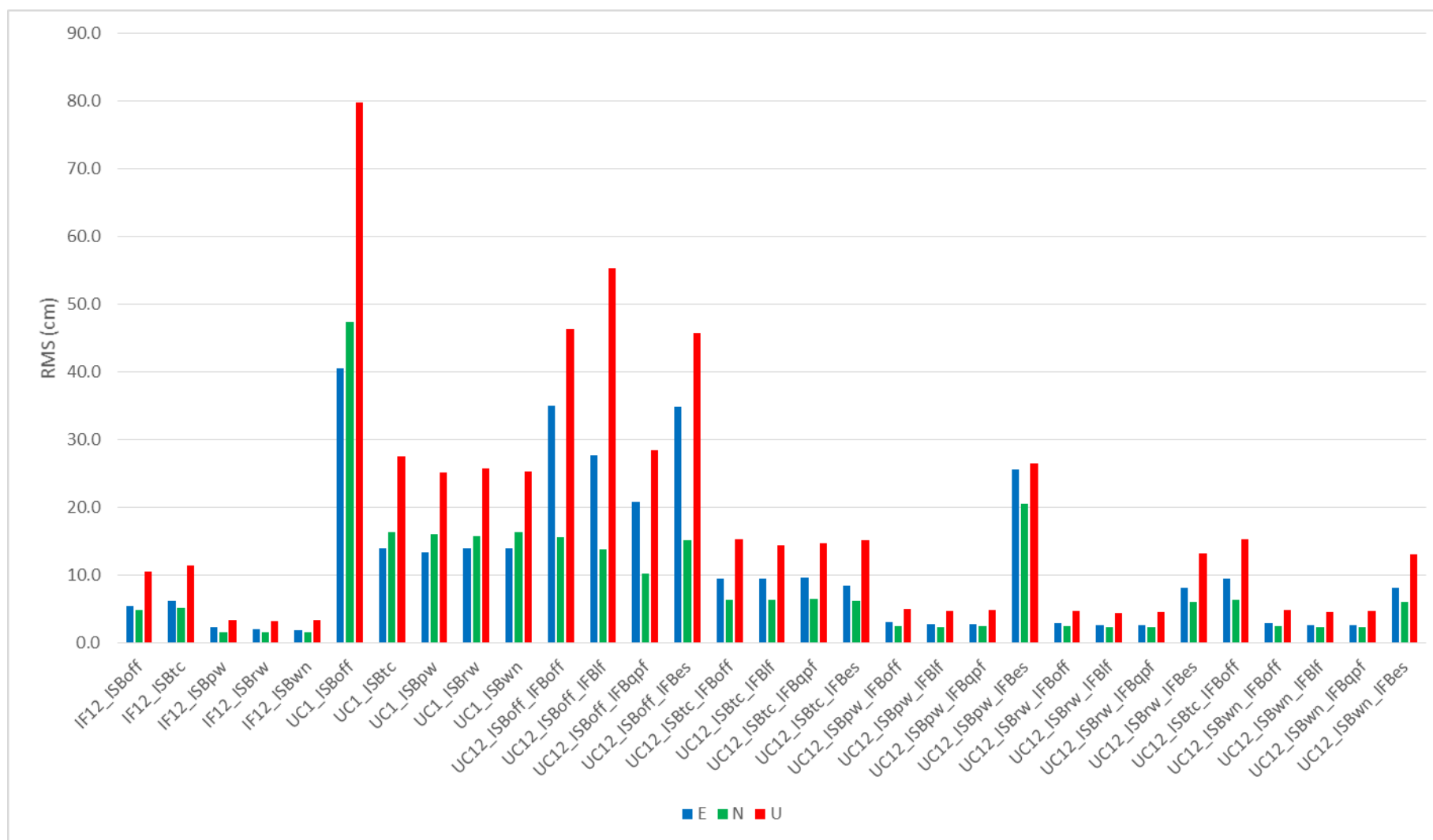
UC1: Ο χρόνος σύγκλισης της επίλυσης μειώνεται κατά 43.5%, 40.6%, 40.6% και 37.9% για τα στοχαστικά μοντέλα εκτίμησης ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff. Παράλληλα, μείωση παρατηρείται και στα μέσα RMS των συνιστωσών E/N/U κατά 67/65.6/65.4%, 65.3/66/68.4%, 65.5/66.7/67.8% και 65.8/65/68.2% για τα στοχαστικά μοντέλα εκτίμησης ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα, συγκριτικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff.

UC12: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται για όλους τους συνδυασμούς εκτίμησης των ISB και IFB, πλην του συνδυασμού ISBoff_IFBes, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff_IFBoff. Την μεγαλύτερη μείωση επιτυγχάνουν τα μοντέλα ISBrw_IFBqpf (69.4%) και ISBwn_IFBqpf (69.5%). Το ίδιο ισχύει και για τα μέσα RMS των συνιστωσών E/N/U των προαναφερθέντων μοντέλων που μειώνονται κατά 92.6/84.7/90.1% και 92.3/84.7/89.9% για αντίστοιχα.

ς προς την επίλυση G_UC12 αν δεν εφαρμοστούν οι συνδυασμοί εκτίμησης των ISB και IFB του πίνακα 20, τότε ο χρόνος σύγκλισης αυξάνεται κατά 45.1% και τα RMS των συνιστωσών E/N/U κατά 279.7/72.7/211.3% αντίστοιχα.



Σχήμα 28. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GRC



Σχήμα 29. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GRC

Πίνακας 20. Ποσοστιαίες μεταβολές του χρόνου σύγκλισης (Cvg) και των RMS των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) των διαφόρων μοντέλων διαμόρφωσης των ISB και εκτίμησης των IFB της επίλυσης GRC, σχετικά ως προς την επίλυση G_UC12

UC12	Cvg %	E %	N %	U %
ISBpw_IFBoff	49.8	66.8	72.8	66.7
ISBpw_IFBlf	53.1	70.0	73.6	68.2
ISBpw_IFBqpf	54.4	70.0	72.6	67.1
ISBrw_IFBoff	52.0	68.7	72.9	68.0
ISBrw_IFBlf	53.9	71.7	74.0	69.8
ISBrw_IFBqpf	55.6	71.5	73.4	69.1
ISBrw_IFBes	51.9	11.8	33.6	11.7
ISBwn_IFBoff	52.0	68.4	72.9	67.5
ISBwn_IFBlf	53.7	72.0	73.5	69.5
ISBwn_IFBqpf	55.7	71.1	73.5	68.6
ISBwn_IFBes	51.7	11.3	33.3	12.0

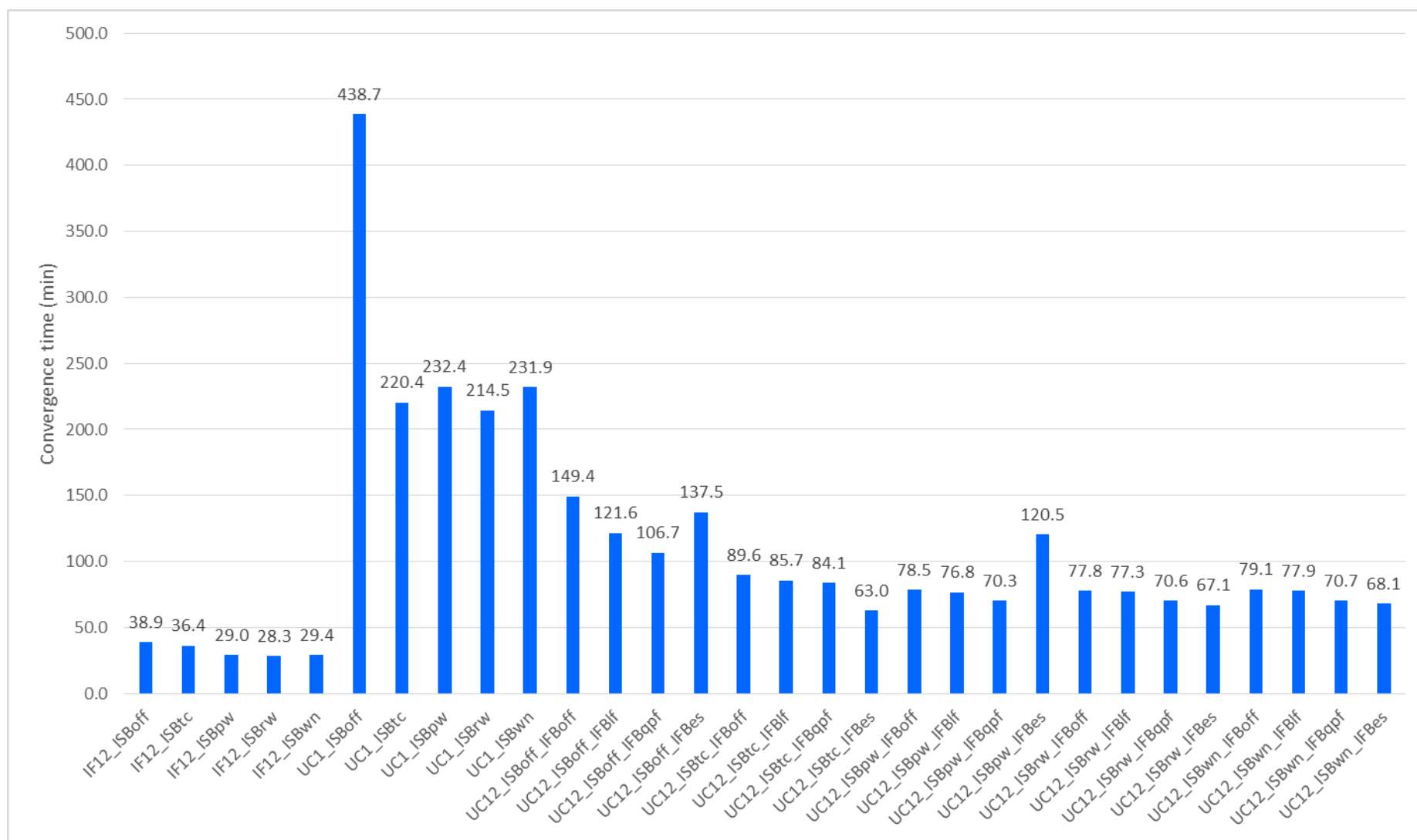
GRE

IF12: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 25.4%, 27.2% και 24.4% και τα RMS των συνιστωσών E/N/U κατά 54.9/61.9/62.6%, 58.5/62.2/61.9% και 59.1/64.0/64.1% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff.

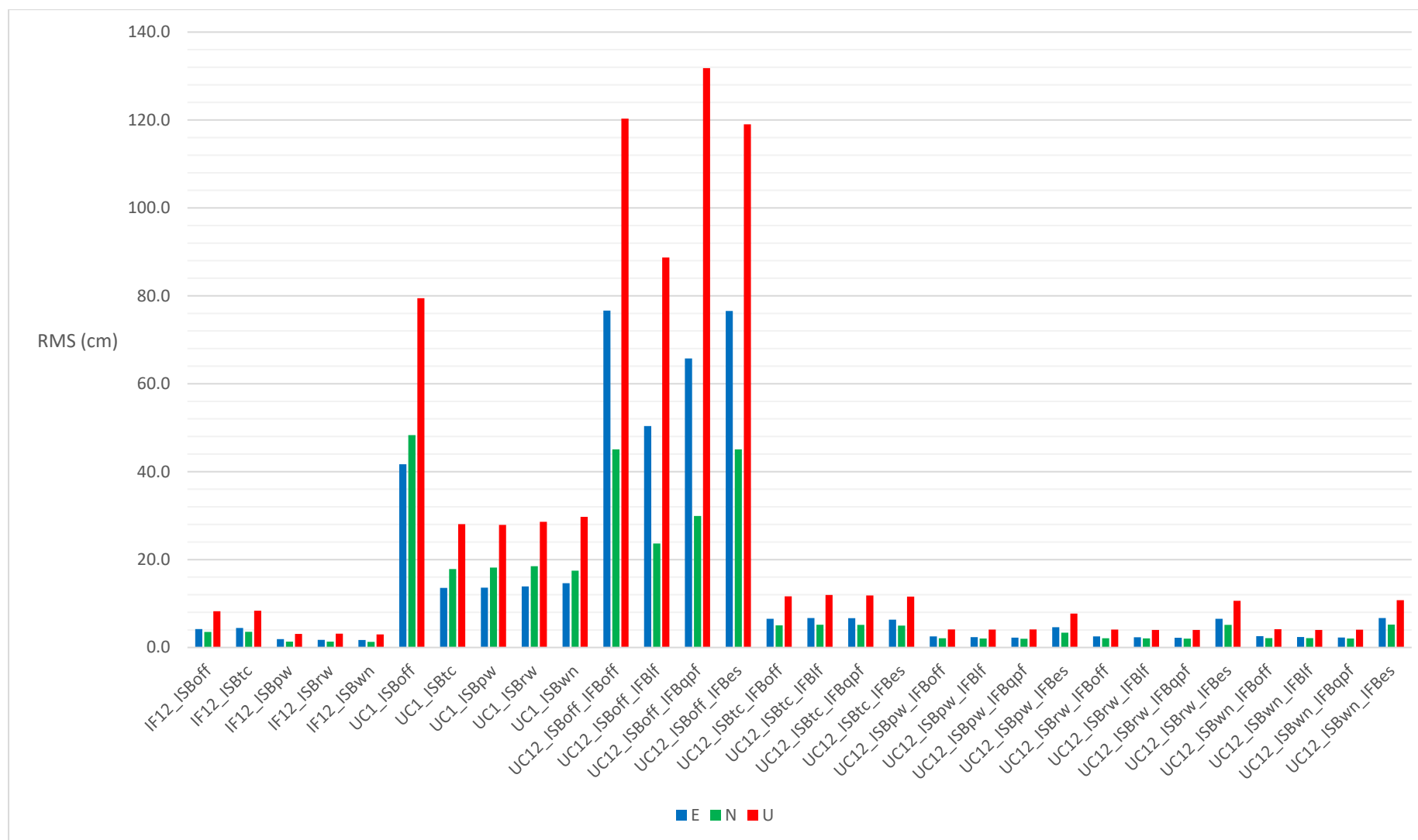
UC1: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται για όλα τα στοχαστικά μοντέλα εκτίμησης των ISB σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff. Το στοχαστικό μοντέλο όμως που αποδίδει καλύτερα τόσο στον χρόνο σύγκλισης όσο και στην ακρίβεια της επίλυσης είναι το ISBwn. Συγκεκριμένα ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 51.1% και τα RMS των συνιστωσών E/N/U κατά 66.7/61.7/64%.

UC12: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται για όλους τους συνδυασμούς των στοχαστικών μοντέλων εκτίμησης των ISB και των μοντέλων εκτίμησης των IFB, εκτός του συνδυασμού ISBoff_IFBes, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff_IFBoff. Παρόλο που η μεγαλύτερη μείωση στον χρόνο σύγκλισης επιτυγχάνεται για τον συνδυασμό ISBtc_IFBes (63%), το μέσο RMS της κατακόρυφης συνιστώσας U δεν κατεβαίνει κάτω από 10 cm. Αντίθετα, στους συνδυασμούς ISBpw_IFBqpf, qpfκαι ISBwn_IFBqpf, με χρόνους σύγκλισης μικρότερους κατά 52.7-52.9%, επιτυγχάνεται μείωση στα μέσα RMS των συνιστωσών E/N/U κατά 97%/95%/96% ως προς τον συνδυασμό ISBoff_IFBoff. Επιπλέον στους συνδυασμούς αυτών το μέσω RMS της συνιστώσας U είναι κάτω από 10 cm.

Ως προς την επίλυση G_UC12 αν δεν εφαρμοστεί κάποιος από τους συνδυασμούς εκτίμησης των ISBs και των IFBs του πίνακα 21, τότε ο χρόνος σύγκλισης αυξάνεται κατά 5.2% και τα RMS των συνιστωσών E/N/U κατά 730.0/396.3/706.2%.



Σχήμα 30. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GRE



Σχήμα 31. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GRE

Πίνακας 21. Ποσοστιαίες μεταβολές του χρόνου σύγκλισης (Cvg) και των RMS των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) των διαφόρων μοντέλων διαμόρφωσης των ISB και εκτίμησης των IFB της επίλυσης GRE, σχετικά ως προς την επίλυση G_UC12

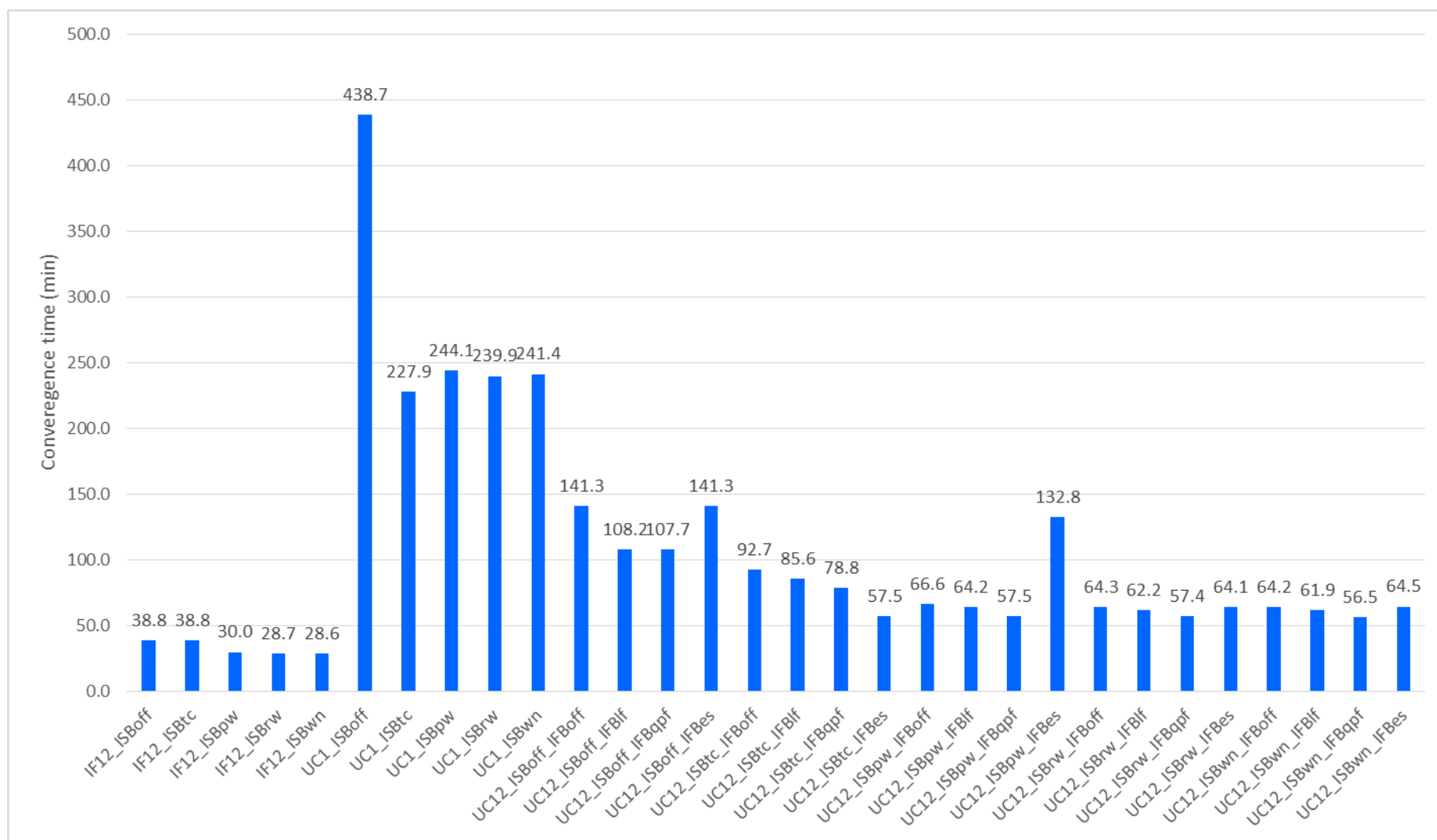
UC12	Cvg %	E %	N%	U%
ISBtc_IFBoff	36.9	29.2	44.7	22.1
ISBtc_IFBlf	39.7	27.3	43.1	19.9
ISBtc_IFBqpf	40.8	27.8	43.4	20.7
ISBtc_IFBes	55.7	31.3	45.1	22.3
ISBpw_IFBoff	44.7	72.6	76.9	72.5
ISBpw_IFBlf	46.0	74.4	77.6	72.7
ISBpw_IFBqpf	50.6	75.7	78.1	72.5
ISBpw_IFBes	15.2	50.2	62.9	48.4
ISBrw_IFBoff	45.2	72.8	76.9	72.7
ISBrw_IFBlf	45.6	74.8	77.1	73.3
ISBrw_IFBqpf	50.3	76.0	77.8	73.3
ISBrw_IFBes	52.8	29.4	43.4	28.8
ISBwn_IFBoff	44.3	72.1	76.5	72.1
ISBwn_IFBlf	45.2	74.1	76.5	73.2
ISBwn_IFBqpf	50.3	75.5	77.4	73.0
ISBwn_IFBes	52.1	27.5	42.5	27.8

GREC

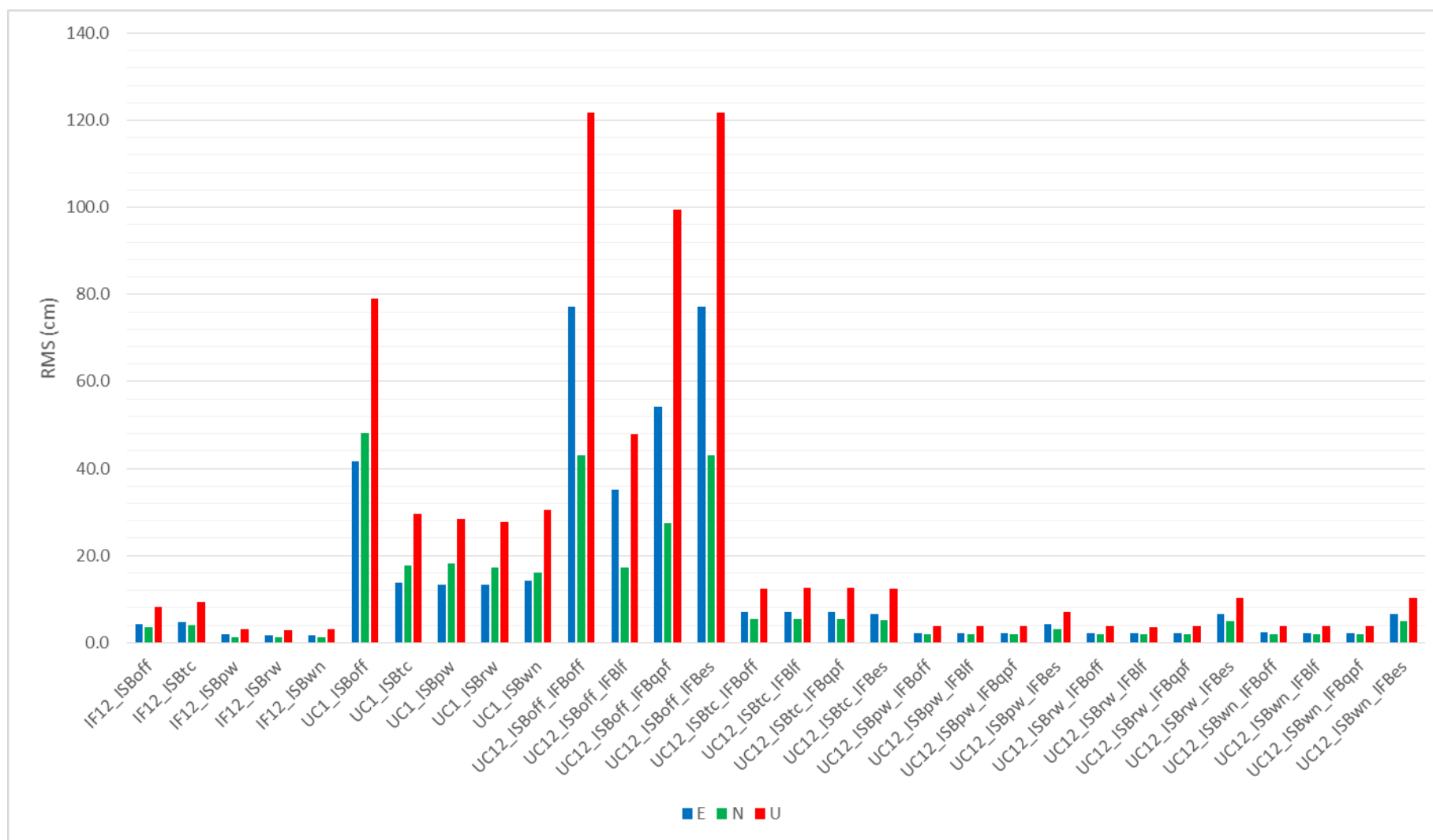
IF12: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 22.7%, 26% και 26.3% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff. Παράλληλα, τα μέσα RMS των συνιστωσών E/N/U μειώνονται κατά 59.5/62.8/63.8%.

UC1: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται κατά 48.1%, 44.4%, 45.3% και 45.0% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISBoff. Παράλληλα τα RMS των συνιστωσών E/N/U ελαττώνονται κατά 66.7/63.0/62.7%, 67.9/62.4/64.2%, 67.8/64.3/65.1% και 65.7/66.6/61.6% για τα στοχαστικά μοντέλα ISBtc, ISBpw, ISBrw και ISBwn αντίστοιχα.

UC12: Ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται για όλους τους συνδυασμούς διαμόρφωσης των ISB και εκτίμησης των IFB, πλην του συνδυασμού ISBoff_IFBes, σχετικά ως προς τον συνδυασμό ISBoff_IFBoff. Καλή συνάφεια ως προς τον χρόνο σύγκλισης και τα μέσα RMS των συνιστωσών E/N/U παρατηρείται για συνδυασμούς μεταξύ των στοχαστικών μοντέλων ISBpw, ISBrw, ISBwn και του μοντέλου εκτίμησης IFBqpf. Συγκεκριμένα, η μείωση στον χρόνο σύγκλισης σχετικά ως προς τον χρόνο σύγκλισης του μοντέλου απόρριψης ISBoff_IFBoff είναι της τάξης του 59.3%, 59.4% και 60% για τους συνδυασμούς ISBpw_IFBqpf, ISBrw_IFBqpf και ISBwn_IFBqpf αντίστοιχα. Παράλληλα, τα RMS των συνιστωσών E/N/U μειώνονται κατά 97/95/97% και για τους τρεις αυτούς συνδυασμούς. Ως προς την επίλυση G_UC12, αν δεν εφαρμοστεί κάποιος από τους συνδυασμούς εκτίμησης των ISBs και των IFBs του πίνακα 22 τότε, ενώ ο χρόνος σύγκλισης παραμένει ουσιαστικά ίδιος (μειώνεται μόνο κατά 0.6%) τα RMS των συνιστωσών E/N/U αυξάνονται κατά 735.1/372.8/716.4%.



Σχήμα 32. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GREC



Σχήμα 33. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GREC

Πίνακας 22. Ποσοστιαίες μεταβολές του χρόνου σύγκλισης (Cvg) και των RMS των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) των διαφόρων μοντέλων διαμόρφωσης των ISB και εκτίμησης των IFB της επίλυσης GREC, σχετικά ως προς την επίλυση G_UC12

UC12	Cvg %	E %	N %	U %
ISBtc_IFBoff	34.8	24.2	40.9	17.4
ISBtc_IFBlf	39.8	24.5	40.0	16.1
ISBtc_IFBqpf	44.6	24.0	39.5	15.9
ISBtc_IFBes	59.5	28.1	42.2	17.0
ISBpw_IFBoff	53.1	75.4	77.9	74.2
ISBpw_IFBlf	54.8	76.8	79.1	74.5
ISBpw_IFBqpf	59.6	76.5	78.3	74.0
ISBpw_IFBes	6.6	54.5	65.6	53.2
ISBrw_IFBoff	54.8	75.9	78.0	75.1
ISBrw_IFBlf	56.3	76.9	79.3	75.5
ISBrw_IFBqpf	59.6	77.2	78.5	75.2
ISBrw_IFBes	54.9	29.9	45.1	31.7
ISBwn_IFBoff	54.8	75.1	77.6	74.7
ISBwn_IFBlf	56.4	76.4	79.1	75.2
ISBwn_IFBqpf	60.2	76.6	78.5	75.0
ISBwn_IFBes	54.6	30.0	44.9	31.4

Συμπεράσματα και Προτάσεις

Αξιολογώντας τα μοντέλα που εφαρμόζει το GAMP, χρησιμοποιώντας τη νέα του διεπαφή GAMPg, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα. Για τον στατικό εντοπισμό παρατηρείται μείωση κυρίως στον χρόνο σύγκλισης της επίλυσης των διάφορων σεναρίων. Συγκεκριμένα, για το γραμμικό συνδυασμό ελευθέρως ιονόσφαιρας (IF12) ο χρόνος σύγκλισης μειώνεται όταν εφαρμόζονται τα μοντέλα διαμόρφωσης των ISB για τα σενάρια GE και GEC, σχετικά ως προς την επίλυση G. Η βελτίωση αυτή όμως είναι πολύ μικρή, της τάξης των δύο λεπτών. Για τις υπόλοιπες επιλύσεις GE, GRE, GRC και GREC, τα μοντέλα διαμόρφωσης ISB_{rw}, ISB_{rw} και ISB_{wn} εφαρμόζονται καλύτερα από ότι το μοντέλο απόρριψης ISB_{off}.

Για τις αδιαφοροποίητες και ασυσχέτιστες παρατηρήσεις κώδικα και φάσης σε μία συχνότητα (UC1) παρατηρείται μείωση ως προς τον χρόνο σύγκλισης της επίλυσης για τα σενάρια GR, GRE, GRC και GREC, σχετικά ως προς για την επίλυση G. Για τις αδιαφοροποίητες και ασυσχέτιστες παρατηρήσεις κώδικα και φάσης σε δύο συχνότητες (UC12), οι χρόνοι σύγκλισης μειώνονται για τις επιλύσεις GE και GEC χρησιμοποιώντας τα μοντέλα ISB_{rw}, ISB_{rw} και ISB_{wn}, σχετικά ως προς την επίλυση G. Στα σενάρια όπου συμπεριλαμβάνονται και παρατηρήσεις GLONASS, όσα επιπλέον δορυφορικά συστήματα χρησιμοποιούνται στην επίλυση, οι συνδυασμοί των διάφορων μοντέλων ISB και IFB που αποδίδουν καλύτερα ως προς τον χρόνο σύγκλισης της επίλυσης G, αυξάνονται.

Σχετικά ως προς την επίλυση GC κανένα από τα μοντέλα διαμόρφωσης των ISB δεν μειώνουν τον χρόνο σύγκλισης της επίλυσης για την συγκεκριμένη περίοδο παρατηρήσεων, πράγμα που ίσως οφείλεται στον μικρό αριθμό παρατηρούμενων δορυφόρων BeiDou, στα μικρά βάρη που δίνονται στις παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων και στην ακρίβεια των προϊόντων χρόνου για τους δορυφόρους BeiDou.

Συγκριτικά με τον στατικό εντοπισμό, στον κινηματικό εντοπισμό παρουσιάστηκαν μεταβολές τόσο ως προς τον χρόνο σύγκλισης, όσο και ως προς τα RMS των συνιστωσών E/N/U. Συγκεκριμένα, για τον γραμμικό συνδυασμό ελευθέρως ιονόσφαιρας (IF12) τα στοχαστικά μοντέλα ISB_{rw}, ISB_{rw} και ISB_{wn} μειώνουν τον χρόνο σύγκλισης και βελτιώνουν την ακρίβεια της επίλυσης σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISB_{off}. Όπως και στην περίπτωση του στατικού εντοπισμού, για την επίλυση GC κανένα μοντέλο διαμόρφωσης των ISB δεν μειώνει τον χρόνο σύγκλισης και τα RMS των συνιστωσών E/N/U σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης των ISB και την επίλυση G.

Στις αδιαφοροποίητες και ασυσχέτιστες παρατηρήσεις κώδικα και φάσης σε μία συχνότητα (UC1) ο χρόνος σύγκλισης και τα RMS των συνιστωσών E/N/U μειώνονται για όλα τα στοχαστικά μοντέλα διαμόρφωσης των ISB, σχετικά ως προς το μοντέλο απόρριψης ISB_{off} των διαφόρων επιλύσεων. Αντίθετα, για τις αδιαφοροποίητες και ασυσχέτιστες παρατηρήσεις κώδικα και φάσης σε δύο συχνότητες (UC12) οι χρόνοι σύγκλισης και τα RMS των συνιστωσών E/N/U των επιλύσεων GE και GEC αποδίδουν καλύτερα από την επίλυση G, για όλα τα στοχαστικά μοντέλα διαμόρφωσης των ISB. Το ίδιο ισχύει και για την επίλυση GC, αλλά μόνο για τα στοχαστικά μοντέλα ISB_{rw} και ISB_{rw}. Για τις επιλύσεις GRE, GRC και GREC όλοι οι συνδυασμοί των στοχαστικών μοντέλων διαμόρφωσης των ISB και των μοντέλων εκτίμησης των IFB βελτιώνουν τον χρόνο σύγκλισης και τα RMS των συνιστωσών E/N/U σχετικά ως προς την επίλυση G. Για την επίλυση GR ισχύουν τα προαναφερθέντα για

όλους τους συνδυασμούς μεταξύ των μοντέλων διαμόρφωσης των ISB και των μοντέλων εκτίμησης των IFB, εκτός του μοντέλου IFBqpf.

Συνεπώς, σύμφωνα με τα προαναφερθέντα το GAMP/GAMPG αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων GNSS εφαρμόζοντας την μέθοδο Precise Point Positioning. Παράλληλα, ο χρήστης απαλλάσσεται από την δημιουργία του αρχείου διαμόρφωσης manually, που χρειάζεται το GAMP για να τρέξει. Συγκεκριμένα, του παρέχεται η δυνατότητα περιήγησης στο windows explorer για την επιλογή του κατάλληλου ή των κατάλληλων αρχείων παρατήρησης προς επεξεργασία, η δυνατότητα διαμόρφωσης των παραμέτρων που καθορίζουν την επίλυση PPP, καθώς και η επιλογή των εξαγόμενων αρχείων της επεξεργασίας. Παράλληλα, το GAMPG λειτουργεί ως διαμεσολαβητής μεταξύ του GAMP και του command prompt για να είναι δυνατή η εκτέλεση του πρώτου. Επιπλέον, ο χρήστης άμεσα μετά την επεξεργασία μπορεί να επεξεργαστεί και να απεικονίσει τα αποτελέσματα του GAMP χρησιμοποιώντας την διεπαφή PLOT του GAMPG. Τέλος, στο GAMPG έχει ενταχθεί η δυνατότητα υπολογισμού του VTEC χρησιμοποιώντας τα εξαγόμενα αρχεία STEC του GAMP.

Μελλοντικά προτείνεται να ανανεωθούν και να ενσωματωθούν τα υπάρχον εργαλεία λήψης δεδομένων GNSS, γραμμένα σε C shell, στο GAMPG. Επίσης, μπορεί να πραγματοποιηθεί συγκριτική ανάλυση μεταξύ του GAMP/GAMPG και των υπολοίπων ανοιχτών λογισμικών επεξεργασίας δεδομένων GNSS για Precise Point Positioning, όπως το PPPH (Bahadur & Nohutcu, 2018), το MG_APP (Xiao, et al., 2020) και το goGPS (Realini & Reguzzoni, 2013). Ειδικότερα, πλέον το goGPS εκτός από ελαχιστοτετραγωνική επίλυση εφαρμόζοντας τον γραμμικό συνδυασμό ελευθέρας ιονόσφαιρας υποστηρίζει και ελαχιστοτετραγωνική επίλυση εφαρμόζοντας το μοντέλο των αδιαφοροποιήτων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων κώδικα και φάσης. Τέλος, στον κώδικα του GAMP μπορεί να ενσωματωθεί το μοντέλο των αδιαφοροποιήτων και ασυσχέτιστων παρατηρήσεων κώδικα και φάσης για τρεις συχνότητες.

Βιβλιογραφία

- Aggarwal, A., n.d. *Introduction to Visual Studio - GeeksforGeeks*. [Online]
Available at: <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-to-visual-studio/>
[Accessed 1 8 2020].
- Anon., 2011. *Galileo High Accuracy Service (HAS) - Navipedia*. [Online]
Available at:
[https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_High_Accuracy_Service_\(HAS\)](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_High_Accuracy_Service_(HAS))
[Accessed 1 8 2020].
- Anon., 2019. *IGS Terms of Reference (v. 07/2019)*. [Online]
Available at: <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/360036364391-IGS-Terms-of-Reference-v-07-2019->
[Accessed 29 8 2020].
- Anon., 2020. *What is .NET Framework? A software development framework..* [Online]
Available at: <https://dotnet.microsoft.com/learn/dotnet/what-is-dotnet-framework>
[Accessed 1 August 2020].
- Anon., 2020. *What is .NET Framework? Complete Architecture Tutorial*. [Online]
Available at: <https://www.guru99.com/net-framework.html>
[Accessed 1 August 2020].
- Anon., n.d. *Aapt.org*. [Online]
Available at: <https://aapt.org/doorway/TGRU/articles/Ashbyarticle.pdf>
[Accessed 29 8 2020].
- Bahadur, B. & Nohutcu, M., 2018. PPPH: a MATLAB-based software for multi-GNSS precise point positioning analysis. *GPS Solutions*, 22(4).
- Bronštejn, I. N., 2007. *Handbook of mathematics*. Berlin: Springer.
- Chand, M., 2020. *What Is C#*. [Online]
Available at: <https://www.c-sharpcorner.com/article/what-is-c-sharp/>
[Accessed 1 August 2020].
- Ge, Y. et al., 2017. The Impact of Satellite Time Group Delay and Inter-Frequency Differential Code Bias Corrections on Multi-GNSS Combined Positioning. *Sensors*, 17(3), p. 602.
- Håkansson, M., Jensen, A. B. O., Horemuz, M. & Hedling, G., 2016. Review of code and phase biases in multi-GNSS positioning. *GPS Solutions*, 21(3), pp. 849-860.
- Hong, J. et al., 2019. Characteristics of inter-system biases in Multi-GNSS with precise point positioning. *Advances in Space Research*, 63(12), pp. 3777-3794.
- Hoque, M. M. & Jakowski, N., 2014. An alternative ionospheric correction model for global navigation satellite systems. *Journal of Geodesy*, 89(4), pp. 391-406.

- Hoque, M. M., Jakowski, N. & Berdermann, J., 2017. Ionospheric correction using NTCM driven by GPS Klobuchar coefficients for GNSS applications. *GPS Solutions*, 21(4), pp. 1563-1572.
- Hoque, M. M., Jakowski, N. & Berdermann, J., 2018. Positioning performance of the NTCM model driven by GPS Klobuchar model parameters. *Journal of Space Weather and Space Climate*, Volume 8.
- Iwabuchi, T., 2003. An impact of estimating tropospheric delay gradients on tropospheric delay estimations in the summer using the Japanese nationwide GPS array. *Journal of Geophysical Research*, 108(D10).
- Jakowski, N., Hoque, M. M. & Mayer, C., 2011. A new global TEC model for estimating transionospheric radio wave propagation errors. *Journal of Geodesy*, 85(12), pp. 965-974.
- Kaseliemi, M. et al., 2020. A Causal Long Short-Term Memory Sequence to Sequence Model for TEC Prediction Using GNSS Observations. *Remote Sensing*, 12(9).
- Kouba, J. & Héroux, P., 2001. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*, 5(2), pp. 12-28.
- Liu, T. et al., 2018. Multi-GNSS triple-frequency differential code bias (DCB) determination with precise point positioning (PPP). *Journal of Geodesy*, 93(5), pp. 765-784.
- Liu, T. et al., 2018. Multi-GNSS triple-frequency differential code bias (DCB) determination with precise point positioning (PPP). *Journal of Geodesy*, 93(5), pp. 765-784.
- Li, Z. et al., 2012. Two-step method for the determination of the differential code biases of COMPASS satellites. *Journal of Geodesy*, 86(11), pp. 1059-1076.
- Montenbruck, O., Hauschild, A. & Steigenberger, P., 2014. Differential Code Bias Estimation using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps. *Navigation*, 61(3), pp. 191-201.
- Odiijk, D. et al., 2016. PPP-RTK by means of S-system theory: Australian network and user demonstration. *Journal of Spatial Science*, 62(1), pp. 3-27.
- Psychas, D. et al., 2018. Assessment of ionospheric corrections for PPP-RTK using regional ionosphere modelling. *Measurement Science and Technology*, 30(1), p. 014001.
- Realini, E. & Reguzzoni, M., 2013. goGPS: open source software for enhancing the accuracy of low-cost receivers by single-frequency relative kinematic positioning. *Measurement Science and Technology*, 24(11).
- Reussner, N. & Wanning, L., 2011. GLONASS inter-frequency biases and their effects on RTK and PPP carrier-phase ambiguity resolution. 1 1. Volume 1.
- Sanz Subirana, J., Juan Zornoza, J. M. & Hernández Pajares, M., 2013. *GNSS data processing*. Noordwijk: ESA Publications Division.
- Sastri, J. H., 1990. Equatorial anomaly in F-region—A Review. *Indian Journal of Radio & Space Physics*, Volume 19, pp. 225-240.

- Schaer, S. et al., 1995. Global and Regional Ionosphere Models Using the GPS Double Difference Phase Observable. *Proceedings of the 1995 IGS Workshop*, 15-17 May, pp. 77-92.
- Schaer, S. & Gurtner, W., 2015. IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1.1.
- Su, K., Jin, S. & Hoque, M., 2019. Evaluation of Ionospheric Delay Effects on Multi-GNSS Positioning Performance. *Remote Sensing*, 11(2).
- Takasu, T. & Yasuda, A., 2009. *Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB*. Seogwipo-si Jungmun-dong, s.n.
- Teunissen, P. & Montenbruck, O., 2017. *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. s.l.:s.n.
- Wang, N., Li, Z., Montenbruck, O. & Tang, C., 2019. Quality assessment of GPS, Galileo and BeiDou-2/3 satellite broadcast group delays. *Advances in Space Research*, 64(9), pp. 1764-1779.
- Wang, N. et al., 2015. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations. *Journal of Geodesy*, 90(3), pp. 209-228.
- Wanninger, L., 2011. Carrier-phase inter-frequency biases of GLONASS receivers. *Journal of Geodesy*, 86(2), pp. 139-148.
- Xiao, G. et al., 2020. MG-APP: an open-source software for multi-GNSS precise point positioning and application analysis. *GPS Solutions*, 24(3).
- Xu, G., 2007. *GPS*. 2nd ed. Berlin: Springer.
- Yuan, Y. & Ou, J., 2004. A generalized trigonometric series function model for determining ionospheric delay. *Progress in Natural Science*, 14(11), pp. 1010-1014.
- Zhao, W. et al., 2020. Evaluation of Inter-System Bias between BDS-2 and BDS-3 Satellites and Its Impact on Precise Point Positioning. *Remote Sensing*, 12(14), pp. 279-289.
- Zhou, F. et al., 2017. Simultaneous estimation of GLONASS pseudorange inter-frequency biases in precise point positioning using undifferenced and uncombined observations. *GPS Solutions*, 22(1).
- Zhou, F. et al., 2019. Influence of stochastic modeling for inter-system biases on multi-GNSS undifferenced and uncombined precise point positioning. *GPS Solutions*, 23(3).
- Zhou, F. et al., 2018. GAMP: An open-source software of multi-GNSS precise point positioning using undifferenced and uncombined observations. *GPS Solutions*, 22(2).

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1. Αρχιτεκτονική συστήματος GNSS	2
Εικόνα 2. Περιγραφή των διαφόρων δορυφορικών συστημάτων.....	3
Εικόνα 3. Δίκτυο σταθμών IGS	8
Εικόνα 4. Δίκτυο σταθμών MGEX	10
Εικόνα 5. Σχηματική αναπαράσταση COM και PCO του δορυφόρου	20
Εικόνα 6. Σχηματική αναπαράσταση των ARP, PCO και PCV της GNSS κεραίας).....	22
Εικόνα 7. Διάταξη προσανατολισμού διπόλων για τον υπολογισμό του σφάλματος phase wind-up	23
Εικόνα 8. Κίνηση πόλου το χρονικό διάστημα 2001-2006	25
Εικόνα 9. Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου Sagnac (Anon., n.d.)	28
Εικόνα 10. Πολυανάκλαση	29
Εικόνα 11. Οι περιοχές D, E, F της ιονόσφαιρας.....	30
Εικόνα 12. Μεταβολές της ισημερινής ανωμαλίας κατά πλάτος, για περίοδο μεγίστου και ελαχίστου ηλιακών κηλίδων	31
Εικόνα 13. Προβλέψεις κύκλου ηλιακών κηλίδων	32
Εικόνα 14. Στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας.....	32
Εικόνα 15. Νόμος του Snell και οι επιπτώσεις του κατά την διαδρομή της ακτίνας.....	33
Εικόνα 16. STEC.....	37
Εικόνα 17. STEC vs VTEC.....	38
Εικόνα 18. Επιπτώσεις εφαρμογής (κόκκινο) και μη (μπλε) μοντέλου Klobuchar για τον δυσδιάστατο εντοπισμό θέσης	40
Εικόνα 19. Επιπτώσεις εφαρμογής (κόκκινο) και μη (μπλε) μοντέλου Klobuchar για την κατακόρυφη διεύθυνση.....	41
Εικόνα 20. Παγκόσμιος χάρτης VTEC παραγόμενος από το μοντέλο NeQuick στις 13 h UT τον Απρίλιο για Az=193	42
Εικόνα 21. Σύγκριση μοντέλων για μέσο, STD, RMS και 95% των 3D σφαλμάτων θέσης για ήσυχη και διαταραγμένη κατάσταση ιονόσφαιρας.....	44
Εικόνα 22. Παγκόσμιος ιονοσφαιρικός χάρτης από το κέντρο ανάλυσης CODE για την ημέρα 181, 2012 και παγκόσμιο χρόνο 00:00 UTC	46
Εικόνα 23. Γραμμική παρεμβολή χρησιμοποιώντας τις τέσσερις πλησιέστερες τιμές E_{ij}	47
Εικόνα 24. Μέσος χρόνος σύγκλισης διαφόρων σεναρίων για PPP σε μία συχνότητα για δεδομένα τριάντα ημερών από δέκα σταθμούς	51
Εικόνα 25. Μέσος χρόνος σύγκλισης διαφόρων σεναρίων για PPP σε δύο συχνότητες για δεδομένα τριάντα ημερών από δέκα σταθμούς	52
Εικόνα 26. Καθυστερήσεις λόγω hardware του δορυφόρου και του δέκτη	56
Εικόνα 27. Σύγκριση του εκτιμώμενου VTEC από την μέθοδο IGGDCB με αυτών του κέντρου ανάλυσης CODE και των μετρήσεων.....	66
Εικόνα 28. Μηνιαίες διαφορές των εκτιμώμενων VTEC από την μέθοδο IGGDCB και των υπολογισμένων VTEC της μεθόδου CCL για σταθμούς κατανεμημένους από νότο προς βορρά στον άξονα x	67

Εικόνα 29. RMS όλων των σταθμών για τις διαφορές μεταξύ των εκτιμώμενων VTEC της μεθόδου IGGDCB και των VTEC από τα GIM του κέντρου ανάλυσης CODE	70
Εικόνα 30. Σχέσεις μεταξύ πλαισίων χρόνου, χρόνου δέκτη, αποχής χρονομέτρου του δέκτη και αποχή μεταξύ των κλιμάκων χρόνου των συστημάτων A και B.....	72
Εικόνα 31. Ημερήσια τυπική απόκλιση των GR/GC/GE ISB, εκτιμώμενα χρησιμοποιώντας ακριβή προϊόντα από τα κέντρα ανάλυσης GFZ, CODE, IGMAS και WHU	77
Εικόνα 32. Εβδομαδιαία τυπική απόκλιση των GR/GC/GEISB εκτιμώμενα χρησιμοποιώντας ακριβή προϊόντα από τα κέντρα ανάλυσης GFZ, CODE, IGMAS και WHU	77
Εικόνα 33. Χρόνος σύγκλισης της μεθόδου PPP για τους συνδυασμούς GPS/GLONASS (αριστερή εικόνα) και GPS/Galileo (δεξιά εικόνα), μεταξύ διαφορετικών σεναρίων διαχείρισης των ISBs, χρησιμοποιώντας τελικά προϊόντα των κέντρων ανάλυσης CODE, GFZ, CNES και WHU	78
Εικόνα 34. Χρόνος σύγκλισης της μεθόδου PPP για τους συνδυασμούς GPS/BeiDou (αριστερή εικόνα) και GPS/QZSS (δεξιά εικόνα), μεταξύ διαφορετικών σεναρίων διαχείρισης των ISBs, χρησιμοποιώντας τελικά προϊόντα από τα κέντρα ανάλυσης CODE, GFZ, CNES και WHU	79
Εικόνα 35. Δεκαδικά μέρη των εκτιμώμενων ασαφειών φάσης της ευρείας οδού (Wide Lane) χρησιμοποιώντας τον γραμμικό συνδυασμό Melbourne-Wübbena στην μέθοδο PPP	80
Εικόνα 36. Δεκαδικά μέρη των εκτιμώμενων ασαφειών φάσης της ευρείας οδού στην μέθοδο PPP. Στην τρίτη απεικόνιση δεξιά παρουσιάζονται αποτελέσματα του GLONASS εφαρμόζοντας a-priory διορθώσεις IFBs, του Πίνακα 14, στα παρατηρούμενα δεδομένα.....	81
Εικόνα 37. Χρόνος σύγκλισης στατικού PPP, χρησιμοποιώντας GPS-μόνο και GLONASS-μόνο για τα διάφορα μοντέλα εκτίμησης των IFBs	85
Εικόνα 38. Χρόνος σύγκλισης κινηματικού PPP, χρησιμοποιώντας GPS-μόνο και GLONASS-μόνο για τα διάφορα μοντέλα εκτίμησης των IFBs	85
Εικόνα 39. Χρόνος σύγκλισης στατικού PPP, χρησιμοποιώντας GPS-μόνο και GPS+GLONASS για τα διάφορα μοντέλα εκτίμησης των IFBs.....	86
Εικόνα 40. Χρόνος σύγκλισης κινηματικού PPP, χρησιμοποιώντας GPS-μόνο και GPS+GLONASS για τα διάφορα μοντέλα εκτίμησης των IFBs.....	86
Εικόνα 41. Αρχείο διαμόρφωσης (configuration file) GAMP	88
Εικόνα 42. Εκτέλεση GAMP μέσω του command prompt.....	89
Εικόνα 43. GUI MatPlot	89
Εικόνα 44. IDE Microsoft Visual Studio 2017	91
Εικόνα 45. Διάφορα μενού του Visual Studio 2017	91
Εικόνα 46. Διάγραμμα αρχιτεκτονικής .Net Framework.....	92
Εικόνα 47. Common Language Runtime	92
Εικόνα 48. Μορφή αρχείου STEC	94
Εικόνα 49. Header αρχείου RCVEX.....	95
Εικόνα 50. Τμήμα δεδομένων (PPP_BLOCK) αρχείου RCVEX (i)	95
Εικόνα 51. Πεδίο δεδομένων (PPP_BLOCK) αρχείου RCVEX (ii)	96
Εικόνα 52. Κύριο Interphase του GAMPG.....	97
Εικόνα 53. Κύριο Interphase του GAMPG (ii).....	98
Εικόνα 54. Κύριο Interphase του GAMPG (iii).....	100
Εικόνα 55. Φόρμα υπολογισμού vTEC.....	102
Εικόνα 56. PLOT	103
Εικόνα 57. Εκτέλεση GAMP/GAMPG (i).....	104

Εικόνα 58. Εκτέλεση GAMP/GAMPG (ii).....	104
Εικόνα 59. Εκτέλεση GAMP/GAMPG (iii).....	105
Εικόνα 60. Υπολογισμός VTEC	105
Εικόνα 61. Επεξεργασία και γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων	106
Εικόνα 62. Χρόνοι σύγκλισης και RMS των συνιστωσών East (E), North (N) και Up(U) για την ημέρα του χρόνου 244/2017.....	107
Εικόνα 63. Χρόνοι σύγκλισης και RMS των συνιστωσών East (E), North (N) και Up(U) για την ημέρα του χρόνου 244/2017.....	107
Εικόνα 64. ISB των συστημάτων GLONASS, Galileo και BeiDou ως προς το GPS για την ημέρα του χρόνου 244/2017	108
Εικόνα 65. Εκτιμώμενα ZTDs για τον σταθμό grac την ημέρα του χρόνου 244/2017	108
Εικόνα 66. Αριθμός χρησιμοποιούμενων δορυφόρων από κάθε δορυφορικό σύστημα και τιμές PDOP	109
Εικόνα 67. Εκτιμώμενα STEC και VTEC χρησιμοποιώντας τους δορυφόρους GPS για την ημέρα του χρόνου 244/2017	109
Εικόνα 68. Εκτιμώμενα STEC και VTEC χρησιμοποιώντας τους δορυφόρους Galileo για την ημέρα του χρόνου 244/2017	110
Εικόνα 69. Εκτιμώμενα STEC χρησιμοποιώντας τους δορυφόρους GLONASS για την ημέρα του χρόνου 244/2017	110
Εικόνα 70. Εκτιμώμενα VTEC χρησιμοποιώντας τους δορυφόρους BeiDou για την ημέρα του χρόνου 244/2017.....	110
Εικόνα 71. Υπόλοιπα παρατηρήσεων φάσης για την πρώτη (αριστερά) και δεύτερη συχνότητα (δεξιά) των δορυφόρων GPS για την ημέρα 244/2017.....	111
Εικόνα 72. Υπόλοιπα παρατηρήσεων φάσης για την πρώτη (αριστερά) και δεύτερη συχνότητα (δεξιά) των δορυφόρων Galileo για την ημέρα 244/2017	111
Εικόνα 73. Υπόλοιπα παρατηρήσεων φάσης για την πρώτη (αριστερά) και δεύτερη συχνότητα (δεξιά) των δορυφόρων GLONASS για την ημέρα 244/2017.....	111
Εικόνα 74. Υπόλοιπα παρατηρήσεων φάσης για την πρώτη (αριστερά) και δεύτερη συχνότητα (δεξιά) των δορυφόρων BeiDou για την ημέρα 244/2017.....	112
Εικόνα 75. Γεωγραφική θέση σταθμού GRAC.....	114

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1. Επισκόπηση σημάτων GPS (Teunissen & Montenbruck, 2017).....	4
Πίνακας 2. Επισκόπηση σημάτων GLONASS. Οι δύο πρώτοι χαρακτήρες ορίζουν την ζώνη συχνοτήτων, ενώ οι δύο επόμενοι χαρακτήρες τον τύπο της υπηρεσίας (O: ανοιχτή, S: εξουσιοδοτημένη) και της διαμόρφωσης (F:FDMA, C:CDMA) (Teunissen & Montenbruck, 2017)	5
Πίνακας 3. Επισκόπηση σημάτων Galileo (Teunissen & Montenbruck, 2017)	6
Πίνακας 4. Επισκόπηση σημάτων BeiDou (Teunissen & Montenbruck, 2017)	6
Πίνακας 5. Επισκόπηση σημάτων QZSS (Teunissen & Montenbruck, 2017)	7
Πίνακας 6. Επισκόπηση σημάτων IRNSS/NavIC (Teunissen & Montenbruck, 2017).....	7
Πίνακας 7. Κέντρα ανάλυσης MGEX (Teunissen & Montenbruck, 2017).....	10
Πίνακας 8. Αντιπροσωπευτικές τιμές των αποχών του κέντρου φάσης της κεραίας από το κέντρο μάζας του δορυφόρου για διάφορους τύπους δορυφόρων του συστήματος GNSS (Teunissen & Montenbruck, 2017)	21
Πίνακας 9. Εκτιμώμενες παράμετροι του δικτύου PPP-RTK για δύο συχνότητες χρησιμοποιώντας το CC-R S-basis, με το σύμβολο p να εκφράζει τον δέκτη/δορυφόρο αναφοράς (Psychas, et al., 2018)	54
Πίνακας 10. Σχηματισμοί και σήματα τους που αναλύονται από το κέντρο ανάλυσης DLR	63
Πίνακας 11. RMS (ns) των διαφορών των εκτιμώμενων DCB με τα προϊόντα CODE/DLR για την περίοδο 2013-2014 (Wang, et al., 2015)	68
Πίνακας 12. Σχηματισμοί και σήματα τους που αναλύονται από το κέντρο ανάλυσης CAS	68
Πίνακας 13. Συνοχή των εκτιμώμενων DCB σε σύγκριση με τα προϊόντα CODE/DLR/CAS για τον μήνα Φεβρουάριο 2017 για 60 σταθμούς του δικτύου MGEX (RMS ns) (Liu, et al., 2018)	71
Πίνακας 14. IFB φάσης για τις συχνότητες L1 και L2 του συστήματος GLONASS για εννιά διαφορετικούς κατασκευαστές δεκτών (Reussner & Wanninger, 2011).....	81
Πίνακας 15. Χαρακτηρίστηκα επεξεργασίας Precise Point Positioning για στατικό (static) και κινηματικό (kinematic) εντοπισμό.....	113
Πίνακας 16. Στοιχεία και χαρακτηρίστηκα σταθμού GRAC	113
Πίνακας 17. Ποσοστιαίες μεταβολές του χρόνου σύγκλισης (Cvg) και των RMS των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U), των διαφορών μοντέλων διαμόρφωσης των ISB και IFB της επίλυσης GREC_UC12 σχετικά ως προς την επίλυση G_UC12	127
Πίνακας 18. Ποσοστιαίες μεταβολές του χρόνου σύγκλισης (Cvg) και των RMS των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U), των διαφορών μοντέλων διαμόρφωσης των ISB και εκτίμησης των IFB της επίλυσης GR_UC12 σχετικά ως προς την επίλυση G_UC12....	131
Πίνακας 19. Ποσοστιαίες μεταβολές του χρόνου σύγκλισης και των RMS των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U), των διαφορών μοντέλων διαμόρφωσης των ISB, σχετικά ως προς την επίλυση G_UC12	137
Πίνακας 20. Ποσοστιαίες μεταβολές του χρόνου σύγκλισης (Cvg) και των RMS των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) των διαφορών μοντέλων διαμόρφωσης των ISB και εκτίμησης των IFB της επίλυσης GRC, σχετικά ως προς την επίλυση G_UC12	141
Πίνακας 21. Ποσοστιαίες μεταβολές του χρόνου σύγκλισης (Cvg) και των RMS των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) των διαφορών μοντέλων διαμόρφωσης των ISB και εκτίμησης των IFB της επίλυσης GRE, σχετικά ως προς την επίλυση G_UC12.....	144

Πίνακας 22. Ποσοστιαίες μεταβολές του χρόνου σύγκλισης (Cvg) και των RMS των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) των διαφόρων μοντέλων διαμόρφωσης των ISB και εκτίμησης των IFB της επίλυσης GREC, σχετικά ως προς την επίλυση G_UC12 147

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1. Σχηματική αναπαράσταση δικτύου PPP-RTK	53
Σχήμα 2. Μέσος χρόνος σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης G.....	114
Σχήμα 3. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) της επίλυσης G	115
Σχήμα 4. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GR	116
Σχήμα 5. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GR	117
Σχήμα 6. Μέσος χρόνος σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GE	118
Σχήμα 7. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) της επίλυσης GE	119
Σχήμα 8. Μέσος χρόνος σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GC	119
Σχήμα 9. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) της επίλυσης GC	120
Σχήμα 10. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GRE.....	121
Σχήμα 11. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GRE.....	122
Σχήμα 12. Μέσος χρόνος σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GEC.....	123
Σχήμα 13. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) της επίλυσης GEC.....	124
Σχήμα 14. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GRC	125
Σχήμα 15. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GRC.....	126
Σχήμα 16. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GREC ...	128
Σχήμα 17. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GREC	129
Σχήμα 18. Μέσος χρόνος σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης G.....	130
Σχήμα 19. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) της επίλυσης G	130
Σχήμα 20. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GR	132
Σχήμα 21. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GR	133
Σχήμα 22. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GE	135
Σχήμα 23. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GE	135
Σχήμα 24. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GC	136
Σχήμα 25. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GC	136
Σχήμα 26. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GEC.....	138
Σχήμα 27. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GEC.....	138
Σχήμα 28. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GRC	139
Σχήμα 29. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GRC.....	140
Σχήμα 30. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GRE.....	142

Σχήμα 31. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GRE.....	143
Σχήμα 32. Μέσοι χρόνοι σύγκλισης (min) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GREC ...	145
Σχήμα 33. Μέσα RMS (cm) των συνιστωσών East (E), North (N) και Up (U) για τα διάφορα σενάρια της επίλυσης GREC	146