



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
Π.Μ.Σ. «ΓΕΩΧΩΡΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΕΚΤΩΝ GNSS ΠΟΥ
ΥΛΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΜΕΣΩ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ**

**Φοιτητής: Βασίλειος Β. Καγιαδάκης
ΑΜ: GST2004**

Επιβλέπων Καθηγητής

**Γιαννίου Μιχαήλ
Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α**

Αιγάλεω, Σεπτέμβριος 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF SURVEYING AND GEOINFORMATICS ENGINEERING
MSc Program in Geospatial Technologies

Master Thesis

**GEODETIC APPLICATIONS OF
SOFTWARE-DEFINED GNSS RECEIVERS**

**Student: Vasileios Kagiadakis
Reg. Number: GST2004**

Supervisor

**Michail Gianniou
Professor, University of West Attica**

Aegaleo, September 2024

ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: «Γεωδαιτικές εφαρμογές δεκτών GNSS που υλοποιούνται μέσω λογισμικού»

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι εξεταστική επιτροπή.

α/α	ΟΝΟΜΑ-ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΜΙΧΑΗΛ ΓΙΑΝΝΙΟΥ	Καθηγητής	
2	ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΠΑΓΟΥΝΗΣ	Καθηγητής	
3	ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΑΝΔΡΙΤΣΑΝΟΣ	Καθηγητής	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογράφων Καγιαδάκης Βασίλειος του Βαρδή, με αριθμό μητρώου GST2004, μεταπτυχιακός φοιτητής του Π.Μ.Σ. «ΓΕΩΧΩΡΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ» του τμήματος Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής δηλώνω ότι:

“Είμαι συγγραφέας της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας για το Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών και κάθε βοήθεια και πληροφορία που χρησιμοποίησα είναι αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Όλες οι πηγές από τις οποίες άντλησα πληροφορίες, ακαδημαϊκές ή επιστημονικές έρευνες-ακαδημαϊκά βιβλία-διαδίκτυο, αναφέρονται στο σύνολο τους με πλήρη αναφορά μέσα στο κείμενο. Η εργασία αυτή έχει συγγραφεί αποκλειστικά από εμένα και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας, δικής μου και του Ιδρύματος.”

Παράβαση της ανωτέρω δήλωσης μου αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου.

Ο ΔΗΛΩΝ

Βασίλειος Β. Καγιαδάκης



Επιβλέπων καθηγητής,

Μιχαήλ Γιαννίου

Ευχαριστίες

Αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τους ανθρώπους όπου με πλαισίωσαν και με στήριξαν για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας στα πλαίσια του Π.Μ.Σ. Πρώτα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μιχαήλ Γιαννίου για την καθοδήγησή του, την εμπιστοσύνη του που μου ανέθεσε το συγκεκριμένο θέμα το οποίο αποτέλεσε μεγάλη μου επιθυμία. Εν συνεχεία θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην οικογένειά μου για τη συμπαράσταση που μου προσέφεραν και την επιμονή που μου μετέδιδαν καθόλα τη διάρκεια της εργασίας. Τέλος νιώθω ευγνώμων για όλους εκείνους τους ανθρώπους που συνεργάστηκα και γνώρισα κατά τη διάρκεια της διετής φοίτησής μου, τόσο συμφοιτητές όπου συνεργάστηκα άψογα στα πλαίσια των μαθημάτων και της κοινής μας φοίτησης, όσο και στους λοιπούς καθηγητές και καλεσμένους ομιλητές στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών που μας μετέδωσαν την τεχνογνωσία και την αγάπη τους για το αντικείμενο.

Βασίλειος Β. Καγιαδάκης
Αθήνα, 2024

“Εκείνος που θέλει να ταρακουνήσει τον κόσμο,
ας ταρακουνήσει πρώτα τον εαυτό του”

-Σωκράτης

Περίληψη

Η εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας έχει ως σκοπό την διερεύνηση, την ανάλυση και την ανάδειξη των δυνατοτήτων αξιοποίησης δεκτών GNSS που υλοποιούνται μέσω λογισμικού (SDR: Software Defined Receivers) σε γεωδαιτικές εφαρμογές.

Η τεχνολογία των SDR έχει αναπτυχθεί εδώ και αρκετά χρόνια. Δεν είχε όμως εξαπλωθεί καθώς η υπολογιστική ισχύς που απαιτεί η υλοποίησή της δεν διατίθετο τα παλαιότερα χρόνια, ιδίως σε φορητές συσκευές που μπορούν είναι κατάλληλες για μετρήσεις πεδίου σε παραγωγικές διαδικασίες. Τα τελευταία χρόνια όμως, δεδομένης της υψηλής υπολογιστικής ισχύος που διαθέτουν πλέον οι φορητές συσκευές (android-ios), η υλοποίηση ενός Software Defined GNSS Receiver είναι σημαντικά ευκολότερη, έχει χαμηλό κόστος και έχει αρχίσει εξαπλώνεται.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η τεχνολογία των Software Defined GNSS Receivers και διερευνάται η δυνατότητα αξιοποίησής τους για γεωδαιτικές εφαρμογές (δηλ. ακρίβειες λίγων cm) μέσω βιβλιογραφικής μελέτης αλλά και με δοκιμαστικές μετρήσεις με χρήση ενός Software Defined GNSS δέκτη που είναι εδώ και λίγα χρόνια διαθέσιμος στην αγορά (Trimble Catalyst). Από την εν λόγω μελέτη προκύπτει ότι υπάρχουν σημαντικές προοπτικές εξάπλωσης της τεχνολογίας αυτής σε εφαρμογές που απαιτούν γεωδαιτική ακρίβεια.

Abstract

The purpose of this Master-Thesis is to investigate, analyze and highlight the possibilities of Software Defined GNSS Receivers for geodetic applications.

The technology of Software Defined Receivers (SDR) has been developed several years ago. However, it was not wide spread as the computing power required for its implementation was not available in earlier years, especially in portable devices, suitable for field measurements. However, recently, given the high computing power of modern mobile devices (android-ios), the implementation of a Software Defined GNSS Receiver is significantly easier, cheaper. Thus, the production of SDR is nowadays expanding.

In this Thesis, the technology of Software Defined GNSS Receivers is presented and the possibility of using it for geodetic applications (i.e. accuracies of a few cm) is presented through a literature study but also with test measurements using a Software Defined GNSS receiver that is available in the market (Trimble Catalyst). The results of this study show that there are significant perspectives of Software Defined GNSS Receivers for application that require geodetic accuracy.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	5
Περίληψη.....	6
Abstract	7
Περιεχόμενα	8
Συντομογραφίες	9
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
2 GNSS και Software-Defined GNSS δέκτες	11
2.1 Σύντομο ιστορικό των GNSS	11
2.2 Σημερινά συστήματα GNSS	12
2.3 Εισαγωγή στους SDR.....	14
3 Επεξεργασία σήματος και λειτουργία των SDR	20
3.1 Παρατηρήσεις GNSS	20
3.2 Συχνότητες GNSS και σήματα.....	24
3.3 Η εξέλιξη στις δυνατότητες των SDR.....	30
3.4 Κύκλωμα Front-End.....	33
4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ SDR ΓΙΑ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	35
4.1 Περιγραφή των δεκτών Trimble Catalyst DA1 και DA2.....	35
4.1.1 Δέκτης Trimble Catalyst DA1	36
4.1.2 Δέκτης Trimble Catalyst DA2	38
4.1.3 Λογισμικά πεδίου για το δέκτη Trimble Catalyst	40
4.2 Αποτελέσματα από διεθνείς μελέτες.....	42
4.2.1 Έρευνα στη Νορβηγία.....	42
4.2.2 Έρευνα σε Ρώμη, Αίγυπτο και Ιράκ.....	44
4.3 Αποτελέσματα από μετρήσεις πεδίου στο ΠΑΔΑ	48
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	53
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	55

Συντομογραφίες

ADC (Analog-to-Digital Converter)

GNSS (Global Navigation Satellite System)

SDR (Software-defined Receivers)

GPS (Global Position System)

RF (Radio Frequency)

IF (Intermediate Frequency)

RTK (Real Time Kinematic)

PPP (Precise Point Position)

CPU (Central Processing Unit)

GPU (Graphics Processing Unit)

FPGA (Field-Programmable Gate Array)

DSP (Digital Signal Algorithm)

DAC (Digital-to-Analog Converter)

FEC (Forward Error Correction)

BPSK (Binary Phase Shift Keying)

CDMA (Code Division Multiple Access)

FDMA (Frequency Division Multiple Access)

DFT (Discrete Fourier Transformation)

FFT (Fast Fourier Transform)

ASIC (Application Specific Integrated Circuit)

AI (Artificial Intelligent)

ML (Machine Learning)

IoT (Internet of Things)

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η θεωρητική εμβάθυνση στους software defined γεωδαιτικούς δέκτες ώστε να γίνει γνωστός ο τρόπος λειτουργίας τους και τα χαρακτηριστικά τους. Επίσης θα εξετάσουμε στην πράξη τις δυνατότητές τους για γεωδαιτικές εφαρμογές τόσο μέσα από βιβλιογραφική αναζήτηση, όσο και με τη χρήση ενός τέτοιου δέκτη και αξιολογώντας τα αποτελέσματά του.

Ειδικότερα τα βήματα είναι:

1. Θεωρητική ανάλυση των συστημάτων GNSS και κατά κύριο λόγο των software defined receivers.
2. Διερεύνηση εφαρμογών των δεκτών αυτών στην γεωδαισία/τοπογραφία μέσω τόσο βιβλιογραφικής αναζήτησης, όσο και μετρήσεων πεδίου.

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

Κεφάλαιο 2^ο: Περιγραφή και ιστορικά στοιχεία των συστημάτων GNSS και μια πρώτη εισαγωγή στους SDR.

Κεφάλαιο 3^ο: Θεωρητική εμβάθυνση στα σήματα και στους κώδικες που κάνουν tracking οι δέκτες, καθώς και στην εξέλιξη των SDR από το παρελθόν μέχρι το σήμερα.

Κεφάλαιο 4^ο: Παρουσίαση των SDR Trimble Catalyst DA1 και DA2 καθώς αποτελεσμάτων από τη χρήση τους σε εφαρμογές τοπογραφίας, τόσο από τη διεθνή βιβλιογραφία, όσο και από μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Κεφάλαιο 5^ο: Συμπεράσματα.

2 GNSS και Software-Defined GNSS δέκτες

2.1 Σύντομο ιστορικό των GNSS

Ως **GNSS (Global Navigation Satellite System)** εννοούμε κάθε σύστημα εντοπισμού θέσης που στηρίζεται σε ένα σύνολο δορυφόρων που αποστέλλουν προς τη Γη κωδικοποιημένα δορυφορικά σήματα με σκοπό την ακριβή εύρεση της θέσης, της ταχύτητας και του χρόνου εξασφαλίζοντας παγκόσμια κάλυψη. Τέτοια σήματα επεξεργάζονται οι δέκτες GNSS ώστε να έχουμε τις πληροφορίες και τα δεδομένα τα οποία χρειαζόμαστε.

Η έννοια της δορυφορικής πλοήγησης πρωτοεμφανίστηκε τη δεκαετία του 1950 μέχρι το 1970 ξεκινώντας από τους Αμερικάνους οι οποίοι είχαν συλλάβει την ιδέα του εντοπισμού της θέσης πάνω στη γη από ένα σύστημα δορυφόρων. Το σύστημα αυτό θα προοριζόταν καθαρά για στρατιωτικούς λόγους και κυρίως για την πλοήγηση του πολεμικού ναυτικού. Πιο συγκεκριμένα οι Ρώσοι το 1957 εκτόξευσαν τον πρώτο τεχνητό δορυφόρο **Sputnik 1**, ενώ ο Αμερικάνικος στόλος το 1960 ανέπτυξε το σύστημα **TRANSIT** (μετά GPS), το πρώτο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης για την καθοδήγηση των πολεμικών του πλοίων (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Τη δεκαετία 1970-1980 πραγματοποιήθηκε σημαντική εξέλιξη στην ανάπτυξη των παγκόσμιων συστημάτων δορυφορικής πλοήγησης. Το 1973 η Αμερική ξεκίνησε το σχεδιασμό του **GPS**, ενός συστήματος που στόχο είχε να αντικαταστήσει το TRANSIT, ώστε να παρέχει πιο ακριβείς πληροφορίες, το οποίο είχε περιορισμούς. Το 1978 ο πρώτος εκ των έντεκα δορυφόρων του συστήματος GPS μπήκε σε τροχιά (BLOCK I) και χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή και τη βελτίωση του GPS (prototype satellite) (Φωτίου & Πικριδάς, 2012). Την περίοδο εκείνη εκτός της Αμερικής που είχε ήδη σχεδιάσει το δικό της σύστημα, η Σοβιετική ένωση άρχισε να εργάζεται στο δικό της σύστημα **GLONASS** το οποίο βρισκόταν σε πολύ πρώιμο στάδιο.

Το 1983 ανακοινώνεται το GPS θα τεθεί για πολιτική χρήση μόλις το σύστημα γίνει πλήρως λειτουργικό κάτι το οποίο ξεκινάει να εφαρμόζεται το 1985 με την εκτόξευση των πρώτων δορυφόρων BLOCK II που σχεδιάστηκαν ώστε να το σύστημα να γίνει πλήρως λειτουργικό και να παρέχει παγκόσμια κάλυψη. Επίσης το 1982 η Σοβιετική Ένωση εκτόξευσε τον πρώτο δορυφόρο του συστήματος GLONASS

Το 1995 το GPS αλλά και το GLONASS έγιναν πλήρως λειτουργικά με 24 δορυφόρους έκαστος παρέχοντας παγκόσμια κάλυψη. Σημαντική στιγμή ήταν το 2000 όταν η Αμερικάνικη κυβέρνηση σταμάτησε την **επιλεκτική διαθεσιμότητα** (Φωτίου & Πικριδάς, 2012) που οδήγησε στην βελτίωση της ακρίβειας του GPS για πολιτική χρήση.

Τέλη του '90 με αρχές του 2000 ξεκίνησε η ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων και από άλλες χώρες όπως το **Beidou** από την Κίνα και το **Galileo** από την Ευρωπαϊκή Ένωση και στη συνέχεια ακόμα περισσότερα συστήματα από διάφορες χώρες. (ITU-T Technical Report GTRS-GNSS 2020)

2.2 Σημερινά συστήματα GNSS

Χρονολογικά η εξέλιξη των GNSS έχει ως εξής:

- **GPS (Αμερική):** λειτουργικό από το 1993
- **GLONASS (Ρωσία σήμερα):** πλήρως λειτουργικό το 1995
- **Galileo (Ευρώπη):** λειτουργικό το 2020, ξεκίνησε το 2016
- **Beidou (Κίνα):** Ξεκίνησε παγκόσμια κάλυψη το 2020

Επίσης, σε ότι αφορά περιφερειακά συστήματα οι αντίστοιχες χρονολογίες είναι οι εξής:

- **NavIC (Ινδία):** Τοπική κάλυψη (όχι παγκόσμια) το 2018
- **QZSS (Ιαπωνία):** Ξεκίνησε το 2018

Μαζί με την ανάπτυξη των πρώτων συστημάτων εντοπισμού θέσης ξεκίνησε η έρευνα και η ανάπτυξη των πρώτων Hardware δεκτών GNSS. Ένας τέτοιος δέκτης είναι μια σύνθετη συσκευή που χρησιμοποιεί πολύπλοκα ηλεκτρονικά κυκλώματα ώστε να λαμβάνει και να επεξεργάζεται τα σήματα που αποστέλλονται από τους δορυφόρους. Στη συνέχεια ο δέκτης αυτός χρησιμοποιεί τα σήματα αυτά για να μπορέσει να υπολογίσει τη δική του θέση στο χώρο. Ο εκάστοτε δέκτης θα πρέπει να έχει μια ανεμπόδιστη οπτική γωνία προς τον ουρανό για να διασφαλίσει τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης του. Το 1970 αναπτύχθηκαν οι πρώτοι δέκτες GPS σχεδιασμένοι για στρατιωτικές εφαρμογές. Το 1980 ξεκίνησε η ανάπτυξη των πρώτων δεκτών που προορίζονταν για πολιτική χρήση και καθώς το σύστημα του GPS ξεκίνησε να γίνεται λειτουργικό το 1990 οι δέκτες αυτοί εκσυγχρονίστηκαν και έγιναν πιο προσιτοί για όλους.

Έπειτα με τη συνεχιζόμενη εξέλιξη τόσο των δορυφόρων όσο και των δεκτών αλλά και όλων των συστημάτων που είναι αναγκαία για το σκοπό αυτό, οι δορυφορικοί δέκτες συνεχίζουν να δέχονται έως και σήμερα τρομερή εξέλιξη πετυχαίνοντας αποτελέσματα που πριν 20-30 χρόνια θα έμοιαζαν απλησίαστα.

Στον παρακάτω Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα δορυφορικά συστήματα παγκοσμίως (GNSS) με την χώρα προέλευσης τους και τον αριθμό των δορυφόρων από όπου αποτελούνται σήμερα. Ο αριθμός αυτός δεν είναι στατικός αλλά δυναμικός καθώς χρόνο με το χρόνο σχεδιάζονται καινούργιοι δορυφόροι έτοιμοι για χρήση.

Πίνακας 2.1: Παγκόσμια και περιφερειακά δορυφορικά συστήματα πλοήγησης

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΧΩΡΑ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΥΡΥΦΟΡΩΝ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΑΛΥΨΗΣ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ (BANDS)
GPS	Αμερική	31 λειτουργικοί	Παγκόσμια	L1, L2, L5
GLONASS	Ρωσία	24 λειτουργικοί	Παγκόσμια	G1, G1a, G2, G2a, G3
Galileo	Ευρώπη	25 λειτουργικοί	Παγκόσμια	E1, E5, E5a, E5b, E6
Beidou	Κίνα	27 λειτουργικοί	Παγκόσμια	B1, B1I, B2, B2a, B2b, B3I
QZSS	Ιαπωνία	7 λειτουργικοί	Τοπική	L1, L2, L5, L6
NAVIC	Ινδία	7 λειτουργικοί	Τοπική	L5, S

Πηγές: (Επίσημα site των συστημάτων)

<https://www.gps.gov/systems/gps/control/>

<https://www.glonass-iac.ru/en/>

<https://www.gsc-europa.eu/>

<http://en.beidou.gov.cn/>

<https://qzss.go.jp/en/index.html>

<https://www.isro.gov.in/SatelliteNavigationServices.html>

Ένα σύστημα GNSS αποτελείται από 3 τμήματα:

- Το τμήμα των δορυφόρων
- Το τμήμα ελέγχου
- Το τμήμα των χρηστών

Το τμήμα ελέγχου αποτελείται από ένα παγκόσμιο επίγειο δίκτυο σταθμών και ένα κέντρο ελέγχου που έχει ως σκοπό την παρακολούθηση, την ορθή λειτουργία και τη διόρθωση σφαλμάτων των δορυφόρων. Πιο συγκεκριμένα υπολογίζουν την τροχιά του δορυφόρου και τη στέλνουν μέσω ραδιοσημάτων στους δορυφόρους. Επίσης το τμήμα ελέγχου είναι υπεύθυνο για την καλή λειτουργία των δορυφόρων (satellite health) και υπολογίζει το σφάλμα στο ρολόι του για να υπάρχει υψηλή ακρίβεια στη μέτρηση του χρόνου. Τα δεδομένα αυτά αφού λαμβάνονται από τους δορυφόρους έπειτα αποστέλλονται στους χρήστες όπου μπορούν με μεγάλη ακρίβεια να υπολογίσουν τη θέση τους. Το τμήμα ελέγχου του GPS αποτελείται από 16 σταθμούς παρακολούθησης, 4 σταθμούς τηλεπικοινωνιών και από 1 κεντρικό σταθμό ελέγχου (Φωτίου & Πικριδάς, 2012).

Η ακρίβεια του προσδιορισμού θέσης εν τέλει βρίσκεται στη διαφορά μεταξύ της μέτρησης ενός δέκτη GNSS και της πραγματικής θέσης και χρόνου του δορυφόρου.

2.3 Εισαγωγή στους SDR

Οι δέκτες GNSS είναι απαραίτητες συσκευές στον τομέα του εντοπισμού θέσης και της πλοήγησης. Χρησιμοποιούν δορυφορικά σήματα για να καθορίσουν την ακριβή θέση ενός δέκτη στη Γη, αποτελώντας έτσι τη βάση τεχνολογιών που βασίζονται από τη χαρτογράφηση και την τοπογραφία έως την πλοήγηση σε αυτόνομα οχήματα.

Πρόσφατα η εξέλιξη των δεκτών που καθορίζονται από λογισμικό (SDR) άνοιξε νέες δυνατότητες επιτρέποντας μεγαλύτερη ευελιξία και μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα στον τομέα του γεωχωρικού εντοπισμού.

Hardware δέκτης GNSS

Ένας παραδοσιακός (hardware) δέκτης GNSS χρησιμοποιεί σήματα από πολλαπλά δορυφορικά συστήματα, όπως το GPS (Αμερική), το GLONASS (Ρωσία), το Galileo (Ευρώπη) και το BeiDou (Κίνα). Αυτά τα σήματα μεταδίδονται στη ζώνη L του φάσματος και ο δέκτης

υπολογίζει τη θέση του μετρώντας τη χρονική καθυστέρηση μεταξύ της μετάδοσης του σήματος και της λήψης του.

Ένας τέτοιος δέκτης αποτελείται από πολλά βασικά στοιχεία (Hofmann-Wellenhof et al., 2008):

- Κεραία: Καταγράφει σήματα GNSS από δορυφόρους.
- Μονάδα RF: Φιλτράρει, ενισχύει και μετατρέπει τα δορυφορικά σήματα υψηλής συχνότητας σε μια ενδιάμεση συχνότητα.
- Επεξεργαστής σήματος: Αποδιαμορφώνει τα σήματα, εκτελεί συσχετισμό με δορυφορικές πληροφορίες και εξάγει τα δεδομένα πλοήγησης.
- Επεξεργαστής πλοήγησης (navigation): Υπολογίζει τη θέση, την ταχύτητα και τον χρόνο του δέκτη με βάση δορυφορικά δεδομένα.

Οι δέκτες GNSS παρέχουν ακριβή εντοπισμό θέσης, ιδιαίτερα με προηγμένες τεχνικές όπως το RTK (κινηματικός εντοπισμός σε πραγματικό χρόνο) επιτυγχάνοντας ακρίβεια σε επίπεδο εκατοστών, ζωτικής σημασίας σε τομείς όπως η τοπογραφία, η γεωργία και οι κατασκευές.

Οι σύγχρονοι δέκτες GNSS μπορούν επίσης να χρησιμοποιούν σήματα από πολλά συστήματα ταυτόχρονα, γεγονός που ενισχύει την ακρίβεια και τη διαθεσιμότητα λύσεων εντοπισμού θέσης, ιδιαίτερα σε δύσκολες συνθήκες όπως σε έναν αστικό ιστό ή σε πυκνά δάση.

Ωστόσο όλα αυτά τα οφέλη ακολουθούνται και από κάποιες δυσκολίες που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

- Οι παραδοσιακοί δέκτες GNSS συχνά απαιτούν ακριβό υλικό υψηλής ακρίβειας ιδιαίτερα για επαγγελματικές εφαρμογές που απαιτούν δέκτες RTK ή διπλής συχνότητας.
- Οι δέκτες που βασίζονται σε hardware είναι ειδικά κατασκευασμένοι, με περιορισμένη προσαρμοστικότητα σε νέους τύπους σήματος ή αλλαγές σε δορυφορικά συστήματα.
- Οι δέκτες GNSS καταναλώνουν σημαντική ισχύ, γεγονός που περιορίζει την αποτελεσματικότητά τους σε περιβάλλοντα που λειτουργούν με μπαταρίες ή με περιορισμένη ενέργεια.

Software Defined Receivers

Σε αντίθεση ένας software δέκτης GNSS έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική του **SDR (Software defined radio)**. Σε ένα τέτοιο δέκτη ολόκληρη η ψηφιακή επεξεργασία του σήματος πραγματοποιείται από έναν επεξεργαστή και όχι σε κυκλώματα hardware. Για να γίνει αυτό, μία διάταξη (DAC) μετατρέπει το αναλογικό σήμα κατευθείαν σε ψηφιακό χωρίς τους λεγόμενους θορύβους (Joe Mitola, 2007). Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι και ένας software defined δέκτης GNSS λειτουργεί τις περισσότερες φορές και με ένα μικρό κομμάτι hardware (Borre & Akos, 2006). Έτσι μια καινούργια κινητή συσκευή smart phone μπορεί αξιοποιώντας τον μικροεπεξεργαστή που διαθέτει να χρησιμοποιηθεί, σε συνδυασμό με τη χρήση του RF, για πλοήγηση και προσδιορισμό θέσης χωρίς την ανάγκη για χρήση ενός πλήρως hardware δέκτη.

Ένας software defined δέκτης αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- **Κεραία:** Καταγράφει σήματα GNSS από δορυφόρους.
- **RF Front-End:** Το μόνο εξάρτημα υλικού σε ένα SDR, υπεύθυνο για τη λήψη και την ψηφιοποίηση των δορυφορικών σημάτων.
- **Λογισμικό:** Εφαρμόζει αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος που αποδιαμορφώνουν τα σήματα, αποκωδικοποιούν δεδομένα πλοήγησης και υπολογίζουν τη θέση. Τα SDR μπορούν να εκτελούνται σε επεξεργαστές γενικής χρήσης (όπως CPU) ή σε εξειδικευμένους επεξεργαστές (όπως FPGA ή GPU).

Μόλις ψηφιοποιηθεί το σήμα RF η όλη επεξεργασία μεταφέρεται στο λογισμικό. Εδώ εφαρμόζονται αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος για την αποδιαμόρφωση, την αποκωδικοποίηση και την ερμηνεία του σήματος. Αυτοί οι αλγόριθμοι μπορούν να τρέξουν σε CPU, GPU, FPGA (Field-Programmable Gate Array) ή DSP (Digital Signal Processor).

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται είναι υπεύθυνο για τρεις πολύ βασικές λειτουργίες:

- **Αποδιαμόρφωση:** Μετατροπή του λαμβανόμενου διαμορφωμένου σήματος για την εξαγωγή της αρχικής πληροφορίας (PRN κώδικες με μήνυμα ναυσιπλοΐας).
- **Αποκωδικοποίηση:** Εξαγωγή των ψηφιακών δεδομένων από το σήμα συμπεριλαμβανομένης της ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων.

ΠΑΔΑ, Τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής, ΜΔΕ Καγιαδάκη Βασιλείου

- **Φιλτράρισμα:** Αφαίρεση θορύβου ή ανεπιθύμητων στοιχείων από το σήμα για βελτίωση της ποιότητας και της ακρίβειας.

Η καρδιά του SDR είναι ο αλγόριθμος DSP (Digital Signal Processing) (Hofmann-Wellenhof et. al, 2008). Το DSP εκτελεί πολύπλοκες μαθηματικές πράξεις (μετασχηματισμοί Fourier, συσχετίσεις κ.λπ.) για να εξαγάγει τις επιθυμητές πληροφορίες από το ψηφιοποιημένο σήμα RF.

Σε ένα GNSS SDR, ο αλγόριθμος DSP θα χειρίζεται εργασίες όπως η απόκτηση σήματος (εντοπισμός του δορυφορικού σήματος σε συχνότητα και χρόνο), παρακολούθηση (συνεχής επεξεργασία του σήματος του δορυφόρου για διατήρηση κλειδώματος) και υπολογισμός για τη λύση πλοήγησης (καθορισμός θέσης, ταχύτητας και χρόνο με βάση τα δορυφορικά δεδομένα).

Η λειτουργία ενός SDR μπορεί να αναλυθεί σε τρία κύρια στάδια:

λήψη σήματος, επεξεργασία σήματος και υπολογισμός θέσης.

Λήψη σήματος: Το σύστημα RF λαμβάνει τα δορυφορικά σήματα από το περιβάλλον χρησιμοποιώντας μια κεραία. Τα αναλογικά σήματα ενισχύονται, φιλτράρονται και μετατρέπονται σε χαμηλότερη συχνότητα, γνωστή ως ενδιάμεση συχνότητα (IF), για να διευκολύνουν την περαιτέρω επεξεργασία (Hailey A. Nichols 2022). Έπειτα το σήμα IF ψηφιοποιείται μέσω ενός ADC, παράγοντας ένα ψηφιακό σήμα που μπορεί να επεξεργαστεί από το λογισμικό.

Επεξεργασία σήματος: Μόλις ψηφιοποιηθεί το σήμα το βάρος τώρα πέφτει στο λογισμικό. Σε έναν παραδοσιακό δέκτη αυτό θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί από ειδικά εξαρτήματα hardware, αλλά ένας SDR χρησιμοποιεί λογισμικό για να εκτελέσει τις λειτουργίες.

Αποδιαμόρφωση και συγχρονισμός: Η επεξεργασία σήματος που βασίζεται σε λογισμικό αποδιαμορφώνει (demodulation) το σήμα εκτελώντας λειτουργίες όπως η συσχέτιση (ταίριασμα του εισερχόμενου σήματος σε γνωστό μοτίβο) και ο συγχρονισμός (παρακολούθηση της συχνότητας και της φάσης του σήματος του δορυφόρου).

Φιλτράρισμα και διόρθωση σφαλμάτων: Οι αλγόριθμοι λογισμικού εφαρμόζουν φίλτρα για την εξάλειψη του θορύβου και των ανεπιθύμητων στοιχείων συχνότητας από το σήμα. Τεχνικές όπως το FEC (Forward Error Correction) χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση τυχόν

σφαλμάτων στο σήμα που προκαλούνται από παρεμβολές, διασφαλίζοντας την ακριβή εξαγωγή δεδομένων (Borre & Akos, 2006).

Εξαγωγή δεδομένων θέσης και πλοήγησης: Μόλις αποδιαμορφωθεί και διορθωθεί το σήμα οι αλγόριθμοι του λογισμικού μπορούν να εξαγάγουν τα δεδομένα πλοήγησης που είναι ενσωματωμένα στο σήμα. Στην περίπτωση ενός GNSS SDR αυτό περιλαμβάνει δορυφορικές εφημερίδες (τροχιακές πληροφορίες), διορθώσεις ρολογιού και άλλα απαραίτητα δεδομένα για τον προσδιορισμό της θέσης του δέκτη.

Υπολογισμός θέσης: Το λογισμικό λαμβάνει τα αποκωδικοποιημένα δορυφορικά δεδομένα εφαρμόζει γεωμετρικούς υπολογισμούς όπως η τριγωνοποίηση και υπολογίζει την ακριβή θέση του δέκτη στη Γη. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των SDR είναι η ικανότητά τους να προσαρμόζουν τις παραμέτρους εν κινήσει, δηλαδή το λογισμικό να μπορεί να εναλλάσσεται μεταξύ διαφορετικών συστημάτων GNSS (π.χ. GPS, GLONASS, GALILEO) ή ακόμη και να χειρίζεται πολλαπλά συστήματα ταυτόχρονα χωρίς αλλαγές στο hardware. Μπορεί επίσης να προσαρμοστεί σε νέους τύπους ή συχνότητες σημάτων απλώς ενημερώνοντας τους αλγόριθμους επεξεργασίας.

Η έννοια της χρήσης SDR δεν είναι καινούργια, όμως η ανάπτυξη κινητών συσκευών με ανεπτυγμένες δυνατότητες, καθιστούν πρακτικές πολλές διαδικασίες που κάποτε ήταν μόνο θεωρητικά δυνατές. Η διαχρονική εξέλιξη συνοψίζεται ως εξής:

1990-2000: Εξαιτίας της αυξανόμενης απόδοσης των CPU μαζί με όλη την τεχνολογική εξέλιξη που περιήλθε γύρω από την ψηφιακή επεξεργασία του σήματος έφερε την ανάγκη για τη δημιουργία software defined δεκτών, δηλαδή δεκτών που επεξεργάζονται σήματα GNSS από συγκεκριμένες τεχνικές επεξεργασίας ψηφιακού σήματος.

2000: Η ανάπτυξη του software defined radio (SDR) επέτρεψε στους μελετητές και στους διάφορους χομπίστες να πειραματιστούν και να χρησιμοποιήσουν την τεχνολογία αυτή για την επεξεργασία GNSS σημάτων (Pany & Akos, 2023).

2010: Οι mobile κινητές συσκευές ξεκίνησαν να ενσωματώνουν δυνατούς σε ισχύ επεξεργαστές ώστε με το λογισμικό που διαθέτουν να είναι ικανοί για επεξεργασία δορυφορικών σημάτων (Pany & Akos, 2023).

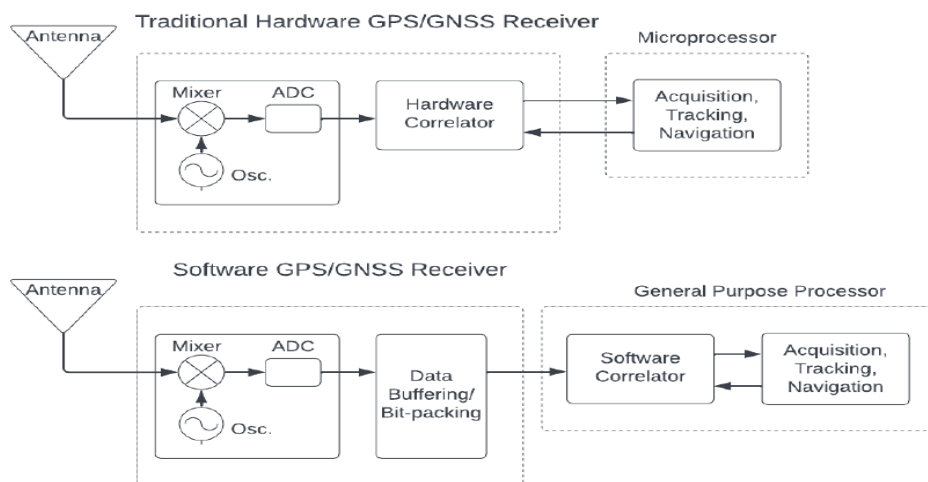
Συμπερασματικά συγκρίνοντας τους δύο διαφορετικού τύπους δεκτών μπορούμε να καταλάβουμε που βρίσκονται οι δυνατότητες τους.

Συμβατικοί GNSS RECEIVER

Οι δέκτες αυτοί μπορούν να θεωρηθούν, λόγω της μεγάλης υπολογιστικής τους ισχύς, πιο αποδοτικοί καθώς έχουν σχεδιαστεί για μόνο αυτόν τον συγκεκριμένο σκοπό.

SOFTWARE DEFINED GNSS RECEIVER

Οι δέκτες αυτοί παρέχουν μεγάλη ευελιξία ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε χρήστη καθώς τα χαρακτηριστικά του μπορούν να διαμορφωθούν μέσω λογισμικού ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες χωρίς τη χρήση ειδικευμένου hardware.



Εικόνα 2.1 Διάγραμμα λειτουργίας hardware GNSS vs software GNSS

(πηγή: Nichols et al. 2022)

3 Επεξεργασία σήματος και λειτουργία των SDR

3.1 Παρατηρήσεις GNSS

Κάθε δέκτης GNSS λαμβάνει και κάνει tracking τρεις πολύ σημαντικές παρατηρήσεις:

- Ψευδοαπόσταση
- Παρατήρηση Φάσης
- Doppler

Ψευδοαπόσταση

Για να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ ενός δορυφόρου και ενός δέκτη είναι αναγκαίο να μετρηθεί ο χρόνος που κάνει το σήμα ώστε να φτάσει στον δέκτη (Φωτίου & Πικριδάς, 2012). Το γεγονός όμως ότι οι δέκτες δε διαθέτουν εξειδικευμένα ατομικά ρολόγια όπως οι δορυφόροι οδηγεί στο να μη γνωρίζουμε με επαρκή ακρίβεια τον ακριβή χρόνο GPS. Για τον προσδιορισμό της θέσης ενός δέκτη, ο δέκτης χρειάζεται μετρήσεις ψευδοαπόστασης από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους. Με τέσσερις μετρήσεις, ο δέκτης μπορεί να λύσει το σύστημα εξισώσεων, μία για κάθε δορυφόρο, για τέσσερις αγνώστους: το πλάτος, το μήκος, το υψόμετρο και το σφάλμα του ρολογιού του.

Ο δορυφόρος εκπέμπει ένα σήμα που περιέχει την ώρα μετάδοσης του σήματος αυτού βάσει του ρολογιού του. Ο δέκτης στη συνέχεια λαμβάνει το σήμα και σημειώνει την στιγμή της λήψης σύμφωνα με το δικό του ρολόι και υπολογίζει τη διαφορά χρόνου μεταξύ αποστολής σήματος και λήψης σήματος. Η βασική εξίσωση ψευδοαπόστασης (PR) είναι:

$$PR = c \cdot \Delta t \quad (1)$$

όπου c η ταχύτητα φωτός ($\sim 3 \times 10^8$ m/s), και Δt ο υπολογιζόμενος χρόνος που χρειάστηκε το σήμα να φτάσει από το δορυφόρο στο δέκτη.

Η μέτρηση της απόστασης αυτής είναι όμως επηρεασμένη και από άλλα συστηματικά σφάλματα. Το σήμα καθώς εισέρχεται στην ατμόσφαιρα δεν ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός καθώς επηρεάζεται από το μέσο καθώς και υπάρχουν και σφάλματα στα ρολόγια των 2 συστημάτων. Έτσι προκύπτει (Γιαννίου, 2019):

$$PR_{1A}^i = \rho_A^i + c \cdot \delta t_A - c \cdot \delta t^i + \delta orb_A^i + \delta I_{1A}^i + \delta T_A^i + \delta mu_{1A}^i + \delta int_{1A}^i + e_{1A}^i \quad (2)$$

όπου:

PR_{1A}^i : η μετρούμενη ψευδοαπόσταση μεταξύ του δέκτη A και του δορυφόρου i .

ρ_A^i : η γεωμετρική απόσταση δέκτη-δορυφόρου

c : η ταχύτητα του φωτός στο κενό (299792458 m/sec)

δt_A : το σφάλμα του χρονομέτρου του δέκτη A

δt^i : το σφάλμα του χρονομέτρου του δορυφόρου i

δorb_A^i : η συνιστώσα του τροχιακού σφάλματος του δορυφόρου i κατά διεύθυνση δορυφόρου - δέκτη A

δI_{1A}^i : το ιονοσφαιρικό σφάλμα κατά τη διεύθυνση δορυφόρου i - δέκτη A

δT_A^i : το τροποσφαιρικό σφάλμα κατά τη διεύθυνση δορυφόρου i - δέκτη A

δmu_{1A}^i : το σφάλμα λόγω του φαινομένου multipath (εάν υπάρχει)

δint_{1A}^i : το σφάλμα λόγω H/M παρεμβολών (εάν υπάρχει)

e_{1A}^i : ο θόρυβος της μέτρησης και τα υπόλοιπα μη μοντελοποιούμενα σφάλματα

Παρατήρηση Φάσης

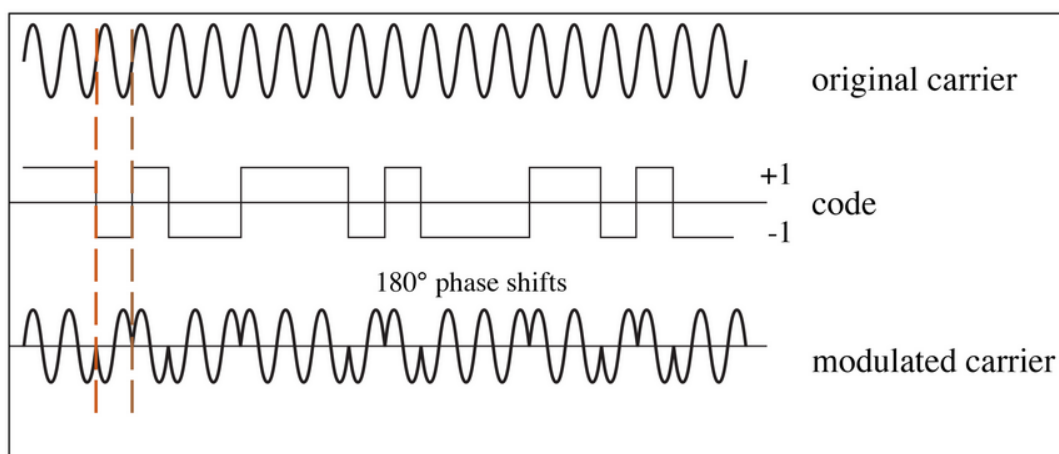
Το σήμα που μεταδίδεται από τον δορυφόρο έχει διαμορφωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να βρίσκεται πάνω σε ένα φέρον κύμα το οποίο δεν περιέχει καμία πληροφορία και λειτουργεί μόνο ως μέσο μεταφοράς.

Το **Binary Phase Shift Keying (BPSK)** είναι ένα σχήμα ψηφιακής διαμόρφωσης όπου μπορεί ένα σήμα χαμηλής συχνότητας να το διαμορφώσει πάνω σε ένα σήμα υψηλής συχνότητας (carrier wave) (βλ. Εικόνα 3.1).

Σε αντίθεση με την ψευδοαπόσταση η οποία βασίζεται στον κώδικα που μεταδίδεται από τον δορυφόρο, η παρατήρηση της φάσης βασίζεται στη φάση του φέροντος κύματος από το σήμα

του δορυφόρου. Επειδή η φέρουσα συχνότητα έχει πολύ μικρότερο μήκος κύματος οι μετρήσεις της φάσης είναι πιο ακριβείς.

Σε ένα σύστημα GNSS το σήμα που μεταδίδεται από τον δορυφόρο αποτελείται από δύο στοιχεία. Τον **κώδικα** (code) που είναι μια ψηφιακή ακολουθία η οποία διαμορφώνεται πάνω στο φέρον κύμα και το **φέρων κύμα** (carrier wave) που είναι ένα συνεχές κύμα σε συγκεκριμένες συχνότητες όπως L1, L2, L5 κλπ.



Εικόνα 3.1: Διαμόρφωση φέροντος κύματος (πηγή: Princeton University)

Η παρατήρηση της φέρουσας φάσης μετρά την κλασματική φάση του φέροντος κύματος που λαμβάνει ο δέκτης σε σχέση με τη φάση του σήματος που παράγεται στον ίδιο το δέκτη. Επειδή το φέρον κύμα έχει μεγάλη συχνότητα και μικρό μήκος κύματος, η μέτρηση της φέρουσας φάσης είναι πιο ακριβής και είναι της τάξης των $\sim 2\text{mm}$.

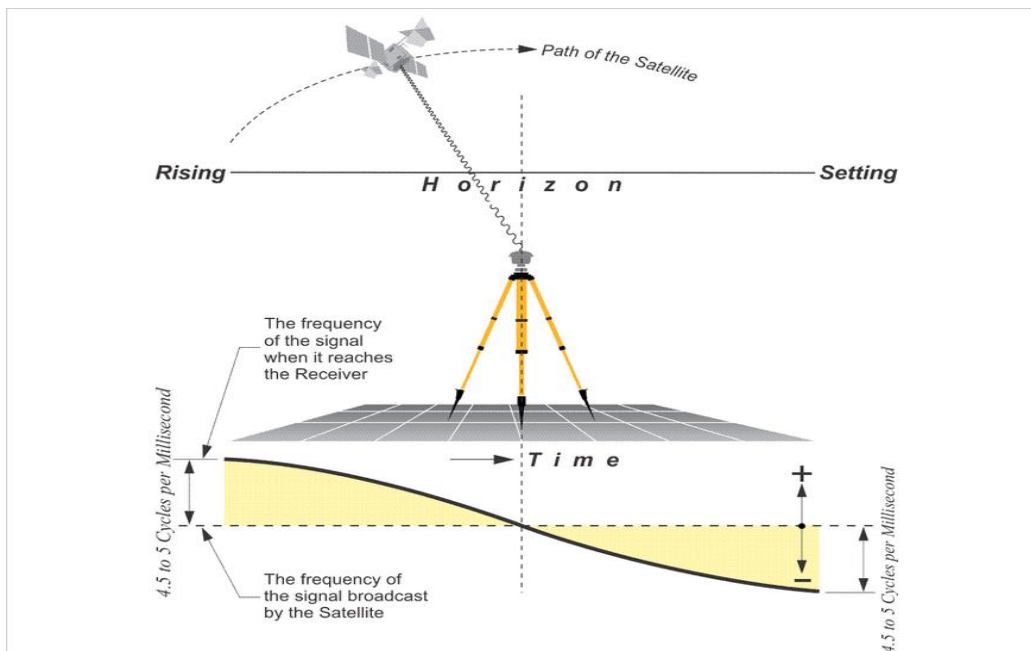
Ορισμένα μειονεκτήματα τα οποία παρατηρούνται σε αυτή τη μέθοδο είναι:

- **Ασάφεια φάσης:** Ο δέκτης δε μπορεί να μετρήσει τον συνολικό αριθμό των πλήρων κύκλων. Ο δέκτης ενώ μετράει το μέρος του μήκους κύματος που λαμβάνεται εκείνη τη στιγμή δεν μπορεί να γνωρίζει πόσα πλήρη μήκη κύματος έχουν ταξιδέψει από το δορυφόρο.
- **Ολίσθηση κύκλου (cycle slip):** Υπό δύσκολες συνθήκες λήψης του σήματος, μπορεί να παρατηρηθεί μια ασυνέχεια στη μέτρηση της φάσης, η οποία ανέρχεται σε έναν ή περισσότερους κύκλους.

Doppler

Εξαιτίας της ταυτόχρονης κίνησης του δορυφόρου και του δέκτη η απόσταση μεταξύ τους συνεχώς μεταβάλλεται και αυτή η συνθήκη έχει επίπτωση και στη συχνότητα του κύματος που λαμβάνει ο δέκτης (Borge & Akos, 2006). Το φαινόμενο Doppler είναι η αλλαγή της συχνότητας μεταξύ 2 κινούμενων συστημάτων. Εάν ο δορυφόρος κινείται προς τον δέκτη, η συχνότητα του σήματος αυξάνεται (θετική μετατόπιση Doppler). Εάν ο δορυφόρος απομακρύνεται από τον δέκτη, η συχνότητα μειώνεται (αρνητική μετατόπιση Doppler). Η μετατόπιση Doppler παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη σχετική ταχύτητα μεταξύ του δορυφόρου και του δέκτη. Μετρώντας τη μετατόπιση της συχνότητας, ο δέκτης μπορεί να υπολογίσει τη δική του ταχύτητα και κατεύθυνση κίνησης σε σχέση με τον δορυφόρο. Οι μετρήσεις αυτές λειτουργούν συνδυαστικά με τις μετρήσεις της ψευδοαπόστασης με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας θέσης.

Η συχνότητα του σήματος του GPS L1 είναι 1575.42 MHz. Λόγω της μετατόπισης Doppler, η παρατηρούμενη συχνότητα στον δέκτη μπορεί να ποικίλλει κατά $\pm 4\text{-}5$ kHz, ανάλογα με τη σχετική κίνηση (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).



Εικόνα 3.2 Doppler shift (πηγή: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1786>)

Η μετατόπιση Doppler Δf μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο προσεγγιστικό τύπο (Γιαννίου, 2019):

$$\Delta f = f_r - f_e = \frac{f_e}{c} \frac{d\rho}{dt} \quad (3)$$

όπου f_e η εκπεμπόμενη συχνότητα, f_r η συχνότητα η οποία λαμβάνεται, c η ταχύτητα διάδοσης του κύματος στο συγκεκριμένο μέσο, ρ η απόσταση μεταξύ σημείου εκπομπής και σημείου λήψης και $d\rho/dt$ η σχετική ακτινική ταχύτητα.

3.2 Συχνότητες GNSS και σήματα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συχνότητες των σημάτων που χρησιμοποιούνται από τα σημερινά συστήματα GNSS.

SYSTEM	SIGNAL	FREQUENCY(MHz)
GPS	L1 C/A	1575.42
	L1C	1575.42
	L2C	1227.6
	L2P	1227.6
	L5	1176.45
GLONASS	L1 C/A	1598.0625-1609.3125
	L2C	1242.9375-1251.6875
	L2P	1242.9375-1251.6875
	L3OC	1202.025

GALILEO	E1	1575.42
	E5a	1176.45
	E5b	1207.14
	E5 AltBOC	1191.795
	E6	1278.75
BeiDou	B1I	1561.098
	B2I	1207.14
	B3I	1268.52
	B1C	1575.42
	B2a	1176.45
	B2b	1207.14
QZSS	L1 C/A	1575.42
	L1C	1575.42
	L1S	1575.42
	L2C	1227.6
	L5	1176.45
	L6	1278.75

GPS: Τα σήματα από τα GNSS μεταδίδονται στη ζώνη L-Band της περιοχής UHF η οποία καλύπτει συχνότητες από 500 MHz έως 3 GHz. Πιο συγκεκριμένα η ζώνη αυτή βρίσκεται στα 1 με 2 GHz η οποία είναι ιδανική για πλοήγηση διότι τα σήματα σε αυτό το εύρος συχνοτήτων

μπορούν να διαπεράσουν με μεγαλύτερη ευκολία τα ατμοσφαιρικά εμπόδια διασφαλίζοντας έτσι αξιόπιστες αποδόσεις. Όσον αφορά τη διαμόρφωση του σήματος, το GPS χρησιμοποιεί τεχνική CDMA (Code Division Multiple Access) (Borre & Akos, 2006), όπου όλοι οι δορυφόροι εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα αλλά διαφορετικούς κώδικες. Στην περίπτωση του GPS έχουμε:

L1

- Συχνότητα 1.57542 GHz
- Κυρίως για πολιτική χρήση
- Φέρει τους κώδικες C/A & P(Y)

L2

- Συχνότητα 1.22760 GHz
- Χρησιμοποιείται από δέκτες διπλής συχνότητας L1, L2 και για στρατιωτική χρήση
- Φέρει τον κώδικα P(Y)

L5

- Συχνότητα 1.17645 GHz
- Χρησιμοποιείται για να προσφέρει καλύτερη απόδοση για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας και εφαρμογές ασφαλείας (safety-of-life)

GLONASS: Τα σήματα από το GLONASS μεταδίδονται και αυτά στη ζώνη L-Band. Σε αντίθεση με το GPS τα σήματα του GLONASS χρησιμοποιούν το FDMA (Frequency Division Multiple Access) δηλαδή ο κάθε δορυφόρος εκπέμπει σε μια μοναδική συχνότητα εντός του L-Band (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Οι δορυφόροι εκπέμπουν σε τρεις διαφορετικές ομάδες συχνοτήτων.

L1

- Συχνότητα 1.602 GHz
- Χρησιμοποιείται για πολιτική και για στρατιωτική χρήση
- Φέρει τους κώδικες L1C/A και L1P

L2

- Συχνότητα 1.264 GHz
- Χρησιμοποιείται για στρατιωτικές εφαρμογές και για ακριβή εντοπισμό θέσης
- Φέρει τον κώδικα L2P

L3

- Συχνότητα 1.202 GHz
- Χρησιμοποιείται για να παρέχει καλή ακεραιότητα του σήματος.
- Φέρει τον κώδικα L3

GALILEO: Τα σήματα από τους δορυφόρους του GALILEO μεταδίδονται και αυτά στη ζώνη L-Band. Τα σήματα αυτά έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι συμβατά με υπόλοιπα συστήματα όπως το GPS και το GLONASS. Χρησιμοποιείται το CDMA όπως και στο GPS επιτρέποντας πολλά σήματα να συνυπάρχουν στην ίδια ζώνη χωρίς παρεμβολές.

E1

- Συχνότητα 1.57542 GHz
- Χρησιμοποιείται για πολιτική χρήση και είναι συμβατή με τη συχνότητα L1 του GPS, η οποία βοηθά στη διαλειτουργικότητα μεταξύ των δύο συστημάτων
- Φέρει τον κώδικα E1

E5

- Συχνότητα 1.17645 GHz
- Παρέχει υψηλότερη ακρίβεια
- Φέρει τους κώδικες E5a & E5b

E6

- Συχνότητα 1.278 GHz
- Χρησιμοποιείται για να παρέχει περισσότερες πληροφορίες εναντίον των παρεμβολών
- Φέρει τον κώδικα E6

BeiDou: Και αυτά τα σήματα από το σύστημα των δορυφόρων μεταδίδονται στη ζώνη L-Band. Αρχικά το BeiDou παρείχε τοπική κάλυψη πάνω από την Κίνα και τις γύρω περιοχές με το BeiDou-1 και BeiDou-2 και μετέπειτα επεκτάθηκε σε παγκόσμια κάλυψη με το BeiDou-3. Χρησιμοποιεί και αυτό την ίδια διαμόρφωση σήματος CDMA.

BeiDou-3

B1

- Συχνότητα 1.561 GHz
- Χρησιμοποιείται για πολιτική χρήση
- Φέρει τον κώδικα B1I

B2

- Συχνότητα 1.207 GHz
- Παρέχει υψηλότερη ακρίβεια
- Φέρει τους κώδικες B2I

B3

- Συχνότητα 1.268 GHz
- Χρησιμοποιείται για πολιτική και στρατιωτική χρήση
- Φέρει τον κώδικα B3I

QZSS: Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε για να βελτιώσει την απόδοση του GPS ιδιαίτερα στα αστικά περιβάλλοντα. Το σύστημα αυτό παρέχει τοπική κάλυψη στην Ιαπωνία και στις γύρω περιοχές καθώς οι δορυφόροι βρίσκονται σε μια σχεδόν ζενίθ τροχιά που σημαίνει ότι είναι ορατοί το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας.

L1

- Συχνότητα 1.57542 GHz
- Χρησιμοποιείται για πολιτική χρήση και είναι συμβατή με τη συχνότητα L1 του GPS, η οποία βοηθά στη διαλειτουργικότητα μεταξύ των δύο συστημάτων
- Φέρει τον κώδικα L1C/A

L2

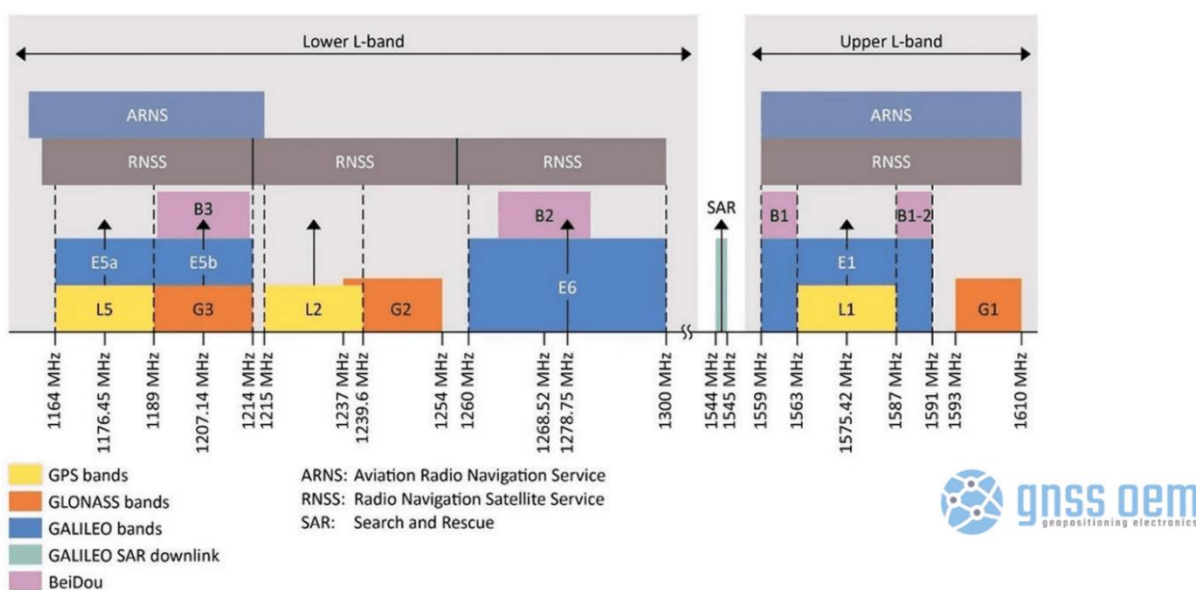
- Συχνότητα 1.22760 GHz
- Παρέχει υψηλότερη ακρίβεια
- Φέρει τον κώδικα L2C

L5

- Συχνότητα 1.17645 GHz
- Χρησιμοποιείται για να προηγμένες εφαρμογές safety-of-life
- Φέρει τον κώδικα L5

L6

- Συχνότητα 1.278 GHz
- Χρησιμοποιείται για να παρέχει βελτιωμένες υπηρεσίες εντοπισμού στην Ιαπωνία
- Φέρει τον κώδικα L6



Εικόνα 3.3 L-Band συχνότητες (πηγή: <https://gnss.store/blog/post/>)

Fourier Transformation

Ο μετασχηματισμός Fourier αποτελεί ένα μαθηματικό εργαλείο που χρησιμοποιείται σε δέκτες SDR GNSS για την επεξεργασία σήματος. Παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάλυση και την επεξεργασία των σημάτων που λαμβάνονται από τους δορυφόρους GNSS, όπως η συχνότητα, και φάση, που είναι απαραίτητες για ακριβή εντοπισμό θέσης. Η πιο κοινή μορφή μετασχηματισμού Fourier που χρησιμοποιείται στην επεξεργασία σήματος είναι ο Discrete Fourier Transformation (DFT) και ο αποτελεσματικός υπολογισμός του εκτελείται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Fast Fourier Transform (FFT) (Miralles & Closas, 2014).

Μία από τις πιο κοινές εφαρμογές του μετασχηματισμού Fourier στο GNSS είναι η χρήση του Fast Fourier Transform (FFT) για την απόκτηση σήματος. Αρχικά ο δέκτης λαμβάνει το εισερχόμενο σήμα του δορυφόρου και ο αλγόριθμος FFT εφαρμόζεται για τη μετατροπή του σήματος από το domain του χρόνου στο domain της συχνότητας. Έπειτα ο δέκτης αναζητά κορυφές που αντιστοιχούν στη συχνότητα φορέα του σήματος και οποιαδήποτε μετατόπιση Doppler. Μόλις εντοπιστεί το σήμα, ο δέκτης μπορεί να καθορίσει τη φάση του κώδικα και τη συχνότητα Doppler, απαραίτητα για τον υπολογισμό των ψευδοαποστάσεων και τελικά τη θέση του δέκτη.

Ο μετασχηματισμός Fourier μετατρέπει ένα σήμα περιοχής χρόνου $x(t)$ στην αναπαράσταση του τομέα συχνότητας:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} * dt$$

$x(t)$: το σήμα σε domain χρόνου

f : συχνότητα

DFT: Discrete Fourier Transform

Στην πράξη, οι δέκτες GNSS χρησιμοποιούν το Discrete Fourier Transform (DFT) αφού λειτουργούν με samples.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j(2\pi/N)kn}$$

όπου:

N : αριθμός δειγμάτων

n : ο δέκτης δείγματος χρόνου

k : ο δέκτης συχνότητας

FFT: Fast Fourier Transform

Ο FFT είναι ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τον αποτελεσματικό υπολογισμό του DFT (Miralles & Closas, 2014).

3.3 Η εξέλιξη στις δυνατότητες των SDR

Όπως ήδη προαναφέρθηκε οι δέκτες GNSS που είναι software based είχαν περιοριστεί μόνο στον τομέα της έρευνας και ανάπτυξης. Όμως λόγω της ραγδαίας αύξησης της ισχύς των σύγχρονων επεξεργαστών καθιστά τη χρήση του SDR όλο και πιο κατάλληλη.

Η έννοια του software defined radio ξεκίνησε να αναδύεται στα τέλη της δεκαετίας του '80 μέχρι τις αρχές του '90 από τον Joseph Mitola καθώς ωρίμαζαν οι τεχνολογίες ψηφιακής επεξεργασία. Αυτό ενέπνευσε τον καθηγητή Michael Braasch και τον τότε διδακτορικό φοιτητή Dennis Akos να πραγματοποιήσουν την πρώτη δημοσίευση σχετικά με το GNSS SDR το 1996. Αρχικά το GNSS SDR ήταν μόνο ένα ακαδημαϊκό εργαλείο που προοριζόταν για έρευνα καθώς μελετούσαν τη σκοπιμότητα χρήσης αλγορίθμων για τη λήψη και παρακολούθηση του σήματος. Ερευνητές από ιδρύματα όπως το πανεπιστήμιο του Stanford και το πανεπιστήμιο του Ohio άρχισαν να δημοσιεύουν εργασίας τα πρώτα GNSS SDR τα οποία βασίζονταν σε έναν high-end υπολογιστή και τόνισαν τις δυνατότητες εξέλιξής τους και σε πραγματικό χρόνο.

Τα πρώτα χρόνια έρευνας και ανάπτυξης των software defined δεκτών υπήρξε περιορισμός στην επεξεργαστική ισχύ ενός απλού microchip. Συχνά βασίζονταν σε λιγότερο ισχυρές CPU και GPU, οι οποίες περιόριζαν την πολυπλοκότητα και την ταχύτητα των αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος (Penny & Akos, 2023). Αυτό περιόρισε την ικανότητά τους να επεξεργάζονται πολλαπλά σήματα ή κανάλια ταυτόχρονα και μπορεί να χρειάζονταν περισσότερο χρόνο για τον υπολογισμό της θέσης. Οι εξελίξεις στην επεξεργαστική ισχύ με πολλαπλούς πλέον πυρήνες και εξειδικευμένοι επεξεργαστές όπως τα κυκλώματα FPGA και τα ASIC επιτρέπουν στους σύγχρονους software δέκτες GNSS να χειρίζονται πολύ πιο σύνθετες και υπολογιστικά εντατικές εργασίες. Αυτό επιτρέπει την επεξεργασία σημάτων σε

πραγματικό χρόνο από πολλαπλά δορυφορικά συστήματα GNSS και τη δυνατότητα εκτέλεσης εξελιγμένων αλγορίθμων διόρθωσης σφαλμάτων.

Οι παλαιότεροι δέκτες επίσης περιορίζονταν και στην επεξεργασία σημάτων μεμονωμένων συστημάτων όπως π.χ. το GPS και συχνά μόνο σε μια συχνότητα. Οι σύγχρονοι δέκτες έχουν σχεδιαστεί για να είναι εξαιρετικά ευέλικτοι, ικανοί να επεξεργάζονται σήματα από πολλαπλά δορυφορικά συστήματα (π.χ. GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou κλπ) και πολλαπλών συχνοτήτων ταυτόχρονα. Οι νέοι δέκτες μπορούν επίσης να προσαρμοστούν γρήγορα σε νέα σήματα ή αλλαγές χάρη στις ενημερώσεις λογισμικού (software updates).

Επίσης οι πρώτοι δέκτες είχαν απλούστερους και λιγότερο βελτιστοποιημένους αλγόριθμους. Μπορεί να αντιμετώπιζαν προκλήσεις όπως παρεμβολές εξαιτίας σφαλμάτων όπως multipath, εξασθένιση σήματος και αδύναμο tracking. Το λογισμικό ήταν συνήθως στατικό, με περιορισμένο πεδίο για ενημερώσεις και η ευελιξία δεν ήταν τόσο εύκολη. Οι σύγχρονοι software δέκτες GNSS επωφελούνται από προηγμένους αλγόριθμους, συμπεριλαμβανομένων τεχνικών μηχανικής εκμάθησης για επεξεργασία σήματος και βελτιωμένη διόρθωση σφαλμάτων. Αυτοί οι αλγόριθμοι ενημερώνονται συνεχώς και το λογισμικό μπορεί συχνά να αναβαθμιστεί ή να τροποποιηθεί για να βελτιώσει την απόδοση ή να προσθέσει νέες δυνατότητες. Αυτή η ευελιξία είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα, που επιτρέπει στον δέκτη να εξελίσσεται χωρίς να χρειάζεται κοστοβόρες αλλαγές όσον αφορά το Hardware.

Ένα μεγάλο εμπόδιο που αντιμετώπιζαν οι software δέκτες παλιά ήταν η διαλειτουργικότητα όπως η ενσωμάτωση με αδρανειακά συστήματα IMU. Οι σύγχρονοι δέκτες έχουν σχεδιαστεί με γνώμονα τη διαλειτουργικότητα, επιτρέποντας την ευκολότερη ενσωμάτωση με άλλους αισθητήρες και συστήματα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές όπως αυτόνομα οχήματα, drones και συσκευές IoT (Internet of Things), όπου τα δεδομένα GNSS συνδυάζονται με άλλα δεδομένα αισθητήρων για καλύτερα και πιο ακριβή αποτελέσματα.

Σημαντικό στοιχείο της εποχής είναι και το κόστος. Οι πρώτοι software δέκτες GNSS ήταν συχνά ακριβοί και απαιτούσαν εξειδικευμένο λογισμικό πράγμα το οποίο περιόριζε πολύ τη χρήση τους. Η τεχνολογική εξέλιξη στους επεξεργαστές έχουν μειώσει το κόστος λειτουργίας τέτοιων δεκτών GNSS (Hailey A. Nichols 2022).

Ακόμα η επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο ήταν μια σημαντική πρόκληση για τους πρώιμους δέκτες λόγω της περιορισμένης επεξεργαστικής ισχύος και των λιγότερο αποδοτικών αλγορίθμων. Υπήρχε συχνά αξιοσημείωτη καθυστέρηση στις διορθώσεις θέσης. Με την πρόοδο της τεχνολογικής εξέλιξης, των ταχύτερων επεξεργαστών και των πιο

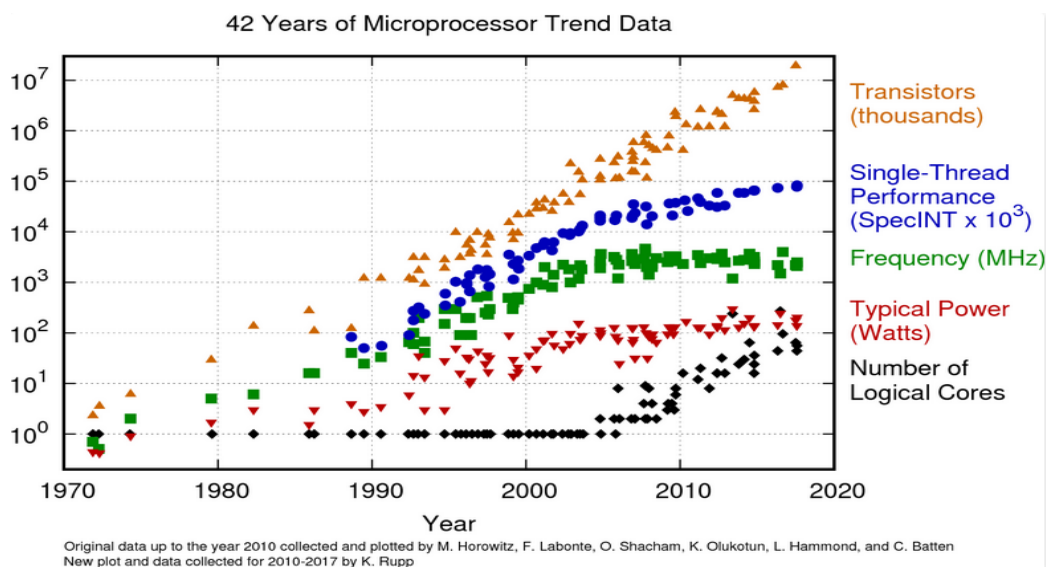
αποτελεσματικών αλγορίθμων, οι σύγχρονοι software defined δέκτες μπορούν να επεξεργάζονται σήματα σε πραγματικό χρόνο με ελάχιστη καθυστέρηση. Αυτή η βελτίωση είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές που απαιτούν στιγμιαίο εντοπισμό θέσης, όπως η αυτόνομη πλοήγηση (Pany & Akos, 2023).

Τέλος οι σύγχρονοι software δέκτες GNSS είναι συχνά ανοιχτού κώδικα ή διαθέτουν εκτεταμένες εργαλειοθήκες, καθιστώντας τους πολύτιμα εργαλεία για ερευνητές και προγραμματιστές. Επιτρέπουν τον πειραματισμό με νέους αλγόριθμους για την επεξεργασία σήματος.

Πλέον οι software defined GNSS δέκτες είναι ένας σοβαρός ανταγωνιστής των κλασικών GNSS δεκτών που χρησιμοποιούν ολοκληρωμένα κυκλώματα για την επεξεργασία των σημάτων και αυτό αναδεικνύεται και στην πράξη με διάφορα case studies που πραγματοποιούνται με τη χρήση SDR.

Ωστόσο και στους δέκτες αυτούς υπάρχουν προκλήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψιν.

- Απαιτήσεις ισχύος επεξεργασίας: Η εκτέλεση αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος GNSS σε λογισμικό είναι υπολογιστικά απαιτητική και απαιτεί σημαντική επεξεργαστική ισχύ. Τα SDR υψηλής τεχνολογίας μπορεί να χρειάζονται πολυπύρηνες CPU ή GPU, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τη χρήση τους σε συσκευές μικρής ή χαμηλής κατανάλωσης.
- Πολυπλοκότητα στην ανάπτυξη: Η ανάπτυξη ενός πλήρως λειτουργικού GNSS SDR είναι μια σύνθετη εργασία, που απαιτεί προηγμένη γνώση της επεξεργασίας σήματος και των αλγορίθμων GNSS, τα οποία ενδέχεται να περιορίσουν την υιοθέτησή του για εμπορικές εφαρμογές χωρίς επαρκή τεχνογνωσία.

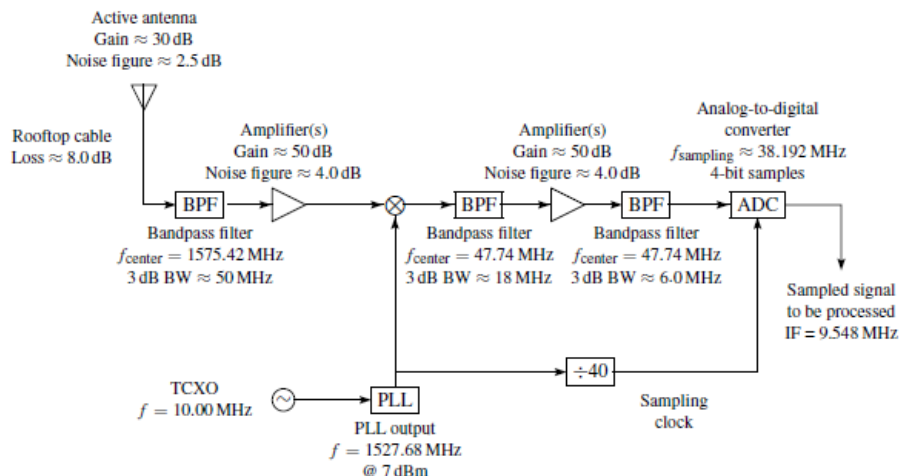


Εικόνα 3.4 Εξελικτική ισχύς των επεξεργαστών (πηγή: Horowitz al., 2010)

3.4 Κύκλωμα Front-End

Η όλη διαδικασία ξεκινάει από τη διάδοση του σήματος. Το σήμα καθώς διαδίδεται στο διάστημα, μέχρι να φτάσει και να το κάνει track ο δέκτης, έχει γίνει «αδύναμο» και η τάση του έχει γίνει εξαιρετικά ασθενής. Συγκεκριμένα για το σήμα του GPS L1, έχει ισχύ 160 dBW (Kai Borre, Dennis M. Akos) και φέρουσα συχνότητα 1575.42 όπως αναφέρεται και στον πίνακα. Το λαμβανόμενο σήμα είναι τόσο αδύναμο που στην πραγματικότητα είναι μικρότερο από το θερμικό θόρυβο που προκύπτει στα ηλεκτρονικά της κεραίας από την όλη διαδικασία.

Λόγω της αδύναμης ισχύς ενός τέτοιου σήματος θα ήταν ακατόρθωτο για έναν απλό μετατροπέα (ADC) που μετατρέπει το σήμα από αναλογικό σε ψηφιακό να λειτουργήσει (Hailey A. Nichols 2022). Για το λόγω αυτό ένα κύκλωμα FRONT END (Hofmann-Wellenhof et al., 2008) χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό ενισχυτών (amplifier), μείκτη (mixer) και διάφορων φίλτρων (filters) ώστε να έχουμε κατάλληλα ψηφιακά δείγματα.



Εικόνα 3.5 FRONT END (Borre, & Akos, 2006)

➤ **Φίλτρο**

Φίλτρο είναι μια συσκευή που επιτρέπει τη διέλευση μόνο συγκεκριμένων συχνοτήτων και εξασθενεί τις υπόλοιπες. Το πρώτο φίλτρο που χρησιμοποιείται έχει ως στόχο την περαιτέρω επιλεκτικότητα στη συνέχεια του συστήματος.

➤ **Ενισχυτής**

Ο ενισχυτής είναι ένα εργαλείο το οποίο αυξάνει την ισχύ του σήματος. Ένας ιδανικός ενισχυτής θα αύξανε μόνο το πλάτος του σήματος αλλά ένας επειδή χρησιμοποιείται ένας απλός ενισχυτής μαζί με την αύξηση της ισχύς του σήματος προστίθεται και λίγο παραπάνω θόρυβος, γεγονός το οποίο δε μας απασχολεί. Στόχος του ενισχυτή είναι να δυναμώσει το σήμα ώστε η μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό να γίνει ευκολότερα.

➤ **Μίκτης (mixer)**

Ο ρόλος ενός μίκτη μαζί με τη συνδρομή ενός ταλαντωτή είναι να κρατήσει το σήμα που δέχεται σε μια ενδιάμεση συχνότητα IF (intermediate frequency), ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το εύρος του σήματος στη συνέχεια από τον μετατροπέα ADC.

4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ SDR ΓΙΑ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας η αξιολόγηση των software defined GNSS δεκτών γίνεται μέσω ενός τέτοιου δέκτη που κυκλοφόρησε για πρώτη φορά στην αγορά πριν από λίγα χρόνια. Πρόκειται για το δέκτη Trimble Catalyst, ο οποίος αποτέλεσε και το μοναδικό αντίστοιχο προϊόν που βγήκε στην αγορά από τις μεγάλες εταιρίες που ειδικεύονται στην κατασκευή γεωδαιτικών δεκτών. Οι δοκιμές έγιναν με έναν τέτοιο δέκτη που διαθέτει το Εργαστήριο Γεωδαισίας – Τοπογραφίας και GNSS του ΠΑΔΑ. Στη συνέχεια περιγράφεται ο δέκτης αυτός, παρατίθενται αποτελέσματα χρήσης του από τη διεθνή βιβλιογραφία και από τις μετρήσεις που έγιναν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας.

4.1 Περιγραφή των δεκτών Trimble Catalyst DA1 και DA2

Το 2016 η TRIMBLE κατασκεύασε έναν software defined δέκτη που τον ονόμασε Catalyst.

Ο πρώτος δέκτης που δημιούργησαν ήταν ο Trimble Catalyst **DA1** όπου χρησιμοποιούσε το ψηφιοποιημένο σήμα από ένα μικρό κύκλωμα RF και έπειτα χάρη στην ισχύ του επεξεργαστή ενός smart phone υπολόγιζε τη θέση του χρήστη. Έπειτα το 2021 δημιουργήθηκε ο δέκτης δεύτερης γενιάς που ονομάστηκε Trimble Catalyst **DA2** ο οποίος έχει ήδη ενσωματωμένο έναν επεξεργαστή στην κεραία ώστε να αποφύγει να χρησιμοποιεί τον επεξεργαστή του Smart phone, συν κάποια βελτιωμένα features.



Εικόνα 4.1 Δέκτες Trimble Catalyst DA1 (αριστερά) και DA2 (δεξιά).

Ο Trimble Catalyst λειτουργεί συνδρομητικά, δηλαδή ο χρήστης αγοράζει μια καθορισμένη χρονική περίοδο ή ένα πρόγραμμα ανάλογα με τις ανάγκες του. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1, οι συνδρομές που είναι διαθέσιμες είναι συνυφασμένες και με την απαιτούμενη ακρίβεια που χρειάζεται ο κάθε χρήστης. Κάθε συνδρομή μπορεί να λειτουργήσει σε μια μόνο συσκευή τη φορά και όχι σε πολλές ταυτόχρονα.

Πίνακας 4.1 Συνδρομές Catalyst και ακρίβειες (<https://catalyst.seilergeo.com/catalyst-home/>)

Catalyst 1 subscription	10 mm HRMS + 1ppm / 20 mm VRMS + 1ppm after 2 minutes
Catalyst 10 subscription	10 cm HRMS and VRMS after 1 minute
Catalyst 30 subscription	30 cm HRMS and VRMS after 1 minute
Catalyst 60 subscription	60 cm HRMS and VRMS after 1 minute
No subscription	200 cm (autonomous) after 1 minute

4.1.1 Δέκτης Trimble Catalyst DA1

Ο δέκτης DA1 αποτελείται από μια μικρή κεραία μικρού κόστους στην οποία ενσωματώνεται και ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Το ψηφιακό σήμα τροφοδοτείται σε μία φορητή συσκευή όπου μέσα από την εφαρμογή του android δέχεται τα δορυφορικά σήματα και τις διορθώσεις ώστε να υπολογίσει την θέση με ακρίβεια. Λόγω του μεγέθους του είναι φορητός και κατάλληλος για εργασίες πεδίου. Ο δέκτης είναι ικανός να επεξεργάζεται σήματα από πολλά συστήματα GNSS όπως GPS, GLONASS και Galileo καθώς και από QZSS, MSS και SBAS. Η κεραία όμως έχει δυνατότητα να λαμβάνει μόνο σήματα μονής συχνότητας, εστιάζοντας στη ζώνη L1.

Το offset του κέντρου της κεραίας βρίσκεται 2.433 ίντσες ή 61.8mm. Οι ελάχιστες απαιτήσεις για τη φορητή συσκευή που φιλοξενεί την εφαρμογή είναι:

- Λειτουργικό android 5.0 και πάνω (δεν είναι διαθέσιμο σε ios συσκευές)
- 64-bit CPU με τουλάχιστον 4 πυρήνες
- Ταχύτητα επεξεργαστή 1.5 GHz ή παραπάνω
- 1.5 GB μνήμη RAM ή παραπάνω

Η κύρια σύνθεση ενός τέτοιου συστήματος αποτελείται από τρία components:

1. από τον Catalyst receiver
2. από μια συσκευή συλλογής δεδομένων (android phone)
3. και από τη συνδρομή στην υπηρεσία της Trimble

Η σύνδεση της κεραίας με το κινητό γίνεται μέσω ενός καλωδίου USB καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα ασύρματης σύνδεσης Bluetooth. Η τροφοδοσία της συσκευής πραγματοποιείται είτε μέσω του καλωδίου USB το οποίο συνδέεται με το κινητό είτε μέσω μιας εξωτερικής μπαταρίας μέσω ξεχωριστής θύρας USB που διαθέτει ο δέκτης. Οι προδιαγραφές και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη δίνονται στις Εικόνες 4.1 και 4.2 αντίστοιχα.

PERFORMANCE SPECIFICATIONS	
Features	
• GNSS signals supported:	
–	GPS: L1C/A, L2C
–	Galileo: E1
–	GLONASS: G1
–	QZSS: L1/L2C
–	SBAS: L1C/A WAAS, EGNOS, GAGAN, L1 SAIF QZSS
–	MSS (or L-band): Trimble RTX
• Trimble RTX correction services	
• Real-time message formats: RTCM 3.0, RTCM 3.1, RTCM 3.2, CMRx	
• Channels: Track and use up to 32 satellites	
• Positioning Rates: 1 Hz, 5 Hz	

Εικόνα 4.1 Προδιαγραφές δέκτη DA1 (πηγή: DA1 manual).

HARDWARE - TRIMBLE CATALYST DA1 DIGITAL ANTENNA		
Physical		
Dimensions (W x H)	130 mm x 60 mm (5.1 in x 2.4 in)	
Weight	300 grams (11 oz)	
Temperature		
Operating	-20 °C to +60 °C (-4 °F to +140 °F)	
Storage	-30 °C to +70 °C (-22 °F to +158 °F)	
Humidity	95%, condensing/humidity proof	
Ingress Protection	IP65	
Shock and vibration		Tested and meets the following environmental standards:
Shock ...	Non-operating: Designed to survive a 2 m (6.6 ft) pole drop onto concrete	
Vibration	MIL-STD-810G, Method.514.6 Procedure 1 Category 24	
Altitude	MIL-STD-810G Low Pressure/Altitude Method 500.5, Procedures I, II and III (9000 m/29,500 ft)	
Salt Resistance	MIL-STD 810G test method 509.5	
Chemical Resistance	MIL-STD 810G test method 504.1 Procedure 1	

Εικόνα 4.2 Χαρακτηριστικά δέκτη DA1 (πηγή: DA1 manual).

4.1.2 Δέκτης Trimble Catalyst DA2

Ο δέκτης DA2 είναι ένας ελαφρύς δέκτης GNSS πιο εξελιγμένος καθώς διαθέτει περισσότερες δυνατότητες. Βασικότερο χαρακτηριστικό που τον διακρίνει σε σχέση με τον προκάτοχό του DA1 που ήταν δέκτης μίας συχνότητας, είναι ότι ο DA2 λαμβάνει σήματα σε δύο συχνότητες για κάθε GNSS που υποστηρίζει. Ο DA2 έχει σχεδιαστεί για να παρέχει καλύτερη απόδοση σε αφιλόξενα περιβάλλοντα, με βελτιωμένες δυνατότητες επεξεργασίας σήματος που βελτιώνουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία. Ο δέκτης είναι ικανός να επεξεργάζεται σήματα από πολλά συστήματα GNSS όπως GPS, GLONASS και Galileo καθώς και από QZSS, MSS και SBAS. Επίσης υποστηρίζει και BeiDou σε αντίθεση με τον DA1. Αναλυτικότερα τα σήματα που υποστηρίζει, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.3, είναι:

- L1 και L5 από GPS
- E1 και E5 από GALILEO
- B1 και B2 από BeiDou
- L1 και L2 από GLONASS

Ο δέκτης DA2 είναι κατάλληλος για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας καθώς έχει περισσότερες δυνατότητες υποστηρίζοντας περισσότερες συχνότητες. Οι ελάχιστες απαιτήσεις για τη φορητή συσκευή που φιλοξενεί την εφαρμογή είναι:

- Λειτουργικό android 5.0 και πάνω ή ios 13.0 και πάνω
- 4-bit CPU με τουλάχιστον 4 πυρήνες
- Μέγιστη ταχύτητα επεξεργαστή 1.5 GHz ή παραπάνω
- 1.5 GB μνήμη RAM ή παραπάνω

Αυτή τη φορά η σύνδεση μεταξύ του δέκτη και της κινητής συσκευής μπορεί να πραγματοποιηθεί και με τη χρήση Bluetooth και με συσκευές apple που έχουν λογισμικό ios. Η φόρτιση του δέκτη πραγματοποιείται αυτή τη φορά είτε με τη χρήση ενός power bank είτε με τη χρήση καλωδίου USB με το κινητό.

Επίσης διαθέτει και την τεχνολογία ProPoint της Trimble. Είναι μια τεχνολογία που προσφέρει βελτιωμένη απόδοση εντοπισμού θέσης σε δύσκολα περιβάλλοντα όπως κοντά σε δέντρα και σε κτίρια. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη δίνονται στην Εικόνα 4.4.

SIGNAL TRACKING	
• Trimble ProPoint GNSS positioning technology for improved accuracy and productivity in challenging GNSS conditions ¹	
• GPS: L1C/A, L2C, L5	
• GLONASS: L1C/A, L2C/A	
• SBAS: L1C/A, L2C, L5	
• Galileo: E1, E5A	
• BeiDou: B1, B2A	
• QZSS: L1C/A, L2C, L5	
• NavIC (IRNSS): L5	
• Digital channels: Software controlled by Catalyst dynamic signal tracking using mathematical channels	

Εικόνα 4.3 Προδιαγραφές δέκτη DA2 (πηγή: DA2 manual).

MECHANICAL	
Dimensions (Diameter x Depth).....	128 x 55 mm
Weight	330 g (11.6 oz)
Ingress protection level.....	IP65 (dust proof, rain proof)
Drop, shock, & vibration	Survives 2 m tipping falls Survives 1.2 m free falls to concrete Survives vibrations & mechanical shocks (MIL-STD-810G test method)
Supported Platforms	
Android	Android 5.0 (Pie) and higher
iOS	iOS 13.0 and higher
COMMUNICATIONS/CONNECTIVITY	
Bluetooth	4.2
Apple	Made for iOS certified
Ports.....	USB-A (Power only)
Data protocols.....	NTRIP, VRS, RTCM 3.x, CMRx, DCOL
Position output	NMEA (LLH), DCOL Android Location Service Apple Location Service Android Location Extras
BATTERY AND POWER	
Requires external USB battery pack	
External power input	USB-A (5 Vdc 1 A)
Power consumption.....	0.5–2.5 W
ENVIRONMENTAL	
Operating ambient temperature	–20 °C to 60 °C (–4 °F to 140 °F)
Storage temperature.....	–40 °C to 70 °C (–40 °F to 158 °F)
Operating humidity95% RH, non-condensing
Operating altitude	Tested to 9,000 m (29,500 ft)

Εικόνα 4.4 Χαρακτηριστικά δέκτη DA2 (πηγή: DA2 manual).

Για να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή ακρίβεια ο δέκτης συνεργάζεται με την τεχνολογία της Trimble Correction Hub. Είναι μια αυτοματοποιημένη υπηρεσία διόρθωσης σφαλμάτων μέσω του Trimble VRS, Trimble RTX και SBAS ανάλογα με τη συνδρομή που έχει επιλέξει ο κάθε χρήστης. Το VRS στηρίζεται σε επίγειους σταθμούς οι οποίοι παρέχουν διορθώσεις σε RTK.

Μια ενδεικτική σύγκριση των δεκτών DA1 και DA2 δίνεται στην Εικόνα 4.5.Επισημαίνεται όμως ότι στη σύγκριση αυτή θα έπρεπε να συμπεριλαμβάνεται και η δυνατότητα λήψης σημάτων σε δύο συχνότητες.

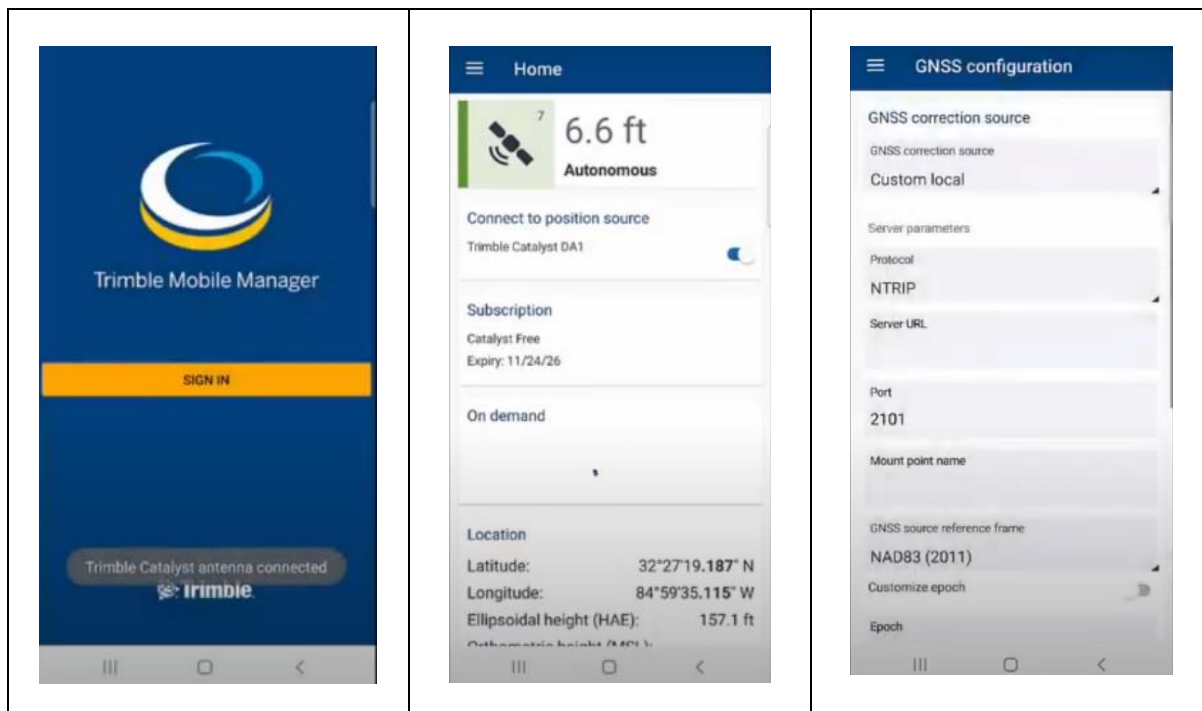
	DA1	DA2
Android Compatible	✓	✓
iOS Compatible		✓
Bluetooth Enabled		✓
Trimble Catalyst App	✓	
Trimble Correction Hub	✓	✓
Trimble ProPoint Technology		✓

Εικόνα 4.5 Ενδεικτική σύγκριση δεκτών DA1 και DA2 (πηγή:

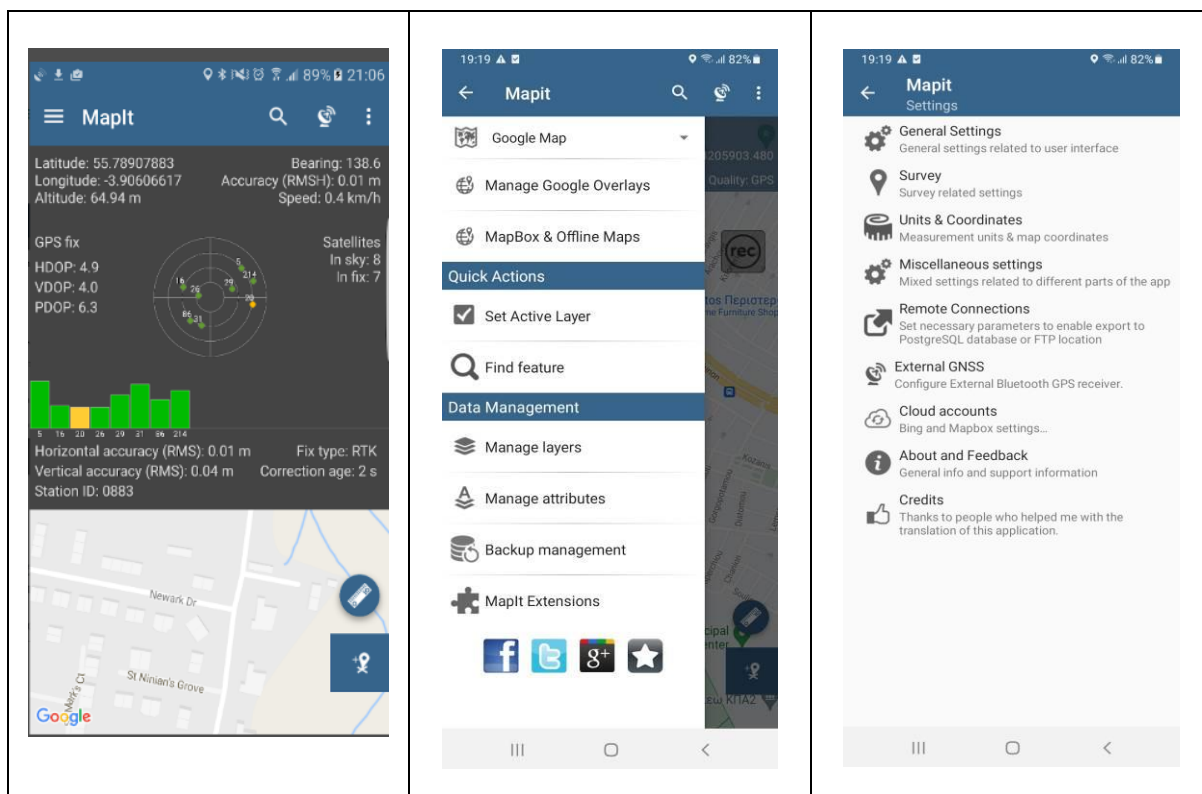
<https://experience.arcgis.com/experience/592209cf53ab44f58a3b74a84470ac48/>)

4.1.3 Λογισμικά πεδίου για το δέκτη Trimble Catalyst

Για τη λειτουργία των δεκτών Catalyst η κατασκευάστρια εταιρία έχει αναπτύξει την εφαρμογή Trimble Mobile Manager για χρήση με συσκευές Android (Εικόνα 4.6). Η εφαρμογή αυτή όμως δεν μπορεί χρησιμοποιηθεί ελεύθερα γιατί προϋποθέτει ενεργοποίηση. Για το λόγο αυτό στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά και η εφαρμογή Marit, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 4.7.



Εικόνα 4.6 Η εφαρμογή Trimble Mobile Manager.



Εικόνα 4.7 Η εφαρμογή Mapit.

4.2 Αποτελέσματα από διεθνείς μελέτες

Υπάρχουν λίγες έρευνες σχετικά με τη χρήση software defined δεκτών και πιο συγκεκριμένα δεκτών όπως τον Trimble catalyst DA1 & DA2 όπου γίνεται χρήση και αξιολόγηση των δεδομένων στο πεδίο και σύγκριση με άλλες συσκευές όπως total station και hardware δεκτών. Τέτοιες έρευνες πραγματοποιούνται από Πανεπιστημιακά ιδρύματα ή από επιστημονικές/ερευνητικές ομάδες για να δουν την αξιοπιστία των GNSS SDR σε σχέση με τις υπόλοιπες εμπορικές συσκευές και πόσο η χρήση τους μπορεί να αποδειχθεί σκόπιμη και αξιόπιστη.

4.2.1 Έρευνα στη Νορβηγία

Η 1η έρευνα που αφορά GNSS receivers χαμηλού κόστους διερευνά τη σκοπιμότητα χρήσης προσιτών δεκτών GNSS, σε συνδυασμό με λογισμικό ανοιχτού κώδικα, για κτηματογράφηση (Nysæter & Leiknes, 2023).

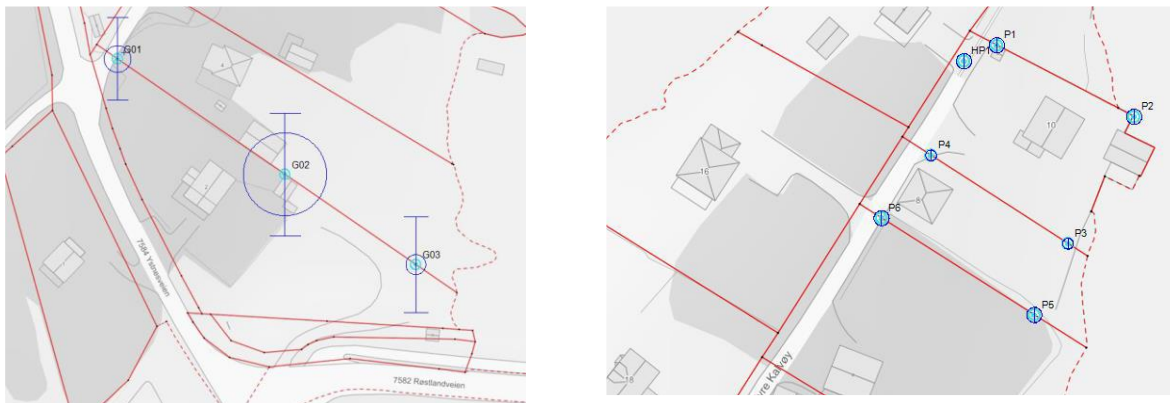
Ο πρωταρχικός στόχος της έρευνας είναι να αξιολογήσει εάν οι χαμηλού κόστους δέκτες GNSS, όπως ο Emlid Reach RS2 (όχι SDR) και ο Trimble Catalyst DA2 (SDR), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη χαρτογράφηση ορίων γεωτεμαχίων, ειδικά σε περιοχές όπου οι συμβατικές λύσεις υψηλού κόστους δεν είναι πρακτικές. Η έρευνα ελέγχει εάν αυτή η μέθοδος μπορεί να καλύψει τις κτηματολογικές απαιτήσεις για την καταχώρηση των γεωτεμαχίων στην κτηματολογική βάση στη Νορβηγία.

Αρχικά χρησιμοποίησαν τον δέκτη Emlid Reach RS2 GNSS, έναν δέκτη χαμηλού κόστους. Αυτή η συσκευή είναι γνωστή για την ικανότητά της να εκτελεί κινηματική σε πραγματικό χρόνο (RTK), προσφέροντας ακρίβεια σε επίπεδο εκατοστών, η οποία είναι βασική απαίτηση για τη χαρτογράφηση ορίων.

Ένα σημαντικό μέρος της έρευνας είναι η χρήση του Trimble Catalyst DA2. Ο Trimble Catalyst αποτελεί σημαντικό μέρος της έρευνάς τους, καθώς αντιπροσωπεύει έναν σύγχρονο δέκτη GNSS που η ακρίβεια του βασίζεται σε συνδρομή και παρέχει εντοπισμό θέσης υψηλής ακρίβειας μέσω μιας προσιτής πλατφόρμας. Έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με smart phone ή tablet, παρέχοντας ακριβή τοποθεσία. Ο δέκτης Trimble Catalyst DA2 επισημαίνεται ως ένα βασικό εργαλείο δοκιμών. Είναι ένας φορητός δέκτης GNSS που συνδέεται με φορητές

συσκευές μέσω Bluetooth, χρησιμοποιώντας την υπηρεσία Catalyst της Trimble για την παροχή δεδομένων GNSS υψηλής ακρίβειας. Οι χρήστες μπορούν να επιλέξουν διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας που κυμαίνονται από μέτρο έως εκατοστό, ανάλογα με την επιλεγμένη συνδρομή.

Τον δέκτη της Trimble χρησιμοποίησαν τρεις ομάδες μαθητών μετρώντας τα όρια ιδιοκτησιών και σύγκριναν τα αποτελέσματα με τον δέκτη της Leica GS18, έναν εμπορικό δέκτη σχεδιασμένο σε hardware αρχιτεκτονική. Στην Εικόνα 4.8 δίνονται ενδεικτικά κάποια από τα σημεία που μετρήθηκαν.



Εικόνα 4.8 Σημεία (ενδεικτικά) από αυτά που μετρήθηκαν στη μελέτη στη Νορβηγία.

Η πρώτη ομάδα μέτρησε μόνο ένα σημείο ενός ορίου ιδιοκτησίας. **Οι διαφορές που προκύπτουν από τις μετρήσεις των δύο δεκτών στο οριζόντιο επίπεδο βρίσκονται εντός των ορίων του αναμενόμενου με βάση τις εκτιμώμενες τυπικές αποκλίσεις, της τάξης του 1.1 cm κατά y και 1.9 cm κατά x.** Παρατηρείται πολύ μεγάλη διαφορά στο υψόμετρο της τάξης 1.793 m, που ίσως έχει να κάνει με το setup του DA2 πάνω στο στείλεό.

Η δεύτερη ομάδα μέτρησε αυτή τη φορά τρία σημεία ενός ορίου ιδιοκτησίας με τα ίδια όργανα. **Οι διαφορές που προκύπτουν από τις μετρήσεις στο οριζόντιο επίπεδο βρίσκονται εντός των ορίων και οι μέγιστες αποκλίσεις είναι της τάξης 1.9 cm κατά y και 0.7 cm κατά x.** Παρατηρείται και εδώ πολύ μεγάλη διαφορά στο υψόμετρο της τάξης 2.155 m.

Η τρίτη ομάδα μέτρησε τα όρια δύο γειτονικών γεωτεμαχίων. Φαίνεται η ακρίβεια στη μέτρηση του ύψους από τον DA2 να έχει χαθεί καθώς τα υψόμετρα παρουσιάζονται με ακρίβεια ενός δεκαδικού και αυτό ίσως οφείλεται σε κάποιο πρόβλημα κατά τη μεταφορά των δεδομένων. Πάλι παρατηρείται μεγάλη διαφορά στο υψόμετρο της τάξης των 3 μέτρων, **ενώ οι μέγιστες διαφορές κατά y είναι 1.6 cm και κατά x 0.7 cm.**

Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε ένα μικρό νησί το οποίο είναι σχεδόν επίπεδο χωρίς δέντρα και πολλά εμπόδια που να εμποδίζουν την ορατότητα και τη λήψη σήματος. Οι συνθήκες λοιπόν ήταν ιδανικές. Παρά τα προβλήματα που εμφανίστηκαν στις μετρήσεις του ύψους, η έρευνα καταλήγει ότι για εργασίες κτηματογράφησης ο DA2 είναι ιδανικός και οι διαφορές μεταξύ των συσκευών ήταν αμελητέες καθώς η πληροφορία του ύψους δεν χρειάζεται για τις εφαρμογές της κτηματογράφησης.

4.2.2 Έρευνα σε Ρώμη, Αίγυπτο και Ιράκ

Η 2^η έρευνα αφορά τη χρήση του δέκτη Trimble Catalyst DA2, σε αρχαιολογικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ο DA2 ο οποίος συνδεόταν μέσω Bluetooth σε ένα smart phone με την συνδρομή που φέρνει την καλύτερη ακρίβεια της τάξης του 1 cm (Brienza, 2023).

Οι τρεις περιοχές που πραγματοποιήθηκαν οι έρευνες ήταν

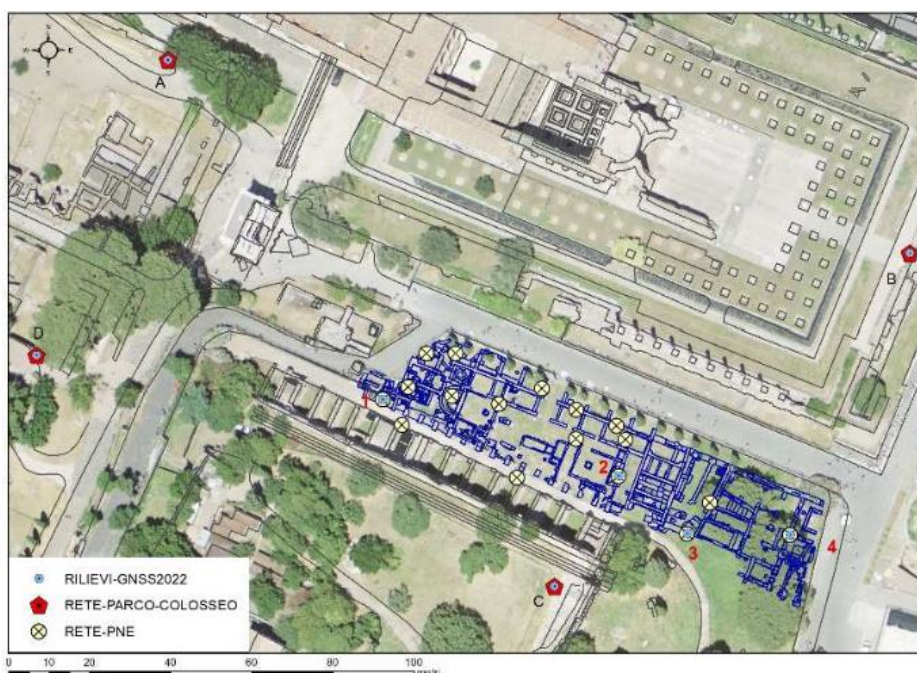
- Curiae Veteres στη Ρώμη της Ιταλίας
- Ο ναός του ήλιου του Niuserra στην Αίγυπτο και
- Το αρχαίο αξιοθέατο του Eridou στο Ιράκ

Ρώμη - Curiae Veteres

Κατά τη διάρκεια των εκσκαφών και των ερευνητικών δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται για περισσότερο από 30 χρόνια, έχουν ανακαλυφθεί πολλά αρχαία κτίρια φέρνοντας στο φως μια πρώτη τοπογραφική και πολεοδομική εικόνα της εποχής. Μια από τις πρώτες εργασίες μετά το πέρας των ανασκαφών ήταν να γίνει μια τοπογραφική αποτύπωση

για τη μελλοντική συντήρηση του χώρου. Τα σημεία που μετρήθηκαν φαίνονται στην Εικόνα 4.9.

Το λογισμικό Trimble Mobile Manager για να προσφέρει τις απαραίτητες διορθώσεις των δεδομένων για την απαιτούμενη ακρίβεια είναι απαραίτητο να είναι συνδεδεμένο στην Online υπηρεσία. Επίσης στη συγκεκριμένη περιοχή της Ρώμης λόγω της ύπαρξης εξαιρετικής γραμμής τηλεφωνίας οι διορθώσεις που παρέχονταν ήταν γρήγορες και ασφαλής χωρίς να υπάρξει καμία διακοπή δεδομένων.



Εικόνα 4.9 Τα σημεία που μετρήθηκαν στη Ρώμη.

Εξετάζοντας τις διαφορές των μετρήσεων στα σταθερά τοπογραφικά σημεία αναφοράς του Κολοσσαίου με τις μετρήσεις του DA2, **τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν πολύ ικανοποιητικά, με τις αποκλίσεις να είναι της τάξης των 2cm για τα τοπογραφικά σημεία αναφοράς** και της τάξης των 2-4cm μεταξύ της νέας φωτογραμμετρικής αποτύπωσης που πραγματοποιήθηκε σε σχέση με τα παλιά ψηφιακά σχέδια που είναι φυσιολογικό λόγω της διαφορετικής ανάλυσης.

Ο ναός του ήλιου του Niuserra στην Αίγυπτο

Μια ερευνητική ομάδα η οποία συντίθεται από πολλά Πανεπιστήμια ξεκίνησε το 2010 αρχαιολογικές έρευνες στο ναό του Ήλιου. Για την αποτύπωση του ναού υπήρξαν πολλά

εμπόδια. Αρχικά η γεωαναφορά και η σύνδεση του Ναού με τις κοντινές αρχαιολογικές περιοχές ήταν δύσκολη καθώς τα εθνικά γεωγραφικά σημεία δεν ήταν ορατά από την περιοχή και η χρήση ενός δέκτη GNSS δεν επιτρεπόταν για στρατιωτικούς σκοπούς. Όσον αφορά τα υψόμετρα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν συμβατικές τιμές καθώς δεν ήταν δυνατόν να υπολογιστούν οι απόλυτες τιμές από τη στάθμη της θάλασσας.

Ο δέκτης DA2 ήταν το κατάλληλο εργαλείο για την ακριβή γεωαναφορά κατά την αρχαιολογική έρευνα.

Δεδομένου ότι η ακρίβεια εκατοστού που χρειάζεται δεν εγγυάται πλήρως στην Αφρική από την Trimble και η γραμμή τηλεφωνίας δεν είναι σταθερή έχουν μετρηθεί τα σημεία αναφοράς του τοπογραφικού δικτύου πολλές φορές. Τα σημεία που μετρήθηκαν φαίνονται στην Εικόνα 4.10.



Εικόνα 4.10 Τα σημεία που μετρήθηκαν στην Αίγυπτο.

Η σύγκριση που γίνεται μεταξύ του DA2 και ενός γεωδαιτικού σταθμού που χρησιμοποιείται για τα ίδια σταθερά σημεία φέρουν σχεδόν πανομοιότυπα αποτελέσματα με αποκλίσεις της τάξης των 2 cm.

Το αρχαίο αξιοθέατο του Eridou στο Ιράκ

Eridou είναι η περιοχή που πραγματοποιήθηκε η πρώτη αστική συσσώρευση της εποχής και βρίσκεται στην κάτω Μεσοποταμία. Η ανασκαφή του μνημείου ξεκίνησε το 1900 αλλά η συστηματική έρευνα ξεκίνησε το 2022.

Για την πραγματοποίηση των ερευνών ήταν αναγκαίο να δημιουργηθεί ένα νέο τοπογραφικό δίκτυο. Η χρήση του DA2 ήταν αρκετά δύσκολη καθώς οι μετρήσεις έπρεπε να πραγματοποιηθούν πολλές φορές, αφού η κινητή τηλεφωνία στην περιοχή ήταν συνεχώς πεσμένη. Οι συνεχόμενες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τον Catalyst DA2 πάνω σε ένα δίποδο ώστε να χρησιμοποιείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η απόκλιση που παρατηρήθηκε ήταν της τάξης των 2-3cm.

Τα σημεία που μετρήθηκαν φαίνονται στην Εικόνα 4.11.



Εικόνα 4.11 Τα σημεία που μετρήθηκαν στο Ιράκ.

Τα σημεία αυτά μετρήθηκαν και εδώ με γεωδαιτικό σταθμό για τον έλεγχο της ακρίβειας. **Η σύγκριση που γίνεται μεταξύ του DA2 και ενός γεωδαιτικού σταθμού που χρησιμοποιείται για τα ίδια σταθερά σημεία φέρουν σχεδόν πανομοιότυπα αποτελέσματα της τάξης του 1 cm οριζοντιογραφικά και της τάξης 4 cm υψομετρικά.**

Κατά τη διάρκεια αυτών των μελετών, η χρήση του Trimble Catalyst DA2 ήταν ικανοποιητική.

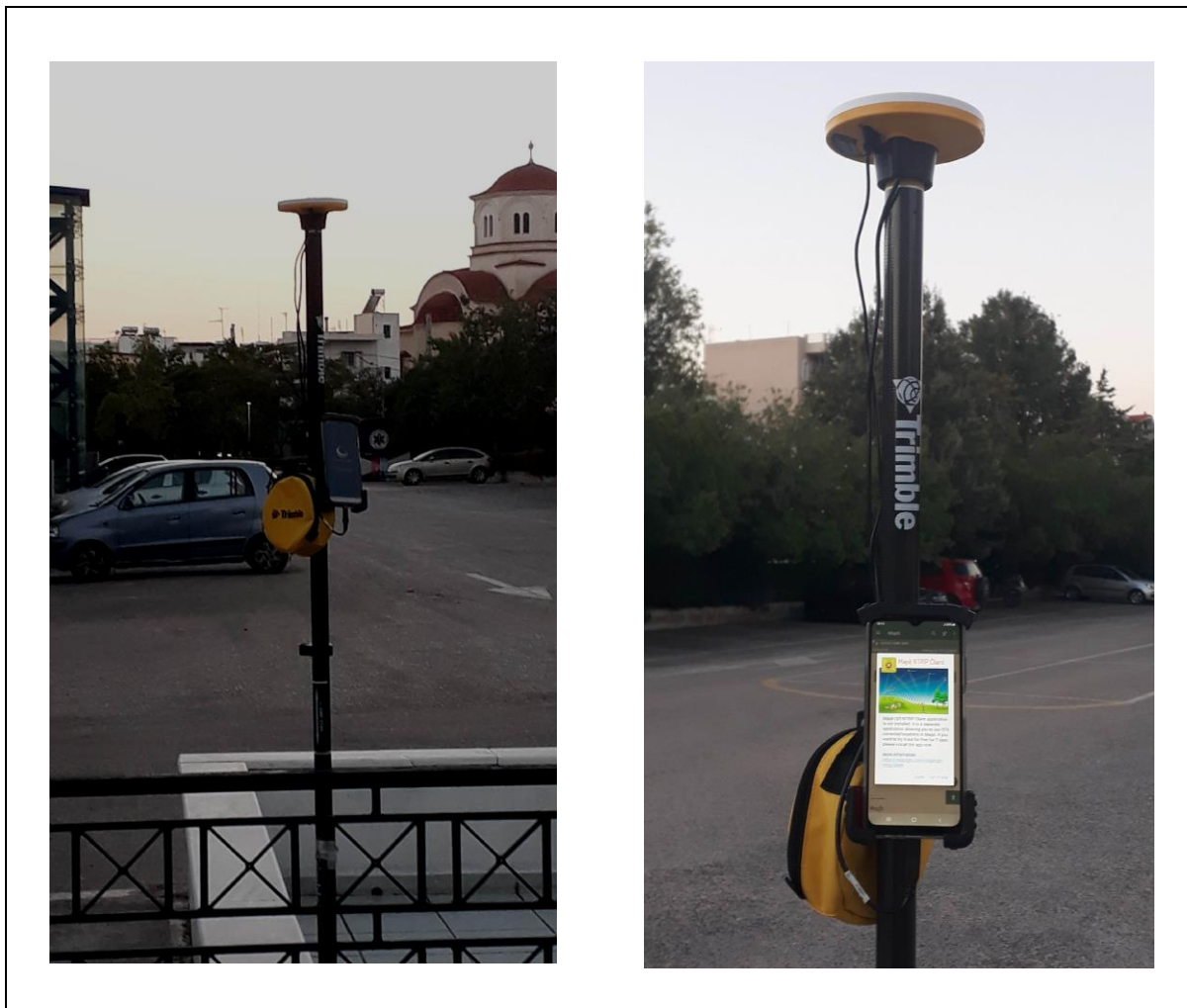
Αρχικά είναι προτιμότερο ο δέκτης αυτός να χρησιμοποιείται σε περιοχές όπου η τηλεφωνική γραμμή είναι επαρκής αλλιώς είναι αναγκαία η σύνδεση στην Online εφαρμογή της Trimble. Δεύτερον πρέπει να υφίσταται ιδιαίτερη προσοχή στα χονδροειδή σφάλματα και να πραγματοποιούνται επαναλαμβανόμενες μετρήσεις μέσα στην ημέρα για λίγες μέρες. Ο DA2 μέχρι σήμερα δεν επιτρέπει να πετύχουμε ακρίβειες χιλιοστού και δεν μπορεί να αντικαταστήσει έναν γεωδαιτικό σταθμό όσον αφορά μετρήσεις σημείων λεπτομέρειας. Ωστόσο υπάρχουν πολλά θετικά στη χρήση του όπως η ευελιξία που παρέχει, η απλότητα του και η δεδομένη ακρίβεια των λίγων εκατοστών που παρέχει ακόμα και σε δυσμενής περιοχές.

4.3 Αποτελέσματα από μετρήσεις πεδίου στο ΠΑΔΑ

Για την αξιολόγηση της απόδοσης των SDR δεκτών, χρησιμοποιήθηκε ο δέκτης Trimble Catalyst DA1 που διαθέτει το Εργαστήριο Γεωδαισίας-Τοπογραφίας και GNSS του ΠΑΔΑ και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου στην Πανεπιστημιούπολη του ΠΑΔΑ στο Αιγάλεω. Οι μετρήσεις έγιναν το Σεπτέμβριο του 2024 (βλ. Εικόνες 4.12 και 4.13).



Εικόνα 4.12 Στιγμιότυπο από τις μετρήσεις στην Πανεπιστημιούπολη του ΠΑΔΑ.



Εικόνα 4.13 Στιγμιότυπα από τις μετρήσεις στην Πανεπιστημιούπολη του ΠΑΔΑ.

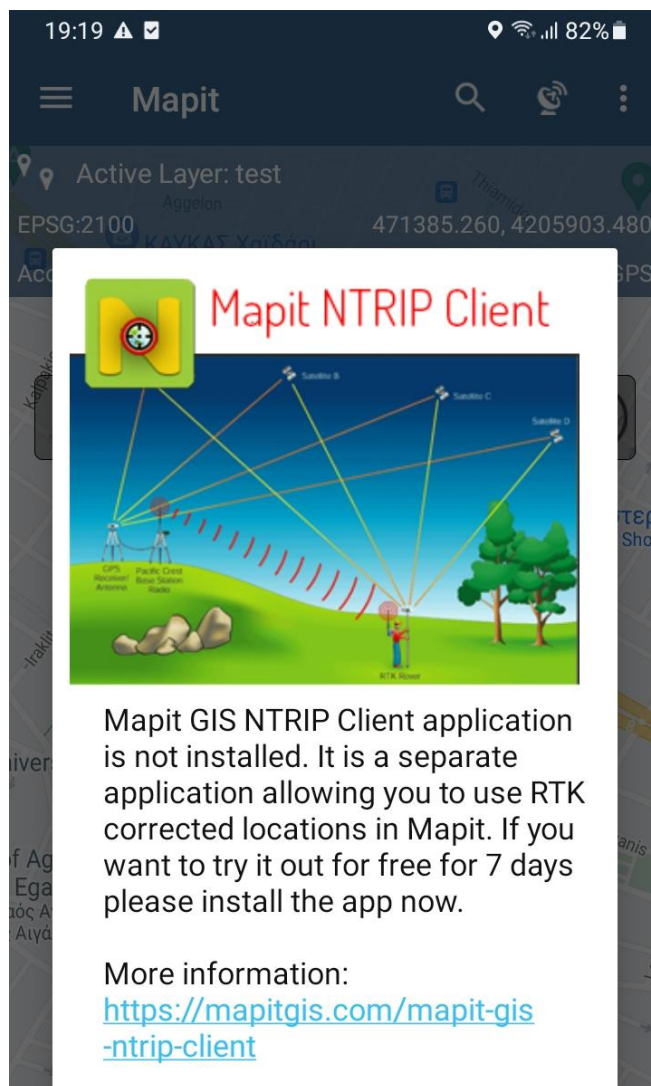
Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ως base ο μόνιμος σταθμός αναφοράς UNIWA1 του Εργαστηρίου Γεωδαισίας-Τοπογραφίας και GNSS, ο οποίος είναι εγκατεστημένος στην Πανεπιστημιούπολη του ΠΑΔΑ. Η κεραία του σταθμού (Trimble Zephyr Geodetic 3) είναι τοποθετημένη στο δώμα της Κεντρικής Βιβλιοθήκης του ΠΑΔΑ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.14. Η θέση αυτή εξασφαλίζει εξαιρετική ορατότητα δορυφόρων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.15. Ο δέκτης του μόνιμου σταθμού είναι της εταιρίας, μοντέλο SP90 με δυνατότητα λήψης όλων των σημάτων του GPS, GLONASS, Galileo και BEiDou. Επίσης διαθέτει ενσωματωμένο NTRIP caster, ο οποίος βρίσκεται σε λειτουργία καλύπτοντας εκπαιδευτικές και ερευνητικές ανάγκες του Εργαστηρίου. Με χρήση τη συγκεκριμένου NTRIP Caster έγιναν οι μετρήσεις με το δέκτη DA1, παραμετροποιώντας κατάλληλα το λογισμικό Marit το οποίο υποστηρίζει λήψη διορθώσεων μέσω NTRIP (Εικόνα .4.16).



Εικόνα 4.14 Κεραία μόνιμου σταθμού UNIWA1.



Εικόνα 4.15 Ορατότητα ουρανού από τη θέση της κεραίας του μόνιμου σταθμού UNIWA1.

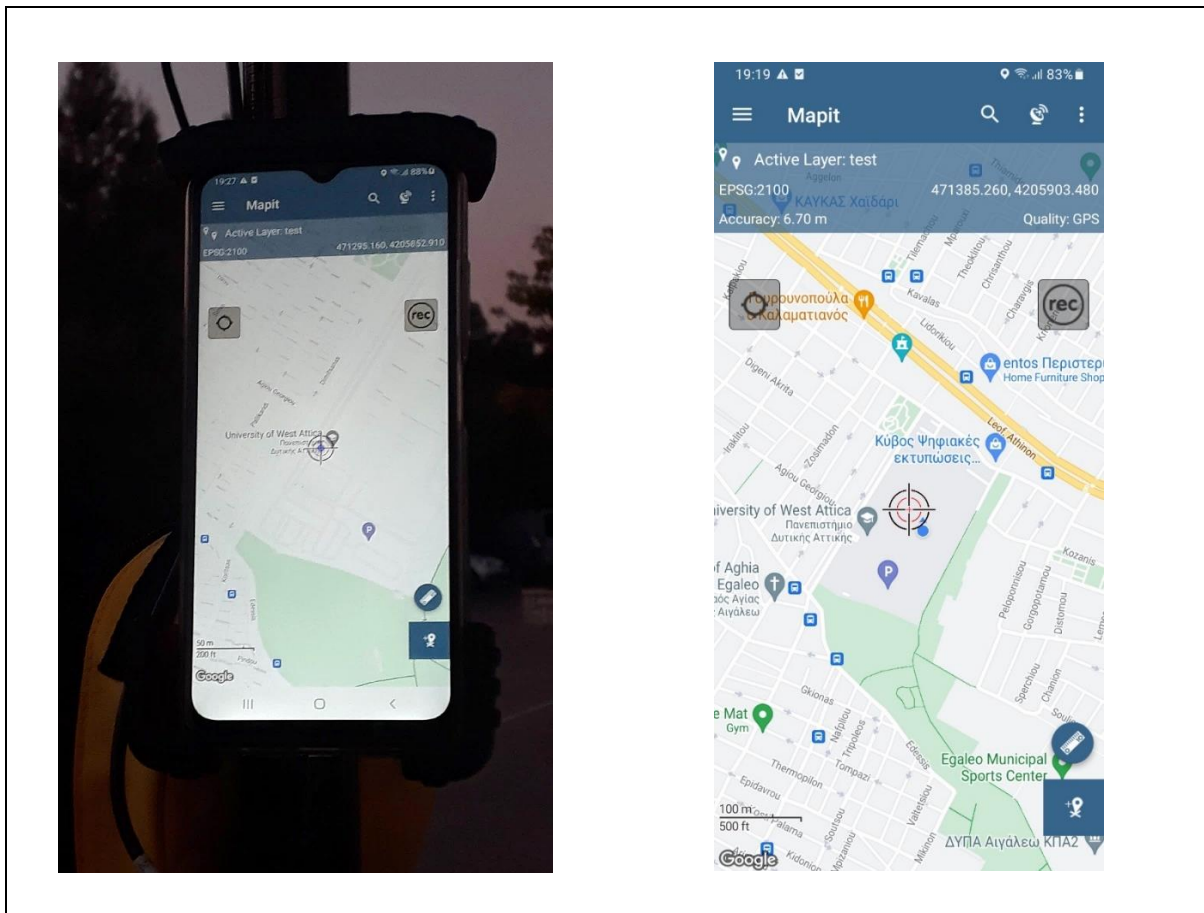


Εικόνα 4.16 Δυνατότητα υποστήριξης NTRIP από την εφαρμογή Mapit.

Οι μετρήσεις οργανώθηκαν σε δύο άξονες:

- Μετρήσεις για την αξιολόγηση της ταχύτητας επίλυσης των ασαφειών φάσης
- Μετρήσεις για την αξιολόγηση της ακρίβειας των λύσεων.

Για την πρώτη περίπτωση πραγματοποιήθηκαν περί τις 50 δοκιμές σε διαφορετικά σημεία της Πανεπιστημιούπολης, τόσο με καλές συνθήκες ορατότητας, όσο και με σχετικά δυσμενείς συνθήκες (στο όριο όμως του αποδεκτού για μετρήσεις GNSS). Η λύση fixed ήταν συνήθως διαθέσιμη εντός ενός λεπτού υπό συνήθεις συνθήκες ορατότητας δορυφόρων. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο χρόνος αυτός δεν ήταν τόσο σύντομος όσο με ένα κανονικό (hardware receiver) δέκτη RTK (συνήθως λίγα sec), κάτι όμως αναμενόμενο και αποδεκτό καθώς πρόκειται για δέκτη μίας συχνότητας σε αντίθεση με τους δέκτες RTK.



Εικόνα 4.17 Στιγμιότυπα από την οθόνη της εφαρμογής Marit κατά τις μετρήσεις στην Πανεπιστημιούπολη του ΠΑΔΑ.

Για την αξιολόγηση της ακρίβειας των λύσεων έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων του δέκτη DA1 με ένα δέκτη RTK Hi-Target irtk5 του Εργαστηρίου (Εικόνα 4.19). Οι διαφορές των οριζόντιων συντεταγμένων ήταν στο επίπεδο των 1-3 cm, αποτέλεσμα ικανοποιητικό για σύγκριση μετρήσεων RTK.



Εικόνα 4.18 Ο δέκτης RTK που χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση με τον DA1.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μελέτη που έγινε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, τόσο μελετώντας τη διεθνή βιβλιογραφία, όσο και από τη διεξαγωγή και ανάλυση μετρήσεων με SDR GNSS δέκτη, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα, τα οποία μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Η τεχνολογία των δεκτών GNSS που υλοποιούνται μέσω λογισμικού έχει φτάσει σε ένα ώριμο επίπεδο και οι πρώτες λύσεις που διατίθενται σήμερα στην αγορά είναι σε ικανοποιητικό επίπεδο. Αξίζει να σημειωθεί ότι από το 2016 που κυκλοφόρησε ο δέκτης DA1, οι συνθήκες έχουν ωριμάσει τόσο που το 2021 κυκλοφόρησε ο νεότερος δέκτης DA2 με σαφείς βελτιώσεις και προτερήματα.
2. Από τις (έστω και λίγες) αναφορές που υπάρχουν στο διαδίκτυο φαίνεται, όπως εξάλλου ήταν και αναμενόμενο, ότι η απόδοση (ταχύτητα λύσης fixed) του δέκτη DA2 που αξιοποιεί σήματα σε δύο συχνότητες για κάθε σύστημα GNSS, είναι σημαντικά καλύτερη από αυτή του DA1. Γενικά μιλώντας, καθώς τα 4 συστήματα GNSS είναι ήδη λειτουργικά, αλλά εξελίσσονται και ίσως προστεθούν και νέα, οι μελλοντικοί δέκτες θα υποστηρίζουν απρόσκοπτα όλο και περισσότερα σήματα πολλαπλών τέτοιων συστημάτων βελτιώνοντας την ακρίβεια τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία του παγκόσμιου εντοπισμού θέσης.
3. Σήμερα η απόδοσή των SDR GNSS δεκτών πλησιάζει αρκετά την απόδοση των συμβατικών (hardware) δεκτών RTK. Αυτό δηλώνει τις πολύ καλές προοπτικές εξέλιξης των SDR GNSS δεκτών. Μάλιστα η αυξανόμενη διαθεσιμότητα ισχυρών και ενεργειακά αποδοτικών επεξεργαστών συμπεριλαμβανομένων των πολυπύρηνων CPU, GPU και FPGA, θα επιτρέψει στους SDR να χειρίζονται πιο πολύπλοκα σήματα, μεγαλύτερα εύρη ζώνης και να γίνεται η επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο πιο αποτελεσματική και άμεση. Από την άλλη πλευρά, καθώς οι δέκτες SDR υιοθετούνται ευρύτερα σε κρίσιμες επικοινωνιακές υποδομές οι ανησυχίες για την ασφάλεια αποκτούν πρωταρχική σημασία. Η αρχιτεκτονική των SDR που βασίζεται σε λογισμικούς επιτρέπει να είναι πιο ευάλωτοι σε κινδύνους ασφαλείας όπως η πλαστογράφιση, οι παρεμβολές ή οι κυβερνοεπιθέσεις. Οι τεχνικές AI και ML θα εφαρμοστούν για την ενίσχυση της ασφάλειας των SDR με τον εντοπισμό και τον μετριάσμό επιθέσεων όπως οι παρεμβολές ή η πλαστογράφιση σε πραγματικό χρόνο.

4. Οι δέκτες SDR προσφέρουν ευελιξία και προσαρμοστικότητα κάνοντας εύκολη την αναβάθμισή τους (αφού ο δέκτης υλοποιείται μέσω λογισμικού) σε αντίθεση με τους δέκτες hardware.
5. Ένα μειονέκτημα των δεκτών που υλοποιούνται μέσω λογισμικού είναι η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, κάτι που περιορίζει σημαντικά τη δυνατότητα χρήσης τους στο πεδίο σε πολύωρες μετρήσεις, κάτι που πλέον δεν αποτελεί πρόβλημα για του σύγχρονους δέκτες RTK. Οι μελλοντικοί αυτοί δέκτες θα πρέπει να αντιμετωπίσουν αυτές τις ανησυχίες σχετικά με την ισχύ ειδικά σε φορητές συσκευές.
6. Ένα επίσης πρακτικό μειονέκτημα των συγκεκριμένων δεκτών που χρησιμοποιήθηκαν είναι ότι απαιτούν την ύπαρξη ενεργούς συνδρομής ακόμα και στην περίπτωση που συνδέονται μέσω NTRIP με δίκτυο μόνιμων σταθμών αναφοράς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Akos, D., Arribas, J., Bhuiyan, M. Z. H., Closas, P., Dosis, F., Fernandez-Hernandez, I., ... & Won, J. H. (2022). GNSS software defined radio: history, current developments, and standardization efforts. In Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022) (pp. 3180-3209).

Borre, K., & Akos, D. (2005). A software-defined GPS and Galileo receiver: single-frequency approach. In Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2005) (pp. 1632-1637).

Brienza, E. (2023). From landscape to excavation: using new smart tools for multiscale archaeological investigations. 2023 IMEKO TC-4 International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, Rome, Italy, October 19-21, 2023.

Clements, Z., Iannucci, P. A., Humphreys, T. E., & Pany, T. (2021, September). Optimized bit-packing for bit-wise software-defined GNSS radio. In Proceedings of the 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2021) (pp. 3749-3771).

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer Science & Business Media.

Miralles, D., & Clossas, P. (2014). FASTER GNSS VIA THE SPARSE FOURIER TRANSFORM.

Mitola, J. (1995). The software radio architecture. IEEE Communications magazine, 33(5), 26-38.

Nichols, H., Murrian, M., & Humphreys, T. (2022). Software-defined GNSS is ready for launch. In Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022) (pp. 996-1013).

Nysæter, H., & Leiknes, A. (2023). Fit-for-purpose boundary mapping with low-cost GNSS receivers and opensource software. FIG Working Week.

Γιαννίου Μ. (2019). Τεχνικές και συστήματα πλοήγησης. Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής ΠΑ.Δ.Α.

Δούκας Ι, Υφαντής Ι (2015). ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ Ι - Γεωδαιτικές μετρήσεις και υπολογισμοί. Εκδόσεις Κυριακίδη.

Φωτίου, Α. & Πικριδάς, Χ., 2012. GPS και γεωδαιτικές εφαρμογές. 2η έκδοση επιμ. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.

Πηγές στο δίδικτυο

https://gnss-learning.org/wp-content/uploads/2022/08/04_Frontend.pdf

<https://geospatial.trimble.com/en/products/software/trimble-catalyst>

<https://geospatial.trimble.com/en/products/hardware/trimble-da2>

<https://gnss-sdr.org/docs/sp-blocks/observables/>

<https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1786>