ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ GNSS ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ RECORD AND REPLAY

ΝΤΑΓΙΑΝΤΑΣ ΦΩΤΙΟΣ

Επιβλέπων: Γκίκας Βασίλειος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF RURAL, SURVEYING AND GEOINFORMATICS ENGINEERING

DEPARTMENT OF TOPOGRAPHY

DIPLOMA THESIS

EXPERIMENTAL EVALUATION OF VEHICLE'S TRAJECTORY USING GNSS SIGNAL SIMULATOR AND RECORD AND REPLAY SYSTEM

NTAGIANTAS FOTIOS

Supervisor: Gikas Vassilios, Professor N.T.U.A.

Athens, February 2023

Νταγιάντας Φώτιος (2023).
Πειραματική Αξιολόγηση Τροχιάς Οχήματος Μέσω Προσομοιωτή Δορυφορικού Σήματος GNSS και Συστήματος Record and Replay
Διπλωματική Εργασία
Τομέας Τοπογραφίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Ntagiantas Fotios (2023).
Experimental Evaluation of Vehicle's Trajectory using GNSS Signal Simulator and Record and Replay System
Diploma Thesis
Department of Topography, National Technical University of Athens, Athens.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Φτάνοντας στο τέλος των προπτυχιακών σπουδών μου, έχω την ανάγκη να ευχαριστήσω κάποιος ανθρώπους οι οποίοι διαδραμάτισαν καταλυτικό ρόλο στην εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, καθώς και στην συνολική πορεία στον κύκλο των σπουδών.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλη Γκίκα, Καθηγητή του Τομέα Τοπογραφίας για την αρχική ανάθεση του θέματος της εργασίας, καθώς και για τη στήριξη και καθοδήγησή του καθόλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας, παίζοντας καθοριστικό ρόλο στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Μεταδιδακτορικό Ερευνητή κ. Μπίμη Θανάση για την άρτια συνεργασία και βοήθεια τόσο στο θεωρητικό και πειραματικό τμήμα της εργασίας, όσο και στο τμήμα της ανάλυσης και επεξεργασίας των δεδομένων.

Θα ήθελα επίσης να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στα αδέλφια μου Ελένη και Θοδωρή για την ανιδιοτελή ψυχολογική υποστήριξή τους τόσο στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, όσο και στη μακροχρόνια προσπάθεια ολοκλήρωσης των σπουδών μου και εύχομαι να συνεχίσουν να προοδεύουν και να πετύχουν τους στόχους τους. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Σωτήρη και Βασιλική για τη στήριξη και καθοδήγησή τους σε κάθε μου βήμα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές μου για τη στήριξη τους, καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ..... ***I***

ABSTRACT ..... ***III***

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ..... ***V***

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ ..... ***XIII***

ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ ..... ***XV***

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ***1***

1.1 Γενικά **1**

1.2 Στόχοι Εργασίας **1**

1.3 Δομή Εργασίας **2**

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ***5***

2.1 Εισαγωγή **5**

2.2 Είδη Σημάτων **5**

2.2.1 Ντετερμινιστικά Σήματα 5

2.2.1.α Συνεχή Ντετερμινιστικά Σήματα 5

2.2.2.β Διακριτά Ντετερμινιστικά Σήματα 6

2.2.3.γ Τετραγωνικοί Παλμοί 7

2.2.2 Τυχαία Σήματα 8

2.2.2.α Τυχαία Στάσιμη Διαδικασία 8

2.2.2.β Τυχαία Αλληλουχία Παλμών 9

2.3 Σειρές και Μετασχηματισμοί Fourier **10**

2.4 Δειγματοληψία **12**

3. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ ***13***

3.1 Γενικά Στοιχεία **13**

3.2 Σήμα GPS **14**

3.2.1 Περιγραφή του Σήματος GPS 14

3.2.1.α Συχνότητες Μετάδοσης 14
3.2.1.β Δεδομένα του Σήματος GPS 14
3.2.1.γ Διαμόρφωση του Φορέα 15
3.2.1.δ Παραγωγή του Σήματος GPS 16
3.2.2 Κώδικες Ψευδοτυχαίου Θορύβου 17
3.2.2.α Παραγωγή Αλληλουχιών Gold 17
3.2.2.β Ιδιότητες Συσχέτισης των Κωδικών Gold 19
3.2.3 Μετατοπίσεις Doppler 20
3.2.4 Μήνυμα Πλοήγησης GPS 22
3.2.4.α Δομή των Υποπλασιών του Μηνύματος Πλοήγησης 23
3.2.4.β Υποπλαίσια Μηνύματος Πλοήγησης 23
3.2.5 Σύγχρονα Σήματα του GPS 25
3.2.5.α L2C 25
3.2.5.β L1C 26
3.2.5.γ L5 26

3.3 Σήμα GALILEO 28

3.3.1 Περιγραφή του σήματος του GALILEO 28
3.3.1.α Συχνότητες Μετάδοσης 28
3.3.1.β Δομή του Σήματος του Galileo 29
3.3.2 Παραγωγή του Σήματος του Galileo 30
3.3.2.α Coherent Adaptive Carrier Modulation 30
3.3.2.β Binary Offset Carrier Modulation 33
3.3.3 Μήνυμα Πλοήγησης Galileo 34

4. ΚΕΡΑΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΩΠΙΑΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΩΝ ΔΕΚΤΩΝ GNSS 37

4.1 Κεραίες GNSS 37

4.1.1 Ισχύς των Σημάτων GNSS 37
4.1.2 Πόλωση των Κεραιών GNSS 38
4.1.3 Διάγραμμα Κεραίας GNSS 38

4.2 Μετωπιαίο RF τμήμα 40

4.2.2 Φίλτρα 40
4.2.3 Ενισχυτές 41

4.2.4 Μείκτες/ Τοπικοί Ταλαντωτές....42
4.2.5 Βαθμός Θορύβου....44
4.2.5.1 Φόρμουλα Friis....44
4.2.5.β Carrier to Noise-Density Ratio (C/N_0)....45
4.2.6 Μετατροπή του Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό....46
4.2.6.α Αριθμός των Bit....46
4.2.6.β Μέγιστη Συχνότητα Δειγματοληψίας - Εύρος Αναλογικού Σήματος....46
4.2.6.γ Εύρος Τάσεων του Αναλογικού Σήματος....47

4.3 Παραγόμενα Σήματα....47

4.4 Μαθηματική Περιγραφή των Δεκτών GNSS....48

5. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ – ΕΠΙΛΥΣΗ ΘΕΣΗΣ....51

5.1 Ανάκτηση Σήματος....51

5.1.2 Βασική Αρχή της Ανάκτησης Σήματος....51
5.1.3 Επιρροή του Θορύβου....54
5.1.3.α Signal to Noise Ratio (SNR)....54
5.1.3.β Ideal Coherent Gain....55
5.1.3.γ Απώλειες Εφαρμογής (Implementation Losses)....55
5.1.4 Coherent Integration....56
5.1.4.α Μειονεκτήματα της Coherent Integration....57
5.1.4.β I&Q και Non-Coherent Integration....58

5.2 Παρακολούθηση Δορυφορικών Σημάτων....60

5.2.1 Παρακολούθηση του Φορέα....60
5.2.2 Παρακολούθηση του Κώδικα....62

5.3 Προσδιορισμός Θέσης....64

5.3.1 Υπολογισμός της Θέσης του Δορυφόρου....64
5.3.2 Υπολογισμός της Ψευδοαπόστασης....67
5.3.3 Υπολογισμός της Θέσης του Δέκτη....67
5.3.4 Dilution Of Precision....71

6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΕΣ GNSS ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ RECORD AND REPLAY..... 73

6.1 Εισαγωγή..... 73

6.2 Προσομοιωτές GNSS 74

6.2.1 Προσομοιωτές GNSS δεκτών - GNSS-SDR.....74

6.2.2 Προσομοιωτές Δορυφορικού Σήματος - Λογισμικό SatGen.....77

6.2.2.α Λεπτομέρειες Σεναρίου (Scenario Details).....78

6.2.2.β Ρυθμίσεις Σεναρίου (Scenario Settings) 81

6.2.2.γ Στατικό Σενάριο (Static scenario) 84

6.2.2.δ Χάραξη Πορείας (Draw Route).....84

6.2.2.ε Εισαγωγή Αρχείου (Import File) 85

6.2.2.ζ Καθορισμός από το χρήστη μέσω εντολών (User Defined) 87

6.3 Συστήματα Record and Replay – LabSat 3 Wideband 88

6.3.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του LabSat 3 Wideband 89

6.3.2 Αρχή Λειτουργίας του LabSat 3 Wideband.....92

6.3.2.α Συλλογή Δεδομένων 92

6.3.2.β Αναπαραγωγή Δεδομένων.....95

6.3.3 Διεπαφή με το Χρήστη 96

6.3.3.α Μετωπιαίο Τμήμα του LabSat 3 Wideband.....96

6.3.3.β Σύνδεση μέσω IP 97

6.3.3. γ Σύνδεση μέσω NAS.....99

6.3.3.δ Σύνδεση με Εξωτερικό Χρόνο Αναφοράς 100

6.3.3.ε Σύνδεση Πολλαπλών LabSat 100

6.3.4 Ψηφιακά κανάλια 101

6.3.4.α Pulse Per Second (PPS).....101

6.3.4.β Controller Area Network (CAN or CAN BUS).....102

6.3.4.γ Recommended Standard 232 (RS232) 105

6.3.4.δ DIGITAL IN/ OUT (DIGI/ DIGO) 107

6.3.5 Συλλογή και Επανάληψη Δεδομένων 107

6.3.5.α Συλλογή Δεδομένων μέσω Κεραίας GNSS.....107

6.3.5.β Συλλογή Δεδομένων μέσω του Λογισμικού SatGen.....108

6.3.5.γ Επανάληψη Δεδομένων 108

7. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ 111

7.1 Σχεδιασμός Πειραματικής Διαδικασίας και Προκαταρκτικές Εργασίες 111

7.2 Πειραματικός Εξοπλισμός και Συλλογή Δεδομένων..... 115

7.2.1 Επισκόπηση Πειραματικού Εξοπλισμού 115

7.2.2 Δέκτης M8T 117

7.2.3 Δέκτης Mosaic-X5.....118

7.2.4 Ολοκληρωμένο Σύστημα Εντοπισμού SPAN.....120

7.2.4.α Περιγραφή του συστήματος SPAN 120

7.2.4.β Σταθμός Βάσης – Δέκτης Trimble R9S 120

7.2.4.γ Σταθμός Rover – Δέκτης PwrPak7.....121

7.2.4.δ Αδρανειακή Μονάδα Εντοπισμού 122

7.3 Επεξεργασία Δεδομένων και Παραγωγή Τροχιών Οχήματος..... 123

7.3.1 Παραγωγή Τροχιάς Αναφοράς.....123

7.3.2 Παραγωγή και Αξιολόγηση Τροχιάς Πεδίου – Τροχιά M8T 125

8. ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΣΉΜΑΤΟΣ – ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΩΝ ΤΡΟΧΙΏΝ 129

8.1 Ανάκτηση Δορυφορικού Σήματος 129

8.1.1 Δεδομένα Εισόδου 129

8.1.2 Παράμετροι Ανάκτησης Δορυφορικού Σήματος 129

8.2 Αναπαραγωγή Προσομοιωμένων Τροχιών 131

8.3 Αξιολόγηση Προσομοιωμένων Τροχιών..... 132

8.3.1 Δέκτης M8T 132

8.3.2 Δέκτης Mosaic 142

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ..... 153

9.1 Συμπεράσματα 153

9.1.1 Αξιολόγηση ως προς το Περιβάλλον Παρατήρησης.....153

9.1.2 Αξιολόγηση ως προς τον τύπο των Δεκτών 154

9.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα..... 156

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 159

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αφορά στην πειραματική διερεύνηση των δυνατοτήτων που προφέρουν οι προσομοιωτές δορυφορικού σήματος GNSS (GNSS simulators), για την παραγωγή και αξιολόγηση τροχιάς οχήματος σε αστικό περιβάλλον. Ειδικότερα, η εργασία εστιάζει στο ρόλο των παραμέτρων που καθορίζουν την παραγωγή του προσομοιωμένου δορυφορικού σήματος και την επίδρασή τους στη λύση εντοπισμού οχήματος, ανάλογα με την τάξη του δορυφορικού δέκτη – χαμηλού κόστους και γεωδαιτικού τύπου. Επιπρόσθετα, ελέγχεται αν η χρήση (εύρος συχνοτήτων) των συστημάτων Record and Replay, επηρεάζει την αναπαραγωγή των προσομοιωμένων σημάτων.

Για την αξιολόγηση του προσομοιωμένου δορυφορικού σήματος, καθώς και του συστήματος Record and Replay, πραγματοποιήθηκαν δύο πειραματικές διαδικασίες. Η πρώτη αφορά το σχεδιασμό και τη συλλογή πρωτογενών δορυφορικών και αδρανειακών δεδομένων για την παραγωγή των τροχιών αναφοράς και ελέγχου. Η τροχιά αναφοράς αντιπροσωπεύει την “αληθή” (ή ονομαστική) τροχιά του οχήματος και χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή και αξιολόγηση των προσομοιωμένων τροχιών. Η τροχιά ελέγχου αποτελεί την τροχιά που τίθεται προς έλεγχο. Στη συγκεκριμένη κατηγορία ανήκει η τροχιά πεδίου, η οποία χρησιμοποιήθηκε για ποιοτικό έλεγχο των προσομοιωμένων τροχιών, καθώς και οι προσομοιωμένες τροχιές. Η δεύτερη πειραματική διαδικασία, αφορά την παραγωγή των προσομοιωμένων τροχιών και την αναπαραγωγή τους, στο σύστημα Record and Replay. Για την παραγωγή των προσομοιωμένων σημάτων, χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο εισόδου η τροχιά αναφοράς. Κατά την αναπαραγωγή τους, χρησιμοποιήθηκαν δύο δέκτες GNSS, διαφορετικών τεχνικών χαρακτηριστικών και απόδοσης, ώστε να ελεγχθεί η επίδραση της τάξης του δέκτη στις διάφορες παραμετροποιήσεις των προσομοιωμένων δορυφορικών σημάτων.

Η επεξεργασία των προσομοιωμένων τροχιών, αφορά την εξαγωγή των ποιοτικών χαρακτηριστικών του εντοπισμού (πλήθος δορυφόρων που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της θέσης του δέκτη και ο δείκτης HDOP), καθώς και της ακρίβειας του δέκτη για τις προσομοιωμένες τροχιές. Για τη σύγκριση των προσομοιωμένων τροχιών, χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης η ορθότητα της τροχιάς, η οποία αφορά την αποχή των προσομοιωμένων τροχιών, από την τροχιά αναφοράς. Ο υπολογισμός αυτού του δείκτη, προϋποθέτει το συγχρονισμό των προσομοιωμένων τροχιών με την τροχιά αναφοράς, προκειμένου να προσδιοριστούν οι σωστές αποχές των προσομοιωμένων σημάτων. Συνοπτικά, τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν ότι οι προσομοιωτές GNSS, αναπαριστούν σχεδόν αυτούσια την τροχιά από τα δεδομένα εισόδου, ενώ οι διαφοροποιήσεις που εντοπίζονται στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του εντοπισμού, οφείλονται στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του δέκτη όπου γίνεται η αναπαραγωγή του προσομοιωμένου σήματος. Η μέση ακρίβεια του δέκτη χαμηλού κόστους ήταν της τάξης των 0.23 m και 0.39 m σε οριζοντιογραφία και υψομετρία αντίστοιχα, ενώ για το δορυφορικό δέκτη γεωδαιτικού τύπου προκύπτουν τιμές 2 m και 4 m (πιθανή επιρροή spoofing) αντίστοιχα. Η ορθότητα εντοπισμού για το δορυφορικό δέκτη χαμηλού και υψηλού κόστους, παρουσιάζει μέγιστη αποχή 0.30 m ±0.30 m και 0.05 m ±0.06 m αντίστοιχα. Τέλος, δεν παρατηρήθηκε επίδραση το εύρος συχνοτήτων του Record and Replay συστήματος, την ποιότητα των προσομοιωμένων τροχιών.

ABSTRACT

The object of this Diploma Thesis concerns the experimental investigation of the possibilities offered by GNSS satellite signal simulators (GNSS simulators), for the production and evaluation of vehicle trajectories in an urban environment. In particular, the study focuses on the parameters that determine the generation of the simulated signals and their effect in the positioning of the vehicle, depending on the GNSS receiver. In addition, it is investigated whether the use (frequency bandwidth) of the Record and Replay systems affects the replay of the simulated signals.

Two experimental procedures were performed to evaluate the simulated satellite signals and the Record and Replay system. The first involved the collection of primary satellite and inertial data for the production of the reference and control trajectories. The reference trajectory represents the true trajectory of the vehicle and was used to generate and evaluate the simulated trajectories. The control trajectory is the trajectory to be checked and includes the field test trajectory, which used for the quality evaluation of the simulated trajectories and the simulated trajectories. The second experimental procedure concerned the production of the simulated trajectories and their replay, in the Record and Replay system. To generate the simulated signals, the reference trajectory was used as input data. During the replay of the simulated signals, two GNSS receivers, of different technical characteristics and performance, were used, in order to check the effect of the receiver in the different set parameters of the simulated satellite signals.

Data processing of the simulated trajectories concerned the extraction of the quality characteristics of the positioning (number of satellites used to calculate the receiver position and the HDOP index), as well as the precision of the receiver for the simulated trajectories. For the comparison of the simulated trajectories, the trueness of the trajectory, which describes the closeness of agreement between the simulated trajectories to the reference trajectory, was used as an indicator. For the trueness calculation, the simulated trajectories must be synchronized with the reference trajectory in order to determine the correct deviations of the simulated signals. In summary, the obtained results show that the GNSS signal simulators represent almost exactly the trajectory from the input data, while the differences found in the quality characteristics of the positioning, were due to the quality characteristics of the receiver, which the simulated signals are replayed. The average precision of the low-cost receiver was in the order of 0.23 m horizontally and 0.39 m vertically, while in the high-end receiver, the horizontal precision was in the order of 2 m and the vertical precision was in the order of 4 m (possible influence of spoofing). The trueness of the low-cost receiver showed larger deviation, of the order of 0.30 m ±0.30 m, while the high-end receiver showed much smaller deviation, of the order of 0.05 m ±0.06 m. Finally, the bandwidth of the Record and Replay system did not affect the quality of the simulated trajectories.

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Αναπαράσταση της συχνότητας L2 του συστήματος GPS στο πεδίο των συχνοτήτων (Πηγή *GPS and Galileo: Dual RF Front-End Receiver and Design, Fabrication, and Test, 2009*) - Figure 2.1 Representation of GPS's L2 signal in frequency domain (Source *GPS and Galileo: Dual RF Front-End Receiver and Design, Fabrication, and Test, 2009*)..10

Σχήμα 3.1 Διαγραμματική αναπαράσταση του εύρους των L1και L2 στο πεδίο των συχνοτήτων (Πηγή *EESA/Navipedia/GPS_Signal*) - Figure 3.1 Spectra of L1 and L2 in frequency domain (Source *EESA/Navipedia/GPS_Signal*) 14

Σχήμα 3.2 Διαμόρφωση φορέα της L1 με τη μέθοδο BPSK (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 3.2 BPSK Modulation of the L1 carrier wave (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) 15

Σχήμα 3.3 Παραγωγή του σήματος του GPS (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 3.3 Generation of GPS signal (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) 16

Σχήμα 3.4 Παραγωγή του κώδικα C/A (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 3.4 C/A code generator (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) 18

Σχήμα 3.5 Επίπεδα αυτοσυσχέτισης του κώδικα C/A (Πηγή *Global Position System: Theory and Applications Volume 2*) - Figure 3.5 Auto correlation levels of C/A code (Source *Global Position System: Theory and Applications Volume 2*).....20

Σχήμα 3.6 Επίπεδα ετεροσυσχέτισης του κώδικα C/A (Πηγή *Global Position System: Theory and Applications Volume 2*) - Figure 3.6 Cross correlation levels of C/A code (Source *Global Position System: Theory and Applications Volume 2*).....20

Σχήμα 3.7 Μετατοπίσεις Doppler της συχνότητας L1 του συστήματος GPS (Πηγή *e-Education.psu.edu/Geog862/Node/1786*) - Figure 3.7 Doppler shifts of GPS L1 frequency (Source *e-Education.psu.edu/Geog862/Node/1786*) 21

Σχήμα 3.8 Δομή μηνύματος πλοήγησης του GPS (Πηγή *SitesGoogle/Site/To Swang/NGPS*) - Figure 3.8 GPS Navigation Message (Source *SitesGoogle/Site/To Swang/NGPS*).....22

Σχήμα 3.9 Στοιχεία Kepler (Πηγή *Wikipedia/Wiki/Orbital_Elements*) - Figure 3.9 Keplerian elements (Source *Wikipedia/Wiki/Orbital Elements*) 24

Σχήμα 3.10 Παραγωγή του σήματος L2C (Πηγή *EESA/Navipedia/GPS Signal*) - Figure 3.10 L2C signal generation (Source *EESA/Navipedia/GPS Signal*).....25

Σχήμα 3.11 Σύνθεση του σήματος της L2C από τα σήματα L2 CM και L2 CL (Πηγή *Time-Multiplexed Offset-Carrier QPSK for GNSS, Απρίλιος 2013*) - Figure 3.11 L2 CM and L2 CL code multiplexing in L2C signal (Source *Time-Multiplexed Offset-Carrier QPSK for GNSS, April 2013*).....26

Σχήμα 3.12 Διαγραμματική αναπαράσταση του εύρους της L5 στο πεδίο των συχνοτήτων (Πηγή *EESA/Navipedia/GPS_Signal*) - Figure 3.12 Spectra of L5 in frequency domain (Source *EESA/Navipedia/GPS_Signal*) 27

Σχήμα 3.13 Διαγραμματική αναπαράσταση του εύρους των E1 OS, E5 και E6 στο πεδίο των συχνοτήτων (Πηγή *EESA/Navipedia/Galileo_Signal_Plan*) - Figure 3.13 Spectra of E1 OS, E5 and E6 in frequency domain (Source *EESA/Navipedia/Galileo_Signal_Plan*) 28

Σχήμα 3.14 Διαγραμματική του εύρους των L1 και E1 OS στο πεδίο των συχνοτήτων (Πηγή *EESA/Navipedia/Galileo_Signal_Plan*) - Figure 3.14 Spectra of L1 and E1 OS in frequency domain (Source *EESA/Navipedia/Galileo_Signal_Plan*) 29

Σχήμα 3.15 Διάγραμμα διαμόρφωσης του σήματος E1 OS με τη μέθοδο CASM (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 3.15 Modulation scheme of E1 OS with CASM (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) 30

Σχήμα 3.16 Κατανομή της ισχύς των καναλιών I&Q για το σήμα E1 με τη μέθοδο CASM (Πηγή *EESA/Navipedia/File:CASM_Fig_4.png*) - Figure 3.16 Distribution of I&Q channel's power of E1 signal with CASM (Source *EESA/Navipedia/File:CASM_Fig_4.png*) 32

Σχήμα 3.17 Διαμόρφωση του φορέα με τη μέθοδο BOC (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 3.17 BOC modulation of the carrier wave (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) 33

Σχήμα 3.18 Δομή του μηνύματος πλοήγησης του Galileo (Πηγή *EESA/Navipedia/File: Galileo_Navigation_Message_Structure.png*) - Figure 3.18 Galileo's navigation message structure (Source *EESA/Navipedia/File: Galileo_Navigation_Message_Structure.png*) 34

Σχήμα 4.1 Διάδοση των σημάτων του GPS (Πηγή *Use of GNSS for lunar missions and plans for Lunar In-Orbit Development, Μάιος 2020*) - Figure 4.1 GPS signal transmission (Source *Use of GNSS for lunar missions and plans for Lunar In-Orbit Development, Μάιος 2020*) .. 37

Σχήμα 4.2 Διάγραμμα κεραίας (Πηγή *EESA/Navipedia/File:Patch_Antenna_Pattern.png*) - Figure 4.2 Patch antenna pattern (Source *EESA/Navipedia/File:Patch_Antenna_Pattern.png*) 38

Σχήμα 4.3 Κύκλωμα ζωνοπερατού φίλτρου (Πηγή *Electronics Tutorials/Filter/Filter_4*) - Figure 4.3 Bandpass filter circuit (Source *Electronics Tutorials/Filter/Filter_4*) 40

Σχήμα 4.4 Επιλεκτικότητα συχνοτήτων των ζωνοπερατών φίλτρων (Πηγή *Electronics Tutorials/Filter/Filter_4*) - Figure 4.4 Bandpass filter frequency selectivity (Source *Electronics Tutorials/Filter/Filter_4*) 41

Σχήμα 4.5 Ιδανικό κύκλωμα ενισχυτή (Πηγή *Electronics Tutorials/Amplifiers/Amp_1*) - Figure 4.5 Ideal amplifier circuit (Source *Electronics Tutorials/Amplifiers/Amp_1*) 42

Σχήμα 4.6 Μείκτης ενός RF κυκλώματος (Πηγή *Wikipedia/wiki/Frequency_Mixer*) - Figure 4.6 Mixer in RF circuits (Source *Wikipedia/wiki/Frequency_Mixer*) 42

Σχήμα 4.7 Μέρη ενός μετωπιαίου RF (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Figure 4.7 RF Front end parts (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) 44

Σχήμα 4.8 Αναπαράσταση 1,048,576 δειγμάτων της L1 σε μορφή ιστογράμματος (αριστερά) και στο πεδίο των συχνοτήτων (δεξιά) (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 4.8 Representation of 1,048,576 samples of L1 in histogram (left) and in frequency domain (right) (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) 47

Σχήμα 4.9 Απλουστευμένη αρχιτεκτονική ενός δέκτη GNSS (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Figure 4.9 Basic GNSS receiver architecture (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) 48

Σχήμα 5.1 Διαγραμματική αναπαράσταση της συνάρτησης συσχέτισης (Πηγή *GNSS-SDR/Documentation/SP-Blocks/Acquisition*) - Figure 5.1 Schematic view of correlation function (Source *GNSS-SDR/Documentation/SP-Blocks/Acquisition*) 52

Σχήμα 5.2 Διαγραμματική αναπαράσταση των ολισθήσεων του κώδικα και της συχνότητας (Πηγή *Study on the cross-correlation of GNSS signals and typical approximations, August*

2016) - Figure 5.2 Schematic view of code and frequency offset (Source *Study on the cross-correlation of GNSS signals and typical approximations, August 2016*) 52

Σχήμα 5.3 Συσχέτιση του λαμβανόμενου κώδικα και του αντιγράφου του (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 5.3 Correlation of incoming code and his replica (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) 53

Σχήμα 5.4 Απώλειες εφαρμογής (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Figure 5.4 Implementation losses (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) ...55

Σχήμα 5.5 Μεταβολή 180° της συνάρτησης συσχέτισης από τα δεδομένα πλοήγησης (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Figure 5.5 180° Phase change from navigation data (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*).....57

Σχήμα 5.6 Μεταβολή των κορυφών συσχέτισης λόγω σφαλμάτων στη συχνότητα του σήματος (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Figure 5.6 Shift of correlation peaks due to frequency errors (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) 57

Σχήμα 5.7 Διάγραμμα ρυθμού μεταβολής της ταχύτητα του δέκτη συναρτήσει του T_{CO} για τη συχνότητα L1 (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Figure 5.7 Rate of change in receiver's velocity vs coherent integration time of L1 (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) 58

Σχήμα 5.8 Διάγραμμα απώλειας τετραγωνισμού συναρτήσει του SNR πριν τον τετραγωνισμό (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Figure 5.8 Squaring loss vs Coherent SNR before squaring (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*).....59

Σχήμα 5.9 Βρόγχος Costas για την παρακολούθηση του φορέα (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 5.9 Costas Loop for carrier tracking (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*).....60

Σχήμα 5.10 DLL για την παρακολούθηση του κώδικα (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 5.10 DLL for code tracking (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*).....62

Σχήμα 5.11 Διάγραμμα παρακολούθησης του δορυφορικού σήματος (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) – Figure 5.10 Block diagram of signal tracking (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) 63

Σχήμα 5.12 Μετασχηματισμός ελλειπτικών συντεταγμένων (Πηγή *Wikimedia/Wiki/Mean_Anomaly*) - Figure 5.12 Conversion of elliptical coordinates (Source *Wikimedia/Wiki/Mean_Anomaly*) 65

Σχήμα 5.13 Επίδραση της γεωμετρίας των δορυφόρων στην ποιότητα του εντοπισμού (Πηγή *Support.Spirent/SC_KnowledgeView*) - Figure 5.13 Impact of satellite geometry in the quality of positioning (Source *Support.Spirent/SC_KnowledgeView*) 71

Σχήμα 6.1 Τυπικό διάγραμμα ροής ενός προσομοιωτή GNSS-SDR (Πηγή *GNSS-SDR/Documentation/Fundamentals*) - Figure 6.1 Typical flow diagram of GNSS-SDR (Source *GNSS-SDR/Documentation/Fundamentals*).....74

Σχήμα 6.2 Διάγραμμα ροής του block Signal Conditioner (Πηγή *GNSS-SDR/Documentation/Signal Processing Blocks/Signal Conditioner*) - Figure 6.2 Flow diagram of Signal Conditioner (Source *GNSS-SDR/Documentation/Signal Processing Blocks/Signal Conditioner*).....75

Σχήμα 6.3 Διάγραμμα ροής των καναλιών (Πηγή *GNSS-SDR/Documentation/Signal Processing Blocks*) - Figure 6.3 Channel's flow diagram (Source *GNSS-SDR/Documentation/Signal Processing Blocks*) 75

Σχήμα 6.4 Ολοκληρωμένο διάγραμμα ροής ενός προσομοιωτή GNSS-SDR (Πηγή *GNSS-SDR/Documentation/Signal Processing Blocks*) - Figure 6.4 Total flow diagram of GNSS-SDR (Source *GNSS-SDR/Documentation/Signal Processing Blocks*) 76

Σχήμα 6.5 Γραφική διεπαφή χρήστη του SatGen (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.5 SatGen GUI (Source *SatGen V3 User Manual*) 77

Σχήμα 6.6 Λεπτομέρειες σεναρίου (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.6 Scenario Details (Source *SatGen V3 User Manual*) 78

Σχήμα 6.7 Παράθυρο δημιουργίας σεναρίου (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.7 Scenario creation (Source *SatGen V3 User Manual*) 79

Σχήμα 6.8 LabSat RT (Πηγή *Naelcom/GNSS-Simulators/LabSat-RT*) - Figure 6.8 LabSat RT (Source *Naelcom/GNSS-Simulators/LabSat-RT*).....80

Σχήμα 6.9 Ρυθμίσεις σεναρίων Real Time (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.9 Real Time scenario settings (Source *SatGen V3 User Manual*) 80

Σχήμα 6.10 Ρυθμίσεις σεναρίου (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.10 Scenario Settings (Source *SatGen V3 User Manual*) 81

Σχήμα 6.11 Ορισμός δυναμικής από το χρήστη (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.11 User dynamics (Source *SatGen V3 User Manual*) 82

Σχήμα 6.12 Στατικό Σενάριο (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.12 Static Scenario (Source *SatGen V3 User Manual*) 84

Σχήμα 6.13 Χάραξη Πορείας (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.13 Draw Route Scenario (Source *SatGen V3 User Manual*) 85

Σχήμα 6.14 Εισαγωγή αρχείου (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.14 Import File Scenario (Source *SatGen V3 User Manual*) 85

Σχήμα 6.15 Παραδείγματα στάσεων στο περιβάλλον του Google Earth (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.15 Adding stops example in Google Earth (Source *SatGen V3 User Manual*).....86

Σχήμα 6.16 VBOX 3i&IMU Integration (Πηγή *Indiamart/Zenmicrosystems/VBOX-System*) - Figure 6.16 VBOX 3i&IMU Integration (Πηγή *Indiamart/Zenmicrosystems/VBOX-System*)87

Σχήμα 6.17 Καθορισμός τροχιάς από το χρήστη μέσω εντολών (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.17 User Defined Scenario (Source *SatGen V3 User Manual*) 87

Σχήμα 6.18 Παραδείγματα Record and Replay συστημάτων GNSS, α) LabSat 3 Wideband (Πηγή *LabSat/Products/LabSat 3 Wideband*), β) Spirent GSS6450 (Πηγή *Spirent/Products/GNSS RF Record and Playback System GSS6450*) - Figure 6.18 Examples of GNSS Record and Replay systems a) LabSat 3 Wideband (Source *LabSat/Products/LabSat 3 Wideband*), b) Spirent GSS6450 (Source *Spirent/Products/GNSS RF Record and Playback System GSS6450*).....88

Σχήμα 6.19 Αναπαράσταση των RF καναλιών (με μπλε. πράσινο και κόκκινο χρώμα) του LabSat 3 Wideband, στο πεδίο των συχνοτήτων (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.19 Representation of LabSat's 3 Wideband RF channels in frequency domain (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*) 89

Σχήμα 6.20 Διαστάσεις του LabSat 3 Wideband σε mm (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.20 Dimensions of LabSat 3 Wideband in mm (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*) 92

Σχήμα 6.21 Σχηματικό διάγραμμα του LabSat 3 Wideband (Πηγή *LabSat 3 Wideband/Datasheet*) - Figure 6.21 Block diagram of LabSat 3 Wideband (Source *LabSat 3 Wideband/Datasheet*) 92

Σχήμα 6.22 Διάγραμμα ροής του VCXO (Πηγή *electronics-notes/articles/electronic-components/quartz-crystal-xtal/TCXO*) - Figure 6.22 Flow diagram of VCXO (Source *electronics- notes/articles/electronic-components/quartz-crystal-xtal/TCXO*) 93

Σχήμα 6.23 Διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει της ολίσθησης της συχνότητας (Πηγή *electronics-notes/articles/electronic-components/quartz-crystal-xtal/TCXO*) - Figure 6.23 Temperature over frequency drift (Source *electronics- notes/articles/electronic-components/quartz-crystal-xtal/TCXO*) 94

Σχήμα 6.24 Μπροστινή όψη του LabSat 3 Wideband (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.24 LabSat 3 Wideband Front (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*) 96

Σχήμα 6.25 Πίσω όψη του LabSat 3 Wideband (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.25 LabSat 3 Wideband Rear (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*) 97

Σχήμα 6.26 Διαχείριση αρχείων του LabSat 3 Wideband (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.26 LabSat 3 Wideband File Management (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*) 98

Σχήμα 6.27 Συγχρονισμός πολλαπλών LabSat 3 Wideband (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.27 Synchronization of multiple LabSat 3 Wideband (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*) 100

Σχήμα 6.28 Expansion θύρα του LabSat 3 Wideband (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.28 Expansion port of LabSat 3 Wideband (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*) 101

Σχήμα 6.29 Διαγραμματική αναπαράσταση ενός PPS (Πηγή *Research on GPS Timing Remote Synchronization Algorithm in High Altitude Meteorological Data Acquisition System, Μάρτιος 2020*) - Figure 6.29 Output characteristics of PPS (Source *Research on GPS Timing Remote Synchronization Algorithm in High Altitude Meteorological Data Acquisition System, March 2020*) 102

Σχήμα 6.30 Πρότυπη δομή μηνύματος CAN (Πηγή *Texas Instruments, Introduction to the Controller Area Network (CAN), Αύγουστος 2002*) - Figure 6.30 Standard CAN message (Source *Texas Instruments, Introduction to the Controller Area Network (CAN), August 2002*) 102

Σχήμα 6.31 LOG FILE δεδομένων CAN (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.31 LOG FILE CAN data (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*) 103

Σχήμα 6.32 Δομή ενός φίλτρου CAN (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.32 Format of CAN frame filter (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*) 104

Σχήμα 6.33 Διαγραμματική αναπαράσταση των τάσεων CAN High και CAN Low (Πηγή *Squarell technology/Knowledgebase/CAN-High--CAN-Low*) - Figure 6.33 CAN Voltage levels (Source *Squarell technology/Knowledgebase/CAN-High--CAN-Low*) 105

Σχήμα 6.34 Μεταφορά δεδομένων με το πρωτόκολλο RS232 (Πηγή *CircuitDigest/article/RS232-serial-communication-protocol-basics-specifications*) - Figure

6.34 Data transfer with RS232 protocol (Source *CircuitDigest/article/RS232-serial-communication-protocol-basics-specifications*) 105

Σχήμα 6.35 Δεδομένα RS232 (Πηγή *CircuitDigest/article/RS232-serial-communication-protocol-basics-specifications*) - Figure 6.35 RS232 Data (Source *CircuitDigest/article/RS232-serial-communication-protocol-basics-specifications*) 106

Σχήμα 6.36 LOG FILE δεδομένων RS232 (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.36 LOG FILE RS2232 data (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*).....106

Σχήμα 7.1 Πλάνο της τροχιά του οχήματος (Πηγή *QGIS/ Google Maps*) - Figure 7.1 Plan of vehicle's trajectory (Source *QGIS/ Google Maps*) 112

Σχήμα 7.2 Απεικόνιση της ακρίβειας έναντι της ορθότητας (Πηγή *Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας και Πλοήγησης, ΕΜΠ*) - Figure 7.2 Illustration of precision versus trueness (Source *Satellite Geodesy and Navigation Notes, NTUA*)) 113

Σχήμα 7.3 Σφάλμα κατά μήκος και εγκάρσια της τροχιάς (Πηγή *Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας και Πλοήγησης, ΕΜΠ*) - Figure 7.3 Along and off track errors (Source *Satellite Geodesy and Navigation Notes, NTUA*) 114

Σχήμα 7.4 Διαστάσεις σχάρας αλουμινίου για το Target Vehicle (Πηγή *RobPos4VApp*) - Figure 7.4 Dimensions of aluminium roof rack for Target Vehicle (Source *RobPos4VApp*)115

Σχήμα 7.5 Πλατφόρμα αισθητήρων (Πηγή *RobPos4VApp*) - Figure 7.5 Sensors Platform (Source *RobPos4VApp*) 116

Σχήμα 7.6 Δέκτης M8T και Evaluation Kit M8T (Πηγή *EVK-M8T User Guide*) - Figure 7.6 GNSS receiver M8T and Evaluation Kit M8T (Source *EVK-M8T User Guide*) 117

Σχήμα 7.7 Δέκτης Mosaic-X5 και Evaluation Kit Moscaic-X5 (Πηγή *Mosaic-X5 Data Sheet*) - Figure 7.7 GNSS receiver Mosaic-X5 and Evaluation Kit Moscaic-X5 (Source *Mosaic-X5 Data Sheet*).....118

Σχήμα 7.8 Δέκτης Trimble R9S (Πηγή *FrontierPrecision/Products/Trimble R9S*) - Figure 7.8 Trimble R9S GNSS receiver (Source *FrontierPrecision/Products/Trimble R9S*) 120

Σχήμα 7.9 Δέκτης PwrPak7 (Πηγή *NavtechGPS/PwPak7*) - Figure 7.9 PwrPak7 GNSS receiver (Source *NavtechGPS/PwPak7*) 121

Σχήμα 7.10 Αδρανειακή μονάδα iIMU-FSAS (Πηγή *iMAR/Products/iIMU-FSAS*) - Figure 7.10 iIMU-FSAS inertial unit (Source *iMAR/Products/iIMU-FSAS*).....122

Σχήμα 7.11 Οριζοντιογραφική αναπαράσταση της τροχιάς αναφοράς - Figure 7.11 Horizontal representation of reference trajectory 123

Σχήμα 7.12 Προφίλ ταχύτητας και ακρίβεια της τροχιάς αναφοράς - Figure 7.12 Velocity profile and precision for reference trajectory.....124

Σχήμα 7.13 Διαγραμματική αναπαράσταση των αριθμού των δορυφόρων και του δείκτη HDOP για την τροχιά αναφοράς - Figure 7.13 Number of satellites and HDOP for reference trajectory 124

Σχήμα 7.14 Οριζοντιογραφική αναπαράσταση της τροχιάς πεδίου και της ακριβείας της - Figure 7.14 Horizontal representation of field test trajectory and its precision.....125

Σχήμα 7.15 Διαγραμματική αναπαράσταση του αριθμού των δορυφόρων και του δείκτη HDOP για την τροχιά πεδίου - Figure 7.15 Number of visible satellites and HDOP for field test trajectory.....125

Σχήμα 7.16 Ορθότητα της τροχιάς πεδίου - Figure 7.16 Trueness of field test trajectory 126

Σχήμα 7.17 Διάγραμμα πυκνότητας πιθανότητας της ορθότητας του εντοπισμού - Figure 7.17 Probability density distribution of trueness 127

Σχήμα 7.18 Διάγραμμα εμπειρικής αθροιστικής κατανομής για την ακρίβεια και την ορθότητα του εντοπισμού - Figure 7.18 Empirical cumulative distribution function for precision and trueness 127

Σχήμα 8.1 Πειραματική διάταξη της επανάληψης των προσομοιωμένων σημάτων - Figure 8.1 Experimental arrangement for the replay of the simulated scenarios 131

Σχήμα 8.2 Οριζοντιογραφική αναπαράσταση των προσομοιωμένων τροχιών του δέκτη M8T - Figure 8.2 Horizontal representation of M8T's simulated trajectories 132

Σχήμα 8.3 Διαγραμματική αναπαράσταση του αριθμού των δορυφόρων των προσομοιωμένων τροχιών του δέκτη M8T - Figure 8.3 Number of visible satellites for M8T's simulated trajectories 133

Σχήμα 8.4 Διαγραμματική αναπαράσταση του δείκτη HDOP των προσομοιωμένων τροχιών του δέκτη M8T - Figure 8.4 HDOP for M8T's simulated trajectories 134

Σχήμα 8.5 Διαγραμματική αναπαράσταση της ακρίβειας του δέκτη M8T για τις προσομοιωμένες τροχιές - Figure 8.5 Precision for M8T's simulated trajectories 135

Σχήμα 8.6 Διαγραμματική αναπαράσταση της κίνησης κατά North και East του δέκτη M8T για τις προσομοιωμένες τροχιές - Figure 8.6 North and East versus time for M8T's simulated trajectories 136

Σχήμα 8.7 Διαγράμματα ορθότητας κατά μήκος της τροχιάς για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη M8T - Figure 8.7 Along track error for M8T's simulated trajectories 137

Σχήμα 8.8 Διαγράμματα ορθότητας εγκάρσια της τροχιάς για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη M8T - Figure 8.8 Off track error for M8T's simulated trajectories 138

Σχήμα 8.9 Διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας της ορθότητας κατά μήκος της τροχιάς για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη M8T - Figure 8.9 PDD of along track error for M8T's simulated trajectories 139

Σχήμα 8.10 Διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας της ορθότητας εγκάρσια της τροχιάς για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη M8T - Figure 8.10 PDD of off track error for M8T's simulated trajectories 140

Σχήμα 8.11 Διαγράμματα εμπειρικής αθροιστικής κατανομής της ορθότητας και της ακρίβειας για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη M8T - Figure 8.11 ECDF of trueness and precision for M8T's simulated trajectories 141

Σχήμα 8.12 Οριζοντιογραφική αναπαράσταση των προσομοιωμένων τροχιών του δέκτη Mosaic - Figure 8.12 Horizontal representation of Mosaic's simulated trajectories 142

Σχήμα 8.13 Διαγραμματική αναπαράσταση του αριθμού των δορυφόρων των προσομοιωμένων τροχιών του δέκτη Mosaic - Figure 8.13 Number of visible satellites for Mosaic's simulated trajectories 143

Σχήμα 8.14 Διαγραμματική αναπαράσταση του δείκτη HDOP των προσομοιωμένων τροχιών του δέκτη Mosaic - Figure 8.14 HDOP for Mosaic's simulated trajectories 144

Σχήμα 8.15 Διαγραμματική αναπαράσταση της ακρίβειας του δέκτη Mosaic για τις προσομοιωμένες τροχιές - Figure 8.15 Precision for Mosaic's simulated trajectories 145

Σχήμα 8.16 Διαγραμματική αναπαράσταση της κίνησης κατά North και East του δέκτη Mosaic για τις προσομοιωμένες τροχιές - Figure 8.16 North and East versus time for Mosaic's simulated trajectories 146

Σχήμα 8.17 Διαγράμματα ορθότητας κατά μήκος της τροχιάς για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη Mosaic - Figure 8.17 Along track error for Mosaic's simulated trajectories.....147

Σχήμα 8.18 Διαγράμματα ορθότητας εγκάρσια της τροχιάς για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη Mosaic - Figure 8.18 Off track error for Mosaic's simulated trajectories 148

Σχήμα 8.19 Διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας της ορθότητας κατά μήκος της τροχιάς για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη Mosaic - Figure 8.19 PDD of along track error for Mosaic's simulated trajectories.....149

Σχήμα 8.20 Διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας της ορθότητας εγκάρσια της τροχιάς για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη Mosaic - Figure 8.20 PDD of off track error for Mosaic's simulated trajectories.....150

Σχήμα 8.21 Διαγράμματα εμπειρικής αθροιστικής κατανομής της ορθότητας και της ακρίβειας για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη Mosaic - Figure 8.21 ECDF of trueness and precision for Mosaic's simulated trajectories 152

Σχήμα 9.1 Θηκόγραμμα για την ορθότητα των προσομοιωμένων τροχιών - Figure 9.1 Box and whiskers plots for the trueness of the simulated trajectories.....155

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 Διαθέσιμα συστήματα εντοπισμού (Πηγή *Wikipedia/Satellite Navigation*) - Table 3.1 Available navigation systems (Source *Wikipedia/Satellite Navigation*) 13

Πίνακας 3.2 Αποτελέσματα του τελεστή OR (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Table 3.2 Output of the exclusive OR operation (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) 15

Πίνακας 3.3 Μετατόπιση φάσης με τη μέθοδο διαμόρφωσης QPSK (Πηγή *Allaboutcircuits/Technical-articles/Quadrature-Phase-Shift-Keying-QPSK-modulation*) - Table 3.3 Phase shift with QPSK (Source *Allaboutcircuits/Technical-articles/Quadrature-Phase-Shift-Keying-QPSK-modulation*) 27

Πίνακας 3.4 Συνδυασμοί των τριών δυαδικών σημάτων του σήματος E1 με τη μέθοδο CASM (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Table 3.4 Combination of three binary signals of E1 signal with CASM (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) 32

Πίνακας 3.5 Χαρακτηριστικά των μηνυμάτων πλοήγησης του Galileo (Πηγή *EESA/Navipedia/Galileo_Navigation_Message*) - Table 3.5 Galileo's navigation message characteristics (Source *EESA/Navipedia/Galileo_Navigation_Message*) 35

Πίνακας 3.6 Δομή των σελίδων των μηνυμάτων πλοήγησης του Galileo (Πηγή *EESA/Navipedia/Galileo_Navigation_Message*) - Table 3.6 Structure of Galileo's navigation data page (Source *EESA/Navipedia/Galileo_Navigation_Message*).....35

Πίνακας 4.1 Λαμβανόμενη ισχύ του σήματος της L1 (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Table 4.1 Effective received power of L1 (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*).....39

Πίνακας 4.2 Θερμοκρασία θορύβου (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Table 4.2 Noise Temperature (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*).....45

Πίνακας 5.1 Coherent Gain (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Table 5.1 Coherent Gain (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) 56

Πίνακας 5.2 Παράμετροι εφημερίδας (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Table 5.1 Ephemeris parameters (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) 64

Πίνακας 6.1 Επιλογή κβάντωσης, εύρους και κατανομής της συχνότητας του καναλιού (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Table 6.1 Selection of quantization, bandwidth and channel frequency allocation (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*) 90

Πίνακας 6.2 Θύρες εισόδου/ εξόδου του LabSat 3 Wideband (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Table 6.2 Input/ Output ports of LabSat 3 Wideband (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*).....97

Πίνακας 6.3 Διαθεσιμότητα μνήμης του LabSat 3 Wideband στην απευθείας αποθήκευση δεδομένων στον NAS (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Table 6.3 Memory requirements when recording data directly to NAS (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*) 99

Πίνακας 7.1 Εξοπλισμός για τις μετρήσεις υπαίθρου του έργου RobPos4VApp - Table 7.1 Equipment for field measurements of RobPos4VApp experiment.....115

Πίνακας 7.2 Επιτρεπτοί συνδυασμοί για την καταγραφή πολλαπλών συστημάτων GNSS του δέκτη M8T (Πηγή *NEO/ LEA M8T Data Sheet*) - Table 7.2 Permissible GNSS combination of EVK-M8T (Source *NEO/ LEA M8T Data Sheet*) 117

Πίνακας 7.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη M8T (Πηγή *NEO/ LEA M8T Data Sheet*) - Table 7.3 Specifications of M8T GNSS receiver (Source *NEO/ LEA M8T Data Sheet*) 118

Πίνακας 7.4 Διαθέσιμα σήματα για το δέκτη Mosaic-X5 (Πηγή *Mosaic-X5 Data Sheet*) - Table 7.4 Available signals for Mosaic-X5 GNSS receiver (Source *Mosaic-X5 Data Sheet*) 119

Πίνακας 7.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη Mosaic-X5 (Πηγή *Mosaic-X5 Data Sheet*) - Table 7.5 Specification of Mosaic-X5 GNSS receiver (Source *Mosaic-X5 Data Sheet*).....119

Πίνακας 7.6 Διαθέσιμα σήματα για το δέκτη Trimble R9S (Πηγή *Trimble R9S Data Sheet*) - Table 7.6 Available signals for Trimble R9S GNSS receiver GNSS receiver (Source *Trimble R9S Data Sheet*) 120

Πίνακας 7.7 Τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη Trimble R9S (Πηγή *Trimble R9S Data Sheet*) - Table 7.7 Specifications of Trimble R9S GNSS receiver (Source *Trimble R9S Data Sheet*).....121

Πίνακας 7.8 Διαθέσιμα σήματα για το δέκτη PwrPak7 (Πηγή *PwrPak7 Data Sheet*) - Table 7.8 Available signals for PwrPak7 GNSS receiver GNSS receiver (Source *PwrPak7 Data Sheet*).....121

Πίνακας 7.9 Τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη PwrPak7 (Πηγή *PwrPak7 Data Sheet*) - Table 7.9 Specifications of PwrPak7 GNSS receiver (Source *PwrPak7 Data Sheet*).....122

Πίνακας 7.10 Τεχνικά χαρακτηριστικά της αδρανειακής μονάδας εντοπισμού (Πηγή *iIMU-FSA /Data Sheet*) - Table 7.10 Specifications of IMU (Source *iIMU-FSA /Data Sheet*).....123

Πίνακας 7.11 Ενδεικτικές τιμές της εμπειρικής αθροιστικής κατανομής για την ακρίβεια και την ορθότητα της τροχιάς πεδίου - Table 7.11 ECDF values for precision and along/ off track error of field test trajectory 128

Πίνακας 8.1 Παράμετροι σεναρίων για τη δημιουργία των προσομοιωμένων σημάτων - Table 8.1 Scenarios settings for the simulated signals.....129

Πίνακας 8.2 Διαφοροποίηση των τελικών σεναρίων με βάση το Attenuation και τη κβάντωση των συνιστωσών I&Q - Table 8.2 Distinction of the final scenarios in terms of Attenuation and quantization of I&Q components 130

Πίνακας 8.3 Συστήματα εντοπισμού των προσομοιωμένων σημάτων - Table 8.3 Constellations of simulated signals.....130

Πίνακας 8.4 Ενδεικτικές τιμές της εμπειρικής αθροιστικής κατανομής για την ακρίβειας και την ορθότητα των προσομοιωμένων τροχιών για το δέκτη M8T - Table 8.4 ECDF values for precision and along/ off track error of M8T's simulated trajectories 141

Πίνακας 8.5 Ενδεικτικές τιμές της εμπειρικής αθροιστικής κατανομής για την ακρίβειας και την ορθότητα των προσομοιωμένων τροχιών για το δέκτη Mosaic - Table 8.5 ECDF values for precision and along/ off track error of Mosaic's simulated trajectories.....152

Πίνακας 8.6 Σύγκριση τροχιών με βάση τα μεμονωμένα χαρακτηριστικά τους - Table 8.6 Trajectories comparison based on their unique values 154

Πίνακας 8.7 Σύγκριση τροχιών με βάση την ορθότητα - Table 8.7 Trajectories comparison based on their trueness 154

ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ

AC	Alternating Current
ADC	Analogue-to-Digital Converter
AGC	Automatic Gain Control
BOC	Binary Offset Carrier
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
CAN	Controller Area Network
CASM	Coherent Adaptive Subcarrier Modulation
CPU	Central Processing Unit
CRC	Cyclic Redundancy Check
DAC	Digital-to-Analogue Converter
DC	Direct Current
DCE	Data Communication Equipment
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System
DIGI	Digital Output
DIGO	Digital Input
DLL	Delay Lock Loop
DOP	Dilution Of Precision
DTE	Data Transmission Equipment
DUT	Device Under Test
ECEF	Earth Centered Earth Fixed
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
FEC	Forward Error Connection
FIFO	First In, First Out
FPGA	Field Programmable Gate Array
GAGAN	GPS-Aided GEO Augmented Navigation
GBAS	Ground Based Augmentation System
GCS	Ground Control Segment
GND	Ground
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Position System
GUI	Graphical User Interface
IF	Intermediate Frequency
IMU	Inertial Measurement Units
INS	Inertial Navigation System
IP	Internet Protocol
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
KML	Keyhole Markup Language
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
LEMO	Léon Mouttet (Founder of LEMO cables)
LFSR	Linear Feedback Shift Register
LHCP	Left Hand Circularly Polarized
LiDAR	Light Detection And Ranging
LiDAR	Light Detection And Ranging
LNA	Low Noise Amplifier
MBOC	Multiplexed Binary Offset Carrier
MDR	Mini Delta Ribbon

MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System
MSPS	Megasamples per Second (Millions of samples per second)
MTBF	Mean Time Before Failure
NAS	Network-Attached Storage
NMEA	National Marine Electronics Association
NRZ	Non Return to Zero
OCXO	Oven Controlled Crystal Oscillator
PLL	Phase Lock Loop
PPS	Pulse Per Second
PRN	Pseudo-Random Noise
PSD	Power Spectral Density
PVT	Position Velocity Time
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RF	Radio Frequency
RHCP	Right Hand Circularly Polarized
RJ45	Registered Jack-45
RS232	Recommended Standard 232
RTK	Real Time Kinematic
SAIF	Submeter-class Augmentation with Integrity Function
SBAS	Space Based Augmentation System
SD	Secure Digital
SDCM	System for Differential Corrections and Monitoring
SDR	Software Defined Radio
SMA	SubMiniature version A
SNR	Signal to Noise Ratio
SSD	Solid State Drive
TCXO	Temperature Compensated Crystal Oscillator
TDM	Time Division Multiplexing
TTFF	Time To First Fix
TTL	Transistor Transistor Logic
UHF	Ultra High Frequency
USB	Universal Serial Bus
UTC	Coordinated Universal Time
VCXO	Voltage Controller Crustal Oscillator
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS84	World Geodetic System 1984
WiFi	Wireless Fidelity
ΕΓΣΑ87	Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987
ΜΣΘ	Μέση Στάθμη Θάλασσας
κτλ	και τα λοιπά

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Τα Παγκόσμια Συστήματα Δορυφορικής Πλοήγησης (Global Navigation Satellite System - GNSS) αποτελούν το πλέον διαδεδομένο μέσο, για την πλοήγηση οχημάτων στον χερσαίο αστικό χώρο. Τα τελευταία χρόνια ο εκσυγχρονισμός των υφιστάμενων και η ανάπτυξη νέων συστημάτων σε συνδυασμό με την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών, έχει οδηγήσει σε αύξηση της ζήτησης των δεκτών GNSS χαμηλού κόστους, καθώς και των εφαρμογών που αξιοποιούν τα συγκεκριμένα συστήματα. Σε έναν τόσο ραγδαία εξελισσόμενο κλάδο, είναι απαραίτητος ο συνεχής έλεγχος τόσο των συστημάτων εντοπισμού, όσο και των δεκτών GNSS, προκειμένου να ελέγχεται η αξιοπιστία και η ακεραιότητά τους. Ο μέχρι τώρα έλεγχος των συστημάτων εντοπισμού, περιλάμβανε πολύωρες παρατηρήσεις υπαίθρου, προκειμένου να συλλεχθούν τα απαραίτητα δεδομένα. Η συγκεκριμένη διαδικασία αν και αποτελεσματική, εξ αντικειμένου παρέχει περιορισμένο όγκο δεδομένων, ενώ παρουσιάζει μειονεκτήματα ως προς την επαναληψιμότητα και την ακεραιότητα των παρατηρήσεων. Τα τελευταία χρόνια, βρίσκει ευρεία εφαρμογή η χρήση προσομοιωτών δορυφορικού σήματος, καθώς η όλη διαδικασία των παρατηρήσεων, γίνεται σε ένα πλήρως ελεγχόμενο περιβάλλον και συνεισφέρει μεγάλο όγκο δεδομένων. Επιπλέον, κάθε σενάριο προσομοίωσης, μπορεί να επαναληφθεί σε διαφορετικούς δέκτες, διευκολύνοντας τη σύγκριση των διαφόρων κεραιών GNSS. Ωστόσο, ο πιο σημαντικός λόγος που προτιμώνται οι εργαστηριακές προσομοιώσεις, είναι η επαναληψιμότητά τους στα διάφορα σφάλματα που υπεισέρχονται κατά τη συλλογή των δεδομένων, όπως για παράδειγμα του σφάλματος της πολυανάκλασης. Η πολυανάκλαση των δορυφορικών σημάτων, παραμένει μέχρι και σήμερα, κρίσιμη πηγή σφαλμάτων στην πλοήγηση οχημάτων σε αστικό περιβάλλον, ενώ η μοντελοποίηση της, είναι ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία. Με τη χρήση των εργαστηριακών προσομοιώσεων, η συγκεκριμένη πηγή σφάλματος μπορεί ή να εξαλειφθεί τελείως, ή να επιδρά με τον ίδιο τρόπο σε κάθε σενάριο προσομοίωσης. Είναι λοιπόν ξεκάθαρη η αναγκαιότητα των εργαστηριακών προσομοιώσεων σε εφαρμογές πλοήγησης και εν προκειμένω, η υπόψη Διπλωματική Εργασία ασχολείται με τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση στην αξιολόγηση τροχιών οχημάτων σε αστικό περιβάλλον, είναι η πρώτη που γίνεται σε επίπεδο Διπλωματικής Εργασίας στη σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής, και αποτελεί ένα κίνητρο ενασχόλησης τόσο των φοιτητών, όσο και του εκπαιδευτικού προσωπικού, στην αξιοποίηση των συγκεκριμένων τεχνολογιών.

1.2 Στόχοι Εργασίας

Ο κύριος στόχος της συγκεκριμένης εργασίας, είναι ο ποιοτικός και ποσοτικός έλεγχος τροχιών που παράγονται με αξιοποίηση προσομοιωμένου δορυφορικού σήματος, καθώς και το κατά πόσο επηρεάζει την ποιότητας τους, η διακριτοποιημένη φύση των Record and Replay συστημάτων. Για την πληρέστερη σύγκριση των τροχιών ελέγχου, πραγματοποιήθηκε μια σειρά μετρήσεων από την οποία συλλέχθηκαν δεδομένα από δέκτη GNSS χαμηλού και υψηλού κόστους. Τα δεδομένα των δεκτών χαμηλού κόστους χρησιμοποιήθηκαν για την ποιοτική σύγκριση των προσομοιωμένων τροχιών και των τροχιών πραγματικού χρόνου, ενώ τα δεδομένα του δέκτη GNSS γεωδαιτικού τύπου, χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή της τροχιάς αναφοράς και τη ποσοτική σύγκριση των παραγόμενων τροχιών. Οι επιπρόσθετοι στόχοι που τέθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, είναι οι εξής:

- Εξοικείωση με τα συστήματα Record and Replay, καθώς και των απαραίτητων συνδεσμολογιών που απαιτούνται για την εποπτεία της πειραματικής διαδικασίας
- Εξοικείωση με τις βασικές έννοιες ανάλυσης, επεξεργασίας και αποθήκευσης του δορυφορικού σήματος
- Εξοικείωση με τις μεθόδους προσομοίωσης του δορυφορικού σήματος
- Συμμετοχή στη διαδικασία συλλογής των δεδομένων
- Επεξεργασία των χρονοσειρών που προέκυψαν από τη συλλογή των δεδομένων
- Εξαγωγή ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών των τροχιών που προέκυψαν προσομοιωμένα δορυφορικά σήματα.

1.3 Δομή Εργασίας

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία χωρίζεται σε 9 Κεφάλαια, των οποίων το περιεχόμενο, αναλύεται στις επόμενες παραγράφους.

Στο Δεύτερο Κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες βασικές έννοιες και μαθηματικά μοντέλα, τα οποία αφορούν γενικότερα την ανάλυση σήματος. Ωστόσο, τόσο οι ορισμοί που εμφανίζονται όσο και τα μαθηματικά μοντέλα, αφορούν κυρίως την ανάλυση του δορυφορικού σήματος.

Στο Τρίτο Κεφάλαιο γίνεται μια γενική περιγραφή των διαθέσιμων συστημάτων εντοπισμού και στη συνέχεια, γίνεται η περιγραφή των συστημάτων εντοπισμού GPS και Galileo. Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται εκτενής αναφορά στις συχνότητες μετάδοσης των δύο συστημάτων, στον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται τα συγκεκριμένα σήματα, καθώς και στα βασικά χαρακτηριστικά των δύο συστημάτων.

Στο Τέταρτο Κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των δεκτών GNSS. Η περιγραφή αυτή ξεκινάει από τις κεραίες GNSS και στο τρόπο με τον οποίο λαμβάνουν το δορυφορικό σήμα, ενώ στη συνέχεια γίνεται μια αναλυτική περιγραφή του μετωπιαίου τμήματος των δεκτών. Η συγκεκριμένη ανάλυση αφορά στα επιμέρους τμήματα του δέκτη και την επίδρασή τους στο λαμβανόμενο σήμα. Τέλος, γίνεται αναφορά στο τελικό παράγωγο της παραπάνω ανάλυσης.

Στο Πέμπτο Κεφάλαιο περιγράφονται οι τρεις βασικές διαδικασίες ενός δορυφορικού δέκτη. Η πρώτη αφορά στην ανάκτηση του δορυφορικού σήματος, πως δηλαδή ο δέκτης καταφέρνει να λάβει τα διάφορα δορυφορικά σήματα και πως υπολογίζει το χρόνο του ταξιδιού. Στη συνέχεια, γίνεται η περιγραφή της παρακολούθησης των δορυφορικών σημάτων, ενώ η τρίτη και τελευταία διαδικασία, είναι ο υπολογισμός της θέσης του δέκτη, από τις πρωτογενής μετρήσεις ψευδοαπόστασης.

Στο Έκτο Κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή των προσομοιωτών GNSS, καθώς και των συστημάτων Record and Replay. Έμφαση δίνεται στην ανάλυση του εξοπλισμού, που αξιοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο Έβδομο Κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διαδικασία και πιο συγκεκριμένα, το στάδιο του σχεδιασμού, της συλλογής και της επεξεργασίας των δεδομένων υπαίθρου. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται η περιγραφή της περιοχής μελέτης, του πειραματικού εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και των μεθόδων αξιολόγησης των τροχιών. Τέλος, γίνεται μια πρώτη επεξεργασία των μετρήσεων που αξιοποιήθηκαν για την παραγωγή και αξιολόγηση των προσομοιωμένων τροχιών.

Στο Όγδοο Κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση και αξιολόγηση των προσομοιωμένων τροχιών. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται οι παράμετροι με τους οποίους ανακτήθηκε το δορυφορικό σήμα, η πειραματικής διάταξη για την αναπαραγωγή των δεδομένων και τέλος, η αξιολόγηση των σεναρίων που δημιουργήθηκαν.

Στο Ένατο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία και γίνονται μερικές προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

2.1 Εισαγωγή

Στην επιστήμη επεξεργασίας σήματος, σήμα [1] καλείται μία συνάρτηση η οποία περιέχει πληροφορία για την εξέλιξη κάποιου συγκεκριμένου φαινομένου. Το σήμα μπορεί να είναι συνάρτηση του χρόνου, όπως για παράδειγμα ο ήχος, ενώ μπορεί να είναι συνάρτηση του χώρου, όπως για παράδειγμα η εικόνα. Στην περίπτωση των GNSS, ως σήμα αναφέρεται η διάδοση μιας ημιτονοειδούς (ή συνημιτονοειδούς) συνάρτησης, ενώ η πληροφορία που περιέχει είναι μία αλληλουχία συγχρονισμού, η τροχιά και ο χρόνος του εκάστοτε δορυφόρου. Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ημιτονοειδούς σήματος είναι το πλάτος του, η συχνότητα και η φάση του. Ως πλάτος ορίζεται η μέγιστη αποχή του σήματος από τον άξονα x'x και εκφράζει την ένταση του σήματος. Η συχνότητα του σήματος, εκφράζει το πόσες φορές επαναλαμβάνεται η ημιτονοειδής αλληλουχία σε 1 sec, ενώ η φάση εκφράζει τη γωνιακή αποχή της συνάρτησης από την αρχή της. Στην περίπτωση των GNSS, η ανάλυση τους γίνεται στο πεδίο των συχνοτήτων και όχι στο πεδίο του χρόνου, καθώς εμφανίζονται κάποιες χαρακτηριστικές ιδιότητες των συγκεκριμένων σημάτων. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται τα δύο βασικά είδη σήματος και παρουσιάζονται τα βασικά μοντέλα για τη μετάβαση από το πεδίο του χρόνου, στο πεδίο των συχνοτήτων. Τέλος, γίνεται μια μαθηματική έκφραση της δειγματοληψίας ενός σήματος.

2.2 Είδη Σημάτων

2.2.1 Ντετερμινιστικά Σήματα

Ντετερμινιστικά [2] ονομάζονται τα σήματα, τα οποία ορίζονται από μία ή περισσότερες ανεξάρτητες παραμέτρους. Κάθε σήμα του οποίου οι παράμετροι δεν περιέχουν κάποια αβεβαιότητα συναρτήσει του χρόνου ή μπορεί να οριστεί με κάποιο αυστηρό μαθηματικό μοντέλο, ονομάζεται ντετερμινιστικό. Τα ντετερμινιστικά σήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε συνεχή και διακριτά.

2.2.1.α Συνεχή Ντετερμινιστικά Σήματα

Τα συνεχή σήματα ορίζονται για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Έστω ένα συνεχές ντετερμινιστικό σήμα *x(t)*, με πεπερασμένη ενέργεια Ε, η οποία υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής του σήματος |*x(t)*|, η οποία καλείται μέτρο του σήματος. Η αναπαράσταση του συγκεκριμένου σήματος στο πεδίο των συχνοτήτων, δίνεται από το μετασχηματισμό Fourier (Βλέπε παράγραφο §2.3 Σειρές και Μετασχηματισμοί Fourier) του *x(t)*.

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \qquad \text{Εξ. (2.1)}$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός του σήματος *X(ω)* δίνεται από τη σχέση,

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega \qquad \text{Εξ. (2.2)}$$

Το σήμα που προκύπτει από το μετασχηματισμό Fourier, είναι αποτέλεσμα εκθετικών μιγαδικά συναρτήσεων και αποτελείται από το πραγματικό και το φανταστικό του μέρος.

$$X(\omega) = \Re\big(X(\omega)\big) + i\Im\big(X(\omega)\big) = |X(\omega)|e^{\arctan\left(\frac{\Im(X(\omega))}{\Re(X(\omega))}\right)} \qquad \text{Εξ. (2.3)}$$

Ο όρος *X(ω)* αναφέρεται και ως φάσμα του σήματος *x(t)*. Αντίστοιχα, με τον όρο | *X(ω)*| αναφέρεται το μέτρο του φάσματος του *x(t)*, ενώ ο όρος arctan[$\Im\big(X(\omega)\big)/\Re\big(X(\omega)\big)$] αναφέρεται στο φάσμα της φάσης του σήματος *x(t)*, καθώς περιγράφει την κατανομή της ενέργειας του σήματος, συναρτήσει της συχνότητάς του. Το φάσμα πυκνότητας της ενέργειας του σήματος *x(t)* προκύπτει από τη σχέση,

$$\mathcal{E}_x(\omega) = |X(\omega)|^2 \qquad \text{Εξ. (2.4)}$$

Το φάσμα πυκνότητας της ενέργειας ενός σήματος *x(t)*, μπορεί να βρεθεί με τη χρήση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης του πεπερασμένης ενέργειας σήματος *x(t)*. Έστω το σήμα *x*(t)* το οποίο έχει το ίδιο πραγματικό μέρος με το σήμα *x(t)* και αντίθετο μιγαδικό μέρος (συζυγής μιγαδικοί αριθμοί). Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του σήματος *x(t)* δίνεται από τη σχέση,

$$r_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x^*(t)x(t+\tau)dt \qquad \text{Εξ. (2.5)}$$

Με βάση την εξίσωση (2.4), το φάσμα πυκνότητας της ενέργειας $\mathcal{E}_x(\omega)$ του σήματος *x(t)* δίνεται από τη σχέση,

$$\mathcal{E}_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} r_x(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau \qquad \text{Εξ. (2.6)}$$

2.2.2.β Διακριτά Ντετερμινιστικά Σήματα

Σε αντίθεση με τα συνεχή σήματα, τα διακριτά σήματα περιέχουν πληροφορία σε ορισμένες (διακριτές) χρονικές στιγμές. Τέτοια σήματα μπορούν να προκύψουν από τη δειγματοληψία συνεχών σημάτων. Σε αυτήν την περίπτωση, η αναπαράσταση ενός διακριτού σήματος *x(n)* στο πεδίο των συχνοτήτων, γίνεται με τη χρήση του διακριτού μετασχηματισμού Fourier.

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-i\omega n} \qquad \text{Εξ. (2.7)}$$

Το διακριτό σήμα της εξίσωσης (2.7) μπορεί να γραφεί και συναρτήσει της συχνότητας *f*. Σε αυτή την περίπτωση, το σήμα *X(f)* είναι περιοδικό για περίοδο 1, ενώ το σήμα *X(ω)* είναι περιοδικό για περίοδο 2π.

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-i2\pi fn} \qquad \text{Εξ. (2.8)}$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier των σημάτων *X(ω)* και *X(f)*, δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$x(n) = \int_{-1/2}^{1/2} X(f)\, e^{i2\pi fn} df = \int_{-\pi}^{\pi} X(\omega) e^{i\omega n}\, d\omega \qquad \text{Εξ. (2.9)}$$

Αντίστοιχα με τα συνεχή σήματα, το φάσμα πυκνότητας της ενέργειας δίνεται από τη σχέση,

$$\mathcal{E}_x(f) = |X(f)|^2 \qquad \text{Εξ. (2.10)}$$

Επιπρόσθετα, το φάσμα πυκνότητας της ενέργειας μπορεί να βρεθεί με χρήση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Σε αυτή την περίπτωση, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης δίνεται από τη σχέση,

$$r_x(k) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x^*(n) x(n+k) \qquad \text{Εξ. (2.11)}$$

Τέλος, με χρήση της εξίσωσης (2.11), το φάσμα πυκνότητας της ενέργειας δίνεται από τη σχέση,

$$\mathcal{E}_x(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} r_x(k) e^{-i2\pi fk} \qquad \text{Εξ. (2.12)}$$

2.2.3.γ Τετραγωνικοί Παλμοί

Οι τετραγωνικοί παλμοί αποτελούν ένα ντετερμινιστικό σήμα και περιγράφονται από το πλάτος και τη διάρκειά τους. Έστω ένα τετραγωνικός παλμός *f(t)* πλάτους 1 και διάρκειας *T*. Μετατοπίζοντας το παλμό κατά *-T/2*, έτσι ώστε η αρχή των αξόνων να τέμνει το μέσο του παλμού, η εξίσωση που περιγράφει το συγκεκριμένο παλμό είναι,

$$f(t) = \begin{cases} 1, & |t| \le T/2 \\ 0, & |t| > T/2 \end{cases} \qquad \text{Εξ. (2.13)}$$

Η περιγραφή των τετραγωνικών παλμών στο πεδίο των συχνοτήτων, προκύπτει από το μετασχηματισμό Fourier της *f(t)*. Η συνάρτηση *F(ω)* που προκύπτει, έχει τη μορφή,

$$F(\omega) = T \frac{\sin\left(\frac{\omega T}{2}\right)}{\frac{\omega T}{2}} = T \operatorname{sinc}\left(\frac{\omega T}{2}\right) \qquad \text{Εξ. (2.14)}$$

Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του παλμού *f(t)*, δίνεται από τη σχέση,

$$r_f(\tau) = \begin{cases} T\left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right), & |\tau| \le T \\ 0, & |\tau| > T \end{cases} \qquad \text{Εξ. (2.15)}$$

Η απεικόνιση της συγκεκριμένης συνάρτησης, είναι ένα τρίγωνο με βάση από *-T* έως *T* (*2T*) και ύψος *T*. Το φάσμα πυκνότητας της ενέργειας του τετραγωνικού παλμού της συνάρτησης *f(t)*, δίνεται από τη σχέση,

$$\mathcal{E}_f(\omega) = \int_{-T}^{T} (T-\tau)\cos(\omega\tau)d\tau = T^2 \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\omega T}{2}\right) \qquad \text{Εξ. (2.16)}$$

Στην περίπτωση όπου η συνάρτηση *f(t)* αναφέρεται σε διακριτό χρόνο, τότε ο τετραγωνικός παλμός *f(n)*, δίνεται από τη σχέση,

$$f(n) = \begin{cases} 1, & 0 \le n \le N-1 \\ 0, & \text{για όλα τα υπολοιπα } n \end{cases} \qquad \text{Εξ. (2.17)}$$

Στην εξίσωση (2.17), ο όρος ***N*** συμβολίζει έναν ακέραιο αριθμό, ο οποίος περιλαμβάνει το μήκος μιας αλληλουχίας τετραγωνικών παλμών. Τέλος, ο μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης *f(n)*, δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$F(f) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-i2\pi fn} = \frac{\sin(\pi f N)}{\sin(\pi f)} e^{-i\pi f(N-1)} \qquad \text{Εξ. (2.18)}$$

2.2.2 Τυχαία Σήματα

2.2.2.α Τυχαία Στάσιμη Διαδικασία

Τυχαία [3] ονομάζονται τα σήματα τα οποία δεν μπορούν να περιγραφούν από κάποιο μαθηματικό μοντέλο. Ένα τυχαίο σήμα μπορεί να θεωρηθεί ως μια τυχαία διαδικασία, όπου τα αποτελέσματά της συναρτήσει του χρόνου, απαρτίζει το τυχαίο σήμα *X(t)*. Μια τυχαία διαδικασία θεωρείται στάσιμη, όταν οι συναρτήσεις πυκνότητας *p(X(t))* είναι αναλλοίωτες στο χρόνο. Το σήμα μιας τυχαίας στάσιμης διαδικασίας, είναι ένα σήμα άπειρης ενέργειας. Αυτό έχεις ως αποτέλεσμα να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μετασχηματισμός Fourier, προκειμένου να περιγραφεί το σήμα *X(t)* στο πεδίο των συχνοτήτων. Προκειμένου να περιγραφεί το σήμα στο πεδίο των συχνοτήτων, χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Fourier στη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης.

$$S_X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} r_X(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \qquad \text{Εξ. (2.19)}$$

Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης μιας στάσιμης διαδικασίας *X(t)*, δίνεται από την εξίσωση,

$$r_X(\tau) = E\{X(t)\cdot X(t+\tau)\} \qquad \text{Εξ. (2.20)}$$

Η συνάρτηση *E{X(t)·X(t+τ)}* εκφράζει την αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier της εξίσωσης (2.19), δίνεται από τη σχέση,

$$r_X(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_X(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \qquad \text{Εξ. (2.21)}$$

Ο όρος S_X καλείται φάσμα της πυκνότητας ισχύος (power density spectrum) του σήματος *X(t)* και χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των σημάτων των GNSS στο πεδίο των συχνοτήτων.

Μια διακριτή τυχαία διαδικασία, θεωρείται ότι έχει μια πεπερασμένη μέση τιμή ισχύος. Σε αυτήν την περίπτωση, ο μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης, δίνεται από τη σχέση,

$$S_X(f) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} r_X(m) e^{-i2\pi f m} \qquad \text{Εξ. (2.22)}$$

Αντίστοιχα, ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier δίνεται από τη σχέση,

$$r_X(\tau) = \int_{-1/2}^{1/2} S_X(f) e^{i2\pi f m} df \qquad \text{Εξ. (2.23)}$$

2.2.2.β Τυχαία Αλληλουχία Παλμών

Μια τυχαία αλληλουχία παλμών, θεωρείται η αλληλουχία η οποία υπάγεται σε μια τυχαία διαδικασία *X(t)*. Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης μιας τυχαίας αλληλουχία, πλάτους από -1 έως 1 και διάρκειας T, δίνεται από τη σχέση,

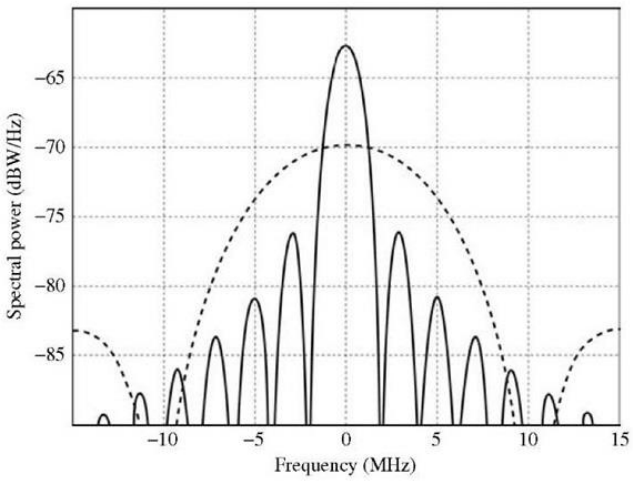
$$r_X(\tau) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right), & |\tau| \leq T \\ 0, & |\tau| > T \end{cases} \qquad \text{Εξ. (2.24)}$$

Ομοίως, στην περίπτωση των τυχαίων παλμών, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης έχει τριγωνική μορφή, με μήκος βάσης *2T* και ύψος 1. Το φάσμα πυκνότητας της ισχύος της αυτοσυσχέτισης των τετραγωνικών παλμών, δίνεται από τη σχέση,

$$S_X(\omega) = \int_{-T}^{T} r_X(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = \int_{-T}^{T} \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right) e^{-i\omega\tau} d\tau = T \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\omega T}{2}\right) \qquad \text{Εξ. (2.25)}$$

Το σήμα των GNSS ανήκει στην κατηγορία των τυχαίων σημάτων, καθώς είναι αποτέλεσμα σύνθεσης τριών σημάτων (φορέας, κώδικας και δεδομένα πλοήγησης) και είναι επιβαρυμένο με θόρυβο, ο οποίος οφείλεται στην διάδοση του μέσα από τα στρώματα της ατμόσφαιρας, σε παρεμβολές κτλ. Η απεικόνιση της εξίσωσης (2.25) στο πεδίο των συχνοτήτων, παρουσιάζει μια χαρακτηριστική καμπύλη για την ανάλυση των σημάτων GNSS. Τα σήματα των GNSS περιέχουν τους Ψευδοτυχαίου Θορύβου Κώδικες (PRN codes), οι οποίο είναι τετραγωνικοί παλμοί πλάτους από 0 έως 1 (ή -1 έως 1) και συγκεκριμένης διάρκειας. Η συνάρτηση της εξίσωσης (2.25), περιλαμβάνει τις συνιστώσες Fourier, δηλαδή τις συχνότητες των σημάτων που χρειάζονται, προκειμένου οι παλμοί να προσεγγισθούν με ημιτονοειδής (ή συνημιτονοειδής) συναρτήσεις. Η ακμή της συνάρτησης sinc εμφανίζεται στη κεντρική συχνότητα όπου μεταδίδεται το σήμα. Επιπλέον, το σχήμα της συνάρτησης sinc στο πεδίο των συχνοτήτων, εξαρτάται από τη διάρκεια του κάθε παλμού. Παλμοί μικρής διάρκειας, αυξάνουν το εύρος (null to null bandwidth) της συνάρτησης sinc στο πεδίο των συχνοτήτων. Αυτό συμβαίνει διότι όσο μικραίνει η διάρκεια του παλμού, μειώνεται και ο αριθμός των συνιστωσών Fourier που απαιτείται, προκειμένου να περιγραφεί ο συγκεκριμένος παλμός. Αντίστοιχα, όσο αυξάνεται η διάρκεια του παλμού, το εύρος της συνάρτησης sinc στενεύει. Επιπλέον, όσο αυξάνεται ο αριθμός των συνιστωσών που περιγράφουν ένα παλμό, το πλάτος των αντίστοιχων συνιστωσών μειώνεται. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η συνάρτηση sinc της συχνότητας L2 τους συστήματος GPS. Το συγκεκριμένο

διάγραμμα είναι μετατοπισμένο κατά $-f_{L2}$, προκειμένου το κέντρο της συνάρτησης sinc, να βρίσκεται στα 0 Hz.



Σχήμα 2.1 Αναπαράσταση της συχνότητας L2 του συστήματος GPS στο πεδίο των συχνοτήτων (Πηγή *GPS and Galileo: Dual RF Front-End Receiver and Design, Fabrication, and Test, 2009*) - Figure 2.1 Representation of GPS's L2 signal in frequency domain (Source *GPS and Galileo: Dual RF Front-End Receiver and Design, Fabrication, and Test, 2009*)

Οι δύο συναρτήσεις που φαίνονται στο Σχήμα 2.1, αντιστοιχούν στους κώδικες L2 P(Y) και L2C (Βλέπε Κεφάλαιο §3.2 Σήμα GPS). Ο στρατιωτικός κώδικας P(Y) αποτελεί μια αλληλουχία παλμών μικρής διάρκειας. Η απεικόνισή του στο πεδίο των συχνοτήτων, αυξάνει το εύρος της συνάρτησης sinc (Βλέπε Σχήμα 2.1 Διακεκομμένη καμπύλη). Αντίστοιχα, ο πολιτικός κώδικας L2C αποτελεί μια αλληλουχία παλμών μεγάλης διάρκειας. Η απεικόνισή του στο πεδίο των συχνοτήτων, εμφανίζεται στο Σχήμα 2.1 με τη μαύρη συνεχή γραμμή. Επιπλέον, για τον κώδικα L2C, οι μηδενικές συνιστώσες της συνάρτησης sinc, βρίσκονται σε απόσταση ±2π/T, ±4π/T, ±6π/T, … από την κεντρική συχνότητα.

2.3 Σειρές και Μετασχηματισμοί Fourier

Οι σειρές Fourier χρησιμοποιούνται για την περιγραφή περιοδικών σημάτων. Συγκεκριμένα, οι σειρές Fourier χρησιμοποιούν άπειρα αθροίσματα ημιτόνων ή συνημιτόνων για την περιγραφή οποιουδήποτε σήματος. Έστω μία συνάρτηση *f(x)* η οποία είναι περιοδική στο εύρος *[-L, L]*. Η σειρά Fourier της συγκεκριμένης συνάρτησης είναι,

$$f(x') = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{n\pi x'}{L}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{n\pi x'}{L}\right) \qquad \text{Εξ. (2.26)}$$

Οι συνιστώσες a_0, a_n και b_n δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$a_0 = \frac{1}{L}\int_{-L}^{L} f(x')dx'$$
$$a_n = \frac{1}{L}\int_{-L}^{L} f(x')\cos\left(\frac{n\pi x'}{L}\right)dx'$$
$$b_n = \frac{1}{L}\int_{-L}^{L} f(x')\sin\left(\frac{n\pi x'}{L}\right)dx' \qquad \text{Εξ. (2.27)}$$

Οι σειρές Fourier μπορούν να εκφραστούν με τη χρήση μιγαδικών εκθετικά συναρτήσεων. Έστω μια συνάρτηση *f(x)* η οποία αποτελείται από πραγματικούς αριθμούς. Η σειρά Fourier της συγκεκριμένης συνάρτησης δίνεται από την εξίσωση,

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{inx} \qquad \text{Εξ. (2.28)}$$

Η μιγαδική εκθετική συνάρτηση δίνεται από τον τύπο του Euler,

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x \qquad \text{Εξ. (2.29)}$$

Με βάση την εξίσωση (2.29), ο όρος A_n της εξίσωσης (2.28) δίνεται από τη σχέση,

$$A_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-inx} dx \qquad \text{Εξ. (2.30)}$$

Ο όρος A_n περιγράφει τις συνιστώσες Fourier της συνάρτησης *f(x)*, οι οποίες δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις.

$$A_n = \begin{cases} \frac{1}{2}(a_n + ib_n), & n < 0 \\ \frac{1}{2} a_0, & n = 0 \\ \frac{1}{2}(a_n - ib_n), & n > 0 \end{cases} \qquad \text{Εξ. (2.31)}$$

Γενικότερα, για μια περιοδική συνάρτηση στο εύρος *[-L/2, L/2]* η σειρά Fourier καθώς και οι συνιστώσες της, δίνονται από τις εξισώσεις,

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{i(\frac{2\pi nx}{L})}$$
$$A_n = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{-L/2} f(x) e^{-i(\frac{2\pi nx}{L})} dx \qquad \text{Εξ. (2.32)}$$

Ο μετασχηματισμός Fourier αποτελεί μια επέκταση των σειρών Fourier όταν η περίοδος *L* τείνει στο άπειρο και η διακριτή συνιστώσα A_n αντικατασταθεί με ένα συνεχές σήμα *F(k)* όταν ο όρος *n/L* τείνει στο *k*.

$$F(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-2\pi ixk} dx \qquad \text{Εξ. (2.33)}$$

Ο μετασχηματισμός Fourier, χρησιμοποιείται για τη μετατροπή ενός σήματος *f(x)* στο πεδίο του χρόνου, σε ένα σήμα *F(x)* στο πεδίο των συχνοτήτων. Ο μετασχηματισμός της εξίσωσης (2.33) καλείται εμπρόσθιος μετασχηματισμός Fourier, ενώ ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier δίνεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$f(x) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} F(k)e^{2\pi ixk}dk \qquad \text{Εξ. (2.34)}$$

Τα δεδομένα εξόδου του μετασχηματισμού Fourier, περιγράφουν τις συχνότητες που εντοπίζονται στο εισαγόμενο σήμα. Στη συνέχεια, οι συχνότητες ολοκληρώνονται (αθροίζονται) προκειμένου να προκύψει η τελική συνάρτηση, η οποία είναι συναρτήσει των συχνοτήτων που εντοπίζονται στο σήμα. Οι συχνότητες του εισαγόμενου σήματος, εμφανίζονται ως κορυφές στο πεδίο των συχνοτήτων. Οι σειρές και οι μετασχηματισμοί Fourier είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι στην ανάλυση των δορυφορικών σημάτων, καθώς βοηθούν στην περιγραφή των τετραγωνικών παλμών [Βλέπε παράγραφο §3.2.2 Κώδικες Ψευδοτυχαίου Θορύβου (PRN codes)] με χρήση ημιτόνων και συνημιτόνων. Επιπλέον, η αναπαράσταση των σημάτων στο πεδίο των συχνοτήτων, παρουσιάζει κάποια βασικά χαρακτηριστικά τα οποία αξιοποιούνται από τους δέκτες (Βλέπε παράγραφο §2.2.2.β Τυχαία Αλληλουχία Παλμών).

2.4 Δειγματοληψία

Η δειγματοληψία ενός σήματος, είναι μια απαραίτητη διαδικασία στην ανάλυσης σήματος, καθώς μετατρέπει ένα συνεχές σήμα, σε διακριτό. Έστω το ληφθέν σήμα *x(t)*, στο οποίο γίνεται δειγματοληψία, ανά T_S δευτερόλεπτα. Ο όρος T_S καλείται περίοδος δειγματοληψίας, ενώ η συχνότητα $f_S=1/T_S$, καλείται ρυθμός δειγματοληψίας. Ο ρυθμός δειγματοληψίας, με βάση το θεώρημα του Nyquist [4], πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το διπλάσιο εύρος της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης, προκειμένου να αποφευχθούν επικαλύψεις στο φάσμα (aliasing).

Γενικότερα, η μαθηματική έκφραση της δειγματοληψίας *x(t)*, δίνεται από τη σχέση,

$$x_\delta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_S)\delta(t - nT_S) \qquad \text{Εξ. (2.35)}$$

Στην εξίσωση (2.35) ο όρος $x(nT_S)$ υποδηλώνει μια άπειρη αλληλουχία δειγμάτων, ενώ ο όρος $\delta(t\text{-}nT_S)$ υποδηλώνει τη συνάρτηση Δέλτα, δηλαδή τη συνάρτηση ενός μοναδιαίου παλμού, ο οποίος είναι το τοποθετημένος στη χρονική στιγμή $t=nT_S$. Ο μετασχηματισμός Fourier του σήματος $x_\delta(t)$, δίνεται από τη σχέση,

$$X_\delta(f) = f_S \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f - nf_S) \qquad \text{Εξ. (2.36)}$$

3. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ

3.1 Γενικά Στοιχεία

Τα Παγκόσμια Συστήματα Δορυφορικής Πλοήγησης (GNSS) αποτελούν ένα πλήθος δορυφόρων, οι οποίοι κινούνται σε ελλειπτικές τροχιές γύρω από την Γη. Σκοπός των συγκεκριμένων δορυφόρων, είναι να παρέχουν συνεχόμενα σήματα, τα οποία ανήκουν στο πεδίο των ραδιοσυχνοτήτων. Ωστόσο, τα συγκεκριμένα σήματα δεν περιλαμβάνουν μόνο μια σειρά ημιτόνων ή συνημιτόνων. Τα μεταδιδόμενα σήματα περιλαμβάνουν δύο επιπλέον χαρακτηριστικά. Το πρώτο χαρακτηριστικό είναι μία αλληλουχία συγχρονισμού, η οποία χρησιμοποιείται για τη διαφοροποίηση του εκάστοτε δορυφόρου, από όλους τους υπόλοιπους, καθώς και για τον υπολογισμό του χρόνου που έκανε το σήμα για να φτάσει στο δέκτη. Το δεύτερο χαρακτηριστικό αφορά μια σειρά δεδομένων, τα οποία περιλαμβάνουν τη θέση και τη κατάσταση του δορυφόρου από τον οποίο μεταδίδονται, ενώ παρέχουν και πληροφορίες για τους υπόλοιπους δορυφόρους. Τα σήματα αυτά λαμβάνονται από τους δέκτες GNSS, προκειμένου να επεξεργαστούν και να προκύψει η θέση και το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη.

Τα δημοφιλέστερα από αυτά τα συστήματα, είναι το αμερικάνικο σύστημα εντοπισμού το οποίο καλείται GPS, το ρωσικό σύστημα εντοπισμού το οποίο καλείται GLONASS, το ευρωπαϊκό σύστημα εντοπισμού το οποίο φέρει το όνομα Galileo και το κινέζικο σύστημα εντοπισμού το οποίο καλείται BeiDou. Πρόσφατα έχουν προστεθεί τα συστήματα εντοπισμού της Ιαπωνίας το οποίο καλείται QZSS, καθώς και το σύστημα εντοπισμού της Ινδίας, το οποίο φέρει το όνομα NavIC. Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται τα διαθέσιμα συστήματα εντοπισμού, μαζί με τον αριθμό των διαθέσιμων δορυφόρων, καθώς και του αριθμού των συχνοτήτων μετάδοσης.

Πίνακας 3.1 Διαθέσιμα συστήματα εντοπισμού (Πηγή *Wikipedia/Satellite Navigation*) - Table 3.1 Available navigation systems (Source *Wikipedia/Satellite Navigation*)

GNSS	**Αριθμός Ενεργών Δορυφόρων**	**Αριθμός Συχνοτήτων Μετάδοσης**
GPS	24	3
GLONASS	24	3
Galileo	24	3
BeiDou	28	4
QZSS	4	4
NavIC	8	2

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, γίνεται εκτενής περιγραφή των συστημάτων GPS και Galileo. Η συγκεκριμένη ανάλυση, αποσκοπεί στη βαθύτερη κατανόηση των σημάτων των συγκεκριμένων συστημάτων εντοπισμού, ενώ για την καλύτερη κατανόηση της συγκεκριμένης μελέτης, χρησιμοποιήθηκε το σήμα της L1 C/A του συστήματος GPS, ενώ για το σύστημα Galileo χρησιμοποιήθηκε το σήμα L1 OS.

3.2 Σήμα GPS

3.2.1 Περιγραφή του Σήματος GPS

3.2.1.α Συχνότητες Μετάδοσης

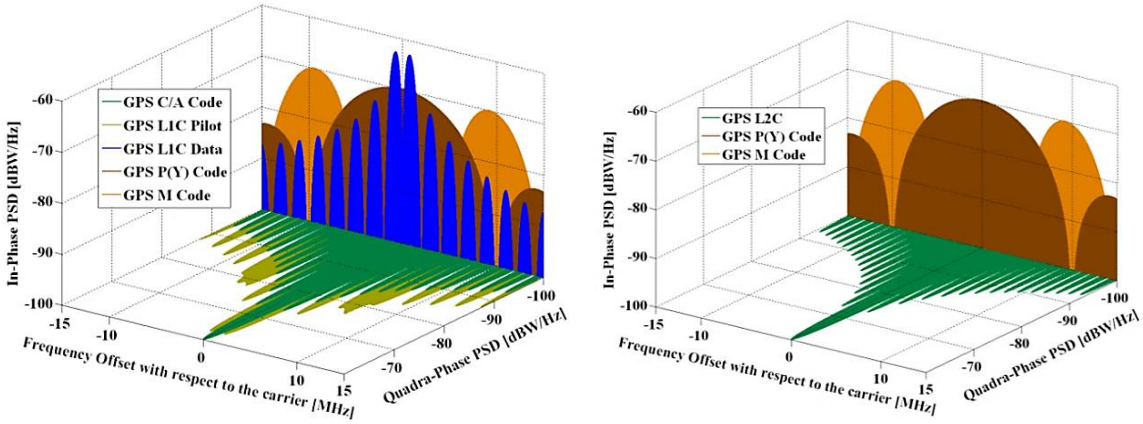
Το Global Position System (GPS) είναι το αμερικάνικο σύστημα εντοπισμού, το οποίο είναι πλήρως λειτουργικό από το 1993. Την 1 Μαΐου του 2000 έγινε η άρση του προγράμματος Επιλεκτικής Διαθεσιμότητας (Selective Availability) [5] και έκτοτε, χρησιμοποιείται καθολικά τόσο από ερευνητές, όσο και από το ευρύ κοινό.

Τα σήματα του GPS ανήκουν στο φάσμα των UHF, το οποίο καλύπτει ένα εύρος από 500 MHz έως 3 GHz. Τα δύο βασικά φέροντα κύματα του GPS, αναφέρονται ως L1 και L2 και παράγονται από τη θεμελιώδη συχνότητα f_0 = 10.23 MHz. Η συγκεκριμένη συχνότητα παράγεται από τα ατομικά ρολόγια των δορυφόρων και παράγει τις δύο φέρουσες συχνότητας.

$$f_{L1} = 154 f_0 = 1575.42 \text{ MHz}, \ \lambda_{L1} = \frac{c}{f_{L1}} \approx 19.03 \text{ cm} \qquad \text{Εξ. (3.1)}$$

$$f_{L2} = 120 f_0 = 1227.60 \text{ MHz}, \ \lambda_{L2} = \frac{c}{f_{L2}} \approx 24.42 \text{ cm} \qquad \text{Εξ. (3.2)}$$

3.2.1.β Δεδομένα του Σήματος GPS



Σχήμα 3.1 Διαγραμματική αναπαράσταση του εύρους των L1και L2 στο πεδίο των συχνοτήτων (Πηγή *EESA/Navipedia/GPS_Signal*) - Figure 3.1 Spectra of L1 and L2 in frequency domain (Source *EESA/Navipedia/GPS_Signal*)

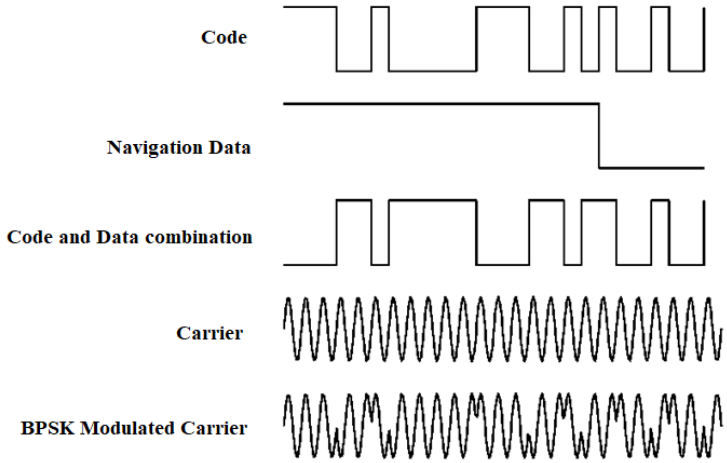
Ο κάθε ένας από τους δορυφόρους του συστήματος GPS, μεταδίδει δύο μετρητικούς κώδικές (PRN Codes). Οι κώδικες είναι ακολουθία δυαδικών ψηφίων (0 και 1) και μεταδίδονται ως ορθογωνικοί παλμοί, πλάτους -1 και 1. Ο πρώτος κώδικας αναφέρεται ως Coarse Acquisition (C/A) και αποτελεί μια αλληλουχία 1023 chips (το 1 chip αντιστοιχεί σε 1 bit, όμως η διαφορά τους είναι ότι το chip δεν περιέχει πληροφορία) με εύρος 2 MHz. Ο συγκεκριμένος κώδικας επαναλαμβάνεται κάθε 1 ms (μήκος κύματος παλμού 300 m), παρέχοντας ένα ρυθμό chip των 1.023 MHz (ή 1.023 Mcps). Ο δεύτερος κώδικας αναφέρεται ως Precise (P) και μεταδίδεται κρυπτογραφημένος ως P(Y). Ο συγκεκριμένος κώδικάς αποτελεί μια αλληλουχία $2.35 \cdot 10^4$ chips, ενώ ο ρυθμός παραγωγής των chip είναι στα 10.23 MHz (ή 10.23 Mcps). Το εύρος του P(Y) είναι 20 MHz και επαναλαμβάνεται κάθε εβδομάδα (μήκος κύματος παλμού 30 m), με αφετηρία την πρώτη μέρα της εβδομάδα GPS (τα μεσάνυχτα της Κυριακής). Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται ο γεωμετρικός τόπος των συντελεστών Fourier (συνάρτηση sinc) των C/A και P(Y) στο πεδίο των συχνοτήτων. Στον άξονα In-Phase

PSD, εμφανίζεται η ένταση των σημάτων του φορέα, ενώ στον άξονα εμφανίζεται η ένταση των σημάτων με μετατοπισμένο φορέα κατά 90°.

Επιπρόσθετα, ο κάθε φορέας μεταφέρει τα δεδομένα πλοήγησης (navigation data) τα οποία περιέχουν πληροφορίες, σχετικά με τις τροχιές και τα ρολόγια των δορυφόρων. Τα συγκεκριμένα δεδομένα μεταδίδονται σε όλους τους δορυφόρους από επίγειους μόνιμους σταθμούς παρατήρησης (GCS), ενώ ο ρυθμός παραγωγής των bit είναι 50 bps (μήκος κύματος παλμού 6000km).

3.2.1.γ Διαμόρφωση του Φορέα

Ο κώδικας σε συνδυασμό με τα δεδομένα πλοήγησης, είναι αυτά που διαμορφώνουν των φορέα, προκειμένου να παραχθεί το μεταδιδόμενο αναλογικό σήμα.



Σχήμα 3.2 Διαμόρφωση φορέα της L1 με τη μέθοδο BPSK (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 3.2 BPSK Modulation of the L1 carrier wave (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*)

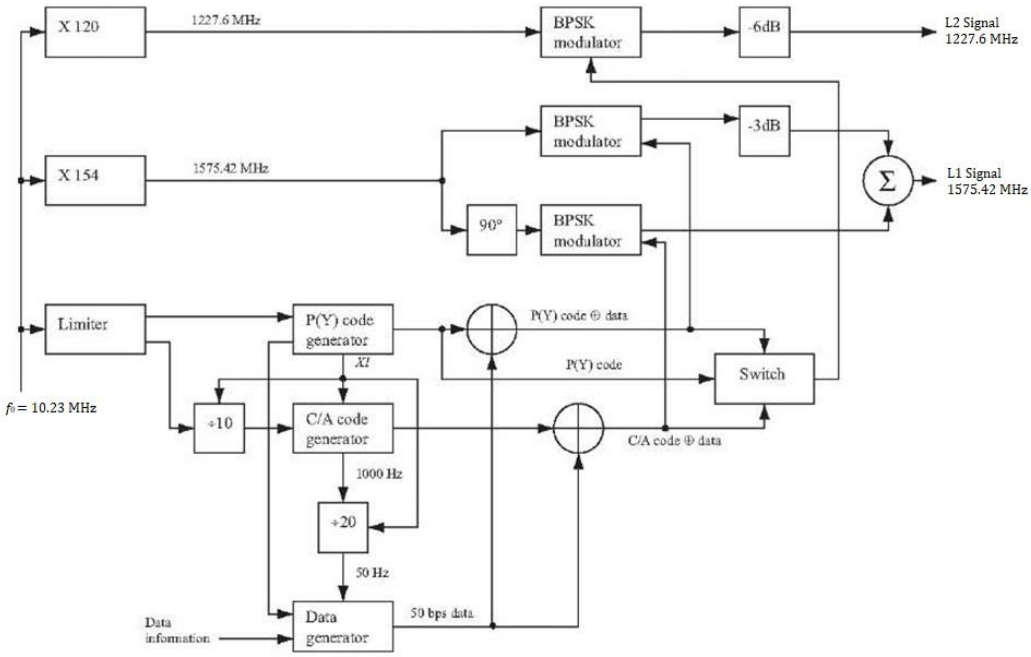
Στο Σχήμα 3.2 περιγράφει τη διαμόρφωση του φορέα της L1 από τον κώδικα και τα δεδομένα πλοήγησης. Στην πρώτη γραμμή εμφανίζονται τα πρώτα 25 chips του κώδικα C/A για τη συχνότητα L1. Το κάθε chip του κώδικα μεταδίδεται ανά 1 μs, ενώ το κάθε chip των Navigation Data μεταδίδεται ανά 20 ms. Στην τρίτη γραμμή φαίνεται η συγχώνευση του κώδικα, με τα δεδομένα πλοήγησης. Η συγχώνευση των δύο δυαδικών αλληλουχιών γίνεται μέσω της πρόσθεσης modulo-2 ($\oplus$). Ο modulo-2 χρησιμοποιεί τον γραμμικό τελεστή αποκλειστικής διάζευξης XOR, προκειμένου να συγχωνεύσει τα δυαδικά δεδομένα. Στον Πίνακα 3.2 φαίνονται τα πιθανά αποτελέσματα του τελεστή XOR.

Πίνακας 3.2 Αποτελέσματα του τελεστή OR (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Table 3.2 Output of the exclusive OR operation (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*)

Bit (Κώδικας)	Bit (Δεδομένα πλοήγησης)	Αποτέλεσμα τελεστή XOR
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Σε περίπτωση που οι δυαδικές ακολουθίες αποτελούνται από τα ψηφία -1 και 1 (NRZ), τότε αντί για το τελεστή XOR μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο κανονικός πολλαπλασιασμός. Ο συνδυασμός του κώδικα και των δεδομένων πλοήγησης, διαμορφώνουν τον φορέα με τη μέθοδο της Δυαδικής Διφασικής Διαμόρφωσης (Binary Phase Shift Keying - BPSK). Η συγκεκριμένη μέθοδος διαμόρφωσης είναι δυαδική, δηλαδή μετατοπίζει τη φάση του φορέα κατά 0° αν το αποτέλεσμα του XOR είναι 0 (ή -1), ενώ αν το αποτέλεσμα του XOR είναι 1, τότε μετατοπίζει τη φάση του φορέα κατά 180°.

3.2.1.δ Παραγωγή του Σήματος GPS



Σχήμα 3.3 Παραγωγή του σήματος του GPS (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 3.3 Generation of GPS signal (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*)

Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται η παραγωγή του σήματος GPS, για τις συχνότητες L1 και L2. Από τη θεμελιώδη συχνότητα f_0 προκύπτουν οι φορείς της L1 και L2. Επιπλέον, χρησιμοποιείται και ένας περιοριστής (Limiter) προκειμένου να προσαρμόσει τη συχνότητα, για την παραγωγή των κωδικών P(Y) και C/A, καθώς και του μηνύματος πλοήγησης. Ο κάθε ένας από τους κώδικες, προστίθεται με τα δεδομένα πλοήγησης μέσω ενός modulo-2. Ο κώδικας μαζί με τα δεδομένα πλοήγησης, εισάγονται στους διαμορφωτές, προκειμένου να διαμορφώσουν τους φορείς L1 και L2. Στην περίπτωση της L1, ο φορέας διαμορφώνεται στις συνιστώσες I&Q. Πιο συγκεκριμένα, η διαμόρφωση του φορέα από τον κώδικα C/A και τα δεδομένα πλοήγησης, γίνεται στη συνιστώσα Q, ενώ η διαμόρφωση του φορέα από τον κώδικα P(Y) και τα δεδομένα πλοήγησης, γίνεται στη συνιστώσα I. Η συνιστώσα I μειώνεται σε ένταση κατά 3 dB και έπειτα προστίθεται στη συνιστώσα Q, προκείμενου να παραχθεί το τελικό σήμα της L1. Στην περίπτωση της L2, ο φορέας διαμορφώνεται μόνο από τον κώδικα P(Y) και τα δεδομένα πλοήγησης και στη συνέχεια, μειώνεται σε ένταση κατά 6 dB. Το σήμα που φθάνει στους δέκτες από τους δορυφόρους του GPS, δίνεται από την εξίσωση (3.3).

$$s^k(t) = \sqrt{2P_{CL1}}\left(C^k(t) \oplus D^k(t)\right)\cos(2\pi f_{L1}t) + \sqrt{2P_{PL1}}\left(P^k(t) \oplus D^k(t)\right)\sin(2\pi f_{L1}t) + \sqrt{2P_{PL2}}\left(P^k(t) \oplus D^k(t)\right)\sin(2\pi f_{L2}t) \quad \text{Εξ. (3.3)}$$

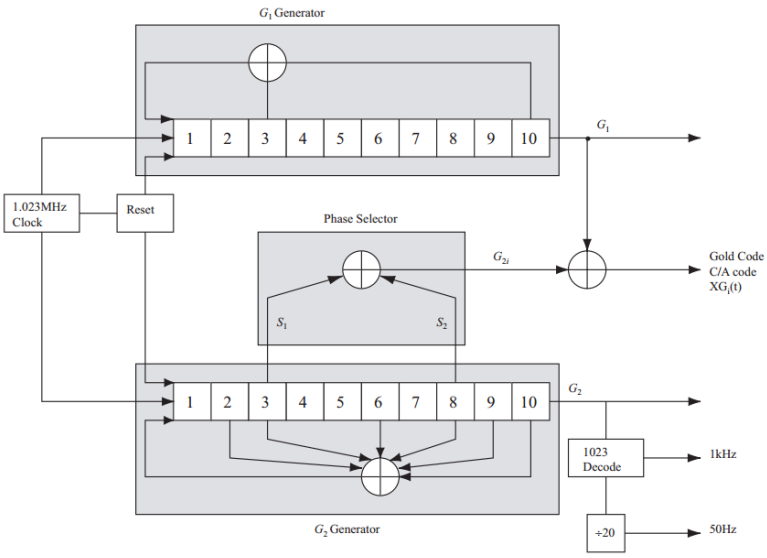
Στην εξίσωση (3.3) οι όροι P_{CL1}, P_{PL1} και P_{PL2} αναφέρονται στην ισχύ των σημάτων με τους κώδικες C/A και P(Y), οι όροι C_k και P_k αναφέρονται στους κώδικες C/A και P(Y) αντίστοιχα που προέρχεται από το δορυφόρο k, ο όρος D_k αναφέρεται στο μήνυμα πλοήγησης του δορυφόρου k και οι όροι f_{L1} και f_{L2}, αναφέρονται στις συχνότητες των φορέων L1 και L2 αντίστοιχα.

3.2.2 Κώδικες Ψευδοτυχαίου Θορύβου

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο §3.2.1.β Δεδομένα του Σήματος GPS, ο κάθε δορυφόρος μεταδίδει δύο κώδικες οι οποίοι χρησιμεύουν στην ανάκτηση του σήματος από τον δέκτη. Οι συγκεκριμένοι κώδικες, αναφέρονται συχνά ως Gold Κώδικες ή Αλληλουχία Gold [6]. Όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, οι συγκεκριμένοι κώδικες έχουν δύο πολύ χαρακτηριστικές ιδιότητες συσχέτισης (correlation properties). Η πρώτη ιδιότητα, είναι ότι ο κάθε κώδικας έχει μια πολύ ισχυρή κορυφή συσχέτισης με το ακριβές αντίγραφό του (συνάρτηση αυτοσυσχέτισης), ενώ η δεύτερη ιδιότητα είναι ότι ο κάθε κώδικας έχει πολύ χαμηλή συσχέτιση με όλους τους υπόλοιπους κώδικες (συνάρτηση ετεροσυσχέτισης). Στη συγκεκριμένη παράγραφο, θα γίνει η περιγραφή της παραγωγής των PRN κωδικών, καθώς και των ιδιοτήτων τους. Για την καλύτερη κατανόηση των επόμενων παραγράφων, η ανάλυση θα γίνει στον κώδικα C/A.

3.2.2.α Παραγωγή Αλληλουχιών Gold

Η αλληλουχία των κωδικών PRN, αν και παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με μια τυχαία αλληλουχία bit, η παραγωγή της είναι πλήρως ντετερμινιστική. Για την παραγωγή του κώδικα C/A χρησιμοποιείται ένας καταχωρητής ολίσθησης LFSR. Η γενικότερη χρήση των καταχωρητών ολίσθησης (shift registers), αφορά στην εισαγωγή και εξαγωγή των bits σε ένα κύκλωμα. Για την εξαγωγή των bit, χρησιμοποιείται ένα ρολόι το οποίο σε κάθε παλμό, μετατοπίζει την ακολουθία των bit κατά μία θέση δεξιά ή αριστερά (ανάλογα την αρχιτεκτονική του shift register). Το χαρακτηριστικό τους είναι ότι τα δεδομένα εξόδου, επηρεάζονται και από την παροντική, αλλά και την παρελθοντική κατάσταση των δεδομένων εισόδου (feedback). Ο LFSR είναι ένας καταχωρητής ολίσθησης, του οποίου τα δεδομένα εισόδου (bits), είναι γραμμική συνάρτηση των δεδομένων εισόδου του προηγούμενου παλμού.



Σχήμα 3.4 Παραγωγή του κώδικα C/A (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 3.4 C/A code generator (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*)

Ο C/A κώδικα, αποτελείται από δύο shift register G1 και G2 (Βλέπε Σχήμα 3.4). Ο κάθε ένας από τους G1 και G2, αποτελείται από 10 κελιά και είναι συνδεδεμένος με ένα ρολόι των 1.023 MHz. Ο αριθμός των στοιχείων (chips) της κάθε αλληλουχίας, δίνεται από την εξίσωση (3.4).

$$N = 2^n - 1 \qquad \text{Εξ. (3.4)}$$

Στην περίπτωση του C/A κώδικα, το n = 10 και προκύπτει ότι ο αριθμός των στοιχείων είναι ίσος με 1023. Αυτό σημαίνει ότι μετά από 1023 στοιχεία, θα επαναληφθεί η προηγούμενη αλληλουχία.

Όπως αναφέρθηκε ήδη, τα δεδομένα εξόδου των LFSR είναι γραμμικός συνδυασμός των προηγούμενων δεδομένων εξόδου. Επιπλέον, σε κάθε παλμό που δέχεται από το ρολόι των 1.023 MHz, το περιεχόμενο των 10 καναλιών ολισθαίνει στο επόμενο κελί προς τα δεξιά. Στην περίπτωση του G1, το πρώτο κελί προκύπτει ως άθροισμα modulo-2, των κελιών 3 και 10. Η μαθηματική έκφραση της παραπάνω διαδικασίας, προκύπτει από το πολυώνυμο της εξίσωσης (3.5).

$$f(x) = 1 + x^3 + x^{10} \qquad \text{Εξ. (3.5)}$$

Το παραπάνω πολυώνυμο εκφράζει την τιμή του πρώτου κελιού, ως άθροισμα modulo-2 των τριών αυτών όρων. Οι όροι x^3 και x^{10}, εκφράζουν την τιμή του bit στο 3° και 10° κελί αντίστοιχα. Το εξαγόμενο bit στο 10° κελί, αποτελεί το δεδομένο εξόδου σε κάθε παλμό. Στην περίπτωση του G2, τα πράγματα διαφοροποιούνται. Το πρώτο κελί προκύπτει ως άθροισμα modulo-2, των κελιών 2, 3, 6, 8, 9 και 10. Το πολυώνυμο του G2 φαίνεται στην εξίσωση (3.6).

$$f(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^6 + x^8 + x^9 + x^{10} \qquad \text{Εξ. (3.6)}$$

Η διαφοροποίηση του ως προς τον G1, είναι ότι το bit εξόδου δεν προκύπτει από το εξαγόμενο bit του κελιού 10. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.4, επιλέγονται δύο επιπλέον κελιά, τα οποία αθροίζονται μέσω ενός modulo-2 (phase selector). Οι διάφοροι συνδυασμοί των κελιών αυτών, προσδίδουν την ίδια ακολουθία με διαφορετικές καθυστερήσεις (ή ολισθήσεις). Το άθροισμα modulo-2 που προκύπτει από τα δύο κελιά, είναι το δεδομένο εξόδου του G2. Η συγκεκριμένη καθυστέρηση του bit εξόδου της G2, είναι αυτή που προσδίδει τον PRN του κάθε δορυφόρου. Συνοπτικά, κάθε δορυφόρος χρησιμοποιεί διαφορετικό ζευγάρι κελιών στον G2, προκειμένου να διαφοροποιείται από τους υπόλοιπους δορυφόρους.

Αφού ολοκληρωθούν οι δύο αλληλουχίες των 1023 chips, αθροίζονται μέσω ενός modulo-2 προκειμένου να προκύψει ένας κώδικας με 1023 chips. Στην περίπτωση του κώδικα P, ακολουθείται η ίδια αρχή με τη διαφοροποίηση ότι υπάρχουν 4 καταχωρητές ολίσθησης, των 12 κελιών. Οι δύο καταχωρητές δημιουργούν την πρώτη ακολουθία των 15,345,000 chips η οποία επαναλαμβάνεται κάθε 1.5 sec και οι δύο υπολειπόμενοι καταχωρητές, δημιουργούν μια αλληλουχία των 15,345,037 chips με τις αντίστοιχες ολισθήσεις. Οι δύο αλληλουχίες αθροίζονται μέσω ενός modulo-2, προκείμενου να προκύψει ο κώδικας P.

3.2.2.β Ιδιότητες Συσχέτισης των Κωδικών Gold

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου §3.2.2 Κώδικες Ψευδοτυχαίου Θορύβου (PRN codes), οι συγκεκριμένοι κώδικες έχουν δύο χαρακτηριστικές ιδιότητες συσχέτισης. Γενικότερα, η συσχέτιση *r* δύο κωδικών *C*, με πλάτος παλμού -1 και 1, από τις πηγές *i* και *j*, δίνεται από την εξίσωση (3.7).

$$r_{ij}(m) = \sum_{l=1}^{2^n-1} C^i(l)C^j(l+m) \qquad \text{Εξ. (3.7)}$$

Στην εξίσωση (2.7) φαίνεται το κανονικό γινόμενο των κωδικών C^i και C^j. Η άθροιση γίνεται για κάθε chip (*l*), ενώ ο όρος *m* στον κωδικό του C^j, υποδηλώνει την καθυστέρηση του κώδικα C^j, ως προς τον κώδικα C^i.

Συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης

Η πρώτη συσχέτιση αφορά τη σύγκριση του κώδικα ενός δορυφόρου *k*, με το ακριβές αντίγραφο του δορυφόρου *k*. Η συσχέτιση ενός κώδικα με τον εαυτό του, είναι πολύ ισχυρή όταν η καθυστέρηση του κώδικα είναι 0. Σε διαφορετική περίπτωση (όταν δηλαδή υπάρχει καθυστέρηση στο ένα σήμα), τότε η εξίσωση (3.7) γίνεται,

$$r_{kk}(m) = \sum_{l=1}^{2^n-1} C^k(l)C^k(l+m) \approx 0, \qquad |m| \geq 1 \qquad \text{Εξ. (3.8)}$$

Στην περίπτωση υψηλής συσχέτισης, όλα τα chips των δύο κωδικών ταυτίζονται. Οπότε σε μία αλληλουχία 1023 chips (C/A κώδικας), με βάση το κανονικό γινόμενο των ψηφίων -1 και 1, προκύπτει ότι η συσχέτιση της εξίσωσης (3.8) παίρνει την τιμή 1023. Γενικότερα η κορυφή της υψηλής συσχέτισης δίνεται από τη σχέση,

$$r_{kk,peak} = 2^n - 1 \qquad \text{Εξ. (3.9)}$$

Στην περίπτωση όπου η καθυστέρηση δεν είναι 0, τότε η τιμή της συνάρτησης συσχέτισης προκύπτει από τη σχέση (3.9),

$$|r_{kk}| \leq 2^{(n+2)/2} + 1 \qquad \text{Εξ. (3.10)}$$

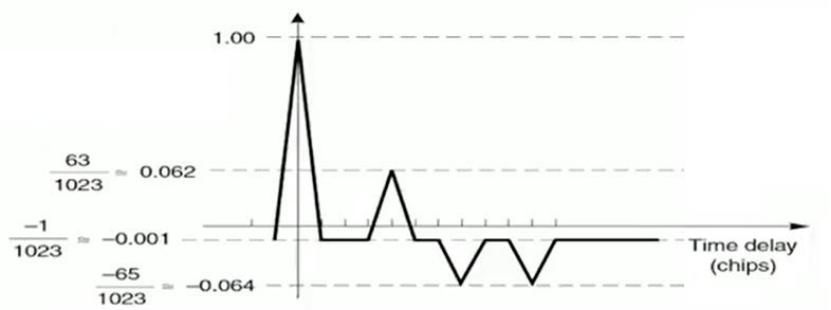
Με βάση την εξίσωση (3.10), η τιμή της συνάρτησης συσχέτισης του C/A κώδικα, παίρνει την τιμή 65 όταν υπάρχει καθυστέρηση. Η τιμή αυτή, εκφράζει τον αριθμό των chips που ταυτίστηκαν στους δύο κώδικες.

Συνάρτηση Ετεροσυσχέτισης

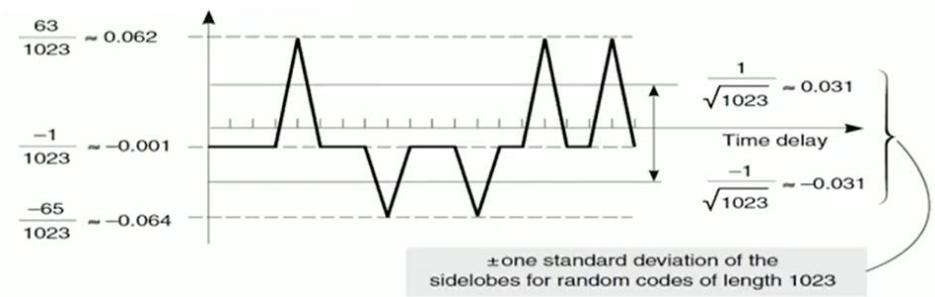
Η δεύτερη συσχέτιση αφορά τη σύγκριση δύο κωδικών, από δύο δορυφόρους *i* και *j*. Σε αυτή την περίπτωση η συνάρτηση συσχέτισης θα ικανοποιεί πάντα την εξίσωση (3.10), δηλαδή οι δύο κώδικες δεν θα έχουν καμία συσχέτιση.

$$r_{ij}(m) = \sum_{l=1}^{2^n-1} C^i(l)C^j(l+m) \approx 0, \qquad m = \pm1, \pm2, \pm3 \ldots \qquad \text{Εξ. (3.11)}$$

Στην πραγματικότητα, ο κώδικας C/A έχει τέσσερα επίπεδα αυτοσυσχέτισης και τρία επίπεδα ετεροσυσχέτισης [7]. Τα επίπεδα αυτά εκφράζονται με την έκφραση *r/N*, όπου *r* το αποτέλεσμα της συνάρτησης συσχέτισης και *N*, ο αριθμός των ψηφίων του κώδικα. Τα επίπεδα του συσχέτισης φαίνονται στα Σχήματα 3.5 και 3.6 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.5 Επίπεδα αυτοσυσχέτισης του κώδικα C/A (Πηγή *Global Position System: Theory and Applications Volume 2*) - Figure 3.5 Auto correlation levels of C/A code (Source *Global Position System: Theory and Applications Volume 2*)



Σχήμα 3.6 Επίπεδα ετεροσυσχέτισης του κώδικα C/A (Πηγή *Global Position System: Theory and Applications Volume 2*) - Figure 3.6 Cross correlation levels of C/A code (Source *Global Position System: Theory and Applications Volume 2*)

Στα Σχήματα 3.5 και 3.6, φαίνονται τα επίπεδα συσχέτισης ενός κώδικα C/A, συναρτήσει της καθυστέρησης του κώδικα. Περισσότερα για τη συσχέτιση του κώδικα με το ακριβές αντίγραφο του δέκτη, θα αναλυθούν στο Κεφάλαιο 5. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ – ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ.

3.2.3 Μετατοπίσεις Doppler

Το φαινόμενο Doppler αφορά στη μεταβολή της λαμβανόμενης συχνότητας ενός κύματος που παρατηρεί ένας δέκτης, από αυτή που εκπέμπεται από έναν πομπό λόγω της σχετικής κίνησης του συστήματος πομπού-δέκτη. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του στατικού δέκτη η λαμβανόμενη συχνότητα αυξάνεται, όσο ο πομπός πλησιάζει το δέκτη, ενώ όσο ο πομπός απομακρύνεται από το δέκτη, τότε η λαμβανόμενη συχνότητα μειώνεται. Η συγκεκριμένη ιδιότητα των κυμάτων, βρίσκει πληθώρα εφαρμογών σε διάφορους κλάδους των θετικών επιστημών. Για παράδειγμα, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενός άστρου σε έναν παρατηρητή από τη Γη, μετατοπίζεται προς το ιώδες όταν το άστρο πλησιάζει προς τον παρατηρητή, ενώ όταν το άστρο απομακρύνεται από τον παρατηρητή μετατοπίζεται προς το ερυθρό.

Στην περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όπου ανήκουν και τα σήματα των GNSS, οι ολισθήσεις Doppler οφείλονται στη σχετική κίνηση του δορυφόρου ως προς δέκτη (περίπτωση στατικού σεναρίου εντοπισμού). Αν f_S η συχνότητα του φορέα που εκπέμπεται

από το δορυφόρο, u η σχετική ταχύτητα του δορυφόρου ως προς το δέκτη και c η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο κενό (ταχύτητα του φωτός) και λαμβάνοντας υπόψη την ειδική θεωρία της σχετικότητας, τότε η παρατηρήσιμη συχνότητα f_R του δέκτη δίνεται από την εξίσωση (3.12).

$$f_R = f_S \left(\frac{1 - \frac{u cos\theta}{c}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \right) \qquad \text{Εξ. (3.12)}$$

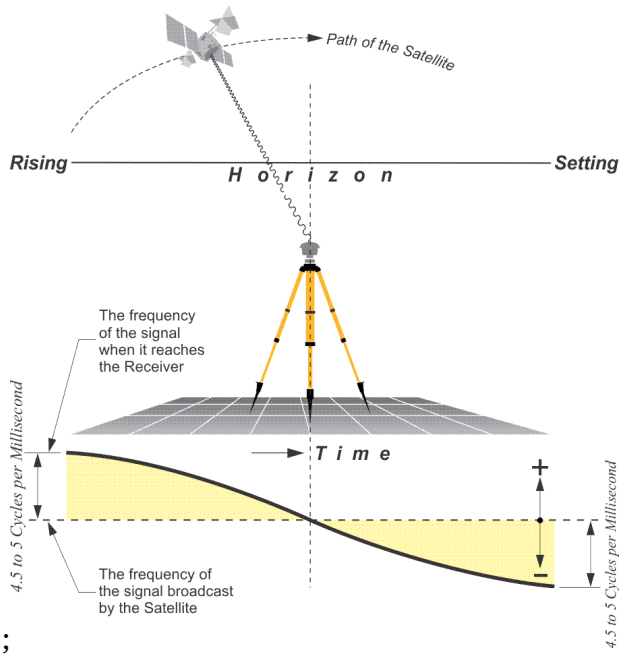
Η γωνία θ, είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της διεύθυνσης της γραμμικής ταχύτητας u και της διεύθυνσης διάδοσης του σήματος. Χρησιμοποιώντας τη διωνυμική ανάπτυξη, εξίσωση (3.12) παίρνει τη μορφή,

$$f_R = f_S \left(1 - \frac{u cos\theta}{c}\right) \left(1 + \frac{u^2}{2c^2} + \frac{u^4}{8c^4} + \cdots\right) \qquad \text{Εξ. (3.13)}$$

Επειδή η ταχύτητα ενός δορυφόρου u (≈ 3.9 km/s) είμαι πολύ μικρότερη σε σχέση με αυτής της ταχύτητας του φωτός c (≈ 300,000 km/s), η εξίσωση (3.13) μπορεί να προσεγγιστεί με την εξίσωση,

$$f_R = f_S \left(1 - \frac{u cos\theta}{c}\right) = f_S \left(1 - \frac{u_\rho}{c}\right) \qquad \text{Εξ. (3.14)}$$

Στην εξίσωση (3.14), το u_ρ εκφράζει το ρυθμό μεταβολής της απόστασης δορυφόρου-δέκτη ως προς το χρόνο.



;

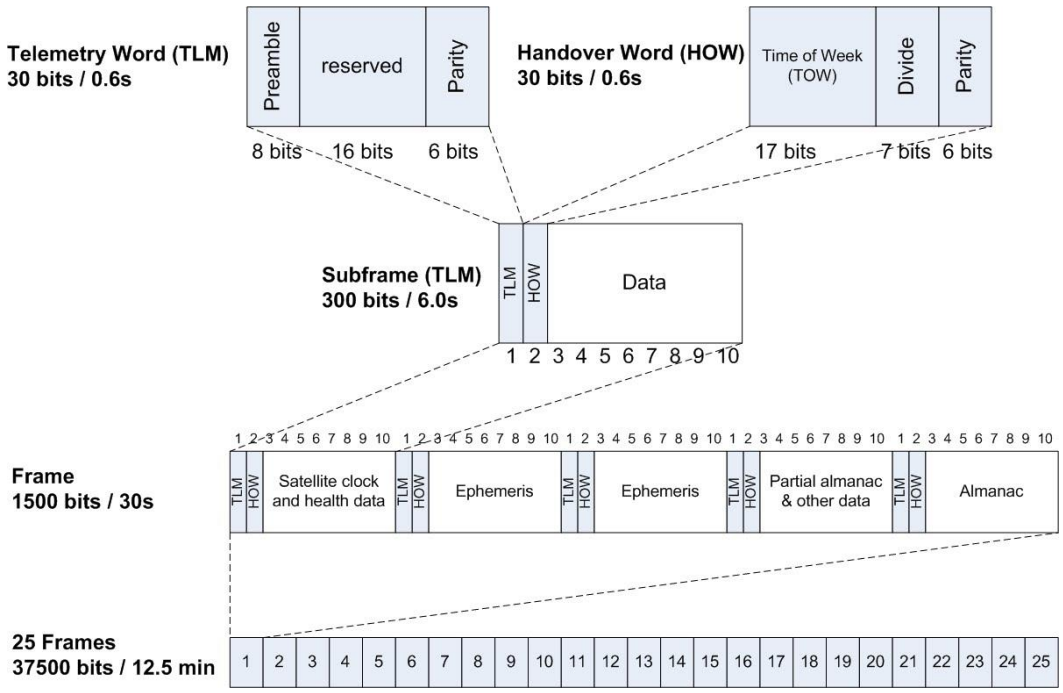
Σχήμα 3.7 Μετατοπίσεις Doppler της συχνότητας L1 του συστήματος GPS (Πηγή *e-Education.psu.edu/Geog862/Node/1786*) - Figure 3.7 Doppler shifts of GPS L1 frequency (Source *e-Education.psu.edu/Geog862/Node/1786*)

Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται η διαφορά της παρατηρήσιμης συχνότητας του δέκτη, σε σχέση με την εκπεμπόμενη από το δορυφόρο συχνότητα. Στην περίπτωση της L1 οι μετατοπίσεις της φέρουσας συχνότητας είναι της τάξεως των ±5 KHz όταν ο δέκτης είναι στάσιμός, ενώ στις περιπτώσεις κινηματικού εντοπισμού σε μεγάλες ταχύτητες (όπως των πολεμικών αεροσκαφών) οι μετατοπίσεις Doppler είναι της τάξεως των ±10 KHz. Μια διαφορά 5 KHz μεταφράζεται ως διαφορά 5000 κύκλων σε ένα 1 sec ή 5 κύκλων σε 1 ms, το οποίο συνεπάγεται διαφορά στην απόσταση δορυφόρου δέκτη. Στην περίπτωση του C/A κώδικα, οι μετατοπίσεις Doppler είναι της τάξεως των ±3.2 KHz και ±6.4 KHz, σε σενάριο στατικού και υψηλών ταχυτήτων κινηματικού εντοπισμού αντίστοιχα.

Οι συγκεκριμένες μετατοπίσεις, οδηγούν σε δυσκολία στο συγχρονισμό του ληφθέντος κώδικα με το αντίγραφό του στο εσωτερικό του δέκτη. Το εύρος των συγκεκριμένων μετατοπίσεων, είναι απαραίτητο στην ανάπτυξη των δεκτών GNSS, καθώς επηρεάζουν την παρακολούθηση των δορυφόρων από το δέκτη. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την επίδραση του φαινομένου Doppler στην παρακολούθηση των δορυφόρων, θα αναφερθούν στο Κεφάλαιο 5. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ – ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ.

3.2.4 Μήνυμα Πλοήγησης GPS

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο §3.2.1.β Δεδομένα του Σήματος GPS, μαζί με τους κώδικες C/A και P(Y), μεταφέρονται και τα δεδομένα πλοήγησης. Τα συγκεκριμένα δεδομένα μεταφέρονται με ένα ρυθμό bit των 50 bps.



Σχήμα 3.8 Δομή μηνύματος πλοήγησης του GPS (Πηγή *SitesGoogle/Site/To Swang/NGPS*) - Figure 3.8 GPS Navigation Message (Source *SitesGoogle/Site/To Swang/NGPS*)

Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται η δομή του μηνύματος πλοήγησης του GPS, μαζί με τους χρόνους που χρειάζεται κάθε πλαίσιο και υποπλαίσιο προκειμένου να μεταδοθεί. Όπως φαίνεται το κάθε μήνυμα αποτελείται από 25 πλαίσια, τα οποία απαιτούν 12.5 min προκειμένου να ληφθούν στο δέκτη. Το κάθε ένα από τα πλαίσια αποτελείται από 5 υποπλαίσια, τα οποία απαιτούν 30 sec για να ληφθούν και το κάθε ένα από αυτά, αποτελείται από ένα υποπλαίσιο το οποίο χρειάζεται 6 sec για να ληφθεί. Οι χρόνοι μετάδοσης είναι

αρκετά μεγάλοι, δυσχεραίνοντας την επίδοση του συστήματος GPS σε περιπτώσεις εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο. Για να μπορέσει να επιταχυνθεί η συγκεκριμένη διαδικασία, χρησιμοποιείται το Υποβοηθούμενο GNSS (Assisted GNSS), προκειμένου να ληφθούν τα δεδομένα πλοήγησης μέσω άλλων πηγών όπως το διαδίκτυο.

3.2.4.α Δομή των Υποπλασιών του Μηνύματος Πλοήγησης

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.8, το κάθε υποπλαίσιο ξεκινά με την ένδειξη TLM, ακολουθεί η ένδειξη TOW και στη συνέχεια, ακολουθούν τα δεδομένα.

Telemetry (TLM)

Η ένδειξη TLM (Telemetry) αποτελείται 8 bit Preamble, 16 bit Reserved και 6 bit Parity. Τα bit στην ένδειξη Preamble, χρησιμοποιούνται για το συγχρονισμό των πλαισίων. Τα bit στην ένδειξη Reserved, χρησιμοποιούνται σε περίπτωση μελλοντικής χρήσης του συγκεκριμένου πλαισίου. Τέλος, τα bit στην ένδειξη Parity, χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό λανθασμένων bit, στο συγκεκριμένο πλαίσιο.

Handover Words (HOW)

Η ένδειξη HOW (Handover Words) αποτελείται από 17 bit TOW, 7 bit Divide και 6 bit Parity. Τα bit στην ένδειξη TOW (Time of Week), περιλαμβάνουν τον αριθμό των δευτερολέπτων που έχουν περάσει από την προηγούμενη εβδομάδα του GPS. Η ένδειξη Divide περιλαμβάνει 4 bit τα οποία περιέχουν πληροφορίες σε περιπτώσεις anti-spoofing και 3 bit τα οποία υποδηλώνουν το Subframe ID, δηλαδή σε πιο από τα 5 υποπλαίσια βρίσκεται το συγκεκριμένου HOW. Τέλος, εμπεριέχονται τα Parity bits, προκειμένου να εντοπιστούν τυχόν λάθος bit.

3.2.4.β Υποπλαίσια Μηνύματος Πλοήγησης

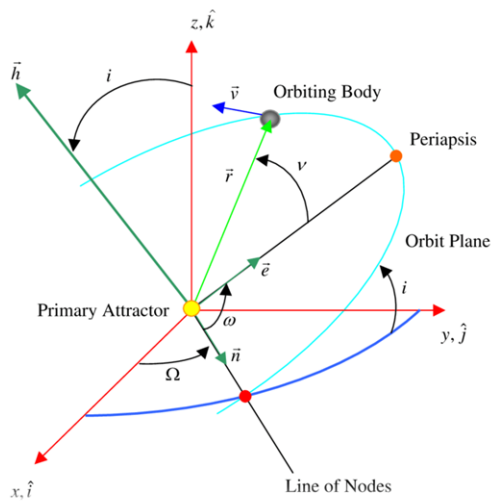
Υποπλαίσιο 1

Το πρώτο υποπλαίσιο φέρει την ένδειξη GPS Week Number, SV Accuracy and Health and Satellite Clock Correction Terms [7]. Το συγκεκριμένο πλαίσιο μεταφέρει τις πληροφορίες για τον αριθμό της εβδομάδα GPS όπου γίνονται οι παρατηρήσεις, την ακρίβεια και τη κατάσταση του δορυφόρου που παρατηρεί ο δέκτης. Οι συγκεκριμένες ενδείξεις, υποδεικνύουν αν είναι αξιόπιστα τα δεδομένα του συγκεκριμένου δορυφόρου. Τέλος, περιέχονται πληροφορίες σχετικά με το ατομικό ρολόι του δορυφόρου.

Υποπλαίσια 2 και 3

Τα υποπλαίσια 2 και 3 φέρουν την ένδειξη Ephemeris Parameters [7]. Τα συγκεκριμένα πλαίσια φέρουν την πληροφορία της θέσης του δορυφόρου. Τα στοιχεία της θέσης του δορυφόρου, καλούνται στοιχεία Kepler (Keplerian elements).

Τα στοιχεία αυτά αφορούν την έλλειψη στην οποία κινείται ο δορυφόρος, καθώς και τον προσανατολισμό της ως προς το Ουράνιο Σύστημα αναφοράς. Το συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς είναι γεωκεντρικό και αδρανειακό, δηλαδή το κέντρο του ταυτίζεται με το κέντρο μάζας της Γης και δεν επηρεάζεται από την περιστροφή της. Ο ημιάξονας x είναι τέμνει το ισημερινό επίπεδο στο Εαρινό Ισημερινό σημείο (♈). Ο ημιάξονας z ταυτίζεται με τον άξονα περιστροφής της Γης και ο ημιάξονας y συμπληρώνει το τρισορθογώνιο σύστημα αξόνων. Στο Σχήμα 3.9 το Ουράνιο Σύστημα αναφοράς εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα, ενώ με πράσινο χρώμα εμφανίζεται ο κάθετα στο ελλειπτικό επίπεδο άξονας. Με γαλάζιο χρώμα εμφανίζεται η ελλειπτική τροχιά του δορυφόρου, ενώ με μπλε χρώμα εμφανίζεται το ισημερινό επίπεδο



Σχήμα 3.9 Στοιχεία Kepler (Πηγή *Wikipedia/Wiki/Orbital_Elements*) - Figure 3.9 Keplerian elements (Source *Wikipedia/Wiki/Orbital Elements*)

Η θέση του κάθε δορυφόρου, υπολογίζεται μέσω έξι στοιχείων. Τα πρώτα τρία στοιχεία αφορούν τον προσανατολισμό της έλλειψης, ως προς το Ουράνιο Σύστημα Αναφοράς. Το πρώτο στοιχείο προσανατολισμού, είναι η κλίση *i* (inclination) του ελλειπτικού επιπέδου ως προς το ισημερινό επίπεδο. Το δεύτερο στοιχείο, ονομάζεται ορθή αναφορά του ανιόντος δεσμού *Ω* (right ascension of ascending node) και εκφράζει τον προσανατολισμό της τομής της έλλειψης με το ισημερινό επίπεδο, ως προς το Εαρινό Ισημερινό σημείο. Το τρίτο στοιχείο, καλείται όρισμα του περιγείου *ω* (argument of perigee) και εκφράζει το προσανατολισμό του μεγάλου ημιάξονα της έλλειψης, ως προς την τομή της έλλειψης με το ισημερινό επίπεδο, πάνω στο επίπεδο της έλλειψης.

Τα επόμενα τρία στοιχεία, αφορούν τη γεωμετρία της έλλειψης, καθώς και τη θέση του δορυφόρου πάνω σε αυτήν. Το πρώτο στοιχείο είναι ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης *a* (semi major axis). Το δεύτερο στοιχείο καλείται εκκεντρότητα της έλλειψης *e* (eccentricity) και εκφράζει την αποχή της έλλειψης, από το σφαιρικό σχήμα. Το τελευταίο στοιχείο, καλείται αληθής ανωμαλία M_0 (mean anomaly) και εκφράζει τη γωνία του άξονα του δορυφόρου, ως προς το μεγάλο ημιάξονα της έλλειψης.

Τα παραπάνω χρησιμοποιούνται, προκειμένου να βρεθούν οι συντεταγμένες του δορυφόρου σε κάποιο γεωκεντρικό τρισορθογώνιο σύστημα αναφοράς (συνήθως στο ECEF). Η διαδικασία μετασχηματισμού των στοιχείων Kepler, σε γεωκεντρικές συντεταγμένες, θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 5. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ – ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ.

Υποπλαίσιο 4

Το υποπλαίσια 4 φέρει το όνομα Almanac and Health Data for Satellites 25-32, Special Messages, Satellite Configuration Flags and Ionospheric and UTC data [7]. Το υποπλαίσιο αυτό (όπως και το υποπλαίσιο 5) περιέχουν τα almanac. Τα συγκεκριμένα αρχεία περιέχουν πληροφορίες για τη θέση και τη κατάσταση των υπόλοιπων δορυφόρων. Συγκεκριμένα, το υποπλαίσιο 4 περιέχει τη θέση και τη κατάσταση των δορυφόρων με PRN από 25 έως 32, καθώς και πληροφορίες σχετικά με το ιονοσφαιρικό μοντέλο. Τα συγκεκριμένα δεδομένα είναι απαραίτητα σε περιπτώσεις, όπου χρησιμοποιείται μία συχνότητα μετάδοσης. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται τουλάχιστον δύο συχνότητες μετάδοσης, τότε η επίδραση της ιονόσφαιρας εξαλείφεται.

Υποπλαίσιο 5

Το υποπλαίσιο 5 φέρει το όνομα Almanac and Health Data for Satellites 1-24 and Almanac Reference Time and Week Number [7]. Το συγκεκριμένο υποπλαίσιο φέρει τα almanac των δορυφόρων με PRN από 1 έως 24, καθώς και πληροφορίες σχετικά με την ημερομηνία και την ώρα των almanac.

3.2.5 Σύγχρονα Σήματα του GPS

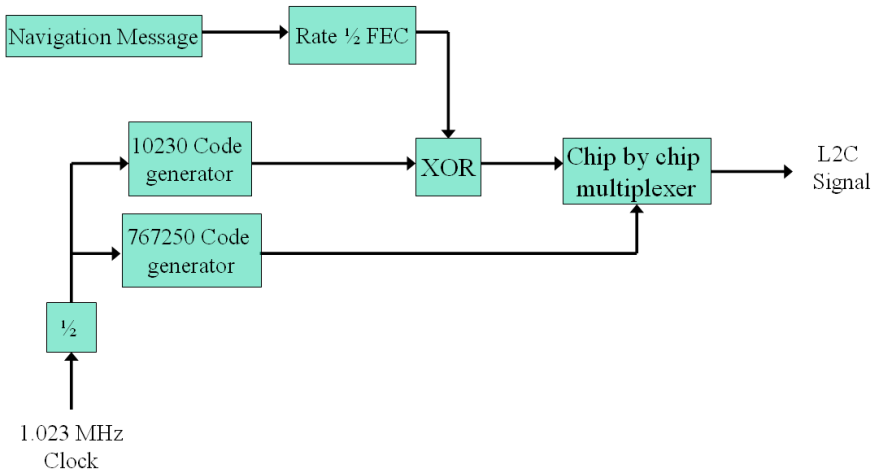
Από τη δημιουργία των δύο φερόντων συχνοτήτων, το σύστημα GPS έχει προσθέσει επιπλέον κώδικες και συχνότητες μετάδοσης. Οι συγκεκριμένες προσθήκες, έχουν αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις L1 και L2, με σκοπό να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος. Σε αυτή την παράγραφο, θα γίνει αναφορά στους κώδικες L2C και L1C, καθώς και στη συχνότητα L5.

3.2.5.α L2C

Η συχνότητα L2 είχε το μειονέκτημα ότι μπορούσε να αξιοποιηθεί από εξουσιοδοτημένους χρήστες, καθώς και τον αμερικανικό στρατό. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, να μπορεί να αξιοποιηθεί μόνο η συχνότητα L1 για εμπορική χρήση. Η χρήση μόνο μίας συχνότητας υποβαθμίζει σημαντικά τη λύση του εντοπισμού, καθώς υπεισέρχονται τα σφάλματα τις ιονόσφαιρας που μέχρι και σήμερα, παραμένει η μεγαλύτερη πηγή σφαλμάτων των GNSS. Προκειμένου να λυθεί το παραπάνω πρόβλημα, σχεδιάστηκε το σήμα L2C προκειμένου να μπορεί να αξιοποιηθεί για εμπορική χρήση.

Η μετάδοση του συγκεκριμένου σήματος γίνεται μαζί με την L2 (1227.60 MHz). Το χαρακτηριστικό του είναι ότι αποτελείται από τα σήματα L2 CM (Civil Moderate) και L2 CL (Civil Long). Ο κώδικας του σήματος L2 CM αποτελείται από μία αλληλουχία των 10230 chips, με συχνότητα παραγωγής chip 511.5 MHz (ή 511.5 Kbps) και επαναλαμβάνεται κάθε 20 ms. Τα δεδομένα πλοήγησης σε αυτόν τον κώδικα, εξάγονται στα 25 bps.

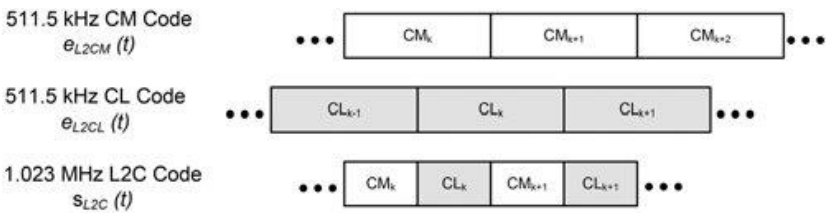
Στην περίπτωση του κώδικα L2 CL, η αλληλουχία του είναι 767,250 chips και επαναλαμβάνεται κάθε 1.5 sec. Η συχνότητα μετάδοσης είναι και σε αυτόν τον κώδικα, στα 511.5 Kbps.



Σχήμα 3.10 Παραγωγή του σήματος L2C (Πηγή *EESA/Navipedia/GPS Signal*) - Figure 3.10 L2C signal generation (Source *EESA/Navipedia/GPS Signal*)

Στο Σχήμα 3.10 φαίνεται η παραγωγή του σήματος L2C. Όπως φαίνεται, ο κώδικας L2 CM προστίθεται με τα δεδομένα πλοήγησης, μέσω ενός modulo-2. Στη συνέχεια, ο κώδικας

L2 CL μαζί με το σήμα L2 CM ⊕ Navigation data, συνθέτουν το σήμα L2C. Η σύνθεση γίνεται μέσω της μεθόδου TDM (Time Division Multiplexing). Η συγκεκριμένη μέθοδος λαμβάνει τα δύο σήματα και συγχρονίζει τα δεδομένα εισόδου με τέτοιο τρόπο, ώστε να εμφανίζονται διαδοχικά στο τελικό σήμα.



Σχήμα 3.11 Σύνθεση του σήματος της L2C από τα σήματα L2 CM και L2 CL (Πηγή *Time-Multiplexed Offset-Carrier QPSK for GNSS, Απρίλιος 2013*) - Figure 3.11 L2 CM and L2 CL code multiplexing in L2C signal (Source *Time-Multiplexed Offset-Carrier QPSK for GNSS, April 2013*)

3.2.5.β L1C

Το σήμα L1C αποτελεί εξέλιξη του σήματος L1 (C/A) και σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι συμβατό με το σήμα E1 του συστήματος Galileo. Το συγκεκριμένο σήμα αποτελείται από δύο σήματα. Το πρώτο αντιπροσωπεύει το σήμα πιλότο και φέρει την ένδειξη $L1C_P$. Το συγκεκριμένο σήμα δεν μεταφέρει δεδομένα και αποτελεί σύνθεση δύο BOC σημάτων (Περισσότερα για τα BOC σήματα θα αναλυθούν στην παράγραφο §3.3 Σήμα Galileo). Το δεύτερο σήμα φέρει την ένδειξη $L1C_D$ και είναι αυτό που μεταφέρει τα δεδομένα. Και το συγκεκριμένο σήμα αποτελεί ένα BOC σήμα. Αποτελείται από έναν κώδικα των 10,230 chips, με συχνότητα 1.023 MHz (ή 1.023 Mbps) και επαναλαμβάνεται κάθε 10 ms.

3.2.5.γ L5

Η συχνότητα L5 αποτελεί μια νέα συχνότητα μετάδοσης και έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να ληφθεί από δέκτες GNSS που βρίσκονται σε κλειστό χώρο.

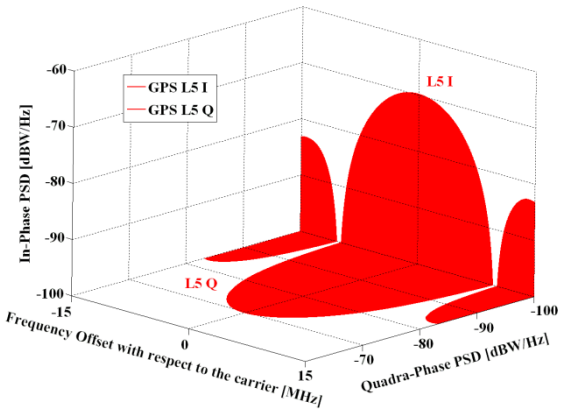
$$f_{L5} = 115 f_0 = 1176.45 \text{ MHz}, \ \lambda_{L5} = \frac{c}{f_{L5}} \approx 25.49 \text{ cm} \qquad \text{Εξ. (3.15)}$$

Το σήμα της L5 αποτελείται από δύο σήματα I&Q. Ο κώδικας της συνιστώσας I, είναι ένα άθροισμα modulo-2 του κώδικα I5, των δεδομένων πλοήγησης και μιας αλληλουχίας συγχρονισμού. Ο κώδικας αποτελεί μια αλληλουχία 10,230 chips, με συχνότητα 10.23 MHz (ή 10.23 Mbps) και επαναλαμβάνεται κάθε 1 ms. Η αλληλουχία συγχρονισμού αποτελεί έναν κώδικα των 10 chips και τα δεδομένα πλοήγησης μεταδίδονται στα 50 bps. Ο κώδικας της συνιστώσας Q είναι άθροισμα του κώδικα Q5 και μιας διαφορετικής αλληλουχίας συγχρονισμού. Το συγκεκριμένο σήμα αποτελεί σήμα πιλότο και δεν περιέχει δεδομένα. Ο κώδικας του Q5 έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με τον I5, ενώ διαφοροποιείται η αλληλουχία συγχρονισμού, η οποία αποτελεί έναν κώδικα των 20 chips. Τα δύο σήματα διαμορφώνουν το φορέα της L5 με τη μέθοδο QPSK.

Πίνακας 3.3 Μετατόπιση φάσης με τη μέθοδο διαμόρφωσης QPSK (Πηγή *Allaboutcircuits/Technical-articles/Quadrature-Phase-Shift-Keying-QPSK-modulation*) - Table 3.3 Phase shift with QPSK (Source *Allaboutcircuits/Technical-articles/Quadrature-Phase-Shift-Keying-QPSK-modulation*)

Bits	**Μετατόπιση φάσης με QPSK**
00	45°
01	135°
10	225°
11	315°

Η συγκεκριμένη μέθοδος διαφοροποιείται από την BPSK, καθώς στη συγκεκριμένη μέθοδο διαμορφώνονται 2 bits ανά chip. Τέλος, στο Σχήμα 3.12 φαίνονται οι συντελεστές Fourier της συχνότητας L5, στο πεδίο των συχνοτήτων.



Σχήμα 3.12 Διαγραμματική αναπαράσταση του εύρους της L5 στο πεδίο των συχνοτήτων (Πηγή *EESA/Navipedia/GPS_Signal*) - Figure 3.12 Spectra of L5 in frequency domain (Source *EESA/Navipedia/GPS_Signal*)

3.3 ΣΗΜΑ GALILEO

3.3.1 Περιγραφή του σήματος του GALILEO

3.3.1.α Συχνότητες Μετάδοσης

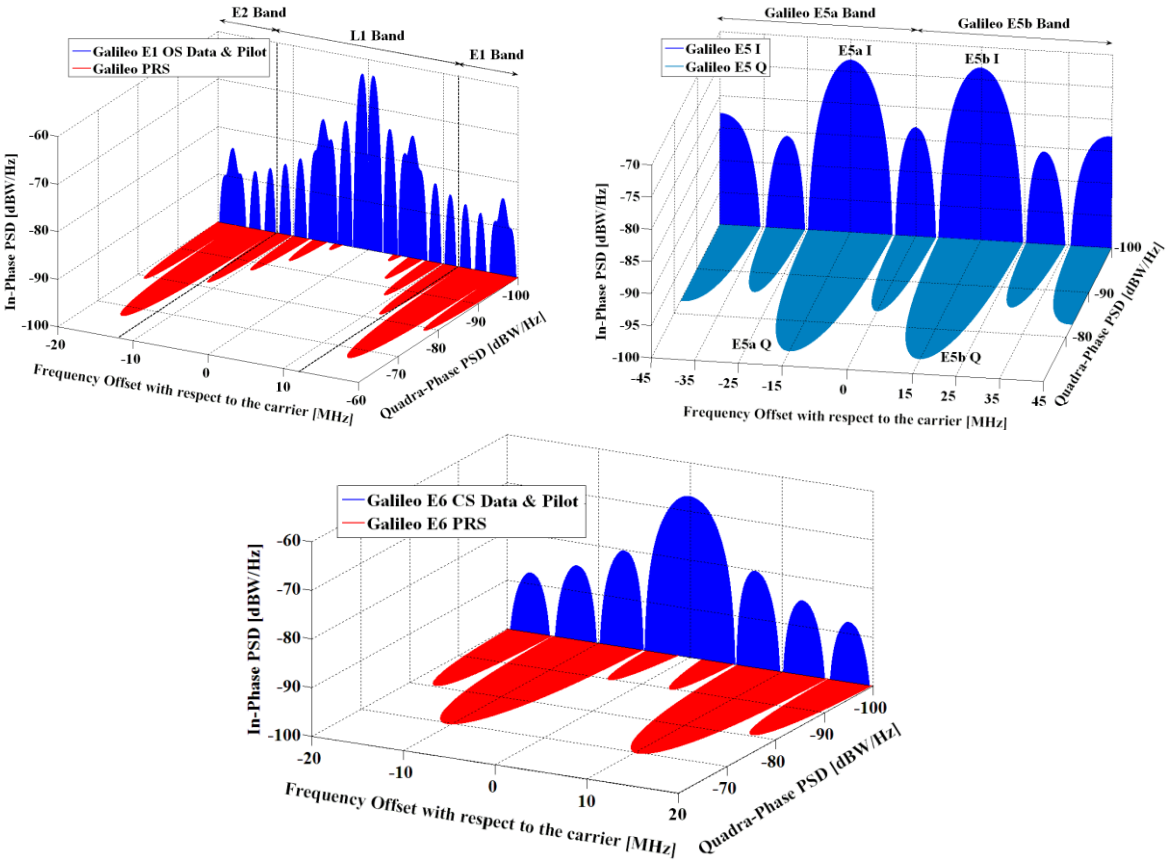
Το Galileo είναι το Ευρωπαϊκό Σύστημα Εντοπισμού το οποίο είναι σε πλήρη λειτουργικότητα από το 2016 [8]. Η βασική συχνότητα μετάδοσης του συστήματος Galileo, καλείται E1 OS (Open Service), η οποία έχει την ίδια συχνότητα μετάδοσης με την L1 του συστήματος GPS. Επιπλέον, για την εξάλειψη των ιονοσφαιρικών σφαλμάτων, χρησιμοποιούνται οι συχνότητες E5 και E6.

$$f_{E1\,OS} = 1575.42\ \text{MHz},\ \ \lambda_{E1\,OS} = \frac{c}{f_{L1}} \approx 19.03\ \text{cm} \qquad \text{Εξ. (3.16)}$$

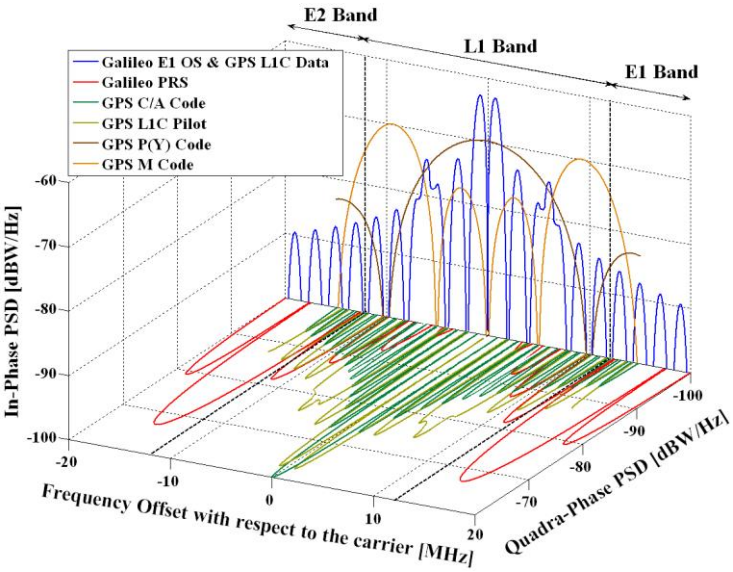
$$f_{E6} = 1278.75\ \text{MHz},\ \ \lambda_{E6} = \frac{c}{f_{L2}} \approx 23.45\ \text{cm} \qquad \text{Εξ. (3.17)}$$

$$f_{E5} = 1191.795\ \text{MHz},\ \ \lambda_{E5} = \frac{c}{f_{L2}} \approx 25.16\ \text{cm} \qquad \text{Εξ. (3.18)}$$

Η διαγραμματική αναπαράσταση των συχνοτήτων E1 OS, E5 και E6 στο πεδίο των συχνοτήτων, φαίνεται στο Σχήμα 3.13, ενώ στο Σχήμα 3.14 φαίνεται η σύγκριση των συχνοτήτων E1 OS και L1 στο πεδίο των συχνοτήτων.



Σχήμα 3.13 Διαγραμματική αναπαράσταση του εύρους των E1 OS, E5 και E6 στο πεδίο των συχνοτήτων (Πηγή *EESA/Navipedia/Galileo_Signal_Plan*) - Figure 3.13 Spectra of E1 OS, E5 and E6 in frequency domain (Source *EESA/Navipedia/Galileo_Signal_Plan*)



Σχήμα 3.14 Διαγραμματική του εύρους των L1 και E1 OS στο πεδίο των συχνοτήτων (Πηγή *EESA/Navipedia/Galileo_Signal_Plan*) - Figure 3.14 Spectra of L1 and E1 OS in frequency domain (Source *EESA/Navipedia/Galileo_Signal_Plan*)

Τα δύο σήματα διαφέρουν αρκετά ως προς την αναπαράστασή τους στο πεδίο των συχνοτήτων. Η αναπαράσταση των σημάτων του συστήματος του Galileo στο πεδίο των συχνοτήτων, δεν ακολουθεί τη συνάρτηση sinc, όπως τα σήματα των συχνοτήτων L1 και L2 του συστήματος GPS. Στη συγκεκριμένη παράγραφο, θα γίνει η ανάλυση της συχνότητας E1 OS και θα αναφερθούν οι λόγοι, για τους οποίους διαφοροποιούνται τα σήματα του Galileo, από τις συχνότητες L1 και L2.

3.3.1.β Δομή του Σήματος του Galileo

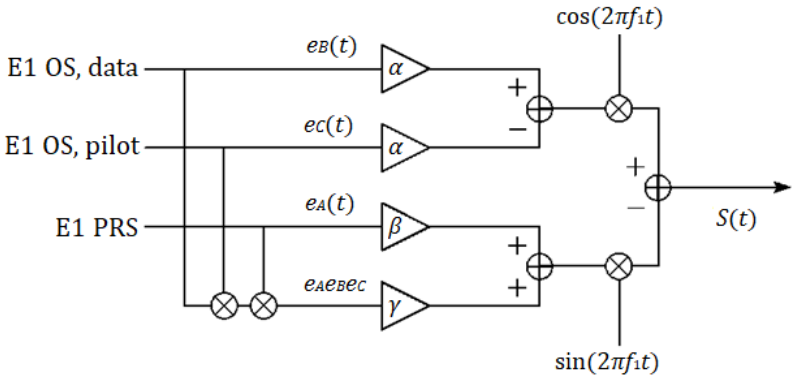
Το σήμα του Galileo αποτελείται από τρία κανάλια A, B και C. Το σήμα E1-A είναι ένα σήμα περιορισμένης πρόσβασης από το κοινό (Public Regulated Signal – PRS). Το σήμα E1-B είναι το σήμα το οποίο περιέχει τα δεδομένα (κώδικα και δεδομένα πλοήγησης), ενώ το σήμα E1-C είναι ένα σήμα το οποίο δεν περιέχει δεδομένα και ονομάζεται σήμα πιλότος (pilot signal). Το συγκεκριμένο σήμα διαμορφώνεται μόνο από τον κώδικα. Ο κώδικας της E1 OS (primary code) έχει μήκος 4092 chips, με ρυθμό παραγωγής 1.023 MHz (ή 1.023 Mcps), εύρους 4 MHz και επαναλαμβάνεται κάθε 4 ms (μήκος κύματος παλμού 300 m). Στο σήμα πιλότο χρησιμοποιείται ένας διαφορετικός κώδικας (secondary code), μήκους 25 chips, ο οποίος αυξάνει το χρόνο που επαναλαμβάνεται ο κώδικας στα 100 ms. Ο primary code αποτελεί ένα μειωμένο Gold κώδικα, ενώ ο secondary code διαμορφώνει 25 συγκεκριμένες επαναλήψεις του primary code. Έτσι, το τελικό μήκος του κώδικα του σήματος E1 OS είναι 4092·25 = 102300 chips και ονομάζεται διαβαθμιζόμενος κώδικας (tiered code).

Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψη, το κανάλι B προκύπτει ως άθροισμα modulo-2 των δεδομένων πλοήγησης ($d_{E1\text{-}B}$), του PRN κώδικα ($c_{E1\text{-}B}$) και του υποφορέα B ($sc_{E1\text{-}B}$), δημιουργώντας τη συνιστώσα $e_B(t)$. Αντίστοιχα, το κανάλι C προκύπτει ως άθροισμα modulo-2 του PRN κώδικα ($c_{E1\text{-}C}$) και του υποφορέα C ($sc_{E1\text{-}C}$), δημιουργώντας τη συνιστώσα $e_C(t)$. Οι δύο δυαδικές συνιστώσες, φαίνονται στις εξισώσεις (3.19) και (3.20).

$$e_B(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \{c_{E1-B,(i\ mod\ 4092)} d_{E1-B,(i\ mod\ 4)} rect_{Tc,E1-B}(t - iT_{c,E1-B}) \cdot \\ \cdot \operatorname{sign}[\sin(2\pi R_{c,E1-B} t)]\} \qquad \text{Εξ. (3.19)}$$

$$e_C(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \{c_{E1-C,(i\ mod\ 4092)} rect_{Tc,E1-C}(t - iT_{c,E1-C})\ \mathrm{sign}[\sin(2\pi R_{c,E1-C} t)]\} \quad \text{Εξ. (3.20)}$$

Ο όρος $rect_{Tc,E1-B/C}(t - iT_{c,E1-B/C})$ εκφράζει τη συνάρτηση ενός τετραγωνικού παλμού, του οποίου οι εναλλαγές -1 και 1 γίνονται ανά $iT_{c,E1-B/C}$, όπου $T_{c,E1-B/C}$ είναι το μήκος ενός chip. Ο όρος $R_{c,E1-B/C}$ εκφράζει τη συχνότητα του υποφορέα, η οποία είναι ίση με 1.023 MHz. Το τελικό διάγραμμα διαμόρφωσης του σήματος E1 φαίνεται στο Σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15 Διάγραμμα διαμόρφωσης του σήματος E1 OS με τη μέθοδο CASM (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 3.15 Modulation scheme of E1 OS with CASM (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*)

Η άθροιση των καναλιών B και C, πολλαπλασιάζεται με τη συνιστώσα I, ενώ η άθροιση του καναλιού A και του σήματος που διαμορφώθηκε από τα κανάλια A, B και C, πολλαπλασιάζεται με τη συνιστώσα Q. Η σύνθεση των σημάτων γίνεται με τη μέθοδο διαμόρφωσης Coherent Adaptive Carrier Modulation (CASM). Η συγκεκριμένη μέθοδος διαμόρφωσης καθώς και οι ενισχύσεις α, β και γ, θα αναλυθούν στις επόμενες παραγράφους.

3.3.2 Παραγωγή του Σήματος του Galileo

3.3.2.α Coherent Adaptive Carrier Modulation

Η μέθοδος διαμόρφωσης Coherent Adaptive Carrier Modulation (CASM) [9] είναι μια μέθοδος διαμόρφωσης πολλών καναλιών, η οποία καλείται και Tricode Hexaphase Modulation. Η συγκεκριμένη μορφή διαμόρφωσης χρησιμοποιείται προκειμένου η μεταδιδόμενη ισχύς του σήματος, να παραμένει σταθερή στο χρόνο. Έτσι, η μεταδιδόμενη πληροφορία δεν περιορίζεται στο πλάτος του μεταδιδόμενου σήματος και ο όρος του πλάτους του λαμβανόμενου σήματος, γίνεται λιγότερο κρίσιμος.

Το τελικό σήμα στο Σχήμα 3.13 φαίνεται στην εξίσωση (3.21).

$$S(t) = \sqrt{2P_{E1}}(s_{E1-I}(t)\cos(2\pi f_{E1} t) - s_{E1-I}(t)\sin(2\pi f_{E1} t)) \quad \text{Εξ. (3.21)}$$

Όπως αναφέρθηκε ήδη, η τα δεδομένα (E1 OS data) και το σήμα πιλότος (E1 OS pilot) διαμορφώνεται στη συνιστώσα I, ενώ το σήμα E1 PRS διαμορφώνεται στη συνιστώσα Q. Στην εξίσωση (3.22) φαίνεται το σήμα της E1 OS, συναρτήσει των σημάτων $e_A(t)$, $e_B(t)$, $e_C(t)$ και $e_A(t)\ e_B(t) e_C(t)$.

$$S(t) = (ae_B(t) - ae_C(t))\cos(2\pi f_{E1}t) - (\beta e_A(t) - \gamma e_A(t)e_B(t)e_C(t)) \cdot \sin(2\pi f_{E1}t)) \quad \text{Εξ. (3.22)}$$

Οι όροι α, β και γ αποτελούν όροι ενίσχυσης των αντίστοιχων σημάτων. Η χρησιμότητά τους, είναι η κατανομή της ισχύς του τελικού μεταδιδόμενου σήματος στα σήματα $e_A(t)$, $e_B(t)$, $e_C(t)$ και $e_A(t)\ e_B(t)e_C(t)$. Ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίζεται η τιμή των ενισχύσεων (α, β, γ) γίνεται με την επίλυση ενός συστήματος τριών εξισώσεων. Στην περίπτωση του σήματος E1, η σχετική ισχύς του σήματος $e_A(t)$ είναι 50%, ενώ για τα σήματα $e_B(t)$ και $e_C(t)$ είναι 25%. Η πρώτη εξίσωση προκύπτει από την ιδιότητα των I&Q καναλιών, δηλαδή ότι το μέτρο τους είναι ίσο με 1 ($I^2+Q^2=1$).

$$\sqrt{(\alpha-\alpha)^2 + (\beta+\gamma)^2} = \beta + \gamma = 1 \quad \text{Εξ. (3.23)}$$

Η δεύτερη εξίσωση προκύπτει από την ισότητα της ισχύος των I&Q καναλιών.

$$\alpha^2 + \alpha^2 = \beta^2 \quad \text{Εξ. (3.24)}$$

Η τελευταία εξίσωση ορίζει ότι η συνολική ισχύς του σήματος, είναι ίση με 1 (100%).

$$\alpha^2 + \alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1 \quad \text{Εξ. (3.25)}$$

Επιλύοντας το παραπάνω σύστημα προκύπτουν οι τιμές των ενισχύσεων α, β και γ.

$$\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}, \beta = \frac{2}{3}, \gamma = \frac{1}{3} \quad \text{Εξ. (3.26)}$$

Το τελικό σήμα που προκύπτει από το συνδυασμό των τριών ενισχύσεων είναι,

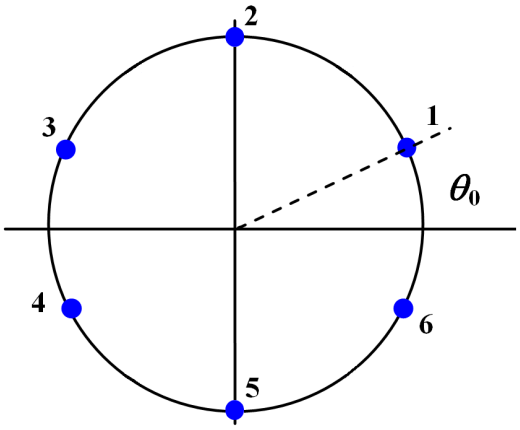
$$S(t) = \frac{\sqrt{3}}{2}(e_B(t) - e_C(t))\cos(2\pi f_{E1}t) - \frac{1}{3}(e_A(t) - e_A(t)e_B(t)e_C(t)) \cdot \sin(2\pi f_{E1}t)) \quad \text{Εξ. (3.27)}$$

Τα συνολικά ποσοστά ενίσχυσης των E1 OS data, E1 OS pilot και E1 PRS είναι 22.22%, 22.22% και 44.44% αντίστοιχα (α^2, α^2, β^2). Το υπολειπόμενο ποσοστό 11.11% (γ^2) καλείται Inter-Modulation και ο ρόλος του είναι η διατήρηση του πλάτους του μεταδιδόμενου σήματος. Το συνολικό ποσοστό της ισχύος του σήματος που μεταδίδεται, είναι το 88.88% προκειμένου το πλάτος του να παραμένει σταθερό.

Γενικότερα, η μέθοδος CASM αναλόγως τη δυαδική αξία των σημάτων E1 PRS, E1 OS Data και E1 OS Pilot, προσαρμόζει το πλάτος των συνιστωσών I&Q, προκειμένου να παραχθεί το σήμα με τη ζητούμενη ισχύς. Η γενική μορφή ενός κανονικοποιημένου βασικής ζώνης σήματος (normalized baseband signal) *s(t)* ενός ζωνοπερατού διαμορφωμένου σήματος *S(t)* [Βλέπε εξίσωση (3.21)], μπορεί να γραφεί συναρτήσει των συνιστωσών I&Q, όπου το πραγματικό τμήμα του σήματος αναφέρεται στη συνιστώσα I, ενώ το φανταστικό τμήμα του σήματος, αναφέρεται στη συνιστώσα Q. Συνεπώς, για το σήμα E1 προκύπτει,

$$s(t) = s_{E1-I}(t) + is_{E1-Q}(t) \quad \text{Εξ. (3.28)}$$

Η συγκεκριμένη εξίσωση, σχηματίζει ένα μοναδιαίο κύκλο, όπου στον άξονα x'x εμφανίζεται η συνιστώσα I, ενώ στον άξονα y'y εμφανίζεται η συνιστώσα Q.



Σχήμα 3.16 Κατανομή της ισχύς των καναλιών I&Q για το σήμα E1 με τη μέθοδο CASM (Πηγή *EESA/Navipedia/File:CASM_Fig_4.png*) - Figure 3.16 Distribution of I&Q channel's power of E1 signal with CASM (Source *EESA/Navipedia/File:CASM_Fig_4.png*)

Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα τρία σήματα του σήματος E1, αποτελούν παλμοί πλάτους -1 έως 1, προκύπτουν $2^3=8$ διαφορετικοί συνδυασμοί δυαδικών αξιών. Οι συγκεκριμένοι συνδυασμοί, αντιστοιχούν σε έξι τιμές φάσης (Γι αυτό και το όνομα Tricode Hexaphase), οι οποίες παρέχουν την ισχύ που απαιτείται για το σήμα E1. Στον Πίνακα 3.4 φαίνονται οι διάφοροι συνδυασμοί των δυαδικών αξίων -1 και 1, καθώς και οι τιμές των I&Q που αντιστοιχούν στον εκάστοτε συνδυασμό. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν για $\theta_0=0.1082\pi$ (Βλέπε Σχήμα 3.16).

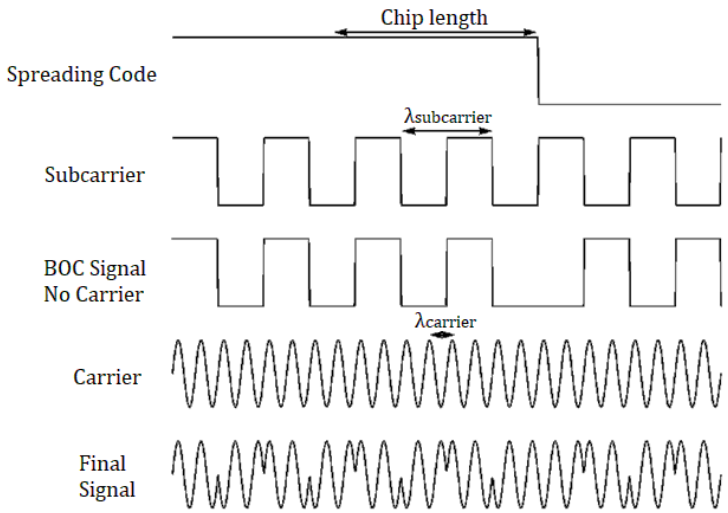
Πίνακας 3.4 Συνδυασμοί των τριών δυαδικών σημάτων του σήματος E1 με τη μέθοδο CASM (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Table 3.4 Combination of three binary signals of E1 signal with CASM (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*)

E1 PRS	**E1 OS Data**	**E1 OS Pilot**	**Real(*S(t)*) - I**	**Imaginary(*S(t)*) - Q**	**Norm(*S(t)*)**
1	1	1	0	1	1
1	1	-1	0.9428	0.3334	1
1	1	-1	-0.9428	0.3334	1
1	-1	1	0	1	1
1	-1	-1	0	-1	1
-1	1	-1	0.9428	-0.3334	1
-1	-1	1	-0.9428	-0.3334	1
-1	-1	-1	0	-1	1

Το πλεονέκτημα της μεθόδου διαμόρφωσης CASM, είναι ότι επιτρέπεται η ανεξάρτητη επεξεργασία των σημάτων E1 OS και E1 PRS. Όλη η πληροφορία των σημάτων E1 OS Data και Pilot, είναι συγκεντρωμένη στη συνιστώσα I, ενώ η πληροφορία του σήματος E1 PRS είναι συγκεντρωμένη στη συνιστώσα Q.

3.3.2.β Binary Offset Carrier Modulation

Η μέθοδος διαμόρφωσης Δυαδική Μετάθεση Φορέα (Binary Offset Carrier - BOC) [10] παρέχει δύο ανεξάρτητες παραμέτρους για το σχεδιασμό των σημάτων. Η πρώτη είναι η συχνότητα του υποφορέα (f_S) σε MHz και η δεύτερη είναι ο ρυθμός παραγωγής του κώδικα του υποφορέα (f_C) σε Mcps.



Σχήμα 3.17 Διαμόρφωση του φορέα με τη μέθοδο BOC (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 3.17 BOC modulation of the carrier wave (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*)

Στο Σχήμα 3.17 εμφανίζεται ο PRN κώδικας (spreading code) και ο υποφορέας (subcarrier). Ο υποφορέας είναι ένα τετραγωνικός παλμός πλάτους -1 έως 1 (ή 0 έως 1) με συχνότητα f_S και ρυθμό παραγωγής chip f_C. Φαίνεται λοιπόν, ότι για κάθε chip του PRN κώδικα, ο υποφορέας διαιρεί το κάθε chip του PRN κώδικα, σε έναν ακέραιο αριθμό chips (subchips). Η διαμόρφωση του φορέα, γίνεται από το κανονικό γινόμενο (ή άθροισα modulo-2) των chip του PRN κώδικα και του υποφορέα. Η διαμόρφωση του φορέα από τους δύο κώδικές, διαιρεί το φάσμα συμμετρικά ως προς τη κεντρική συχνότητα του φορέα. Η διαίρεση αυτή δημιουργεί δύο κύριες κορυφές στο πεδίο των συχνοτήτων (Βλέπε Σχήμα 3.13 Galileo E1 OS Data&Pilot). Με αυτόν τον τρόπο τα BOC σήματα της E1 OS και τα σήματα της L1, δεν βασίζονται μόνο στην ιδιότητα Cross-Correlation προκειμένου να διαφοροποιηθούν, αλλά βασίζονται και στο γεγονός, ότι το ένα σήμα δεν επικαλύπτει το άλλο στο πεδίο των συχνοτήτων. Επιπροσθέτως, ο παράγοντας f_S υποδηλώνει τη μετατόπιση των διαιρεμένων κορυφών, από τη κεντρική συχνότητα. Αυτή η ιδιότητα των σημάτων BOC, προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα στην επεξεργασία του σήματος από τους δέκτες.

Τα σήματα BOC συμβολίζονται ως BOC(f_S, f_C) ή BOC(m, n), όπου η παράμετρος m συμβολίζει το λόγο μεταξύ της συχνότητας του υποφορέα (f_S) και της θεμελιώδης συχνότητας f_0 = 10.23 MHz. Η παράμετρος n συμβολίζει το λόγο του ρυθμού παραγωγής του κώδικα του υποφορέα (f_C) και της f_0. Στην περίπτωση του σήματος E1 OS και L1C του συστήματος GPS, χρησιμοποιείται ένα σήμα BOC(1,1), δηλαδή ένα σήμα με υποφορέα συχνότητας 1 MHz και ρυθμό παραγωγής chip 1 MHz (ή 1 Mcps).

Στην πραγματικότητα, το σήμα E1 OS είναι αποτέλεσμα δύο BOC σημάτων (Multiplexed BOC - MBOC). Το τελικό σήμα, αποτελεί συνδυασμό ενός υπερευρείας ζώνης σήματος BOC(6, 1) και του στενής ζώνης σήματος BOC(1, 1). Η σύνθεση των δύο σημάτων γίνεται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε το 1/11 της ισχύος του σήματος, να βρίσκεται στη

συνιστώσα Fourier υψηλής συχνότητας. Ο συμβολισμός της σύνθεσης των δύο BOC σημάτων, είναι MBOC(6, 1, 1/11). Το αποτέλεσμα της συγκεκριμένης σύνθεσης, είναι η δημιουργία νέων κορυφών στη συνάρτηση sinc (Βλέπε Σχήμα 3.13 Galileo E1 OS Data&Pilot), στις συνιστώσες Fourier μεγαλύτερης τάξης.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό του σήματος BOC(1, 1), είναι ότι δημιουργεί τρεις κορυφές συσχέτισης, ενώ η κλίση της κορυφής της συνάρτησης συσχέτισης, είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτήν, του κώδικα C/A. Επιπλέον, για ένα σήμα BOC(m, n) ο αριθμός των θετικών και αρνητικών κορυφών στη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, δίνεται από τη σχέση $2n-1$, όπου το n δίνεται από το λόγο ($2\ f_S/\ f_C$). Οι απόσταση των τριών κορυφών δίνεται από τη σχέση,

$$T_S = \frac{1}{2p}, \qquad p = 1, 2, 3, \dots. \qquad \text{Εξ. (3.29)}$$

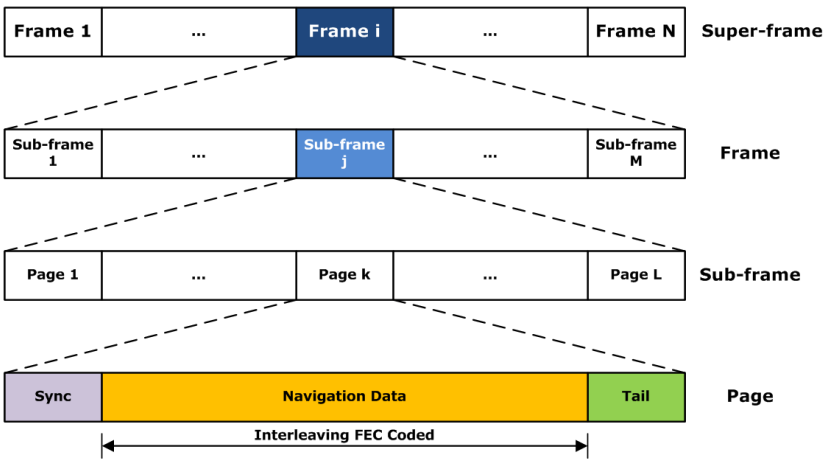
Το σύμβολο p, συμβολίζει το ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας του υποφορέα και του ρυθμού παραγωγής των chip [BOC(pn, n)]. Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψη, το λαμβανόμενο σήμα της E1 OS, το οποίο βρίσκεται στη συνιστώσα I, είναι της μορφής,

$$\varphi(t) = 0.89\frac{\sqrt{2P}}{3}[s_d(t-\tau) - s_e(t-\tau)]\cos[2\pi(f-\Delta f)(t-\tau)+\theta] \qquad \text{Εξ. (3.30)}$$

Από τη εξίσωση (3.30) φαίνεται ότι λαμβάνεται το 89% της συνολικής ισχύς του σήματος, οι όροι s_d και s_e εκφράζουν το γινόμενο του κώδικα με τον υποφορέα, των καναλιών E1 OS Data και E1 OS Pilot αντίστοιχα. Ο χρόνος ταξιδιού συμβολίζεται με το γράμμα τ, ενώ η μετατόπιση της κεντρικής συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler, είναι συμβολισμένη με Δf. Τέλος, με το γράμμα θ συμβολίζεται η φάση του φορέα.

3.3.3 Μήνυμα Πλοήγησης Galileo

Το σύστημα του Galileo περιέχει διαφόρων ειδών δεδομένα. Αυτά που χρησιμοποιούνται για εμπορική χρήση είναι τα μηνύματα I/NAV και F/NAV. Στον Πίνακα 3.5 φαίνονται τα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων μηνυμάτων, ενώ στο Σχήμα 3.18 φαίνεται η δομή των δεδομένων πλοήγησης του Galileo.



Σχήμα 3.18 Δομή του μηνύματος πλοήγησης του Galileo (Πηγή *EESA/Navipedia/File: Galileo_Navigation_Message_Structure.png*) - Figure 3.18 Galileo's navigation message structure (Source *EESA/Navipedia/File: Galileo_Navigation_Message_Structure.png*)

Πίνακας 3.5 Χαρακτηριστικά των μηνυμάτων πλοήγησης του Galileo (Πηγή *EESA/Navipedia/Galileo_Navigation_Message*) - Table 3.5 Galileo's navigation message characteristics (Source *EESA/Navipedia/Galileo_Navigation_Message*)

Μήνυμα	**Ρυθμός δεδομένων (bps)**	**Διάρκεια σελίδας (sec)**	**Σελίδες σε κάθε υποπλαίσιο**	**Υποπλαίσια σε κάθε πλαίσιο**
F/NAV	25	10	5	12
I/NAV	125	2	15	24

Στον Πίνακα 3.6 φαίνεται η δομή των σελίδων των δύο μηνυμάτων πλοήγησης.

Πίνακας 3.6 Δομή των σελίδων των μηνυμάτων πλοήγησης του Galileo (Πηγή *EESA/Navipedia/Galileo_Navigation_Message*) - Table 3.6 Structure of Galileo's navigation data page (Source *EESA/Navipedia/Galileo_Navigation_Message*)

	F/NAV	**I/NAV**
Synchronization Word (SW)	12 bits	10 bits
Page Type	6 bits	-
Navigation Data	208 bits	114 bits
Cyclic Redundancy Check	24 bits	-
Tail	6 bits	6 bits

Η κάθε σελίδα ξεκινάει με μία λέξη συγχρονισμού, προκειμένου ο δέκτης να συγχρονίσει τα δεδομένα. Το μήνυμα F/NAV παρέχει 6 bit που υποδεικνύουν το περιεχόμενο της σελίδας. Στη συνέχεια, ακολουθούν τα δεδομένα πλοήγησης στα οποία χρησιμοποιείται η μέθοδος κωδικοποίησης FEC. Η κωδικοποίηση των δεδομένων πλοήγησης κατατάσσει τα bit με τέτοια σειρά, έτσι ώστε για τα αριθμητικά δεδομένα, να αποδίδεται η τιμή 0 στο πιο σημαντικό bit/byte και για τη κατάταξη των bit/byte, να μεταδίδεται πρώτο το πιο σημαντικό bit/byte. Το μήνυμα F/NAV περιλαμβάνει 24 bits CRC προκειμένου να εντοπιστούν λανθασμένα bit. Τέλος, και τα δύο μηνύματα περιέχουν 6 bits τα οποία υποδεικνύουν ότι η κωδικοποίηση FEC τελείωσε.

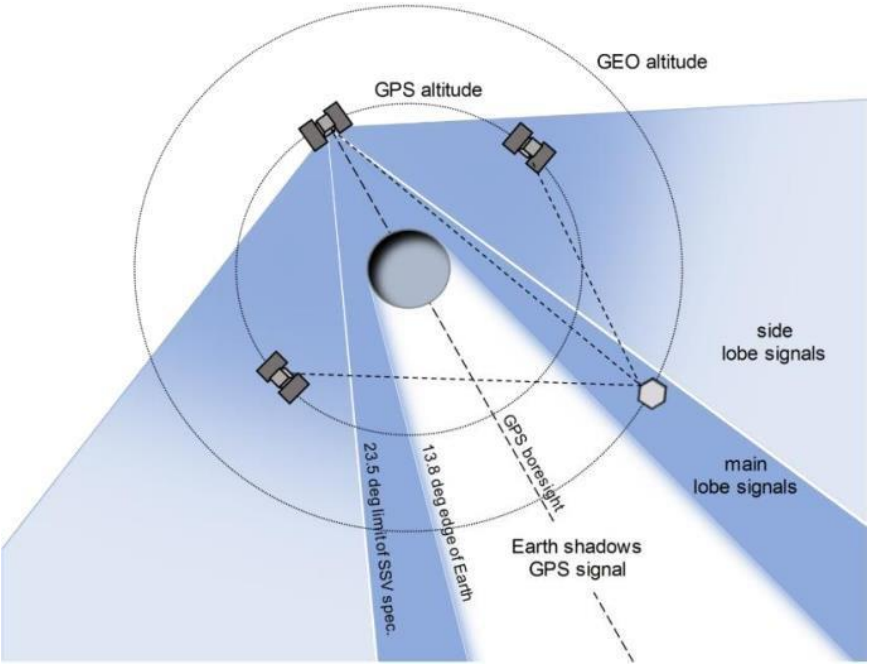
Τα δεδομένα πλοήγησης του συστήματος Galileo, περιλαμβάνουν τα στοιχεία Kepler των δορυφόρων (a, e, ω, Ω, i, M_0), μηνύματα για την κατάσταση των δορυφόρων του συστήματος, τα almanac, καθώς και παραμέτρους για τη μετατροπή του χρόνου αναφοράς του συστήματος Galileo (Galileo System Time – GST), στο χρόνο UTC και στο χρόνο του GPS (GPST).

4. ΚΕΡΑΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΩΠΙΑΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΩΝ ΔΕΚΤΩΝ GNSS

4.1 Κεραίες GNSS

4.1.1 Ισχύς των Σημάτων GNSS

Τα απεσταλμένα από τους δορυφόρους σήματα, διαδίδονται μέσα από τα στρώματα της ατμόσφαιρας, προκειμένου να συλλεχθούν και να μετατραπούν σε ψηφιακό σήμα. Η ισχύς των δορυφορικών σημάτων του GPS, είναι της τάξης των P_T = 27 W (ή 14.3 dB) και μειώνονται σε ισχύ, όσο απομακρύνονται από το δορυφόρο. Τα συγκεκριμένα σήματα δεν διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις, αλλά προς ένα συγκεκριμένο χώρο.



Σχήμα 4.1 Διάδοση των σημάτων του GPS (Πηγή *Use of GNSS for lunar missions and plans for Lunar In-Orbit Development, Μάιος 2020*) - Figure 4.1 GPS signal transmission (Source *Use of GNSS for lunar missions and plans for Lunar In-Orbit Development, Μάιος 2020*)

Ο χώρος αυτός αποτελεί ένα τμήμα της ιδεατής σφαίρας που θα είχε το σήμα, αν μεταδιδόταν προς όλες τις κατευθύνσεις . Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η δισδιάστατη προβολή του συγκεκριμένου χώρου (γαλάζιο χρώμα). Ο λόγος του εμβαδού του συγκεκριμένου χώρου (p), προς το εμβαδόν της ιδεατής σφαίρας καλείται απολαβή κεραίας (antenna gain) και δίνεται από τον τύπο,

$$G_T = \frac{4\pi R^2}{\pi p^2} = \frac{2}{1 - cosa} \qquad \text{Εξ. (4.1)}$$

Στην εξίσωση 4.1, το a εκφράζει τη γωνία που σχηματίζει ο κάθετος στην τροχιά του δορυφόρου άξονας (Βλέπε Σχήμα 4.1 GPS boresight), με τον άξονα που εφάπτεται στη περίμετρο της Γης. Στην περίπτωση του GPS, η γωνία a είναι ίση με 13.8° στην περιφέρεια της Γης, ενώ η μέγιστη τιμής της είναι 23.5°. Ο λόγος που η εμβέλεια είναι μεγαλύτερη της περιμέτρου της Γης, είναι για να μπορεί ο εκάστοτε δορυφόρος να στείλει σήματα και σε

αντικείμενα που βρίσκονται σε τροχιά με τη Γη, όπως για παράδειγμα ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός (ISS). Για a = 13.8°, προκύπτει ότι η μεταδιδόμενη απολαβή κεραίας του GPS είναι G_T = 12.3 dB. Το χαρακτηριστικό των σημάτων των GNSS, είναι ότι είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο, ώστε η λαμβανόμενη ισχύς του δορυφορικού σήματος να είναι ίδια σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας της Γης. Η ληφθέντα από το δέκτη πυκνότητα ισχύος, δίνεται από τον τύπο,

$$P_R = \frac{P_T G_T G_A}{4\pi R^2} \qquad \text{Εξ. (4.2)}$$

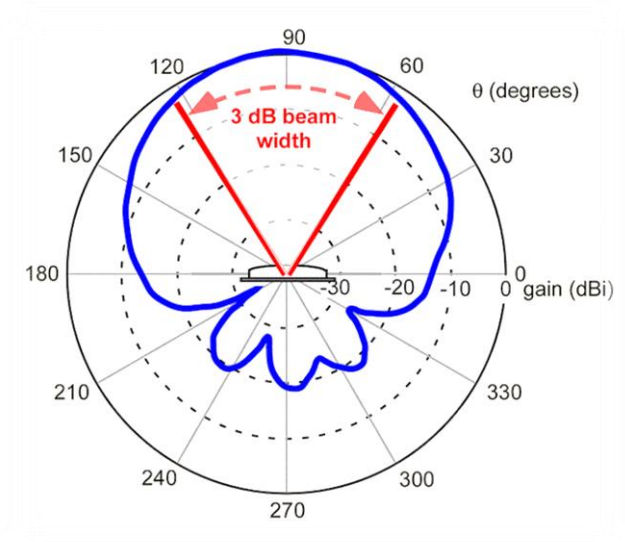
Ο όρος G_A εκφράζει τη λαμβανόμενη απολαβή κεραίας. Η τιμή του συγκεκριμένου όρου εξαρτάται από την πόλωση της κεραίας, δηλαδή τη διάταξη του ηλεκτρικού πεδίου από τη μετάδοση των RF, καθώς και του διαγράμματος της κεραίας.

4.1.2 Πόλωση των Κεραιών GNSS

Όπως αναφέρθηκε ήδη, η πόλωση εκφράζει τη διάταξη του ηλεκτρικού πεδίου από τη μετάδοση των RF. Τα λαμβανόμενα σήματα των GNSS είναι κυκλικά πολωμένα, καθώς αποτελούνται από δύο σήματα τα οποία είναι κάθετα μεταξύ τους και έχουν διαφορά φάσης 90°. Η φορά τους προσδιορίζεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού (RHCP). Για να μπορούν να δεχτούν οι κεραίες τα συγκεκριμένα σήματα, θα πρέπει και αυτές να είναι RHCP. Ωστόσο, αυτός δεν είναι ο μόνος λόγος που οι κεραίες GNSS είναι RHCP. Κατά τη διάδοση των σημάτων στην ατμόσφαιρα, τα σήματα ανακλούν σε διάφορες επιφάνειες, αυξάνοντας το χρόνο λήψης του σήματος (Σφάλμα πολυανάκλασης – Multipath error). Τα RHCP σήματα, με το που ανακλαστούν από την προσπίπτουσα επιφάνεια, αντιστρέφεται η πόλωσή τους σε αριστερόστροφη (LHCP). Μια RHCP κεραία είναι αποτελεσματικότερη στο να απομακρύνει τα LHCP, ελαχιστοποιώντας τα σφάλματα πολυανάκλασης.

4.1.3 Διάγραμμα Κεραίας GNSS

Τα διαγράμματα κεραίες, παρέχονται από τον κατασκευή και φανερώνουν τη λαμβανόμενη απολαβή κεραίας.



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα κεραίας (Πηγή *EESA/Navipedia/File:Patch_Antenna_Pattern.png*) - Figure 4.2 Patch antenna pattern (Source *EESA/Navipedia/File:Patch_Antenna_Pattern.png*)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2, οι κεραίες GNSS λαμβάνουν τα σήματα που βρίσκονται πάνω από τον ορίζοντα (Βλέπε Σχήμα 4.1 0° έως 90°). Ο λόγος που οι κεραίες GNSS δεν λαμβάνουν την ίδια απολαβή από όλες τις γωνίες (Ισοτροπικές κεραίες), είναι αφενός επειδή όλοι οι παρατηρήσιμοι δορυφόροι είναι πάνω από τον ορίζοντα της κεραίας, αφετέρου επειδή τα μόνα σήματα που λαμβάνονται κάτω από τον ορίζοντα της κεραίας, είναι συνήθως σήματα που οφείλονται σε πολυανάκλαση. Με αυτήν την ημισφαιρική δομή, τα σήματα που οφείλονται σε πολυανάκλαση μειώνονται σημαντικά. Συνήθως, η λαμβανόμενη απολαβή κεραίας είναι στα 3 dB.

$$3\ dB = 10log_{10}(2) \qquad \text{Εξ. (4.3)}$$

Από τον ορισμό των dB (10·[δεκαδικός λογάριθμος του λόγου ισχύος]), μια αύξηση των 3 dB συνεπάγεται το διπλασιασμό της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος. Τέλος, εισάγεται ο όρος της αποτελεσματικής περιοχής της κεραίες, η οποία εκφράζει το λόγο της περιοχής της πραγματικής επιφάνειας της κεραίας, προς την ενίσχυση σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος.

$$A_E = \frac{\lambda^2}{4\pi} \qquad \text{Εξ. (4.4)}$$

Η συνολική ισχύς του λαμβανόμενου σήματος, φαίνεται στον Πίνακα 4.1. Η συγκεκριμένη ανάλυση αφορά την ισχύ του σήματος της L1 από δύο κεραίες. Ο δορυφόρος βρίσκεται στο ζενίθ της πρώτης κεραίας, ενώ η δεύτερη κεραία παρατηρεί τον ίδιο δορυφόρο σε γωνία αποκοπής 5°. Τα αποτελέσματα των δύο στηλών προκύπτουν από τον πολλαπλασιασμό των επιμέρων στοιχείων, καθώς οι όροι αναφέρονται σε λογαριθμική κλίμακα [$loga + logb = \log(a * b)$].

Πίνακας 4.1 Λαμβανόμενη ισχύ του σήματος της L1 (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Table 4.1 Effective received power of L1 (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*)

	Ζενίθ	**5°**
Μεταδιδόμενη ισχύς (P_T)	27 W	27 W
Μεταδιδόμενη απολαβή κεραίας (G_T)	10.5	17
Απώλεια διάδοσης ($1/4\pi R^2$), όπου R η απόσταση δορυφόρου Γης ≈ 20201227 m	$1.95\cdot10^{-16}$ m^{-2}	$1.20\cdot10^{-16}$ m^{-2}
Απώλεια λόγο της ατμόσφαιρας (-0.5 dB)	0.9	0.9
Λαμβανόμενη απολαβή κεραίας (3 dB)	2	2
Αποτελεσματική περιοχή κεραίας (A_E)	$2.87\cdot10^{-3}$ m^2	$2.87\cdot10^{-3}$ m^2
Απώλεια πόλωσης (-3 dB)	0.5	0.5
Αποτελεσματική λαμβανόμενη ισχύ	$1.43\cdot10^{-16}$ W	$1.43\cdot10^{-16}$ W
Αποτελεσματική λαμβανόμενη ισχύ σε dBm: $10\log_{10}$(ισχύς σε mW)	-128.5 dBm	-128.5 dBm

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.1, η λαμβανόμενη ισχύς του σήματος GPS της συχνότητας L1, είναι ίση με -128.5 dBm ανεξαρτήτως του τόπου όπου βρίσκεται η κεραία GNSS. Επιπλέον, φαίνεται το ποσό εξασθενημένο είναι το λαμβανόμενο σήμα. Το μεταδιδόμενο σήμα από το δορυφόρο ήταν στα 27 W, ενώ στο δέκτη λήφθηκε ένα σήμα των $1.43\cdot10^{-16}$ W. Υπενθυμίζεται ότι το συγκεκριμένο νούμερο αφορά την παρατήρηση της L1 σε ανοιχτό ουρανό.

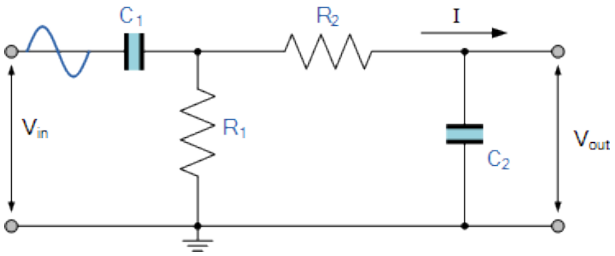
4.2 Μετωπιαίο RF τμήμα

Αφού φτάσει στην κεραία το λαμβανόμενο σήμα, εισάγεται στο μετωπιαίο RF τμήμα. Το συγκεκριμένο τμήμα είναι υπεύθυνο για το φιλτράρισμα του σήματος, καθώς και τη μετατροπή σου σε σήμα IF. Η συγκεκριμένη μετατροπή είναι απαραίτητη, καθώς παράγεται ένα σήμα το οποίο έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με το φορέα, όμως έχει τέτοια συχνότητα, που μπορεί να επεξεργαστεί και να ψηφιοποιηθεί. Στη συγκεκριμένη παράγραφο θα γίνει η περιγραφή των επιμέρους τμημάτων του μετωπιαίο RF, καθώς και του θορύβου που εισάγουν στο φορέα.

4.2.2 Φίλτρα

Φίλτρα καλούνται οι συσκευές οι οποίες επιτρέπουν να περάσουν συγκεκριμένες συχνότητες από ένα σήμα, εξασθενώντας τις υπόλοιπες. Σε ένα ιδανικό περιβάλλον, τα φίλτρα θα άφηναν ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων να εισαχθεί στα επόμενα τμήματα της κεραίας, ενώ οι υπόλοιπες συχνότητες θα εξουδετερωνόντουσαν πλήρως. Στην πραγματικότητα όμως, η λήψη των συχνοτήτων ενδιαφέροντος και η εξάλειψη των υπόλοιπων συχνοτήτων, γίνεται σε στάδια. Πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμα και οι συχνότητες ενδιαφέροντος δέχονται κάποιο βαθμό εξασθένησης.

Το πρώτο φίλτρο μετά την κεραία, είναι συνήθως ένα Ζωνοπερατό φίλτρο (Bandpass filter), το οποίο επιτρέπει την εισαγωγή ορισμένων ζωνών συχνοτήτων, εξασθενώντας τις υψηλότερες και χαμηλότερες συχνότητες. Η ζώνη των συχνοτήτων που επιτρέπει να περάσουν, βρίσκονται γύρω από τη συχνότητα ενδιαφέροντος, η οποία καλείται κεντρική συχνότητα (center frequency). Στην περίπτωση των GNSS, τα συγκεκριμένα φίλτρα αποτρέπουν την εισαγωγή σημάτων μεγάλης ισχύος και σημάτων που βρίσκονται εκτός της ζώνης ενδιαφέροντος.



Σχήμα 4.3 Κύκλωμα ζωνοπερατού φίλτρου (Πηγή *Electronics Tutorials/Filter/Filter_4*) - Figure 4.3 Bandpass filter circuit (Source *Electronics Tutorials/Filter/Filter_4*)

Το κύκλωμα ενός ζωνοπερατού φίλτρου φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Με τη διάταξη πυκνωτής (C_1) και αντίσταση (R_1) περνάνε οι υψηλές και μεσαίες συχνότητες (High Pass filter), ενώ οι χαμηλές γειώνονται μέσω της R_1. Με τη διάταξη αντίσταση (R_2) και πυκνωτής (C_2) περνάνε μόνο οι μεσαίες συχνότητες, ενώ οι υψηλές συχνότητες γειώνονται μέσω του C_2 (Low pass filter). Το αποτέλεσμα του συνδυασμού των φίλτρων High pass και Low pass, είναι οι συχνότητες που ανήκουν σε ένα συγκεκριμένο εύρος από την κεντρική συχνότητα. Σε ένα τέτοιο κύκλωμα, η συχνότητα των φίλτρων High και Low pass δίνεται από την εξίσωση,

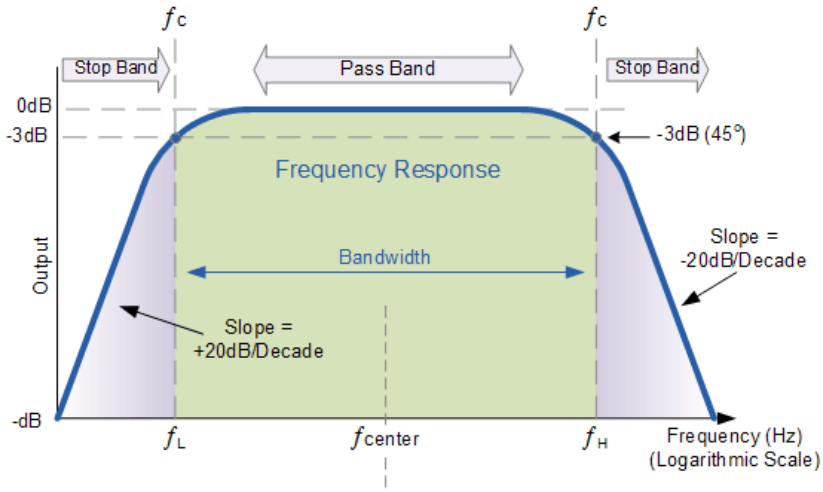
$$f_i = \frac{1}{2\pi R_i C_i} \qquad \text{Εξ. (4.5)}$$

Οι συγκεκριμένες συχνότητες ονομάζονται συχνότητες αποκλεισμού (cut-off frequencies), καθώς είναι αυτές που θα ορίσουν ποιο εύρος συχνοτήτων θα περάσει. Η

κεντρική συχνότητα προκύπτει ως ο γεωμετρικός μέσος όρος των cut-off frequencies, ενώ το εύρος προκύπτει από τη διαφορά τους.

$$f_{center} = \sqrt{f_1 + f_2} \quad \text{Εξ. (4.6)}$$
$$BW = f_2 - f_1 \quad \text{Εξ. (4.7)}$$

Το εύρος των συχνοτήτων που περνά από ένα Bandpass φίλτρο, φαίνεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4 Επιλεκτικότητα συχνοτήτων των ζωνοπερατών φίλτρων (Πηγή *Electronics Tutorials/Filter/Filter_4*) - Figure 4.4 Bandpass filter frequency selectivity (Source *Electronics Tutorials/Filter/Filter_4*)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4, οι προεκτάσεις τέμνουν τη συνάρτηση στα -3 dB (στο 50% της ισχύος του σήματος). Στην πραγματικότητα, όλα τα φίλτρα περιέχουν και μια απώλεια εισαγωγής (insertion loss). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ισχύς των συχνοτήτων εντός του εύρους, να μειώνεται. Σκοπός είναι το insertion loss να είναι όσο χαμηλότερο γίνεται, προκειμένου να μην υποβαθμιστεί σημαντικά η ισχύς του ληφθέντος σήματος.

4.2.3 Ενισχυτές

Ο ρόλος των ενισχυτών είναι να αυξήσουν το μέγεθος ενός σήματος, δηλαδή να αυξήσουν το πλάτους του. Σε ένα ιδανικό σύστημα, ένας ενισχυτής θα αύξανε μόνο το πλάτος του εισαγόμενου σήματος. Στην πραγματικότητα όμως, εκτός του πλάτους, αυξάνεται και ο θόρυβος του σήματος. Υπάρχουν διάφοροι ενισχυτές, οι οποίοι ελαχιστοποιούν την αύξηση του θορύβου ενός σήματος, όπως για παράδειγμα οι LNA.

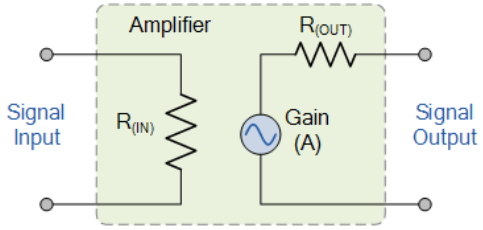
Οι ενισχυτές, σε αντίθεση με τα περισσότερα φίλτρα, ανήκουν στα ενεργά στοιχεία του κυκλώματος, δηλαδή απαιτούν παροχή ρεύματος προκειμένου να αυξήσουν την ένταση του σήματος. Η αύξηση της έντασης είναι τέτοια, ώστε το εξαγόμενο αναλογικό σήμα, να έχει τέτοια ένταση ώστε να μπορεί να μετατραπεί σε ψηφιακό.

Το ιδανικό κύκλωμα χαρακτηρίζεται από δύο αντιστάσεις (R_{IN} και R_{OUT}) και από μία AC παροχή. Η συγκεκριμένη παροχή εκφράζει την αύξηση της έντασης του εξαγόμενου σήματος και καλείται Ενίσχυση (Gain). Υπάρχουν τριών ειδών ενίσχυσης που μπορούν να μετρηθούν σε ένα κύκλωμα. Η πρώτη καλείται Ενίσχυση Τάσης (Voltage Gain - A_V), η δεύτερη Ενίσχυση Ρεύματος (Current Gain - A_I) και η τρίτη, Ενίσχυση Ισχύς (Power Gain - A_P). Η τιμή των τριών αυτών μεγεθών, δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις.

$$A_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad \text{Εξ. (4.8)}$$

$$A_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} \quad \text{Εξ. (4.9)}$$

$$A_P = A_V \cdot A_I \quad \text{Εξ. (4.10)}$$

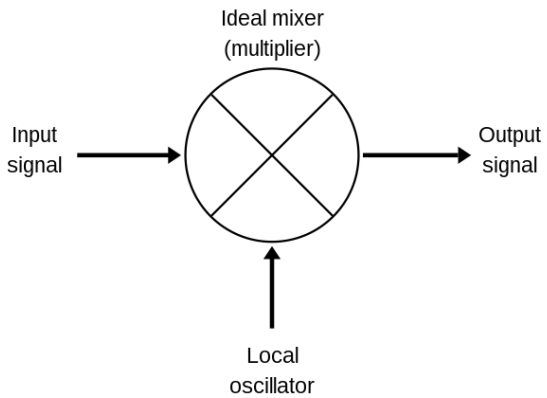


Σχήμα 4.5 Ιδανικό κύκλωμα ενισχυτή (Πηγή *Electronics Tutorials/Amplifiers/Amp_1*) - Figure 4.5 Ideal amplifier circuit (Source *Electronics Tutorials/Amplifiers/Amp_1*)

Τέλος, μία ακόμη σημαντική παράμετρος στους ενισχυτές, είναι το εύρος των συχνοτήτων το οποίο θα ενισχύσουν, προκειμένου να ενισχυθούν τα σήματα της συχνότητας ενδιαφέροντος.

4.2.4 Μείκτες/ Τοπικοί Ταλαντωτές

Ο ρόλος των μεικτών σε ένα RF κύκλωμα, είναι η μετατροπή της συχνότητας ενός RF σήματος, προκειμένου να παραχθεί ένα IF σήμα. Για τη συγκεκριμένη μετατροπή, χρησιμοποιείται ένα τοπικός ταλαντωτής, προκειμένου να παρέχει ένα σήμα σταθερής συχνότητας. Στην περίπτωση που το νέο σήμα, είναι μικρότερης συχνότητας από το εισαγόμενο, τότε ο μείκτης καλείται υποβιβαστής (downconverter).



Σχήμα 4.6 Μείκτης ενός RF κυκλώματος (Πηγή *Wikipedia/wiki/Frequency_Mixer*) - Figure 4.6 Mixer in RF circuits (Source *Wikipedia/wiki/Frequency_Mixer*)

Έστω το εισαγόμενο RF σήμα $\sqrt{2}d_k cos(\omega_1 t)$. Ο όρος d_k αντιπροσωπεύει ένα ψηφιακό σήμα πλάτους -1 και 1, ενώ ο όρος ω_1 υποδεικνύει τη συχνότητα του σήματος. Από τον τοπικό ταλαντωτή παράγεται ένα σήμα της μορφής $\sqrt{2}cos(\omega_2 t)$, όπου ο όρος ω_2 υποδεικνύει τη συχνότητα του σήματος. Αυτό που στην ουσία πραγματοποιεί ο ταλαντωτής, είναι ο πολλαπλασιασμός των δύο σημάτων με βάση τις τριγωνομετρικές ταυτότητες,

$$\cos(A+B) = \cos(A)\cos(B) - \sin(A)\sin(B) \quad \text{Εξ. (4.11)}$$

$$\cos(A-B) = \cos(A)\cos(B) + \sin(A)\sin(B) \quad \text{Εξ. (4.12)}$$

Προσθέτοντας τις εξισώσεις (4.11) και (4.12), προκύπτει ένα σήμα της μορφής,

$$2\cos(A)\cos(B) = \cos(\mathrm{A}+\mathrm{B}) + \cos(\mathrm{A}-\mathrm{B}) \qquad \text{Εξ. (4.13)}$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση (4.13) στα δύο σήματα που αναφέρθηκαν, προκύπτει το εξής σήμα.

$$2d_k\cos(\omega_1 t)\cos(\omega_2 t) = d_k\cos(\omega_1 t + \omega_2 t) + d_k\cos(\omega_1 t - \omega_2 t) \qquad \text{Εξ. (4.14)}$$

Στην παράγραφο §4.2.2 Φίλτρα, αναφέρθηκε ότι το πρώτο φίλτρο μετά την κεραία, είναι ένα φίλτρο Bandpass. Ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ένα Low pass, προκειμένου να αποκοπούν οι υψηλές συχνότητες. Σε αυτή την περίπτωση, ο όρος $d_k cos(\omega_1 t + \omega_2 t)$ αφαιρείται και το τελικό σήμα είναι της μορφής,

$$2d_k\cos(\omega_1 t)\cos(\omega_2 t) = d_k\cos(\omega_1 t - \omega_2 t) \qquad \text{Εξ. (4.15)}$$

Το ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να επιτευχθεί, αν το σήμα του ταλαντωτή έχει αποχή από τη συχνότητα του εισαγόμενου σήματος, ίση με τη συχνότητα του IF σήματος (περίπτωση των Bandpass φίλτρων).

Στην περίπτωση που η συχνότητα του εισαγόμενου σήματος ταυτίζεται με αυτή του ταλαντωτή, τότε στην εξίσωση (4.15) ο όρος $cos(\omega_1 t - \omega_2 t)$ ισούται με 1 και το σήμα που μένει, είναι η ψηφιακή αλληλουχία d_k. Με αυτόν τον τρόπο, ο δέκτης απομονώνει τον Gold κώδικα, προκειμένου να εισαχθεί στο επόμενο στάδιο το οποίο περιλαμβάνει την συσχέτισή του, με το ακριβές αντίγραφο του, στο δέκτη. Ωστόσο, οι συχνότητες των δύο σημάτων δεν είναι ποτέ ίσες, καθώς υπεισέρχονται διάφοροι παράγοντες που προκαλούν ολισθήσεις στις δύο συχνότητες, όπως το φαινόμενο Doppler, σφάλματα του ταλαντωτή κτλ. Στην πραγματικότητα, η συχνότητα του σήματος του ταλαντωτή, ποτέ δεν ταυτίζεται με τη συχνότητα του εισαγόμενου σήματος, καθώς η ακριβής συχνότητα του εισαγόμενου σήματος δεν είναι γνωστή. Έτσι, το νέο σήμα περιέχει μια υπολειπόμενη συχνότητα η οποία δυσχεραίνει το στάδιο της συσχέτισης του κώδικα.

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος, χρησιμοποιείται ένας μείκτης ο οποίος παράγει ένα σήμα, του οποίου η συχνότητα έχει διαφορά φάσης κατά 90°. Σε αυτήν την περίπτωση, το σήμα του ταλαντωτή είναι της μορφής $-\sqrt{2}sin(\omega_2 t)$ και χρησιμοποιούνται οι εξής τριγωνομετρικές ταυτότητες.

$$\sin(A+B) = \sin(A)\cos(B) + \cos(A)\sin(B) \qquad \text{Εξ. (4.16)}$$
$$\sin(A-B) = \sin(A)\cos(B) - \cos(A)\sin(B) \qquad \text{Εξ. (4.17)}$$

Αφαιρώντας τις εξισώσεις (4.16) και (4.17) και εξαλείφοντας τον όρο μεγάλης συχνότητας, προκύπτει ένα σήμα της μορφής,

$$2d_k\cos(\omega_1 t)sin(\omega_2 t) = d_k\sin(\omega_1 t - \omega_2 t) \qquad \text{Εξ. (4.18)}$$

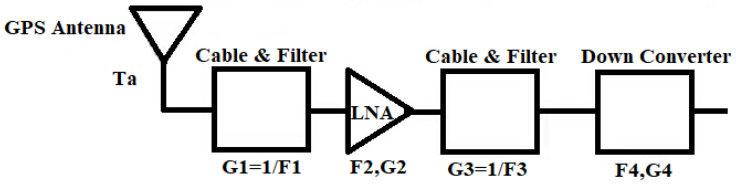
Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης διαδικασίας θα αναλυθούν περαιτέρω στο Κεφάλαιο 5. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ – ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ.

4.2.5 Βαθμός Θορύβου

4.2.5.1 Φόρμουλα Friis

Η μέχρι τώρα ανάλυση, αφορά τα μέρη του μετωπιαίου RF, τα οποία είναι και τα πρώτα που έρχονται σε επαφή με το ληφθέν σήμα. Όπως αναφέρθηκε μέχρι τώρα, τα συγκεκριμένα μέρη εισάγουν κάποιο βαθμού θόρυβο στη ληφθέν σήμα. Η ποσοτικοποίηση του θορύβου των επιμέρους στοιχείων, περιγράφεται από το βαθμό θορύβου (noise figure).

Ο βαθμός θορύβου αποτελεί μια ένδειξη του επιπρόσθετου θορύβου, που εισάγουν τα επιπρόσθετα μέρη της κεραίας (καλώδια, φίλτρα, ενισχυτές κτλ). Έστω το παρακάτω μετωπιαίο RF τμήμα μιας κεραίας GNSS. Το τμήμα αυτό αποτελείται από μία κεραία, δύο φίλτρα, έναν ενισχυτή (LNA) και ένα μετασχηματιστή των υψηλών τάσεων σε χαμηλές.



Σχήμα 4.7 Μέρη ενός μετωπιαίου RF (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Figure 4.7 RF Front end parts (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*)

Η ένδειξη *Ta* ονομάζεται ισοδύναμη θερμοκρασία (equivalent temperature) ή θερμοκρασία κεραίας (Antenna temperature). Η συγκεκριμένη ένδειξη δεν αντιπροσωπεύει την θερμοκρασία του περιβάλλοντος όπου γίνονται οι μετρήσεις. Αυτό που εκφράζει, είναι η θερμοκρασία θορύβου που παράγει η κεραία, σε ένα δεδομένο περιβάλλον και παρέχεται από τον κατασκευαστή της κεραίας. Οι όροι F_i εκφράζουν το βαθμό θορύβου του κάθε μέρους, ενώ οι όροι G_i εκφράζουν την ενίσχυση του κάθε μέρους. Για τα παθητικά μέρη του κυκλώματος (τα μέρη όπου δεν απαιτούν ενέργεια), ο βαθμός θορύβου δίνεται από τη σχέση,

$$F_i = \frac{1}{Gi} \qquad \text{Εξ. (4.19)}$$

Για τα ενεργά στοιχεία του κυκλώματος (αυτά που απαιτούν ενέργεια για να λειτουργήσουν), ο βαθμός θορύβου δίνεται από τον κατασκευαστή. Ο συνολικός θόρυβος του συγκεκριμένου κυκλώματος, δίνεται από τη φόρμουλα Friis. Η γενική μορφή της, δίνεται από την εξίσωση,

$$F_{system} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \cdots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 G_3 \ldots G_n} \qquad \text{Εξ. (4.20)}$$

Η συγκεκριμένη φόρμουλα περιγράφει το συνολικό θόρυβο του συστήματος. Ο πρώτος όρος εισάγει ολόκληρο το βαθμό θορύβου του, ενώ οι υπόλοιποι όροι εισάγουν το βαθμό θορύβου τους εξασθενημένο. Η εξασθένηση του θορύβου τους, σχετίζεται με την ενίσχυση του προηγούμενου στοιχείου. Όσο μεγαλύτερη είναι η ενίσχυση του προηγούμενου στοιχείου, τόσο πιο εξασθενημένος θα είναι ο θόρυβος που θα εισάγει το επόμενο στοιχείο. Στην περίπτωση του προηγούμενου παραδείγματος, ο συνολικός θόρυβος θα είναι,

$$F_{system} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} \qquad \text{Εξ. (4.21)}$$

Με την ίδια φόρμουλα, μπορεί να υπολογιστεί η θερμοκρασία θορύβου (noise temperature) του συστήματος T_{eq}.

$$T_{eq} = T_a + (F_1 - 1)T + \frac{(F_2 - 1)T}{G_1} + \frac{(F_3 - 1)T}{G_1 G_2} + \frac{(F_4 - 1)T}{G_1 G_2 G_3} \qquad \text{Εξ. (4.22)}$$

Ο όρος T εκφράζει την περιβάλλουσα θερμοκρασία (ambient temperature), δηλαδή τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος. Σε αυτήν την περίπτωση, ο πρώτος όρος είναι η περιβάλλουσα θερμοκρασία και δεν ενισχύει το σήμα. Γι' αυτό και ο όρος ($[F_1\text{-}1]T$) δεν διαιρείται με την ενίσχυση του προηγούμενου στοιχείου. Στον Πίνακα 4.2 φαίνεται ο υπολογισμός της θερμοκρασίας θορύβου του συνολικού συστήματος του παραδείγματος με βάση τη φόρμουλα Friis.

Πίνακας 4.2 Θερμοκρασία θορύβου (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Table 4.2 Noise Temperature (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*)

	Ενίσχυση (dB)	**Ενίσχυση ($10^{dB/10}$)**
Κεραία, T_A	-	130 K
Περιβάλλουσα θερμοκρασία, T	-	290 K
Καλώδια και Φίλτρα, $F_1 = 1/G_1$	0.0	1.0
Ενίσχυση LNA, G_2	25	316.2
Βαθμός θορύβου LNA, F_2	1.9	1.5
Καλώδια και Φίλτρα, $F_3 = 1/G_3$	0.5	1.1
Βαθμός θορύβου, F_4	9.0	7.9
T_{eq}	-	296.4 K

4.2.5.β Carrier to Noise-Density Ratio (C/N_0)

Η εύρεση της T_{eq} είναι απαραίτητη, καθώς σχετίζεται με ένα χαρακτηριστικό μέγεθος του σήματος των GNSS, το οποίο καλείται Carrier to Noise-Density ratio (C/N_0). Το συγκεκριμένο μέγεθος, εκφράζει το πόσο ισχυρό είναι το σήμα των GNSS, που φθάνει στο δέκτη. Ο όρος Carrier (C) εκφράζει τη λαμβανόμενη ισχύς του σήματος, ενώ ο όρος Noise (N_0) εκφράζει τη θερμοκρασία θορύβου του δέκτη και υπολογίζεται από την εξίσωση (4.23).

$$N_0 = kT_{eq} \left(\frac{Watts}{Hz}\right) \qquad \text{Εξ. (4.23)}$$

Ο όρος k αναφέρεται στη σταθερά του Boltzmann και ισούται με $1.38 \cdot 10^{-23}$ Joule/Kelvin. Σε περίπτωση που ζητείται ο C/N_0 ενός σήματος που περνάει μέσα από ένα φίλτρο, τότε θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί ο όρος N_0 με το εύρος του φίλτρου. Σε αυτή την περίπτωση, υπολογίζεται ο λόγος ισχύος (power ratio) προκειμένου να ελεγχθεί η ισχύς του θορύβου.

$$P_N = kT_{eq}B_N = N_0 B_N (Watts) \qquad \text{Εξ. (4.24)}$$

Οι μονάδες μέτρησης του C/N_0, φαίνονται στην εξίσωση (4.25).

$$10log_{10}\left[\frac{C\ (Watts)}{N_0\ \left(\frac{Watts}{Hz}\right)}\right] = dB \cdot Hz \qquad \text{Εξ. (4.25)}$$

Λαμβάνοντας υπόψη τους πίνακες 4.1 και 4.2, καθώς και την εξίσωση (4.23) προκύπτει ο C/N_0 της συχνότητας L1 του συστήματος GPS.

$$N_0 = 10log_{10}(kT_{eq}) = 10log_{10}(1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 296.4) = -203.9\ dBW \cdot Hz \qquad \text{Εξ. (4.26)}$$

$$C/N_0 = \frac{-128.5\ dBm}{-203.9\ dBW \cdot Hz} = \frac{-158.5\ dBW}{-203.9\ dBW \cdot Hz} = -158.5 - (-203.9)\ dB \cdot Hz = \\ = 45.4\ dB \cdot Hz \qquad \text{Εξ. (4.27)}$$

Η συγκεκριμένη τιμή αναφέρεται στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος σε ανοιχτού ουρανού συνθήκες παρατήρησης.

4.2.6 Μετατροπή του Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό

Το τελευταίο τμήμα του μετωπιαίου RF, είναι η μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC). Η συγκεκριμένη διαδικασία εξαρτάται από το αντίστοιχο ADC που εντοπίζεται στο κύκλωμα, καθώς και των παραμέτρων του. Οι κύριο παράγοντες που θα αναλυθούν, είναι ο αριθμός των bit, η μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας, το εύρος του αναλογικού σήματος και εύρος των τάσεων του αναλογικού σήματος.

4.2.6.α Αριθμός των Bit

Η συγκεκριμένη παράμετρος εκφράζει το βάθος bit (bit depth). Για τα σήματα των GNSS, η ενός bit δειγματοληψία επιφέρει λιγότερη από 2 dB υποβάθμιση, στο τελικό ψηφιακό σήμα. Ωστόσο, οι περισσότεροι ADC του εμπορίου, προσφέρουν περισσότερων bit δειγματοληψία. Σε αυτήν την περίπτωση, η υποβάθμιση του παραγόμενου σήματος είναι λιγότερη από 1 dB. Στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται παραπάνω από 1 bit για τη δειγματοληψία, τότε το εισαγόμενο σήμα θα πρέπει να δεχθεί κάποιου είδους ενίσχυση, προκειμένου να κβαντωθεί σωστά το σήμα.

Ένας επιπλέον λόγος που χρησιμοποιούνται παραπάνω από 1 bit για την κβάντωση του σήματος, είναι ότι η κατά 2 dB υποβάθμιση αναφέρεται σε ιδανικές συνθήκες. Στην πραγματικότητα, λόγο των διαφόρων παρεμβολών που δέχονται οι κεραίες GNSS, η υποβάθμιση θα είναι χειρότερη. Ένας μεγαλύτερος ρυθμός δειγματοληψίας, θα μπορεί να ανταπεξέλθει στις παρεμβολές των σημάτων από το περιβάλλον.

4.2.6.β Μέγιστη Συχνότητα Δειγματοληψίας - Εύρος Αναλογικού Σήματος

Η συχνότητα δειγματοληψίας περιγράφει το ποια πρέπει να είναι η συχνότητα που θα δειγματοληφθεί ένα αναλογικό συνεχές σήμα, προκειμένου να μην χαθεί η πληροφορία του και να μπορεί να αναδημιουργηθεί. Η συχνότητα δειγματοληψίας προκύπτει από το θεώρημα του Nyquist [4], σύμφωνα με το οποία η συχνότητα δειγματοληψίας ενός σήματος, πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το διπλάσιο της μέγιστης συχνότητας του σήματος.

Η μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι τέτοια, έτσι ώστε να ικανοποιεί το εύρος του παραγόμενου σήματος. Για παράδειγμα, αν η μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας είναι 60 MHz, τότε το εύρος του παραγόμενου σήματος θα είναι στα 30 MHz. Ένα τέτοιο εύρος είναι αρκετό για τη συχνότητα της L1, της οποίας το εύρος είναι στα 2 MHz. Το ποια αναλογικά σήματα θα εισαχθούν στον ADC, εξαρτάται από το εύρος του αναλογικού

σήματος. Η τιμή του αναλογικού εύρους καθορίζει τη μέγιστη συχνότητα των σημάτων, που θα εισαχθούν στον ADC. Αυτή είναι και η τιμή του IF σήματος που δημιουργείται στους μείκτες. Με βάση την παραπάνω ανάλυση, είναι φανερό ότι το τελευταίο φίλτρο του μετωπιαίου RF (πριν τον ADC) πρέπει να είναι ένα φίλτρο Bandpass, προκειμένου να εισαχθούν μόνο οι συχνότητες ενδιαφέροντος.

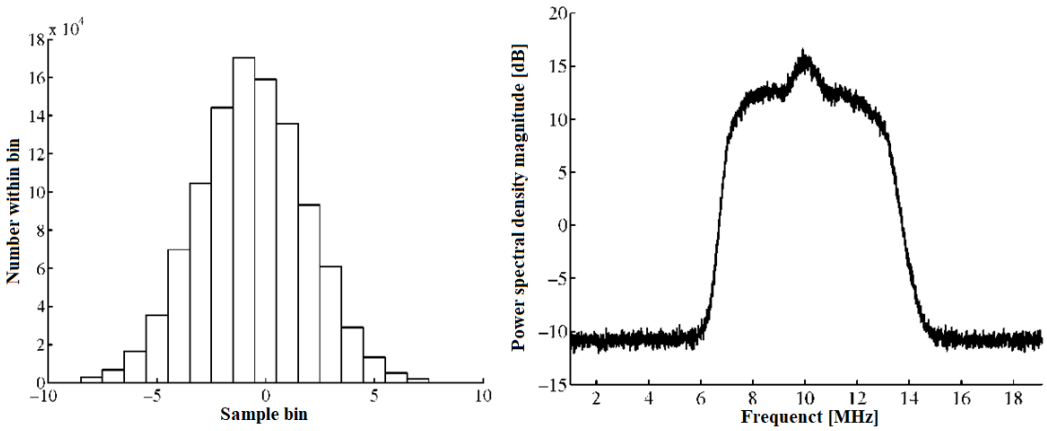
4.2.6.γ Εύρος Τάσεων του Αναλογικού Σήματος

Το συγκεκριμένο εύρος περιγράφει την τιμή των τάσεων που θα κατανεμηθεί η κβάντωση του σήματος. Το κάθε αναλογικό σήμα που εισάγεται στον ADC, παράγει μια τάση. Ανάλογα τον αριθμό της τάσης, γίνεται η ανάθεση της δυαδικής αξίας για το συγκεκριμένο σήμα. Ένα ελάχιστο εύρος τάσεων που χρησιμοποιείται στα RF, είναι το 1 V peak-to-peak. Ο όρος peak-to-peak περιγράφει το εύρος μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμής της τάσης ενός σήματος (ή η διαφορά του μέγιστου και ελάχιστου πλάτους του σήματος).

Ένα σήμα που παράγει τάση του 1 V, αντιστοιχεί σε -17 dBW. Φαίνεται λοιπόν γιατί είναι απαραίτητη η ενίσχυση του λαμβανόμενου σήματος. Η ισχύς των λαμβανόμενων σημάτων (-128.5 dBm ή -158.5 dBW) είναι αρκετά μικρή και δεν μπορεί να αντιστοιχηθεί κάποια δυαδική αξία στο συγκεκριμένο σήμα. Το πόση θα είναι η ενίσχυση του λαμβανόμενου σήματος, εξαρτάται από το πόσες δυαδικές αξίες ενεργοποιούνται από τον ADC. Αν για παράδειγμα, η ισχύς του σήματος είναι αρκετά χαμηλή και δεν χρησιμοποιούνται όλες οι δυαδικές αξίες του ADC, τότε η ενίσχυση αυξάνεται. Στην περίπτωση όπου η ενίσχυση είναι αρκετά μεγάλη και προκαλεί μεγάλο αριθμό δειγμάτων, τότε η ενίσχυση μειώνεται. Ένα τέτοιος ενισχυτής καλείται AGC (Automatic Gain Control) και είναι συνήθως ο τελευταίος ενισχυτής του μετωπιαίου RF.

4.3 Παραγόμενα Σήματα

Έχοντας μετατραπεί τα αναλογικά λαμβανόμενα σήματα σε ψηφιακά, έχουν δημιουργηθεί τα ψηφιακά παραγόμενα σήματα. Τα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων σημάτων, είναι η συχνότητά τους, η συχνότητα δειγματοληψίας τους καθώς και ο αριθμός των bit των δειγμάτων. Κάποιες χαρακτηριστικές τιμές των συγκεκριμένων παραμέτρων για τα σήματα των GNSS είναι, 9.548 MHz η IF, 38.192 MHz η συχνότητα δειγματοληψίας και δείγματα των 4 bit.



Σχήμα 4.8 Αναπαράσταση 1,048,576 δειγμάτων της L1 σε μορφή ιστογράμματος (αριστερά) και στο πεδίο των συχνοτήτων (δεξιά) (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 4.8 Representation of 1,048,576 samples of L1 in histogram (left) and in frequency domain (right) (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*)

Στο Σχήμα 4.8 φαίνεται στην αριστερή εικόνα ο αριθμός των bit των δειγμάτων. Οι στήλες που εμφανίζονται στην εικόνα είναι 16, το οποίο σημαίνει ότι χρησιμοποιήθηκαν και τα 4 bit του ADC ($2^4 = 16$). Στην αριστερή εικόνα φαίνονται τα δείγματα στο πεδίο των συχνοτήτων. Αυτό που φαίνεται στη συγκεκριμένη αναπαράσταση, είναι το αποτέλεσμα του τελευταίου Bandpass φίλτρου. Ο συγκεκριμένος χώρος αντιπροσωπεύει τη ζώνη των αναλογικών σημάτων που εισήχθησαν στον ADC, πριν τη ψηφιοποίησή τους. Επιπροσθέτως, στο κέντρο του γραφήματος εμφανίζεται μία ακμή, η οποία αντιπροσωπεύει την κορυφή της συνάρτησης sinc του σήματος της L1. Με λίγα λόγια την αναπαράσταση των κωδικών της L1 στο πεδίο των συχνοτήτων.

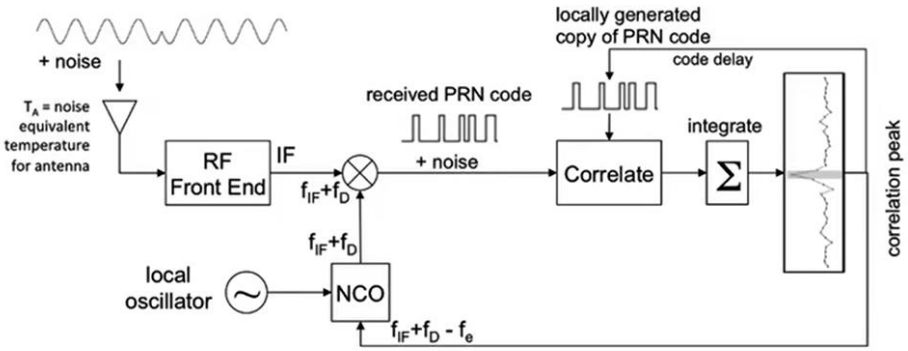
Το συγκεκριμένο σήμα εισάγεται στο επόμενο στάδιο του δέκτη, το οποίο περιλαμβάνει την εξαγωγή του κώδικα και τη συσχέτισή του με το αντίγραφο του δέκτη, την εύρεση του χρόνου λήψης του σήματος, την παρακολούθηση του συγκεκριμένου δορυφόρου, καθώς και τον προσδιορισμό της θέσης του δέκτη. Οι παραπάνω διαδικασίες θα αναλυθούν στο επόμενα κεφάλαια.

4.4 Μαθηματική Περιγραφή των Δεκτών GNSS

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει μια απλουστευμένη ανάλυση ενός λαμβανόμενου σήματος, στο εσωτερικό του δέκτη. Για τη συγκεκριμένη ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί ως λαμβανόμενο σήμα, ο πρώτος όρος της εξίσωσης (2.3).

$$s(t) = \sqrt{2P_{CL1}}C^k(t-\tau)D^k(t-\tau)\cos[2\pi(f_{L1}+f_D)t+\theta] \qquad \text{Εξ. (4.28)}$$

Για την απλούστευση της εξίσωσης, θεωρείται ότι ο κώδικας και τα δεδομένα πλοήγησης αποτελούν παλμοί πλάτους από -1 έως 1, γι' αυτό και χρησιμοποιείται ο κανονικός πολλαπλασιασμός. Σε αντίθεση με την εξίσωση (2.3), το συγκεκριμένο λαμβανόμενο σήμα έχει τρεις επιπρόσθετους όρους. Ο πρώτος όρος τ αντιπροσωπεύει το χρόνο που έκανε το σήμα για να φτάσει από το δορυφόρο στο δέκτη. Ο δεύτερος όρος f_D αντιπροσωπεύει τη μετατόπιση Doppler στη συχνότητα της L1. Τέλος, ο όρος θ αντιπροσωπεύει την ολίσθηση στη φάση του σήματος. Το μοντέλο του δέκτη που θα χρησιμοποιηθεί για το συγκεκριμένο παράδειγμα, φαίνεται στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9 Απλουστευμένη αρχιτεκτονική ενός δέκτη GNSS (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Figure 4.9 Basic GNSS receiver architecture (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*)

Το μετωπιαίο RF θεωρείται ότι αποτελείται από έναν ενισχυτή LNA, ένα φίλτρο Bandpass, έναν μείκτη (συνδεδεμένο με έναν ταλαντωτή) και ένα ακόμα Bandpass φίλτρο το οποίο έχει για κεντρική συχνότητα, την IF του παραγόμενου σήματος.

Το λαμβανόμενο σήμα εισάγεται στο μετωπιαίο RF. Το πρώτο στοιχείο είναι ο ενισχυτής LNA, ο οποίος επιφέρει μια αύξηση στο πλάτος του σήματος. Στη συνέχεια το σήμα εισάγεται στο πρώτο Bandpass φίλτρο, προκειμένου να αποκοπούν ορισμένες συχνότητες που μπορεί να οφείλονται σε παρεμβολές κτλ. Το επόμενο στοιχείο είναι ο μείκτης. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο §4.2.4 Μείκτες/ Τοπικοί Ταλαντωτές, ο ταλαντωτής παράγει ένα σήμα της μορφής,

$$m(t) = \sqrt{2}\cos[2\pi(f_{L1} - f_{IF})t + \theta_{IF}] \qquad \text{Εξ. (4.29)}$$

Η συχνότητα του σήματος του ταλαντωτή, είναι ίση με τη συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος, μετατοπισμένη κατά τη συχνότητα f_{IF}. Επιπλέον, προσθέτει μια τιμή φάσης θ_{IF}, η οποία διαφέρει από τη φάση του λαμβανόμενου σήματος θ, καθώς είναι άγνωστο μέγεθος. Τα σήματα των εξισώσεων (4.28) και (4.29) εισάγονται στο μείκτη και με βάση την εξίσωση (4.14) προκύπτει,

$$s(t) = \sqrt{2C_{CL1}}C^k(t-\tau)D^k(t-\tau)\{\cos[2\pi(f_{IF} + f_D)t + \theta - \theta_{IF}] + \cos[2\pi(2f_{L1} + f_D - f_{IF})t + \theta + \theta_{IF}]\} \qquad \text{Εξ. (4.30)}$$

Ο όρος $\sqrt{2C_{CL1}}$ εκφράζει τη μεταβολή του πλάτους του λαμβανόμενου σήματος από τον LNA. Το τελικό στοιχείο του μετωπιαίου RF, περιλαμβάνει το τελικό Bandpass φίλτρο, με κεντρική συχνότητα f_{IF}. Από το συγκεκριμένο φίλτρο, θα εισαχθούν μόνο οι συχνότητες που είναι κοντά στην κεντρική συχνότητα. Το σήμα που θα εξαχθεί από το μετωπιαίο RF φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση.

$$s(t) = \sqrt{2C_{CL1}}C^k(t-\tau)D^k(t-\tau)\cos[2\pi(f_{IF} + f_D)t + \delta\theta] \qquad \text{Εξ. (4.31)}$$

Ο όρος $\delta\theta$ εκφράζει τη διαφορά της φάσης του εισαγόμενου σήματος, με τη φάση του σήματος που παρήγαγε ο ταλαντωτής. Το σήμα της εξίσωσης (4.31), είναι το τελικό IF σήμα με συχνότητα f_{IF}, μετατοπισμένη λόγω του φαινομένου Doppler. Το συγκεκριμένο σήμα εισάγεται στον ADC και στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ένας ταλαντωτής προκειμένου να δημιουργήσει δύο σήματα, με διαφορά φάσης 90°. Το πρώτο σήμα *I(t)*, είναι το συνημιτονοειδές σήμα του ταλαντωτή, ενώ το δεύτερο σήμα *Q(t)*, είναι ημιτονοειδές σήμα, καθώς είναι ίδιο με το σήμα *I(t)*, μετατοπισμένο όμως κατά μισό κύκλο.

$$I(t) = \sqrt{2}\cos\left[2\pi\left(f_{IF} + \widehat{f_D}\right)t + \hat{\theta}\right] \qquad \text{Εξ. (4.32)}$$
$$Q(t) = -\sqrt{2}\sin\left[2\pi\left(f_{IF} + \widehat{f_D}\right)t + \hat{\theta}\right] \qquad \text{Εξ. (4.33)}$$

Ο ταλαντωτής παράγει τα δύο σήματα με μία προσεγγιστική τιμή $\widehat{f_D}$ για τη μετατόπιση Doppler του λαμβανόμενου σήματος, καθώς και με μία προσεγγιστική τιμή η οποία εκφράζει τη φάση του λαμβανόμενου σήματος. Ο λόγος που χρησιμοποιούνται προσεγγιστικές τιμές, είναι επειδή και η φάση του σήματος, αλλά και η μετατόπιση της συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler, είναι ακόμα άγνωστα μεγέθη. Το σήμα της εξίσωσης (4.33) πολλαπλασιάζεται με τα σήματα των εξισώσεων (4.32) και (4.33) και προκύπτουν δύο δείγματα του αρχικού σήματος.

$$s_I(t) = \sqrt{2C_{CL1}}C^k(t-\tau)D^k(t-\tau)\cos[2\pi(\Delta f_D)t + \Delta\theta] \qquad \text{Εξ. (4.34)}$$
$$s_Q(t) = \sqrt{2C_{CL1}}C^k(t-\tau)D^k(t-\tau)\sin[2\pi(\Delta f_D)t + \Delta\theta] \qquad \text{Εξ. (4.35)}$$

Τα δύο σήματα εισάγονται στο επόμενο στάδιο, το οποίο περιλαμβάνει τη συσχέτιση του κώδικα. Σε αυτήν την περίπτωση, ο δέκτης παράγει ένα ψηφιακό σήμα της μορφής $C^R(t-\hat{\tau})$. Το συγκεκριμένο σήμα είναι το αντίγραφο του κώδικα και είναι μετατοπισμένο κατά την εκτίμηση που έχει κάνει ο δέκτης, για το χρόνο που έκανε το σήμα να φτάσει από το δορυφόρο στο δέκτη (φάση κώδικα). Τα δύο σήματα ολοκληρώνονται και προκύπτουν οι δύο συναρτήσεις συσχέτισης.

$$S_I(t) = \frac{\sqrt{2C_{CL1}}D^k(t-\tau)}{T_{CO}} \int_0^{T_{co}} C^k(t-\tau)C^k(t-\hat{\tau})\cos[2\pi(\Delta f_D)t + \Delta\theta]\, dt \qquad \text{Εξ. (4.36)}$$

$$S_Q(t) = \frac{\sqrt{2C_{CL1}}D^k(t-\tau)}{T_{CO}} \int_0^{T_{co}} C^k(t-\tau)C^k(t-\hat{\tau})\sin[2\pi(\Delta f_D)t + \Delta\theta]\, dt \qquad \text{Εξ. (4.37)}$$

Ο όρος T_{CO}, καλείται χρόνος συνεκτικής ολοκλήρωσης (coherent integration time) και εκφράζει την αλλαγή του σήματος $C^R(t-\hat{\tau})$, προκειμένου να ταυτιστεί με το αντίστοιχο λαμβανόμενο σήμα. Ουσιαστικά, εκφράζει το πόση ώρα ολοκληρώνονται τα πάνω σήματα, προκειμένου να συσχετιστούν οι δύο κώδικες (περαιτέρω ανάλυση θα γίνει στο Κεφάλαιο 5. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ – ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ).

Από τις εξισώσεις (4.36) και (4.37), φαίνεται ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συσχέτιση των δύο σημάτων, είναι η μετατόπιση λόγω Doppler Δf_D και η προσέγγιση του δέκτη $\hat{\tau}$, στο χρόνο που έκανε το σήμα για να φτάσει στο δέκτη. Για να μπορέσει να γίνει η συσχέτιση του λαμβανόμενου σήματος, με το αντίγραφο του δέκτη, θα πρέπει να βρεθεί ο συνδυασμός των δύο αυτών τιμών, που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση συσχέτισης.

5. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ – ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ

Η ανάλυση του Κεφαλαίου 4. ΚΕΡΑΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΩΠΙΑΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΩΝ ΔΕΚΤΩΝ GNSS, αφορά τα στάδια ανάλυσης του λαμβανόμενου δορυφορικού σήματος, προκειμένου καταστεί επεξεργάσιμο από το δέκτη. Το τελικό σήμα που προέκυψε από τη συγκεκριμένη ανάλυση, είναι ένα σήμα IF το οποίο έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με το φορέα. Σε αυτό το κεφάλαιο, περιγράφονται τα στάδια ανάλυσης σήματος που ακολουθούν, τα οποία περιλαμβάνουν την ανάκτηση του σήματος του εκάστοτε δορυφόρου, την παρακολούθησή του και τον προσδιορισμό της θέσης του δέκτη.

5.1 Ανάκτηση Σήματος

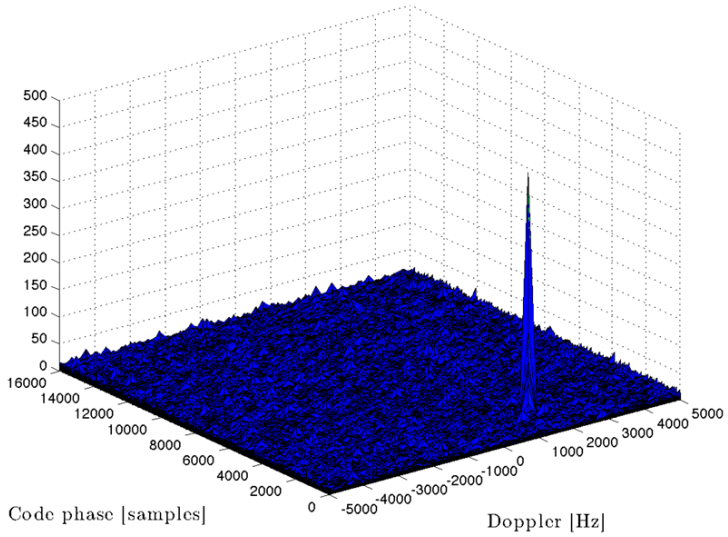
Ο όρος ανάκτηση σήματος, πρωτογενώς αναφέρεται στη διαδικασία αναγνώρισης του εκάστοτε δορυφόρου από το δέκτη. Κατά τη διαδικασία των παρατηρήσεων, ο δέκτης λαμβάνει σήματα από τουλάχιστον 4 δορυφόρους, οι οποίοι συνήθως ανήκουν σε διαφορετικό δορυφορικό σύστημα εντοπισμού. Προκειμένου ο δέκτης να λάβει τα δεδομένα κάθε δορυφόρου, είναι αναγκαίο να ταυτοποιήσει το δορυφόρο μέσω του κώδικα (PRN). Η διαδικασία περιλαμβάνει τη συσχέτιση του κώδικα του λαμβανόμενου σήματος, με τον κώδικα που παράγει ο δέκτης. Ωστόσο, το λαμβανόμενο σήμα περιέχει δύο παραμέτρους, οι οποίοι δυσχεραίνουν τη διαδικασία συσχέτισης των δύο σημάτων. Όπως φάνηκε στις εξισώσεις (4.36) και (4.37), οι δύο αυτοί παράμετροι είναι η συχνότητα του φορέα, η οποία είναι μετατοπισμένη λόγω του φαινομένου Doppler και η φάση του κώδικα. Σκοπός της ανάκτησης του σήματος, είναι να προσδιορίσει τις δύο αυτές παραμέτρους και με βάση τις ιδιότητες συσχέτισης (Βλέπε παράγραφο §2.2.2 Ιδιότητες Συσχέτισης των Κωδικών Gold), να συσχετίσει τα δύο σήματα.

5.1.2 Βασική Αρχή της Ανάκτησης Σήματος

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι δύο παράμετροι που καθορίζουν την αποτελεσματική ανάκτηση του σήματος, είναι η μετατόπιση λόγω Doppler της συχνότητας του φορέα και η φάση του κώδικα. Σύμφωνα με την παράγραφο §2.2 Μετατοπίσεις Doppler, η μέγιστη μετατόπιση Doppler είναι ±5 KHz για σενάρια στατικού εντοπισμού. Προκειμένου ο δέκτης να εντοπίσει τη συγκεκριμένη μετατόπιση, θα πρέπει να ελέγξει όλες τις πιθανές συχνότητες του παραπάνω εύρους. Ο έλεγχος γίνεται με συγκεκριμένο εύρος, το οποίο καθορίζεται από το χρόνο συνεκτικής ολοκλήρωσης (T_{CO}) (περαιτέρω ανάλυση θα γίνει στις επόμενες παραγράφους).

Η δεύτερη παράμετρος είναι η φάση του κώδικα. Η συγκεκριμένη παράμετρος εκφράζει την καθυστέρηση που εισάγει ο δέκτης στο αντίγραφό του. Ο κώδικας από το δορυφόρο, είναι μετατοπισμένος λόγω της απόστασης δορυφόρου δέκτη. Η συγκεκριμένη χρονική καθυστέρηση είναι άγνωστο μέγεθος, οπότε ο δέκτης εισάγει μια δικιά του καθυστέρηση, προκειμένου να συγχρονιστούν και να συσχετιστούν οι δύο κώδικες. Η συγκεκριμένη καθυστέρηση εκφράζεται σε chips. Στην περίπτωση του κώδικα C/A, η τιμή της καθυστέρησης του δέκτη μπορεί να πάρει την τιμή από 1 έως 1023. Με αυτόν τον τρόπο, υποδηλώνεται ότι του αντίγραφο του κώδικα είναι μετατοπισμένο κατά έναν ακέραιο αριθμό chips από τον λαμβανόμενο κώδικα.

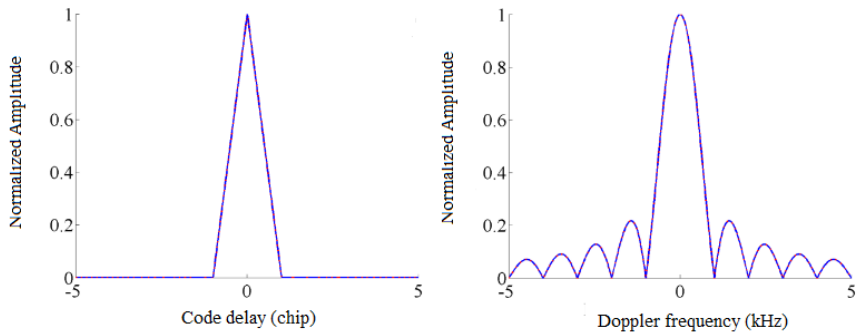
Η εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού των δύο παραμέτρων, γίνεται στον τρισδιάστατο χώρο. Η αναπαράσταση αυτού του χώρου, φαίνεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1 Διαγραμματική αναπαράσταση της συνάρτησης συσχέτισης (Πηγή *GNSS-SDR/Documentation/SP-Blocks/Acquisition*) - Figure 5.1 Schematic view of correlation function (Source *GNSS-SDR/Documentation/SP-Blocks/Acquisition*)

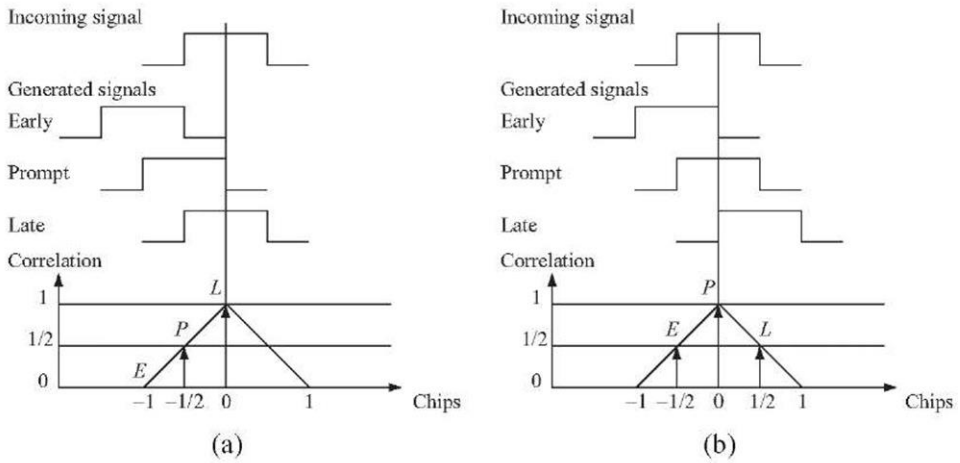
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.1, η εύρεση του σωστού συνδυασμού των δύο παραμέτρων, οδηγεί στη μεγιστοποίηση της συνάρτησης συσχέτισης. Ο άξονας Doppler περιλαμβάνει ένα εύρος των ±5 KHz, ενώ ο άξονας Code Phase περιλαμβάνει τις καθυστερήσεις του παραγόμενου από το δέκτη κώδικα. Η ακμή της συνάρτησης συσχέτισης, υποδεικνύει ότι ο λαμβανόμενος κώδικας ταυτίστηκε πλήρως με το αντίγραφο του. Η εύρεση της καθυστέρησης του κώδικα, συνεπάγεται ότι βρέθηκε ο χρόνος που έκανε το σήμα προκειμένου να φτάσει από το δορυφόρο στο δέκτη. Η εύρεση του συγκεκριμένου χρόνου είναι το κλειδί για την αποτελεσματικότητα των GNSS, καθώς ο χρόνος ταξιδιού πολλαπλασιασμένος με την ταχύτητα διάδοσης του φορέα (ταχύτητα του φωτός) δίνει την απόσταση μεταξύ δορυφόρου και δέκτη.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεμονωμένη αναπαράσταση του Doppler και του Code phase.



Σχήμα 5.2 Διαγραμματική αναπαράσταση των ολισθήσεων του κώδικα και της συχνότητας (Πηγή *Study on the cross-correlation of GNSS signals and typical approximations, August 2016*) - Figure 5.2 Schematic view of code and frequency offset (Source *Study on the cross-correlation of GNSS signals and typical approximations, August 2016*)

Στην αριστερή εικόνα (Βλέπε Σχήμα 5.2 Code Offset) φαίνεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του κώδικα στο πεδίο του χρόνου. Η συνάρτηση συσχέτισης των τετραγωνικών παλμών [Βλέπε Εξ.(2.7)], σχηματίζει το συγκεκριμένο τρίγωνο του οποίου η κορυφή συμβολίζει την ταύτιση των δύο κωδικών. Το κάθε δείγμα του λαμβανόμενου κώδικα, πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο δείγμα του αντιγράφου του και στη συνέχεια αθροίζονται. Στην περίπτωση όπου όλα τα δείγματα του κώδικα ταυτίζονται με τα αντίστοιχα δείγματα του αντιγράφου του, τότε μεγιστοποιείται η συνάρτηση συσχέτισης. Στην περίπτωση που η αποχή είναι μεγαλύτερη από 1 chip, τότε η συνάρτηση ελαχιστοποιείται.



Σχήμα 5.3 Συσχέτιση του λαμβανόμενου κώδικα και του αντιγράφου του (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 5.3 Correlation of incoming code and his replica (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*)

Οι όροι *L*, *P* και *E* αναφέρονται στα αντίγραφα Late, Prompt και Early αντίστοιχα. Η χρησιμότητα των τριών αυτών αντιγράφων, θα αναλυθεί στην παράγραφο §5.2.2 Παρακολούθηση του Κώδικα.

Στη δεξιά εικόνα (Βλέπε Σχήμα 5.2 Frequency Offset) φαίνεται η αναπαράσταση των τετραγωνικών παλμών του κώδικα, στο πεδίο των συχνοτήτων. Η συγκεκριμένη συνάρτηση, περιγράφεται από το μέτρο της εξίσωσης,

$$|\mathrm{sinc}(fT_{CO})| = \left|\frac{\sin(\pi f T_{CO})}{\pi f T_{CO}}\right| \qquad \text{Εξ. (5.1)}$$

Στην εξίσωση (5.1) με *f* συμβολίζεται το εύρος του βήματος. Όπως αναφέρθηκε, ένας σημαντικός παράγοντας στον υπολογισμό της συχνότητας, είναι το βήμα (frequency bin) με το οποίο θα γίνει ο έλεγχος των συχνοτήτων στο διάστημα ±5 KHz. Το εύρος του βήματος καθορίζεται από την ευαισθησία του. Η ευαισθησία του βήματος, περιγράφει πόσο κάτω από την κορυφή της καμπύλης θα θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί η αυτοσυσχέτιση του κώδικα με το αντίγραφό του. Όσο πιο μεγάλο το εύρος, τόσο μικρότερη θα είναι η ευαισθησία του, δηλαδή τόσο μεγαλύτερη θα είναι η αποχή από την κορυφή της καμπύλης. Αντίστοιχα, όσο μικραίνει το εύρος, τόσο μικραίνει η αποχή από την κορυφή της καμπύλης, αλλά αυξάνεται ο χρόνος που απαιτείται για να βρεθεί η σωστή συχνότητα. Η τιμή του βήματος είναι συνήθως 500 Hz (±250 Hz), ενώ ο χρόνος T_{CO} συνήθως είναι 1 ms. Η επιλογή 1 ms δεν είναι τυχαία, καθώς ο κώδικας C/A επαναλαμβάνεται κάθε 1 ms. Αυτό σημαίνει ότι η ολοκλήρωση [Βλέπε

Εξ.(4.36) και (4.37)] θα πρέπει να διαρκέσει τουλάχιστον 1 ms, προκειμένου να επιτευχθεί η αυτοσυσχέτιση. Εφαρμόζοντας τις παραπάνω τιμές στην εξίσωση (5.1), προκύπτει,

$$|sinc(250 \cdot 10^{-3})| = \left|\frac{\sin(\pi \cdot 250 \cdot 10^{-3})}{\pi \cdot 250 \cdot 10^{-3}}\right| = 0.90 = 10 \cdot log_{10}(0.9^2) = -1\ dB \quad \text{Εξ. (5.2)}$$

Υπενθυμίζεται ότι η τιμή 0.9 υψώνεται στο τετράγωνο, καθώς αποτελεί λόγο μέτρου, ενώ τα dB εκφράζουν λόγο ισχύος. Με ένα βήμα των ±250 Hz η απώλεια από την κορυφή της καμπύλης είναι 0.1 ή -1 dB.

5.1.3 Επιρροή του Θορύβου

Η μέχρι τώρα ανάλυση, έχει γίνει χωρίς την προσθήκη θορύβου. Τα σήματα των GNSS είναι επιβαρυμένα με θόρυβο, λόγω της διάδοσης μέσα από τα στρώματα της ατμόσφαιρας, καθώς και άλλων εξωτερικών παρεμβολών. Αυτό έχεις ως αποτέλεσμα τη στρέβλωση του σήματος και κατ' επέκταση, του κώδικα. Σε περίπτωση που ο θόρυβος δεν είχε κάποια συσχέτιση με το αντίγραφο του κώδικα (ή ο θόρυβος ήταν τυχαίος), τότε δεν θα επηρεαζόταν σημαντικά η κορυφή της συνάρτησης συσχέτισης του Code Offset. Ωστόσο, λόγω της εισαγωγής του λαμβανόμενου σήματος στο μετωπιαίο RF, ο θόρυβος επηρεάζει τη συσχέτιση του κώδικα με το αντίγραφό του.

5.1.3.α Signal to Noise Ratio (SNR)

Ο λόγος Signal to Noise Ratio (SNR) εκφράζει το πόσο πιο ισχυρό είναι το σήμα, έναντι του θορύβου. Η τιμή του, δίνεται από το λόγο του σήματος πριν συσχετιστεί, προς την ισχύς του θορύβου.

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} = \left(\frac{S}{\sigma_N}\right)^2 \quad \text{Εξ. (5.3)}$$

Στην εξίσωση (5.3), ο όρος S εκφράζει το πλάτος της κορυφής συσχέτισης, ενώ ο όρος σ_N εκφράζει την τυπική απόκλιση του θορύβου. Με βάση την μέχρι τώρα ανάλυση, το λαμβανόμενο σήμα πριν τη συσχέτιση, είναι της τάξεως των -128.5 dBm ≈ -130 dBm. Ένα τυπικό IF έχει εύρος 3 MHz. Σε συνδυασμό με την εξίσωση (4.26), η ισχύς του θορύβου του IF σήματος υπολογίζεται από τη σχέση,

$$P_N = 10log_{10}(3 \cdot 10^6) - 203.9 = -139.1\ dBW = -109.1\ dBm \quad \text{Εξ. (5.4)}$$

Ο SNR του IF σήματος, υπολογίζεται από τη διαφορά της ισχύς του λαμβανόμενου σήματος με την ισχύς του θορύβου, καθώς είναι εκφρασμένα σε λογαριθμική κλίμακα.

$$SNR_{IF} = -130\ dBm - (-109.1\ dBm) = -20.9\ dBm \quad \text{Εξ. (5.5)}$$

Φαίνεται λοιπόν πόσο υπερισχύει ο θόρυβος, έναντι του σήματος. Σε μία τέτοια περίπτωση, δεν θα μπορούσε να βρεθεί η κορυφή της συνάρτησης συσχέτισης, καθώς όλο το σήμα αποτελείται κυρίως από θόρυβο. Για να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, χρησιμοποιείται η ideal coherent gain η οποία εκφράζει την απολαβή που θα είχε το σήμα, αν ο θόρυβος δεν έχει κάποια συσχέτιση με το αντίγραφο του δέκτη.

5.1.3.β Ideal Coherent Gain

Σε έναν τυπικό δέκτη, η συσχέτιση του κώδικα C/A με το αντίγραφό του, γίνεται με ρυθμό δειγματοληψίας 2 δείγματα ανά chip. Συνεπώς, ο ρυθμός δειγματοληψίας του C/A κώδικα είναι 2·1.023 MHz = 2.046 MHz. Σε μία περίοδο του κώδικα, ο αριθμός των δειγμάτων είναι ίσος με,

$$M_C = 1\,ms \cdot 2.046\,MHz = 2046\,\delta\epsilon\acute{\iota}\gamma\mu\alpha\tau\alpha \qquad \text{Εξ. (5.6)}$$

Με βάση την ideal coherent gain, το μέτρο του σήματος αυξάνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των δειγμάτων (M_C), ενώ η τυπική απόκλιση του θορύβου, αυξάνεται όσο αυξάνεται η τετραγωνική ρίζα του αριθμού των δειγμάτων ($\sqrt{M_C}$). Με βάση την εξίσωση (5.3), ο SNR αυξάνεται κατά,

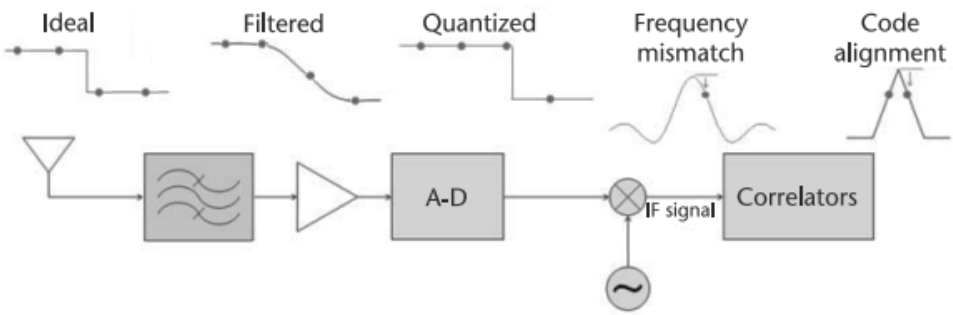
$$\left(\frac{M_C}{\sqrt{M_C}}\right)^2 = M_C \qquad \text{Εξ. (5.7)}$$

Με βάση την εξίσωση (5.6), η ideal coherent gain, που είναι συνάρτηση του αριθμού των δειγμάτων, δίνεται από την εξίσωση,

$$ideal\ coherent\ gain = 10log_{10}(M_C) \qquad \text{Εξ. (5.8)}$$

5.1.3.γ Απώλειες Εφαρμογής (Implementation Losses)

Με τον όρο απώλειες εφαρμογής, αναφέρεται η υποβάθμιση του σήματος κατά την επεξεργασία του από το δέκτη. Το αποτέλεσμά τους είναι η αύξηση του θορύβου του λαμβανόμενου σήματος, καθώς επιφέρουν μείωση της ideal coherent gain.



Σχήμα 5.4 Απώλειες εφαρμογής (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Figure 5.4 Implementation losses (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*)

Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται η επιρροή των διαφόρων τμημάτων της κεραίας, σε ένα τμήμα του PRN κώδικα. Ο εισαγόμενος παλμός (Ideal), θεωρείται ένας ιδανικός τετραγωνικός παλμός, πλάτους -1 έως 1. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4. ΚΕΡΑΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΩΠΙΑΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΩΝ ΔΕΚΤΩΝ GNSS, τα διάφορα τμήματα της κεραίας αυξάνουν το θόρυβο του λαμβανόμενου σήματος. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3, το φιλτράρισμα του σήματος μπορεί να οδηγήσει στην αλλοίωση του τετραγωνικού παλμού (Filtered), μεταβάλλοντας τη θέση ορισμένων chips. Αυτή η μεταβολή, επηρεάζει τη κβάντωση του σήματος κατά τη μετατροπή του σε ψηφιακό, προσδίδοντας διαφορετική δυαδική αξία στο συγκεκριμένο chip (Quantized). Η επόμενη απώλεια (Frequency mismatch) οφείλεται στη συχνότητα του μείκτη, η οποία δεν ταυτίζεται με αυτή του φορέα, επιφέροντας μια

υπολειπόμενη συχνότητα στο επεξεργασμένο σήμα [Βλέπε Εξ.(4.34) και Εξ.(4.35)]. Τέλος, η τελευταία απώλεια (Code alignment) οφείλεται στη διαφορετική θέση των δειγμάτων του επεξεργασμένου σήματος, σε σχέση με αυτά του αντιγράφου του. Αυτό έχεις ως αποτέλεσμα, τα δείγματα να μην βρίσκονται στην κορυφή της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, οι απώλειες που προκύπτουν είναι:

- IF filtering loss (IF): η απώλεια λόγω του φιλτραρίσματος του IF σήματος
- Quantization loss (Q): η απώλεια λόγω μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό
- Frequency mismatch loss (F): η απώλεια λόγω της διαφοροποίησης της συχνότητας του λαμβανόμενου σήματος και του σήματος του μείκτη
- Code alignment (C): η απώλεια λόγω της διαφορετικής θέσης των δειγμάτων του επεξεργασμένου σήματος και του αντιγράφου του

Με βάση της απώλειες εφαρμογής, η συνολική ideal coherent gain δίνεται από την εξίσωση,

$$actual\ coherent\ gain = ideal\ coherent\ gain - (IF + Q + F + C) \qquad \text{Εξ. (5.9)}$$

Στον Πίνακα 5.1 φαίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές των παραπάνω απωλειών, καθώς και η τελική τιμή του SNR του σήματος.

Πίνακας 5.1 Coherent Gain (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Table 5.1 Coherent Gain (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*)

	Ενίσχυση (dB)
IF SNR	-20.9
Ideal Coherent Gain	33.1
IF	0.0
Q	-0.6
F	-0.1
C	-1.2
Actual Coherent Gain	31.2
SNR	10.4
Ratio	$10^{\frac{SNR}{20}} = 3.3$

Η τελική τιμή του SNR είναι 10.4 dB, το οποίο συνεπάγεται ότι η κορυφή της συνάρτησης συσχέτισης είναι 3.3 φορές μεγαλύτερη από την τυπική απόκλιση του θορύβου. Η τιμή 3.3 αποτελεί μια τυπική τιμή της κορυφής συσχέτισης, ενώ υπάρχουν δέκτες που ο λόγος της κορυφής συσχέτισης προς τη τετραγωνική ρίζα του θορύβου, είναι 7.3. Όσο μεγαλώνει ο συγκεκριμένος λόγος, τόσο αυξάνεται η ευαισθησία του δέκτη στο να εντοπίσει τη κορυφή συσχέτισης στον τρισδιάστατο χώρο που φαίνεται στο Σχήμα 5.1.

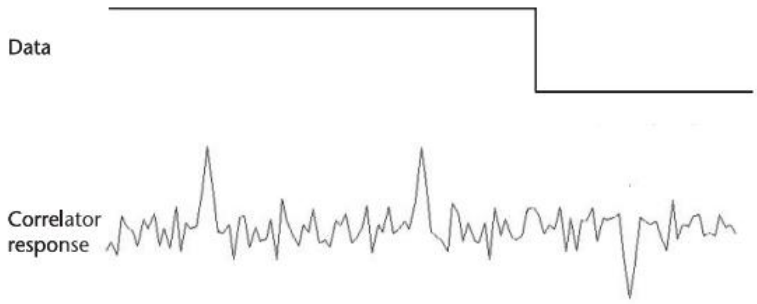
5.1.4 Coherent Integration

Στην παράγραφο §4.4 Μαθηματική Περιγραφή των Δεκτών GNSS, αναφέρθηκε ότι το επεξεργασμένο σήμα πολλαπλασιάζεται με τον παραγόμενο από το δέκτη κώδικα και στη συνέχεια ολοκληρώνονται (αθροίζονται), προκειμένου να προκύψει η κορυφή συσχέτισης. Η coherent integration εκφράζει μια μορφή ολοκλήρωσης, κατά την οποία ότι μεταβολή υπάρχει στη φάση του επεξεργασμένου σήματος, το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης, θα δεχθεί την ίδια μεταβολή φάσης. Η ολοκλήρωση γίνεται σε ένα χρονικό διάστημα T_{CO}, το

οποίο ονομάζεται coherent integration time. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος χρόνος έχει πεπερασμένο εύρος, καθώς μετά από μια συγκεκριμένη τιμή, η κορυφή συσχέτισης αρχίζει να μειώνεται. Στη συγκεκριμένη παράγραφο, θα αναφερθούν τα μειονεκτήματα της πολύωρης coherent integration, καθώς και ο τρόπος που μπορεί να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα.

5.1.4.α Μειονεκτήματα της Coherent Integration

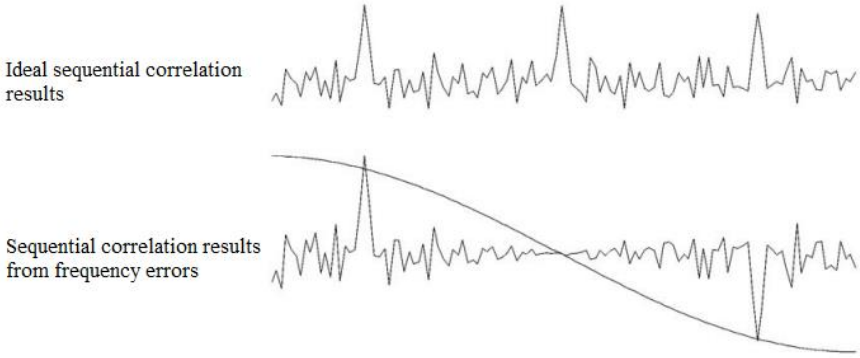
Η μέχρι τώρα ανάλυση, έχει γίνει χωρίς την αναφορά των δεδομένων πλοήγησης. Τα δεδομένα αυτά διαμορφώνουν από κοινού το φορέα. Ωστόσο, λόγω του αργού ρυθμού μετάδοσής τους (50 bps), η διαμόρφωση του φορέα οφείλεται κυρίως στις εναλλαγές του κώδικα. Αν η ολοκλήρωση, δηλαδή η άθροιση των δύο κωδικών διαρκέσει αρκετό χρόνο, τότε θα υπάρξει κάποια μεταβολή στη φάση του κώδικα η οποία θα οφείλεται στα δεδομένα πλοήγησης. Αυτή η μεταβολή θα αντιστρέψει τη κορυφή συσχέτισης κατά 180°, λόγω της διαμόρφωσης του φορέα από τη μέθοδο BPSK.



Σχήμα 5.5 Μεταβολή 180° της συνάρτησης συσχέτισης από τα δεδομένα πλοήγησης (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Figure 5.5 180° Phase change from navigation data (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*)

Η άθροιση των συναρτήσεων συσχέτισης του Σχήματος 5.4, θα οδηγήσει σε μία συνάρτηση συσχέτισης χωρίς κάποια ισχυρή κορυφή (SNR ratio < 3.3), καθώς οι θετικές κορυφές θα αναιρούνται από τις αρνητικές. Η απουσία της κορυφής συσχέτισης, συνεπάγεται την αποτυχία εύρεσης του χρόνου ταξιδιού. Φαίνεται λοιπόν, ότι ο ένας παράγοντας που επηρεάζει το χρόνο T_{CO}, είναι ο χρόνος που απαιτείται για να αποσταλεί το κάθε bit του μηνύματος πλοήγησης (δηλαδή 20 ms).

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τη φάση του κώδικα, είναι η υπολειπόμενη συχνότητα του επεξεργασμένου σήματος.

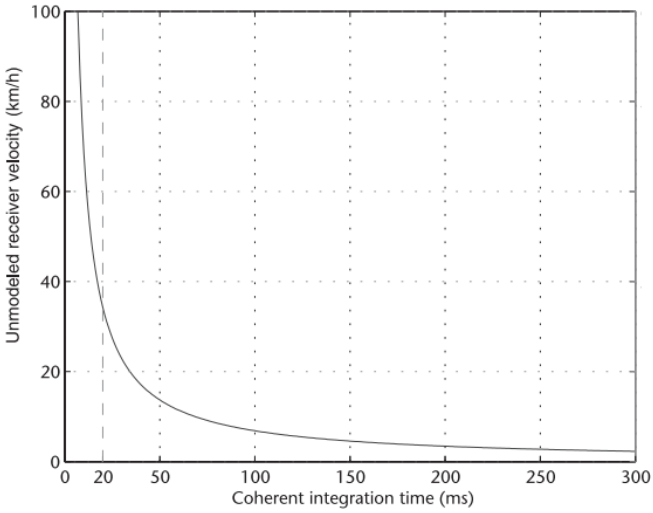


Σχήμα 5.6 Μεταβολή των κορυφών συσχέτισης λόγω σφαλμάτων στη συχνότητα του σήματος (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Figure 5.6 Shift of correlation peaks due to frequency errors (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*)

Η συγκεκριμένη συχνότητα, λόγω του ότι βρίσκεται εντός του συνημίτονου, οδηγεί στην αναστροφή του κώδικα και κατ' επέκταση στη δημιουργία μηδενικών και αρνητικών κορυφών συσχέτισης. Το αποτέλεσμα των αρνητικών κορυφών, εμφανίζεται στο Σχήμα 5.2 ως μηδενικές τιμές της συνάρτησης *sinc* [Βλέπε Εξ.(5,1)], σε απόσταση από την κορυφή συσχέτισης $\pm 1/T_{CO}$. Ωστόσο, υπάρχει η δυνατότητα να εντοπιστεί η κορυφή συσχέτισης στη συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς θα εντοπίζεται σε διαφορετική θέση στο χώρο του Σχήματος 5.1.

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας στην επιλογή του T_{CO}, είναι ο ρυθμός αλλαγής της ταχύτητας του δέκτη. Η αλλαγή στην ταχύτητα του δέκτη, προκαλεί μια μεταβολή στη φάση του φορέα. Η μέγιστη επιτρεπόμενη αλλαγή στην ταχύτητα του δέκτη, είναι εκείνη που αντιστοιχεί σε μετατόπιση ενός μήκος κύματος, καθόλη τη διάρκεια του T_{CO}. Για παράδειγμα, για τη συχνότητα L1 του συστήματος GPS, η μέγιστη επιτρεπόμενη αλλαγή στην ταχύτητα δίνεται στο παρακάτω σχήμα.

$$\Delta velocity = \frac{\lambda_{L1}}{T_{CO}} = \frac{0.19\ m}{T_{CO}} \qquad \text{Εξ. (5.10)}$$



Σχήμα 5.7 Διάγραμμα ρυθμού μεταβολής της ταχύτητα του δέκτη συναρτήσει του T_{CO} για τη συχνότητα L1 (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Figure 5.7 Rate of change in receiver's velocity vs coherent integration time of L1 (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*)

Αν η αλλαγή στην ταχύτητα, αντιστοιχεί σε μετατόπιση φάσης του φορέα κατά ένα μήκος κύματος, τότε θα δημιουργηθούν ίσου αριθμού αρνητικές και θετικές κορυφές συσχέτισης, οι οποίες θα αναιρεθούν. Με βάση το Σχήμα 5.6, για διάρκεια ολοκλήρωσης 20 ms, η μέγιστη επιτρεπόμενη αλλαγή στην ταχύτητα του δέκτη είναι 34.2 km/h, το οποίο είναι ικανοποιητικό για περιπτώσεις πλοήγησης οχημάτων. Όσο μεγαλώνει ο χρόνος ολοκλήρωσης, τόσο μικραίνει η επιτρεπόμενη αλλαγή ταχύτητας. Σε συνδυασμό με το χρόνο που απαιτείται για τη μετάδοση 1 bit δεδομένων πλοήγησης, φαίνεται ότι τα 20 ms είναι ο μέγιστος χρόνος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί η coherent integration.

5.1.4.β I&Q και Non-Coherent Integration

Για την αντιμετώπιση των τριών παραπάνω προβλημάτων, χρησιμοποιούνται δύο κανάλια I&Q [Βλέπε Εξ.(4.34) και Εξ.(4.35)], προκειμένου να απαλλαγεί το επεξεργασμένο σήμα από τις μεταβολές στη φάση του. Το κάθε ένα από τα κανάλια I&Q υψώνεται στο τετράγωνο και στη συνέχεια, αθροίζονται.

$$s_I(t)^2 = \left(\sqrt{2C_{CL1}}C^k(t-\tau)D^k(t-\tau)\right)^2 (\cos[2\pi(\Delta f_D)t + \Delta\theta])^{\,2} \qquad \text{Εξ. (5.11)}$$

$$s_Q(t)^2 = \left(\sqrt{2C_{CL1}}C^k(t-\tau)D^k(t-\tau)\right)^2 (\sin[2\pi(\Delta f_D)t + \Delta\theta])^2 \qquad \text{Εξ. (5.12)}$$

$$s_I(t)^2 + s_Q(t)^2 = \left(\sqrt{2C_{CL1}}C^k(t-\tau)D^k(t-\tau)\right)^2 + \\ + [(\cos[2\pi(\Delta f_D)t + \Delta\theta])^{\,2} + (\sin[2\pi(\Delta f_D)t + \Delta\theta])^2] \qquad \text{Εξ. (5.13)}$$

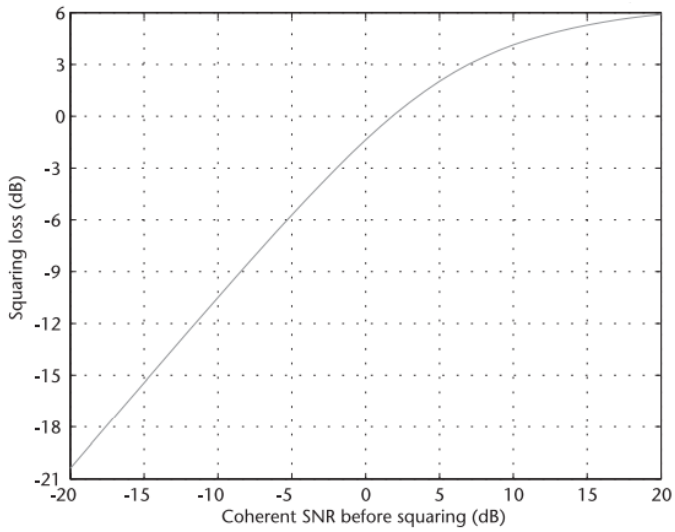
Χρησιμοποιώντας την τριγωνομετρική ταυτότητα $\sin\theta^2 + \cos\theta^2 = 1$, προκύπτει ότι η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος του τετραγώνου (Route Sum of Squares – RSS) των δύο σημάτων ισούται,

$$\sqrt{s_I(t)^2 + s_Q(t)^2} = \sqrt{\left(\sqrt{2C_{CL1}}C^k(t-\tau)D^k(t-\tau)\right)^2} \\ = \sqrt{2C_{CL1}}C^k(t-\tau)D^k(t-\tau) \qquad \text{Εξ. (5.14)}$$

Το νέο σήμα που προέκυψε, είναι απαλλαγμένο από όλες τις μεταβολές στη συχνότητά του και κατ' επέκταση των μετατοπίσεων της φάσης. Γι αυτό και η συγκεκριμένη άθροιση των σημάτων καλείται non-coherent integration. Ένας ακόμα όρος που αλλάζει μετά την άθροιση των σημάτων, είναι ο θόρυβος. Η ύψωση των σημάτων στο τετράγωνο, συνεπάγεται και την ύψωση του θορύβου στο τετράγωνο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωσης της τυπικής απόκλισής του, καθώς και τη μεταβολή της μέσης τιμής του, η οποία είναι πλέον μεγαλύτερη του μηδενός. Η αύξηση της τυπικής απόκλισης του θορύβου, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κορυφή συσχέτισης δηλαδή του SNR. Η συγκεκριμένη μείωση καλείται απώλεια τετραγωνισμού (squaring loss) και υπολογίζεται από την εξίσωση,

$$squaring\ loss = \frac{RSS\ SNR}{coherent\ SNR} \qquad \text{Εξ. (5.15)}$$

Οι τιμές αυτής της συγκεκριμένης απώλειας φαίνονται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.8 Διάγραμμα απώλειας τετραγωνισμού συναρτήσει του SNR πριν τον τετραγωνισμό (Πηγή *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*) - Figure 5.8 Squaring loss vs Coherent SNR before squaring (Source *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS, 2009*)

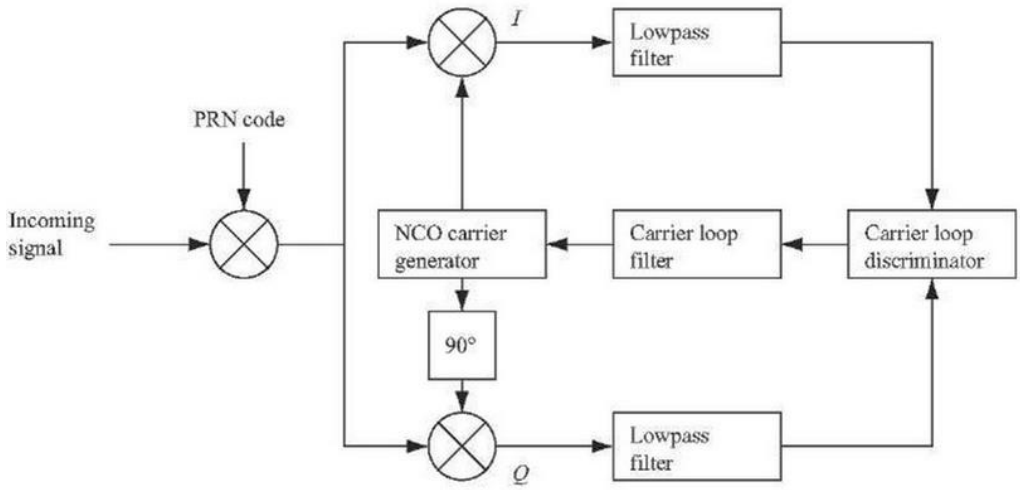
Φαίνεται λοιπόν, ότι προκειμένου να απαλλαγεί το σήμα από τις μεταβολές της συχνότητας, θα πρέπει να δεχτεί μια υποβάθμιση η κορυφή συσχέτισης. Το πλεονέκτημα με της non-coherent integration, είναι ότι ο δέκτης μπορεί να πραγματοποιεί συσχετίσεις για εκατοντάδες ms.

5.2 Παρακολούθηση δορυφορικών σημάτων

Ο κύριος σκοπός της παρακολούθησης του δορυφορικού σήματος, είναι η ανανέωση των τιμών της μετατόπισης της συχνότητας και της φάσης του κώδικα, καθώς και της αποδιαμόρφωσης των δεδομένων πλοήγησης προκειμένου να υπολογιστεί η θέση του δέκτη. Για να μπορεί να γίνει η παρακολούθηση, θα πρέπει το μοντέλο που χρησιμοποιείται να μπορεί να περιέχει ένα βρόγχο ανάδρασης, ο οποίος θα ανατροφοδοτεί τα δεδομένα εξόδου στην είσοδο του συστήματος. Επιπλέον, θα πρέπει το μοντέλο να παρέχει προβλέψεις για την παρακολούθηση του σήματος. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι το Phase Lock Loop (PLL). Για την παρακολούθηση των δορυφορικών σημάτων χρησιμοποιείται η γραμματικοποιημένη μορφή του PLL, η οποία καλείται Second Order PLL. Τόσο στην παρακολούθηση του φορέα, όσο και στην παρακολούθηση του κώδικα, χρησιμοποιείται ένα τέτοιο μοντέλο. Σε αυτήν την παράγραφο θα γίνει η περιγραφή της παρακολούθησης του φορέα και του κώδικα, ενώ η επίλυση της θέσης θα αναλυθεί στην παράγραφο §5.3 Προσδιορισμός Θέσης.

5.2.1 Παρακολούθηση του Φορέα

Προκειμένου να μπορέσουν να εξαχθούν τα δεδομένα πλοήγησης από τον φορέα, θα πρέπει ο δέκτης να παράγει ένα σήμα που να ταυτίζεται με το φορέα και μέσω ενός μείκτη, να πολλαπλασιαστούν, προκειμένου να απαλειφθεί ο φορέας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο δέκτης παράγει ένα σήμα, διαφορετικής συχνότητας από το λαμβανόμενο, το οποίο επιφέρει μια υπολειπόμενη συχνότητα στο παραγόμενο από το μείκτη σήμα. Για να μπορέσει να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα το οποίο θα παρακολουθεί τη φάση του παραγόμενου σήματος, θα εντοπίζει το σφάλμα της φάσης και θα το παρέχει στο μείκτη προκειμένου να προσαρμόσει τη φάση του σήματος του ταλαντωτή. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται, καλείται βρόγχος Costas (Costas loop) το οποίο δεν επηρεάζεται από την αλλαγή της φάσης του φορέα που προκαλείται από τα δεδομένα πλοήγησης (μεταβολή φάσης 180°).



Σχήμα 5.9 Βρόγχος Costas για την παρακολούθηση του φορέα (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 5.9 Costas Loop for carrier tracking (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*)

Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται ο βρόγχος Costas που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της φάσης του φορέα. Το επεξεργασμένο IF σήμα πολλαπλασιάζεται με το αντίγραφο του κώδικα προκειμένου να απαλειφθεί ο κώδικας PRN και στη συνέχεια, εισάγεται στο βρόγχο. Στο βρόγχο υπάρχουν δύο μείκτες, προκειμένου να παραχθούν δύο σήματα I&Q. Στόχος του συγκεκριμένου βρόγχου, είναι να απομονώσει όλη την ενέργεια (πληροφορία) του σήματος στη συνιστώσα I. Στην περίπτωση που οι δύο κώδικες είναι συγχρονισμένοι (δηλαδή έχει βρεθεί η κορυφή συσχέτισης), τότε με βάση τις εξισώσεις (4.14) και (4.18), το σήμα της συνιστώσας I θα είναι της μορφής,

$$s_I(t) = I^k(t) = \sqrt{2C_{CL1}}D^k(t)\cos[\varphi] + \sqrt{2C_{CL1}}D^k(t)\cos[2\omega_{IF} + \varphi] \qquad \text{Εξ. (5.16)}$$

Η εξίσωση (5.16) διαφοροποιείται από την εξίσωση (4.34), καθώς σε αυτήν την περίπτωση θεωρείται ότι έχει βρεθεί ο χρόνος ταξιδιού τ και η μετατόπιση της συχνότητας λόγω Doppler. Επιπλέον, ο όρος $\Delta\theta$ της εξίσωσης (4.34), αντικαταστάθηκε με το γράμμα φ. Αντίστοιχα, το σήμα της συνιστώσας Q θα είναι,

$$s_Q(t) = Q^k(t) = \sqrt{2C_{CL1}}D^k(t)\sin[\varphi] + \sqrt{2C_{CL1}}D^k(t)\,sin[2\omega_{IF} + \varphi] \qquad \text{Εξ. (5.17)}$$

Τα δύο σήματα εισάγονται σε ένα Low pass φίλτρο προκειμένου να αποκοπούν οι υψηλές συχνότητας. Έτσι, τα σήματα που προκύπτουν είναι της μορφής,

$$I^k(t) = \sqrt{2C_{CL1}}D^k(t)\cos[\varphi] \qquad \text{Εξ. (5.18)}$$
$$Q^k(t) = \sqrt{2C_{CL1}}D^k(t)\sin[\varphi] \qquad \text{Εξ. (5.19)}$$

Η διόρθωση για τη συχνότητα του ταλαντωτή (Βλέπε Σχήμα 5.8 Carrier loop discriminator), μπορεί να δοθεί από τη σχέση,

$$\frac{Q^k(t)}{I^k(t)} = \frac{\sqrt{2C_{CL1}}D^k(t)\sin[\varphi]}{\sqrt{2C_{CL1}}D^k(t)\cos[\varphi]} = \tan\varphi \qquad \text{Εξ. (5.20)}$$
$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{Q^k(t)}{I^k(t)}\right) \qquad \text{Εξ. (5.21)}$$

Από την εξίσωση (5.21), φαίνεται ότι το σφάλμα της φάσης ελαχιστοποιείται όταν η συσχέτιση στη συνιστώσα Q είναι μηδενική και μεγιστοποιείται, όταν η συσχέτιση στη συνιστώσα I μεγιστοποιείται. Πρέπει να σημειωθεί, ότι ο όρος συσχέτιση αναφέρεται στη μείξη του IF σήματος, με το σήμα του ταλαντωτή.

Εκτός του τόξου εφαπτομένης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξής discriminators,

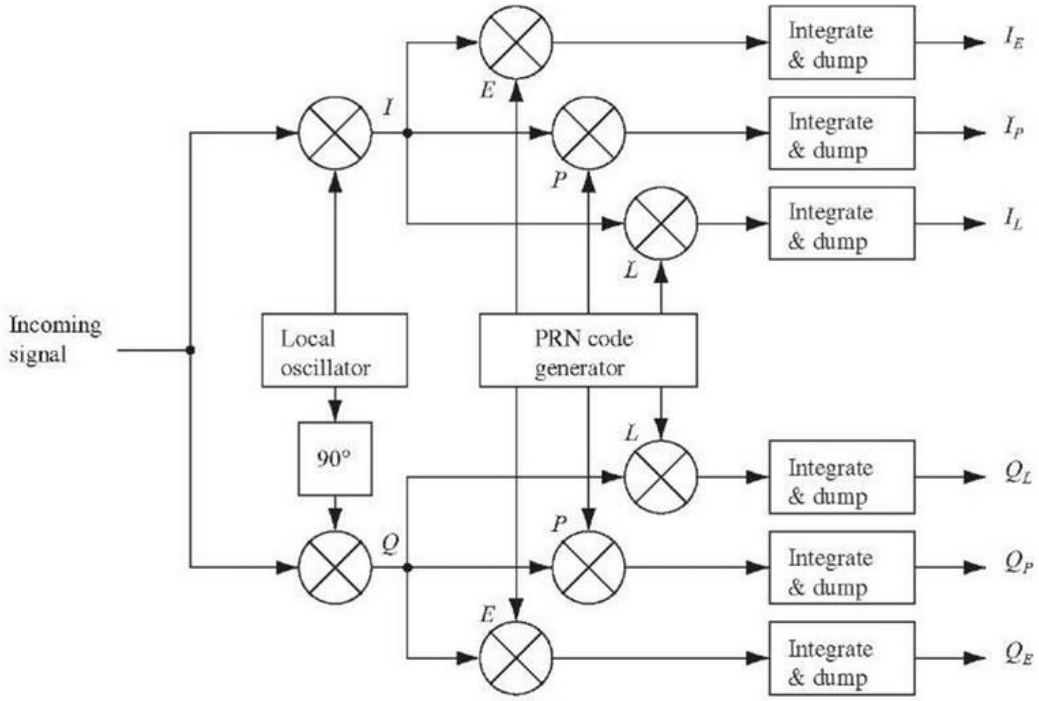
$$D = \text{sign}\left(I^k(t)\right)Q^k(t) \qquad \text{Εξ. (5.22)}$$
$$D = I^k(t)Q^k(t) \qquad \text{Εξ. (5.23)}$$

Στην εξίσωση (5.23) το αποτέλεσμα του discriminator είναι ανάλογο του *sin(φ)*, ενώ στην εξίσωση (5.23) το αποτέλεσμα είναι ανάλογο του *sin(2φ)*.

Η διόρθωση αυτή φιλτράρεται (Βλέπε Σχήμα 5.8 Carrier loop filter), προκειμένου να υπολογιστούν σχετικές μετατοπίσεις του δορυφόρου, καθώς και η συχνότητα Doppler. Τέλος, εισάγεται στο Numerically Controlled Oscillator (Βλέπε Σχήμα 5.8 NCO carrier generator), προκειμένου να διορθωθεί η συχνότητα του ταλαντωτή.

5.2.2 Παρακολούθηση του Κώδικα

Ο στόχος της παρακολούθησης του κώδικα, είναι να παρέχει διορθώσεις στη φάση του, προκειμένου ο κώδικας του επεξεργασμένου σήματος και ο κώδικας του δέκτη, να ταυτιστούν. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται, καλείται Delay Lock Loop (DLL) το οποίο χρησιμοποιεί για τη συσχέτιση των δύο κωδικών, τρία αντίγραφα του κωδικού του δέκτη.



Σχήμα 5.10 DLL για την παρακολούθηση του κώδικα (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Figure 5.10 DLL for code tracking (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*)

Σε αυτό το βρόγχο παράγονται οι συνιστώσες I&Q, προκειμένου το σήμα να μην εξαρτάται από τα σφάλματα στη φάση του φορέα (non-coherent). Το επεξεργασμένο IF σήμα εισάγεται στο βρόγχο και μέσω ενός μείκτη, δημιουργούνται οι συνιστώσες I&Q. Η κάθε μία από τις συνιστώσες, πολλαπλασιάζεται με τρία αντίγραφα του δέκτη (Βλέπε Σχήμα 5.3 L, P, E), τα οποία έχουν διαφορά στη φάση του κώδικα κατά ±1/2 chips. Στη συνέχεια, τα 6 αποτελέσματα ολοκληρώνονται και τα αποτελέσματά τους συγκρίνονται, προκειμένου να βρεθεί ποιο από τα τρία σήματα, παρέχει τη μεγαλύτερη συσχέτιση.

Η παρακολούθηση του κώδικα γίνεται ταυτόχρονα με την παρακολούθηση της φάσης. Σε περίπτωση όπου ο βρόγχος Costas δεν έχει εντοπίσει το σφάλμα της φάσης του φορέα, τότε χρησιμοποιούνται και οι δύο συνιστώσες προκειμένου να παρακολουθηθεί η φάση του κώδικα. Σε αντίθετη περίπτωση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο η συνιστώσα I, με το μειονέκτημα ότι η φάση του φορέα, θα επηρεάσει τη συσχέτιση των τριών αντιγράφων (I_L, I_P, I_E) με τον λαμβανόμενο κώδικα (coherent). Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψη, οι discriminators της DLL δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις.

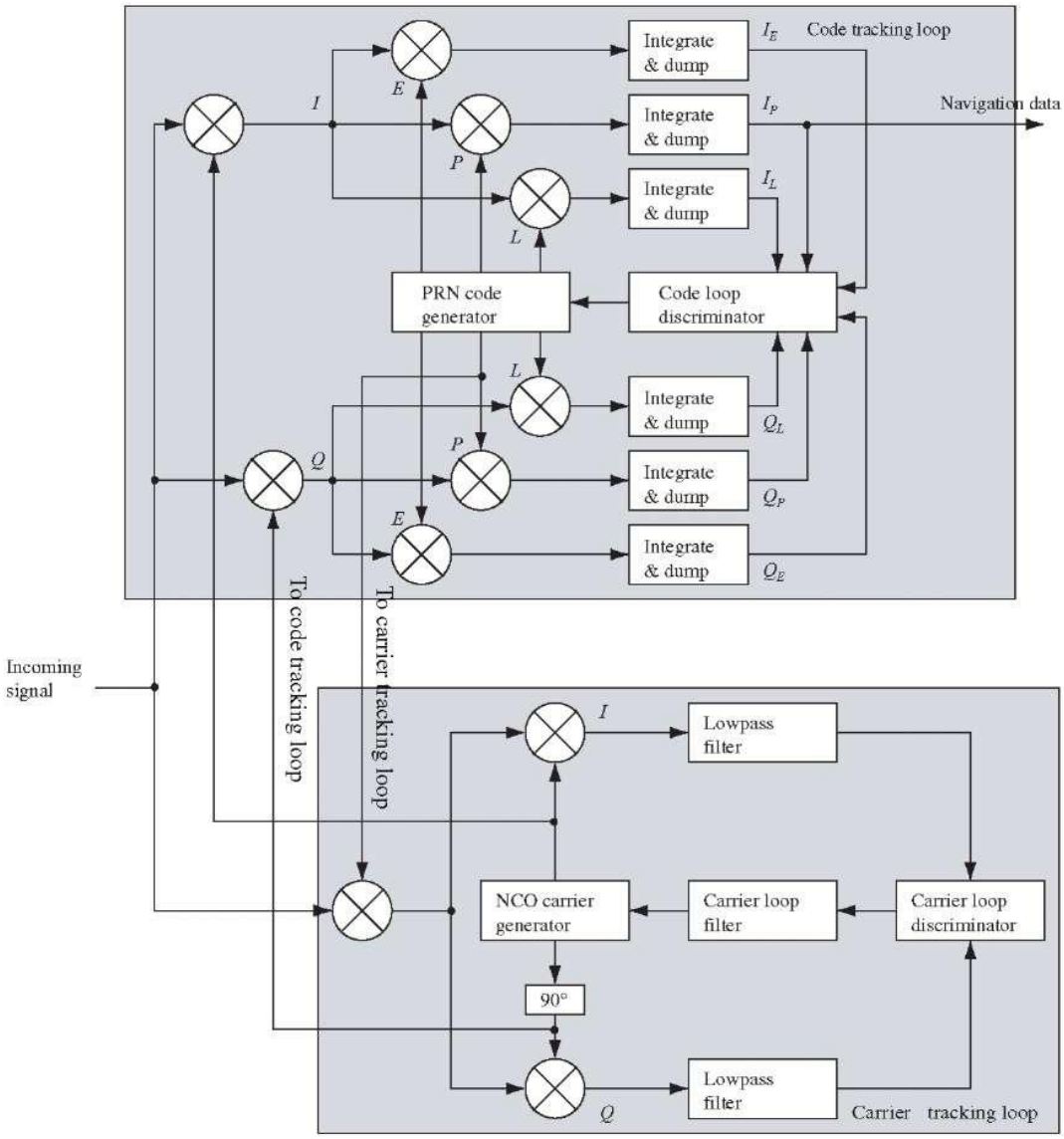
$$D = I_E - I_L \qquad \text{Coherent} \qquad \text{Εξ. (5.24)}$$

$$D = (I_E + Q_E)^2 - (I_L + Q_L)^2 \qquad \text{Non} - \text{coherent} \qquad \text{Εξ. (5.25)}$$

$$D = \frac{(I_E + Q_E)^2 - (I_L + Q_L)^2}{(I_E + Q_E)^2 + (I_L + Q_L)^2} \qquad \text{Non} - \text{coherent} \qquad \text{Εξ. (5.26)}$$

$$D = I_P(I_E + Q_E)^2 - Q_P(I_L + Q_L)^2 \qquad \text{Non} - \text{coherent} \qquad \text{Εξ. (5.27)}$$

Η εξίσωση (5.24) είναι η πιο απλή από όλες τις υπόλοιπες, όμως απαιτεί καλή γνώση του σφάλματος της φάσης του φορέα. Οι εξισώσεις (5.25), (5.26) και (5.27) είναι αυτές που χρησιμοποιούνται κυρίως, καθώς επιτρέπουν στο DLL να λειτουργεί αυτόνομα από το βρόγχο Costas. Από τις παραπάνω εξισώσεις προτιμάτε η εξίσωση (5.26), καθώς μπορεί να διαχειριστεί σήματα με διάφορα επίπεδα SNR. Τέλος, στο Σχήμα 5.10 φαίνεται το τελικό διάγραμμα της παρακολούθησης του σήματος.



Σχήμα 5.11 Διάγραμμα παρακολούθησης του δορυφορικού σήματος (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) – Figure 5.10 Block diagram of signal tracking (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*)

5.3 Προσδιορισμός Θέσης

Έχοντας προσδιορίσει τη φάση του κώδικα και τη φάση του σήματος, ο δέκτης ξεκινάει την αποκωδικοποίηση των δεδομένων πλοήγησης. Η αποκωδικοποίηση των δεδομένων πλοήγησης θα δώσει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους, προκειμένου να υπολογιστούν οι θέσεις των δορυφόρων που παρατηρεί ο δέκτης. Για κάθε έναν από τους διαθέσιμους δορυφόρους, ο δέκτης υπολογίζει την απόσταση δορυφόρου δέκτη, η οποία καλείται ψευδοαπόσταση. Έτσι, για κάθε δορυφόρο, έχει υπολογιστεί η θέση του στο τρισορθογώνιο γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς ECEF, καθώς και η απόστασή του από το δέκτη. Σε αυτήν την παράγραφο γίνεται ανάλυση του υπολογισμού της θέσης του δορυφόρου, της ψευδοαπόστασης και της θέσης του δέκτη.

5.3.1 Υπολογισμός της Θέσης του Δορυφόρου

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο §3.2.4 Μήνυμα Πλοήγησης GPS, τα στοιχεία που περιγράφουν την τροχιά του δορυφόρου είναι,

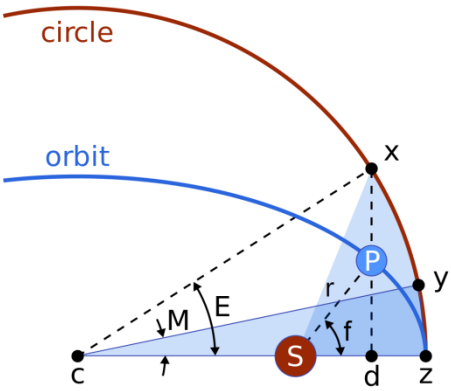
- a: ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης
- e: η εκκεντρότητα της έλλειψης
- ω: το όρισμα του περιγείου
- Ω: η ορθή αναφορά του ανιόντος δεσμού
- i: η κλίση του ελλειπτικού επιπέδου
- M_0: η μέση ανωμαλία

Τα συγκεκριμένα στοιχεία αναφέρονται σε ένα συγκεκριμένο χρόνο t_{oe}, ο οποίος είναι χρόνος αναφοράς της εφημερίδας. Στον Πίνακα 5.2, φαίνονται όλα τα στοιχεία που εξάγονται από τα δεδομένα πλοήγησης, καθώς και τον αριθμό των bit που αποτελούνται.

Πίνακας 5.2 Παράμετροι εφημερίδας (Πηγή *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*) - Table 5.1 Ephemeris parameters (Source *A Software Defined GPS and Galileo Receiver, 2007*)

Δεδομένα	Μονάδες μέτρησης	Περιγραφή	Αριθμός bit
IODE (Issue Of Data Ephemeris)	-	Αριθμός που περιγράφει μοναδικά το σετ δεδομένων	8
Δn	rad/sec	Διαφορά μέσης κίνησης από την υπολογισμένη τιμή	16
M_0	rad	Μέση ανωμαλία	32
e	-	Εκκεντρότητα	32
$\sqrt{a}$	$m^{1/2}$	Τετραγωνική ρίζα του μεγάλου ημιάξονας της έλλειψης	32
t_{oe}	sec	Χρόνος αναφοράς εφημερίδας	16
Ω_0	rad	Ορθή αναφορά του ανιόντος δεσμού	32
i_0	rad	Κλίση τροχιακού επιπέδου	32
ω	rad	Όρισμα περιγείου	32
$\dot{\Omega}$	rad/sec	Ρυθμός μεταβολής Ω	24
$\dot{i}$	rad/sec	Ρυθμός μεταβολής i	14
C_{rs}	m	Εύρος του όρου του ημιτόνου της αρμονική διόρθωσης της ακτίνας	16
C_{rc}	m	Εύρος του όρου του συνημίτονου της αρμονική διόρθωσης της ακτίνας	16
C_{is}	rad	Εύρος του όρου του ημιτόνου της αρμονική διόρθωσης της γωνίας κλίσης	16
C_{ic}	rad	Εύρος του όρου του συνημίτονου της αρμονική διόρθωσης της γωνίας κλίσης	16
$C_{\omega s}$	rad	Εύρος του όρου του ημιτόνου της αρμονική διόρθωσης του ορίσματος του περιγείου	16
$C_{\omega c}$	rad	Εύρος του όρου του συνημίτονου της αρμονική διόρθωσης του ορίσματος του περιγείου	16

Ο μετασχηματισμός των παραπάνω παραμέτρων, περιλαμβάνει την εύρεση των ελλειπτικών συντεταγμένων του δορυφόρου (μεγάλος ημιάξονας έλλειψης - a, εκκεντρότητα της έλλειψης - e, μέση ανωμαλία - M_0), την εύρεση των κυκλικών συντεταγμένων του δορυφόρου (επιβατική ακτίνα - R, έκκεντρη ανωμαλία - E), τις καρτεσιανές συντεταγμένες στο επίπεδο της έλλειψης (ξ, η) και τέλος τις καρτεσιανές συντεταγμένες του δορυφόρου στο (X^S, Y^S, Z^S). Με λίγα λόγια, η ελλειπτική τροχιά του δορυφόρου μετασχηματίζεται σε κυκλική, με ακτίνα ίση με το μεγάλο ημιάξονα της έλλειψης. Έπειτα, η θέση του δορυφόρου στην ελλειπτική τροχιά, μετασχηματίζεται προκειμένου να βρεθεί η θέση του δορυφόρου στην κυκλική τροχιά. Το χαρακτηριστικό αυτής της θέσης, είναι ότι η γωνιακή ταχύτητα του δορυφόρου διαγράφει σε ίσους χρόνους, ίσα εμβαδά. Από τη θέση του δορυφόρου στην κυκλική τροχιά, γίνεται ο μετασχηματισμός των κυκλικών συντεταγμένων, σε καρτεσιανές.



Σχήμα 5.12 Μετασχηματισμός ελλειπτικών συντεταγμένων (Πηγή *Wikimedia/Wiki/Mean_Anomaly*) - Figure 5.12 Conversion of elliptical coordinates (Source *Wikimedia/Wiki/Mean_Anomaly*)

Αρχικά, γίνεται ο υπολογισμός του χρόνου που αναφέρονται οι συγκεκριμένοι παράμετροι t_j. Ο συγκεκριμένος χρόνος έχει εύρος [-302400, +302400] sec, δηλαδή Το πλήθος των δευτερολέπτων που υπάρχουν μέσα σε μία εβδομάδα και προκύπτει, από τη διαφορά του χρόνου ταξιδιού (τ), με το χρόνο αναφοράς της εφημερίδας (t_{oe}).

$$t_j = \tau - t_{oe} \qquad \text{Εξ. (5.28)}$$

Έπειτα, υπολογίζεται η μέση ανωμαλία για τη χρονική στιγμή t_j.

$$M_j = M_0 + \left(\sqrt{\frac{GM}{a^3}} + \Delta n\right) t_j \qquad \text{Εξ. (5.29)}$$

Ο όρος GM εκφράζει το γινόμενο της παγκόσμιας σταθεράς έλξης, με τη μάζα της Γης και ισούται με $3.986005 \cdot 10^{14}$ m^3/s^2. Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει τον υπολογισμό της έκκεντρης ανωμαλίας E.

$$E_j = M_j + e \sin E_j \qquad \text{Εξ. (5.30)}$$

Η εύρεσης της έκκεντρης ανωμαλίας, γίνεται με διαδοχικές προσεγγίσεις της εξίσωσης (5.30), όπου για πρώτη τιμή επανάληψης (E_0) χρησιμοποιείται η τιμή της μέσης ανωμαλίας M_j. Αφού βρεθεί η έκκεντρη ανωμαλία, υπολογίζεται η αληθής ανωμαλία f.

$$f_j = \arctan \frac{\sqrt{1-e^2}\sin E_j}{\cos E_j - e} \qquad \text{Εξ. (5.31)}$$

Η συγκεκριμένη εξίσωση απαιτεί διερεύνηση λόγω του τόξου εφαπτομένης, προκειμένου να βρεθεί το τεταρτημόριο στο οποίο αναφέρεται η αληθής ανωμαλία. Ο επόμενος υπολογισμός, αφορά το μήκος του ανιόντος δεσμού.

$$\Omega_j = \Omega_0 + (\dot{\Omega} + \omega_e)t_j - \omega_e t_{oe} \qquad \text{Εξ. (5.32)}$$

Στην εξίσωση (5.32), ο όρος ω_e αναφέρεται στη μέση γωνιακή ταχύτητα της Γης και ισούται με $7.2921151467 \cdot 10^{-5}$ rad/sec. Στη συνέχεια, διορθώνεται το όρισμα του περιγείου.

$$\omega_j = \omega + f_j + C_{\omega c}\cos 2(\omega + f_j) + C_{\omega s}\sin 2(\omega + f_j) \qquad \text{Εξ. (5.33)}$$

Η επόμενη διόρθωση αφορά την ακτίνα r.

$$r_j = a(1 - e\cos E_j) + C_{rc}\cos 2(\omega + f_j) + C_{rs}\sin 2(\omega + f_j) \qquad \text{Εξ. (5.34)}$$

Η τελευταία διόρθωση, αφορά την κλίση του τροχιακού επιπέδου.

$$i_j = i_0 + \dot{i}t_j + C_{ic}\cos 2(\omega + f_j) + C_{is}\sin 2(\omega + f_j) \qquad \text{Εξ. (5.35)}$$

Αφού έχουν διορθωθεί όλα τα μεγέθη, μπορούν πλέον να υπολογιστούν οι συντεταγμένες του δορυφόρου στο τροχιακό επίπεδο της έλλειψης.

$$\begin{aligned} \xi_j &= r_j \cos \omega_j \\ \eta_j &= r_j \sin \omega_j \end{aligned} \qquad \text{Εξ. (5.36)}$$

Τέλος, υπολογίζονται οι καρτεσιανές συντεταγμένες του δορυφόρου.

$$\begin{aligned} X_j^S &= \xi_j \cos(\Omega_j) - \eta_j \cos(i_j)\sin(\Omega_j) \\ Y_j^S &= \xi_j \sin(\Omega_j) + \eta_j \cos(i_j)\cos(\Omega_j) \\ Z_j^S &= \eta_j \sin(i_j) \end{aligned} \qquad \text{Εξ. (5.37)}$$

5.3.2 Υπολογισμός της Ψευδοαπόστασης

Ο υπολογισμός της ψευδοαπόστασης γίνεται με βάση το χρόνο του ταξιδιού. Όπως αναφέρθηκε ήδη, η DLL είναι υπεύθυνη για την παρακολούθηση του κώδικα και την εύρεση του χρόνου ταξιδιού. Ο χρόνος ταξιδιού περιγράφει την καθυστέρηση του λαμβανόμενου κώδικα, σε σχέση με το αντίγραφό του, στο δέκτη. Μια πρώτη εκτίμηση του χρόνου ταξιδιού, προκύπτει από την απόσταση δορυφόρου-δέκτη. Το εύρος των συγκεκριμένων αποστάσεων (20,000 έως 26,000 km) πολλαπλασιασμένο με την ταχύτητα του φωτός, οδηγεί σε ένα εύρος χρόνων ταξιδιού από 65 έως 83 ms. Έτσι, ο δέκτης μπορεί να παράγει αντίγραφα στο συγκεκριμένο εύρος και μέσω της DLL, να παρέχει διορθώσεις στην αρχική εκτίμηση. Ο διορθωμένος χρόνος πολλαπλασιασμένος με την ταχύτητα του φωτός, είναι η ψευδοαπόσταση του συγκεκριμένου δορυφόρου από το δέκτη.

Πρέπει να σημειωθεί, ότι για τον υπολογισμό της θέσης του δέκτη, απαιτούνται τουλάχιστον 12 sec προκειμένου να ληφθούν τα απαραίτητα δεδομένα πλοήγησης. Μετά από τα 12 sec, ο δέκτης μέσω του πλαισίου TLM (Βλέπε παράγραφο §3.2.4 Μήνυμα Πλοήγησης GPS) μπορεί να συσχετίσει τα δεδομένα, με το preamble του TLM. Η συγκεκριμένη συσχέτιση αποσκοπεί στο συγχρονισμό του κάθε υποπλαίσιου, προκειμένου να εξαχθούν τα δεδομένα πλοήγησης του κάθε δορυφόρου.

5.3.3 Υπολογισμός της Θέσης του Δέκτη

Η ψευδοαπόσταση ενός δορυφόρου k και ενός δέκτη i, δίνεται από τη σχέση,

$$t_i - t^k = \frac{P_i^k}{c} \qquad \text{Εξ. (5.38)}$$

Οι δύο χρόνοι t_i και t_k δεν είναι απόλυτα συγχρονισμένοι με το χρόνο του GPS (GPST). Το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη, δίνεται από τα δεδομένα πλοήγησης, ενώ το σφάλμα στο χρονόμετρο του δέκτη είναι άγνωστο. Έτσι, το σφάλμα στο χρονόμετρο του δέκτη εισάγεται ως άγνωστος, στην εξίσωση παρατήρησης της ψευδοαπόστασης. Αν dt_i είναι το σφάλμα στο χρονόμετρο του δέκτη, dt^k είναι το σφάλμα στο χρονόμετρο του δορυφόρου, T_i^k είναι η τροποσφαιρική καθυστέρηση, I_i^k η ιονοσφαιρική καθυστέρηση και e_i^k το τυχαίο σφάλμα της ψευδοαπόστασης, τότε η εξίσωση παρατήρησης της ψευδοαπόστασης P_i^k είναι,

$$P_i^k = \rho_i^k + c(dt_i - dt^k) + T_i^k + I_i^k + e_i^k \qquad \text{Εξ. (5.39)}$$

Στην εξίσωση (5.39), ο όρος ρ_i^k εκφράζει τη γεωμετρική απόσταση δορυφόρου-δέκτη.

$$\rho_i^k = \sqrt{(X^k - X_i)^2 + (Y^k - Y_i)^2 + (Z^k - Z_i)^2} \qquad \text{Εξ. (5.40)}$$

Οι όροι (X^k, Y^k, Z^k) εκφράζουν τις συντεταγμένες του εκάστοτε δορυφόρου, ενώ οι όροι (X_i, Y_i, Z_i) εκφράζουν τις συντεταγμένες του δέκτη. Οι συντεταγμένες του δορυφόροι υπολογίζονται μέσω των δεδομένων πλοήγησης και θεωρούνται γνωστό μέγεθος. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (5.39) και (5.40), προκύπτει η εξής εξίσωση παρατήρησης.

$$P_i^k = \sqrt{(X^k - X_i)^2 + (Y^k - Y_i)^2 + (Z^k - Z_i)^2} + c(dt_i - dt^k) + T_i^k + I_i^k + e_i^k \qquad \text{Εξ. (5.41)}$$

Οι όροι T_i^k και I_i^k προσδιορίζονται από μοντέλα που παρέχονται από τα δεδομένα πλοήγησης. Για την επίλυση της παραπάνω εξίσωσης, χρησιμοποιείται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα τυχαία σφάλματα της

ψευδοαπόστασης e_i^k. Οι ανεξάρτητοι καθοριστικοί παράμετροι είναι η θέση του δέκτη (X_i, Y_i, Z_i) και το σφάλμα του χρονομέτρου του dt_i. Για τον υπολογισμό της θέσης του δέκτη με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, θα πρέπει ο αριθμός των παρατηρήσεων να είναι μεγαλύτερος από των αριθμό των ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων (δηλαδή ο βαθμός ελευθερίας να είναι μεγαλύτερος του μηδενός). Άρα, θα πρέπει να παρατηρούνται 4 δορυφόροι για να μπορεί να επιλυθεί το παραπάνω σύστημα (μοναδική λύση) και τουλάχιστον 4, προκειμένου να μπορούν να εκτιμηθούν οι μεταβλητότητες (το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης) και συμμεταβλητότητες των ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων.

Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων απαιτεί τη γραμμική σχέση των παρατηρήσιμων (P_i^k) και αγνώστων (X_i, Y_i, Z_i, dt_i) μεγεθών. Η εξίσωση παρατήρησης της ψευδοαπόστασης δεν είναι γραμμική ως προς τις ανεξάρτητες καθοριστικές παραμέτρους. Για τη γραμμικοποίηση της εξίσωσης (5.41) χρησιμοποιείται το ανάπτυγμα Taylor.

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}(x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x - x_0)^2 + \cdots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x - x_0)^n \quad \text{Εξ. (5.42)}$$

Θεωρώντας ότι οι όροι μεγαλύτερης τάξης έχουν μικρή επιρροή στη λύση, η εξίσωση (5.42) είναι γραμμική ως προς το (x-x_0). Έτσι, προκύπτει ότι η εξίσωση παρατήρησης της ψευδοαπόστασης με τη εφαρμογή του αναπτύγματος Taylor είναι η εξής.

$$\begin{aligned} f\left(X_{i,1}, Y_{i,1}, Z_{i,1}, dt_{i,1}\right) = f\left(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0}, dt_{i,0}\right) + \frac{\partial f\left(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0}, dt_{i,0}\right)}{\partial X_{i,0}} \Delta X_{i,1} + \\ + \frac{\partial f\left(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0}, dt_{i,0}\right)}{\partial Y_{i,0}} \Delta Y_{i,1} + \frac{\partial f\left(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0}, dt_{i,0}\right)}{\partial Z_{i,0}} \Delta Z_{i,1} + \\ + \frac{\partial f\left(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0}, dt_{i,0}\right)}{\partial dt_{i,0}} \Delta dt_{i,1} \end{aligned} \quad \text{Εξ. (5.43)}$$

Όπως φαίνεται και από την εξίσωση (5.43), θα πρέπει να υπάρχουν κάποιες προσεγγιστικές τιμές ($X_{i,0}$, $Y_{i,0}$, $Z_{i,0}$, $dt_{i,0}$) προκειμένου να επιλυθεί το σύστημα. Τα δεδομένα εξόδου της συγκεκριμένης μεθόδου είναι οι διορθώσεις ($\Delta X_{i,1}$, $\Delta Y_{i,1}$, $\Delta Z_{i,1}$, $\Delta dt_{i,1}$) που πρέπει να γίνουν στις προσεγγιστικές, προκειμένου να βρεθούν οι καλύτερες τιμές των ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων.

$$\begin{aligned} \hat{X}_{i,1} &= X_{i,0} + \Delta X_{i,1} \\ \hat{Y}_{i,1} &= Y_{i,0} + \Delta Y_{i,1} \\ \hat{Z}_{i,1} &= Z_{i,0} + \Delta Z_{i,1} \\ \widehat{dt}_{i,1} &= dt_{i,0} + \Delta dt_{i,1} \end{aligned} \quad \text{Εξ. (5.44)}$$

Η γραμμικοποίηση της εξίσωσης παρατήρησης ως προς τις ανεξάρτητες καθοριστικές παραμέτρους, δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις.

$$\frac{\partial f\left(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0}, dt_{i,0}\right)}{\partial X_{i,0}} = -\frac{X^k - X_{i,0}}{\rho_{i,0}^k}$$

$$\frac{\partial f\left(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0}, dt_{i,0}\right)}{\partial Y_{i,0}} = -\frac{Y^k - Y_{i,0}}{\rho_{i,0}^k}$$

$$\frac{\partial f(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0}, dt_{i,0})}{\partial Z_{i,0}} = -\frac{Z^k - Z_{i,0}}{\rho_{i,0}^k}$$
$$\frac{\partial f(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0}, dt_{i,0})}{\partial dt_{i,0}} = 1 \qquad \text{Εξ. (5.45)}$$

Οι προσεγγιστικές τιμές των ($X_{i,0}$, $Y_{i,0}$, $Z_{i,0}$, $dt_{i,0}$) μπορούν να υπολογιστούν από μια πρώτη επίλυση του δέκτη και στη συνέχεια, να υπολογιστούν οι διορθώσεις τους. Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις, η τελική γραμμικοποιημένη μορφή της εξίσωσης παρατήρησης είναι η εξής.

$$P_i^k = \rho_{i,0}^k - \frac{X^k - X_{i,0}}{\rho_{i,0}^k}\Delta X_{i,1} - \frac{Y^k - Y_{i,0}}{\rho_{i,0}^k}\Delta Y_{i,1} - \frac{Z^k - Z_{i,0}}{\rho_{i,0}^k}\Delta Z_{i,1} + cdt_{i,1} - cdt^k + T_i^k + I_i^k + e_i^k \qquad \text{Εξ. (5.46)}$$

Μετασχηματίζοντας την παραπάνω εξίσωση, προκύπτει η τελική εξίσωση παρατήρησης.

$$P_i^k - \rho_{i,0}^k + cdt^k = -\frac{X^k - X_{i,0}}{\rho_{i,0}^k}\Delta X_{i,1} - \frac{Y^k - Y_{i,0}}{\rho_{i,0}^k}\Delta Y_{i,1} - \frac{Z^k - Z_{i,0}}{\rho_{i,0}^k}\Delta Z_{i,1} + cdt_{i,1} \qquad \text{Εξ. (5.47)}$$

Στην εξίσωση (5.47), ο όρος $\alpha_i = -(T_i^k + I_i^k + e_i^k)$ έχει προστεθεί στον όρο P_i^k. Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων. Έστω το γραμμικό σύστημα,

$$A\delta x = \delta l + \upsilon \qquad \text{Εξ. (5.48)}$$

Επιλύοντας της εξίσωση (5.48) ως προς το υπόλοιπο, προκύπτει ότι,

$$\upsilon = A\delta x - \delta l \qquad \text{Εξ. (5.49)}$$

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, προκύπτει ότι,

$$\sum_0^i \upsilon^2 = \sum_0^i (A\delta x - \delta l)^2 = min \qquad \text{Εξ. (5.50)}$$

Για την ελαχιστοποίηση της εξίσωσης (5.50) χρησιμοποιείται η σχέση,

$$\delta x = (A^T A)^{-1} A^T \delta l \qquad \text{Εξ. (5.51)}$$

Η εξίσωση (5.51) χρησιμοποιείται για ισοβαρής παρατηρήσεις. Σε περίπτωση που οι παρατηρήσεις δεν είναι ισοβαρείς, τότε προστίθεται ο πίνακας βαρών P και η εξίσωση παίρνει τη μορφή,

$$\delta x = (A^T P A)^{-1} A^T P \delta l \qquad \text{Εξ. (5.52)}$$

Ο πίνακας A ονομάζεται πίνακας σχεδιασμού και περιέχει τους συντελεστές των αγνώστων. Οι στήλες του πίνακα A, είναι όσες είναι και ο αριθμός των ανεξάρτητων

καθοριστικών παραμέτρων, ενώ οι γραμμές του είναι όσες είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων. Ο συγκεκριμένος πίνακας, εκφράζει τη γεωμετρία του δορυφορικού σχηματισμού, μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Με βάση την εξίσωση (5.47), ο πίνακας σχεδιασμού έχει τη μορφή,

$$A = \begin{vmatrix} -\frac{X^1 - X_{i,0}}{\rho_{i,0}^1} & -\frac{Y^1 - Y_{i,0}}{\rho_{i,0}^1} & -\frac{Z^1 - Z_{i,0}}{\rho_{i,0}^1} & 1 \\ -\frac{X^2 - X_{i,0}}{\rho_{i,0}^2} & -\frac{Y^2 - Y_{i,0}}{\rho_{i,0}^2} & -\frac{Z^2 - Z_{i,0}}{\rho_{i,0}^2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{X^n - X_{i,0}}{\rho_{i,0}^n} & -\frac{Y^n - Y_{i,0}}{\rho_{i,0}^n} & -\frac{Z^n - Z_{i,0}}{\rho_{i,0}^n} & 1 \end{vmatrix} \qquad \text{Εξ.(5.53)}$$

Το γινόμενο $(A^T PA)^{-1}$ καλείται πίνακας κανονικών εξισώσεων και συμβολίζεται με το χαρακτήρα N. Ο συγκεκριμένος πίνακας είναι τετραγωνικός με μηδενική ορίζουσα και έχει διαστάσεις, όσες ο αριθμός των αγνώστων, δηλαδή 4x4. Το διάνυσμα δl περιέχει τις διαφορές $P_i^k - \rho_{i,0}^k + cdt^k$ και έχει τόσα στοιχεία, όσες και οι εξισώσεις παρατήρησης. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5.52) προκύπτουν οι διορθώσεις που πρέπει να γίνουν στις άγνωστες καθοριστικές παραμέτρους ($\Delta X_{i,1}$, $\Delta Y_{i,1}$, $\Delta Z_{i,1}$, $\Delta dt_{i,1}$). Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται επαναληπτικά όπου σε κάθε επανάληψη, εισάγονται οι διορθωμένες τιμές των αγνώστων ($\hat{X}_{i,1}$, $\hat{Y}_{i,1}$, $\hat{Z}_{i,1}$,$\widehat{dt}_{i,1}$), ως δεδομένα εισόδου.

Ο πίνακας μεταβλητοτήτων και συμμεταβλητοτήτων των αγνώστων, υπολογίζεται από τον τύπο,

$$V_{\hat{X}} = \sigma_{\hat{o}}^2 N \qquad \text{Εξ. (5.54)}$$

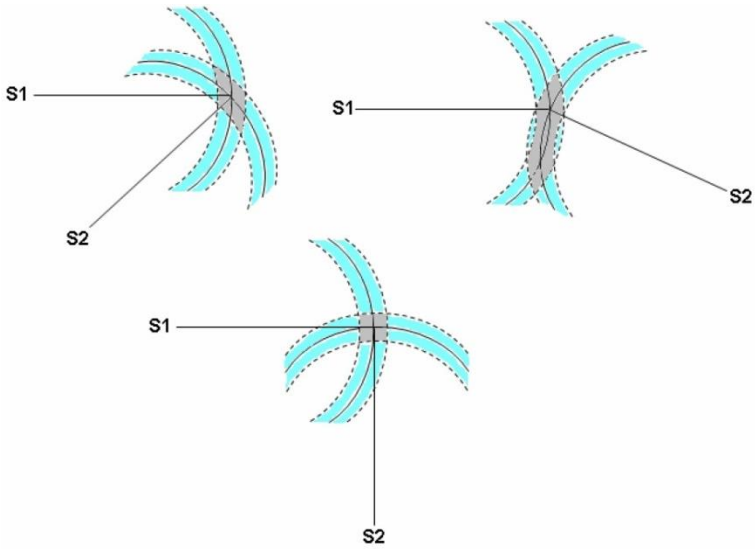
Ο όρος $\sigma_{\hat{o}}^2$ καλείται a-posteriori σφάλμα της μονάδας βάρους και δίνεται από τον τύπο,

$$\sigma_{\hat{o}}^2 = \frac{\upsilon^T P \upsilon}{r} \qquad \text{Εξ. (5.55)}$$

Στον τύπο (5.55), το r είναι ο βαθμός ελευθερίας και ισούται με τη διαφορά του αριθμού των παρατηρήσεων από τον αριθμό των ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων. Τα στοιχεία της κυρίας διαγωνίου του πίνακα $V_{\hat{X}}$, είναι οι μεταβλητότητες των ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων (σ_X^2, σ_Y^2, σ_Z^2, σ_{dt}^2). Η μεταβλητότητα είναι το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης και εκφράζει, την εσωτερική ακρίβεια των μετρήσεων.

5.3.4 Dilution Of Precision

Ο όρος Dilution of Precision (DOP) αποτελεί ένα μέτρο ποιότητας των δορυφορικών μετρήσεων και εξαρτάται, από τον πίνακα σχεδιασμού δηλαδή τη γεωμετρία του δορυφορικού σχηματισμού, καθώς και από το a-posteriori σφάλμα της μονάδας βάρους. Όσο καλύτερη είναι η κατανομή των δορυφόρων, τόσο καλύτερη η γεωμετρία του σχηματισμού.



Σχήμα 5.13 Επίδραση της γεωμετρίας των δορυφόρων στην ποιότητα του εντοπισμού (Πηγή *Support.Spirent/SC_KnowledgeView*) - Figure 5.13 Impact of satellite geometry in the quality of positioning (Source *Support.Spirent/SC_KnowledgeView*)

Ο προσδιορισμός του DOP γίνεται με τα στοιχεία της κυρίας διαγωνίου του πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας. Αναλόγως του συνδυασμού των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν, προκύπτουν τα εξής μέτρα ποιότητας.

$$Geometry\ DOP\ (GDOP) = \sqrt{\frac{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2 + \sigma_{dt}^2}{\sigma_{\hat{0}}^2}} \qquad \text{Εξ. (5.56)}$$

$$Position\ DOP\ (PDOP) = \sqrt{\frac{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2}{\sigma_{\hat{0}}^2}} \qquad \text{Εξ. (5.57)}$$

$$Horizontal\ DOP\ (HDOP) = \sqrt{\frac{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}{\sigma_{\hat{0}}^2}} \qquad \text{Εξ. (5.58)}$$

$$Vertical\ DOP\ (VDOP) = \sqrt{\frac{\sigma_Z^2}{\sigma_{\hat{0}}^2}} = \frac{\sigma_Z}{\sigma_{\hat{0}}} \qquad \text{Εξ. (5.59)}$$

$$Time\ DOP\ (TDOP) = \sqrt{\frac{\sigma_{dt}^2}{\sigma_{\hat{0}}^2}} = \frac{\sigma_{dt}}{\sigma_{\hat{0}}} \qquad \text{Εξ. (5.60)}$$

$$GDOP^2 = PDOP^2 + TDOP^2 = HDOP^2 + VDOP^2 + TDOP^2 \qquad \text{Εξ. (5.61)}$$

Συνήθως τα μέτρα ποιότητας PDOP και VDOP αναφέρονται σε τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς (East, North, Up). Η μετατροπή των καρτεσιανών συντεταγμένων (X, Y, Z) σε τοποκεντρικές συντεταγμένες (e, n, u), γίνεται κατά τις διευθύνσεις των γεωδαιτικών συντεταγμένων (φ, λ, h). Η μετατροπή των συντεταγμένων γίνεται μέσω ενός πίνακα στροφής R, ενώ η εξίσωση μετασχηματισμού των συντεταγμένων είναι,

$$\begin{bmatrix} \delta e \\ \delta n \\ \delta u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi \\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix} \qquad \text{Εξ. (5.62)}$$

Συνήθως, όσο χαμηλότερες είναι οι τιμές DOP τόσο καλύτερη είναι η γεωμετρία των δορυφόρων και κατ' επέκταση, τόσο καλύτερη θα είναι και η λύση του εντοπισμού. Ο δ PDOP είναι χαμηλότερος από το VDOP, καθώς όλοι οι δορυφόροι είναι πάνω από τον ορίζοντα του σημείου. Ωστόσο, η ποιότητα του εντοπισμού εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως το περιβάλλον που γίνονται οι μετρήσεις, οι πολυανακλάσεις του δορυφορικού σήματος, τα σφάλματα της ατμόσφαιρας κτλ.

6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΕΣ GNSS ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ RECORD AND REPLAY

6.1 Εισαγωγή

Σε συνέχεια της Επιλεκτικής Διαθεσιμότητας του συστήματος GPS (Μάιος 2000) [5], έχουν ως σήμερα τεθεί σε πλήρη λειτουργία 4 συστήματα δορυφορικού εντοπισμού (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou), ενώ στα επόμενα 2 χρόνια θα είναι διαθέσιμο και το σύστημα εντοπισμού της Ιαπωνίας QZSS. Το κάθε ένα από τα διαθέσιμα συστήματα εντοπισμού έχει σε λειτουργία τουλάχιστον 20 δορυφόρους, παρέχοντας πλήρη δορυφορική κάλυψη, καθόλη τη διάρκεια της ημέρας. Η συνεχόμενη αύξηση των συστημάτων εντοπισμού καθώς και η αυξημένη ζήτησή τους, έχει οδηγήσει στη ραγδαία εξέλιξη τόσο των κεραιών GNSS, όσο και στη βελτίωση των ίδιων των συστημάτων με την δημιουργία νέων συχνοτήτων μετάδοσης, νέων αλγορίθμων επεξεργασίας κτλ. Η αναγκαιότητα λοιπόν, του ελέγχου των παραπάνω συστημάτων είναι απαραίτητη για τη συνεχή εξέλιξή τους, καθώς το πλήθος των εφαρμογών που χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη τεχνολογία είναι πολύ μεγάλος.

Ο έλεγχος των συγκεκριμένων συστημάτων ανέκαθεν μπορούσε να γίνει με παρατηρήσεις υπαίθρου, καθώς και με την ίδρυση μόνιμων σταθμών παρατηρήσεων. Η συγκεκριμένη μέθοδος αν και αποτελεσματική, έχει το μειονέκτημα ότι οι συνθήκες παρατήρησης διαφέρουν από μέτρηση σε μέτρηση, αμφισβητώντας έτσι την ακεραιότητα των μετρήσεων από εποχή σε εποχή. Τα τελευταία χρόνια προτιμάται η χρήση των εργαστηριακών προσομοιώσεων για τον έλεγχο των δορυφορικών συστημάτων. Το μεγάλο πλεονέκτημα στη χρήση προσομοιωτών, είναι ότι ο έλεγχος γίνεται κάτω από πλήρως ελεγχόμενες συνθήκες παρατήρησης, ενώ ο χρήστης μπορεί να επαναλάβει τον έλεγχο όποτε θελήσει. Επιπρόσθετα, με τη χρήση προσομοιωτών επιτρέπεται και η εξέλιξη δεκτών για δορυφορικά συστήματα τα οποία είτε είναι προσωρινά μη-διαθέσιμα, είτε ο αριθμός των δορυφόρων δεν επαρκεί για την πλήρη λειτουργικότητα του συστήματος. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα που έχει η χρήση των προσομοιωτών GNSS, είναι ο έλεγχος στα σφάλματα τα οποία προκύπτουν κατά τη διαδικασία των μετρήσεων. Για παράδειγμα, τα σφάλματα που προκύπτουν από την ανάκλαση των σημάτων στα κτίρια (multipath), επιδρούν κάθε φορά με διαφορετικό τρόπο στις μετρήσεις και αντίστοιχα, στη λύση του εντοπισμού.

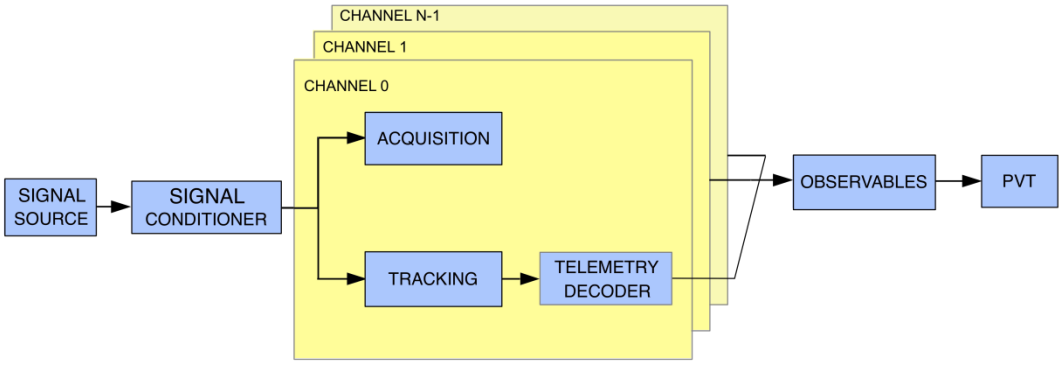
Τέλος, με τη χρήση των προσομοιωτών επιτρέπεται και η μοντελοποίηση τη δυναμικής του οχήματος σε περιπτώσεις κινηματικού εντοπισμού. Ειδικότερα σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ο έλεγχος τροχιών ιπτάμενων οχημάτων όπου αναπτύσσονται μεγάλες δυναμικές, οι απευθείας μετρήσεις δεκτών από δορυφόρους είναι ιδιαίτερα δαπανηρές και εμπεριέχουν αρκετά σφάλματα τα οποία διαφέρουν από μέτρηση σε μέτρηση. Με τη χρήση των προσομοιωτών ο έλεγχος γίνεται απευθείας στο εργαστήριο, οι συνθήκες παρατήρησης καθώς και η δυναμική του οχήματος είναι πλήρως ελεγχόμενα από το χρήστη και όσοι έλεγχοι απαιτούνται με βάση το σενάριο που θέλει να προσομοιώσει ο χρήστης, μπορούν να πραγματοποιηθούν.

6.2 Προσομοιωτές GNSS

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο §6.1 Εισαγωγή, οι προσομοιωτές GNSS πλεονεκτούν έναντι των συμβατικών μετρήσεων πεδίου, ως προς την ακεραιότητα των μετρήσεων που παράγουν. Ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στους προσομοιωτές που προσομοιώνουν τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί ένας δέκτης GNSS και σε αυτούς, που προσομοιώνουν το δορυφορικό σήμα. Στην παράγραφο που ακολουθεί γίνεται η περιγραφή του προσομοιωτή GNSS-SDR [11], ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των προσομοιωτών που προσομοιώνουν τους δέκτες GNSS. Η σκοπιμότητα της συγκεκριμένης παραγράφου, είναι για τη πληρότητα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης της παρούσα Διπλωματική Εργασία και δεν αξιοποιείται στο πειραματικό της τμήμα.

6.2.1 Προσομοιωτές GNSS δεκτών - GNSS-SDR

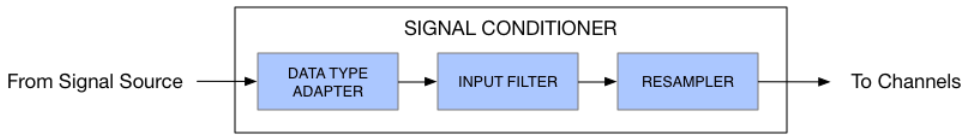
Οι προσομοιωτές GNSS-SDR [11], αφορούν ένα λογισμικό πρόγραμμα στο οποίο έχει προσομοιαστεί ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ένας δέκτης GNSS. Η σχεδίασή του, του επιτρέπει να δεχθεί αρκετές παραμετροποιήσεις όπως διάφορες πηγές σήματος, διάφορους αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος, διαλειτουργικότητα με άλλα συστήματα και διάφορα πρότυπα εξαγωγής των δεδομένων.



Σχήμα 6.1 Τυπικό διάγραμμα ροής ενός προσομοιωτή GNSS-SDR (Πηγή *GNSS-SDR/Documentation/Fundamentals*) - Figure 6.1 Typical flow diagram of GNSS-SDR (Source *GNSS-SDR/Documentation/Fundamentals*)

Στο Σχήμα 6.1, φαίνεται η αρχιτεκτονική ενός προσομοιωτή GNSS-SDR, η οποία είναι εμπνευσμένη από τη μαθηματική αναπαράσταση των δικτύων διεργασίας του *Gilles Kahn* [12]. Η διεργασία Kahn περιγράφει ένα μοντέλο στο οποίο οι διεργασίες συνδέονται μεταξύ τους μέσω καναλιών επικοινωνίας, δημιουργώντας ένα δίκτυο. Τα δεδομένα εξάγονται από μία διεργασία και μέσω των καναλιών επικοινωνίας, εισάγονται στην επόμενη διεργασία, με το χαρακτηριστικό ότι τα κανάλια επικοινωνίας ακολουθούν την αρχή FIFO [13].

Τα δεδομένα εισόδου (Signal Source) του προσομοιωτή, αφορούν ανεπεξέργαστα bits τα οποία προέρχονται από κάποιο μετωπιαίο ADC. Τα δεδομένα αυτά μπορούν είτε να εισαχθούν σε πραγματικό χρόνο (μέσω Ethernet ή USB πύλης) ή να εισαχθούν μέσω κάποιου αρχείου. Στην περίπτωση όπου εισαχθούν από κάποιο αρχείο, ο χρήστης πρέπει να ορίσει τις σχετικές παραμέτρους (I&Q συνιστώσες, ρυθμός δειγματοληψίας και αριθμό bit ανά δείγμα). Έπειτα, τα δεδομένα εισόδου εισάγονται στο επόμενο block (Signal Conditioner), ώστε να προσαρμόσει το βάθος bit του δείγματος, σε μια μορφή δεδομένων εύκολα διαχειρίσιμη από τον υπολογιστή.

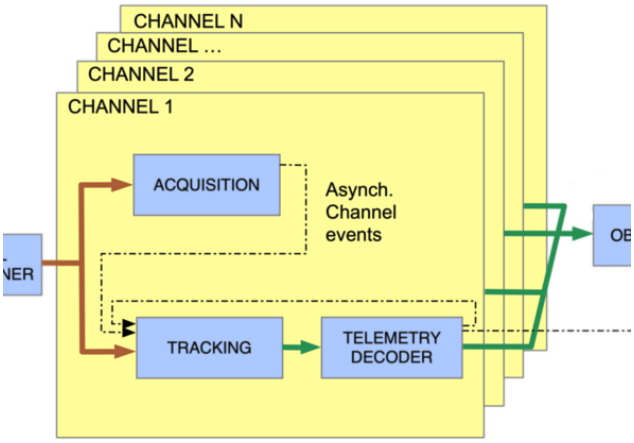


Σχήμα 6.2 Διάγραμμα ροής του block Signal Conditioner (Πηγή *GNSS-SDR/Documentation/Signal Processing Blocks/Signal Conditioner*) - Figure 6.2 Flow diagram of Signal Conditioner (Source *GNSS-SDR/Documentation/Signal Processing Blocks/Signal Conditioner*)

Τα τρία εσωτερικά blocks του Signal Conditioner αφορούν:

- στο μετασχηματισμό της μορφής δεδομένων σε ροή δειγμάτων (Data Type Adapter block)
- στο φιλτράρισμα του εισαχθέντος σήματος από θόρυβο και πιθανές παρεμβολές (Input Filter block)
- στη δειγματοληψία του σήματος και την εισαγωγή του σε N παράλληλα κανάλια διεργασίας (Resampler block)

Έχοντας τροποποιήσει τα δεδομένα εισόδου στην απαραίτητη μορφή, εισάγονται από το Signal Conditioner block, στα κανάλια. Τα κανάλια αντιπροσωπεύουν τις αντίστοιχες συχνότητες μετάδοσης, των διάφορων GNSS συστημάτων. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει τον αριθμό των συγκεκριμένων καναλιών, ενώ μπορούν να δουλεύουν παράλληλα παραπάνω από ένα κανάλι.



Σχήμα 6.3 Διάγραμμα ροής των καναλιών (Πηγή *GNSS-SDR/Documentation/Signal Processing Blocks*) - Figure 6.3 Channel's flow diagram (Source *GNSS-SDR/Documentation/Signal Processing Blocks*)

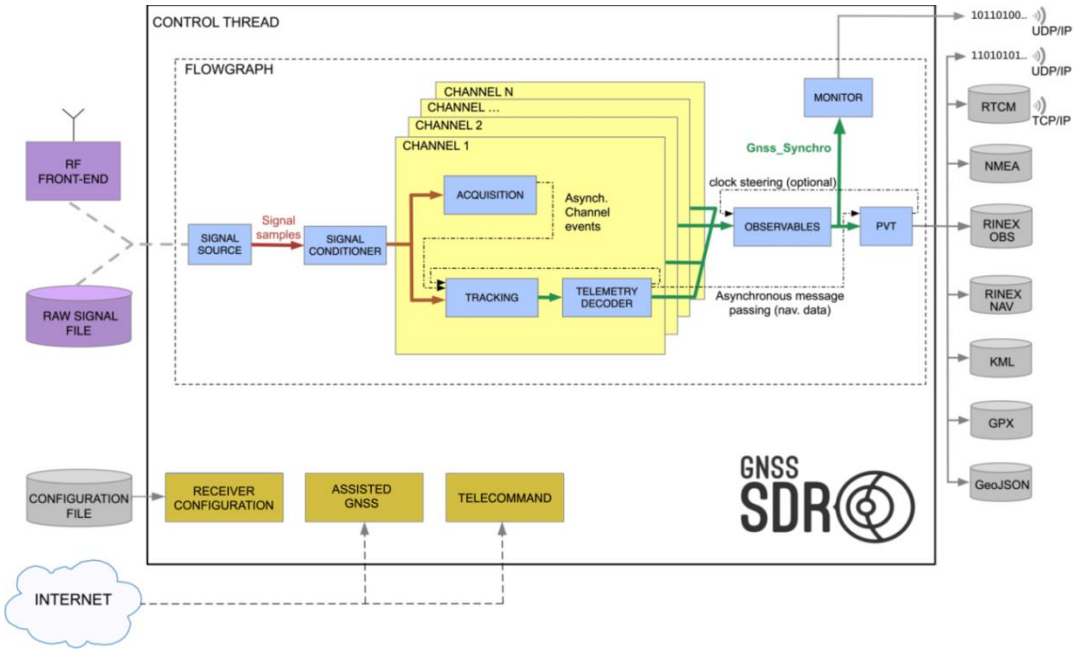
Τα τρία εσωτερικά blocks των καναλιών αφορούν:

- στην ανάκτηση των διαφόρων δορυφορικών σημάτων (Acquisition block),
- στην παρακολούθηση του εκάστοτε δορυφόρου από το δέκτη (Tracking block)
- στην αποκωδικοποίηση του μηνύματος πλοήγησης του κάθε δορυφόρου (Telemetry Decoder block).

Τα δύο τελευταία blocks είναι τα Observables και PVT (Βλέπε Σχήμα 6.1). Στο Observables block γίνεται η συλλογή των συγχρονισμένων δεδομένων από όλα τα κανάλια και υπολογίζονται από αυτά, οι τρεις πρωτογενείς παρατηρήσεις των GNSS (ψευδοαποστάσεις, φάση του φορέα και μετατοπίσεις Doppler). Στο PVT block γίνεται η

επίλυση του εντοπισμού, καθώς και η εξαγωγή των δεδομένων σε διάφορα πρότυπα (για περαιτέρω ανάλυση) ή οπτικοποίησή τους.

Όλοι οι παράμετροι του κάθε block, ορίζονται από το χρήση και εισάγονται σε ένα αρχείο (Configuration File). Κάθε τέτοιο αρχείο ορίζει ένα δέκτη GNSS, ο οποίος περιλαμβάνει όλα τα παραπάνω blocks. Επιπροσθέτως, το κάθε αρχείο έχει τη δυνατότητα να δεχθεί επιπλέον παραμέτρους όπως υποβοηθούμενο GNSS, τηλεχειρισμό κτλ, ώστε να καταστεί δυνατόν ο χρήστης να προσομοιώσει όσο πιο πιστά μπορεί ένα σενάριο πεδίου. Λαμβάνοντας όλα τα παραπάνω υπόψη, το διάγραμμα ροής ενός προσομοιωτή GNSS-SDR έχει μια τέτοια μορφή



Σχήμα 6.4 Ολοκληρωμένο διάγραμμα ροής ενός προσομοιωτή GNSS-SDR (Πηγή *GNSS-SDR/Documentation/Signal Processing Blocks*) - Figure 6.4 Total flow diagram of GNSS-SDR (Source *GNSS-SDR/Documentation/Signal Processing Blocks*)

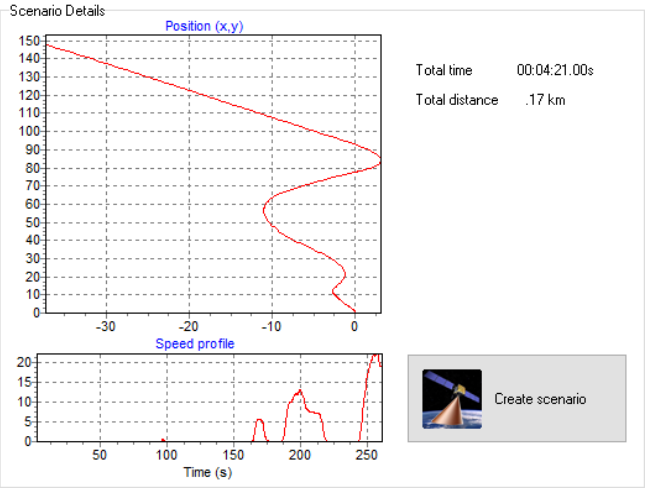
6.2.2 Προσομοιωτές Δορυφορικού Σήματος - Λογισμικό SatGen

Το SatGen αποτελεί ένα λογισμικό πρόγραμμα της RACELOGIC, για την προσομοίωση δορυφορικών σημάτων GNSS και την παραγωγή RF δεδομένων. Ο σκοπός του συγκεκριμένου λογισμικού προγράμματος, είναι να παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να δημιουργεί RF δεδομένα, χωρίς να χρειαστούν παρατηρήσεις υπαίθρου. Επιπλέον, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει σενάριο τα οποία αφορούν μελλοντική ή παρελθοντική εποχή, για οποιαδήποτε ώρα τον ενδιαφέρει. Οι παράμετροι του σεναρίου, καθώς και το είδος του εντοπισμού (στατικός ή κινηματικός), είναι στον έλεγχο του χρήστη.

Σχήμα 6.5 Γραφική διεπαφή χρήστη του SatGen (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.5 SatGen GUI (Source *SatGen V3 User Manual*)

Στο Σχήμα 6.5 φαίνεται η γραφική διεπαφή χρήστη του SatGen. Στο αριστερό τμήμα του παραθύρου, εμφανίζονται οι ενδείξεις Static scenario, Draw route, Import file, User defined και Close (Στατικό σενάριο, Χάραξη πορείας, Εισαγωγή αρχείου, Καθορισμός από το χρήστη μέσω εντολών και Κλείσιμο SatGen). Η κάθε μία από τις παραπάνω επιλογές, περιλαμβάνει ένα παράθυρο που φέρει το όνομα της εκάστοτε επιλογής, ένα παράθυρο που περιλαμβάνει τις λεπτομέρειες του σεναρίου (Scenario Details) και ένα παράθυρο που περιλαμβάνει τις ρυθμίσεις του σεναρίου (Scenario Settings). Το παράθυρο Scenario Details είναι ακριβώς το ίδιο για όλες τις επιλογές, ενώ το παράθυρο Scenario Setting διαφοροποιείται, ανάλογα με την επιλογή του σεναρίου.

6.2.2.α Λεπτομέρειες Σεναρίου (Scenario Details)

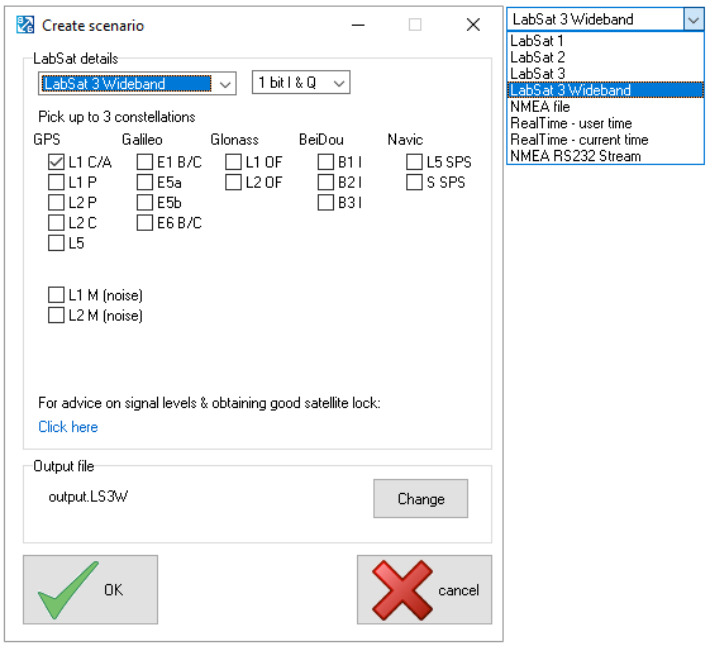


Σχήμα 6.6 Λεπτομέρειες σεναρίου (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.6 Scenario Details (Source *SatGen V3 User Manual*)

Στο Σχήμα 6.6 φαίνεται το παράθυρο Scenario Details. Το συγκεκριμένο παράθυρο περιλαμβάνει τρία πλαίσια. Το πρώτο πλαίσιο φέρει την ένδειξη Position (x,y) m και περιλαμβάνει την οριζοντιογραφία του σεναρίου σε ορθή προβολή, εκφρασμένη σε τοποκεντρικό σύστημα αναφοράς. Στην περίπτωση του στατικού εντοπισμού, στο συγκεκριμένο πλαίσιο εμφανίζεται ένα σημείο τοποθετημένο στη θέση (0,0). Στην περίπτωση κινηματικού εντοπισμού, εμφανίζεται η τροχιά του σεναρίου. Το πρώτο σημείο είναι τοποθετημένο στη θέση (0,0), ενώ τα υπόλοιπα σημεία είναι εκφρασμένα ως αποστάσεις από το πρώτο σημείο κατά Δx και Δy. Το συγκεκριμένο πλαίσιο χρησιμοποιείται κυρίως στην περίπτωση κινηματικού εντοπισμού, προκειμένου να έχει ο χρήστης εποπτικό έλεγχο της τροχιάς. Αριστερά του πλαισίου, φαίνεται ο συνολικός χρόνος και η απόσταση του σεναρίου.

Το δεύτερο πλαίσιο φέρει την ένδειξη Speed Profile και περιλαμβάνει το προφίλ ταχύτητας του κινηματικού εντοπισμού εκφρασμένο σε m/s, συναρτήσει του χρόνου. Και το συγκεκριμένο πλαίσιο, χρησιμεύει για τον εποπτικό έλεγχο της ταχύτητας του σεναρίου.

Το τρίτο πλαίσιο φέρει την Create scenario και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του σεναρίου. Έχοντας εισάγει τα απαραίτητα δεδομένα και ρυθμίσει όλες τις παραμέτρους, ο χρήστης πατώντας στο συγκεκριμένο πλαίσιο, μπορεί να δημιουργήσει το RF αρχείο. Το SatGen περιλαμβάνει αρκετές επιλογές ως προς τα δεδομένα εξόδου.



Σχήμα 6.7 Παράθυρο δημιουργίας σεναρίου (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.7 Scenario creation (Source *SatGen V3 User Manual*)

Στο Σχήμα 6.7 φαίνονται οι επιλογές που έχει ο χρήστης για την εξαγωγή των δεδομένων από το SatGen.

LabSat 1

Με την ένδειξη LabSat 1, τα δεδομένα εξόδου είναι συμβατά με τον LabSat 1 και περιλαμβάνουν IF δεδομένα των 1 bit, μόνο για το σύστημα GPS. Τα αρχεία εξόδου στο συγκεκριμένο πρότυπο φέρουν την κατάληξη .bin

LabSat 2

Με την ένδειξη LabSat 2, τα δεδομένα εξόδου είναι συμβατά με τον LabSat 2 και περιλαμβάνουν δεδομένα της μορφής I&Q (δυαδικά αρχεία). Τα αρχεία εξόδου στο συγκεκριμένο πρότυπο φέρουν την κατάληξη .ls2

LabSat 3

Με την ένδειξη LabSat 3, τα δεδομένα εξόδου είναι συμβατά με τον LabSat 3 και περιλαμβάνουν δεδομένα της μορφής I&Q. Τα αρχεία εξόδου στο συγκεκριμένο πρότυπο φέρουν την κατάληξη .ls3

LabSat 3 Wideband

Με την ένδειξη LabSat 3 Wideband, τα δεδομένα εξόδου είναι συμβατά με τον LabSat 3 Wideband και περιλαμβάνουν δεδομένα της μορφής I&Q. Με τη συγκεκριμένη επιλογή προκύπτουν δύο αρχεία εξόδου. Το πρώτο αρχείο φέρει την κατάληξη .LS3W, ενώ το δεύτερο την κατάληξη .ini. Για να μπορέσει ο χρήστης να επαναλάβει το σενάριο στον LabSat 3 Wideband, θα πρέπει και τα δύο αρχεία να βρίσκονται στον ίδιο φάκελο του εσωτερικού SSD του LabSat, ή στον ίδιο φάκελο του NAS

NMEA file

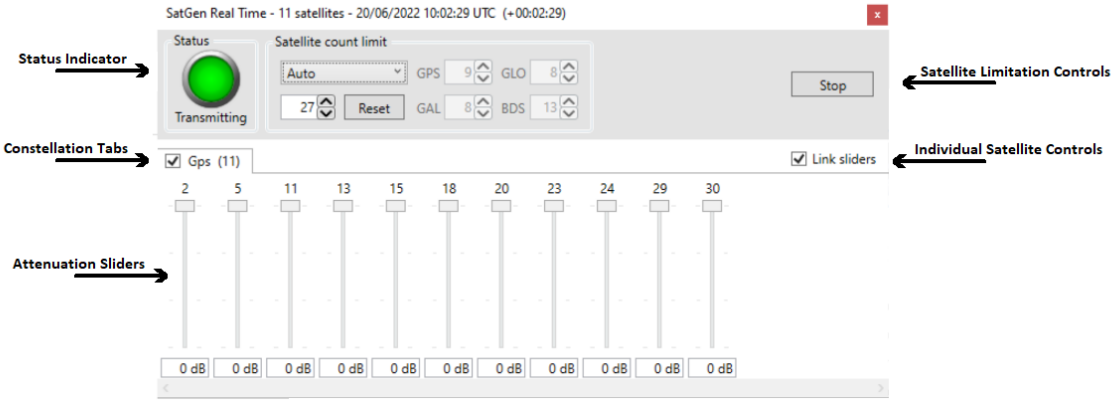
Με την ένδειξη NMEA file, τα δεδομένα εξόδου εξάγονται στο πρότυπο NMEA και προκύπτει ένα αρχείο που φέρει την κατάληξη .txt

Real Time

Με τις ενδείξεις Real Time - user time και Real Time - current time, το σενάριο εξάγεται ως ψηφιακή ροή στον συνδεδεμένο LabSat RT. Ο LabSat RT, μετατρέπει τη ψηφιακή ροή σε αναλογική και στη συνέχεια, μεταδίδεται ως ένα RF σήμα. Με την ένδειξη user time, τα RF δεδομένα αφορούν τη ορισμένη από το χρήστη ώρα και ημέρα. Με την ένδειξη current time, τα RF δεδομένα αφορούν τη συγκεκριμένη ώρα και μέρα του σεναρίου, ενώ η καθυστέρηση της αναλογική ροής είναι λιγότερη 1 sec.

Σχήμα 6.8 LabSat RT (Πηγή *Naelcom/GNSS-Simulators/LabSat-RT*) - Figure 6.8 LabSat RT (Source *Naelcom/GNSS-Simulators/LabSat-RT*)

Με τη συγκεκριμένη επιλογή εμφανίζεται ένα επιπλέον παράθυρο, το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των δεδομένων εξόδου.



Σχήμα 6.9 Ρυθμίσεις σεναρίων Real Time (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.9 Real Time scenario settings (Source *SatGen V3 User Manual*)

Το παράθυρο που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.9 περιλαμβάνει:

- την ένδειξη του μεταδιδόμενου σήματος (Status Indicator). Η συγκεκριμένη ένδειξη παίρνει το χρώμα κίτρινο, όταν ξεκινάει η προσομοίωση του σεναρίου. Όταν η ένδειξη γίνει πράσινη, τότε τα δεδομένα μεταδίδονται, ενώ όταν η ένδειξη γίνει κόκκινη, υπάρχει υπερφόρτωση των σημάτων και ο χρήστης θα πρέπει να μειώσει τον αριθμό των δορυφόρων του σεναρίου, μέχρι η ένδειξη να γίνει πράσινη
- την ένδειξη των συστημάτων εντοπισμού που χρησιμοποιούνται (Constellation Tabs). Για κάθε σύστημα εντοπισμού, φαίνονται και οι αντίστοιχοι δορυφόροι που χρησιμοποιούνται, ενώ ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αφαιρέσει δορυφόρους (ένδειξη Individual Satellite Control) ή ολόκληρο το σύστημα εντοπισμού που θέλει

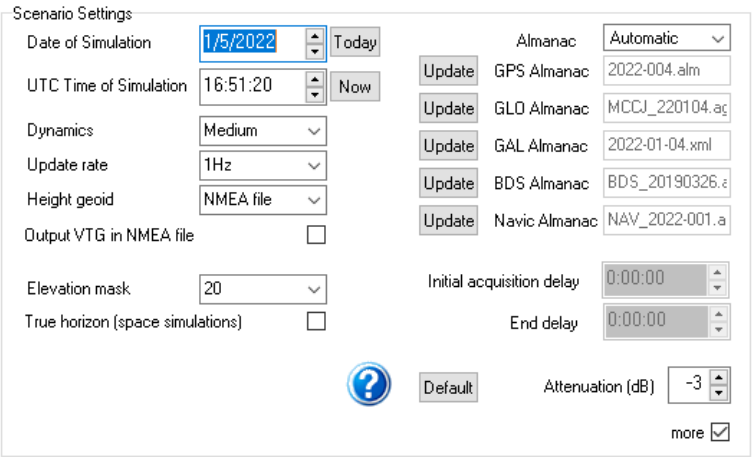
- την ένδειξη της έντασης του σήματος (Attenuation Sliders). Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αυξήσει ή να μειώσει την ένταση του σήματος σε ολόκληρο το σύστημα εντοπισμού ή σε κάθε δορυφόρο ξεχωριστά
- την ένδειξη περιορισμού των δορυφόρων των συστημάτων εντοπισμού (Satellite Limitations Control). Η συγκεκριμένη ένδειξη έχει τις επιλογές Automatic και Manual. Με την επιλογή Automatic, το πρόγραμμα προσομοιώνει όσους περισσότερους δορυφόρους μπορεί (για το κάθε σύστημα εντοπισμού), μέχρι η CPU να φτάσει στο 100% της χρήσης της. Με την επιλογή Manual, ο χρήστης επιλέγει τον αριθμό των δορυφόρων που θα προσομοιωθεί, για το κάθε σύστημα εντοπισμού

NMEA RS232

Τέλος, με την ένδειξη NMEA RS232, τα δεδομένα εξόδου εξάγονται ως NMEA, με βάση το πρωτόκολλο επικοινωνίας RS232 [Βλέπε παράγραφο §6.3.4.γ Recommended Standard 232 (RS232)]

Επιπλέον, ο χρήστης πρέπει να ορίσει τον αριθμό των bit για την κβάντωση των συνιστωσών I&Q και να επιλέξει τα συστήματα εντοπισμού που θα χρησιμοποιηθούν στο σενάριο (Βλέπε Σχήμα 6.7). Ανάλογα το πρότυπο εξαγωγής δεδομένων, χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα συστήματα εντοπισμού.

6.2.2.β Ρυθμίσεις Σεναρίου (Scenario Settings)



Σχήμα 6.10 Ρυθμίσεις σεναρίου (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.10 Scenario Settings (Source *SatGen V3 User Manual*)

Στο Σχήμα 6.10 φαίνονται οι ρυθμίσεις του σεναρίου. Ανάλογα το σενάριο του χρήστη, διαφοροποιούνται και κάποιες από τις ρυθμίσεις. Στο παράθυρο των ρυθμίσεων φαίνονται:

Date of Simulation

Η ημερομηνία του σεναρίου στο πρότυπο mm/dd/year. Πατώντας την ένδειξη Today, εισάγεται αυτόματα η ημερομηνία όπου πατήθηκε η ένδειξη Today

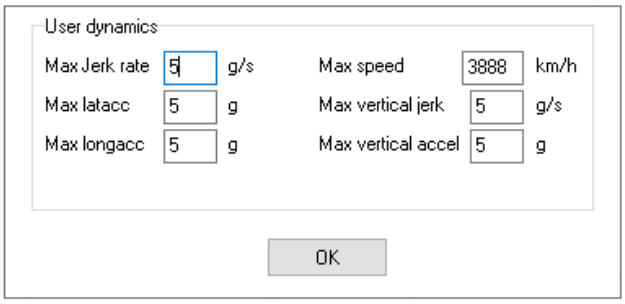
UTC Time of Simulation

Ο χρόνος του σεναρίου εκφρασμένος στην κλίμακα του Παγκόσμιου Συντονισμένου Χρόνου. Πατώντας την ένδειξη Today, εισάγεται αυτόματα η ώρα όπου πατήθηκε η ένδειξη Today

Dynamics

Η δυναμική της συσκευής ελέγχου (DUT). Ο χρήστης μπορεί να ορίσει τη δυναμική του οχήματος, ανάλογα με το σενάριο που θέλει να προσομοιώσει. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι:

- Low: Χαμηλή δυναμική (μέγιστη ταχύτητα 60 km/h)
- Medium: Μέτρια δυναμική (μέγιστη ταχύτητα 100 km/h)
- High: Υψηλή δυναμική (μέγιστη ταχύτητα 300 km/h)
- User dynamics input: Στη συγκεκριμένη επιλογή ο χρήστης ορίζει τη δυναμική της DUT. Οι παράμετροι που πρέπει να ορίσει ο χρήστης, φαίνονται στο Σχήμα 6.11



Σχήμα 6.11 Ορισμός δυναμικής από το χρήστη (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.11 User dynamics (Source *SatGen V3 User Manual*)

Η παράμετρος Max Jerk rate αναφέρεται στο ρυθμό μεταβολής της επιτάχυνσης στην οριζοντιογραφική θέση. Οι παράμετροι Max latacc και Max longacc αναφέρονται στη μέγιστη επιτάχυνση της DUT, εγκάρσια και στη διεύθυνση της πορείας αντίστοιχα. Η παράμετρος Max speed αναφέρεται στη μέγιστη επιτάχυνση που μπορεί να αναπτύξει η DUT. Η παράμετρος Max vertical jerk αναφέρεται στο ρυθμό μεταβολής της επιτάχυνσης στη διεύθυνση κάθετα της κίνησης. Τέλος, η παράμετρος Max vertical accel αναφέρεται στη μέγιστη επιτάχυνση στη διεύθυνση κάθετα της κίνησης.

Update rate

Ο ρυθμός ανανέωσης της τροχιάς σε Hz

Height geoid

Το μοντέλο γεωειδούς του σεναρίου. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τα μοντέλα EGM84, EGM96, EGM2008 ή NMEA file, δηλαδή να χρησιμοποιηθούν τα υψομετρικά δεδομένα του NMEA. Η συγκεκριμένη ένδειξη χρησιμοποιείται για τη μετατροπή των γεωμετρικών υψομέτρων (υψόμετρα από το ελλειψοειδές αναφοράς), σε ορθομετρικά υψόμετρα (υψόμετρα από τη Μέση Στάθμη της Θάλασσας). Τα υψόμετρα που εισάγονται στο SatGen, θεωρούνται από το λογισμικό ως ορθομετρικά

Output VTG in NMEA file indicator

Η συγκεκριμένη ένδειξη εξάγει τα δεδομένα VTG (Track made good and speed over the ground) από το NMEA αρχείο. Τα συγκεκριμένα δεδομένα αφορούν μετρήσεις για τη ταχύτητα της DUT

Elevation Mask

Η γωνίας αποκοπής των δορυφόρων, δηλαδή την ελάχιστη γωνία από τον τοπικό ορίζοντα, όπου ο δέκτης μπορεί να παρατηρήσει δορυφόρους

True horizon (space simulations) indicator

Η συγκεκριμένη ένδειξη χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το σενάριο αφορά προσομοίωση ιπτάμενων οχημάτων. Επιλέγοντας τη παραπάνω ένδειξη, αυξάνεται ο αριθμός των διαθέσιμων δορυφόρων. Τα δεδομένα ενός τέτοιου σεναρίου δεν μπορούν να αναφέρονται σε τοπικό σύστημα αναφοράς, ενώ τα γραφήματα στις λεπτομέρειες του σεναρίου (Βλέπε παράγραφο §6.2.2.α Λεπτομέρειες Σεναρίου [Scenario Details]) δεν πρέπει να ληφθούν υπόψη από το χρήστη, καθώς δεν αναπαριστούν σωστά τις συγκεκριμένες τροχιές

Almanac

Τα αρχεία Almanac είναι δεδομένα τα οποία υποβοηθούν το δέκτη να εντοπίσει και να παρακολουθήσει τους διαθέσιμους δορυφόρους, παρέχοντας πληροφορίες για την τροχιά τους, το ιονοσφαιρικό μοντέλο για την επίδραση της ιονόσφαιρας (σε περιπτώσεις μίας συχνότητας μετάδοσης), καθώς και για τις συνθήκες παρατήρησης του σεναρίου. Με την ένδειξη Automatic, τα αρχεία κατεβάζονται και εισάγονται αυτόματα από το SatGen, με βάση την ημέρα και την ώρα του σεναρίου. Με την ένδειξη Manual, ο χρήστης πρέπει να κατεβάσει και να εισάγει τα αντίστοιχα αρχεία

Initial Acquisition delay

Την καθυστέρηση του δέκτη στην επίλυση της θέσης και του χρόνου του (TTFF). Σε περιπτώσεις όπου το σενάριο δεν περιλαμβάνει κάποιο αρχικό χρονικό διάστημα ακινησίας του δέκτη, ο χρήστης μπορεί να εισάγει αυτό το διάστημα, αυξάνοντας το χρόνο της συγκεκριμένης ένδειξης

End delay

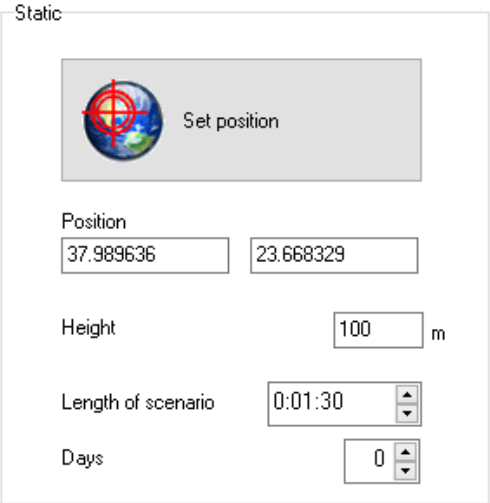
Ο χρόνος που απαιτείται μέχρι ο δέκτης να σταματήσει να στέλνει δεδομένα στη DUT

Attenuation

Η ένδειξη Attenuation αναφέρεται στο Carrier to Noise ratio (C/N_0). Η συγκεκριμένη ένδειξη χρησιμοποιείται προκειμένου ο χρήστης, να εισάγει τεχνητό θόρυβο στα δεδομένα. Λόγω των ασθενών σημάτων των GNSS, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αυξήσει ή να μειώσει την ένταση του σήματος των GNSS. Το αν θα αυξήσει ή θα μειώσει την ένταση του σήματος, εξαρτάται από την κεραία που χρησιμοποιείται στο σενάριο. Ο συγκεκριμένος τεχνητός θόρυβος δεν είναι βαθμονομημένος, οπότε αν ο χρήστης εισάγει ένα θόρυβο 6 dB, ο λόγος C/N_0 δεν θα προσαρμοστεί ακριβώς στα 6 dB.

6.2.2.γ Στατικό Σενάριο (Static scenario)

Με τη συγκεκριμένη επιλογή, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει ένα RF αρχείο για ένα στατικό σενάριο εντοπισμού.

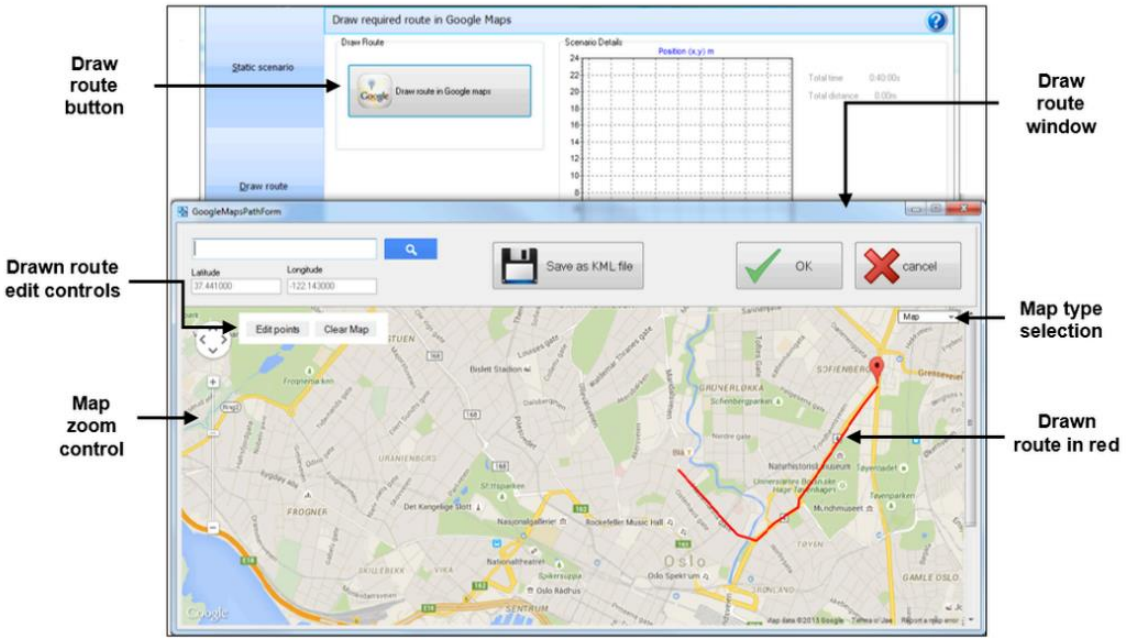


Σχήμα 6.12 Στατικό Σενάριο (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.12 Static Scenario (Source *SatGen V3 User Manual*)

Στο συγκεκριμένο σενάριο ο χρήστης πρέπει να εισάγει τις συντεταγμένες (γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος) και το ορθομετρικό υψόμετρο του σημείου. Πατώντας την ένδειξη Set Position, ο χρήστης εισάγεται σε ένα περιβάλλον Google Maps και εισάγει το σημείο ενδιαφέροντος. Επιπλέον, ο χρήστης πρέπει να ορίσει την ώρα όπου θα διαρκέσει το σενάριο (σε μορφή hh:mm:ss) ή πόσες μέρες θα διαρκέσει το σενάριο.

6.2.2.δ Χάραξη Πορείας (Draw Route)

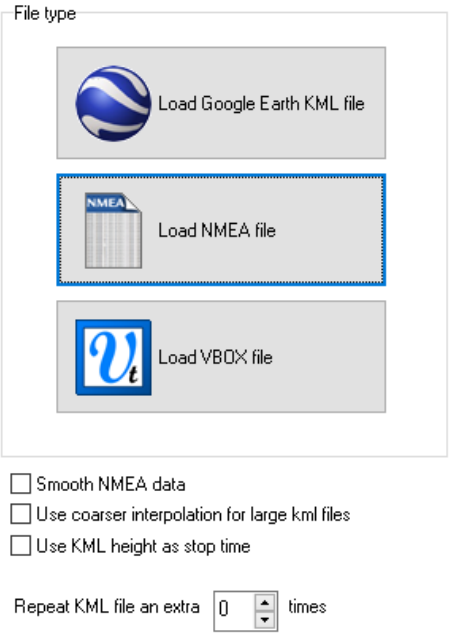
Με τη συγκεκριμένη επιλογή, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει τροχιές για σενάρια κινηματικού εντοπισμού. Ο χρήστης εισάγεται σε ένα περιβάλλον Google Maps και μπορεί να εισάγει τη τροχιά είτε χειροκίνητα, είτε εισάγοντας το κάθε σημείο ξεχωριστά. Ο χρήστης μπορεί να μεγεθύνει το παράθυρο του Google Maps για να πετύχει μεγαλύτερη ακρίβεια στη χάραξη της τροχιάς, ενώ έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει τη συγκεκριμένη τροχιά στο πρότυπο KML. Το παράθυρο της Χάραξης Πορείας φαίνεται στο Σχήμα 6.13.



Σχήμα 6.13 Χάραξη Πορείας (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.13 Draw Route Scenario (Source *SatGen V3 User Manual*)

6.2.2.ε Εισαγωγή Αρχείου (Import File)

Η συγκεκριμένη επιλογή, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει ένα αρχείο το οποίο περιέχει τη τροχιά ενός σεναρίου.

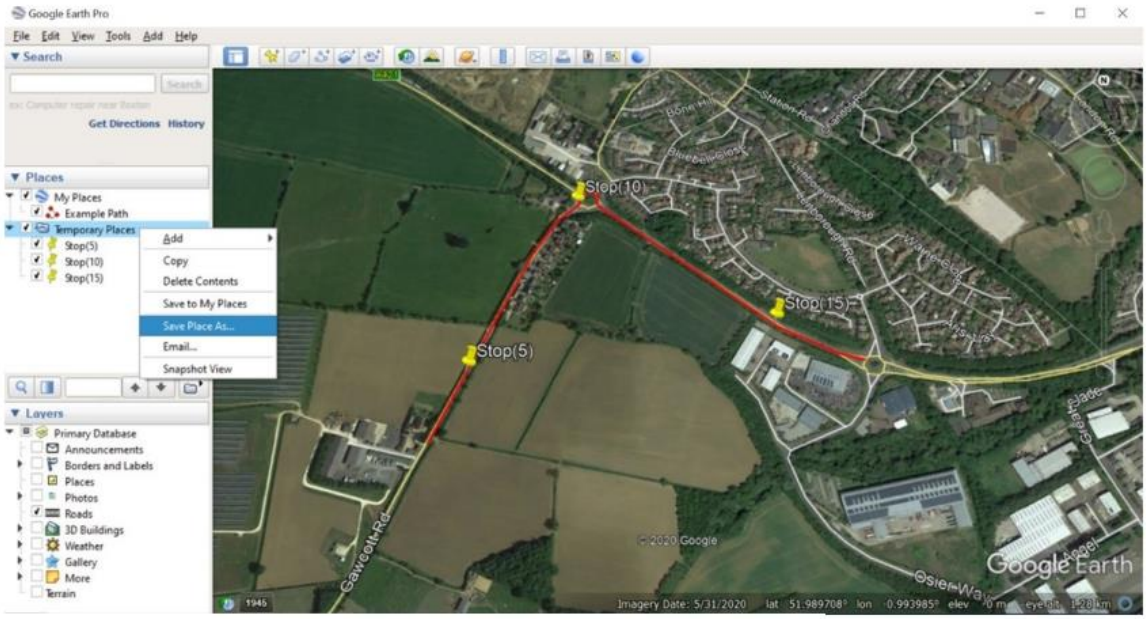


Σχήμα 6.14 Εισαγωγή αρχείου (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.14 Import File Scenario (Source *SatGen V3 User Manual*)

Load Google Earth KML file

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει ένα αρχείο στο πρότυπο KML. Στα συγκεκριμένα αρχεία, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τροποποιήσει οποιαδήποτε από τις ρυθμίσεις. Επιπροσθέτως, κατά τη δημιουργία του KML αρχείου στο περιβάλλον του Google Earth, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσθέσει στάσεις. Η συγκεκριμένη επιλογή είναι

ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου το σενάριο αφορά την κίνηση ενός οχήματος σε ένα αστικό δίκτυο. Πατώντας την επιλογή Add Placemark του Google Earth και ονομάζοντας το κάθε σημείο 'Stop(x)' (όπου x ο χρόνος που θα είναι σταματημένο το όχημα σε sec), ο χρήστης μπορεί να προσθέσει όσες στάσεις θέλει, προκειμένου να προσομοιώσει το σενάριο που τον ενδιαφέρει.



Σχήμα 6.15 Παραδείγματα στάσεων στο περιβάλλον του Google Earth (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.15 Adding stops example in Google Earth (Source *SatGen V3 User Manual*)

Με την εισαγωγή των αρχείων KML, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τις ενδείξεις Use coarser interpolation for large kml files, Use KML height as stop time και Repeat KML file an extra x times. Η ένδειξη Use coarser interpolation for large kml files πρέπει να επιλέγεται σε περίπτωση που το αρχείου KML, είναι μεγάλο σε όγκο. Επιλέγοντας τη συγκεκριμένη ένδειξη, το SatGen χρησιμοποιεί μια μέθοδο παρεμβολής προκειμένου να μειώσει το ποσοστό μνήμης που απαιτείται. Η ένδειξη Use KML height as stop time χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις, όπου ο χρήστης έχει αλλάξει τις τιμές των υψομέτρων στο KML αρχείο. Οι τιμές που βρίσκονται στο πεδίο των υψομέτρων που είναι μεγαλύτερες από 0, υποδεικνύουν στάση τόσων δευτερολέπτων, όση η τιμή που απεικονίζουν. Τέλος, η ένδειξη Repeat KML file an extra x times, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επαναλάβει το συγκεκριμένο KML αρχείο, 'x' φορές.

Load NMEA file

Με τη συγκεκριμένη επιλογή, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει ένα αρχείο στο πρότυπο NMEA. Πριν την εισαγωγή του συγκεκριμένου αρχείου, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την ένδειξη Smooth NMEA data, προκειμένου να αφαιρεθεί τυχόν θόρυβος από τα δεδομένα. Στα δεδομένα NMEA, η δυναμική της DUT εξάγεται από το NMEA και όχι από το χρήστη.

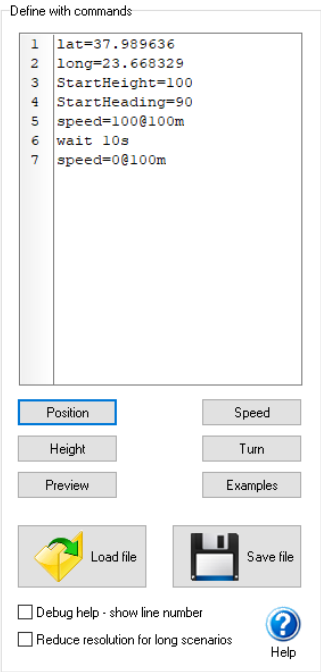
Load VBOX file

Το VBOX αποτελεί μια μετωπιαία συσκευή της RACELOGIC, για την καταγραφή δεδομένων που αφορούν στην πλοήγηση οχημάτων (θέση, ταχύτητα, αδρανειακές μετρήσεις, μετρήσεις κατά roll, pitch, yaw κτλ). Όπως και στα NMEA, έτσι και στα αρχεία του VBOX η δυναμική της DUT ορίζεται από το αρχείο.

Σχήμα 6.16 VBOX 3i&IMU Integration (Πηγή *Indiamart/Zenmicrosystems/VBOX-System*) - Figure 6.16 VBOX 3i&IMU Integration (Πηγή *Indiamart/Zenmicrosystems/VBOX-System*)

6.2.2.ζ Καθορισμός από το χρήστη μέσω εντολών (User Defined)

Με τη συγκεκριμένη επιλογή ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει μία τροχιά, μέσω εντολών.



Σχήμα 6.17 Καθορισμός τροχιάς από το χρήστη μέσω εντολών (Πηγή *SatGen V3 User Manual*) - Figure 6.17 User Defined Scenario (Source *SatGen V3 User Manual*)

Οι εντολές του λογισμικού είναι αρκετά απλές, ενώ το ίδιο το λογισμικό παρέχει κάποιες προεπιλεγμένες τροχιές, τις οποίες ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει. Σε περίπτωση που η τροχιά είναι αρκετά μεγάλη σε μέγεθος, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την ένδειξη Reduce resolution for long scenarios, προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα μνήμης.

6.3 Συστήματα Record and Replay – LabSat 3 Wideband

Τα συστήματα Record and Replay [14] χρησιμοποιούνται για τη συλλογή ανεπεξέργαστων GNSS σημάτων σε πραγματικό χρόνο, καθώς και για την επανάληψή τους. Τα συγκεκριμένα συστήματα έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν πολλαπλά σήματα από διάφορα συστήματα εντοπισμού, εισάγοντάς τα σε πολλαπλά κανάλια. Η συλλογή των δεδομένων γίνεται με τη χρήση μιας κεραίας GNSS, η οποία συνδέεται με το Record and Replay σύστημα, συνήθως με τη χρήση ενός RF καλωδίου (τύπου SMA).

α) β)

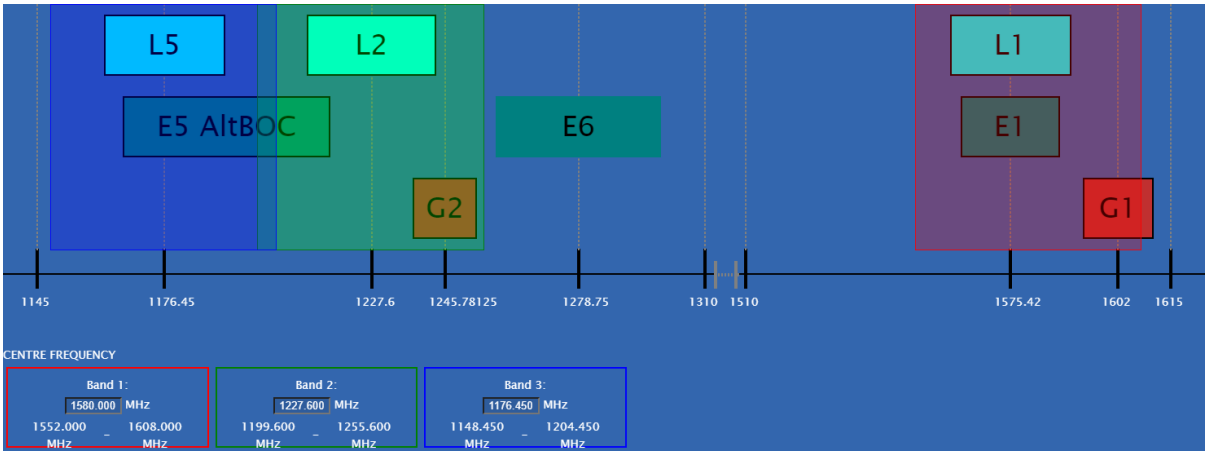
Σχήμα 6.18 Παραδείγματα Record and Replay συστημάτων GNSS, α) LabSat 3 Wideband (Πηγή *LabSat/Products/LabSat 3 Wideband*), β) Spirent GSS6450 (Πηγή *Spirent/Products/GNSS RF Record and Playback System GSS6450*) - Figure 6.18 Examples of GNSS Record and Replay systems a) LabSat 3 Wideband (Source *LabSat/Products/LabSat 3 Wideband*), b) Spirent GSS6450 (Source *Spirent/Products/GNSS RF Record and Playback System GSS6450*)

Ωστόσο, οι κεραίες GNSS δεν είναι οι μοναδικές πηγές δεδομένων εισόδου για τα συγκεκριμένα συστήματα. Ένας ακόμα τρόπος, είναι με τη χρήση ενός λογισμικού προγράμματος το οποίο έχει τη δυνατότητα να αναπαράγει αρχεία, συμβατά με τα Record and Replay συστήματα. Τα αρχεία αυτά αποτελούνται από RF I&Q ή IF δεδομένα (δυαδικά αρχεία), τα οποία περιλαμβάνουν όλες τις συνθήκες παρατήρησης και όλα τα διαθέσιμα συστήματα εντοπισμού, για το εκάστοτε σενάριο προσομοίωσης. Τα Record and Replay συστήματα, πρέπει να συνδεθούν με κάποια κεραία GNSS, προκειμένου να μπορέσει ο χρήστης να επαναλάβει το σενάριο. Με αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης μπορεί να επαναλάβει το ίδιο σενάριο σε διαφορετικές κεραίες, το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην αξιολόγηση ή στην ανάπτυξη κεραιών GNSS, παρέχοντας έτσι αξιοπιστία και συστηματικότητα μεταξύ των σεναρίων.

Πλέον, στο εμπόριο είναι διαθέσιμα διάφορα Record and Replay συστήματα, τα οποία παρέχουν στο χρήστη αρκετές δυνατότητες. Τα εμπορικά πακέτα, αν και όμοια ως προς την αρχή λειτουργίας τους, παρουσιάζουν αρκετές διαφοροποιήσεις ως προς τις δυνατότητες που παρέχουν, καθώς και ως προς το κομμάτι διεπαφής με το χρήστη. Για ευνόητους λόγους, η ανάλυση όλων των διαθέσιμων εμπορικών πακέτων δεν είναι δυνατή στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, καθώς δεν αποσκοπεί στη σύγκριση των διαφόρων Record and Replay συστημάτων. Η ανάλυση που θα ακολουθήσει στις επόμενες παραγράφους, αναφέρεται στο Record and Replay σύστημα της RACELOGIC LabSat 3 Wideband, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή των ανεπεξέργαστων δεδομένων και για την αναπαραγωγή των διαφόρων σεναρίων.

6.3.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του LabSat 3 Wideband

Ο LabSat 3 Wideband, ανήκει στην κατηγορία των Record and Replay συστημάτων και επιτρέπει την κάλυψη των δορυφορικών συστημάτων GPS, Galileo, GLONASS και BeiDou, ενώ περιλαμβάνει επιπλέον τα συστήματα QZSS, IRNSS, SBAS και διάφορων εμπορικών διαφορικών υπηρεσιών. Το χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου συστήματος, είναι ότι παρέχει 3 μεταβαλλόμενα RF κανάλια τα οποία καλύπτουν ένα εύρος συχνοτήτων των 10 MHz, 30 MHz και 56 MHz. Το εύρος, η θέση (στο πεδίο των συχνοτήτων) αλλά και ο αριθμός των καναλιών ρυθμίζεται από το χρήστη, προκειμένου να συλλέξει τις αντίστοιχες συχνότητες μετάδοσης.



Σχήμα 6.19 Αναπαράσταση των RF καναλιών (με μπλε. πράσινο και κόκκινο χρώμα) του LabSat 3 Wideband, στο πεδίο των συχνοτήτων (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.19 Representation of LabSat's 3 Wideband RF channels in frequency domain (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*)

Στο Σχήμα 6.19 απεικονίζονται τα τρία διαθέσιμα κανάλια του LabSat 3 Wideband. Το κάθε κανάλι καλύπτει ένα εύρος συχνοτήτων των 56 MHz. Το πρώτο κανάλι (κόκκινο χρώμα) καλύπτει ένα εύρος από 1552.000 MHz έως 1608.000 MHz, δίνοντας τη δυνατότητα συλλογής των σημάτων L1, E1 και ένα ποσοστό της G1. Αντίστοιχα, το δεύτερο κανάλι (πράσινο χρώμα) παρέχει ένα εύρος από 1199.600 MHz έως 1255.600 MHz, καλύπτοντας τις συχνότητες L2, G2 και ένα τμήμα της E5 AltBOC, ενώ το τρίτο κανάλι (μπλε χρώμα) παρέχει ένας εύρος από 1148.450 MHz έως 1204.450 MHz καλύπτοντας τις συχνότητες L5 και το υπολειπόμενο τμήμα της E5 AltBOC. Η συχνότητα δειγματοληψίας του LabSat 3 Wideband γίνεται στα 10.23 MHz, 30.69 MHz και 58 MHz.

Επιπροσθέτως, ο LabSat 3 Wideband δίνει την επιλογή κβάντωσης των σημάτων I&Q στα 1, 2 και 3 bits ανά σήμα. Η συγκεκριμένη επιλογή είναι απαραίτητη για τη συλλογή και την επανάληψη των RF σημάτων, καθώς επηρεάζει τη μετατροπή του εισαχθέντος αναλογικού σήματος, σε ψηφιακό (ADC). Η επιλογή των bits για τις συνιστώσες I&Q γίνεται με βάση τις μετρήσεις που θέλει να συλλέξει ο χρήστης. Ο μόνος περιορισμός στην επιλογή των bits, έγκειται στη μνήμη της συσκευής όπου είναι αποθηκευμένα τα αρχεία (Βλέπε παράγραφο §6.3.5 Συλλογή και Επανάληψη Δεδομένων). Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται οι συχνότητες που έχει πρόσβαση ο χρήστης, με βάση τον αριθμό των bits για την κβαντοποίηση των συνιστωσών I&Q, το εύρος και τη θέση των καναλιών. Οι συγκεκριμένες προ-επιλογές δεν είναι οι μοναδικές που έχει στη διάθεσή του ο χρήστης, καθώς μπορεί να δημιουργήσει και τις δικές του, ώστε να καλύψει το εύρος συχνοτήτων που τον ενδιαφέρουν.

Πίνακας 6.1 Επιλογή κβάντωσης, εύρους και κατανομής της συχνότητας του καναλιού (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Table 6.1 Selection of quantization, bandwidth and channel frequency allocation (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*)

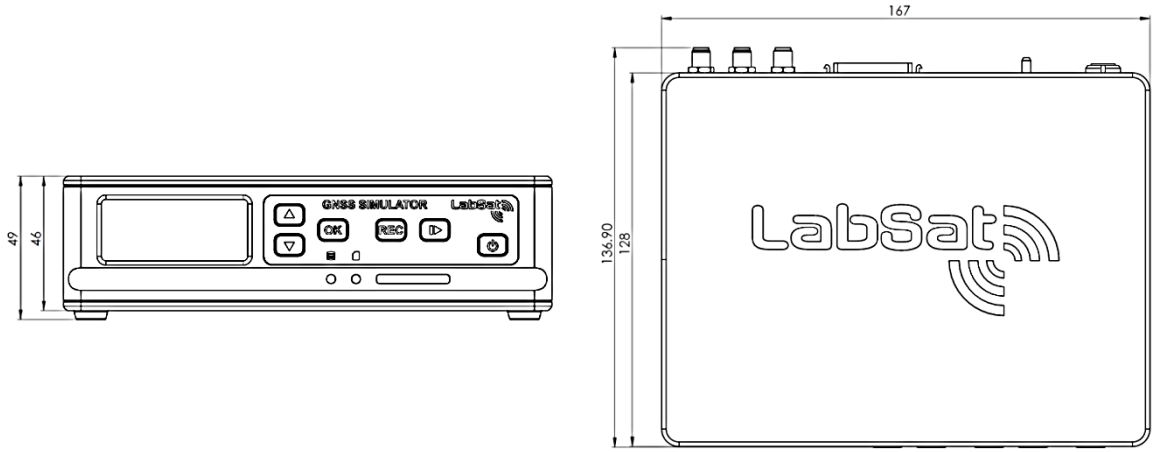
Preset	**Frequency (MHz)**	**10 MHz Bandwidth 10.23 MSPS**	**30 MHz Bandwidth 30.69 MSPS**	**56 MHz Bandwidth 58 MSPS**
1	1602	GLONASS L1 CA	GLONASS L1 CA P	
2	1580			GPSGPS L1 CA P(Y), L1c, M Galileo E1 B,C CBOC QZSS L1 CA, L1c, TMBOC WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN, SAIF GLONASS L1 CA, P B1
3	1575.42	GPS L1 CA, L1c BOC(1,1) Galileo E1 B,C BOC(1,1) QZSS L1 CA, L1c BOC(1,1) WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN, SAIF	Galileo E1 B,C CBOC QZSS L1 CA, L1c TMBOC WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN, SAIF	Galileo E1 B,C CBOC QZSS L1 CA, L1c TMBOC WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN, SAIF
4	1567.236		GPS L1 CA, L1c BOC(1,1) Galileo E1 B,C BOC(1,1) BeiDou B1 QZSS L1 CA, L1c BOC(1,1) WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN,SAIF	
5	1561.098	BeiDou B1	BeiDou B1	
6	1542	OmniSTAR, TerraStar, StarFire	OmniSTAR, TerraStar, StarFire	
7	1278.75			Galileo E6 A,B BeiDou B3
8	1268.52		BeiDou B1	
9	1246		GLONASS L2 CA, P	
10	1233.738			GPS L2 L2c, P(Y), M QZSS L2c GLONASS L2 CA, P

11	1227.6	GPS L2 L2c	GPS L2 L2c, P(Y), M QZSS L2c	GPS L2 L2c, P(Y), M QZSS L2c
12	1207.014		BeiDou B2 Galileo E5b GLONASS L3	
13	1176.45		GPS L5 Galileo E5a QZSS L5 IRNSS L5 SBAS L5	
14	1191.795			Galileo E5A/B GPS L5 BeiDou B2 IRNSS

Όπως αναφέρθηκε, τα συστήματα Record and Replay, προκειμένου να συλλέξουν και να επαναλάβουν τα ανεπεξέργαστα σήματα, πρέπει να συνδεθούν με μια κεραία GNSS μέσω ενός RF καλωδίου (Βλέπε παράγραφο §6.3.3.α Μετωπιαίο τμήμα του LabSat 3 Wideband). Στην περίπτωση του LabSat 3 Wideband, τα σήματα εξόδου είναι της τάξεως των -73 dBm έως -162 dBm. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει την ένταση των σημάτων εξόδου, με βάση τις ιδιαιτερότητες του σεναρίου που θέλει να επαναλάβει (αν είναι σε περιβάλλον με καθαρό ουρανό, αν είναι σε αστικό περιβάλλον κτλ). Για την αποθήκευση και αναπαραγωγή των δεδομένων εισόδου, ο LabSat 3 Wideband χρησιμοποιεί έναν εσωτερικό SSD χωρητικότητας 1 TB, ενώ περιλαμβάνει έναν SD χωρητικότητας 8 GB ο οποίος χρησιμοποιείται μόνο για τις αναβαθμίσεις του τυπικού λογισμικού (firmware).

Ο LabSat 3 Wideband περιλαμβάνει ένα δέκτη GNSS, ο οποίος χρησιμοποιείται για την παρατήρηση των συχνοτήτων GPS L1, Galileo E1, GLONASS L1 και BeiDou B1 στο στάδιο της καταγραφής και της επανάληψη του σήματος. Η κύρια λειτουργία του συγκεκριμένου δέκτη, είναι να μπορεί ο χρήστης να έχει εποπτικό έλεγχο στο αν η κεραία που έχει συνδέσει, λειτουργεί σωστά. Σε καμία περίπτωση, ο χρήστης δεν μπορεί να επιλέξει ποιες συχνότητες θα λάβει ή θα εξάγει ο LabSat 3 Wideband μέσω του συγκεκριμένου δέκτη. Στην περίπτωση συλλογής δεδομένων, ο δέκτης, λαμβάνει τα εισαχθέντα RF σήματα, ενώ στην περίπτωση της επανάληψης δεδομένων τα εξαγόμενα RF σήματα. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εξάγει τα δεδομένα από το δέκτη στο πρότυπο NMEA, συνδέοντας το σύστημα με έναν υπολογιστή, με τη χρήση ενός καλωδίου USB (Βλέπε παράγραφο §6.3.3.α Μετωπιαίο τμήμα του LabSat 3 Wideband). Τα δεδομένα του NMEA εξάγονται στα 115.200 baud (σύμβολα το δευτερόλεπτο).

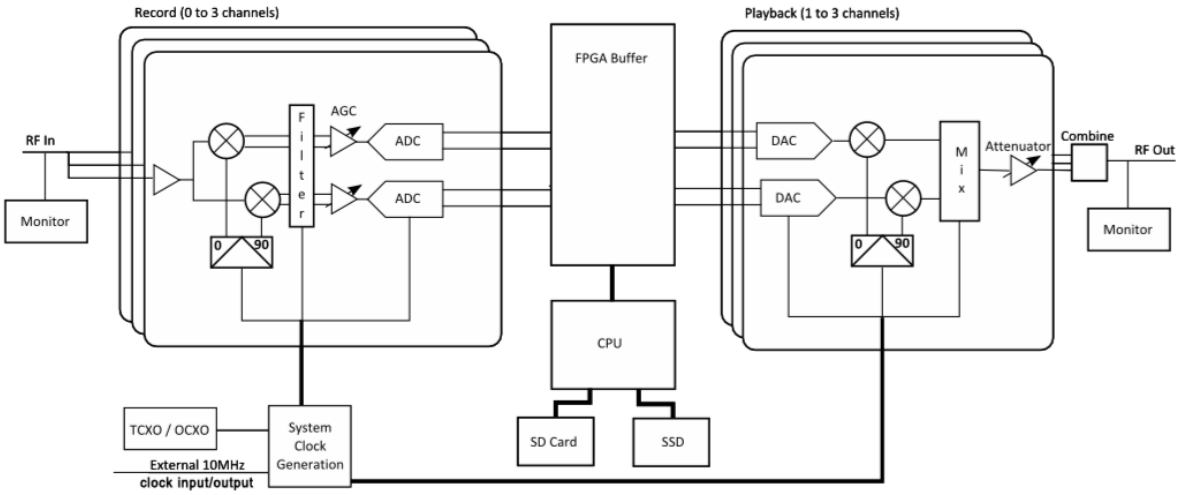
Τα τελευταία από τα βασικά χαρακτηριστικά του LabSat 3 Wideband, αφορούν τη λειτουργική του τάση, τη λειτουργική και αποθηκευτική θερμοκρασία και το μέγεθός του. Η τάση λειτουργίας του προσομοιωτή είναι μεταξύ των 2.8 και 4.6 V DC και η θερμοκρασία για την ορθή λειτουργία του, καθώς και η αποθηκευτική του θερμοκρασία, πρέπει να βρίσκεται στο εύρος -20°C έως +60°C. Τέλος, το βάρος του είναι στα 1.2 kg και οι διαστάσεις του φαίνονται στο Σχήμα 6.20.



Σχήμα 6.20 Διαστάσεις του LabSat 3 Wideband σε mm (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.20 Dimensions of LabSat 3 Wideband in mm (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*)

6.3.2 Αρχή Λειτουργίας του LabSat 3 Wideband

Ο LabSat 3 Wideband περιλαμβάνει κανάλια επικοινωνίας στα οποία γίνεται η εισαγωγή και εξαγωγή των δεδομένων. Στο Σχήμα 6.21 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του LabSat 3 Wideband.



Σχήμα 6.21 Σχηματικό διάγραμμα του LabSat 3 Wideband (Πηγή *LabSat 3 Wideband/Datasheet*) - Figure 6.21 Block diagram of LabSat 3 Wideband (Source *LabSat 3 Wideband/Datasheet*)

6.3.2.α Συλλογή Δεδομένων

Το τμήμα της συλλογής δεδομένων (Record), δέχεται ένα εισαγόμενο ανεπεξέργαστο σήμα. Το σήμα αυτό αφορά ένα αναλογικό GNSS σήμα, το οποίο αντιστοιχεί σε κάποια συγκεκριμένη συχνότητα μετάδοσης. Ανάλογα με τη συχνότητα του σήματος, εισάγεται στο 1 από τα 3 RF κανάλια του LabSat. Σκοπός του κάθε καναλιού, είναι να μετατρέψει το εισαγόμενο αναλογικό σήμα, σε ψηφιακό (δυαδικό αρχείο). Στις παραγράφους που ακολουθούν, γίνεται η περιγραφεί της μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό σήμα (ADC). Πρέπει να αποσαφηνιστεί ότι η περιγραφεί που θα ακολουθήσει, αφορά την ανάλυση του σήματος που γίνεται εντός του καναλιού του LabSat και δεν πρέπει να συγχέεται με την ανάλυση του σήματος που πραγματοποιούν οι κεραίες GNSS (Βλέπε Κεφάλαιο 4. ΚΕΡΑΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΩΠΙΑΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΩΝ ΔΕΚΤΩΝ GNSS).

Low Noise Amplifier (LNA)

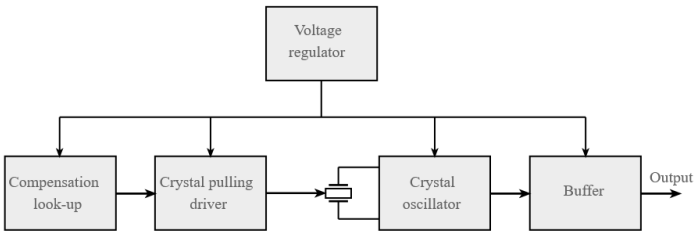
Τα σήματα των GNSS φθάνουν αρκετά εξασθενημένα στην κεραία, λόγω της καθυστέρησής τους μέσα από τα στρώματα της ατμόσφαιρας. Κατά την εισαγωγή τους στο αντίστοιχο κανάλι, ενισχύονται μέσω ενός LNA. Το χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης ενίσχυσης, είναι ότι δεν δυσχεραίνει σημαντικά το θόρυβο του σήματος (SNR). Οποιαδήποτε μέθοδος ενίσχυσης ενός σήματος, επιφέρει επιπλέον θόρυβο στο ληφθέν σήμα. Οι συγκεκριμένοι ενισχυτές είναι σχεδιασμένοι με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιούν το θόρυβο που θα προσθέσουν στο σήμα. Ο LNA του LabSat, αυξάνει την ένταση του σήματος κατά 8 dB.

Local Oscillator (LO)

Αφού ενισχυθεί το ληφθέν σήμα, θα πρέπει να γίνει ένας μετασχηματισμός της συχνότητάς του, προκειμένου να αντιστοιχεί στη κεντρική συχνότητα του συγκεκριμένου καναλιού. Έστω για παράδειγμα, ότι το εισαχθέν σήμα αφορά τη συχνότητα L1 του συστήματος GPS και ο χρήστης έχει ορίσει σαν κεντρική συχνότητα για το κανάλι 1, την L1. Η συχνότητα μετάδοσής του ληφθέν σήματος είναι στα 1575.42 MHz. Λόγω του φαινομένου Doppler, η συχνότητα μετάδοσης του εισαχθέν σήματος, θα είναι μετατοπισμένη σε σχέση με την κεντρική συχνότητα της L1. Ο ρόλος του ταλαντωτή είναι να παράγει τη κεντρική συχνότητα που απαιτείται για το εισαχθέν σήμα. Εισάγοντας το ληφθέν σήμα και το σήμα του ταλαντωτή στο μείκτη, μετατοπίζεται η συχνότητα του εισαχθέν σήματος και παράγονται τα σήματα I&Q. Στο Σχήμα 6.21 εμφανίζονται δύο ταλαντωτές. Ο πάνω ταλαντωτής παράγει ένα σήμα με κεντρική συχνότητα, ίση με αυτή του καναλιού (I) ενώ ο δεύτερος ταλαντωτής, παράγει ακριβώς το ίδιο σήμα, μετατοπισμένο κατά 90° (Q). Για να μπορέσει ο ταλαντωτής να παράγει τη κεντρική συχνότητα, θα πρέπει να είναι συνδεδεμένος με κάποιο ρολόι αναφοράς, ώστε να μπορεί να διατηρεί τη συχνότητά του σταθερή. Για την παραγωγή αυτής της σταθερής συχνότητας, ο LabSat 3 Wideband περιέχει τους ταλαντωτές TCXO και OCXO, ενώ μπορεί να συνδεθεί και με ένα εξωτερικό ρολόι αναφοράς.

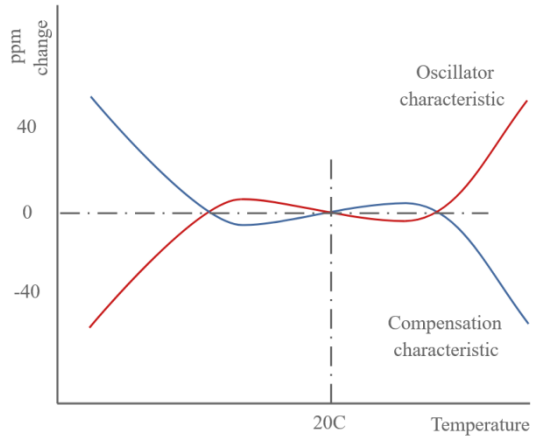
Temperature Compensated Crystal Oscillator (TCXO)

Ο TCXO είναι ένας κρυσταλλικός ταλαντωτής, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με ένα θερμικά ευαίσθητο επαγωγικό κύκλωμα σε κάθε βρόγχο ταλάντωσης, ώστε να αντισταθμίζει τη συχνότητα εξόδου από τις διακυμάνσεις στη θερμοκρασία. Οι κρυσταλλικοί ταλαντωτές χρησιμοποιούν κομμάτια χαλαζία, τα οποία έχουν την ιδιότητα να ταλαντώνονται με σταθερή συχνότητα ταλάντωσης, όταν θερμανθούν. Όσο μεταβάλλεται η θερμοκρασία που δέχονται, τόσο μεταβάλλεται και η σταθερότητα της συχνότητας ταλάντωσης του κρυστάλλου. Για να μπορέσει να σταθεροποιήσει τη συχνότητα ταλάντωσης, ο TCXO χρησιμοποιεί ένα VCXO. Ο VCXO αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό των TCXO και είναι αυτό το τμήμα, το οποίο διορθώνει τη συχνότητα ταλάντωσης από τις μεταβολές της θερμοκρασίας.



Σχήμα 6.22 Διάγραμμα ροής του VCXO (Πηγή *electronics-notes/articles/electronic-components/quartz-crystal-xtal/TCXO*) - Figure 6.22 Flow diagram of VCXO (Source *electronics-notes/articles/electronic-components/quartz-crystal-xtal/TCXO*)

Στο Σχήμα 6.22 φαίνεται το διάγραμμα ροής του VCXO. Το πρώτο και το πιο βασικό τμήμα του VCXO, είναι το Compensation look-up. Το συγκεκριμένο κύκλωμα δέχεται θερμικά δεδομένα από έναν θερμικό αισθητήρα και τα μετατρέπει σε τάση. Στη συνέχεια, προσαρμόζει ένα πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού για να εκφράσει τη θερμοκρασία συναρτήσει της σταθερότητας της ταλάντωσης του κρυστάλλου (για μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πολυώνυμο 5^{ου} βαθμού). Η τάση που δημιουργείται από τα θερμικά δεδομένα, σχηματίζει μια καμπύλη που είναι αντίθετη από την καμπύλη θερμοκρασίας-ταλαντωτή.



Σχήμα 6.23 Διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει της ολίσθησης της συχνότητας (Πηγή *electronics-notes/articles/electronic-components/quartz-crystal-xtal/TCXO*) - Figure 6.23 Temperature over frequency drift (Source *electronics- notes/articles/electronic-components/quartz-crystal-xtal/TCXO*)

Στο Σχήμα 6.23 φαίνεται με κόκκινο χρώμα το πολυώνυμο τρίτου βαθμού που εκφράζει τη θερμοκρασία συναρτήσει της σταθερότητα του ταλαντωτή, ενώ με μπλε χρώμα η καμπύλη της τάσης από τα θερμικά δεδομένα. Στη συνέχεια, η τάση εισάγεται στο κύκλωμα Oscillator pulling. Το κύκλωμα αυτό διορθώνει τις διακυμάνσεις στη συχνότητα του ταλαντωτή που προκαλούνται από τη μεταβολή στη θερμοκρασία, με βάση την τάση που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Το επόμενο κύκλωμα είναι το Crystal oscillator, το οποίο χρησιμοποιείται για την παραγωγή της επιθυμητής συχνότητας. Προκειμένου να αποτραπούν εξωτερικές αλλαγές στην τάση (συνήθως οφείλονται σε θόρυβο που προκαλείται από την παροχή ρεύματος) που προκαλώντας μετατόπιση στη συχνότητα του ταλαντωτή, χρησιμοποιείται ένας Κανονικοποιητής Τάσης (Voltage Regulator). Το τελευταίο τμήμα του TCXO, καλείται Buffer Amplifier. Το συγκεκριμένο τμήμα απομονώνει τον ταλαντωτή από εξωτερικές μεταβολές, το οποίο βελτιώνει τη σταθερότητά του. Ο ταλαντωτής TCXO του LabSat 3 Wideband, παρέχει σταθερότητα στις μεταβολές της θερμοκρασίας κατά ± 0.05 ppm, ενώ η σταθερότητα στη συχνότητα του ταλαντωτή είναι της τάξεως του ± 1 ppm στο πρώτο χρόνο λειτουργίας.

Oven Controller Crystal Oscillator (OCXO)

Κι ο συγκεκριμένος ταλαντωτής ανήκει στους κρυσταλλικούς ταλαντωτές. Η διαφορά του από τον TCXO, είναι ότι χρησιμοποιεί ένα θερμικά απομονωμένο θάλαμο. Ο συγκεκριμένος θάλαμος παρέχει μια ελεγχόμενη θερμοκρασία, προκειμένου να διατηρήσει σταθερή τη θερμοκρασία και κατ' επέκταση, τη συχνότητα του κρυσταλλικού ταλαντωτή. Ο ταλαντωτής OCXO του LabSat 3 Wideband, παρέχει σταθερότητα στις μεταβολές της

θερμοκρασίας κατά ±0.05 ppm, ενώ η σταθερότητα στη συχνότητα του ταλαντωτή είναι της τάξεως του ±0.3 ppm στο πρώτο χρόνο λειτουργίας.

Low Pass Baseband filter

Το κάθε ένα από τα I&Q σήματα, εισάγεται σε ένα Low Pass φίλτρο προκειμένου να αποκοπούν οι υψηλές συχνότητες. Η συγκεκριμένη διαδικασία αποτρέπει την εισροή αρμονικών σημάτων, δηλαδή σήματα τα οποία η συχνότητα που έχουν, είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας ενδιαφέροντος.

Automatic Gain Control (AGC)

Τα πλέον χαμηλόσυχνα σήματα εισάγονται στο κλειστού βρόγχου κύκλωμα AGC. Τα κλειστού βρόγχου κυκλώματα, όπως φανερώνει και το όνομά τους, είναι συστήματα τα οποία ανταποκρίνονται στις αλλαγές και πραγματοποιούν διορθώσεις από μόνα τους. Το συγκεκριμένο κύκλωμα ελέγχει τις αυξήσεις στο πλάτος του εισαγόμενου σήματος, προκειμένου να εξάγεται το επιθυμητό σήμα. Η συγκεκριμένη διαδικασία παρέχει ένα συνεχές πλάτος στο εξαγόμενο σήμα, ώστε τα κυκλώματα που ακολουθούν, να απαιτούν μικρότερο δυναμικό εύρος. Ο LabSat 3 Wideband παρέχει ένα δυναμικό εύρος 72 dB, το οποίο λειτουργεί σε μία περίοδο από 16 έως 256 δείγματα.

Analogue to Digital (ADC)

Τελευταίο στάδιο του εισαγόμενου σήματος, είναι η μετατροπή του σε ψηφιακό σήμα. Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι αυτή που μετατρέπει το συνεχές αναλογικό σήμα, σε μια δυαδική αναπαράσταση. Ο LabSat 3 Wideband περιέχει έναν ADC των 3 bit, δηλαδή μετατρέπει την εισαγόμενη τάση σε έναν δυαδικό αριθμό των 3 bit. Οι συγκεκριμένοι αριθμοί αποθηκεύονται προσωρινά στην FPGA, προτού αποθηκευτούν μόνιμα στη CPU του LabSat. Ο ρυθμός εξαγωγής των δυαδικών αριθμών από τον ADC, φτάνει μέχρι τα 58 MHz.

6.3.2.β Αναπαραγωγή Δεδομένων

Το τμήμα της αναπαραγωγής δεδομένων (Playback), παίρνει τα ψηφιακά δεδομένα από την CPU και τα αποθηκεύει προσωρινά στην FPGA. Από την FPGA εξάγονται τα I&Q δεδομένα και εισάγονται στα μπλοκ αναπαραγωγής. Σκοπός της συγκεκριμένης διαδικασίας, είναι να μετατρέψει τα ψηφιακά δεδομένα, σε αναλογικά σήματα τα οποία θα εισαχθούν στη συνδεδεμένη με τον LabSat, κεραία. Στις παραγράφους που ακολουθούν, περιγράφεται η παραπάνω διαδικασία.

Digital to Analogue (DAC)

Το πρώτο στάδιο των ψηφιακών δεδομένων, είναι να μετατραπούν σε αναλογικά σήματα. Η κάθε μία από τις συνιστώσες I&Q εισάγεται σε ξεχωριστό DAC, προκειμένου να παραχθούν τα αναλογικά σήματα. Η ανάλυση του DAC, είναι συνάρτηση των bit του δυαδικού αριθμού που εισάγεται. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των bit των δυαδικών αριθμών, τόσο μεγαλύτερη είναι η ανάλυση του DAC. Ο LabSat παρέχει δύο DAC, όπου ο κάθε ένας λειτουργεί έως τα 58 MHz.

Local Oscillator

Όπως και στο τμήμα συλλογής δεδομένων, έτσι και εδώ ο ταλαντωτής χρησιμοποιείται για τη μετατόπιση της συχνότητας του αναλογικού σήματος, στην επιθυμητή συχνότητα. Κάθε μία από τις συνιστώσες I&Q εισάγεται στον αντίστοιχο μείκτη και μέσω των ταλαντωτών TCXO και OCXO, προκύπτουν οι φορείς με την επιθυμητή συχνότητα.

Quadrature Modulator

Έχοντας πλέον τη σωστή συχνότητα μετάδοσης, τα σήματα εισάγονται στο διαμορφωτή. Το συγκεκριμένο κύκλωμα, δέχεται τους φορείς I&Q και τους πολλαπλασιάζει (πράξη συνέλιξης) με τα αντίστοιχα δυαδικά δεδομένα. Τα δύο σήματα στη συνέχεια αθροίζονται προκειμένου να προκύψει το τελικό αναλογικό σήμα, με τη ζητούμενη συχνότητα μετάδοσης.

Attenuator

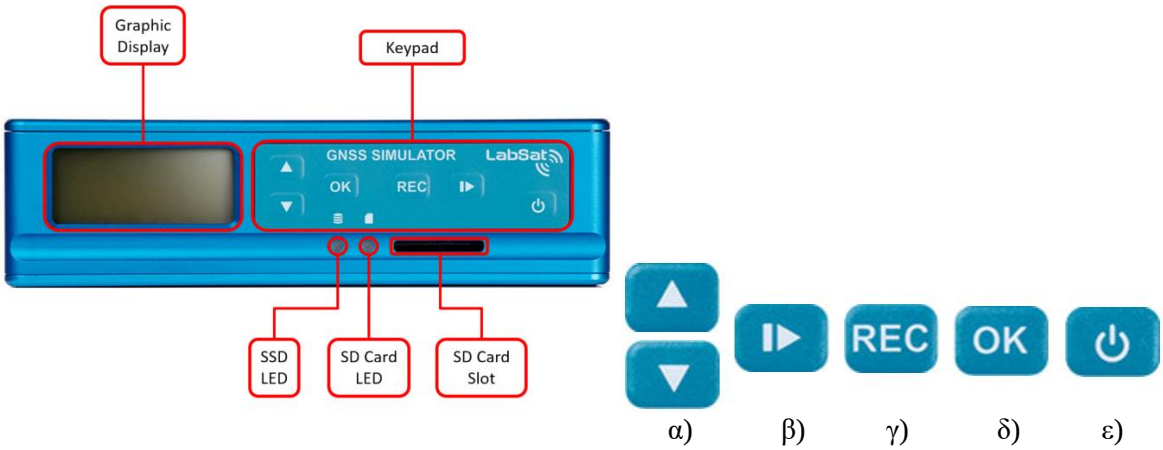
Ο LabSat 3 Wideband παρέχει έναν εξασθενητή ο οποίος χρησιμοποιείται για τη μείωση της έντασης του σήματος. Η προεπιλεγμένη τιμή του εξασθενητή είναι στα 0 dB, ενώ δέχεται ένα εύρος τιμών από +20 dB έως -69 dB.

Τέλος, τα σήματα από τα τρία κανάλια συνδυάζονται και φιλτράρονται, προκειμένου να προκύψουν σήματα εξόδου που αντιστοιχούν στα σήματα που λαμβάνουν οι δέκτες από τα GNSS.

6.3.3 Διεπαφή με το Χρήστη

6.3.3.α Μετωπιαίο Τμήμα του LabSat 3 Wideband

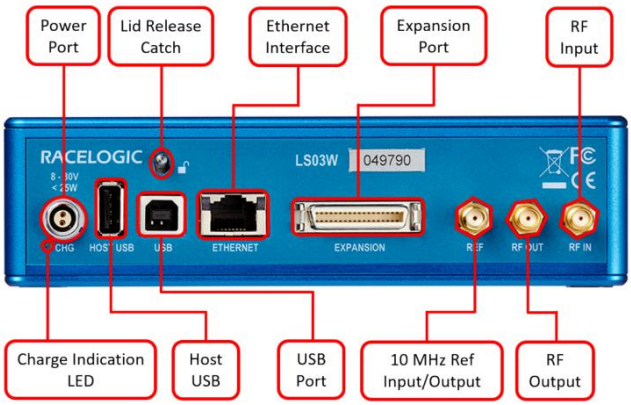
Το μετωπιαίο τμήμα του LabSat 3 Wideband είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι απλό στη χρήση του και να είναι εύκολα μεταφερόμενο. Το μπροστά τμήμα του, αποτελείται από μια οθόνη Backlit LCD Dotmatrix, ένα πληκτρολόγιο, δύο ενδείξεις LED για τον SSD και την SD κάρτα και την υποδοχή της SD.



Σχήμα 6.24 Μπροστινή όψη του LabSat 3 Wideband (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.24 LabSat 3 Wideband Front (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*)

Το τμήμα του πληκτρολογίου αποτελείται από τα 5 πλήκτρα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.24. Η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της συσκευής, επιτυγχάνεται με το πλήκτρο ε). Με το πλήκτρο δ) ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις ενδείξεις που απεικονίζονται στην οθόνη της συσκευής, ενώ με το πλήκτρο α) έχει τη δυνατότητα να μετακινηθεί στο μενού που εμφανίζεται στην οθόνη. Πέρα από την περιήγηση στο μενού, το πλήκτρο α) χρησιμοποιείται και στο στάδιο της συλλογής ή αναπαραγωγής των δεδομένων, δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να αυξομειώσει την ένταση του σήματος (Βλέπε παράγραφο §6.3.5 Συλλογή και Επανάληψη δεδομένων). Τα πλήκτρα β) και γ) αφορούν στη συλλογή και την επανάληψη των δεδομένων αντίστοιχα (Βλέπε παράγραφο §6.3.5 Συλλογή και Επανάληψη δεδομένων).

Στην πίσω όψη του, εντοπίζονται όλες οι θύρες που επιτρέπουν την επικοινωνία του προσομοιωτή με άλλες συσκευές.



Σχήμα 6.25 Πίσω όψη του LabSat 3 Wideband (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.25 LabSat 3 Wideband Rear (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*)

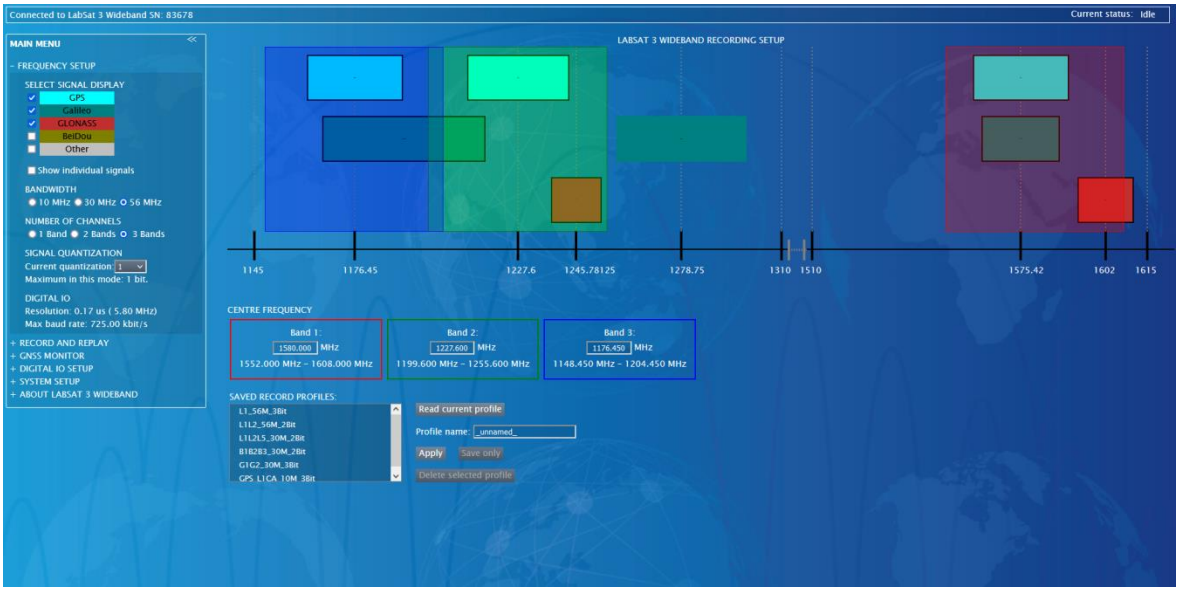
Η ένδειξη Lid Release Catch χρησιμοποιείται για να αφαιρεθεί το πάνω τμήμα του LabSat 3 Wideband και να μπορέσει ο χρήστης να εξάγει τον SSD. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται αναλυτικά οι παραπάνω θύρες, καθώς και η χρησιμότητά τους.

Πίνακας 6.2 Θύρες εισόδου/ εξόδου του LabSat 3 Wideband (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Table 6.2 Input/ Output ports of LabSat 3 Wideband (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*)

Όνομα	**Τύπος θύρας**	**Περιγραφή**
PWR	2 pin LEMO	8-30 V DC παροχή ενέργειας
HOST USB	USB ‘A’	Σύνδεση USB συσκευών και κλειδιών προστασίας WiFi
USB	USB ‘B’	Εξαγωγή NMEA δεδομένων
ETHERNET	RJ45	Μακρινός έλεγχος και σύνδεση
EXPANSION	36 Way MDR	1 PPS, Digital I/O, CAN, RS232
REF	SMA	10MHz είσοδος/ έξοδος ώρας αναφοράς
RF OUT	SMA	Έξοδος RF σήματος
RF IN	SMA	Είσοδος RF σήματος

6.3.3.β Σύνδεση μέσω IP

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί και να αλληλεπιδράσει με τον LabSat, μέσω IP. Εισάγοντας την IP της συγκεκριμένης συσκευής στο ευρετήριο αρχείων (file explorer), ο χρήστης έχει πρόσβαση στα αρχεία του LabSat. Με αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης μπορεί να μεταφέρει τα αρχεία από τον LabSat στο δικό του υπολογιστή, σκληρό δίσκο κτλ. Εισάγοντας την IP σε κάποιο internet browser, ο χρήστης έχει πρόσβαση στο παράθυρο διαχείρισης αρχείων του LabSat. Στο Σχήμα 6.26 φαίνεται το παράθυρο διαχείρισης αρχείων του LabSat.



Σχήμα 6.26 Διαχείριση αρχείων του LabSat 3 Wideband (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.26 LabSat 3 Wideband File Management (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*)

Στο αριστερό πλαίσιο του περιβάλλοντος ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τροποποιήσει τις παραμέτρους του LabSat. Πιο συγκεκριμένα:

- Στο παράθυρο FREQUENCY SETUP ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει τον αριθμό, τη θέση και το εύρος των RF καναλιών κατά τη διαδικασία της συλλογής δεδομένων. Επιπλέον, μπορεί να ορίσει τον αριθμό κβάντωσης των συνιστωσών I&Q, καθώς και να επιλέξει τα σήματα από τα συστήματα εντοπισμού, που θα συλλεχθούν
- Στο παράθυρο RECORD AND REPLAY ο χρήστης μπορεί να ξεκινήσει τη συλλογή των δεδομένων, ορίζοντας το χρονικό διάστημα για το οποίο ο LabSat θα συλλέγει δεδομένα, καθώς και το όνομα του αρχείου. Επιπλέον, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ένα από τα υπάρχοντα αρχεία και να το επαναλάβει στον LabSat, ορίζοντας την αρχή και τη διάρκεια της επανάληψης, ενώ έχει και τη δυνατότητα να επαναλαμβάνει ατέρμονα το σενάριο
- Στο παράθυρο GNSS MONITOR απεικονίζονται τα ιστογράμματα της έντασης των λαμβανόμενων σημάτων της συχνότητας L1, από τα διάφορα συστήματα εντοπισμού. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μειώσει την ένταση των λαμβανόμενων σημάτων σε κάθε κανάλι ξεχωριστά. Επιπλέον, απεικονίζονται οι συντεταγμένες του σημείου, καθώς και ο χρόνος του σεναρίου
- Στο παράθυρο DIGITAL I/O SETUP, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει το ψηφιακό κανάλι, στο οποίο θα αποθηκευτούν τα αντίστοιχα επιπρόσθετα δεδομένα, ενώ μπορεί να ορίσει και τις παραμέτρους του κάθε δεδομένου (Βλέπε παράγραφο §6.3.4 Ψηφιακά κανάλια)
- Στο παράθυρο SYSTEM SETUP εμφανίζονται οι παράμετροι της συγκεκριμένης συσκευής. Σε αυτό το παράθυρο, ο χρήστης μπορεί να ορίσει το ρολόι αναφοράς (TCXO, OXCO, εξωτερικό ρολόι αναφοράς), καθώς και κάποιες παραμέτρους που αφορούν τη συνδεσμολογία του LabSat, την ώρα, την ένταση του ήχου της συσκευής και τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Τέλος, ο χρήστης μπορεί να αφαιρέσει όλα τα δεδομένα του εσωτερικού SSD, με την αντίστοιχη ένδειξη
- Στο παράθυρο ABOUT LABSAT 3 WIDEBAND εμφανίζονται πληροφορίες της συσκευής

6.3.3. γ Σύνδεση μέσω NAS

Ο LabSat 3 Wideband έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί σε έναν NAS, μέσω ενός μεταγωγέα δικτύου (Network Switch). Με τη συγκεκριμένη επιλογή, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει τα δεδομένα του LabSat απευθείας στον NAS, αποδεσμεύοντας μνήμη από τον εσωτερικό του SSD. Για να γίνει η συγκεκριμένη σύνδεση, θα πρέπει να συνδεθεί ο LabSat στο μεταγωγέα δικτύου, μέσω ενός καλωδίου Ethernet. Ο μεταγωγέας θα πρέπει να είσαι συνδεδεμένος με τον NAS και όλο το σύστημα LabSat-Network Switch-NAS θα πρέπει να είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο του χρήστη. Το συγκεκριμένο σύστημα, προσφέρει 40 TB αποθηκευτικού χώρου.

Το αρνητικό της συγκεκριμένης επιλογής, αφορά την καταγραφή των δεδομένων απευθείας στον NAS, καθώς κάποιοι συνδυασμοί εύρους-κβάντωσης-αριθμός καναλιών, υπερβαίνουν τον αριθμό με τον οποίο ο NAS «διαβάζει» και αποθηκεύει τα δεδομένα. Στον Πίνακα 6.3 φαίνεται η διαθεσιμότητα μνήμης, συναρτήσει του εύρους και τον αριθμό των RF καναλιών, καθώς και τον αριθμό των bits στην κβάντωση των συνιστωσών I&Q.

Πίνακας 6.3 Διαθεσιμότητα μνήμης του LabSat 3 Wideband στην απευθείας αποθήκευση δεδομένων στον NAS (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Table 6.3 Memory requirements when recording data directly to NAS (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*)

Εύρος (MHz)	Κβάντωση	Αριθμός Καναλιών	Διαθεσιμότητα μνήμης
10	1	1	
		2	
		3	
	2	1	
		2	
		3	
	3	1	
		2	
		3	
30	1	1	
		2	
		3	
	2	1	
		2	
		3	
	3	1	
		2	
56	1	1	
		2	
		3	
	2	1	
		2	
	3	1	

Οι συνδυασμοί με πράσινο χρώμα, δεν υπερβαίνουν τα όρια μνήμης και μπορούν να αποθηκεύσουν δεδομένα στον NAS χωρίς κάποιο πρόβλημα. Οι συνδυασμοί με κίτρινο χρώμα δεν υπερβαίνουν τα όρια μνήμης, όμως απαιτούν πάνω από το 90% της διαθέσιμης μνήμης. Και σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύσει δεδομένα απευθείας στον NAS. Οι συνδυασμοί με κόκκινο χρώμα υπερβαίνουν τα όρια μνήμης και δεν μπορούν να αποθηκευτούν τα συγκεκριμένα δεδομένα, απευθείας στον NAS. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι οι συγκεκριμένες ενδείξεις αφορούν σενάριο στα οποία αποθηκεύονται μόνο GNSS

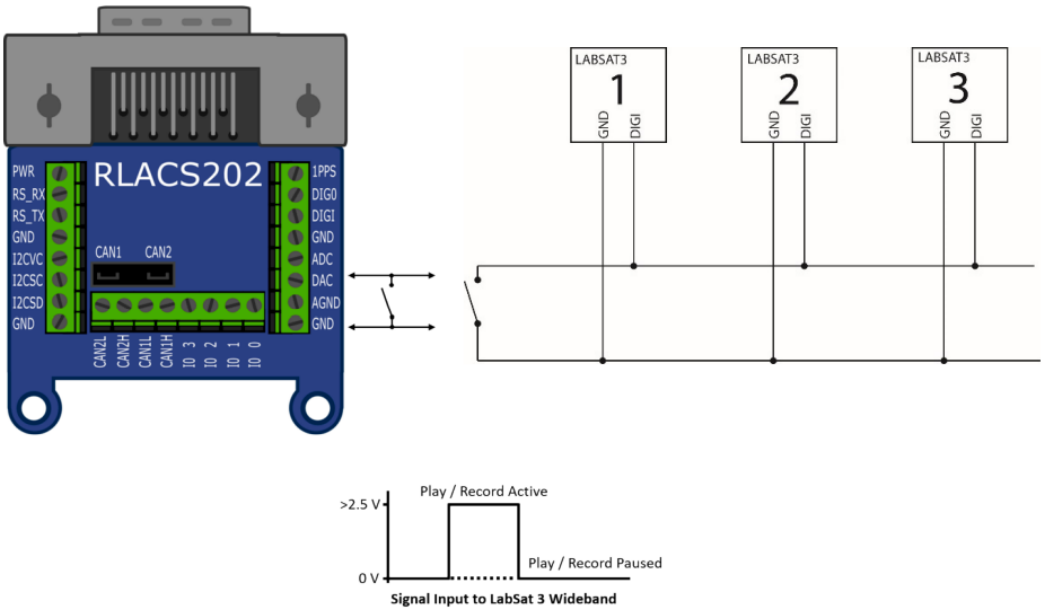
δεδομένα. Σε περίπτωση που αποθηκεύονται και επιπρόσθετα δεδομένα, τα όρια μνήμης δυσχεραίνονται.

6.3.3.δ Σύνδεση με Εξωτερικό Χρόνο Αναφοράς

Ο LabSat 3 Wideband έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί με κάποιο εξωτερικό χρόνο αναφοράς, μέσω της θύρας REF (Βλέπε Σχήμα 6.12). Η συγκεκριμένη επιλογή χρησιμοποιείται για τον συγχρονισμό των δεδομένων του LabSat, εισάγοντας ένα σήμα 10 MHz. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης θα πρέπει να ορίσει ότι η θύρα REF θα δεχτεί ένα εξωτερικό σήμα των 10 MHz, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για το χρόνο αναφοράς. Στην περίπτωση που ο LabSat χρησιμοποιήσει τους εσωτερικούς ταλαντωτές TCXO ή OCXO για το συγχρονισμό των δεδομένων του, τότε ο χρήστης μπορεί να ορίσει ότι η θύρα REF θα εξάγει ένα σήμα των 10 MHz το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί από άλλες συσκευές.

6.3.3.ε Σύνδεση Πολλαπλών LabSat

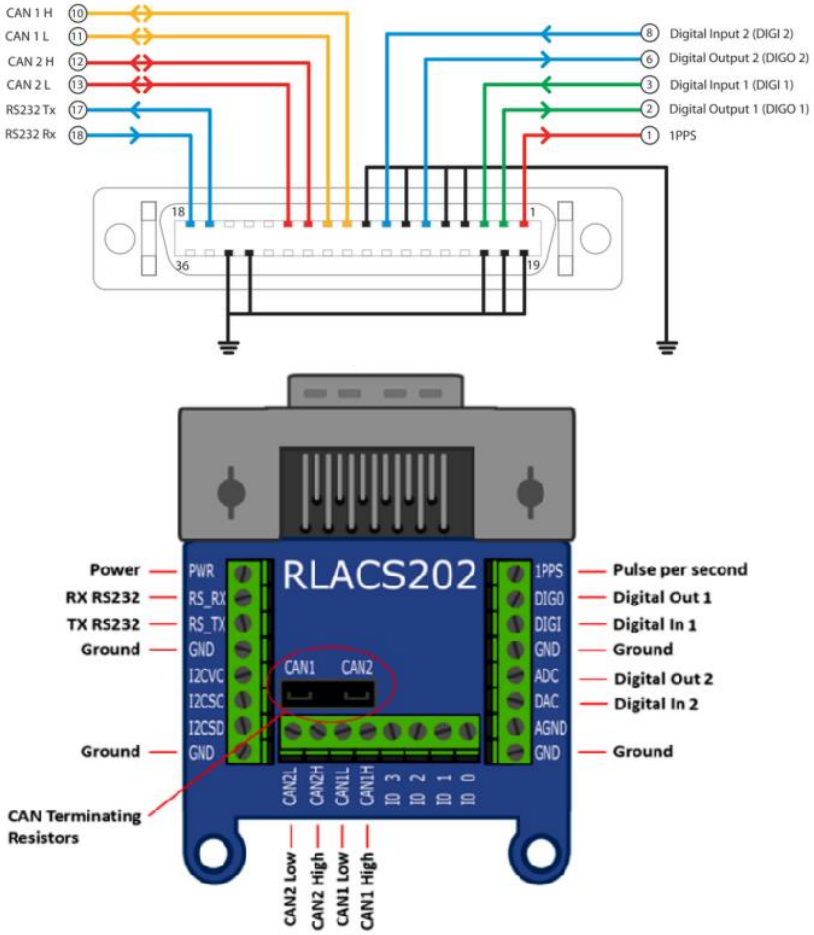
Ο LabSat 3 Wideband έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί με πολλαπλές συσκευές LabSat. Ο συγχρονιστούν όλων των συσκευών, γίνεται μέσω του ακροδέκτη DIGI2 (Βλέπε Σχήμα 6.28). Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζοντας μια μηδενική τάση στον ακροδέκτη DIGI2, σχηματίζεται ένα κλειστό κύκλωμα μεταξύ του ακροδέκτη DIGI2 και GND (Βλέπε Σχήμα 6.28). Πατώντας το κουμπί REC (Βλέπε Σχήμα 6.24) στον κάθε LabSat 3 Wideband, τότε η τάση μετατοπίζεται περίπου στα 5 V, δημιουργώντας ένα ανοιχτό κύκλωμα στο οποίο μεταφέρονται δεδομένα μεταξύ των LabSat.



Σχήμα 6.27 Συγχρονισμός πολλαπλών LabSat 3 Wideband (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.27 Synchronization of multiple LabSat 3 Wideband (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*)

6.3.4 Ψηφιακά κανάλια

Ο LabSat 3 Wideband έχει τη δυνατότητα να λάβει εξωτερικά ψηφιακά δεδομένα, τα οποία συγχρονίζει με το αντίστοιχο αρχείο που περιέχει τα RF δεδομένα. Η σύνδεσή του με τις διάφορες εξωτερικές πηγές ψηφιακών δεδομένων, γίνεται μέσω της θύρας EXPANSION (Βλέπε Σχήμα 6.25).

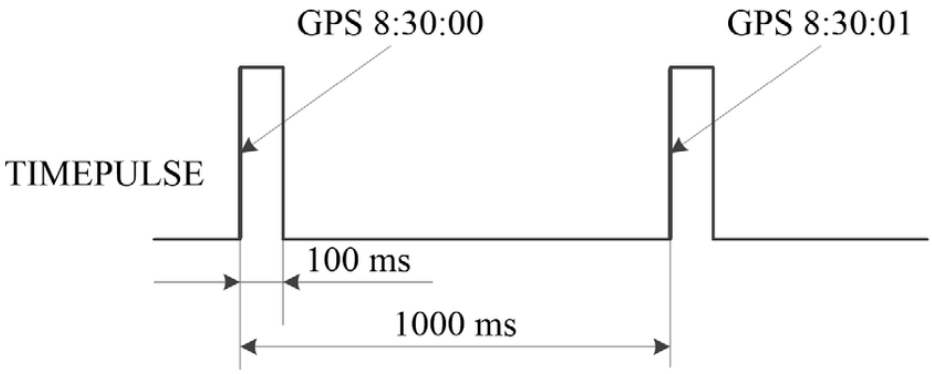


Σχήμα 6.28 Expansion θύρα του LabSat 3 Wideband (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.28 Expansion port of LabSat 3 Wideband (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*)

Τα ψηφιακά κανάλια φέρουν τις ενδείξεις CH1, CH2, CH3 και CH4. Η μέγιστη συχνότητα εισόδου του κάθε καναλιού είναι 1 MHz και το κάθε ένα από τα κανάλια έχει τη δυνατότητα να λάβει δεδομένα από τα εξής πρότυπα: 1PPS, CAN, RS232, DIGI1 και DIGI2.

6.3.4.α Pulse Per Second (PPS)

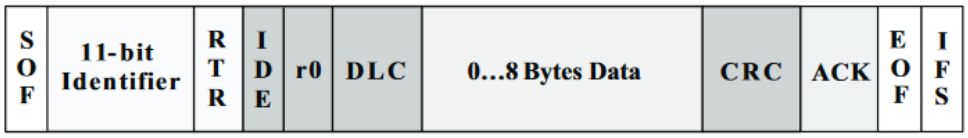
Το PPS [15] αποτελεί ένα πρωτόκολλο συγχρονισμού και χρησιμοποιείται τόσο στα GNSS, όσο και στα IMU. Σκοπός του είναι να παρέχει ένα σήμα με ακριβή χρόνο, ώστε να μπορέσουν να συγχρονιστούν διάφορες συσκευές, σε κοινό χρόνο αναφοράς. Συνήθως, παρέχεται με τη μορφή ενός σήματος TTL [16] στα 3.3V ή 5V. Το συγκεκριμένο σήμα εξάγεται από τον εσωτερικό δέκτη GNSS του LabSat 3 Wideband, εφόσον έχει προσδιοριστεί η θέση και ο χρόνος του. Κατά την επανάληψη του RF σήματος, το αποθηκευμένο PPL σήμα εξάγεται από τον ακροδέκτη 2 (Βλέπε Σχήμα 6.28).



Σχήμα 6.29 Διαγραμματική αναπαράσταση ενός PPS (Πηγή *Research on GPS Timing Remote Synchronization Algorithm in High Altitude Meteorological Data Acquisition System, Μάρτιος 2020*) - Figure 6.29 Output characteristics of PPS (Source *Research on GPS Timing Remote Synchronization Algorithm in High Altitude Meteorological Data Acquisition System, March 2020*)

6.3.4.β Controller Area Network (CAN or CAN BUS)

Το CAN [17] αποτελεί ένα σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνίας το οποίο επιτρέπει τη σύνδεση και αλληλεπίδραση διαφόρων ηλεκτρονικών συστημάτων, που εντοπίζονται σε ένα δίκτυο. Η αλληλεπίδραση των διαφόρων συστημάτων γίνεται με τη χρήση κόμβων, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για το συντονισμό των σημάτων που εξάγονται από τα διάφορα συστήματα. Χρησιμοποιήθηκε και χρησιμοποιείται κυρίως για την επικοινωνία των διαφόρων συστημάτων που εντοπίζονται στα αυτοκίνητα, για τη μείωση της καλωδίωσης. Τα δεδομένα CAN μεταφέρονται μέσω μηνυμάτων, τα οποία αποτελούνται από 11 καρέ (Πρότυπη δομή μηνύματος). Η δομή αυτών των μηνυμάτων φαίνεται στο Σχήμα 6.30.



Σχήμα 6.30 Πρότυπη δομή μηνύματος CAN (Πηγή *Texas Instruments, Introduction to the Controller Area Network (CAN), Αύγουστος 2002*) - Figure 6.30 Standard CAN message (Source *Texas Instruments, Introduction to the Controller Area Network (CAN), August 2002*)

Τα καρέ του μηνύματος [18] περιλαμβάνουν τα:

- SOF (Start of Frame): Η αρχή του μηνύματος η οποίο χρησιμοποιείται για το συγχρονισμό των κόμβων
- 11-bit Identifier: Το πρότυπο αναγνωριστικό σύμβολο CAN, το οποίο δείχνει την προτεραιότητα του μηνύματος (όσο χαμηλότερη η δυαδική αξία του, τόσο μεγαλύτερη προτεραιότητα έχει)
- RTR (Remote Transmission Request): Την αίτηση για απομακρυσμένη μετάδοση, η οποία χρησιμοποιείται για την επικοινωνία και την αλληλεπίδραση των κόμβων. Τα δεδομένα στέλνονται σε όλους τους κόμβους και αξιοποιούνται από τους κόμβους ενδιαφέροντος
- IDE (Identifier Extension): Το εκτεταμένο αναγνωριστικό σύμβολο, το οποίο υποδεικνύει ότι ένα πρότυπο αναγνωριστικό σύμβολο CAN, μεταδίδεται χωρίς επέκταση
- r0 (Reserved bit): Ένα κρατημένο bit, σε περίπτωση μελλοντικής τροποποίησης
- DLC (Data Length Code): Ο κωδικός του μήκους των δεδομένων, ο οποίος περιέχει τον αριθμό των bytes των δεδομένων

- Data: Τα δεδομένα
- CRC (Cyclic Redundancy Check): Τον κυκλικό εφεδρικό έλεγχο, ο οποίος περιέχει το άθροισμα των bit που μεταδόθηκαν και χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό σφαλμάτων
- ACK (ACKNOWLEDGE): Το οποίο χρησιμοποιείται ως ένδειξη για την ακεραιότητα των δεδομένων
- EOF (End of Frame): Το τέλος του μηνύματος
- IFS (Interframe Space): Το οποίο περιέχει το χρόνο που απαιτείται από το χειριστή να μετακινήσει ένα σωστά λαμβανόμενο μήνυμα, στη σωστή θέση

Ο LabSat 3 Wideband, έχει τη δυνατότητα να λάβει δεδομένα από δύο ξεχωριστά δίκτυα CAN (CAN1 και CAN2). Τα δεδομένα CAN συλλέγονται στα κανάλια CH1 και CH2 του LabSat και ο χρήστης έχει δύο επιλογές, ως προς τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να αποθηκευτούν.

DIGITIZE Mode

Ο πρώτος τρόπος φέρει την ένδειξη DIGITZE Mode. Με αυτή την επιλογή τα δεδομένα CAN αποθηκεύονται σε επίπεδο ανεπεξέργαστων bit. Όταν γίνεται η επανάληψη του αρχείου, τότε τα αποθηκευμένα bits εισάγονται στα αποθηκευμένα δεδομένα του GPS και αναδημιουργούνται ακριβώς τα ίδια δεδομένα (με τα αποθηκευμένα δεδομένα CAN) από το LabSat. Η επιλογή DIGITIZE συγχρονίζεται με τα RF σήματα με απόκλιση 60 nanoseconds, ενώ δεν χρειάζεται να οριστεί από το χρήστη, ο ρυθμός με τον οποίο εξάγονται τα δεδομένα CAN (baud rate). Η συγκεκριμένη επιλογή χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου ο χρήστης θέλει να εντοπίσει σφάλματα στους διαύλους (CAN bus-errors), δηλαδή σφάλματα που προκύπτουν από λανθασμένη καλωδίωση, από τη διαφορά του λαμβανόμενου και του μεταδιδόμενου bit, από λανθασμένα μηνύματα μεταξύ των συστημάτων CAN κτλ. Επιπλέον, με τη συγκεκριμένη επιλογή μπορούν να εντοπιστούν σφάλματα που οφείλονται σε συγκρούσεις δεδομένων (data collisions), δηλαδή σφάλματα που προκύπτουν όταν μεταδίδονται ταυτόχρονα σήματα από δύο κόμβους. Το αρνητικό της επιλογής DIGITIZE, είναι ότι μπορεί να οδηγήσει σε αλλοίωση ορισμένων καρέ δεδομένων, αν η επανάληψη του αρχείου, γίνεται σε ένα σύστημα το οποίο εξάγει δεδομένα CAN την ώρα της επανάληψης.

LOG FILE Mode

Ο δεύτερος τρόπος φέρει την ένδειξη LOG FILE Mode. Με αυτή την επιλογή τα δεδομένα CAN αποθηκεύονται απευθείας σε ένα text αρχείο. Η μορφή αυτού του αρχείου, φαίνεται στο Σχήμα 6.31.

```
Labsat3 SN:00323502
DATE:12/06/2014
TIME:13:07
CAN1: 500.00K
CAN2: 500.00K
GNSS: GPS, GLO
CHAN, TIME, ID, DLC, DATA
2      0.060      360  8 0B 70 C8 35 44 60 80 A3
1      0.060      420  8 7B 46 02 84 01 00 3E 1D
2      0.062      620  8 0D 24 02 1B 81 7E 37 02
1      0.063      428  7 00 8E 00 00 37 00 20
2      0.064      200  7 01 F5 01 E2 02 00 00
```

Σχήμα 6.31 LOG FILE δεδομένων CAN (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.31 LOG FILE CAN data (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*)

Στις πρώτες γραμμές του αρχείου εμφανίζονται ο σειριακός αριθμός του LabSat, η ημερομηνία και η ώρα δημιουργίας του αρχείου, ο ρυθμός εξαγωγής των δεδομένων CAN σε baud και τα συστήματα εντοπισμού. Έπειτα, ξεκινάει η καταγραφή των δεδομένων CAN. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν:

- CHAN (Channel): Το κανάλι στο οποίο έχουν αποθηκευτεί τα δεδομένα CAN (CH1 ή CH2)
- TIME: Η χρονοσήμανση των δεδομένων CAN
- ID (Identifier): Το αναγνωριστικό σύμβολο CAN. Σε περίπτωση εκτεταμένων CAN IDs, τότε προστίθεται το γράμμα 'x'
- DLC (Data Length Code): Ο κωδικός του μήκους των δεδομένων, ο οποίος δείχνει τον αριθμό των bytes των δεδομένων CAN
- DATA: Τα δεδομένα CAN

Στο τέλος του text αρχείου, εμφανίζεται το άθροισμα όλων των CAN μηνυμάτων σε κάθε κανάλι. Κατά τη διαδικασία συλλογής των δεδομένων, ο LabSat μεταδίδει αναγνωριστικούς παλμούς, ως ένδειξη ότι λήφθηκαν σωστά τα δεδομένα. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να απενεργοποιήσει τους συγκεκριμένους παλμούς, επιλέγοντας το Silent Record. Το θετικό της επιλογής LOG FILE, είναι ότι ο LabSat μπορεί να δεχθεί απευθείας δεδομένα από αδρανειακούς αισθητήρες ή άλλες συσκευές, οι οποίες εξάγουν δεδομένα CAN. Κατά την επανάληψη των δεδομένων, ο LabSat «διαβάζει» το text αρχείο και μεταδίδει τα δεδομένα CAN, σε χρονικά διαστήματα που υποδεικνύονται από τη στήλη της χρονοσήμανσης και μεταδίδονται, μέσω ενός ενεργού CAN Bus χειριστή. Ο LabSat ελέγχει τη κατάσταση του διαύλου (Bus state) και μεταδίδει μόνο τα δεδομένα που βρίσκονται ανάμεσα από μηνύματα, που προέρχονται από διαφορετικούς κόμβους.

Επιπροσθέτως, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει ένα φίλτρο, προκειμένου να συλλέξει δεδομένα από συγκεκριμένα καρέ των δεδομένων CAN. Στο Σχήμα 6.32 φαίνεται η δομή ενός τέτοιου φίλτρου.

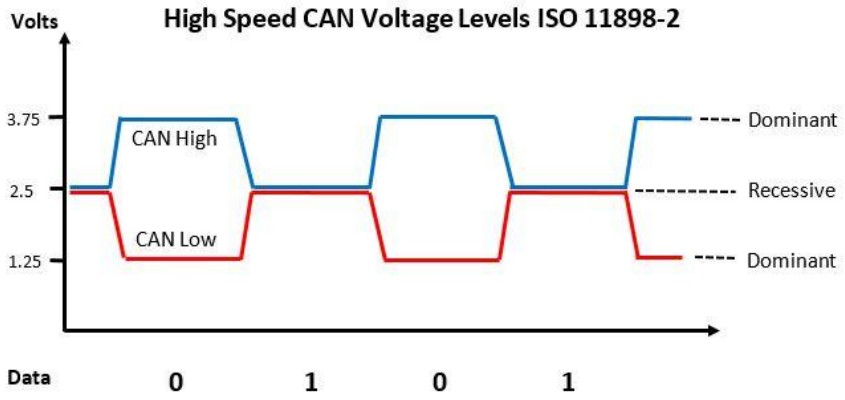
```
1 0x3F1 0x7FF
1 0x7E8 0x7FF
2 0x10751023x 0x1FFFFFFF
1 0x10751023x 0x1FFFFFFF

-- End of configuration file
```

Σχήμα 6.32 Δομή ενός φίλτρου CAN (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.32 Format of CAN frame filter (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*)

Η δομή του φίλτρου που φαίνεται στο Σχήμα 6.19, περιλαμβάνει το κανάλι που θα αποθηκευτούν τα δεδομένα CAN (CH1 ή CH2), το αναγνωριστικό σύμβολο του CAN (CAN IDs) και τη μάσκα. Η μάσκα υποδεικνύει πόσα CAN IDs, από ένα σύνολο CAN IDs, θα αποθηκευτούν. Το κάθε κανάλι έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει δεδομένα CAN, από 1 μέχρι 16 CAN IDs. Για παράδειγμα, η πρώτη γραμμή υποδεικνύει ότι στο κανάλι 1 θα αποθηκευτούν τα δεδομένα του CAN με αναγνωριστικό σύμβολο 0x3F1.

Τέλος, τα δεδομένα CAN μεταδίδονται μέσω των ακροδεκτών 10, 11 για το κανάλι 1 και 12, 13 για το κανάλι 2 (Βλέπε Σχήμα 6.28). Ο λόγος που τα δεδομένα αυτά μεταδίδονται σε 2

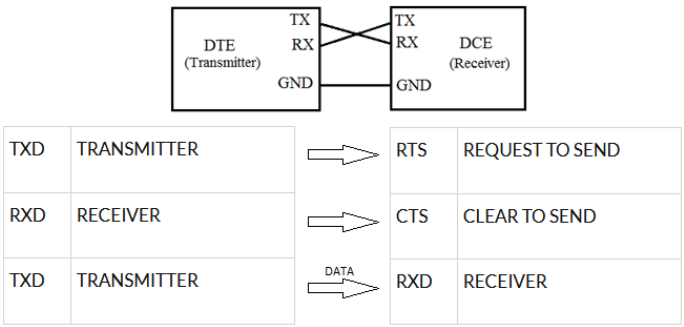
ακροδέκτες, έγκειται στην αρχιτεκτονική των CAN. Τα δύο καλώδια που απαιτούνται για το κανάλι 1, φέρουν τις ενδείξεις CAN1 H (CAN1 High) και CAN1 L (CAN1 Low). Αντίστοιχα, CAN2 H και CAN2 L για το κανάλι 2. Η λειτουργική τάση του CAN είναι στα 2.5V. Οι τάσεις των CAN High και CAN Low, διαμορφώνονται ανάλογα με το bit που μεταδίδουν. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που μεταδίδεται το bit 0, η CAN High τάση παίρνει την τιμή 3.75Volt και η CAN Low 1.25V, δημιουργώντας μια διαφορική τάση των 2.5V μεταξύ των 2 καλωδίων. Η συγκεκριμένη ιδιότητα των CAN, τους επιτρέπει να μην επηρεάζονται από θόρυβο, ηλεκτρικά πεδία κτλ [19].



Σχήμα 6.33 Διαγραμματική αναπαράσταση των τάσεων CAN High και CAN Low (Πηγή *Squarell technology/Knowledgebase/CAN-High--CAN-Low*) - Figure 6.33 CAN Voltage levels (Source *Squarell technology/Knowledgebase/CAN-High--CAN-Low*)

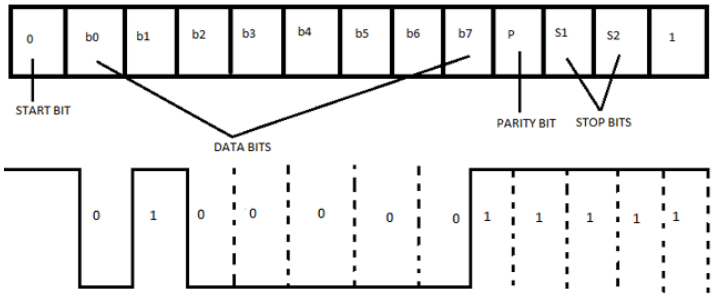
6.3.4.γ Recommended Standard 232 (RS232)

Το RS232 [20] αποτελεί ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας για τη μεταφορά δεδομένων. Όπως και το CAN, το συγκεκριμένο πρότυπο είναι σειριακό, δηλαδή τα δεδομένα μεταφέρονται σε διαδοχικά bits. Ο τρόπος με τον οποίο τα δεδομένα μεταφέρονται με το συγκεκριμένο πρότυπο, φαίνεται στο Σχήμα 6.34.



Σχήμα 6.34 Μεταφορά δεδομένων με το πρωτόκολλο RS232 (Πηγή *CircuitDigest/article/RS232-serial-communication-protocol-basics-specifications*) - Figure 6.34 Data transfer with RS232 protocol (Source *CircuitDigest/article/RS232-serial-communication-protocol-basics-specifications*)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.34, οι συσκευές DTE και DCE περιέχουν τις διόδους TX και RX. Η δίοδος TX στην DTE, αποτελεί την δίοδο όπου θα εξαχθούν τα δεδομένα και η δίοδος RX στην DCE, αποτελεί τη δίοδο όπου θα εισαχθούν τα δεδομένα. Για τη μεταφορά των δεδομένων, η TX παράγει την ένδειξη ώστε να σταλούν τα δεδομένα (RTS) και έπειτα, παράγεται από την RX η ένδειξη ότι τα δεδομένα μπορούν να σταλούν από την TX (CTS). Στη συνέχεια, ξεκινάει η μεταφορά των δεδομένων ανά bit. Η αντίστοιχη διαδικασία, γίνεται και για τη μεταφορά των δεδομένων από τη DCE στη DTE.



Σχήμα 6.35 Δεδομένα RS232 (Πηγή *CircuitDigest/article/RS232-serial-communication-protocol-basics-specifications*) - Figure 6.35 RS232 Data (Source *CircuitDigest/article/RS232-serial-communication-protocol-basics-specifications*)

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.35, η μεταφορά των δεδομένων:

- Ξεκινάει στέλνοντας η DTE ένα αρχικό bit (start bit), το οποίο υποδεικνύει στη DCE ότι τα δεδομένα ξεκινάνε από το επόμενο bit
- Έπειτα, στέλνονται τα δεδομένα
- Ακολουθεί ένα bit για τον έλεγχο των σφαλμάτων (parity bit)
- Τέλος, ακολουθούν τα bits που υποδεικνύουν ότι σταμάτησε η μεταφορά των δεδομένων (stop bits)

Όπως και στο CAN, ο LabSat 3 Wideband παρέχει δύο επιλογές ως προς την αποθήκευση των συγκεκριμένων δεδομένων.

DIGITIZE Mode

Στην επιλογή DIGITIZE, τα δεδομένα αποθηκεύονται σε συγχρονισμό με τα GNSS δεδομένα. Κατά την επανάληψη των δεδομένων, τα δεδομένα αναδημιουργούνται και εξάγονται μέσω μιας μετατόπισης της τάσης, στην έξοδο RS232 του LabSat. Το θετικό της συγκεκριμένης επιλογής, είναι ότι ο χρήστης δεν χρειάζεται να ορίσει το ρυθμό εξαγωγής των δεδομένων (baud rate). Επιπλέον, η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να καταγράψει δυαδικά δεδομένα, τα οποία δεν χρησιμοποιούν το πρότυπο ASCII.

LOG FILE Mode

Η επιλογή LOG FILE, ενδείκνυται για τη λήψη δεδομένων της μορφής ASCII. Στο Σχήμα 6.36 φαίνεται ένα LOG FILE, το οποίο έχει προστεθεί σε ένα NMEA αρχείο.

```
RLLS03W-RP  46966
DATE  09/05/2018
TIME  14:26
baud=9600, data_bits=8, stop_bits=1, parity=none, flow_control=false
[TIME]characters
[00000.303035]$GNGGA,142624.000,5159.3737,N,00059.4843,W,1,17,0.63,104.0,M,47.3,M,,*6E
[00000.381021]$GPGSA,A,3,31,25,14,26,02,23,29,21,16,05,,,1.04,0.63,0.83*04
[00000.446229]$GLGSA,A,3,85,77,68,86,76,75,87,,,,,,1.04,0.63,0.83*14
[00000.505305]$GNRMC,142624.000,A,5159.3737,N,00059.4843,W,0.00,138.31,090518,,,A*67
[00000.581050]$GNVTG,138.31,T,,M,0.00,N,0.00,K,A*2B
[00001.311372]$GNGGA,142625.000,5159.3737,N,00059.4843,W,1,17,0.63,104.0,M,47.3,M,,*6F
[00001.389135]$GPGSA,A,3,31,25,14,26,02,23,29,21,16,05,,,1.04,0.63,0.83*04
[00001.454471]$GLGSA,A,3,85,77,68,86,76,75,87,,,,,,1.04,0.63,0.83*14
```

Σχήμα 6.36 LOG FILE δεδομένων RS232 (Πηγή *LabSat 3 Wideband User Manual*) - Figure 6.36 LOG FILE RS2232 data (Source *LabSat 3 Wideband User Manual*)

Στις πρώτες γραμμές εμφανίζονται ο σειριακός αριθμός του LabSat, η ημερομηνία και η ώρα. Έπειτα, ακολουθεί η γραμμή με τα στοιχεία του LOG FILE. Η γραμμή αυτή περιλαμβάνει:

- το ρυθμό εξαγωγής των δεδομένων (baud rate), ο οποίος πρέπει να οριστεί από το χρήστη
- τον αριθμό των bit των δεδομένων
- την τιμή των stop bits
- την τιμή του parity
- τον έλεγχο ροής των δεδομένων (flow control), ο οποίος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων και
- την χρονοσήμανση των δεδομένων (TIME)

Καθώς συλλέγονται τα δεδομένα, δημιουργείται μια νέα σειρά στο ASCII αρχείο (NMEA στην περίπτωση του Σχήματος 6.36) με διαφορετική χρονοσήμανση. Η σειρά αυτή έχει το ίδιο όνομα με το αντίστοιχό GNSS σήμα (αντίστοιχη γραμμή στο NMEA), όμως περιέχει και την επέκταση <SER>. Η συγκεκριμένη σειρά, είναι αυτή που εισάγεται στο LOG FILE. Η αλλαγή της σειράς γίνεται με τις ενδείξεις CR (Carriage return) και LF (Line feed). Κατά την επανάληψη του αποθηκευμένου αρχείου, τα δεδομένα του LOG FILE επαναλαμβάνονται με βάση τη χρονοσήμανση, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις στο χρόνο που προκύπτει από το αποθηκευμένο και το αναπαραγόμενο αρχείο.

Η τάση των RS232 σημάτων μετατρέπεται από τα ±12V, στα 3V ώστε είναι συμβατή με τον LabSat. Τα δεδομένα του RS232 μεταδίδονται μέσω των ακροδεκτών 17 (RS232 Tx) για τη μετάδοση των δεδομένων και 18 (RS232 Rx) για τη λήψη των δεδομένων (Βλέπε Σχήμα 6.28).

6.3.4.δ DIGITAL IN/ OUT (DIGI/ DIGO)

Τέλος, ο LabSat 3 Wideband έχει την επιλογή να δεχθεί ψηφιακά σήματα μέσω των ακροδεκτών 3 (DIGI1) και 8 (DIGI2), καθώς και να τα εξάγει μέσω των ακροδεκτών 2 (DIGO1) και 6 (DIGO2) (Βλέπε Σχήμα 6.28). Η τάση των ακροδεκτών εισόδου μπορεί να φτάσει μέχρι 12V DC, ενώ το κατώφλι για την αλλαγή των λαμβανόμενων σημάτων είναι 2.5V. Η τάση των ακροδεκτών εξόδου είναι στα 5V.

6.3.5 Συλλογή και Επανάληψη Δεδομένων

Στη συγκεκριμένη παράγραφο γίνεται η περιγραφή της συλλογής και επανάληψης των δεδομένων, συνοψίζοντας όσα αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Η περιγραφή που θα ακολουθήσει αφορά τη συλλογή και επανάληψη δεδομένων GNSS.

6.3.5.α Συλλογή Δεδομένων μέσω Κεραίας GNSS

Για το συγκεκριμένο σενάριο, ο χρήστης χρειάζεται να έχει:

- μία κεραία GNSS μαζί με το καλώδιο SMA
- τον LabSat 3 Wideband
- ένα όχημα (DUT)

Προτού ξεκινήσει την καταγραφή των δεδομένων, ο χρήστης θα πρέπει να έχει τροποποιήσει τις παραμέτρους του LabSat 3 Wideband (αριθμός, θέση και εύρος των RF καναλιών και αριθμός κβάντωσης των I&Q), προκειμένου να συλλέξει τα δεδομένα που χρειάζεται. Στη συνέχεια, θα πρέπει να συνδέσει την κεραία GNSS με τον LabSat 3

Wideband, συνδέοντας το καλώδιο SMA στη θύρα RF IN στο πίσω μέρος του LabSat (Βλέπε Σχήμα 6.25). Έπειτα, πρέπει να τοποθετήσει την κεραία στην οροφή της DUT και να ανοίξει τον LabSat, πατώντας το πλήκτρο ε) (Βλέπε Σχήμα 6.24). Τα δεδομένα του LabSat είναι αρκετά μεγάλα σε όγκο, οπότε προτού ξεκινήσει η καταγραφή των δεδομένων, ο χρήστης θα πρέπει να έχει ελέγξει ότι υπάρχει διαθέσιμος χώρος στον εσωτερικό SSD του LabSat. Αφού ενεργοποιηθεί η συσκευή, ο χρήστης μπορεί να ξεκινήσει την καταγραφή των δεδομένων πατώντας το πλήκτρο REC (Βλέπε Σχήμα 6.24). Πριν ξεκινήσει να κινείται το όχημα, η κεραία θα πρέπει να μείνει στάσιμη σε ανοιχτό ουρανό για κάποια λεπτά, προκειμένου να εντοπίσει και να παρακολουθεί τους διαθέσιμους δορυφόρους. Στη συνέχεια, ο χρήστης μπορεί να ξεκινήσει την καταγραφή της τροχιάς του, ακολουθώντας τη διαδρομή που έχει επιλέξει για το σενάριό του. Έχοντας συλλέξει όλα τα δεδομένα που χρειάζεται, ο χρήστης πρέπει να πατήσει το πλήκτρο REC για να σταματήσει η καταγραφή των δεδομένων. Τη στιγμή που σταματάει η καταγραφή των δεδομένων, εμφανίζονται στο μενού του LabSat δύο αρχεία. Το πρώτο φέρει την κατάληξη .LS3W και περιέχει τα RF δεδομένα των συνιστωσών I&Q (δυαδικό αρχείο). Το δεύτερο αρχείο έχει το ίδιο όνομα με το πρώτο, όμως φέρει την κατάληξη .ini. Το συγκεκριμένο αρχείο, είναι αρχείο διαμόρφωσης και περιέχει τις παραμέτρους του αρχείου .LS3W.

6.3.5.β Συλλογή Δεδομένων μέσω του Λογισμικού SatGen

Σε αυτό το σενάριο, ο χρήστης χρειάζεται να έχει:

- ένα αρχείο τροχιάς στο πρότυπο KML, NMEA ή VBOX. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει κάποιο από τα παραπάνω αρχεία, μπορεί να σχεδιάσει μία τροχιάς μέσω των επιλογών Draw route ή User definer (Βλέπε παράγραφο §6.2.2 Προσομοιωτές Δορυφορικού Σήματος - Λογισμικό SatGen)
- έναν υπολογιστή με εγκατεστημένο το λογισμικό SatGen

Ο χρήστης αφού εισάγει την τροχιά και τροποποιήσει κατάλληλα τις ρυθμίσεις του σεναρίου [Βλέπε παράγραφο §6.2.2.β Ρυθμίσεις Σεναρίου (Scenario Settings)], μπορεί να δημιουργήσει τα αρχεία .LS3W και .ini. Τα αρχεία του SatGen που αφορούν τον LabSat 3 Wideband, εξάγονται ως καθαρό σήμα (δηλαδή το Attenuation είναι ίσο με 0).

6.3.5.γ Επανάληψη Δεδομένων

Για την επανάληψη των δεδομένων, ο χρειάζεται να έχει:

- τα αρχεία .LS3W και .ini στον ίδιο φάκελο
- μία κεραία GNSS μαζί με το καλώδιο SMA
- τον LabSat 3 Wideband

Αφού συνδέσει την κεραία στον LabSat, ο χρήστης ενεργοποιεί τη συσκευή και εισάγεται στο μενού του LabSat. Αφού επιλέξει το αρχείο που θέλει να επαναλάβει, μπορεί να πατήσει το πλήκτρο β) (Βλέπε Σχήμα 6.24) για να ξεκινήσει την επανάληψη του σεναρίου. Με το που ξεκινήσει η επανάληψη του σεναρίου, εμφανίζεται στην οθόνη του LabSat το ιστόγραμμα με την ένταση (C/N_0) των δορυφορικών σημάτων, του συστήματος GPS. Με το πλήκτρο OK (Βλέπε Σχήμα 6.24), ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αλλάξει το σύστημα εντοπισμού που απεικονίζεται στην οθόνη. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μειώσει ή να αυξήσει την ένταση των σημάτων ενός συγκεκριμένου συστήματος εντοπισμού, με τη χρήση του πλήκτρου α) (Βλέπε Σχήμα 6.24). Η αύξηση ή μείωση του σήματος, επιφέρεται σε όλα τα σήματα του ίδιου συστήματος εντοπισμού και όχι σε κάθε δορυφόρο ξεχωριστά. Επιπροσθέτως, ο χρήστης μπορεί να επαναλάβει το σενάριο που τον ενδιαφέρει μέσω του File Management (Βλέπε παράγραφο §6.3.3.β Σύνδεση μέσω IP). Το πλεονέκτημα

της συγκεκριμένης επιλογής, είναι ότι ο χρήστης μπορεί να ορίσει το πόσες φορές θα επαναληφθεί το σενάριο, το πόση ώρα θα διαρκέσει το σενάριο και σε πιο χρονικό σημείο θα ξεκινήσει το σενάριο, κατευθείαν από τον υπολογιστή του.

7. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ

7.1 Σχεδιασμός Πειραματικής Διαδικασίας και Προκαταρκτικές Εργασίες

Το πειραματικό σκέλος της Διπλωματικής Εργασίας, αφορά την αξιολόγηση τροχιάς ενός οχήματος με αξιοποίηση του συστήματος LabSat 3 Wideband, καθώς και του λογισμικού SatGen. Η αξιολόγηση αυτή περιλαμβάνει δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα, έχει ως στόχο την αξιολόγηση της ποιότητας των τροχιών που προκύπτουν από προσομοιωμένα δορυφορικά σήματα. Σε αυτό το τμήμα της πειραματικής διαδικασίας, ελέγχεται η ποιότητα των τροχιών που προκύπτουν από προσομοιωμένα σήματα, καθώς και το κατά πόσο οι διάφορες παραμετροποιήσεις που δέχεται το λογισμικό SatGen, επηρεάζουν την ποιότητα των παραγόμενων τροχιών. Το δεύτερο τμήμα,. αποσκοπεί στο κατά πόσο η διακριτοποιημένη συλλογή και η αναπαραγωγή ενός δορυφορικού σήματος, επηρεάζει την ποιότητα των παραγόμενων τροχιών. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο §6.3.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του LabSat 3 Wideband, η συλλογή και αναπαραγωγή των δορυφορικών σημάτων, γίνεται με τη χρήση τριών ζωνών με συγκεκριμένη κεντρική συχνότητα και συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας, είναι να ελέγξει το κατά πόσο επηρεάζει την ποιότητα της επίλυσης του εντοπισμού, η συγκεκριμένη ιδιότητα των Record and Replay συστημάτων

Από την παραπάνω ανάλυση, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Είναι απαραίτητη η γνώση μίας τροχιάς, η οποία θα έχει προκύψει από πραγματικές μετρήσεις πεδίου, προκειμένου να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά τα σενάρια προσομοίωσης
- Η συλλογή των δεδομένων, για την παραγωγή της παραπάνω τροχιάς, θα πρέπει να γίνει με δύο δέκτες GNSS. Ο πρώτος δέκτης θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή της τροχιάς αναφοράς, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία των προσομοιωμένων δορυφορικών σημάτων, καθώς και για την αξιολόγηση των παραγόμενων τροχιών. Ο δεύτερος δέκτης θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή της τροχιάς που προέκυψε από τις μετρήσεις πεδίου (τροχιά πεδίου), η οποία δεν θα είναι διορθωμένη από τα διάφορα σφάλματα που υπεισέρχονται κατά τη διαδικασία των μετρήσεων. Η τροχιά αυτή θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των προσομοιωμένων τροχιών
- Για να έχει νόημα η σύγκριση των τροχιών που προέκυψαν από τα προσομοιωμένα σήματα, έναντι των τροχιών που προέκυψαν από πραγματικές μετρήσεις πεδίου, θα πρέπει ο δεύτερος δέκτης να χρησιμοποιηθεί και στην αναπαραγωγή των προσομοιωμένων τροχιών, συνδέοντάς τον στο Record and Replay σύστημα της LabSat

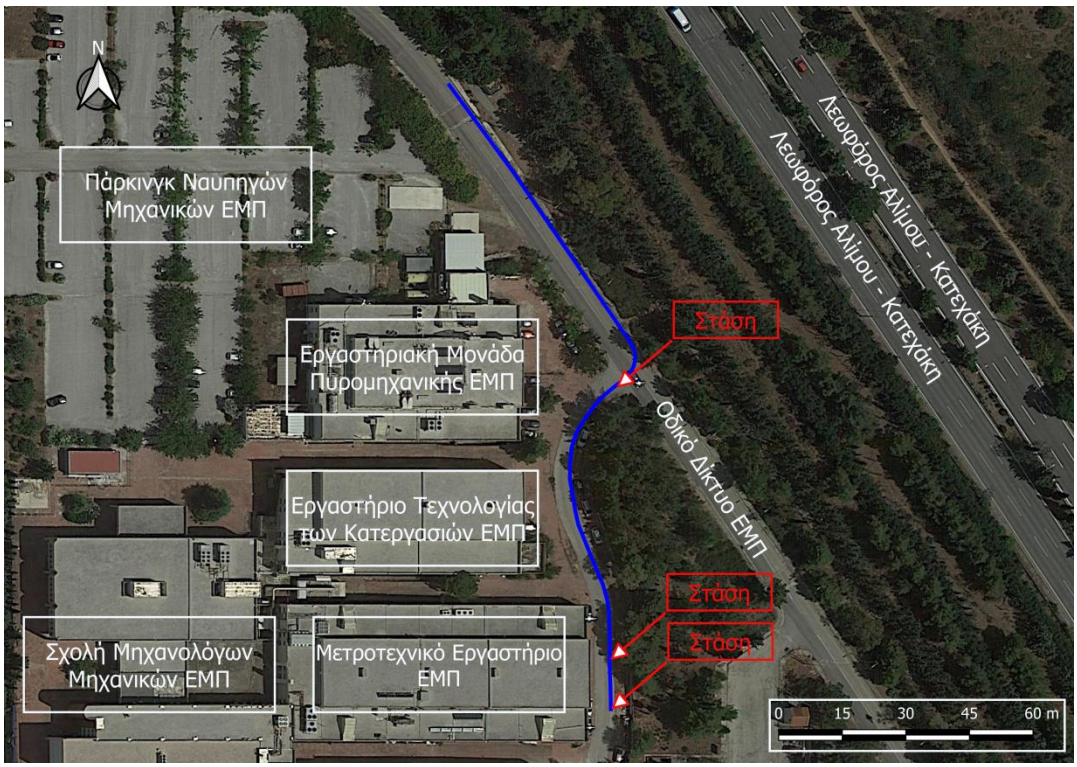
Προκειμένου να δημιουργηθούν οι απαραίτητες τροχιές, υλοποιήθηκε μια σειρά μετρήσεων πεδίου για τη συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων στην Πολυτεχνειούπολη στο Δήμο Ζωγράφου, στις 21 Μαΐου του 2022. Η συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία έγινε στα πλαίσια του έργου RobPos4VApp [21]. Το συγκεκριμένο έργο αποσκοπεί στη δημιουργία ενός μεθοδολογικού πλαισίου εύρωστου συνεργατικού εντοπισμού DGNSS/ INS χαμηλού κόστους, για κρίσιμες εφαρμογές συνδεδεμένων οχημάτων. Το πείραμα που σχεδιάστηκε στα πλαίσια του παραπάνω έργου, αποσκοπούσε στην απόκτηση δεδομένων

GNSS, INS καθώς και άλλων αισθητήρων, τα οποία θα αξιοποιηθούν για το συνεργατικό εντοπισμό της τροχιάς ελέγχου.

Καθοριστικός παράγοντας για την άντληση ορθολογικών συμπερασμάτων, ήταν ο σχεδιασμός της τροχιάς της DUT. Η συγκεκριμένη τροχιά θα πρέπει να παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά, με τροχιές που αντιστοιχούν σε πλοήγηση οχημάτων σε αστικό περιβάλλον. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι:

i. Η περιορισμένη ορατότητα των διαθέσιμων δορυφόρων από τους δέκτες GNSS, λόγω των κτιρίων που εμφανίζονται σε ένα αστικό περιβάλλον, το οποίο συνεπάγεται και την έντονη επίδραση των σφαλμάτων που οφείλονται στις πολυανακλάσεις (multipath) των δορυφορικών σημάτων
ii. Η πολυπλοκότητά της τροχιάς ως προς τη δυναμική που αναπτύσσεται κατά την κίνηση στο οδικό δίκτυο. Θα πρέπει να εντοπίζονται χρονικά διαστήματα στα οποία το όχημα μεταβαίνει από κίνηση σε ακινησία και αντίθετα, προκειμένου να είναι πιο αντιπροσωπευτική και ρεαλιστική, ενώ δεν χρειάζεται να αναπτύσσονται μεγάλες ταχύτητες
iii. Να μην εντοπίζονται μεγάλες ευθυγραμμίες, καθώς δεν θα αντιπροσωπεύει κατάλληλα την κίνηση του οχήματος σε αστικό περιβάλλον
iv. Να υπάρχει τμήμα της τροχιάς που να βρίσκεται σε λωρίδα διπλής διέλευσης, ώστε να υπάρχει και φυσικό όριο στα σφάλματα της τροχιάς

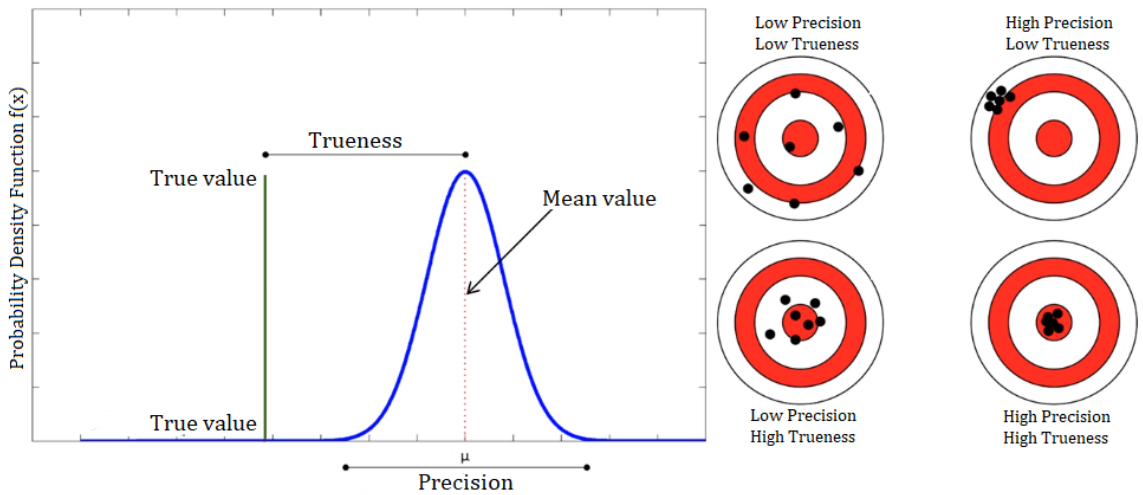
Καθώς τα αρχεία του SatGen είναι αρκετά μεγάλα σε όγκο, εισήχθηκε και μία δέσμευση ως προς το μήκος της τροχιάς, προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα στη διαθεσιμότητα της μνήμης του LabSat 3 Wideband. Με βάση τα παραπάνω, η τροχιά που σχεδιάστηκε για το πειραματικό κομμάτι της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας φαίνεται στο Σχήμα 7.1.



Σχήμα 7.1 Πλάνο της τροχιά του οχήματος (Πηγή *QGIS/ Google Maps*) - Figure 7.1 Plan of vehicle's trajectory (Source *QGIS/ Google Maps*)

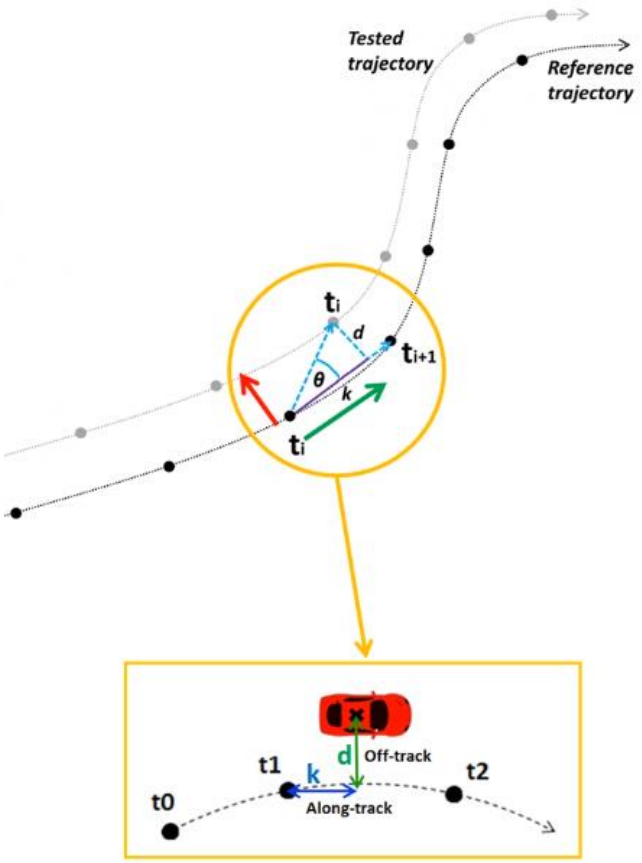
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1, η συγκεκριμένη τροχιά περιλαμβάνει 3 χρονικά διαστήματα ακινησίας, δεν εμφανίζει μεγάλες ευθυγραμμίες και κείται σε δρόμο διπλής διέλευσης. Στο ανατολικό τμήμα της τροχιάς, εντοπίζονται υψηλά δέντρα, ενώ στο δυτικό τμήμα της, εντοπίζονται κτίρια της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, περιορίζοντας την ορατότητα του δέκτη στους διαθέσιμους δορυφόρους, ενώ το μήκος της είναι στα 170 m.

Η αξιολόγηση της συγκεκριμένης τροχιάς είναι πολυπαραμετρική. Αρχικά, εξετάζονται κάποια μέτρα ποιότητας που αφορούν στη συλλογή των δεδομένων κατά την πειραματική διαδικασία, όπως το πλήθος των διαθέσιμων δορυφόρων και το δείκτη DOP. Στην συνέχεια, εξετάζεται η ποιότητα των παραγόμενων τροχιών, με βάση την ακρίβεια του δέκτη. Ως ακρίβεια (precision), ορίζεται το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης των μετρήσεων και περιγράφει την εσωτερική ακρίβεια του δέκτη, δηλαδή την διαφορά της κάθε παρατήρησης, από τη μέση τιμή των παρατηρήσεων. Το τελικό τμήμα της αξιολόγησης, περιλαμβάνει τη σύγκριση των προσομοιωμένων τροχιών, με την τροχιά αναφοράς. Για τη συγκεκριμένη σύγκριση, χρησιμοποιείται ως δείκτης η ορθότητα (trueness) της τροχιάς, δηλαδή η διαφορά της εκάστοτε παρατήρησης από την αληθή τιμή. Ως αληθή τιμή της παρατήρησης (x_i^s, y_i^s) της προσομοιωμένης τροχιάς τη χρονική i, θεωρείται η θέση (x_i^r, y_i^r) της τροχιάς αναφοράς τη χρονική στιγμή i.



Σχήμα 7.2 Απεικόνιση της ακρίβειας έναντι της ορθότητας (Πηγή *Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας και Πλοήγησης, ΕΜΠ*) - Figure 7.2 Illustration of precision versus trueness (Source *Satellite Geodesy and Navigation Notes, NTUA*))

Η ορθότητα της τροχιάς καταμερίστηκε σε δύο συνιστώσες, προκειμένου να είναι καλύτερη η κατανόησή της,. Η πρώτη συνιστώσα καλείται σφάλμα κατά μήκος της τροχιάς (along track error) και εκφράζει την αποχή της προσομοιωμένης τροχιάς από την τροχιά αναφοράς, κατά τη διεύθυνση της κίνησης. Η δεύτερη συνιστώσα καλείται σφάλμα εγκάρσια της τροχιάς (off track error) και εκφράζει την αποχή της προσομοιωμένης τροχιάς, στον κάθετο από τη διεύθυνση της κίνησης, άξονα.



Σχήμα 7.3 Σφάλμα κατά μήκος και εγκάρσια της τροχιάς (Πηγή *Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας και Πλοήγησης, ΕΜΠ*) - Figure 7.3 Along and off track errors (Source *Satellite Geodesy and Navigation Notes, NTUA*)

Στο Σχήμα 7.3 φαίνονται οι δύο συνιστώσες της ορθότητας της προσομοιωμένης τροχιάς. Το σφάλμα κατά μήκος της τροχιάς θεωρείται θετικό, όταν το σημείο της προσομοιωμένης τροχιάς τη χρονική στιγμή *i*, είναι έμπροσθεν του σημείου της τροχιάς αναφοράς, την ίδια χρονική στιγμή. Το σφάλμα εγκάρσια της τροχιάς θεωρείται θετικό, όταν το σημείο της προσομοιωμένης τροχιάς τη χρονική στιγμή *i*, είναι αριστερά του σημείου της τροχιάς αναφοράς, την ίδια χρονική στιγμή. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη σωστή εξαγωγή των συνιστωσών της ορθότητας, είναι ο συγχρονισμός των δύο τροχιών.

Εκτός του συστήματος LabSat 3 Wideband και του λογισμικού SatGen, ένας σημαντικός παράγοντας για την αξιολόγηση της τροχιάς, είναι ο δέκτης που θα χρησιμοποιηθεί για την επανάληψη των δεδομένων. Η χρήση ενός μόνο δέκτη δεν ενδείκνυται, καθώς είναι αρκετά δύσκολο να επιλεγεί ένας δέκτης, του οποίου τα αποτελέσματα να είναι αντιπροσωπευτικά για όλους του δέκτες. Αναλόγως την αρχιτεκτονική και τον κατασκευαστή του δέκτη, διαφοροποιούνται αρκετοί παράγοντες, οι οποίοι επιδρούν με διαφορετικό τρόπο στην επίλυση του εντοπισμού. Για την πληρέστερη αξιολόγηση των προσομοιωμένων τροχιών, η επανάληψή τους, έγινε σε δύο δέκτες GNSS διαφορετικής απόδοσης, προκειμένου να είναι πιο αντιπροσωπευτικά και ακέραια τα αποτελέσματα, αλλά και να ελεγχθεί αν οι διάφορες παραμετροποιήσεις του SatGen, επιδρούν με παρόμοιο τρόπο στους δύο δέκτες.

7.2 Πειραματικός Εξοπλισμός και Συλλογή Δεδομένων

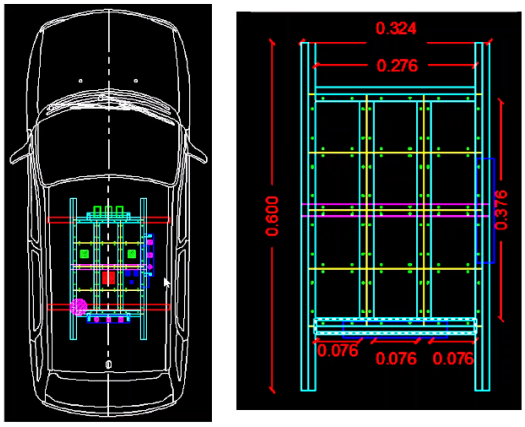
7.2.1 Επισκόπηση Πειραματικού Εξοπλισμού

Η πειραματική διαδικασία περιλάμβανε συμμετοχή 7 οχημάτων, εκ των οποίων το ένα αναφέρεται ως Target Vehicle (DUT) και τα υπόλοιπα 6, αναφέρονται ως Neighbor Vehicle. Στα Neighbor Vehicle ήταν εγκατεστημένος ένας GNSS δέκτης ο οποίος κατέγραφε τη θέση του οχήματος, ενώ σε κάποια από αυτά, ήταν εγκατεστημένη και μία μονάδα IMU. Στο Target Vehicle ήταν εγκατεστημένη μία σειρά GNSS δεκτών, μονάδων IMU, ένας αισθητήρας LiDAR, 3 κινητά τηλέφωνα με δυνατότητα παρατήρησης της φάσης, καθώς και το Record and Replay σύστημα της LabSat. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα οχήματα του πειράματος.

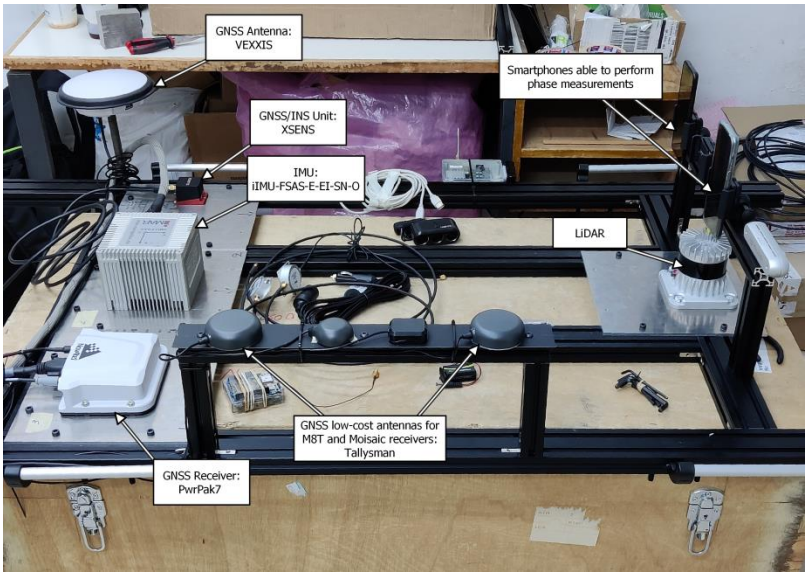
Πίνακας 7.1 Εξοπλισμός για τις μετρήσεις υπαίθρου του έργου RobPos4VApp - Table 7.1 Equipment for field measurements of RobPos4VApp experiment

Όχημα	**Αισθητήρες**		
	GNSS Δέκτες	**IMU**	**Record and Replay**
Target Vehicle (DUT)	PwrPak7 Mosaic M8P M8T Adafruit	iIMU-FSAS MTi-680G	LabSat 3 Wideband
Neighbor Vehicle A	Mosaic	-	-
Neighbor Vehicle B	M8P	Spatial	-
Neighbor Vehicle C	M8T	MTi-G-700	-
Neighbor Vehicle D	M8T	-	-
Neighbor Vehicle E	F9P	-	-
Neighbor Vehicle F	F9P	-	-

Για την τοποθέτηση των αισθητήρων στο Target Vehicle, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια σχάρα αλουμινίου, στην οποία τοποθετήθηκαν οι παραπάνω αισθητήρες. Ο λόγος που επιλέχθηκε το αλουμίνιο, ήταν για τη μείωση του βάρους της σχάρας. Απαραίτητη ήταν η μέτρηση των εκκεντροτήτων των αισθητήρων (lever arms), προκειμένου να μπορούν να αναχθούν όλες οι μετρήσεις σε κοινό σημείο αναφοράς (body frame). Στο Σχήμα 7.4 φαίνονται οι διαστάσεις της σχάρας αλουμινίου, στην οποία τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες.



Σχήμα 7.4 Διαστάσεις σχάρας αλουμινίου για το Target Vehicle (Πηγή *RobPos4VApp*) - Figure 7.4 Dimensions of aluminium roof rack for Target Vehicle (Source *RobPos4VApp*)



Σχήμα 7.5 Πλατφόρμα αισθητήρων (Πηγή *RobPos4VApp*) - Figure 7.5 Sensors Platform (Source *RobPos4VApp*)

Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα από το Target Vehicle για την παραγωγή των απαραίτητων τροχιών. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν:

- οι αισθητήρες PwrPak7 και iIMU-FSAS για παραγωγή της τροχιάς αναφοράς,
- ο δέκτης M8T για την παραγωγή της τροχιάς πεδίου
- οι δέκτες M8T και Mosaic σε συνδυασμό με τον LabSat 3 Wideband για την επανάληψη των προσομοιωμένων σημάτων

Επιπροσθέτως, η κεραία του δέκτη M8T η οποία ήταν εγκατεστημένη στο Target Vehicle, ήταν συνδεδεμένη με τον LabSat 3 Wideband για την καταγραφή της τροχιάς του οχήματος σε πραγματικό χρόνο. Στην παράγραφο που ακολουθεί, γίνεται η περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών των δεκτών GNSS που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

7.2.2 Δέκτης M8T

Σχήμα 7.6 Δέκτης M8T και Evaluation Kit M8T (Πηγή *EVK-M8T User Guide*) - Figure 7.6 GNSS receiver M8T and Evaluation Kit M8T (Source *EVK-M8T User Guide*)

Ο δέκτης M8T κατασκευάζεται από την εταιρία ublox και ανήκει στην κατηγορία των δεκτών GNSS χαμηλού κόστους. Έχει δυνατότητα καταγραφής μίας συχνότητας από τα συστήματα GPS, QZSS, GLONASS, BeiDou και Galileo. Ωστόσο, έχει περιορισμένη δυνατότητα στην ταυτόχρονη καταγραφή πολλαπλών συστημάτων εντοπισμού. Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται οι διάφοροι συνδυασμοί για την ταυτόχρονη καταγραφή συστημάτων εντοπισμού.

Πίνακας 7.2 Επιτρεπτοί συνδυασμοί για την καταγραφή πολλαπλών συστημάτων GNSS του δέκτη M8T (Πηγή *NEO/ LEA M8T Data Sheet*) - Table 7.2 Permissible GNSS combination of EVK-M8T (Source *NEO/ LEA M8T Data Sheet*)

GPS	Galileo	GLONASS	BeiDou
•	•	-	-
•	•	•	-
•	•	-	•
•	-	•	-
•	-	-	•
-	•	•	-
-	•	-	•
-	-	•	•

Ο συγκεκριμένος δέκτης προσφέρει μια οριζοντιογραφική ακρίβεια της τάξης των 2.5 m, ενώ η ακρίβεια στην καταγραφή της ταχύτητας, είναι της τάξης των 0.05 m/s. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, τον καθιστούν αντιπροσωπευτικό δέκτη στην κατηγορία χαμηλού κόστους, γι αυτό κι επιλέχθηκε για την παραγωγή της τροχιάς πεδίου. Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη M8T.

Πίνακας 7.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη M8T (Πηγή *NEO/ LEA M8T Data Sheet*) - Table 7.3 Specifications of M8T GNSS receiver (Source *NEO/ LEA M8T Data Sheet*)

GNSS Signals	GPS L1 C/A, SBAS L1 C/A, QZSS L1 C/A, QZSS L1 SAIF, GLONASS L1 C/A, BeiDou B1, Galileo E1B/C						
Channels	72						
	GNSS	**GPS & GLONASS**	**GPS & BeiDou**	**GPS**	**GLONASS**	**BeiDou**	**Galileo**
Time-To-First-Fix (sec)	Cold Start	25	28	29	30	34	45
	Aided Start	2	2	2	2	3	7
	Hot Start	1	1	1	1	1	1
Sensitivity (dBm)	Tracking & Navigation	-167	-166	-166	-166	-159	-159
	Aided Acquisition	-157	-157	-157	-151	-146	-142
	Reacquisition	-160	-160	-160	-156	-156	-153
	Cold Start	-148	-148	-148	-145	-143	-138
	Hot Start	-160	-160	-160	-156	-155	-151
Horizontal Position Accuracy	Standalone	2.5 m	2.5 m	2.5 m	4.0 m	3.0 m	TBC
	SBAS	2.0 m	2.0 m	2.0 m	N/A	N/A	N/A
Velocity Accuracy		0.05 m/s	0.05 m/s	0.05 m/s	0.1 m/s	0.1 m/s	0.1 m/s
Heading Accuracy		0.3°	0.3°	0.3°	0.4°	0.5°	0.5°
Time Accuracy	Clear Sky	≤ 20 ns					
	Indoor	≤ 500 ns					
Max Update Rate		4 Hz	4 Hz	10 Hz	10 Hz	10 Hz	10 Hz
Dimensions	M8T	17.0 x 22.4 x 2.4 mm					
	EVK-M8T	105 x 64 x 26 mm					

7.2.3 Δέκτης Mosaic-X5

Σχήμα 7.7 Δέκτης Mosaic-X5 και Evaluation Kit Moscaic-X5 (Πηγή *Mosaic-X5 Data Sheet*) - Figure 7.7 GNSS receiver Mosaic-X5 and Evaluation Kit Moscaic-X5 (Source *Mosaic-X5 Data Sheet*)

Ο δέκτης Mosaic-X5 κατασκευάζεται από την εταιρία Septentrio και ανήκει στην κατηγορία δεκτών GNSS υψηλού κόστους. Έχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης καταγραφής πολλαπλών σημάτων, από όλα τα διαθέσιμα συστήματα εντοπισμού. Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται τα συστήματα εντοπισμού με τις συχνότητες μετάδοσης που μπορεί να λάβει ο δέκτης Mosaic-X5.

Πίνακας 7.4 Διαθέσιμα σήματα για το δέκτη Mosaic-X5 (Πηγή *Mosaic-X5 Data Sheet*) - Table 7.4 Available signals for Mosaic-X5 GNSS receiver (Source *Mosaic-X5 Data Sheet*)

GNSS	**Available Signals**
GPS	L1 C/A, L2 P(Y), L2C, L2P, L5
GLONASS	L1 C/A, L2 C/A, L2P, L3 CDMA
Galileo	E1, E5a, E5b, E5 AltBOC
BeiDou	B1I, B1C, B2a, B2I, B3
QZSS	L1 C/A, L2C, L5
NavIC	L5
SBAS	EGNOS, WAAS, GAGAN, MSAS, SDCM (L1, L5)

Ο συγκεκριμένος δέκτης προσφέρει μια οριζοντιογραφική ακρίβεια της τάξης των 1.2 m, ενώ η ακρίβεια στην καταγραφή της ταχύτητας είναι της τάξης 0.03 m/s και χρησιμοποιήθηκε στο στάδιο της επανάληψης των προσομοιωμένων σημάτων, προκειμένου να εντοπιστούν τυχόν διαφορές μεταξύ των δύο δεκτών στις διάφορες παραμετροποιήσεις του SatGen. Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη Mosaic-X5.

Πίνακας 7.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη Mosaic-X5 (Πηγή *Mosaic-X5 Data Sheet*) - Table 7.5 Specification of Mosaic-X5 GNSS receiver (Source *Mosaic-X5 Data Sheet*)

Channels		**448**
Time-To-First-Fix (sec)	Cold Start	< 45
	Hot Start	< 2
	Re-acquisition	< 1
Horizontal Position Accuracy	Standalone	1.2 m
	SBAS	0.6 m
	DGNSS	0.4 m
	RTK	0.6 cm + 0.5 ppm
Velocity Accuracy	Standalone	0.03 m/s
	RTK	0.01 m/s + 1ppm
Time Accuracy	< 20 ns	
Max Update Rate	100 Hz	
Dimensions	31 x 31 x 4 mm	

Ο συγκεκριμένος δέκτης περιλαμβάνει κι ένα παράθυρο διεπαφής, από το οποίο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τον παραμετροποιήσει, να παρακολουθήσει τα λαμβανόμενα σήματα, καθώς και να εξάγει τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από το δέκτη. Η σύνδεση στο συγκεκριμένο παράθυρο, γίνεται με χρήση της IP του δέκτη.

7.2.4 Ολοκληρωμένο Σύστημα Εντοπισμού SPAN

7.2.4.α Περιγραφή του συστήματος SPAN

Το σύστημα εντοπισμού SPAN αποτελείται από μία κεραίες GNSS η οποία έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί μετρήσεις RTK και από μία αδρανειακή μονάδα ακριβείας. Ο σταθμός Base που χρησιμοποιήθηκε, ήταν τοποθετημένος σε σημείο γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων, με εξαναγκασμένη κέντρωση στο δυτικό τμήμα της ταράτσας του κτιρίου Λαμπαδαρίου της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής, προκειμένου να παρέχει διορθώσεις. Ο δέκτης Rover τοποθετήθηκε στο Target Vehicle, προκειμένου να καταγράψει τη τροχιά του οχήματος, λαμβάνοντας διορθώσεις από το Base. Ο συγκεκριμένος δέκτης μαζί με την αδρανειακή μονάδα ακριβείας, ενσωματώθηκαν στο σύστημα συγχρονισμού SPAN, προκειμένου να προκύψει η τροχιά αναφοράς του οχήματος. Στις επόμενες παραγράφους, θα αναφερθούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη που ήταν τοποθετημένος στο Target Vehicle (Rover), του σταθμού Base, καθώς και της αδρανειακής μονάδας.

7.2.4.β Σταθμός Βάσης – Δέκτης Trimble R9S

Σχήμα 7.8 Δέκτης Trimble R9S (Πηγή *FrontierPrecision/Products/Trimble R9S*) - Figure 7.8 Trimble R9S GNSS receiver (Source *FrontierPrecision/Products/Trimble R9S*)

Ο δέκτης Trimble R9S κατασκευάζεται από την εταιρία Trimble και χρησιμοποιείται για εφαρμογές κινηματικού εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο. Παρέχει δυνατότητα ταυτόχρονης παρακολούθησης των συστημάτων εντοπισμού GPS, GLONASS, Galileo και BeiDou, χρησιμοποιώντας πληθώρα σημάτων από το εκάστοτε σύστημα εντοπισμού. Τα διαθέσιμα σήματα που μπορεί λάβει ο δέκτης, καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του, φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 7.6 Διαθέσιμα σήματα για το δέκτη Trimble R9S (Πηγή *Trimble R9S Data Sheet*) - Table 7.6 Available signals for Trimble R9S GNSS receiver GNSS receiver (Source *Trimble R9S Data Sheet*)

GNSS	Available Signals
GPS	L1 C/A, L2C, L2E, L5
GLONASS	L1 C/A, L2 C/A, L1P, L2P, L3
Galileo	E1, E5a, E5b, E5 AltBOC
BeiDou	B1, B2
SBAS	QZSS, EGNOS, WAAS, GAGAN, MSAS

Πίνακας 7.7 Τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη Trimble R9S (Πηγή *Trimble R9S Data Sheet*) - Table 7.7 Specifications of Trimble R9S GNSS receiver (Source *Trimble R9S Data Sheet*)

Channels		**440**	
Horizontal Position Accuracy	Static Positioning	High Accuracy Static	3 mm + 0.1 ppm
		Static – Fast Static	3 mm + 0.5 ppm
	RTK	Single Baseline < 30 km	8 mm + 1 ppm
		Network RTK	8 mm + 0.5 ppm
	Code DGNSS	0.25 m + 1 ppm	
Update Rate	1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz and 20 Hz		
Dimensions	240 x 120 x 50 mm		

7.2.4.γ Σταθμός Rover – Δέκτης PwrPak7

Σχήμα 7.9 Δέκτης PwrPak7 (Πηγή *NavtechGPS/PwPak7*) - Figure 7.9 PwrPak7 GNSS receiver (Source *NavtechGPS/PwPak7*)

Ο δέκτης PwrPak7 κατασκευάζεται από την εταιρία Novatel και αποτελεί τη μονάδα συγχρονισμού των μετρήσεων GNSS και INS. Η αδρανειακή μονάδα συνδέεται στο PwrPak7 μέσω της σειριακής θύρας (RS232), προκειμένου να εισαχθούν οι μετρήσεις της στο σύστημα συγχρονισμού και στη συνέχεια, οι παρατηρήσεις της IMU συγχρονίζονται με τις παρατηρήσεις GNSS. Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται τα διαθέσιμα συστήματα εντοπισμού που μπορεί να λάβει ο δέκτης, μαζί με τα αντίστοιχα σήματα μετάδοσης.

Πίνακας 7.8 Διαθέσιμα σήματα για το δέκτη PwrPak7 (Πηγή *PwrPak7 Data Sheet*) - Table 7.8 Available signals for PwrPak7 GNSS receiver GNSS receiver (Source *PwrPak7 Data Sheet*)

GNSS	**Available Signals**
GPS	L1 C/A, L1C, L2C, L2P, L5
GLONASS	L1 C/A, L2 C/A, L2P, L3, L5
Galileo	E1, E5a, E5b, E5 AltBOC, E6
BeiDou	B1I, B1C, B2I, B2a, B2b, B3I
QZSS	L1 C/A, L1C, L2C, L5, L6
NavIC	L5
SBAS	L1, L5

Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη PwrPak7.

Πίνακας 7.9 Τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη PwrPak7 (Πηγή *PwrPak7 Data Sheet*) - Table 7.9 Specifications of PwrPak7 GNSS receiver (Source *PwrPak7 Data Sheet*)

Channels	**555**		
Time-To-First-Fix (sec)	Cold Start	< 39	
	Hot Start	< 20	
	Re-acquisition	L1	< 0.5
		L2	< 1
Horizontal Position Accuracy	Single Point L1	1.5 m	
	Single Point L1/ L2	1.2 m	
	SBAS (GPS only)	60 cm	
	DGNSS (GPS only)	40 cm	
	RTK	1 cm + 1 ppm	
Velocity Accuracy	< 0.03 m/s		
Time Accuracy	20 ns		
Max Update Rate	100 Hz		
Dimensions	147 x 145 x 53 mm		

7.2.4.δ Αδρανειακή Μονάδα Εντοπισμού

Σχήμα 7.10 Αδρανειακή μονάδα iIMU-FSAS (Πηγή *iMAR/Products/iIMU-FSAS*) - Figure 7.10 iIMU-FSAS inertial unit (Source *iMAR/Products/iIMU-FSAS*)

Η αδρανειακή μονάδα εντοπισμού φέρει το όνομα iIMU-FSAS και κατασκευάζεται από την εταιρεία iMAR. Η συγκεκριμένη μονάδα ήταν εγκατεστημένη στο Target Vehicle και σε συνδυασμό με τη μονάδα συγχρονισμού του SPAN, χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή της τροχιάς αναφοράς. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

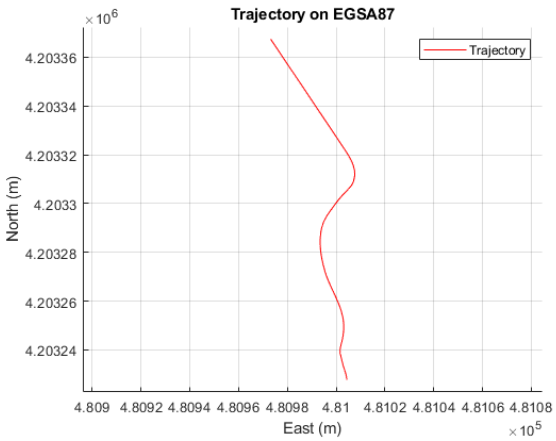
Πίνακας 7.10 Τεχνικά χαρακτηριστικά της αδρανειακής μονάδας εντοπισμού (Πηγή *iIMU-FSA /Data Sheet*) - Table 7.10 Specifications of IMU (Source *iIMU-FSA /Data Sheet*)

	Sensor Range	Bias	Scale Error	Angular Random Walk
Gyroscope	± 500 deg/sec	< 0.75 deg/hr	300 ppm	0.17 deg/$\sqrt{\text{hr}}$
Accelerometer	± 5 g	< 1.5 mg	400 ppm	< 50 μg/$\sqrt{\text{Hz}}$
MTBT	35,000 hr			
Data Rate	200 Hz			
Positioning Accuracy	Standalone	1.8 m		
	DGPS	0.45 m		
Velocity Accuracy	0.02 m/s			
Acceleration Accuracy	0.03 m/s^2			
Angular Accuracy	Roll	0.015°		
	Pitch	0.015°		
	Yaw	0.041°		
Dimensions	128 x 128 x 104 mm			

7.3 Επεξεργασία Δεδομένων και Παραγωγή Τροχιών Οχήματος

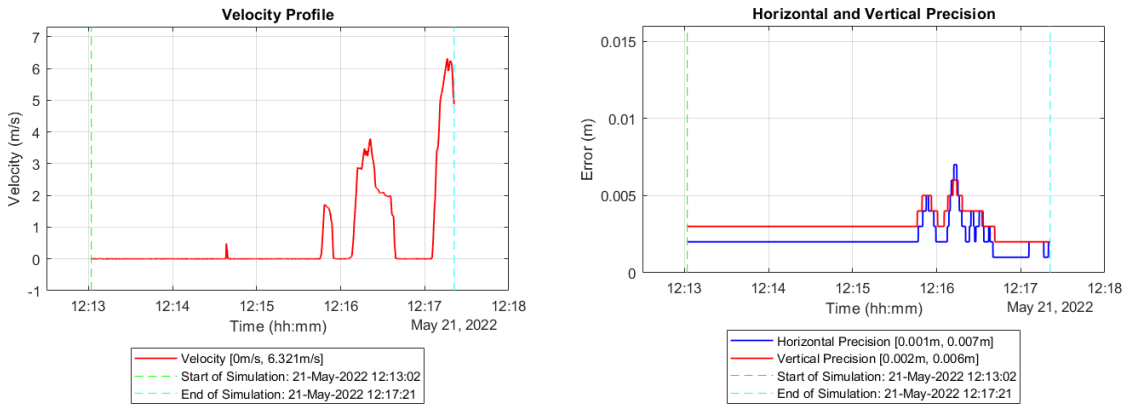
7.3.1 Παραγωγή Τροχιάς Αναφοράς

Η πρώτη βασική επεξεργασία μετρήσεων, αφορούσε την παραγωγή της τροχιάς αναφοράς από τα δεδομένα του SPAN, τα οποία περιλαμβάνουν δεδομένα GNSS και INS. Η επίλυση έγινε με χρήση ενός φίλτρου Kalman, προκειμένου να εξαχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Η τροχιά αναφοράς προβλήθηκε στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ87, ενώ τα τελικά δεδομένα εξήχθησαν στο πρότυπο NMEA. Το αρχείο NMEA της τροχιάς αναφοράς, περιλαμβάνει το χρόνο και τη θέση του δέκτη, με ρυθμό ανανέωσης 10 Hz. Για τη διαγραμματική αναπαράσταση των δεδομένων, συντάχθηκε κώδικας σε περιβάλλον MatLab από το συγγραφέα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Στο Σχήμα 7.11 φαίνεται η τροχιά αναφοράς κατά North και East.



Σχήμα 7.11 Οριζοντιογραφική αναπαράσταση της τροχιάς αναφοράς - Figure 7.11 Horizontal representation of reference trajectory

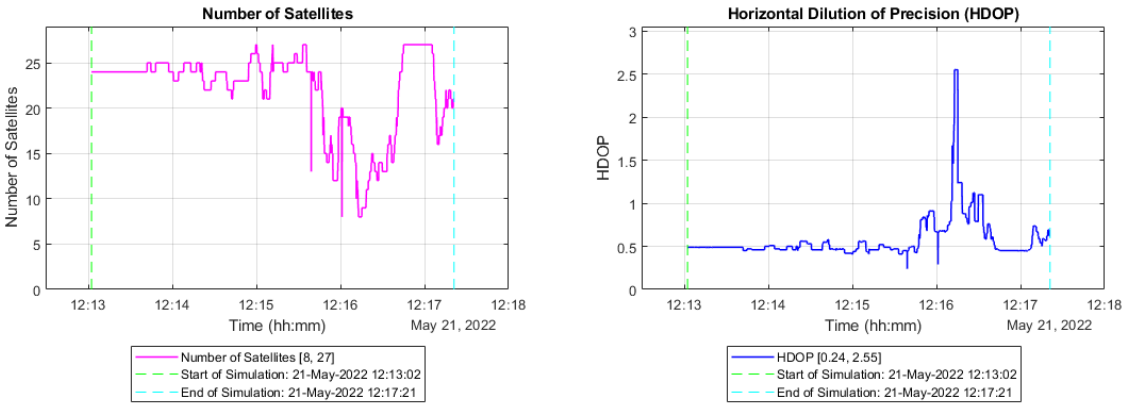
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.11, το εξαγόμενο αποτέλεσμα από την επίλυση των δορυφορικών και αδρανειακών δεδομένων, είναι μια ομαλή τροχιά, απαλλαγμένη από τα σφάλματα της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας, καθώς και τα σφάλματα που οφείλονται στις πολυανακλάσεις του δορυφορικού σήματος. Στο Σχήμα 7.12 φαίνεται το προφίλ ταχύτητας του οχήματος, καθώς και η ακρίβεια προσδιορισμού της τροχιάς αναφοράς.



Σχήμα 7.12 Προφίλ ταχύτητας και ακρίβεια της τροχιάς αναφοράς - Figure 7.12 Velocity profile and precision for reference trajectory

Η ομαλότητα της τροχιάς επαληθεύεται και από την ακρίβεια των μετρήσεων. Η οριζοντιογραφική ακρίβεια κυμαίνεται από 0.001 m έως 0.007 m, ενώ η υψομετρική ακρίβεια κυμαίνεται από 0.002 m έως 0.006 m. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια, μεταβάλλονται από μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, δημιουργώντας τοπικά ελάχιστα και μέγιστα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι από εκείνη τη χρονική στιγμή και έπειτα, το όχημα ξεκινά να κινείται, αυξάνοντας την αβεβαιότητα στη θέση του δέκτη. Ωστόσο, λόγω της εκ των υστέρων επεξεργασίας των μετρήσεων, η αβεβαιότητα της θέσης του δέκτη δεν ξεπερνά τα 0.007 m.

Επιπροσθέτως, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα του αριθμού των δορυφόρων που χρησιμοποιούνταν για τον προσδιορισμό της θέσης του δέκτη, καθώς και του δείκτη HDOP, προκειμένου να γίνουν συγκρίσεις με το δέκτη M8T, αλλά και με τις προσομοιωμένες τροχιές.



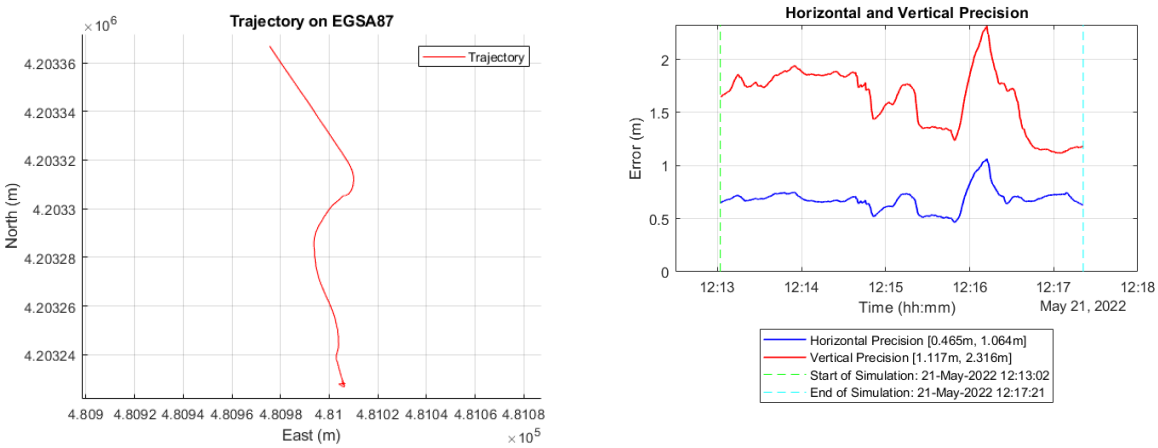
Σχήμα 7.13 Διαγραμματική αναπαράσταση των αριθμού των δορυφόρων και του δείκτη HDOP για την τροχιά αναφοράς - Figure 7.13 Number of satellites and HDOP for reference trajectory

Και στα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται μείωση των διαθέσιμων δορυφόρων από τη στιγμή που το όχημα ξεκινάει να κινείται και έπειτα. Η μείωση αυτή επιφέρει αύξηση στο δείκτη HDOP, καθώς πλέον δεν είναι διαθέσιμοι όλοι οι δορυφόροι που παρατηρούνταν κατά την ακινησία του οχήματος, μεταβάλλοντας τη γεωμετρία του δορυφορικού σχηματισμού. Όπως φάνηκε και στο Σχήμα 7.1, η τροχιά που καλείται να διασχίσει το όχημα, περιβάλλεται από ψηλά δέντρα στο ανατολικό τμήμα της και κτίρια στο δυτικό της.

Κατά την κίνηση του οχήματος, παρεμβλήθηκαν δέντρα ή/και κτίρια μεταξύ του δέκτη και των δορυφόρων, δυσχεραίνοντας την διαδικασία παρακολούθησης των διαθέσιμων δορυφόρων. Η μείωση της διαθεσιμότητας των δορυφόρων και η αύξηση του δείκτη HDOP, δικαιολογεί και τη μείωση της ακρίβειας στον προσδιορισμό της θέσης του δέκτη.

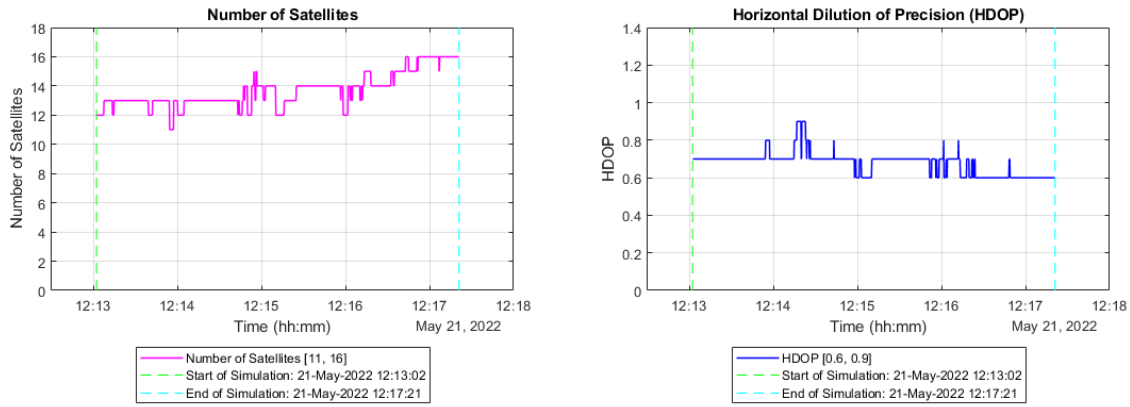
7.3.2 Παραγωγή και Αξιολόγηση Τροχιάς Πεδίου – Τροχιά M8T

Σε αντίθεση με την τροχιά αναφοράς, η τροχιά του δέκτη M8T δεν επιλύθηκε με εκ των υστέρων επεξεργασία. Η συγκεκριμένη τροχιά είναι σκοπίμως επηρεασμένη με όλα τα σφάλματα που υπεισέρχονται κατά τη διαδικασία των μετρήσεων, προκειμένου να είναι πιο αντιπροσωπευτική και ρεαλιστική. Η τροχιά πεδίου προέκυψε από τις πρωτογενείς μετρήσεις GNSS, προβλήθηκε στο ΕΓΣΑ87 και εξάχθηκε στο πρότυπο NMEA.



Σχήμα 7.14 Οριζοντιογραφική αναπαράσταση της τροχιάς πεδίου και της ακριβείας της - Figure 7.14 Horizontal representation of field test trajectory and its precision

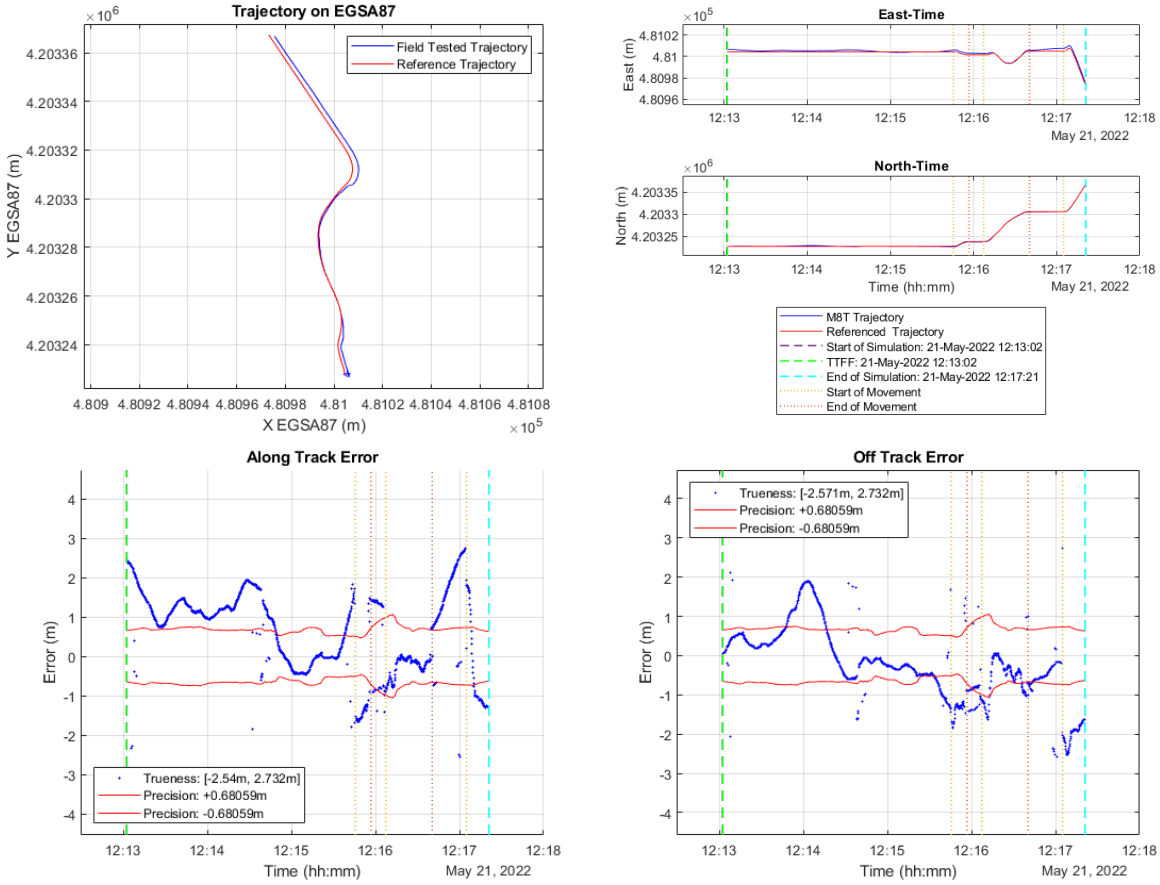
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.14, η τροχιά αυτή είναι λιγότερο ομαλή, ενώ φαίνονται σημεία τα οποία είναι αρκετά επηρεασμένα από τα διάφορα σφάλματα που υπεισέρχονται κατά τη διαδικασία των μετρήσεων, όπως για παράδειγμα στο διάστημα ακινησίας του δέκτη. Η οριζοντιογραφική ακρίβεια της θέσης κυμαίνεται από 0.47 m έως 1.06 m, ενώ η υψομετρική ακρίβεια κυμαίνεται από 1.10 m έως 2.32 m. Η ακρίβεια προσδιορισμού είναι αρκετά χειρότερη από αυτή της τροχιάς αναφοράς, είναι όμως αρκετά ικανοποιητική λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός, ότι η τροχιά αυτή επιλύθηκε από ανεπεξέργαστες μετρήσεις πεδίου.



Σχήμα 7.15 Διαγραμματική αναπαράσταση του αριθμού των δορυφόρων και του δείκτη HDOP για την τροχιά πεδίου - Figure 7.15 Number of visible satellites and HDOP for field test trajectory

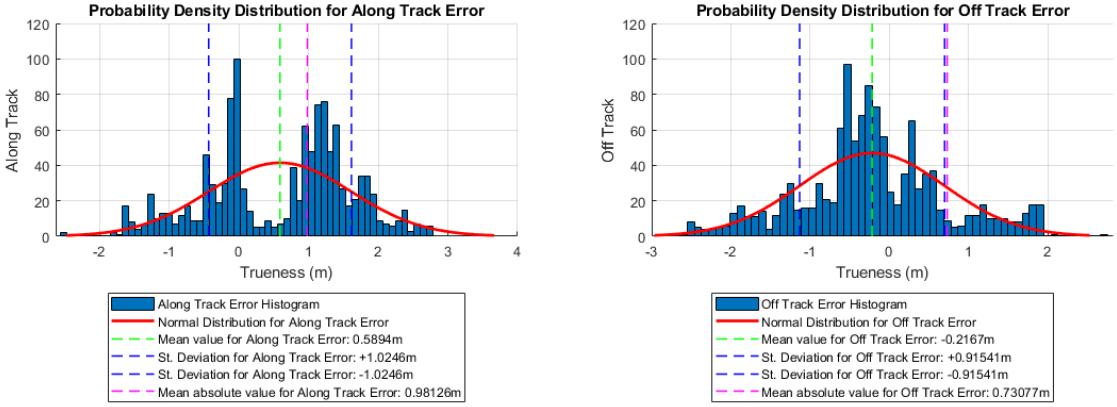
Στο Σχήμα 7.15, φαίνεται ο αριθμός των δορυφόρων που παρατηρούσε ο δέκτης M8T, καθώς και η τιμή του δείκτη HDOP. Παρατηρείται ότι ο δέκτης M8T αξιοποίησε λιγότερους δορυφόρους σε σχέση με το δέκτη PwrPak7, το οποίο οφείλεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο δεκτών. Ο δέκτης M8T μπορεί να αξιοποιήσει μόνο μία συχνότητα από τα συστήματα GPS, GLONASS, Galileo και BeiDou, σε αντίθεση με το δέκτη PwrPak7 ο οποίος μπορεί να αξιοποιήσει περισσότερες συχνότητες και περισσότερα συστήματα εντοπισμού. Επιπλέον, φαίνεται ότι η κίνηση του οχήματος δεν επηρέασε σημαντικά ούτε τον αριθμό των διαθέσιμων δορυφόρων, ούτε το δείκτη HDOP.

Για την περαιτέρω αξιολόγηση της συγκεκριμένης τροχιάς, έναντι της τροχιάς αναφοράς, έγινε ο υπολογισμός της ορθότητάς της, στις συνιστώσες along και off track. Ο ρυθμός ανανέωσης του αρχείου NMEA της τροχιάς πεδίου, είναι της τάξης των 3 Hz και 5 Hz. Για τον υπολογισμό των συνιστωσών της ορθότητας, ο συγχρονισμός έγινε με βάση το χρόνου του NMEA της τροχιάς πεδίου. Συγκεκριμένα, η συνάρτηση συγχρονισμού επέλεξε τις παρατηρήσεις του αρχείου NMEA της τροχιάς αναφοράς, όπου οι χρόνοι των δύο τροχιών ταυτίζονται. Με βάση τις παρατηρήσεις που προέκυψαν, υπολογίστηκε η ορθότητα της τροχιάς πεδίου.



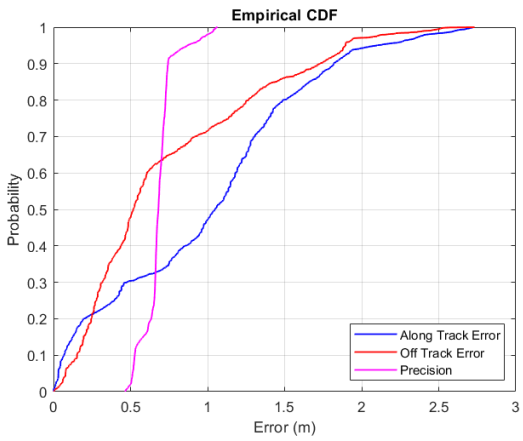
Σχήμα 7.16 Ορθότητα της τροχιάς πεδίου - Figure 7.16 Trueness of field test trajectory

Στο Σχήμα 7.16 φαίνεται η ορθότητα της τροχιάς του M8T. Παρατηρούνται αποχές τις τάξης των ±2.50 m, κατά τη διεύθυνση και εγκάρσια της τροχιάς. Για την ποσοτικοποίηση της κατανομής των συγκεκριμένων αποχών, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας (probability density distribution) και εμπειρικής αθροιστικής κατανομής (empirical cumulative distribution function). Τα δύο διαγράμματα αποτελούν ένα ποιοτικό και ποσοτικό μέσο, για τον έλεγχο της διασποράς της ορθότητας του εντοπισμού.



Σχήμα 7.17 Διάγραμμα πυκνότητας πιθανότητας της ορθότητας του εντοπισμού - Figure 7.17 Probability density distribution of trueness

Στο Σχήμα 7.17 φαίνεται η διασπορά της ορθότητας της τροχιάς του M8T, στις συνιστώσες along και off track. Στα δύο διαγράμματα έχουν τοποθετηθεί η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και η μέση απόλυτη τιμή του δείγματος των along και off track συνιστωσών. Η μέση τιμή υποδεικνύει την κορυφή της κανονικής κατανομής, η τυπική απόκλιση το σημείο αλλαγής των κοίλων της κανονική κατανομής, ενώ η μέση απόλυτη τιμή είναι ένας δείκτης διασποράς των μετρήσεων. Η μέση τιμή υπολογίζεται από το σύνολο των παρατηρήσεων, προς τον αριθμό των παρατηρήσεων. Οι παρατηρήσεις αποτελούνται από θετικές και αρνητικές τιμές, οπότε το αποτέλεσμά της, αναμένεται να βρίσκεται κοντά στο μηδέν. Η μέση απόλυτη τιμή υπολογίζεται από το άθροισμα της απόλυτης τιμής των παρατηρήσεων, προς το σύνολο των παρατηρήσεων. Με αυτόν τον τρόπο, ο συγκεκριμένος δείκτης απαλλάσσεται από την παλινδρόμηση γύρω από το μηδέν και προσφέρει μια πιο ξεκάθαρη εικόνα, για την αποχή των παρατηρήσεων. Όσο μεγαλύτερη είναι η μέση απόλυτη τιμή, τόσο μεγαλύτερη αναμένεται και η διασπορά του δείγματος και αντίστροφα. Στη συνιστώσα along track, παρατηρείται έντονη διασπορά των αποχών, με το μεγαλύτερο ποσοστό να βρίσκεται εκατέρωθεν της μέσης τιμής. Στη συνιστώσα off track, παρατηρείται έντονη διασπορά, με το μεγαλύτερο ποσοστό των αποχών να βρίσκεται κοντά στη μέση τιμή.



Σχήμα 7.18 Διάγραμμα εμπειρικής αθροιστικής κατανομής για την ακρίβεια και την ορθότητα του εντοπισμού - Figure 7.18 Empirical cumulative distribution function for precision and trueness

Στο Σχήμα 7.18 φαίνεται η εμπειρική αθροιστική κατανομή για την ακρίβεια και την ορθότητα της τροχιάς, εκφρασμένη στις συνιστώσες along και off track. Η κλίση των τριών καμπυλών, υποδεικνύει τη διασπορά των μετρήσεων. Όσο η κλίση της καμπύλης είναι απότομη (πλησιάζει τις 90°), τόσο μικρότερη αναμένεται η διασπορά των μετρήσεων. Αντίστοιχα, όσο η κλίση της καμπύλης είναι ήπια και δεν παρουσιάζει κάποια απότομη μεταβολή, τόσο μεγαλύτερη είναι η διασπορά των μετρήσεων. Φαίνεται ότι η μεγαλύτερη διασπορά εντοπίζεται στη συνιστώσα along track, ακολουθεί η συνιστώσα off track, ενώ η ακρίβεια της τροχιάς παρουσιάζει τη μικρότερη διασπορά. Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμής για το 50%, 75% και 95% του πλήθους των παρατηρήσεων.

Πίνακας 7.11 Ενδεικτικές τιμές της εμπειρικής αθροιστικής κατανομής για την ακρίβεια και την ορθότητα της τροχιάς πεδίου - Table 7.11 ECDF values for precision and along/ off track error of field test trajectory

Πλήθος Παρατηρήσεων	**50%**	**75%**	**95%**
Ακρίβεια – Precision	0.68 m	0.72 m	0.87 m
Ορθότητα κατά μήκος της τροχιάς – Along track error	1.05 m	1.40 m	2.10 m
Ορθότητα εγκάρσια της τροχιάς – Off track error	0.52 m	1.14 m	1.89 m

Από την παραπάνω ανάλυση, φαίνεται ότι ο δέκτης M8T προσφέρει μια ικανοποιητική εσωτερική ακρίβεια σε standalone positioning, αφού το 95% των παρατηρήσεων δεν ξεπερνάει την ακρίβεια των 0.90 m. Αντίθετα, η ορθότητα του δέκτη M8T είναι αρκετά χειρότερη, καθώς η απόχη κατά μήκος της τροχιάς, είναι της τάξης του 1.0 m για το 50% των παρατηρήσεων, ενώ για το 75% των παρατηρήσεων, η αποχή είναι της τάξης των 1.40 m. Η αποχή εγκάρσια της τροχιάς είναι της τάξης των 0.50 m για το 50% των παρατηρήσεων, ενώ για ποσοστό 75%, η αποχή είναι της τάξης των 1.14 m. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη ανάλυση, αφορά ένα δέκτη χαμηλού κόστους, σε ένα δύσκολο περιβάλλον παρατήρησης. Η παραπάνω ανάλυση, έγινε για όλα τα σενάρια προσομοίωσης, τα οποία θα αναλυθούν στην επόμενη παράγραφο.

8. ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΣΉΜΑΤΟΣ – ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΩΝ ΤΡΟΧΙΩΝ

8.1 Ανάκτηση Δορυφορικού Σήματος

8.1.1 Δεδομένα Εισόδου

Το επόμενο στάδιο στο πειραματικό τμήμα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, αφορούσε τη δημιουργία των προσομοιωμένων δορυφορικών σημάτων, με χρήση του λογισμικού SatGen. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΕΣ GNSS ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ RECORD AND REPLAY, το SatGen μπορεί να δεχτεί διάφορα πρότυπα αρχείων ως δεδομένα εισόδου, ενώ ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσαρμόσει κάποιες από τις παραμέτρους του, προκειμένου να δημιουργήσει το επιθυμητό σήμα. Το δεδομένο εισόδου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, ήταν το αρχείο NMEA της τροχιάς αναφοράς, προκειμένου να αναπαραχθεί η πραγματική τροχιά του οχήματος. Ο μοναδικός περιορισμός των NMEA αρχείων στο SatGen, είναι ότι η δυναμική του οχήματος εξάγεται από το αρχείο εισόδου και ο χρήστης, δεν έχει τη δυνατότητα να τη τροποποιήσει. Για την παρούσα Διπλωματική Εργασία δεν αποτέλεσε πρόβλημα, καθώς δεν αποσκοπεί στο να μελετήσει το πώς επιδρούν οι διάφορες δυναμικές στο προσομοιωμένο σήμα.

8.1.2 Παράμετροι Ανάκτησης Δορυφορικού Σήματος

Οι βασικοί παράμετροι του SatGen, προκειμένου να δημιουργήσει το ψηφιακό σήμα, είναι η ώρα έναρξης του σεναρίου εκφρασμένη στην κλίμακα UTC, καθώς και η ημερομηνία όπου λαμβάνει χώρα το σενάριο. Η ημερομηνία του σεναρίου, ταυτίστηκε με την ημερομηνία που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις πεδίου, δηλαδή στις 21/05/2022. Η ώρα του σεναρίου έπρεπε να ταυτίζεται απόλυτα με την ώρα που αναφέρεται στο NMEA αρχείο της τροχιάς αναφοράς, ώστε η τροχιά αναφοράς και η τροχιά του προσομοιωμένου σήματος, να είναι συγχρονισμένες, προκειμένου οι αποχές των δύο τροχιών, να οφείλονται μόνο στην ορθότητα του δέκτη. Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψη, ο χρόνος έναρξης του σεναρίου ήταν στις 12:13:02 στην κλίμακα UTC. Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται οι βασικοί παράμετροι που είναι κοινοί, για όλα τα σενάριο προσομοίωσης.

Πίνακας 8.1 Παράμετροι σεναρίων για τη δημιουργία των προσομοιωμένων σημάτων - Table 8.1 Scenarios settings for the simulated signals

Scenario Settings	Value
Date of simulation	21/05/2022
UTC Time of simulation	12:13:02
Smooth NMEA	No
Update Rate	10 Hz
Height Geoid	NMEA file
Elevation Mask	15°
Almanac	Automatic
Initial Acquisition	00:00:00
End Delay	00:00:00

Οι παράμετροι οι οποίοι διαφοροποίησαν τα σενάρια που δημιουργήθηκαν, ήταν η ένδειξη Attenuation και ο αριθμός κβάντωσης των συνιστωσών I&Q. Η παράμετρος Attenuation αναφέρεται στην εξασθένιση ή ενίσχυση του C/N_0 των λαμβανόμενων σημάτων και μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος (internal) μπορεί να πραγματοποιηθεί κατευθείαν από το SatGen, εισάγοντας στην παράμετρο Attenuation τον αριθμό (σε dB) κατά τον οποίο, θα μεταβληθεί η ισχύς του σήματος. Ο δεύτερος τρόπος (external) μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά την επανάληψη του σεναρίου, χρησιμοποιώντας το πληκτρολόγιο του LabSat 3 Wideband. Η παράμετρος της κβάντωσης των συνιστωσών I&Q, εμπλέκεται στη μετατροπή του ψηφιακού σήματος, σε αναλογικό. Προκειμένου να εξετασθεί η επιρροή των δύο αυτών παραμέτρων στην επίλυση του εντοπισμού, δημιουργήθηκαν τέσσερα σενάρια. Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται οι παράμετροι των τελικών σεναρίων.

Πίνακας 8.2 Διαφοροποίηση των τελικών σεναρίων με βάση το Attenuation και τη κβάντωση των συνιστωσών I&Q - Table 8.2 Distinction of the final scenarios in terms of Attenuation and quantization of I&Q components

Settings		**Scenario 1**	**Scenario 2**	**Scenario 3**	**Scenario 4**
Attenuation	Internal	0 dB	0 dB	- 15 dB	-15 dB
	External	0 dB	0 dB	0 dB	-25 dB
I&Q components		1 bit	2 bits	1 bit	1 bit

Τέλος, τα διαθέσιμα συστήματα εντοπισμού για τα παραπάνω σενάρια, φαίνονται στον Πίνακα 8.3.

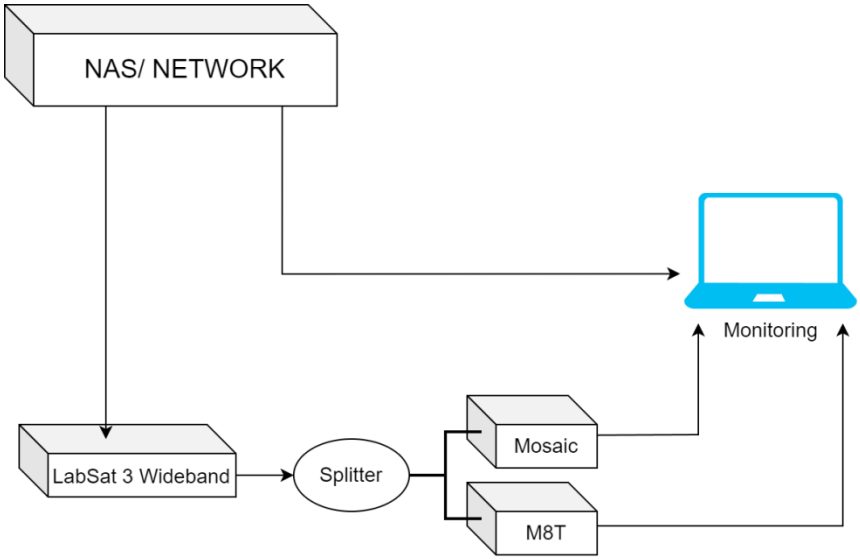
Πίνακας 8.3 Συστήματα εντοπισμού των προσομοιωμένων σημάτων - Table 8.3 Constellations of simulated signals

GNSS	**Transmitted Signals**
GPS	L1 C/A, L1P, L2P, L2C, L5, L1M, L2M
GLONASS	L1 C/A, L2 C/A
Galileo	E1B/C, E5a, E5b
BeiDou	B1I, B2I
NavIC	L5SPS

Η δημιουργία των προσομοιωμένων σημάτων απαιτεί αρκετή ώρα, καθώς για ένα σενάριο των 4 min, χρειάστηκαν περίπου 100 min. Αφού δημιουργήθηκαν όλα τα απαραίτητα σενάρια, αποθηκεύτηκαν σε έναν NAS προκειμένου να μην δεσμευτεί η εσωτερική μνήμη του LabSat 3 Wideband. Πρέπει να σημειωθεί, πως δεν δημιουργήθηκε κάποιο σενάριο με αριθμό κβάντωσης 3 bit, προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα μνήμης, κατά τη μεταφορά των δεδομένων από τον NAS.

8.2 Αναπαραγωγή Προσομοιωμένων Τροχιών

Το τελικό στάδιο της πειραματικής διαδικασίας, αφορούσε την επανάληψη των προσομοιωμένων τροχιών, στους δέκτης M8T και Mosaic. Στο Σχήμα 8.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 8.1 Πειραματική διάταξη της επανάληψης των προσομοιωμένων σημάτων - Figure 8.1 Experimental arrangement for the replay of the simulated scenarios

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.1, οι δύο δέκτες ήταν συνδεδεμένοι στον LabSat 3 Wideband, μέσω ενός καλωδίου SMA, ενώ για να μπορέσει να γίνει ταυτόχρονα η αναπαραγωγή των σεναρίων στους δέκτες, χρησιμοποιήθηκε ένας splitter. Η επίβλεψη της επανάληψης των προσομοιωμένων τροχιών, έγινε με τη χρήση ενός Η/Υ, στον οποίο αποθηκεύτηκαν τα εξαγόμενα αρχεία. Στην περίπτωση του M8T, η σύνδεση στον Η/Υ έγινε με τη χρήση ενός καλωδίου USB, ενώ στην περίπτωση του Mosaic, η σύνδεση έγινε διαδικτυακά μέσω της IP του. Η επανάληψη των δεδομένων από τον LabSat 3 Wideband, έγινε σε ένα εύρος 56 MHz, όπου στο κέντρο του, εντοπιζόταν η κεντρική συχνότητα του κάθε καναλιού. Οι τιμές των κεντρικών συχνοτήτων επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να συλλεχθούν οι βασικές συχνότητες μετάδοσης των σημάτων GNSS (L1, L2 και L5). Έτσι, οι τιμές που επιλέχτηκαν ήταν 1176.45 MHz, 1227.60 MHz και 1600.00 MHz

Προτού ξεκινήσει η αναπαραγωγή των σεναρίων, οι δύο δέκτες έπρεπε να μην περιέχουν πρόσφατα almanac, καθώς αυτό θα δυσχέραινε τη διαδικασία ανάκτησης του δορυφορικού σήματος. Με την επιλογή cold start διαγράφηκαν τα πρόσφατα almanac από τους δέκτες, ενώ η συγκεκριμένη διαδικασία έγινε για κάθε ένα από τα τέσσερα σενάρια. Για την καταγραφή των δεδομένων του δέκτη M8T χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό u-center, ενώ για την καταγραφή των δεδομένων του δέκτη Mosaic, χρησιμοποιήθηκε η IP του, με σκοπό την πρόσβαση στο διαδικτυακό του παράθυρο. Αξίζει να σημειωθεί πως κατά την αναπαραγωγή των τροχιών στο δέκτη Mosaic, εμφανίστηκε η ένδειξη Spoofing, δηλαδή ο δέκτης αναγνώριζε τα εισερχόμενα σήματα, ως μη-αληθινά. Ο προσδιορισμός της θέσης του δέκτη έγινε με τη μέθοδο standalone positioning, ενώ από τις δύο εφαρμογές προέκυψε ένα NMEA το οποίο περιέχει:

- το χρόνο και την ημερομηνία της κάθε παρατήρησης, εκφρασμένος στο σύστημα unix
- τις γεωδαιτικές συντεταγμένες (φ, λ) του δέκτη στο σύστημα αναφοράς WGS84

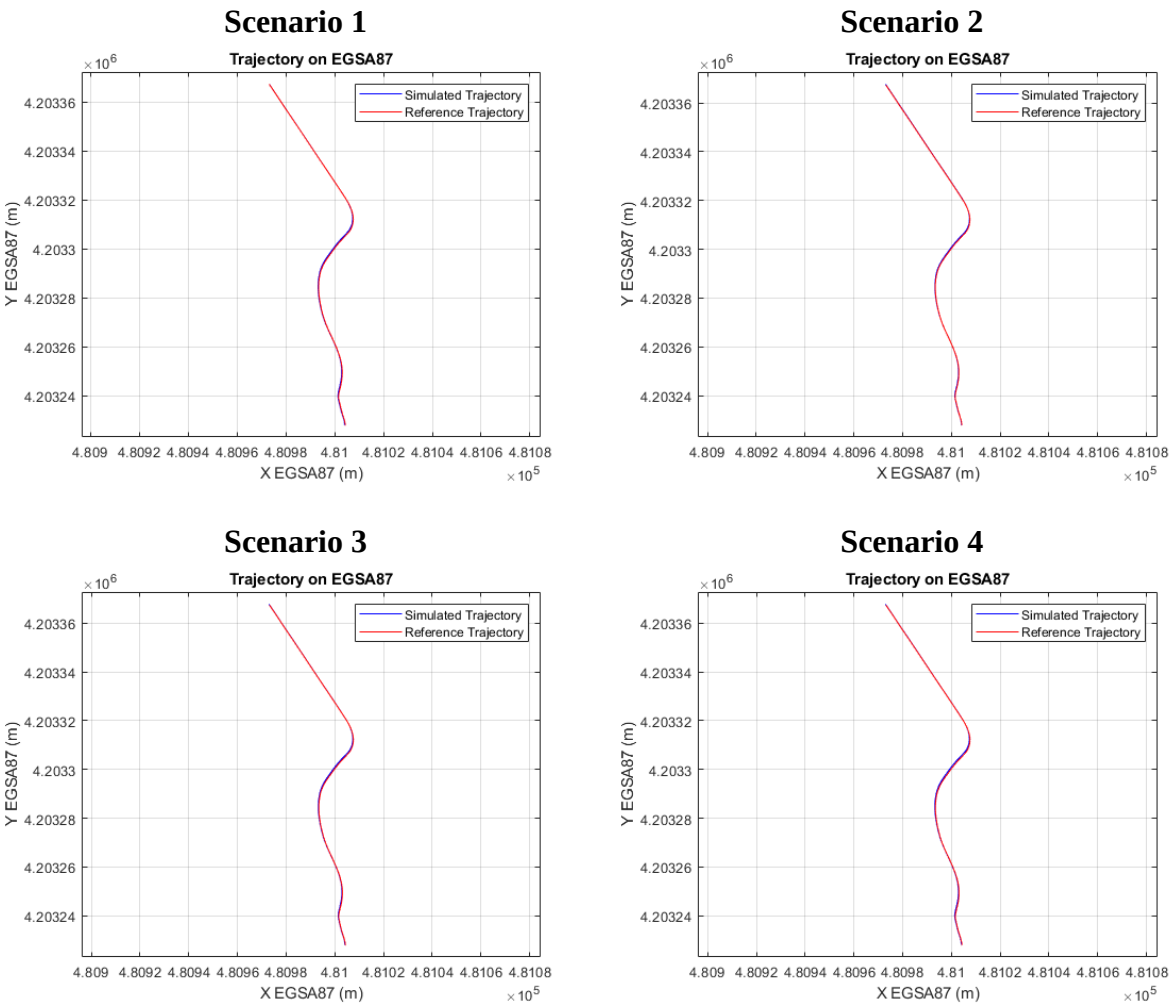
- το ορθομετρικό υψόμετρο του δέκτη
- τον αριθμό των δορυφόρων που αξιοποιήθηκαν για την επίλυση της θέσης
- την οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια του κάθε σημείου
- το δείκτη HDOP

Επιπροσθέτως, ο ρυθμός ανανέωσης των δεδομένων του δέκτη M8T, ήταν της τάξης των 3 Hz και 5 Hz, σε αντίθεση με το δέκτη Mosaic όπου ο ρυθμός ανανέωσης ήταν 10 Hz. Η πρώτη προ-επεξεργασία των μετρήσεων, αφορούσε τη μετατροπή των γεωδαιτικών συντεταγμένων των προσομοιωμένων τροχιών, στο προβολικό σύστημα του ΕΓΣΑ87. Στη συνέχεια, το κάθε ένα αρχείο επεξεργάστηκε σε περιβάλλον MatLab, προκειμένου να προκύψουν τα ζητούμε διαγράμματα.

8.3 Αξιολόγηση Προσομοιωμένων Τροχιών

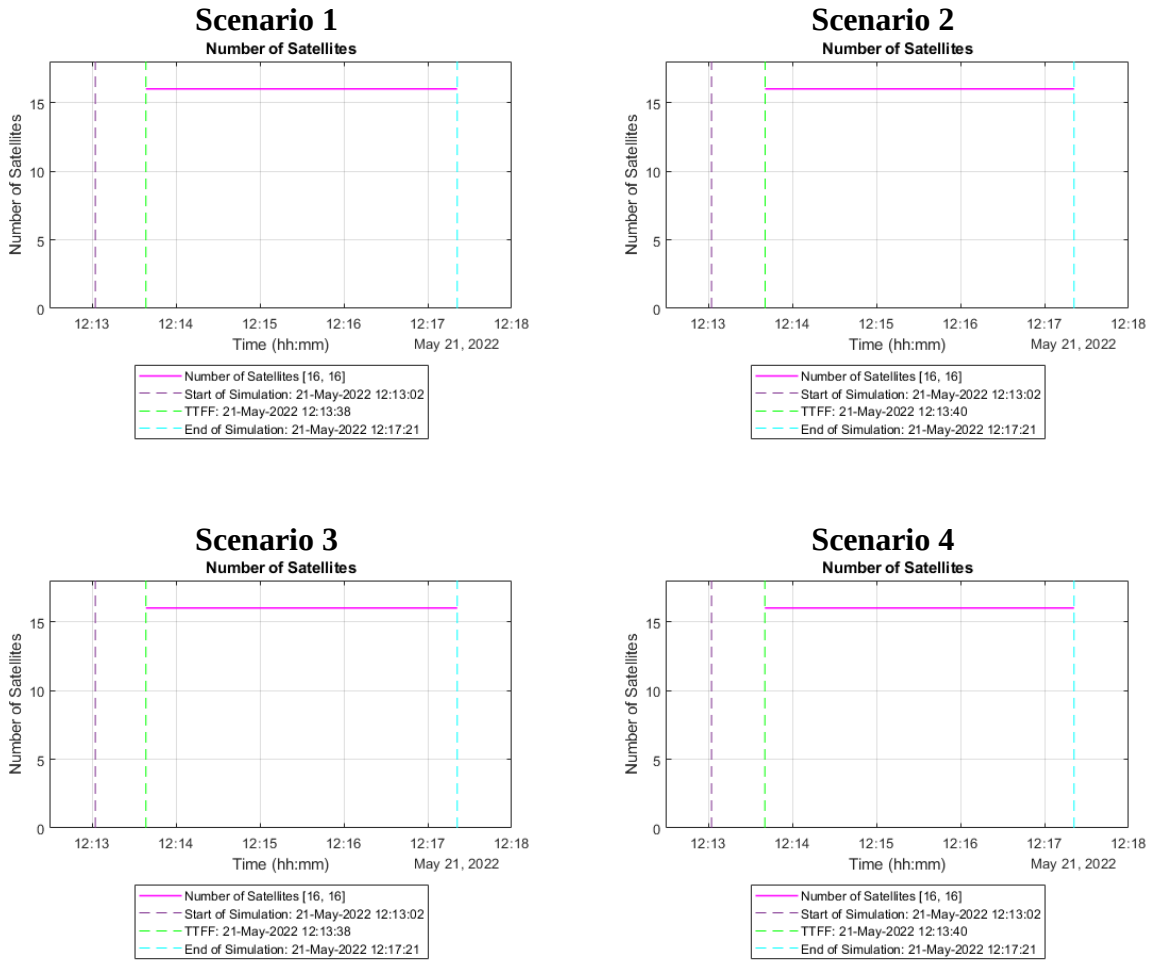
8.3.1 Δέκτης M8T

Η πρώτη σύγκριση που πραγματοποιήθηκε, ήταν οι προσομοιωμένες τροχιές του M8T έναντι της τροχιάς αναφοράς.



Σχήμα 8.2 Οριζοντιογραφική αναπαράσταση των προσομοιωμένων τροχιών του δέκτη M8T - Figure 8.2 Horizontal representation of M8T's simulated trajectories

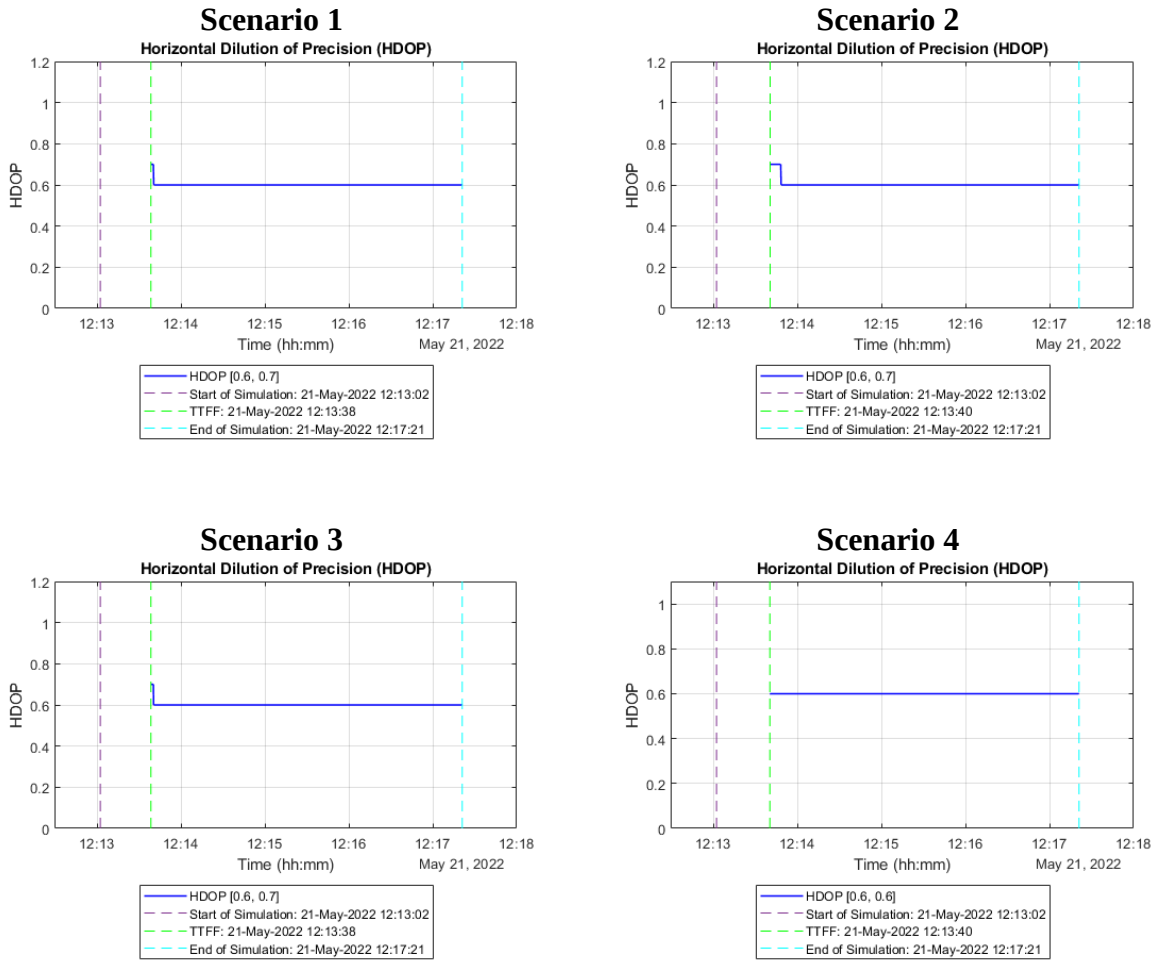
Από την οριζοντιογραφική αναπαράσταση της προσομοιωμένης τροχιάς του M8T έναντι της τροχιάς αναφοράς, φαίνονται πολύ μικρότερες αποχές, σε σχέση με αυτές της τροχιάς πεδίου και όλες, παρατηρούνται κατά τη στροφή του δέκτη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι συγκεκριμένες παρατηρήσεις είναι ανεπηρέαστες από τα σφάλματα των πολυανακλάσεων του δορυφορικού σήματος, καθώς το SatGen δεν χρησιμοποιεί κάποιο υψομετρικό μοντέλο επιφανείας. Το γεγονός ότι το SatGen δεν χρησιμοποιεί κάποιο τέτοιο μοντέλο, συνεπάγεται ότι δεν θα υπάρχουν στιγμές όπου ο δέκτης χάνει το σήμα, λόγω παρεμβολής κάποιου εμποδίου. Άρα, τα διαγράμματα HDOP και αριθμού των διαθέσιμων δορυφόρων, αναμένονται να είναι πολύ πιο σταθερά σε σχέση με αυτά της τροχιάς πεδίου.



Σχήμα 8.3 Διαγραμματική αναπαράσταση του αριθμού των δορυφόρων των προσομοιωμένων τροχιών του δέκτη M8T - Figure 8.3 Number of visible satellites for M8T's simulated trajectories

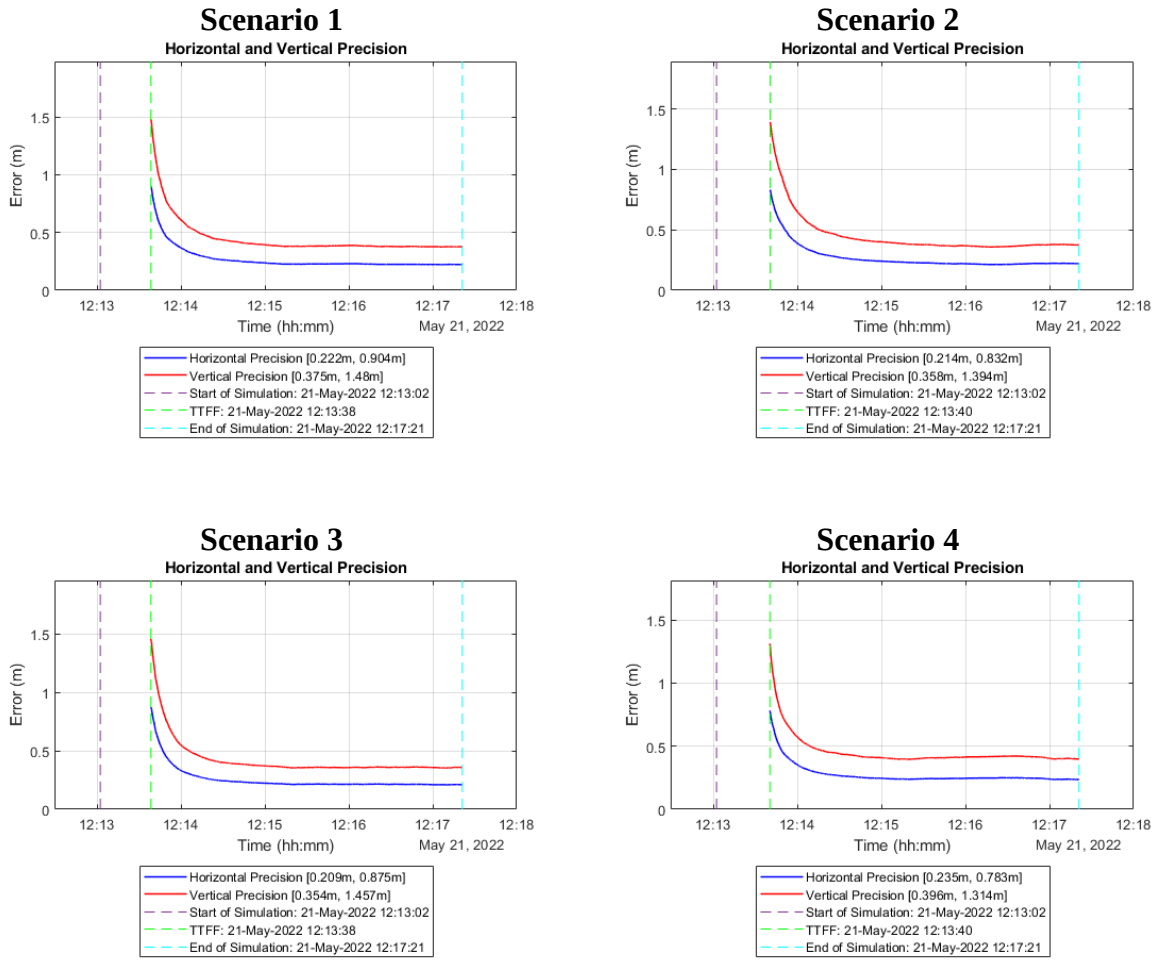
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8.3, ο αριθμός των παρατηρήσιμων δορυφόρων παραμένει σταθερός καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Αυτό συνεπάγεται ότι ο δέκτης M8T, παρατηρούσε πάντα το μέγιστο αριθμό δορυφόρων που θα μπορούσε να παρατηρήσει, καθώς το μόνο όριο που επηρέαζε τον αριθμό των παρατηρήσιμων δορυφόρων, είναι η γωνία αποκοπής των 15°. Το συμπέρασμα αυτό, επαληθεύεται και από το Σχήμα 7.15, όπου ο μέγιστος αριθμός των παρατηρήσιμων δορυφόρων της τροχιάς πεδίου, είναι ίσος με τον αριθμό των δορυφόρων στις προσομοιωμένες τροχιές, δηλαδή 16.

Το γεγονός ότι δεν υπάρχει μεταβολή στον αριθμό των παρατηρήσιμων δορυφόρων, συνεπάγεται ότι η γεωμετρία του δορυφορικού σχηματισμού, δεν μεταβάλλεται σημαντικά. Άρα τα διαγράμματα του δείκτη HDOP, αναμένονται να είναι σταθερά και να είναι εντός του εύρους τιμών του HDOP της τροχιάς πεδίου ([0.6, 0.9]).



Σχήμα 8.4 Διαγραμματική αναπαράσταση του δείκτη HDOP των προσομοιωμένων τροχιών του δέκτη M8T - Figure 8.4 HDOP for M8T's simulated trajectories

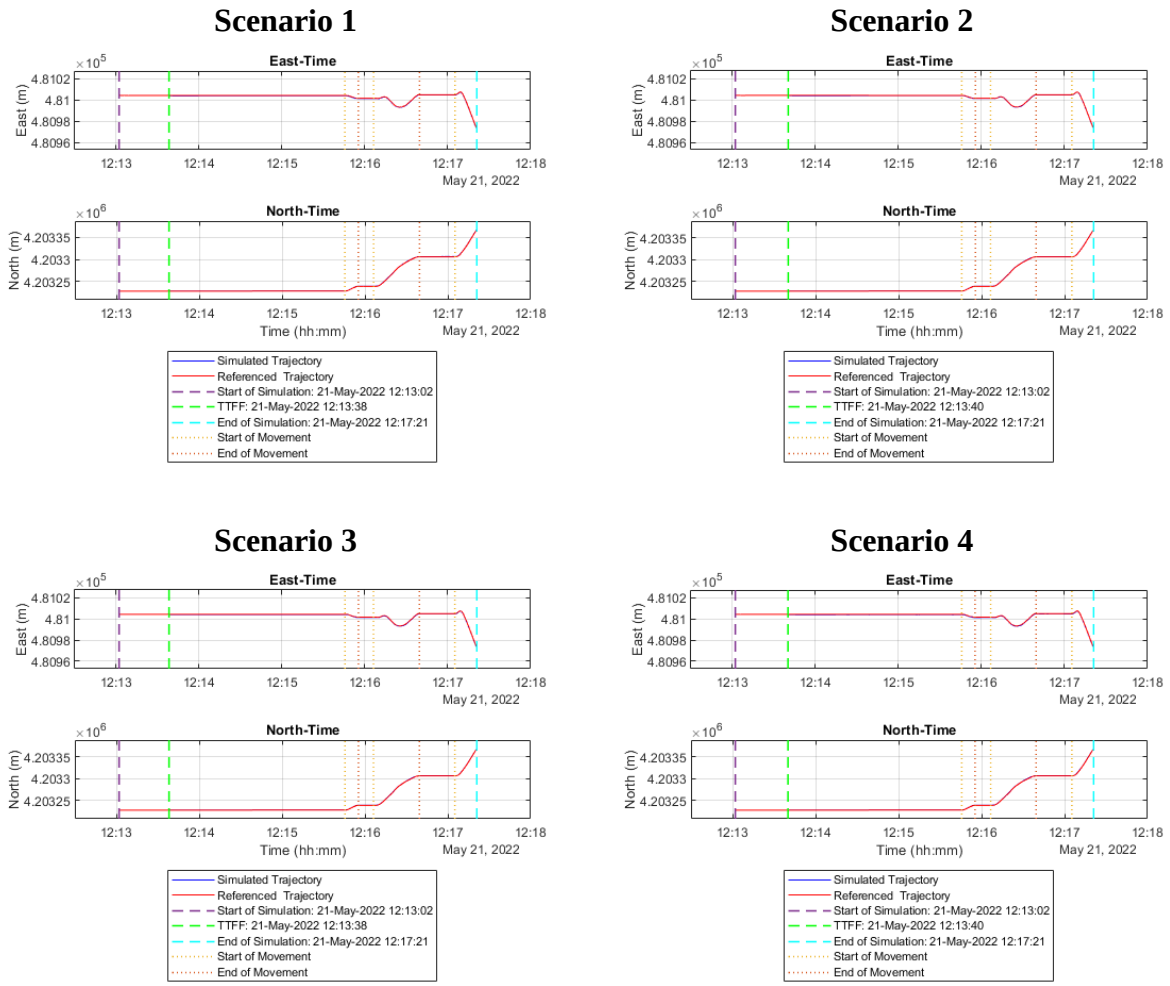
Όπως ήταν αναμενόμενο, οι τιμές του HDOP είναι εντός του εύρους των [0.6, 0.9] και δεν παρουσιάζονται σημαντικές μεταβολές. Τα διαγράμματα του αριθμού των παρατηρήσιμων δορυφόρων, καθώς και του δέκτη HDOP, αφορούν κυρίως δεδομένα που χρησιμοποίησε το SatGen από τα almanac. Γι αυτό και δεν εντοπίζονται μεταβολές μεταξύ των σεναρίων. Από την άλλη πλευρά, στα διαγράμματα ακρίβειας και ορθότητας παίζει σημαντικό ρόλο το σήμα και η ισχύς που λαμβάνει ο δέκτης, όποτε είναι πιο πιθανό να εντοπιστούν μεταβολές στα συγκεκριμένα διαγράμματα. Επιπλέον, καθοριστικός παράγοντας για τον εντοπισμό μεταβολών, είναι ο ίδιος ο δέκτης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.



Σχήμα 8.5 Διαγραμματική αναπαράσταση της ακρίβειας του δέκτη M8T για τις προσομοιωμένες τροχιές - Figure 8.5 Precision for M8T's simulated trajectories

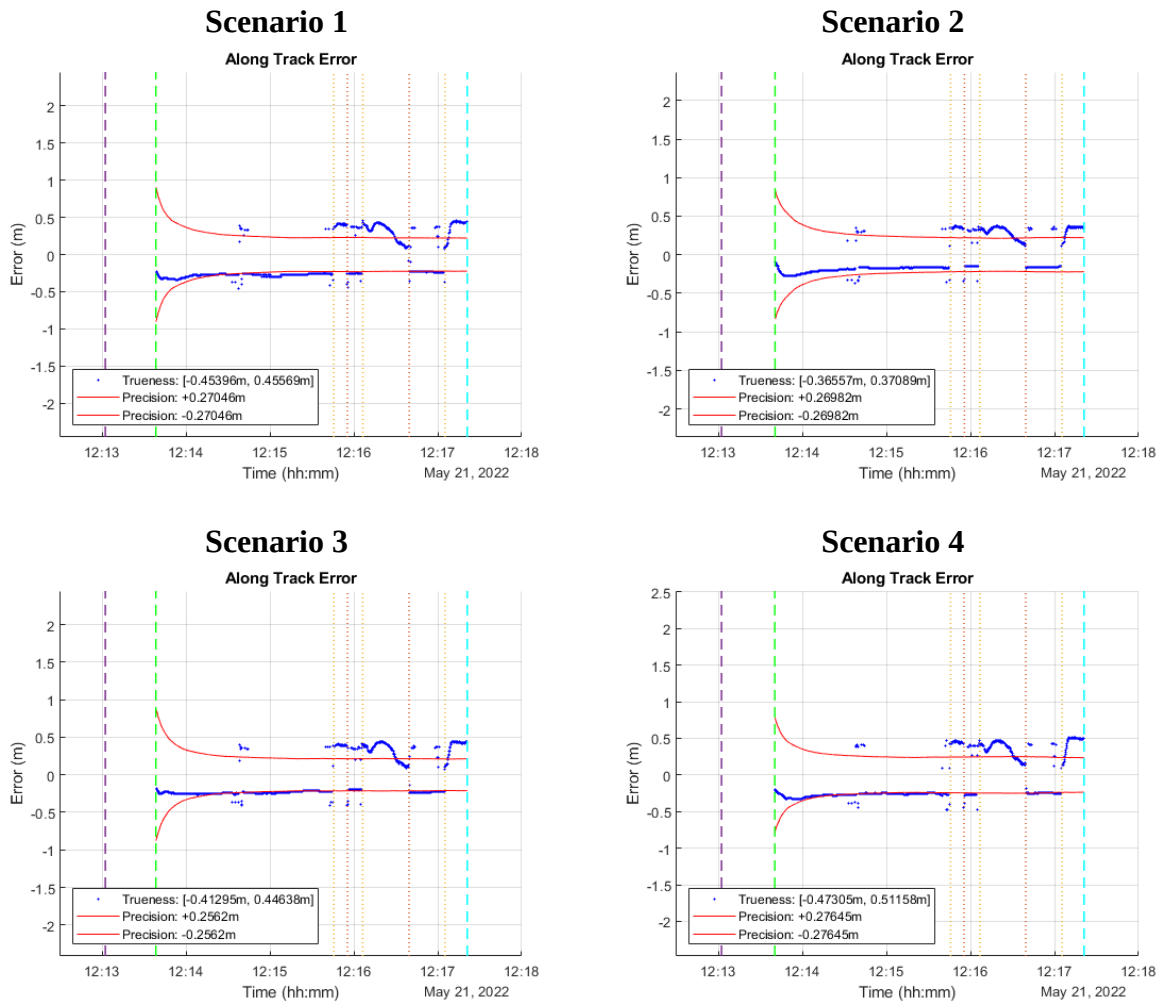
Στο Σχήμα 8.5 φαίνεται η ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης του δέκτη M8T. Από το TTFF και έπειτα, παρατηρείται βελτίωση κατά 20 cm στην οριζοντιογραφική ακρίβεια του δέκτη M8T, σε σχέση με τη τροχιά πεδίου. Στην υψομετρική ακρίβεια εντοπίζεται αύξηση της τάξης του 1.5 m, σε σχέση με την τροχιά πεδίου. Και στα τέσσερα σενάρια, οι ακρίβειες είναι κάτω από 50 cm, ενώ οι μεγαλύτερες οριζοντιογραφικές ακρίβειες εντοπίζονται στα σενάρια 2 και 3. Ωστόσο, οι συγκεκριμένες διαφορές είναι της τάξης των 2 cm - 4 cm, οι οποίες για εφαρμογές πλοήγησης είναι αμελητέες. Οι υψομετρικές ακρίβειες των σεναρίων 2 και 4, είναι κατά 10 cm - 18 cm καλύτερη από τα σενάρια 1 και 2. Στο κομμάτι της εσωτερικής ακρίβειας του δέκτη, φαίνεται το σενάριο 2 να έχει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα, σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Τα επόμενα διαγράμματα αφορούν τα διαγράμματα ορθότητας των προσομοιωμένων τροχιών, του δέκτη M8T. Και σε αυτή την περίπτωση, ο συγχρονισμός των δύο τροχιών έγινε με βάση τις χρονικές ενδείξεις των προσομοιωμένων τροχιών του δέκτη M8T.



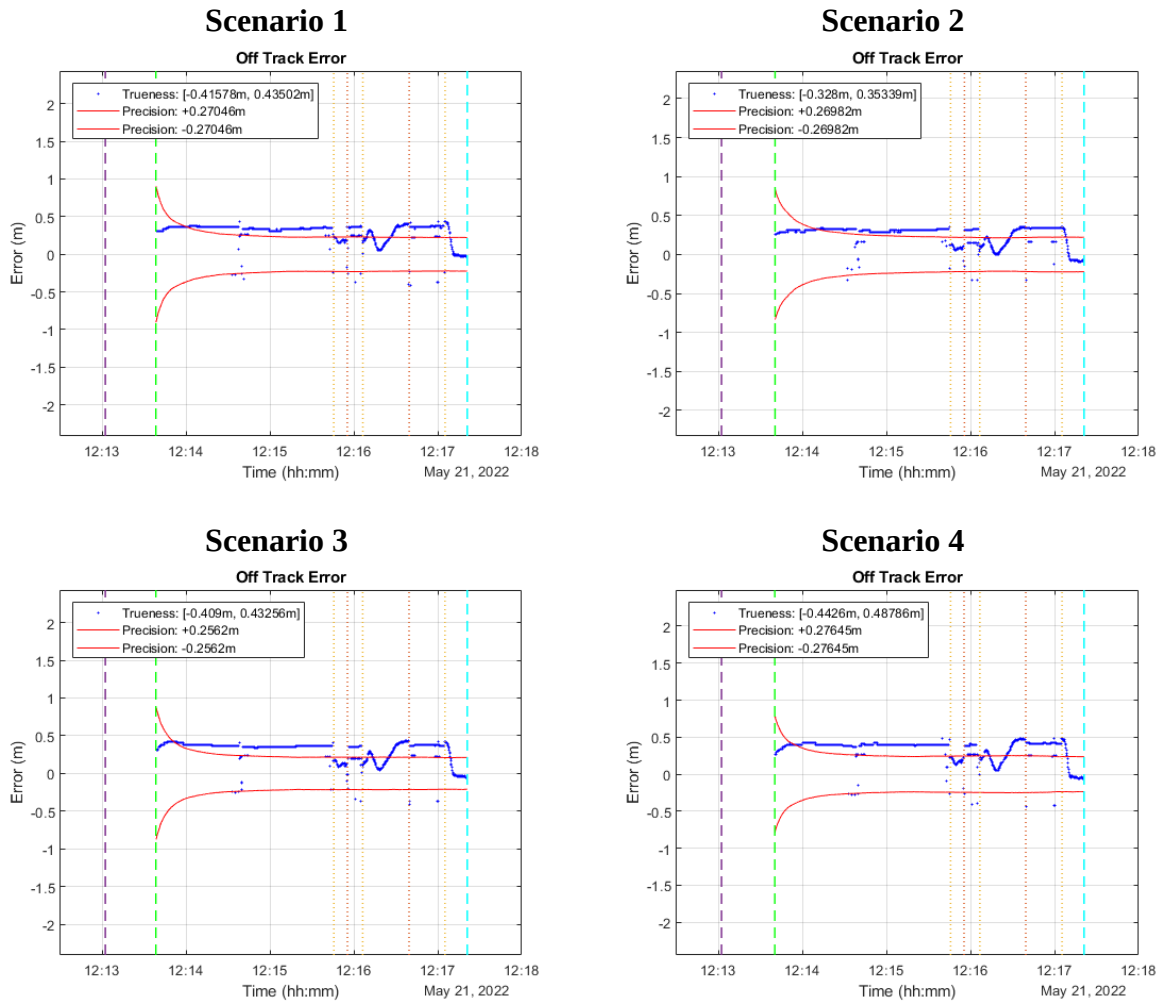
Σχήμα 8.6 Διαγραμματική αναπαράσταση της κίνησης κατά North και East του δέκτη M8T για τις προσομοιωμένες τροχιές - Figure 8.6 North and East versus time for M8T's simulated trajectories

Στο Σχήμα 8.6 φαίνονται οι αποχές του δέκτη κατά North και East. Ο ρόλος του συγκεκριμένου διαγράμματος είναι ποιοτικός και όχι ποσοτικός, καθώς προσφέρει μια πρώτη εικόνα για τις απόχες των προσομοιωμένων τροχιών. Επιπλέον, υποδεικνύει με σαφή τρόπο τις στιγμές ακινησίας και κίνησης του δέκτη.



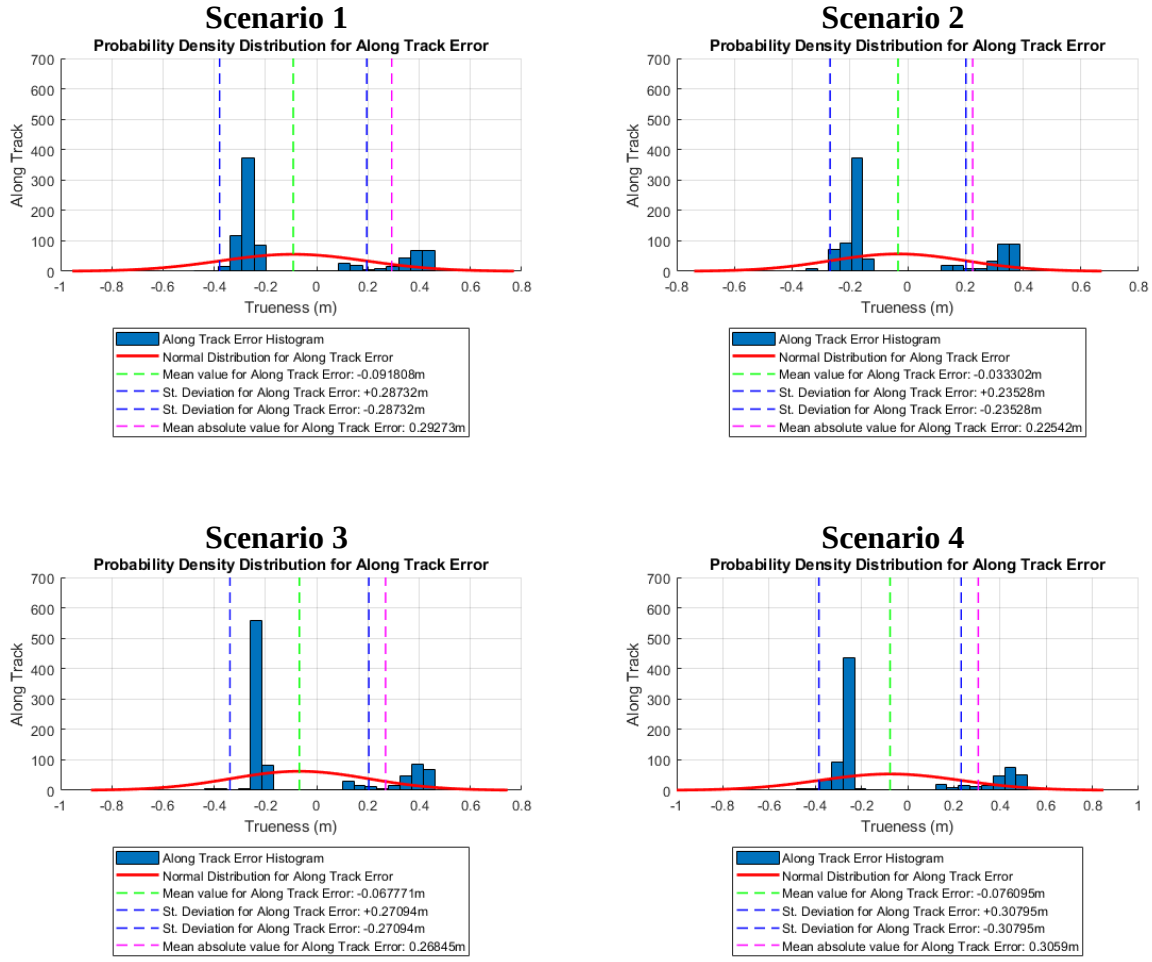
Σχήμα 8.7 Διαγράμματα ορθότητας κατά μήκος της τροχιάς για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη M8T - Figure 8.7 Along track error for M8T's simulated trajectories

Στο Σχήμα 8.7 φαίνεται η ορθότητα του εντοπισμού των προσομοιωμένων τροχιών, κατά τη διεύθυνση της κίνησης. Οι αποχές των προσομοιωμένων τροχιών είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με αυτές της τροχιάς πεδίου. Πιο συγκεκριμένα, στο σενάριο 1 είναι της τάξης των 45 cm, στο σενάριο 2, είναι της τάξης των 37 cm, στο σενάριο 3 είναι της τάξης των 45 cm, ενώ στο σενάριο 4 είναι της τάξης των 51 cm. Και στα τέσσερα σενάρια, οι μεγαλύτερες αποχές εντοπίζονται στα διαστήματα κίνησης του δέκτη, ενώ κατά την ακινησία, η ορθότητα κατά μήκος της τροχιάς έχει μια συστηματική αποχή, η οποία είναι περίπου ίση με την οριζοντιογραφική ακρίβεια. Φαίνεται λοιπόν, πόσο διαφορετική είναι η απόδοση του ίδιου δέκτη όταν λαμβάνει πραγματικές μετρήσεις πεδίου και όταν λαμβάνει μετρήσεις από ένα ελεγχόμενο σήμα. Και σε αυτό το διάγραμμα το σενάριο 2 φέρει τα καλύτερα αποτελέσματα, γεγονός που υποδεικνύει το πόσο διαφοροποιείται το αποτέλεσμα της επίλυσης, από τον αριθμό των bit των συνιστωσών I&Q.



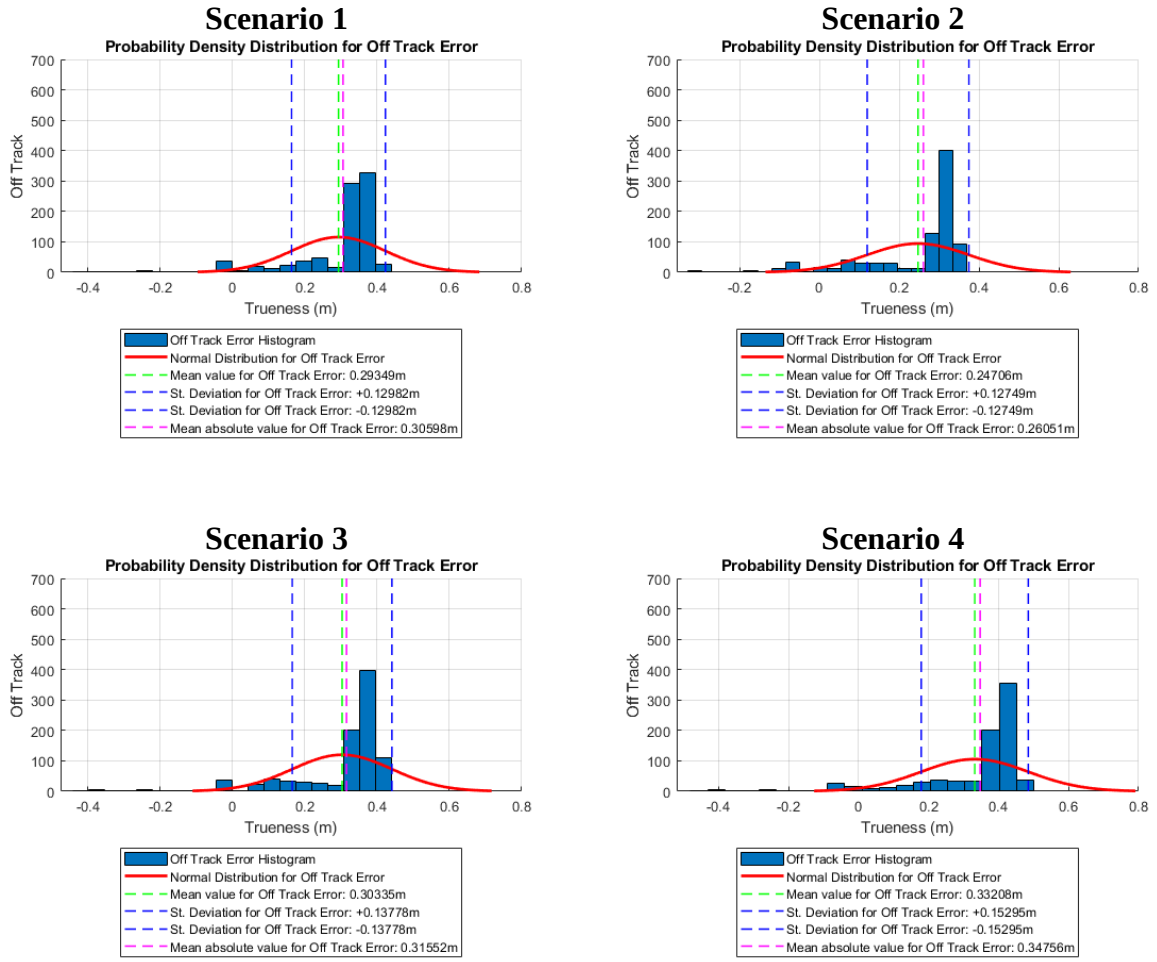
Σχήμα 8.8 Διαγράμματα ορθότητας εγκάρσια της τροχιάς για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη M8T - Figure 8.8 Off track error for M8T's simulated trajectories

Στο Σχήμα 8.8 φαίνονται τα διαγράμματα ορθότητας εγκάρσια της τροχιάς. Κι στα συγκεκριμένα διαγράμματα, οι αποχές είναι πολύ μικρότερες από αυτές της τροχιάς πεδίου. Πιο συγκεκριμένα, στο σενάριο 1 και 3 οι αποχές είναι της τάξης των 43 cm, στο σενάριο 2 είναι της τάξης των 35 cm, ενώ στο σενάριο 4 είναι της τάξης των 49 cm. Επιπροσθέτως, παρουσιάζεται κι εδώ μια συστηματική αποχή κατά την ακινησία, ενώ και στην ορθότητα εγκάρσια της τροχιάς, τα καλύτερα αποτελέσματα εντοπίζονται στο σενάριο 2.



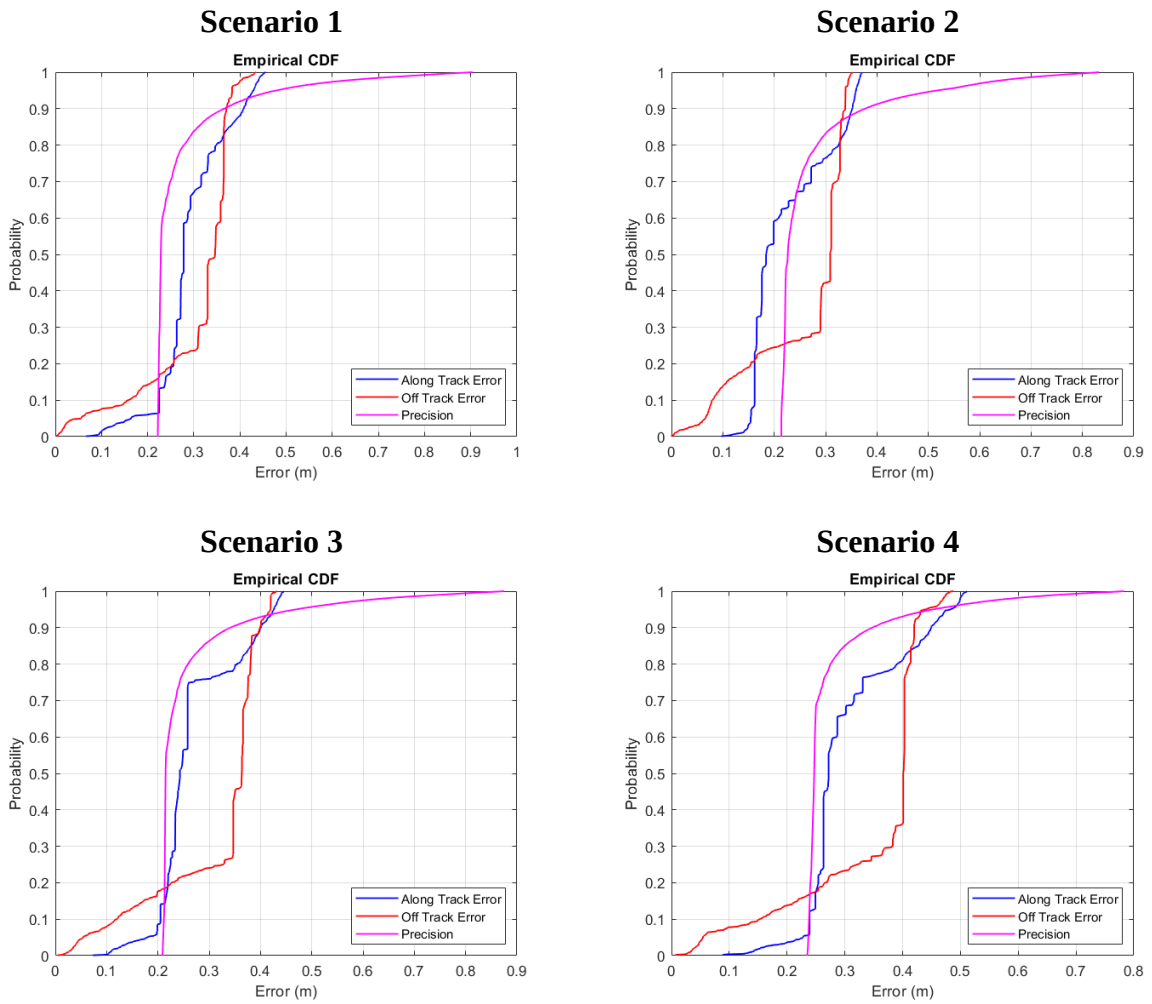
Σχήμα 8.9 Διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας της ορθότητας κατά μήκος της τροχιάς για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη M8T - Figure 8.9 PDD of along track error for M8T's simulated trajectories

Στο Σχήμα 8.9 φαίνονται τα διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας της ορθότητας, κατά μήκος της τροχιάς. Στα συγκεκριμένα διαγράμματα παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των παρατηρήσεων, βρίσκεται εντός της τυπικής απόκλισης του δείγματος. Ωστόσο, εντοπίζονται και ποσοστά αποχών εκτός της τυπικής απόκλισης, τα οποία αυξάνουν τη διασπορά του δείγματος. Ωστόσο, η διασπορά του δείγματος είναι της τάξης των ±29 cm, ±23 cm, ±27 cm και ±31 cm για τα σενάρια 1, 2, 3 και 4 αντίστοιχα. Είναι δηλαδή πολύ μικρότερες από αυτές που εντοπίζονται στη τροχιά πεδίου. Επιπροσθέτως, είναι εμφανής η συστηματική αποχή των μετρήσεων κατά περίπου -20 cm, η οποία υποδηλώνει τις παρατηρήσεις όπου το όχημα βρισκόταν σε ακινησία.



Σχήμα 8.10 Διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας της ορθότητας εγκάρσια της τροχιάς για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη M8T - Figure 8.10 PDD of off track error for M8T's simulated trajectories

Στο Σχήμα 8.10 φαίνονται τα διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας εγκάρσια της τροχιάς. Στα συγκεκριμένα διαγράμματα παρατηρείται μικρότερη διασπορά του δείγματος, σε σχέση με την ορθότητα κατά μήκος της τροχιάς, με το μεγαλύτερο ποσοστό του δείγματος να βρίσκεται μεταξύ της μέσης τιμής και του θετικού ορίου της τυπικής απόκλισης του δείγματος. Και σε αυτό το διάγραμμα παρατηρείται η συστηματική αποχή των παρατηρήσεων όπου το όχημα βρισκόταν σε ακινησία, ενώ η διασπορά του δείγματος είναι της τάξης των ±12 cm για τα σενάρια 1 και 2, ±14 cm για το σενάριο 3 και ±25 cm για το σενάριο 4.



Σχήμα 8.11 Διαγράμματα εμπειρικής αθροιστικής κατανομής της ορθότητας και της ακρίβειας για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη M8T - Figure 8.11 ECDF of trueness and precision for M8T's simulated trajectories

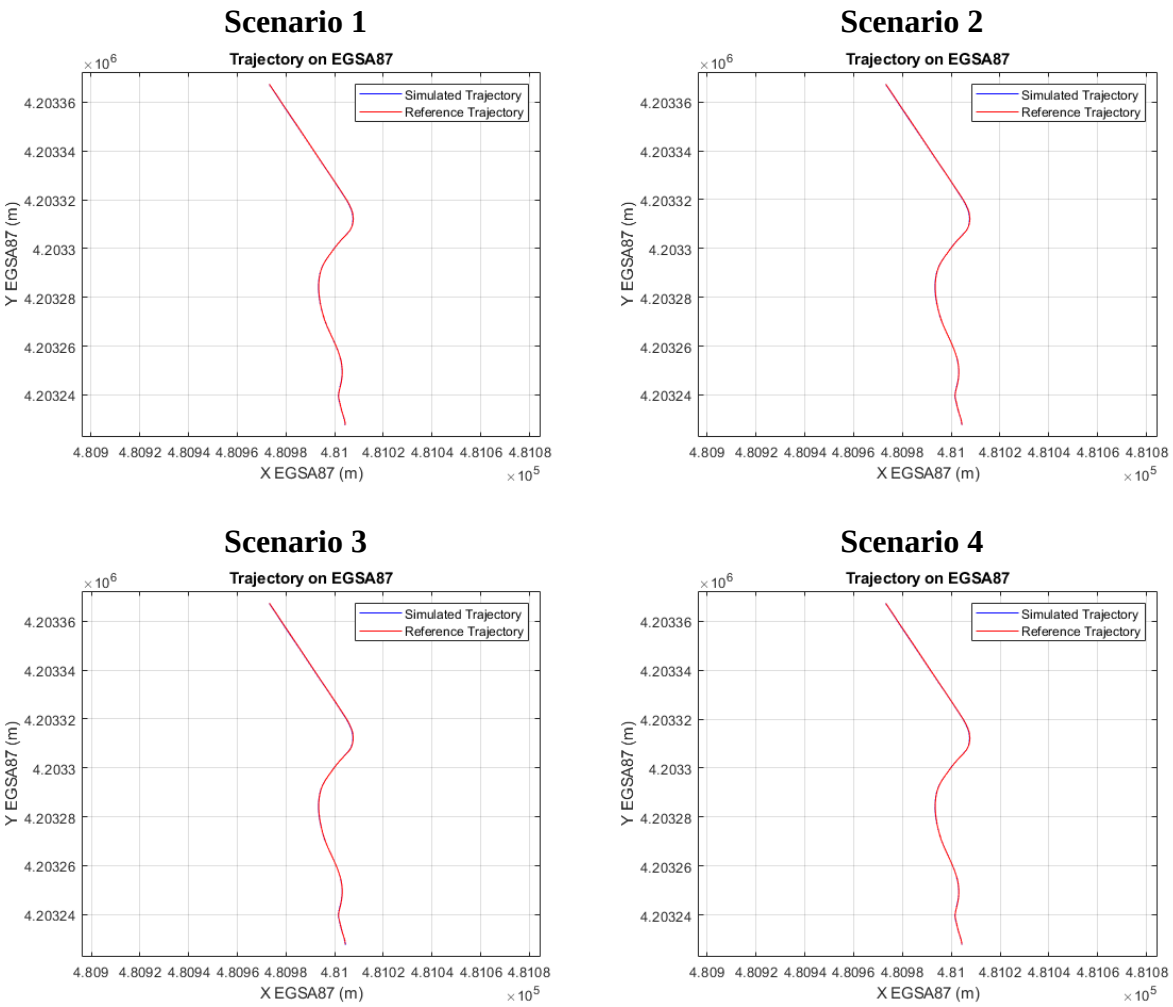
Το τελευταίο διάγραμμα που δημιουργήθηκε, είναι το διάγραμμα της εμπειρικής αθροιστικής κατανομής. Παρατηρείται ότι τα σενάρια 1 και 2 έχουν πολύ μικρότερη διασπορά, ενώ στο σενάριο 3 και 4, η διασπορά είναι ελαφρώς μεγαλύτερη. Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές για τη διασπορά του δείγματος.

Πίνακας 8.4 Ενδεικτικές τιμές της εμπειρικής αθροιστικής κατανομής για την ακρίβειας και την ορθότητα των προσομοιωμένων τροχιών για το δέκτη M8T - Table 8.4 ECDF values for precision and along/ off track error of M8T's simulated trajectories

	Scenario 1			**Scenario 2**			**Scenario 3**			**Scenario 4**		
	50%	**75%**	**95%**	**50%**	**75%**	**95%**	**50%**	**75%**	**95%**	**50%**	**75%**	**95%**
Along Track (m)	0.23	0.33	0.43	0.18	0.29	0.36	0.24	0.26	0.43	0.27	0.33	0.48
Off Track (m)	0.35	0.37	0.38	0.31	0.33	0.34	0.36	0.38	0.42	0.40	0.40	0.44
Precision (m)	0.23	0.26	0.49	0.23	0.26	0.52	0.21	0.24	0.47	0.25	0.26	0.45

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, είναι φανερό ότι το σενάριο με το μεγαλύτερο αριθμός κβάντωσης στις συνιστώσες I&Q, προσέφερε τα καλύτερα αποτελέσματα, όσον αφορά την ακρίβεια και την ορθότητα της τροχιάς. Ωστόσο, σε όλα τα σενάρια εντοπίστηκαν πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τη τροχιά πεδίου, πράγμα αναμενόμενο καθώς τα προσομοιωμένα σήματα δεν ήταν επιβαρυμένα με τα διάφορα σφάλματα που υπεισέρχονται κατά τη διαδικασία των μετρήσεων. Φαίνεται λοιπόν, ότι το SatGen αναπαριστά την εισαχθείσα τροχιά με πάρα πολύ καλό τρόπο, ενώ οι διάφορες αποχές που εντοπίζονται στις τροχιές, οφείλονται στο δέκτη στον οποίο γίνεται η αναπαραγωγή του σεναρίου. Στην επόμενη παράγραφο, γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του δέκτη Mosaic, προκειμένου να επαληθευτεί ο παραπάνω ισχυρισμός. Πρέπει να αποσαφηνιστεί ότι οι προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη Mosaic, συγκρίνονται με αυτές του δέκτη M8T και όχι με της τροχιάς πεδίου. Ο στόχος της συγκεκριμένης σύγκρισης, είναι το πώς διαφοροποιείται το ίδιο σήμα, κατά την αναπαραγωγή του σε διαφορετικούς δέκτες.

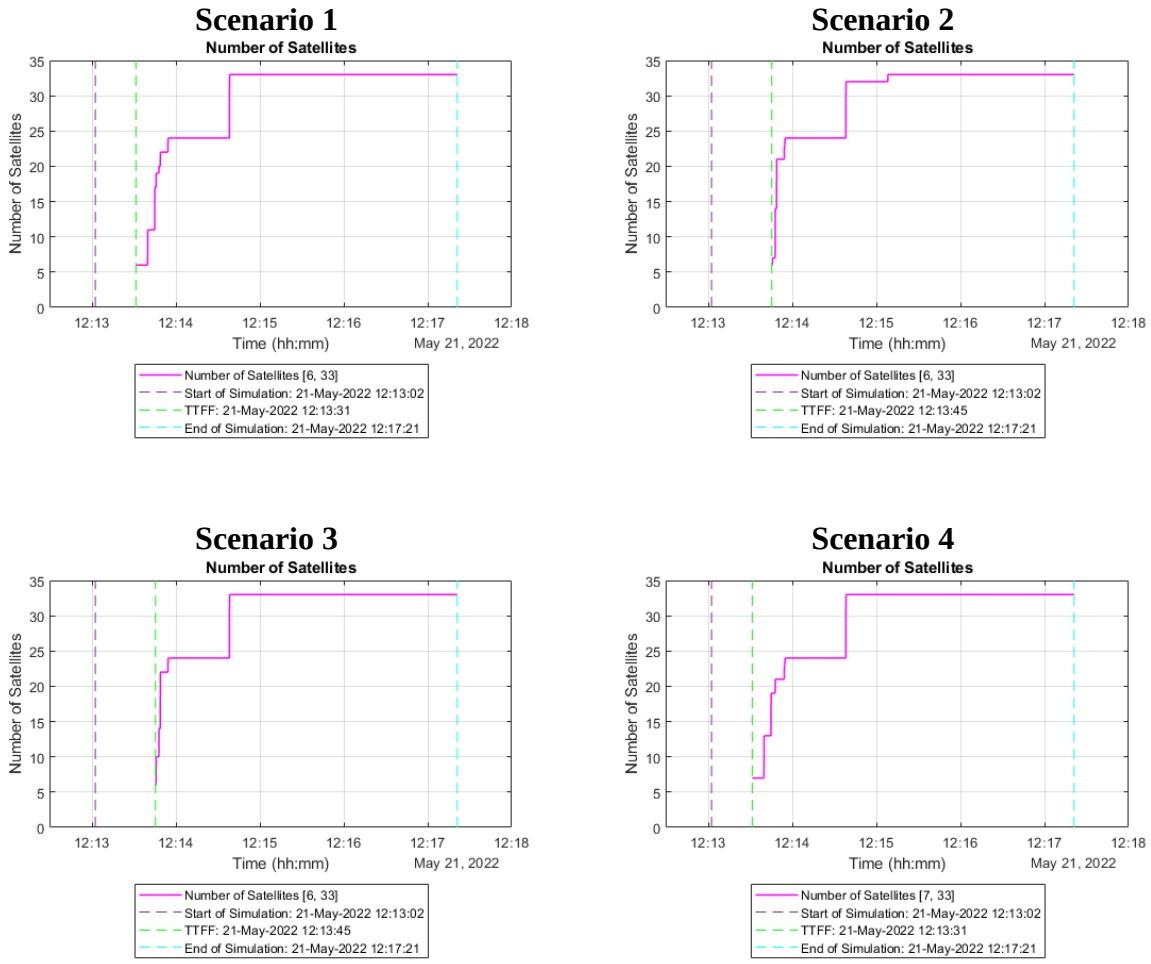
8.3.2 Δέκτης Mosaic



Σχήμα 8.12 Οριζοντιογραφική αναπαράσταση των προσομοιωμένων τροχιών του δέκτη Mosaic - Figure 8.12 Horizontal representation of Mosaic's simulated trajectories

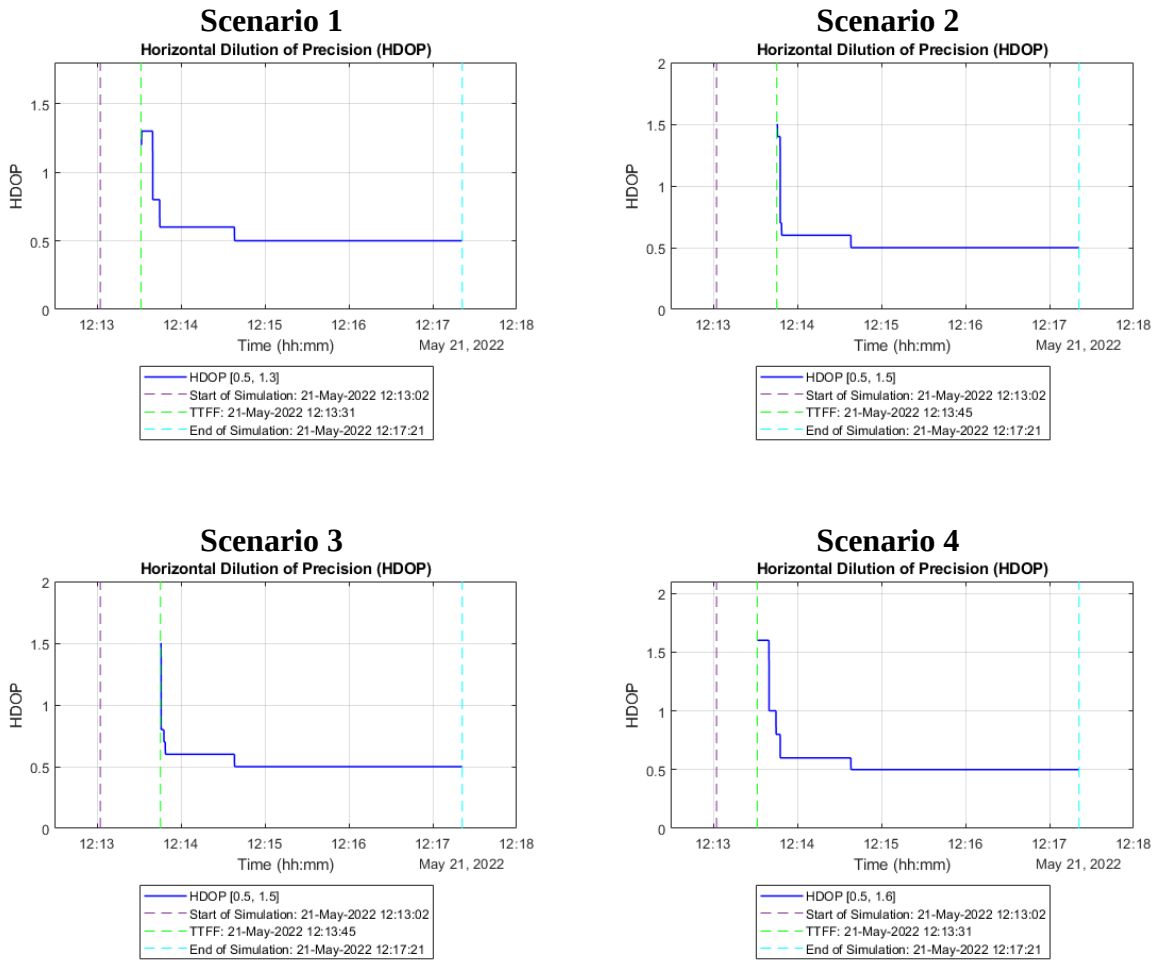
Στο Σχήμα 8.12 φαίνεται η οριζοντιογραφική αναπαράσταση των προσομοιωμένων τροχιών του δέκτη Mosaic, έναντι της τροχιάς αναφοράς. Από έναν πρώτο εποπτικό έλεγχο, φαίνεται ότι οι παραπάνω τροχιές εμφανίζουν πολύ μικρότερες αποχές, σε σχέση με αυτές του δέκτη M8T, το οποίο οφείλεται κυρίως στα διαφορετικά χαρακτηριστικά του δέκτη

Mosaic. Ο δέκτης Mosaic ανήκει στην κατηγορία δεκτών GNSS υψηλού κόστους, οπότε αναμένονται μικρότερες αποχές στην ορθότητά του.



Σχήμα 8.13 Διαγραμματική αναπαράσταση του αριθμού των δορυφόρων των προσομοιωμένων τροχιών του δέκτη Mosaic - Figure 8.13 Number of visible satellites for Mosaic's simulated trajectories

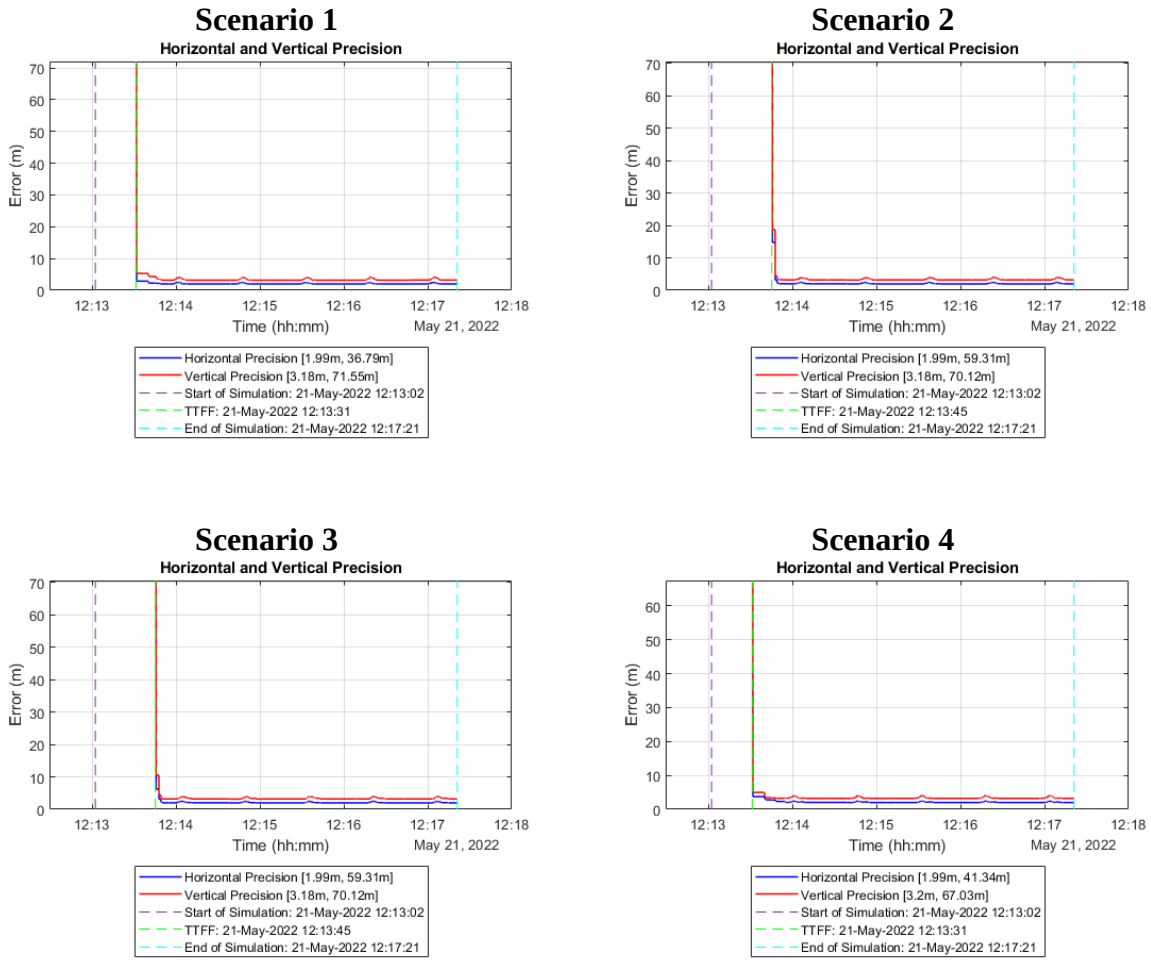
Έντονη διαφορά παρατηρείται και στον αριθμό των διαθέσιμων δορυφόρων. Συγκεκριμένα, ο δέκτης Mosaic παρατήρησε από 6 έως και 33 δορυφόρους, σε σχέση με το δέκτη M8T, ο οποίος παρατήρηση 16 δορυφόρους. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι ο δέκτης Mosaic, μπορεί να παρατηρήσει περισσότερα συστήματα εντοπισμού και να δεχθεί περισσότερες συχνότητες μετάδοσης. Επιπλέον, ο συγκεκριμένος αριθμός δορυφόρων, είναι διπλάσιος από τον αριθμό των παρατηρήσιμων δορυφόρων της τροχιάς αναφοράς. Αυτή η διαφορά οφείλεται και πάλι, στο γεγονός ότι το SatGen δεν λαμβάνει υπόψη του κάποιο υψομετρικό μοντέλο εδάφους, δίνοντας τη δυνατότητα στο δέκτη, να παρατηρήσει όλους τους διαθέσιμους δορυφόρους.



Σχήμα 8.14 Διαγραμματική αναπαράσταση του δείκτη HDOP των προσομοιωμένων τροχιών του δέκτη Mosaic - Figure 8.14 HDOP for Mosaic's simulated trajectories

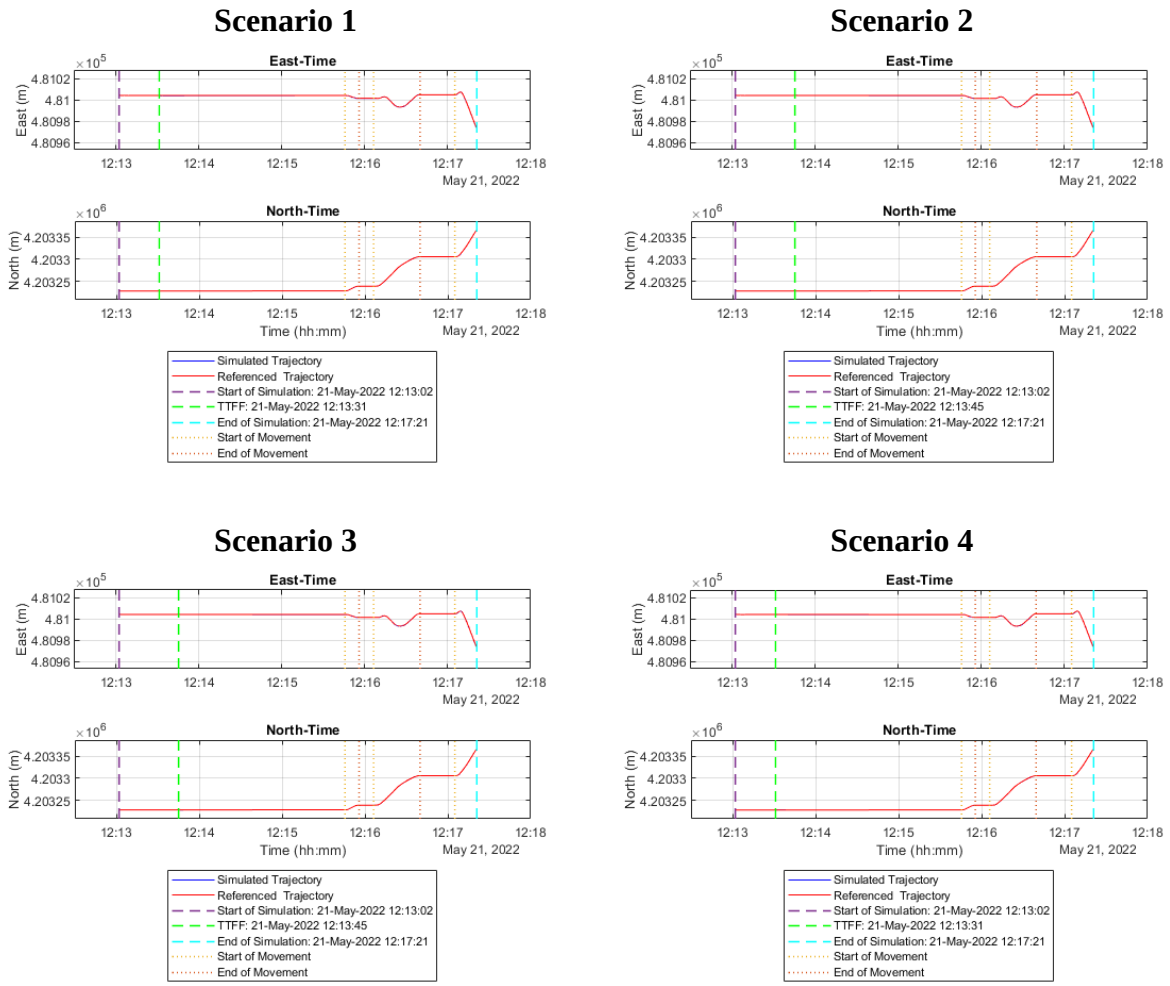
Στο 8.14 φαίνεται ο δείκτης HDOP για κάθε ένα από τα σενάρια προσομοίωσης. Από τη στιγμή που ο δέκτης κατάφερε να εντοπίσει τη θέση και το χρόνο του (TTFF), παρατηρείται μια έντονη μείωση του δείκτη HDOP, ενώ δεν παρατηρούνται επιπλέον μεταβολές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει συνεχόμενη παρατήρηση του δέκτη ως προς τους διαθέσιμους δορυφόρους, καθώς και στο γεγονός ότι δεν υπάρχει μεταβολή στη γεωμετρία του δορυφορικού σχηματισμού. Ο συγκεκριμένος ισχυρισμός, επαληθεύεται από το διάγραμμα του αριθμού των παρατηρήσιμων δορυφόρων.

Τα διαγράμματα που ακολουθούν αφορούν την ακρίβεια και την ορθότητα του δέκτη Mosaic.



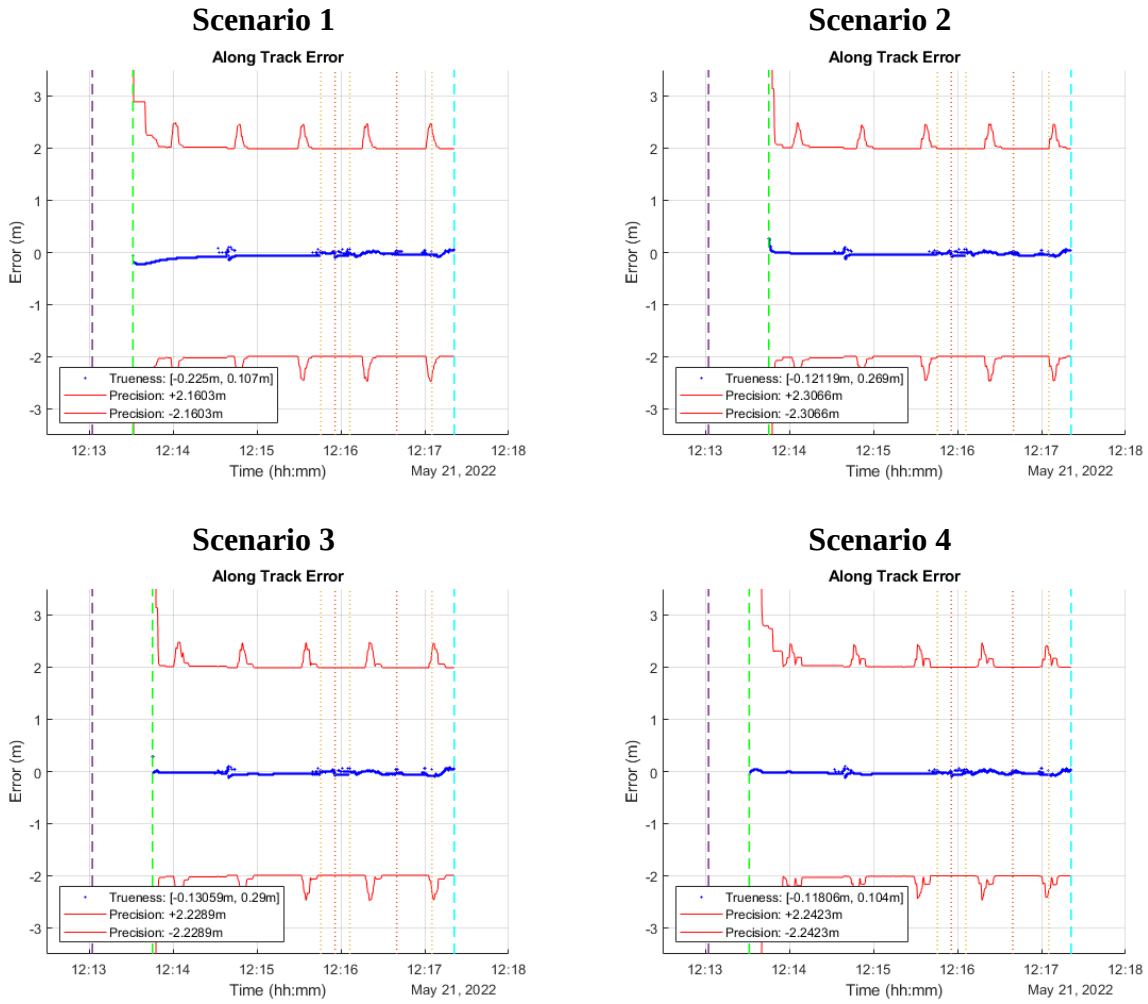
Σχήμα 8.15 Διαγραμματική αναπαράσταση της ακρίβειας του δέκτη Mosaic για τις προσομοιωμένες τροχιές - Figure 8.15 Precision for Mosaic's simulated trajectories

Στο Σχήμα 8.15 φαίνεται η οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια του δέκτη Mosaic για τις προσομοιωμένες τροχιές. Παρατηρούνται πολύ μικρότερες ακρίβειες σε σχέση με αυτές του δέκτη M8T, τόσο οριζοντιογραφικά όσο και υψομετρικά. Πιο συγκεκριμένα, μετά τη στιγμή TTFF η οριζοντιογραφική ακρίβεια του δέκτη Mosaic φτάνει στα 2.0 m, έναντι των 0.2 m που παρατηρούνταν στο δέκτη M8T. Αντίστοιχα, η υψομετρική ακρίβεια φτάνει τα 3.2 m, έναντι των 0.4 m που παρατηρούνταν στο δέκτη M8T. Επιπροσθέτως, παρατηρείται μια επαναληψιμότητα στον τρόπο που κατανέμονται τα διαγράμματα ακρίβειας. Συγκεκριμένα, η οριζοντιογραφική και η υψομετρική ακρίβεια σχηματίζουν μια κορυφή κάθε 45 sec, η οποία μειώνει τις δύο ακρίβειες κατά 50 cm και 90 cm αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη επαναληψιμότητα πιθανότητα οφείλεται στο γεγονός ότι ο δέκτης αναγνωρίζει τα εισερχόμενα σήματα ως Spoofing και γι αυτό, η ακρίβεια που εξάγεται από την επίλυση της θέσης, είναι μια προεπιλεγμένη τιμή για περιπτώσεις standalone positioning.



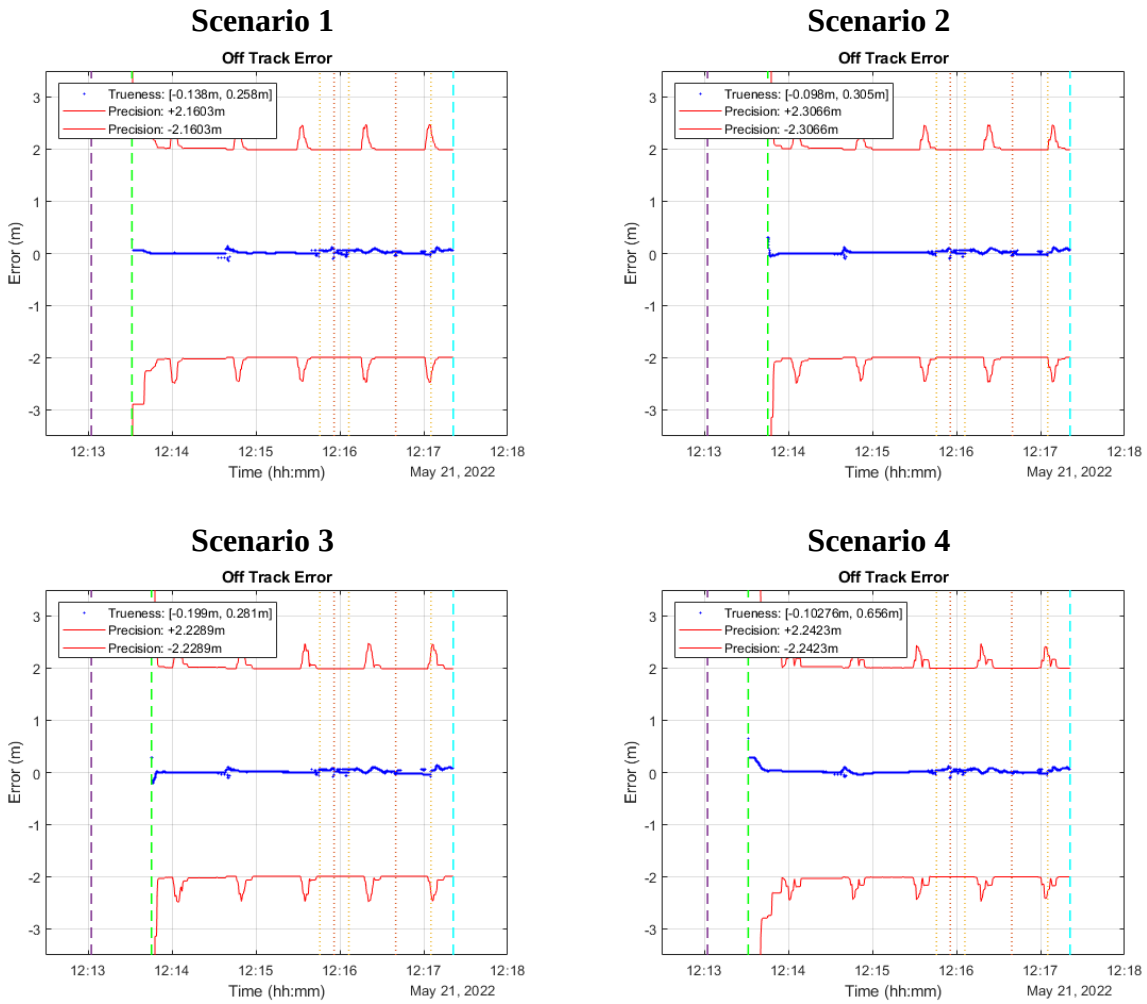
Σχήμα 8.16 Διαγραμματική αναπαράσταση της κίνησης κατά North και East του δέκτη Mosaic για τις προσομοιωμένες τροχιές - Figure 8.16 North and East versus time for Mosaic's simulated trajectories

Στο Σχήμα 8.16 φαίνονται οι αποχές του δέκτη κατά North και East. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα οι δύο τροχιές σχεδόν ταυτίζονται, το οποίο συνεπάγεται πολύ μικρότερες αποχές, Επιπλέον, φαίνονται και τα διαστήματα ακινησίας και κίνησης του δέκτη.



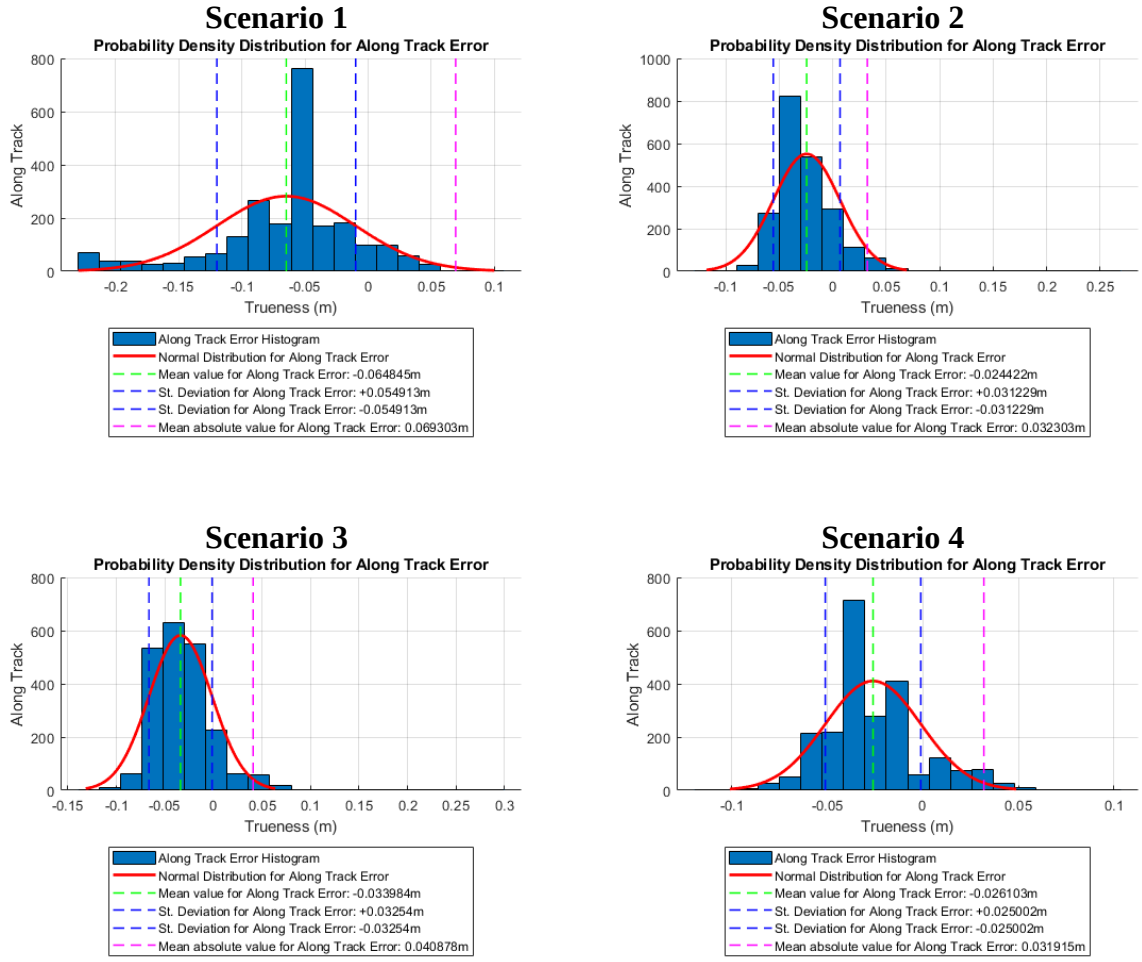
Σχήμα 8.17 Διαγράμματα ορθότητας κατά μήκος της τροχιάς για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη Mosaic - Figure 8.17 Along track error for Mosaic's simulated trajectories

Στο Σχήμα 8.17 φαίνεται η ορθότητα του εντοπισμού των προσομοιωμένων τροχιών, κατά τη διεύθυνση της κίνησης. Το πρώτο πράγμα που παρατηρείται είναι η έντονη διαφοροποίηση της ακρίβειας και της ορθότητας των προσομοιωμένων τροχιών. Συγκεκριμένα, στο σενάριο 1 η ορθότητα κυμαίνεται από -23 cm έως 11 cm, στο σενάριο 2 κυμαίνεται από -12cm έως 27 cm, στο σενάριο 3 από -13 cm έως 30 cm, ενώ στο σενάριο 4 κυμαίνεται από -12 cm έως 10 cm. Φαίνεται λοιπόν, ότι το σενάριο 4 παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα στην κατά μήκος της τροχιάς ορθότητα. Ωστόσο, πρέπει να εξεταστούν και τα υπόλοιπα διαγράμματα ορθότητας, ώστε να εξεταστεί και η διασπορά των παρατηρήσεων.



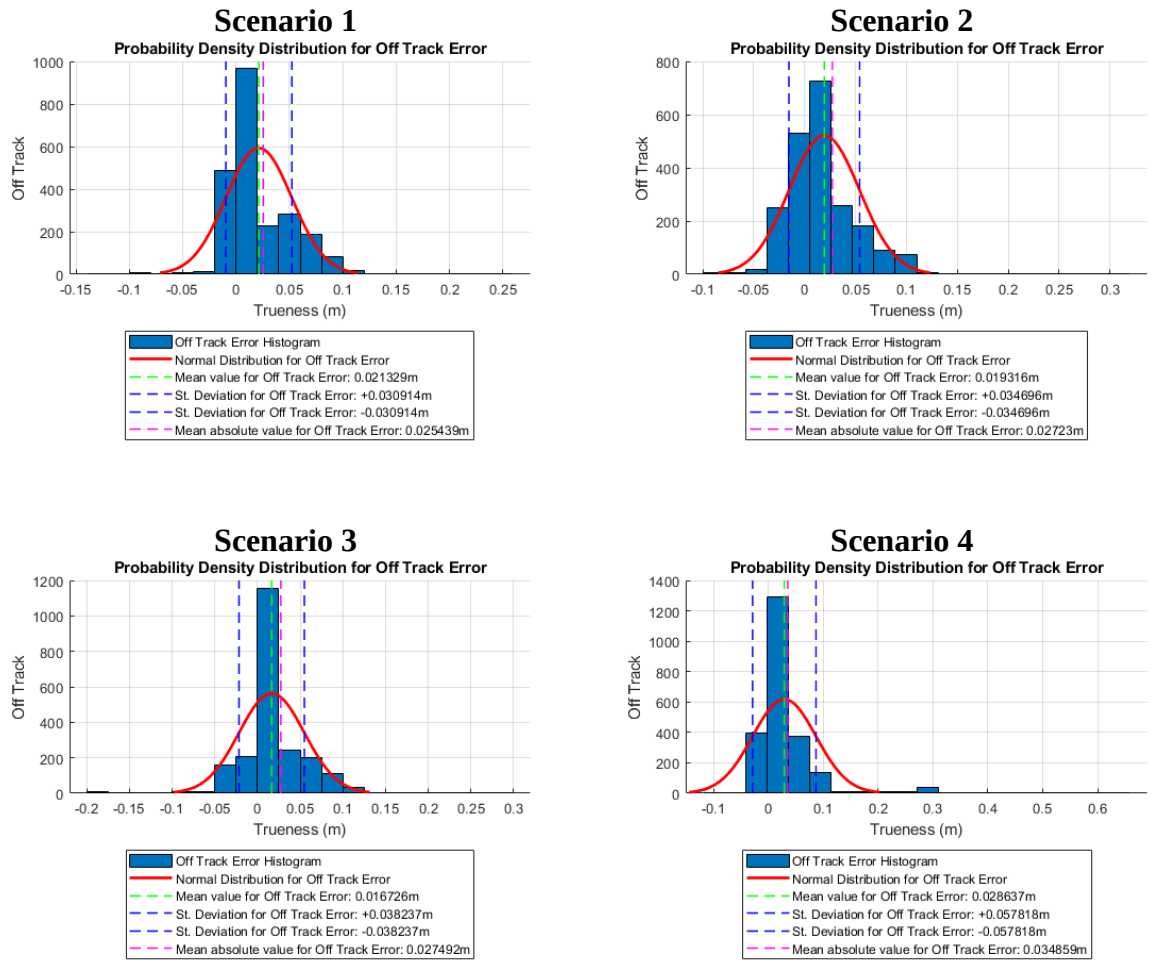
Σχήμα 8.18 Διαγράμματα ορθότητας εγκάρσια της τροχιάς για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη Mosaic - Figure 8.18 Off track error for Mosaic's simulated trajectories

Στο Σχήμα 8.18 φαίνονται τα διαγράμματα ορθότητας εγκάρσια της τροχιάς. Κι στα συγκεκριμένα διαγράμματα, οι αποχές είναι πολύ μικρότερες από αυτές της τροχιάς του M8T. Πιο συγκεκριμένα, στο σενάριο 1 η ορθότητα κατά μήκος της τροχιάς κυμαίνεται από -14 cm έως 26 m, στο σενάριο 2 κυμαίνεται από -10 cm έως 31 cm, στο σενάριο 3 κυμαίνονται από -20 cm έως 28 cm, ενώ στο σενάριο 4 κυμαίνεται από -10 cm έως 67 cm. Για τα σφάλματα εγκάρσια της τροχιάς, τα καλύτερα αποτελέσματα τα έδωσαν τα σενάρια 1 και 2, ωστόσο πρέπει να ελεγχθεί η διασπορά των σεναρίων, προκειμένου να εξαχθεί ένα ορθολογικό συμπέρασμα.



Σχήμα 8.19 Διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας της ορθότητας κατά μήκος της τροχιάς για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη Mosaic - Figure 8.19 PDD of along track error for Mosaic's simulated trajectories

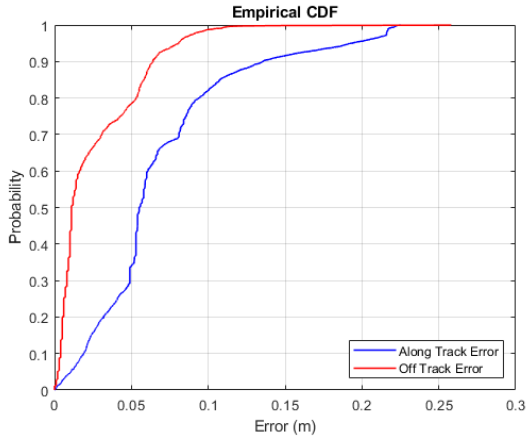
Στο Σχήμα 8.19 φαίνονται τα διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας της ορθότητας, κατά μήκος της τροχιάς. Τα συγκεκριμένα διαγράμματα, επαληθεύουν το γεγονός ότι ο δέκτης Mosaic παρέχει μεγαλύτερη ορθότητα από ότι ο δέκτης M8T, καθώς οι διασπορές των αποχών είναι πολύ μικρότερες. Τα σενάρια με τα μεγαλύτερα ποσοστά ορθότητας, είναι το 2 και 3, καθώς σε αυτά εντοπίζεται μικρή διασπορά. Πιο συγκεκριμένα και στα δύο σενάρια, το μεγαλύτερο ποσοστό των μετρήσεων βρίσκεται εντός της τυπικής απόκλισης του δείγματος, ενώ στο σενάριο 3 το μεγαλύτερο ποσοστό των αποχών, βρίσκεται κοντά στη μέση τιμή του δείγματος. Στα σενάριο 1, 2 και 3, το μεγαλύτερο ποσοστό των παρατηρήσεων βρίσκεται ανάμεσα στη μέση τιμή και το αρνητικό άκρο της τυπικής απόκλισης του δείγματος, ενώ φαίνεται ότι τα σενάρια 1 και 3 να έχουν μεγαλύτερη διασπορά. Ωστόσο, σε όλα τα διαγράμματα παρατηρείται μια συστηματική απόχη της τάξης των -4 cm, από το μηδέν.



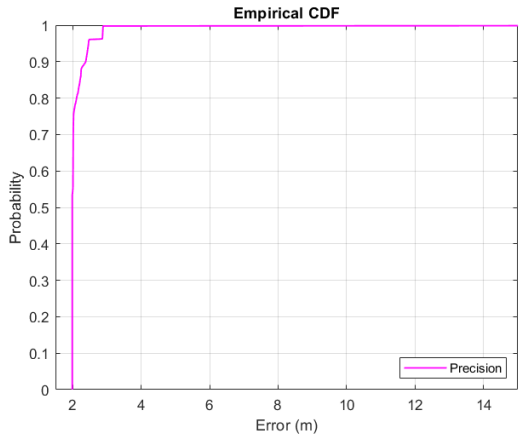
Σχήμα 8.20 Διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας της ορθότητας εγκάρσια της τροχιάς για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη Mosaic - Figure 8.20 PDD of off track error for Mosaic's simulated trajectories

Στο Σχήμα 8.20 φαίνονται τα διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας εγκάρσια της τροχιάς. Στα συγκεκριμένα διαγράμματα, παρατηρούνται μικρότερες αποχές, καθώς η συστηματική αποχή από το μηδέν, είναι της τάξης των 3 cm. Τα διαγράμματα με τη μικρότερη διασπορά είναι και σε αυτή την περίπτωση των σεναρίων 2 και 3, ενώ σε όλα τα διαγράμματα, το μεγαλύτερο ποσοστό των αποχών βρίσκεται κοντά στη μέση τιμή του δείγματος. Από τα δύο διαγράμματα της πυκνότητας πιθανότητας της ορθότητας, προκύπτει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των αποχών οφείλεται κυρίως στις αποχές κατά μήκος της τροχιάς.

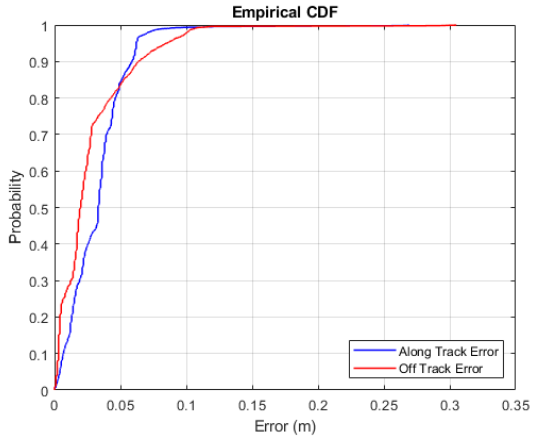
Scenario 1



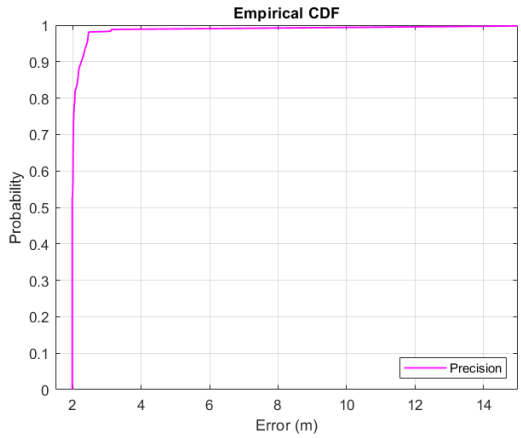
Scenario 1



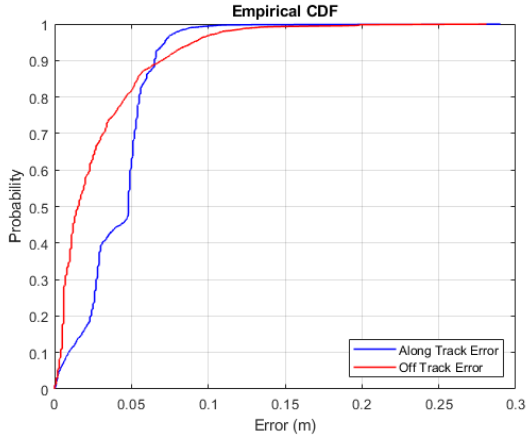
Scenario 2



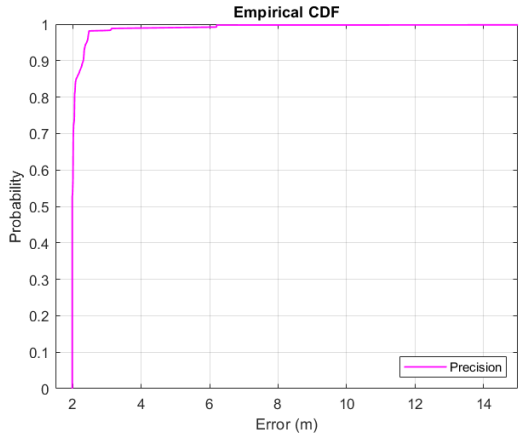
Scenario 2

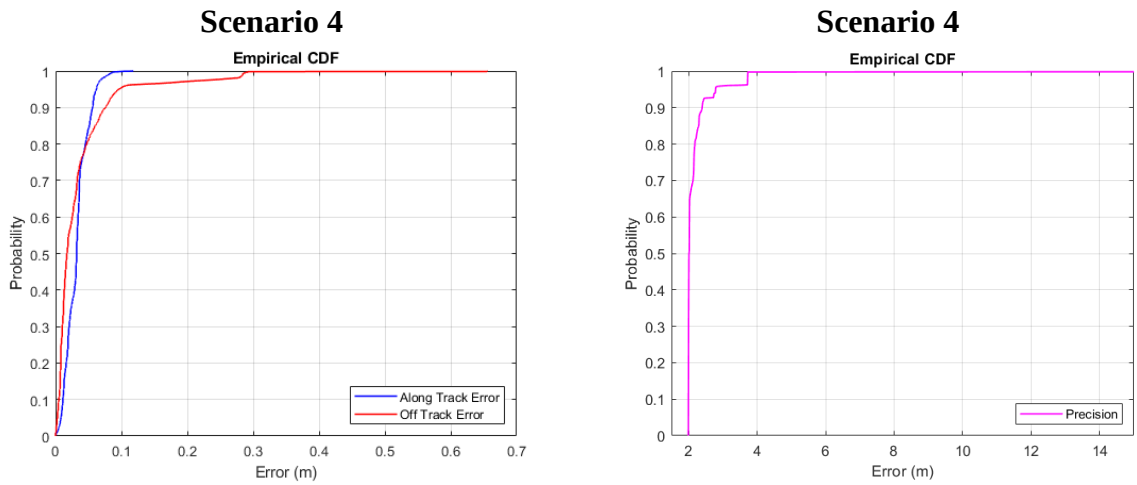


Scenario 3



Scenario 3





Σχήμα 8.21 Διαγράμματα εμπειρικής αθροιστικής κατανομής της ορθότητας και της ακρίβειας για τις προσομοιωμένες τροχιές του δέκτη Mosaic - Figure 8.21 ECDF of trueness and precision for Mosaic's simulated trajectories

Το τελευταίο διάγραμμα που δημιουργήθηκε, είναι το διάγραμμα της εμπειρικής αθροιστικής κατανομής. Παρατηρείται ότι τα σενάρια 2 και 3 έχουν πολύ μικρότερη διασπορά, το οποίο επαληθεύεται και από τα διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας. Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές για τη διασπορά του δείγματος.

Πίνακας 8.5 Ενδεικτικές τιμές της εμπειρικής αθροιστικής κατανομής για την ακρίβειας και την ορθότητα των προσομοιωμένων τροχιών για το δέκτη Mosaic - Table 8.5 ECDF values for precision and along/ off track error of Mosaic's simulated trajectories

	Scenario 1			**Scenario 2**			**Scenario 3**			**Scenario 4**		
	50%	**75%**	**95%**	**50%**	**75%**	**95%**	**50%**	**75%**	**95%**	**50%**	**75%**	**95%**
Along Track (m)	0.06	0.09	0.19	0.03	0.04	0.09	0.05	0.05	0.07	0.03	0.04	0.10
Off Track (m)	0.01	0.04	0.08	0.02	0.03	0.06	0.02	0.04	0.09	0.02	0.04	0.10
Precision (m)	1.99	2.03	2.47	1.99	2.03	2.42	1.99	2.05	2.41	2.02	2.16	2.79

Από την παραπάνω ανάλυση, φαίνεται ότι τα λιγότερα καλά αποτελέσματα προέκυψαν από το σενάριο 1, ενώ από τα υπόλοιπα τρία σενάρια, φαίνεται ότι τα σενάρια 2 και 3 έχουν τα καλύτερα αποτελέσματα, όσον αφορά την ορθότητα του δέκτη. Επιπλέον, οι υψηλές τιμές στην ορθότητα του δέκτη, σε συνδυασμό με τις χαμηλές τιμές στην ακρίβειά του, ενισχύει τον ισχυρισμό ότι οι τιμές ακρίβειας, φαίνονται ότι είναι κάποιες προεπιλεγμένες τιμές σε περιπτώσεις Spoofing, καθώς από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη, η ακρίβεια του δέκτη σε standalone positioning είναι της τάξης των 1.2 m.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

9.1 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση του κεφαλαίου 8. ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ – ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΡΟΧΙΩΝ, μπορούν να κατατμηθούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αξιολογεί ολόκληρο το περιβάλλον παρατήρησης, στο οποίο πραγματοποιήθηκε η πειραματική διαδικασία. Η δεύτερη κατηγορία αφορά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την αξιολόγηση των δύο δεκτών, χρησιμοποιώντας την ίδια τροχιά.

9.1.1 Αξιολόγηση ως προς το Περιβάλλον Παρατήρησης

Η συγκεκριμένη αξιολόγηση αφορά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη δημιουργία, αναπαραγωγή και ανάλυση των προσομοιωμένων σημάτων. Τα πρώτα γενικού τύπου συμπεράσματα, είναι ότι και το Record and Replay σύστημα της LabSat, αλλά και το λογισμικό SatGen είναι αρκετά εύκολα στη χρήση τους, ενώ δεν χρειάζεται κάποια εξειδικευμένη γνώση, για την αξιοποίησή τους. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί και η σημαντικότητά τους στην αξιολόγηση τροχιών. Εκτός του σταδίου των παρατηρήσεων υπαίθρου, η όλη διαδικασία έγινε απευθείας στο γραφείο, σε ένα πλήρως ελεγχόμενο περιβάλλον, ενώ όποτε ήταν απαραίτητο, επαναλαμβανόταν το εκάστοτε σενάριο, χωρίς να απαιτούνται νέες παρατηρήσεις υπαίθρου. Η συγκεκριμένη διαδικασία προσφέρει αμεσότητα, καθώς ο χρόνος επανάληψης είναι ο μοναδικός παράγοντας που επηρεάζει το χρόνο της αναπαραγωγής των προσομοιωμένων σημάτων, αλλά και ακεραιότητα μεταξύ των επαναλήψεων, καθώς η πειραματική διάταξη παραμένει σταθερή, καθόλη τη διάρκεια αναπαραγωγής.

Από την αναπαραγωγή και ανάλυση των προσομοιωμένων σημάτων, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Κατά τη δημιουργία των προσομοιωμένων τροχιών, θα πρέπει να γίνεται έλεγχος της διαθεσιμότητας της μνήμης του LabSat, προκειμένου να αποφεύγονται προβλήματα μνήμης κατά την αναπαραγωγή των σεναρίων
- Τα σήματα με αριθμό κβάντωσης 3 bit, θα πρέπει να εισάγονται απευθείας στην εσωτερική μνήμη του LabSat, προκειμένου να αποφεύγονται προβλήματα μνήμης, ενώ σήματα με αριθμό κβάντωσης 1 bit και 2 bits, μπορούν να αποθηκεύονται απευθείας στον NAS
- Το εύρος των 56 MHz δεν επηρεάζει το στάδιο αναπαραγωγής των σημάτων, καθώς τα περισσότερα σήματα των GNSS έχουν εύρος null-to-null πολύ μικρότερο από τα 56 MHZ
- Εμφανίστηκαν έντονες διαφοροποιήσεις τόσο στα ποιοτικά, όσο και στα ποσοτικά χαρακτηριστικά μεταξύ της τροχιάς πεδίου και των προσομοιωμένων τροχιών του δέκτη M8T. Οι διαφοροποιήσεις αυτές, οφείλονται κυρίως στο περιβάλλον παρατήρησης, καθώς το περιβάλλον της τροχιάς πεδίου περιλάμβανε ψηλά δέντρα και κτίρια, δηλαδή παράγοντες που δυσχεραίνουν την παρακολούθηση των διαθέσιμων δορυφόρων. Επιπλέον, είναι πολύ πιο έντονη η επίδραση των σφαλμάτων που οφείλονται σε πολυανάκλαση. Το περιβάλλον των προσομοιωμένων τροχιών, είναι ένα ιδανικό περιβάλλον όπου δεν εντοπίζονται

υψομετρικά εμπόδια για να εμποδίσουν την παρακολούθηση των διαθέσιμων δορυφόρων, ενώ δεν υπεισέρχονται τα σφάλματα της πολυανάκλασης

- Ο μοναδικός παράγοντας που φαίνεται να επηρεάζει τις τροχιές του SatGen, είναι ο δέκτης στον οποίο έγινε η αναπαραγωγή των σεναρίων. Οι τροχιές που προέκυψαν σχεδόν ταυτίζονταν με την τροχιά από το NMEA που εισήχθη στο SatGen ως δεδομένο εισόδου, ενώ οι διαφοροποιήσεις που προέκυπταν, οφειλόντουσαν κυρίως στο δέκτη και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του

9.1.2 Αξιολόγηση ως προς τον τύπο των Δεκτών

Η συγκεκριμένη αξιολόγηση αφορά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των δύο δεκτών. Για την καλύτερη κατανόηση της αξιολόγησης, δημιουργήθηκαν δύο συγκεντρωτικοί πίνακες. Στον Πίνακα 8.6 παρουσιάζονται τα δεδομένα που αφορούν μεμονωμένα την κάθε τροχιά, ενώ στον Πίνακα 8.7 παρουσιάζονται τα δεδομένα που αφορούν τη σύγκριση της κάθε τροχιάς, με την τροχιά αναφορά.

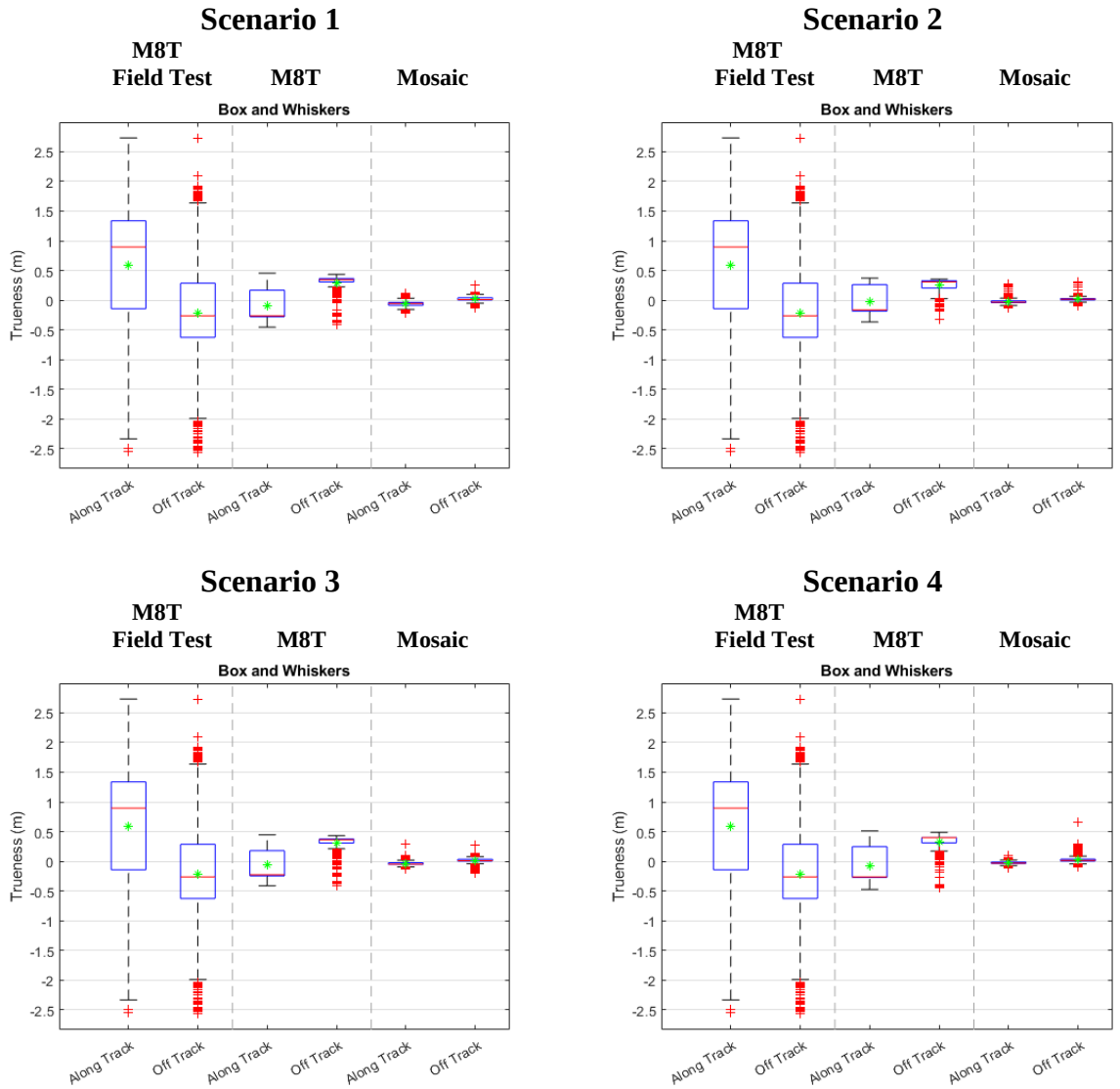
Πίνακας 8.6 Σύγκριση τροχιών με βάση τα μεμονωμένα χαρακτηριστικά τους - Table 8.6 Trajectories comparison based on their unique values

		Reference Trajectory	**M8T Field Test**	**M8T**				**Mosaic**			
Scenarios				**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**
Number of Satellites	min	8	11	16	16	16	16	6	6	6	7
	max	27	16	16	16	16	16	33	33	33	33
HDOP	min	0.2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5
	max	2.3	0.9	0.7	0.7	0.7	0.6	1.3	1.5	1.5	1.6
Horizontal Accuracy (m)	min	0.001	0.47	0.22	0.21	0.21	0.24	1.99	1.99	1.99	1.99
	max	0.007	1.06	0.90	0.83	0.83	0.78	2.45	2.45	2.47	2.44
Vertical Accuracy (m)	min	0.002	1.12	0.38	0.36	0.36	0.40	3.18	3.18	3.18	3.20
	max	0.006	2.32	1.48	1.39	1.39	1.31	4.19	4.06	3.93	4.03

Πίνακας 8.7 Σύγκριση τροχιών με βάση την ορθότητα - Table 8.7 Trajectories comparison based on their trueness

	M8T Field Test	**M8T**				**Mosaic**			
Scenarios		**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**
Along Track Error									
Mean Value (m)	0.59	-0.09	-0.03	-0.07	-0.08	-0.07	-0.02	-0.04	-0.03
St. Deviation (m)	±1.03	±0.29	±0.24	±0.27	±0.31	±0.06	±0.03	±0.03	±0.03
Mean Absolute Value (m)	0.98	0.29	0.23	0.27	0.31	0.07	0.03	0.04	0.03
50% (m)	1.05	0.23	0.18	0.24	0.27	0.06	0.03	0.05	0.03
75% (m)	1.40	0.33	0.29	0.26	0.33	0.06	0.04	0.05	0.04
95% (m)	2.10	0.43	0.36	0.43	0.48	0.19	0.09	0.07	0.10
Off Track Error									
Mean Value (m)	-0.22	0.29	0.25	0.30	0.33	0.02	0.02	0.02	0.03
St. Deviation (m)	±0.92	±0.13	±0.13	±0.14	±0.15	±0.03	±0.04	±0.04	±0.06
Mean Absolute Value (m)	0.73	0.31	0.26	0.32	0.35	0.03	0.03	0.03	0.04
50% (m)	0.52	0.35	0.31	0.36	0.40	0.01	0.02	0.02	0.02
75% (m)	1.14	0.37	0.33	0.38	0.40	0.04	0.03	0.04	0.04
95% (m)	1.89	0.38	0.34	0.42	0.44	0.08	0.06	0.09	0.10

Επιπροσθέτως, δημιουργήθηκε το θηκόγραμμα της ορθότητας των προσομοιωμένων τροχιών, για τη συγκριτική αξιολόγηση των δεκτών.



Σχήμα 9.1 Θηκόγραμμα για την ορθότητα των προσομοιωμένων τροχιών - Figure 9.1 Box and whiskers plots for the trueness of the simulated trajectories

Στο Σχήμα 9.1 φαίνονται:

- Με πράσινο χρώμα η μέση τιμή του δείγματος
- Με κόκκινη γραμμή η διάμεσος του δείγματος
- Το ανώτερο όριο του μπλε πλαισίου αφορά το 75% του δείγματος, καλείται 3° τεταρτημόριο και συμβολίζεται με Q3
- Το κατώτερο όριο του μπλε πλαισίου αφορά το 25% του δείγματος, καλείται 1° τεταρτημόριο και συμβολίζεται με Q1, ενώ η διαφορά Q3 – Q1 καλείται ενδοτεταρτημοριακό εύρος και συμβολίζεται με IQR (Interquartile Range)
- Το ανώτερο όριο της γκρι γραμμής αφορά τη μέγιστη τιμή του δείγματος που είναι μικρότερη ή ίση από την ποσότητα Q3 + 1.5*IQR (Upper Adjacent)
- Το κατώτερο όριο της γκρι γραμμής αφορά την ελάχιστη τιμή του δείγματος που είναι μεγαλύτερη ή ίση από την ποσότητα Q1 – 1.5* IQR (Lower Adjacent)

- Με κόκκινο σταυρόνημα οι τιμές του δείγματος που παρουσιάζουν μεγάλη αποχή από τη διάμεσο και καλούνται έκτροπες τιμές (Outlier)

Το συγκεκριμένο διάγραμμα περιλαμβάνει ένα ποιοτικό τρόπο, οπτικοποίησης του εύρους και της κατανομής ενός δείγματος. Τα αποτελέσματα του θηκογράμματος, επαληθεύουν τα σχόλια που προέκυψαν από την ανάλυση των διαγραμμάτων πυκνότητας πιθανότητας και εμπειρικής αθροιστικής κατανομής. Συγκεκριμένα, ο δέκτης M8T παρουσιάζει μεγαλύτερη διασπορά στις αποχές κατά τη διεύθυνση της κίνησης, ενώ στις αποχές κάθετα στη διεύθυνση της κίνησης εντοπίζεται η συστηματική αποχή στα διαστήματα ακινησίας. Ο δέκτης Mosaic παρουσιάζει πολύ μικρότερες αποχές στην ορθότητα, ενώ οι αποχές κάθετα στη διεύθυνση της κίνησης, περιλαμβάνουν αρκετές τιμές οι οποίες είναι αρκετά απομακρυσμένες από τη διάμεσο του δείγματος.

Από τους παραπάνω πίνακες, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η ορθότητα του δέκτη M8T στις προσομοιωμένες τροχιές, φαίνεται να βελτιώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των bit των συνιστωσών I&Q, ενώ η μείωση του C/N_0 δεν επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του δέκτη
- Η οριζοντιογραφική και υψομετρική ακρίβεια του δέκτη M8T στις προσομοιωμένες τροχιές, είναι αρκετά υψηλή σε σχέση με αυτές της τροχιάς πεδίου, ενώ δεν παρατηρήθηκαν διακυμάνσεις σε αυτές. Ωστόσο, τα αποτελέσματα του M8T δεν μπορούν να θεωρηθούν ρεαλιστικά, καθώς το σήμα του SatGen είναι ένα ιδανικό σήμα, το οποίο δεν μπορεί να ανακτηθεί από πραγματικές παρατηρήσεις πεδίου. Ο ισχυρισμός αυτός επαληθεύεται και από την τροχιά πεδίου του M8T
- Η ορθότητα του δέκτη Mosaic στις προσομοιωμένες τροχιές, είναι αρκετά υψηλή σε σχέση με αυτή του M8T, το οποίο δικαιολογείται από τη διαφορά στην απόδοση των δύο δεκτών. Επιπλέον, φαίνεται ότι τα σενάρια 2 και 3 έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα, το οποίο υποδεικνύει την ευαισθησία του δέκτη και σε χαμηλής ισχύς σήματα, αλλά και σε σήματα με μεγαλύτερο αριθμό κβάντωσης
- Η ακρίβεια του δέκτη Mosaic είναι αρκετά χαμηλή, σε σχέση με την απόδοση και την ορθότητα του δέκτη. Ο πιθανότερος λόγος γι αυτό, είναι επειδή ο δέκτης αναγνώριζε το λαμβανόμενο σήμα ως Spoofing και το εξαγόμενο αποτέλεσμα, αναφέρεται σε μια προκαθορισμένη τιμή ακρίβειας για standalone positioning
- Τέλος, και τα αποτελέσματα του Mosaic αναφέρονται σε ένα ιδανικό σήμα το οποίο δεν μπορεί να ανακτηθεί από πραγματικές μετρήσεις πεδίου. Η σύγκριση των δύο δεκτών σε μια ρεαλιστική εφαρμογή, αφορά στάδιο προμελέτης για τον έλεγχο της απόδοσης των δεκτών ή την επιλογή του καταλληλότερου δέκτη

9.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Η πρώτη πρόταση για περαιτέρω έρευνα, αφορά την αναπαραγωγή τροχιών σε μικρότερο εύρος συχνοτήτων. Για την αναπαραγωγή των σεναρίων προσομοίωσης της παρούσας Διπλωματικές Εργασίας, χρησιμοποιήθηκε ένα εύρος των 56 MHz. Θα είχε ενδιαφέρον η μεμονωμένη παρατήρηση ενός δορυφορικού συστήματος, στα εύρη των 10 και 30 MHz από ένα δέκτη GNSS χαμηλού και υψηλού κόστους, προκειμένου να εντοπιστούν διαφορές, στην ανάκτηση του δορυφορικού σήματος, καθώς και στα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της θέσης (αριθμός παρατηρήσιμων δορυφόρων, DOP, ακρίβεια, ορθότητα).

Η δεύτερη πρόταση αφορά την αξιολόγηση εναέριων τροχιών. Στη παρούσα εργασία, το μεγαλύτερο βάρος δόθηκε κατά την οριζοντιογραφική διάσταση των τροχιών. Σε μια εναέρια εφαρμογή, σημαντικός παράγοντας είναι και η υψομετρική διάσταση, αλλά και οι διάφορες δυναμικές που αναπτύσσονται. Θα μπορούσε να δοκιμαστεί η αξιοποίηση ενός δέκτη GNSS χαμηλού κόστους σε μια εναέρια πτήση και να ελεγχθούν οι διαφορές μεταξύ μιας πραγματικής και μιας προσομοιωμένης τροχιάς. Το μεγαλύτερο βάρος θα μπορούσε να δοθεί κατά την απογείωση και προσγείωση του οχήματος, καθώς αυτές οι δύο καταστάσεις, αποτελούν τα πιο κρίσιμα σημεία της πτήσης.

Η τρίτη και τελευταία πρόταση αφορά τη σύγκριση μιας προσομοιωμένης και μιας πραγματικής τροχιάς. Πιο συγκεκριμένα, θα μπορούσαν να εντοπιστούν ποιες μεταβολές της πραγματικής τροχιάς οφείλονται σε multipath, έχοντας ως μέτρο σύγκρισης την προσομοιωμένη τροχιά, η οποία δεν περιέχει τα συγκεκριμένα σφάλματα. Μια τέτοια πρόταση, θα είχε ιδιαίτερο νόημα σε εφαρμογή πλοήγησης/ αυτόνομής πλοήγησης σε αστικό περιβάλλον, όπου οι τιμές των συγκεκριμένων σφαλμάτων είναι αρκετά υψηλές.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] R. Priemer (1990), Introductory Signal Processing, World Scientific, Singapore
- [2] José M. Amigo, *Hyperspectral Imaging*, (2019), Elsevier B. V.
- [3] William K. Blake, *Mechanics Flow-Induced Sound and Vibration*, (2017), Academic Press
- [4] John C. Lindon (2000), *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectro*metry, Academic Press
- [5] White House (2000), *Statement by the President regarding the United States' Decision to stop degrading Global Positioning System Accuracy*, 1 May 2000.
- [6] R. Gold (1967), *Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing*, IEEE Transactions on Information Theory (Correspondence)
- [7] Bradford W. Parkinson, P. Enge, P. Axelrad, James J. Spilker Jr, *Global Position System: Theory and Applications Volume 2*, (1 January 1996), American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 370 L'Enfant Promenade, SW, Washington, DC 20024-2518 https://www.youtube.com/watch?v=o1Fyn_h6LKU&list=PLGvhNIiu1ubyEOJga50LJMzVXtbUq6CPo&index=2
- [8] *Galileo Initial Service*, (9 December 2016), GSA.EUROPA, https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/services/initial-services
- [9] P.A Dafesh (6 August 2002), *Coherent Adaptive Sub-carrier Modulation Method*, Patent US 6,430,213
- [10] E. Rebeyrol, C. Macabiau, L. Lestarquit, L. Ries, J-L. Issler, M.L. Boucheret, M. Bousquet *BOC Power Spectrum Densities*, Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, ION-NTM 2005, 24-26 January 2005, Long Beach, California, USA
- [11] C. Fernandez-Prades, J. Arribas, P. Closas, C. Aviles, and L. Esteve, *GNSS-SDR: an open source tool for researchers and developers*, in Proc. of the ION GNSS 2011 Conference, (Portland, Oregon), Sept. 2011.
- [12] G. Kahn, *The semantics of a simple language for parallel programming, in Information processing*, J. L. Rosenfeld, Ed., Stockholm, Sweden, August 1974, pp. 471-475, North Holland
- [13] Andrew S. Tanenbaum, Herber Bos (2015), *Modern Operating Systems*, Pearson
- [14] R. O'Callahan, C. Jones, N. Froyd, K. Huey, A. Noll, and N. Partush, *Engineering Record and Replay For Deployability: Extended Technical Report*, CoRR **abs/1705.05937** (2017), https://arxiv.org/abs/1705.05937
- [15] R. L. Reaser (2002) *GPS User Equipment (Phase III) Interface Control Document for the Precise Time and Time Interval (PTTI) Interface*, ICD-GPS-060B
- [16] J. L. Buie (1966), *Coupling Transistor Logic and Other Circuit*, TRW Semiconductors Inc
- [17] W. Lawrenz, N. Obermoller (2011), *CAN: Controller Area Network: Grundlagen, Design, Anwendungen, Testtechnik*, VDE Verlag
- [18] S. Corrigan (August 2002), *Introduction to Controller Area Network (CAN)*, Texas Instruments https://www.ti.com/lit/an/sloa101b/sloa101b.pdf?ts=1667881312935&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.co.in%252F
- [19] Squarell Support (2013), *CAN high / CAN low*, December 2013, https://support.squarell.com/index.php?/Knowledgebase/Article/View/94/0/can-high--can-low

- [20] John M. Evans Jr., Joseph T. O'Neill, John L. Little, James S. Albus, Anthony J. Barbera, Dennis W. Fife, Elizabeth N. Fong, David E. Gilsinn, Frances E. Holberton, Brian G. Lucas, Gordon E. Lyon, Beatrice A. S. Marron, Albercht J. Neumann, Mabel V. Vick (October 1976), *Standards for Computer Aided Manufacturing (Second Interim Report ed.), Office of Developmental Automation and Control Technology, Institute for Computer Sciences and Technology*, National Bureau of Standards, Washington, DC, USA, Manufacturing Technology Division, Air Force Materials Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio 45433, NBSIR 76-1094, retrieved 2017-03-04
- [21] V. Gikas, T. Mpimis, *RobPos4VApp*, 2020, http://robpos4vapp.survey.ntua.gr/index.html
- *Analogue to Digital Tutorial*, Electronics Tutorials, https://www.electronics-tutorials.ws/combination/analogue-to-digital-converter.html
- *Change Topic: Pseudorandom Noise (PRN) Expansion*, (October 2009), GPS.GOV, https://www.gps.gov/technical/icwg/meetings/2011/09/13/WAS-IS-FINAL_PRN_Expansion_4May2011.pdf
- E. Onajite (2014), *Seismic Data Analysis Techniques in Hydrocarbon Exploration*, Elsevier
- Frank Van Diggelen, *A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS*, (31 March 2009), Artech House
- I. Rosu, *Automatic Gain Control (AGC) in Receivers*, YO3DAC/ VA3IUL, https://www.qsl.net/va3iul/Files/Automatic_Gain_Control.pdf
- *Inertial Navigation Primer*, VECTORNAV, https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer
- J. Sanz Subirana, JM. Juan Zornoza and M. Hernandez-Pajares (2011), *Galileo Navigation Message*, EESA, Navipedia, https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Navigation_Message
- J.A Ávila Rodríguez (2011), *Coherent Adaptive Sub-Carrier Modulation (CASM) and Interplex*, EESA, Navipedia, https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Coherent_Adaptive_Sub-Carrier_Modulation_(CASM)_and_Interplex
- J.A Ávila Rodríguez (2011), *GPS Signal Plan*, EESA, Navipedia, https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Signal_Plan
- K. Borre, Dennis M. Akos, N. Bertelsen, P. Rinder, Søren H. Jensen, *A Software-Defined GPS and Galileo Receiver*, (9 November 2006), Birkhäuser Boston
- *OCXO, Oven Controlled Crystal Oscillator*, Electronics notes, https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/quartz-crystal-xtal/ocxo-oven-controlled-crystal-xtal-oscillator.php
- R. A. Meyers (2001), *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Academic Press
- R. Rutkowski, *What's the Difference Between OCXOs and TCXOs*, (April 2018), https://www.mwrf.com/technologies/components/article/21849108/whats-the-difference-between-ocxos-and-tcxos
- Ravij (July 2022), *Low Pass, High Pass and Band Pass Filters – Simple Explanation*, RF page, https://www.rfpage.com/low-pass-high-pass-and-band-pass-filters-simple-explanation/
- *Signals Classification*, Tutorials Point, https://www.tutorialspoint.com/signals_and_systems/signals_classification.htm

- *TCXO, Temperature Compensated Crystal Oscillator*, Electronics notes, https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/quartz-crystal-xtal/tcxo-temperature-compensated-crystal-xtal-oscillator.php
- *TCXO: How it works and why*, (August 2020), Jauch Blog, https://www.jauch.com/blog/en/tcxo-design-and-functionality
- *Understanding I/Q Signals and Quadrature Modulation*, All about Circuits, https://www.allaboutcircuits.com/textbook/radio-frequency-analysis-design/radio-frequency-demodulation/understanding-i-q-signals-and-quadrature-modulation/
- Weisstein Eric W, *Fourier Series*, MathWorld--A Wolfram Web Resource, https://mathworld.wolfram.com/FourierSeries.html
- Weisstein Eric W, *Fourier Transform*, MathWorld--A Wolfram Web Resource, https://mathworld.wolfram.com/FourierTransform.html
- *What is GNSS Simulator*, (2010), Spirent
- *LabSat 3 Wideband User Manual*, (2020), Racelogic
- Α. Μ. Αγάτζα Μπαλοδήμου(2009), *Θεωρία Σφαλμάτων και Συνόρθωσης*