



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ GNSS (GPS) ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΣΕΙΣΜΩΝ ΚΑΙ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ
ΑΓΓΕΛΟΣ ΤΣΑΓΑΣ
Α.Μ. 7151

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Δρ. ΣΩΤΗΡΗΣ ΛΥΚΟΥΡΓΙΩΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ, 2022

Η φύσις ουδέν ποιεί άλματα.

~ Αριστοτέλης ~

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της Διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου, κ. Λυκουργιώτη Σωτήρη, επιβλέποντα Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, που με τις πολύτιμες υποδείξεις και παρατηρήσεις του συνέβαλε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Τσάγας Άγγελος
Πάτρα, 2022

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματεύεται την τεχνολογία των Παγκόσμιων Δορυφορικών Συστημάτων Πλοήγησης (GNSS) όπου έχει καταστεί ζωτικής σημασίας για πολλές εφαρμογές που κυμαίνονται από τη μηχανική πολεοδομίας και τον καθορισμό ζωνών έως τις στρατιωτικές εφαρμογές.

Αρχικά, αναφέρεται η αξία του Gns και γίνεται αναφορά στις κυρίες δορυφορικές τεχνολογίες όπως το GPS, Glonass, BeiDou και Galileo, όπου κάθε ένα από αυτά αποτελείται κυρίως από τρία τμήματα: (α) δορυφορικό τμήμα, (β) τμήμα ελέγχου και (γ) τμήμα χρήστη. Έπειτα, παρουσιάζονται τα περιφερειακά δορυφορικά συστήματα πλοήγησης, οι τεχνικές εντοπισμού θέσης gnss (όπου είναι η τοποθέτηση ενός σημείου και η διαφορική τοποθέτηση), και τα ασύρματα συστήματα - εφαρμογές gnss.

Εν συνεχεία, περιγράφεται η χρήση του gnss για τον υπολογισμό των μετακινήσεων μετά το σεισμό, μέσα από την έρευνα που πραγματοποίησαν τέσσερις ερευνητικές ομάδες με μια σειρά παραδειγμάτων (Νήσοι Shumagin, Ζάκυνθο, Νεπάλ, Sumatra – Andaman).

Τέλος, παρουσιάζεται η χρήση του GNSS κατά την διάρκεια του σεισμού, μέσω της παρακολούθησης της απόκρισης των κατασκευών, ιδιαίτερα των ψηλών κτιρίων, υπό σοβαρές συνθήκες φόρτισης.

Λέξεις κλειδιά: Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (GNSS), Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS), Κατασκευή Πολυώροφων, Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS).

ABSTRACT

This Thesis deals with the technology of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) where it has become vital for many applications ranging from urban engineering and zoning to military applications.

First, the value of Gns is mentioned and reference is made to the main satellite technologies such as GPS, Glonass, BeiDou and Galileo, where each of them consists mainly of three parts: (a) satellite part, (b) control part and (c) user section. Next, the peripheral satellite navigation systems, the gnss positioning techniques (where point and differential positioning are located), and the wireless gnss applications are introduced.

Next, the use of gnss for the calculation of movements after the earthquake is described, through the research carried out by four research teams with a series of examples (Shumagin Islands, Zakynthos, Nepal, Sumatra - Andaman).

Finally, the use of GNSS during the earthquake is presented, by monitoring the response of structures, especially tall buildings, under severe loading conditions.

Key words: Global Navigation Satellite System (GNSS), Global Positioning System (GPS), High-rise Structure, Geographic Information System (GIS).

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ GNSS.....	1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.2 ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ.....	1
1.2.1 ΣΗΜΑΤΑ GPS.....	3
1.3 ΕΚΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΕΝΟ GPS.....	4
1.4 GLONASS.....	6
1.4.1 ΤΑ ΣΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ GLONASS.....	6
1.5 ΒΕΙΔΟΥ.....	7
1.6 GALILEO.....	7
1.6.1 ΤΜΗΜΑΤΑ GALILEO.....	8
1.6.1.1 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ.....	8
1.6.1.2 ΕΠΙΓΕΙΟ ΤΜΗΜΑ.....	8
1.6.1.3 ΤΜΗΜΑ ΧΡΗΣΤΗ.....	8
1.6.2 ΣΗΜΑΤΑ GALILEO.....	8
1.6.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ.....	9
1.7 ΣΗΜΑΤΑ GNSS.....	11
1.7.1 ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ.....	11
1.7.1.1 NAVIC.....	11
1.7.1.2 QZSS.....	12
1.7.1.3 DORIS.....	12
1.7.1.4 ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ LEO.....	13
1.8 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΕΚΤΗ.....	13
1.9 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	15
1.9.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ.....	15
1.10 ΧΡΟΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	17
1.11 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ.....	18
1.11.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΨΕΥΔΟ - ΚΩΔΙΚΑ.....	19
1.11.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΨΕΥΔΟΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	20

1.12 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΙΜΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ GNSS	20
1.13 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ GNSS.....	22
1.13.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΕ ΕΝΑ ΣΗΜΕΙΟ.....	22
1.13.2 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΙΜΗ ΔΙΑΦΟΡΑ	23
1.13.3 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΘΕΣΗ.....	24
1.13.4 ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ GNSS ΕΥΡΕΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ (WADGNSS)	26
1.14 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ GNSS.....	28
1.14.1 ΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ.....	29
1.14.2 GNSS ΚΑΙ ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	29
1.14.3 ΔΙΚΤΥΟ RTK	30
1.14.4 ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΑΣΕΙ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ (LBS)	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΧΡΗΣΗ GNSS ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΜΕΤΑ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ	33
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	33
2.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΣΤΟΥΣ ΝΗΣΟΥΣ SHUMAGIN, ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ GNSS	34
2.3 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΣΤΗΝ ΖΑΚΥΝΘΟ ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ GNSS	35
2.4 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΝΕΠΑΛ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ GNSS.....	37
2.5 ΠΙΘΑΝΗ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΣΕΙΣΜΟΥ ΣΤΑ ΝΗΣΙΑ SUMATRA – ANDAMAN, ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ GNSS	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΧΡΗΣΗ GNSS ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ	41
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	41
3.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΟ GNSS	43
3.2.1 ΑΡΧΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ GNSS.....	43
3.2.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΕΤΑΙ ΣΕ GNSS ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΠΟΛΥΩΡΟΦΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ	45
3.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΟΥ GNSS	46
3.3.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΔΕΚΤΩΝ GNSS ΣΕ ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	47
3.3.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΔΕΚΤΩΝ GNSS ΣΕ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	48
3.3.2.1 ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΑΠΕΖΙΟΥ ΑΝΑΚΙΝΗΣΗΣ.....	48
3.3.2.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΠΤΗΣ ΔΟΜΗΣ	52
3.3.2.3 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ.....	57

3.4 ΠΡΟΟΔΟΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΥΨΗΛΩΝ ΟΡΟΦΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.....	59
3.4.1 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΝΕΜΟ.....	61
3.4.2 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ..	66
3.4.3 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΟ.....	68
3.5 ΠΡΟΣΦΑΤΕΣ ΠΡΟΟΔΟΙ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ GNSS	69
3.5.1 ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΔΕΚΤΗ GNSS ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ	70
3.5.2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΨΕΥΔΟΛΙΘΟ	74
3.5.3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ GNSS	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	79
ΓΕΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	82

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1	- Δορυφορικό σύστημα GPS.	(Πηγή: https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf).....	2
Εικόνα 2	- Δορυφορικά σήματα GPS.	(Πηγή: https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf).....	2
Εικόνα 3	- Τμήματα GPS (Aerospace Corporation, 2003)	(Πηγή: https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf).....	2
Εικόνα 4	- Διαμόρφωση διαφασικού φορέα	(Πηγή: https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf).....	3
Εικόνα 5	- Εκσυγχρονισμένα σήματα GPS	(Πηγή: https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf).....	5
Εικόνα 6	- Αρχιτεκτονική Συστήματος GALILEO (GALILEO 2003)	(Πηγή: https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf).....	9
Εικόνα 7	- Φάσμα συχνοτήτων δορυφορικών συστημάτων ραδιοπλοήγησης (RNSS) που ορίζεται για το GNSS σήματα (GALILEO, 2005)	(Πηγή: https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf).....	11
Εικόνα 8	- Έννοια Hybrid Galileo/GPS Receiver	(Πηγή: https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf).....	14
Εικόνα 9	- Σύστημα συντεταγμένων ECEF και ελλειψοειδείς συντεταγμένες	(Πηγή: https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf).....	16
Εικόνα 10	- Βασική έννοια μέτρησης εύρους	(Πηγή: https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf).....	19
Εικόνα 11	- Διόρθωση διαφορικής	(Πηγή: https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf).....	25
Εικόνα 12	- Αποτύπωμα των Υπηρεσιών Παγκόσμιων Διορθώσεων Διόρθωσης του GNSS: ΗΠΑ (WAAS), Η.Π.Α. (EGNOS) και Ιάπωνες (MSAS)	(Πηγή: https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf).....	28
Εικόνα 13	- Δίκτυο RTK (Euler, 2005)	(Πηγή: https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf).....	30
Εικόνα 14	- Στοιχεία συστήματος AVL	(Πηγή: https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf).....	32
Εικόνα 15	- (α) Αναπαράσταση της λήψης του σήματος GNSS. Η είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του κέντρου της κεραίας GNSS και της ανακλούμενης επιφάνειας και ϵ είναι η γωνία μεταξύ του δορυφόρου και του ορίζοντα. Τα απευθείας σήματα GNSS εμφανίζονται με μπλε χρώμα και η πρόσθετη διαδρομή που διανύει το ανακλώμενο σήμα εμφανίζεται με κόκκινο. (β) Δέκτης GNSS AC12 στο νησί Chernabura, Αλάσκα (Φωτογραφία: UNAVCO). (γ) Οι ζώνες ανάκλασης που εμφανίζονται με χρώμα χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις της στάθμης του νερού AC12 (Roesler & Larson, 2018). Ο χάρτης είναι ευγενική προσφορά του Google Earth (Πηγή: Larson, K. M., et al. 2021).....		35

Εικόνα 16 - Χάρτης του νότιου Ιονίου. Το κίτρινο αστέρι σηματοδοτεί τη θέση του σεισμού 25 Οκτωβρίου 2018 Mw (NOA) = 6,7 (το επίκεντρο αυτής της μελέτης). Τα χερσαία και υπεράκτια ρήγματα (κόκκινο) είναι από τους Ganas et al. (2013), Παπούλια κ.ά. (2014), Οι Wardell et al. (2014). Οι διακεκομμένες κίτρινες γραμμές δείχνουν τα βάθη της αφρικανικής πλάκας που υποχωρεί από τους Halpaar et al. (2018). Ο ένθετος χάρτης δείχνει τη θέση της περιοχής μελέτης στο δυτικό τμήμα του Ελληνικού Τόξου. Τα μπλε διανύσματα δείχνουν ταχύτητες GPS κατά την Ευρασία από τους Devoti et al. (2017). (Για την ερμηνεία των αναφορών στο χρώμα σε αυτό το υπόμνημα σχήματος, ο αναγνώστης παραπέμπεται στην έκδοση web αυτού του άρθρου) (Πηγή: Ganas A., et al., 2020).	37
Εικόνα 17 - Σύγκριση των κυματομορφών ταχύτητας που προέρχονται από μετρήσεις GPS, BDS και GPS + BDS στο σταθμό LASA χρησιμοποιώντας τη μεταβλητή προσέγγιση. Η ώρα εκκίνησης (OT) του σεισμού του Νεπάλ είναι 06:11:26 (UTC) στις 25 Απριλίου 2015 (Πηγή: Geng T., et al. 2016).	39
Εικόνα 18 - Στρατηγική GNSS για τον προσδιορισμό της θέσης (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).	44
Εικόνα 19 - Γενικό σχηματικό διάγραμμα της ανάπτυξης του GNSS σε μια πολυώροφα κατασκευή (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).	46
Εικόνα 20 - Πείραμα σεισμομέτρου GNSS (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).	49
Εικόνα 21 - Σύγκριση της εξόδου RTK - GNSS και της πραγματικής μετατόπισης από τον μορφοτροπέα μετατόπισης σύρματος ($Y = 2$ cm): (α) $f = 0,5$ Hz, (β) $f = 1$ Hz, (γ) $f = 3$ Hz και (δ) $f = 4$ Hz. (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).	49
Εικόνα 22 - Σύγκριση εξόδου RTK - GNSS και πραγματικής μετατόπισης από μορφοτροπέα μετατόπισης σύρματος ($f = 2$ Hz): (α) $Y = 0,25$ cm, (β) $Y = 1$ cm, (γ) $Y = 2$ cm, και (δ) $Y = 5$ cm. (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).	50
Εικόνα 23 - Σχηματικό σχέδιο αναφοράς και κεραία rover (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).	51
Εικόνα 24 - Σχηματική διαμόρφωση στοιχείων GNSS (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).	51
Εικόνα 25 - Ο δέκτης GNSS της πλακέτας JNS100 OEM (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).	53
Εικόνα 26 - Πλατφόρμα για τη δυναμική δοκιμή (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).	54
Εικόνα 27 - Πειραματικό μοντέλο (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).	55
Εικόνα 28 - Μέτρηση επιτάχυνσης με GNSS, μετρητή μετατόπισης λείζερ και επιταχυνσιόμετρο (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).	56
Εικόνα 29 - Η πειραματική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα του Ψιμούλη (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).	57
Εικόνα 30 - Διάγραμμα έλικας Helix οριζόντιων συντεταγμένων του κινούμενου rover συναρτήσει του χρόνου. Στο (α) είναι εμφανές ένα σχεδόν ιδανικό κυλινδρικό διάγραμμα, ενώ στο (β) παρατηρούνται ορισμένες ακραίες τιμές (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).	58

Εικόνα 31 - Κεραία Rover τοποθετημένη σε τρίποδο εφοδιασμένο με περιστρεφόμενο βραχίονα (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).....	59
Εικόνα 32 - Αποτέλεσμα της κινηματικής ανίχνευσης GNSS του Rover Antenna που εφαρμόζεται σε δύο διαφορετικές ακτίνες (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).....	60
Εικόνα 33 - Φάσμα ισχύος τάσεων μελών κατά τη διάρκεια του Typhoon 0221 (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).....	62
Εικόνα 34 - Ο πύργος τηλεόρασης της Στουτγάρδης, καθημερινή μετατόπιση της κορυφής λόγω ηλιακής ακτινοβολίας και ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας με ωριαίες θέσεις και χρονικά σημάδια (4 – 8 Ιουλίου 2006). Στα βορειοανατολικά της κάτοψης φαίνονται δύο ακραία σημεία, που προκαλούνται από καταιγίδα με άνεμο από Νοτιοδυτικά με ταχύτητα περίπου 1 m/s (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).	64
Εικόνα 35 - Ο πύργος τηλεόρασης της Στουτγάρδης, στατικά και δυναμικά στοιχεία της απόκρισης του ανέμου κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας που παράγει ένα περίγραμμα της ημερήσιας μετατόπισης της θερμοκρασίας. Ο άνεμος από Νότιο-Δυτικό με ταχύτητα περίπου 17 m/s προκαλεί βορειοανατολική μετατόπιση περίπου 6 cm. Η κύρια κατεύθυνση της δόνησης είναι σε ορθή γωνία προς την κατεύθυνση του ανέμου με μετατόπιση 9 – 14 cm (5 Ιουλίου 2006) (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).	65
Εικόνα 36 - Παραμόρφωση του πύργου που προκαλείται από θερμική καταπόνηση (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).....	67
Εικόνα 37 - Σχηματικό διάγραμμα συνδέσεων συστοιχίας κεραιών.	77
Εικόνα 38 - Συσκευή μεταγωγής πολλαπλών κεραιών GNSS (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).	77

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας I. Χρονικά συστήματα (Hofmann-Wellenhof et al., 2001).....	18
Πίνακας II. Επίπεδα ακρίβειας για διαφορετικές λειτουργίες εντοπισμού θέσης GNSS.	46
Πίνακας III. Ανάλυση συσχέτισης μετατοπίσεων με μεταβλητές καιρού.	67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΤΟΙΧΕΙΑ GNSS

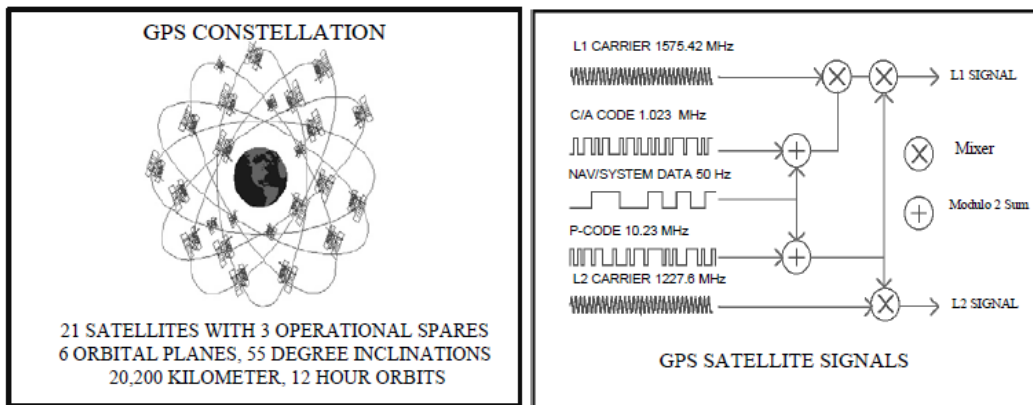
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το GNSS αποτελείται από τέσσερις κύριες δορυφορικές τεχνολογίες: GPS, Glonass, BeiDou και Galileo. Κάθε ένα από αυτά αποτελείται κυρίως από τρία τμήματα: (α) δορυφορικό τμήμα, (β) τμήμα ελέγχου και (γ) τμήμα χρήστη. Αυτά τα τμήματα είναι σχεδόν παρόμοια στις τέσσερις δορυφορικές τεχνολογίες, οι οποίες αποτελούν όλες μαζί το GNSS.

1.2 ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ

Το Υπουργείο Άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών (DoD) ανέπτυξε το Navstar GPS, το οποίο είναι ένα σύστημα πλοήγησης παντός καιρού, βασισμένο στο διάστημα για να καλύψει τις ανάγκες των στρατιωτικών δυνάμεων των ΗΠΑ και να προσδιορίσει με ακρίβεια τη θέση, την ταχύτητα και τον χρόνο τους σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς, οπουδήποτε πάνω ή κοντά στη Γη σε συνεχή βάση (Wooden, 1985). Το GPS έχει σημαντικό αντίκτυπο σε όλες σχεδόν τις εφαρμογές εντοπισμού θέσης, πλοήγησης και παρακολούθησης. Παρέχει ιδιαίτερα κωδικοποιημένα δορυφορικά σήματα που μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία σε δέκτη GPS, επιτρέποντας στον δέκτη να εκτιμήσει τη θέση, την ταχύτητα και τον χρόνο (Hofmann-Wellenhof et al., 2001). Υπάρχουν τέσσερα δορυφορικά σήματα GPS που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό θέσεων σε τρεις διαστάσεις και τη μετατόπιση χρόνου στο ρολόι του δέκτη. Το GPS περιλαμβάνει τρία κύρια στοιχεία:

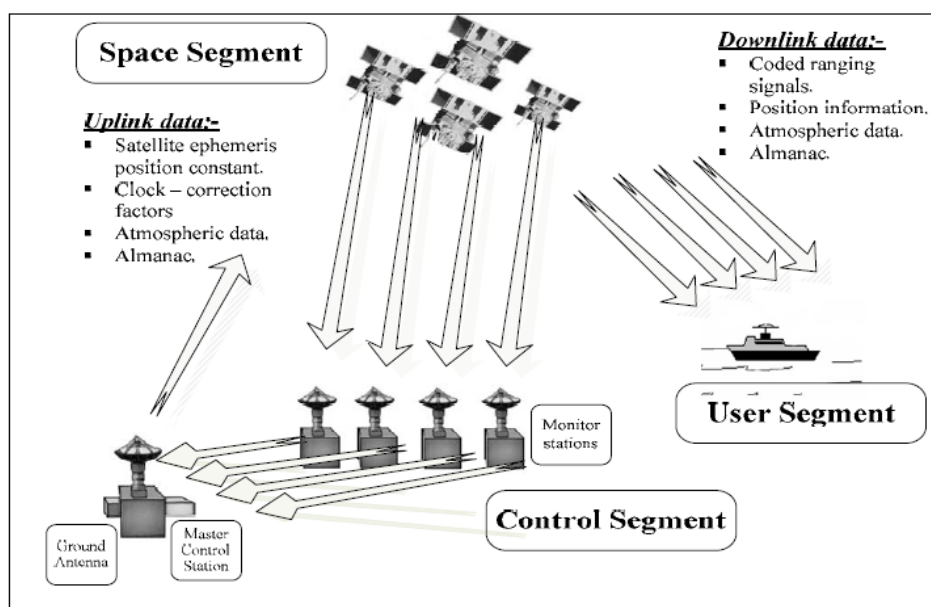
- Δορυφορικό τμήμα: Το δορυφορικό τμήμα του συστήματος αποτελείται από τους δορυφόρους GPS (βλέπε Εικόνα 1). Αυτά τα δορυφορικά οχήματα (SV) στέλνουν ραδιοσήματα από το διάστημα (όπως φαίνεται στην Εικόνα 2).
- Τμήμα ελέγχου: Το τμήμα ελέγχου αποτελείται από ένα σύστημα σταθμών παρακολούθησης που βρίσκονται σε όλο τον κόσμο. Η εγκατάσταση Master Control βρίσκεται στην αεροπορική βάση Schriever (πρώην Falcon AFB) στην Πολιτεία του Κολοράντο των ΗΠΑ.
- Τμήμα χρήστη: Το τμήμα χρήστη GPS αποτελείται από τους δέκτες GPS και την κοινότητα χρηστών. Οι δέκτες GPS μετατρέπουν τα σήματα δορυφορικών οχημάτων (SV) σε εκτιμήσεις θέσης, ταχύτητας και χρόνου.



Εικόνα 1 - Δορυφορικό σύστημα GPS. **Εικόνα 2** - Δορυφορικά σήματα GPS.

(Πηγή: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>)

Οι δορυφόροι είναι διασκορπισμένοι σε έξι τροχιακά επίπεδα σε σχεδόν κυκλικές τροχιές με υψόμετρο περίπου 20.200 km πάνω από την επιφάνεια της Γης, με κλίση 55 μοιρών ως προς τον ισημερινό και με περιόδους τροχιάς περίπου 11 ώρες 58 λεπτά (μισή αστρική ημέρα). Οι κατηγορίες είναι Block I, Block II, Block IIR (R για αναπλήρωση) και Block IIA (A για προχωρημένους) και έχει επίσης προγραμματιστεί μια περαιτέρω επόμενη κατηγορία Block IIF (ICD-GPS, 2003). Η Εικόνα 3 δείχνει τα κύρια τμήματα GPS.



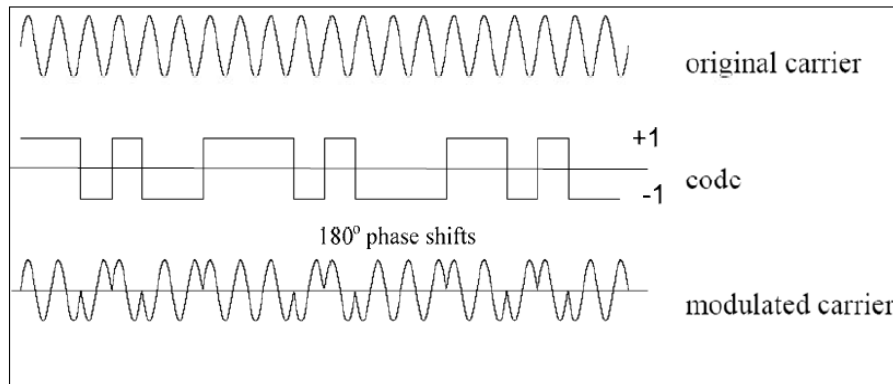
Εικόνα 3 - Τμήματα GPS (Aerospace Corporation, 2003).

(Πηγή: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>).

1.2.1 ΣΗΜΑΤΑ GPS

Τα σήματα που παράγονται στους δορυφόρους βασίζονται ή προέρχονται από τη δημιουργία μιας θεμελιώδους συχνότητας $f_0=10.23$ MHz (Hofmann-Wellenhof et al., 2001). Το σήμα ελέγχεται από ατομικό ρολόι και έχει σταθερότητα στην περιοχή 10^{-13} σε μία ημέρα. Δύο φέροντα σήματα στη ζώνη L, που συμβολίζονται L1 και L2, παράγονται από ακέραιους πολλαπλασιασμούς του f_0 . Οι φορείς L1 και L2 διαμορφώνονται διφασικά από κώδικες για να παρέχουν μετρήσεις δορυφορικού ρολογιού στον δέκτη και να μεταδίδουν πληροφορίες όπως τις τροχιακές παραμέτρους. Οι κωδικοί αποτελούνται από μια ακολουθία με τις καταστάσεις +1 ή -1, που αντιστοιχεί στις δυαδικές τιμές 0 ή 1.

Η διφασική διαμόρφωση εκτελείται με μια μετατόπιση 180° στη φάση φορέα κάθε φορά που συμβαίνει αλλαγή στην κατάσταση του κώδικα (βλέπε Εικόνα 4). Ο κωδικός σαφής/πρόσβασης (κωδικός C/A) και κωδικός ακριβείας (κωδικός P) χρησιμοποιούνται για την ανάγνωση του ρολογιού δορυφόρου, και οι δύο χαρακτηρίζονται από μια ακολουθία ψευδοτυχαίου θορύβου (PRN). Ο κωδικός W χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση του κωδικού P στον κωδικό Y όταν εφαρμόζεται Anti Spoofing (A-S). Το μήνυμα πλοήγησης διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας τους δύο φορείς (L1 και L2) με ρυθμό 50 bps.



Εικόνα 4 - Διαμόρφωση διφασικού φορέα

(Πηγή: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>).

Περιέχει πληροφορίες για τις τροχιές των δορυφόρων, τις διαταραχές τροχιάς, την ώρα GPS, το ρολόι του δορυφόρου, τις ιονόσφαιρες παραμέτρους και τα μηνύματα κατάστασης του συστήματος (Leick, 2003). Η διαμόρφωση του L1 με Pcode, C/A-code και μήνυμα πλοήγησης (D), γίνεται χρησιμοποιώντας το σχήμα τετραγωνικής μετατόπισης φάσης (QPSK). Ο κωδικός C/A τοποθετείται στον φορέα L1 με μετατόπιση 90° από τον κωδικό P, καθώς έχουν τις ίδιες εποχές μετάβασης bit. Για τα L1 και L2 έχουμε:

$$L1(t) = \alpha_1 P(t)W(t)\cos(2\pi f_1 t) + \alpha_1 C / A(t)D(t)\sin(2\pi f_1 t)$$

$$L2(t) = \alpha_2 P(t)W(t)\cos(2\pi f_2 t) \quad (1)$$

Το σήμα που εκπέμπει ο δορυφόρος είναι ένα σήμα ευρέος φάσματος, γεγονός που τον καθιστά λιγότερο επιρρεπές σε εμπλοκές. Η βασική ιδέα της τεχνικής του φάσματος εξάπλωσης είναι ότι η κυματομορφή πληροφοριών με μικρό εύρος ζώνης μετατρέπεται διαμορφώνοντάς την με μια κυματομορφή μεγάλου εύρους ζώνης (Hofmann-Wellenhof et al., 2001).

Η δημιουργία ψευδοτυχαίας ακολουθίας (PRN) στον κώδικα βασίζεται στη χρήση μιας ηλεκτρονικής συσκευής υλικού που ονομάζεται καταχωρητής μετατόπισης ανατροφοδότησης (FBSR). Αυτή η συσκευή μπορεί να δημιουργήσει μια μεγάλη ποικιλία ψευδοτυχαίων κωδικών, αλλά με αυτόν τον τρόπο ο παραγόμενος κώδικας επαναλαμβάνεται μόνος του μετά από πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο δέκτης μπορούσε να διακρίνει τα σήματα που προέρχονται από διαφορετικούς δορυφόρους επειδή ο κωδικός C/A λήψης (ο κωδικός Gold), έχει χαμηλή διασταυρούμενη συσχέτιση και είναι μοναδικός για κάθε δορυφόρο (Leick, 2003).

Το μήνυμα πλοήγησης αποτελείται από 25 μετρήσεις με κάθε πλαίσιο να περιέχει 1500 bit και κάθε πλαίσιο υποδιαιρείται σε 5 υποπλαίσια με 300 bit. Οι πληροφορίες που μεταδίδονται από το μήνυμα πλοήγησης ενημερώνονται περιοδικά από το τμήμα ελέγχου.

1.3 ΕΚΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΕΝΟ GPS

Λόγω των τεράστιων πολιτικών εφαρμογών της τεχνολογίας GPS κατά την τελευταία δεκαετία περίπου και λόγω των νέων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στους δορυφόρους και τους δέκτες, η κυβέρνηση των ΗΠΑ αποφάσισε να επεκτείνει τις δυνατότητες του GPS για να προσφέρει περισσότερα οφέλη στην κοινωνία των πολιτών. Εκτός από τα υπάρχοντα σήματα GPS, νέα σήματα θα μεταδίδονται μέσω δορυφόρου GPS (βλέπε Εικόνα 5).

Επιπλέον, αυτό θα αυξήσει την ευρωστία στα σήματα και θα βελτιώσει την αντίσταση στις παρεμβολές σήματος. Αυτό σίγουρα θα οδηγήσει σε καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών (QoS). Τα νέα σήματα που προστέθηκαν στο GPS (Fontana et al., 2001), είναι: (i) μια νέα συχνότητα L5 σε μια αεροναυτική ζώνη υπηρεσίας ραδιοπλοήγησης (ARNS) με δομή σήματος σχεδιασμένη για τη βελτίωση των αεροπορικών εφαρμογών, (ii) κωδικός C/A στον φορέα L2C (L2 civil signal) και (iii) νέος στρατιωτικός κωδικός (M) στη συχνότητα L1 και L2 γιατί έχει προστεθεί το Υπουργείο Εξωτερικών. Έχει τη δυνατότητα παρακολούθησης σήματος ακόμη και σε κακές συνθήκες όπου η

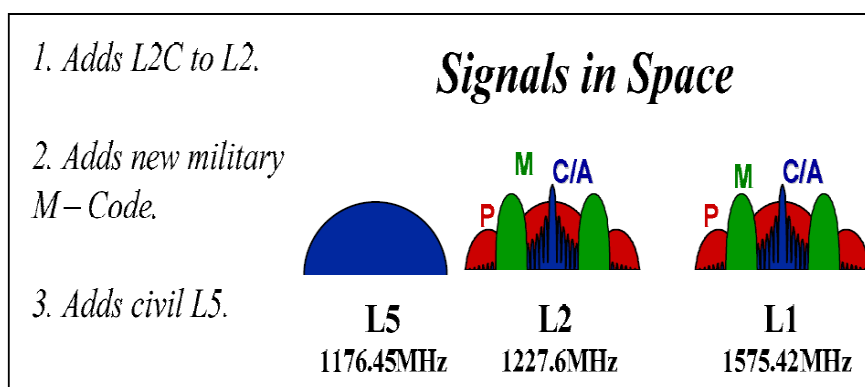
παρακολούθηση κωδικού C/A στο L1 δεν θα ήταν δυνατή. Ο νέος στρατιωτικός κώδικας θα μεταδοθεί από τους δορυφόρους Block IIR-M και IIF (Betz, 2002).

Είναι ευρέως γνωστό ότι η παρουσία μετρήσεων διπλής συχνότητας (L1 και L2) έχει καλά πλεονεκτήματα για την εξάλειψη της επίδρασης της ιονόσφαιρας και την ενίσχυση της ανάλυσης που είναι αβέβαια, ειδικά για τις μετρήσεις υψηλής ακρίβειας (Liu and Lachapelle, 2002).

Τα συστήματα διπλής συχνότητας υψηλής τεχνολογίας θα βασίζονται στον κώδικα CA L1 και στον πρόσφατα σχεδιασμένο κωδικό L2 C. Τα επόμενα χρόνια οι δέκτες θα γίνουν πιο περίπλοκοι προκειμένου να επιτραπεί η παρακολούθηση του νέου αστικού κώδικα στο L2 και η παρακολούθηση του κρυπτογραφημένου P στο L2 (A-S).

Η συχνότητα του L5 είναι 1176,45 MHz, με ρυθμό 10,23 MHz παρόμοιο με τον κωδικό P. Ο υψηλός ρυθμός αποκοπής του κώδικα L5 θα παρέχει δυνατότητες εμβέλειας υψηλής απόδοσης και καλύτερη μέτρηση κώδικα από τις μετρήσεις κωδικού L1 C/A (Dierendonck and Hegarty, 2000). Το L2 έχει καλύτερη προστασία συσχέτισης σε σχέση με το L1 αφού έχει μακρύ κωδικό. Αυτό θα είναι χρήσιμο σε σοβαρές συνθήκες όπου τα σήματα GPS είναι αδύναμα, όπως η πλοήγηση σε αστικές, εσωτερικές και δασικές περιοχές.

Οι παλιοί και οι νέοι κώδικες (Στρατιωτικοί και Πολιτικοί), στα L1, L2 και L5 χρειάζονται πιο προηγμένη διαμόρφωση που μοιράζεται καλύτερα τις υπάρχουσες εκχωρήσεις συχνοτήτων με όλα τα σήματα αυξάνοντας τον φασματικό διαχωρισμό και, ως εκ τούτου, διατηρεί το φάσμα. Κατά συνέπεια, ο δυαδικός φορέας μετατόπισης (BOC) χρησιμοποιείται για τις διαμορφώσεις στρατιωτικού κώδικα (Betz, 2002).



Εικόνα 5 - Εκσυγχρονισμένα σήματα GPS

(Πηγή: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>).

1.4 GLONASS

Το GLONASS (Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης ή «GLObalnaya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema») είναι σχεδόν πανομοιότυπο με το GPS. Το δορυφορικό σύστημα ραδιοπλοήγησης Glonass παρέχει τις πληροφορίες θέσης και χρονισμού στους χρήστες. Λειτουργεί από το Υπουργείο Άμυνας της Ρωσικής Ομοσπονδίας (GLONASS-ICD, 2002).

Το δορυφορικό τμήμα Glonass αποτελείται από 24 δορυφόρους, ισόποσα καταναμημένους σε 3 τροχιές που χωρίζονται κατά 120° στο ισημερινό επίπεδο. Το δορυφορικό τροχιακό υψόμετρο είναι περίπου 19.130 χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια τροχιακή περίοδο 11:15:44 που αντιστοιχεί στις 17/8 μιας αστρικής ημέρας. Το μέλλον της GLONASS φαίνεται αβέβαιο λόγω των οικονομικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η Ρωσική Ομοσπονδία. Ο αριθμός των λειτουργικών δορυφόρων μειώνονταν σταθερά τα τελευταία χρόνια. Η εκτόξευση τριών νέων δορυφόρων GLONASS τον Δεκέμβριο του 1998 ήταν η πρώτη εκτόξευση μετά από πάροδο 3 ετών.

1.4.1 ΤΑ ΣΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ GLONASS

Το Glonass εκπέμπει τον κωδικό C/A στο L1, τον κωδικό P στο L1 και το L2. Τα παρατηρήσιμα Glonass (κωδικός και φάση) είναι παρόμοια με το GPS. Η κύρια διαφορά μεταξύ GPS και GLONASS είναι ότι το GLONASS χρησιμοποιεί τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης συχνότητας (FDMA) για να διακρίνει τα σήματα διαφορετικών δορυφόρων, αλλά το GPS και το Galileo χρησιμοποιούν (Code Division Multiple Access, CDMA) για τη διάκριση μεταξύ των δορυφόρων. Όλοι οι δορυφόροι Glonass εκπέμπουν τους ίδιους κωδικούς C/A- και P, αλλά ο καθένας δορυφόρος έχει ελαφρώς διαφορετικές συχνότητες φορέα.

Οι ονομαστικές συχνότητες φορέα για τα σήματα L1 και L2 μπορούν να γραφτούν όπως φαίνεται παρακάτω (Leick, 2003):

$$f_1^n = 1602 + 0.5625.n \text{ MHz}$$

$$f_2^n = 1246 + 0.4375.n \text{ MHz}$$

με:

$$f_1^n / f_2^n = 9/7$$

όπου n είναι ο αριθμός καναλιού συχνότητας $1 \leq n \leq 24$, που καλύπτει ένα εύρος συχνοτήτων στο L1 από 1602,5625 MHz έως 1615,5 MHz. Δεδομένου ότι ορισμένες από τις συχνότητες GLONASS παρεμβάλλονται σε συχνότητες που χρησιμοποιούνται για τη ραδιοαστρονομία, ορισμένες αλλαγές στο σχέδιο συχνοτήτων αναμένονται μετά το 2005 (GLONASS-ICD, 2002). Το μήνυμα πλοήγησης περιέχεται στα λεγόμενα

υποπλάισια, τα οποία έχουν διάρκεια 2,5 λεπτών. Κάθε υποπλάισιο αποτελείται από πέντε μετρήσεις με διάρκεια 30 δευτερόλεπτα. Το μήνυμα πλοήγησης περιέχει πληροφορίες, παρόμοιες με το μήνυμα πλοήγησης GPS, σχετικά με τις δορυφορικές τροχιές, τα ρολόγια τους, μεταξύ άλλων.

Αντίθετα με το GPS, όπου τα εφήμερα εκπομπής ορίζονται από τροποποιημένα στοιχεία του Κεπλέριου, τα εφήμερα εκπομπής των δορυφόρων GLONASS ορίζονται από θέσεις και ταχύτητες που αναφέρονται σε συστήματα με επίκεντρο και σταθερά τη Γη (PZ-90). Οι εφήμερες εκπομπές των δορυφόρων Glonass ενημερώνονται κάθε 30 λεπτά.

1.5 BEIDOU

Το BeiDou ξεκίνησε ως το πλέον παροπλισμένο BeiDou-1, ένα τοπικό δίκτυο Ασίας-Ειρηνικού στις γεωστατικές τροχιές. Η δεύτερη γενιά του συστήματος BeiDou-2 τέθηκε σε λειτουργία στην Κίνα τον Δεκέμβριο του 2011. Το σύστημα BeiDou-3 προτείνεται να αποτελείται από 30 δορυφόρους MEO και πέντε γεωστατικούς δορυφόρους (IGSO). Μια περιφερειακή έκδοση 16 δορυφόρων (που καλύπτει την περιοχή της Ασίας και του Ειρηνικού) ολοκληρώθηκε τον Δεκέμβριο του 2012. Η παγκόσμια υπηρεσία ολοκληρώθηκε έως τον Δεκέμβριο του 2018. Στις 23 Ιουνίου 2020, η ανάπτυξη BDS-3 ολοκληρώθηκε πλήρως μετά την επιτυχή ολοκλήρωση του τελευταίου δορυφόρου εκτοξεύτηκε στο Κέντρο Εκτόξευσης Δορυφόρου Xichang.

1.6 GALILEO

Το GALILEO είναι η πρωτοβουλία της Ευρώπης για ένα υπερσύγχρονο παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης, το οποίο παρέχει μια εξαιρετικά ακριβή, εγγυημένη υπηρεσία παγκόσμιας εντοπισμού θέσης υπό πολιτικό έλεγχο. Το Galileo δεν θα είναι πολύ διαφορετικό από τα άλλα μέρη του GNSS (εκσυγχρονισμένοι GPS και Glonass) (Salgado et al., 2001). Θα παρέχει αυτόνομες υπηρεσίες πλοήγησης και εντοπισμού θέσης, αλλά ταυτόχρονα θα είναι διαλειτουργικό με τα δύο άλλα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης το GPS και GLONASS. Ένας χρήστης θα μπορεί να πάρει θέση με τον ίδιο δέκτη από οποιονδήποτε από τους δορυφόρους σε οποιονδήποτε συνδυασμό.

Ωστόσο, παρέχοντας διπλές συχνότητες, το GALILEO θα προσφέρει ακρίβεια εντοπισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο μέχρι το εύρος του μετρητή. Θα εγγυηθεί τη διαθεσιμότητα της υπηρεσίας σε όλες, αλλά στις πιο ακραίες περιστάσεις και θα ενημερώσει τους χρήστες μέσα σε δευτερόλεπτα σε περίπτωση βλάβης οποιουδήποτε δορυφόρου.

Αυτό θα το κάνει κατάλληλο για εφαρμογές όπου η ασφάλεια είναι ζωτικής σημασίας, όπως η λειτουργία τρένων, η καθοδήγηση αυτοκινήτων και η προσγείωση αεροσκαφών. Η συνδυασμένη χρήση του GALILEO και άλλων συστημάτων GNSS μπορεί να προσφέρει πολύ βελτιωμένη απόδοση για όλα τα είδη χρηστών παγκοσμίως.

1.6.1 ΤΜΗΜΑΤΑ GALILEO

Τα τμήματα Galileo είναι σχεδόν παρόμοια με το GPS, αλλά με κάποια τροποποίηση. Η κύρια επέκταση του Galileo σε σύγκριση με το GPS είναι η εφαρμογή ενός παγκόσμιου/περιφερειακού τμήματος για την παρακολούθηση της ακεραιότητας. Ο στόχος είναι να υποστηριχθεί η πλοήγηση των αεροσκαφών κρίσιμης σημασίας για την ασφάλεια και να εντοπιστούν και να καθοδηγηθούν σιδηροδρομικά τρένα (GALILEO, 2003).

1.6.1.1 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ

Το δορυφορικό τμήμα ή τα χαρακτηριστικά του, αποτελούνται από 30 δορυφόρους Medium Earth Orbiting (MEO) (27 και 3 ενεργούς εφεδρικούς δορυφόρους), που κατανέμονται ομοιόμορφα και τακτικά σε τρία επίπεδα τροχιάς. Το προβλεπόμενο υψόμετρο είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από ό,τι για το GPS 23.616 km και η κλίση είναι 56° (Benedicto and Ludwig, 2002).

1.6.1.2 ΕΠΙΓΕΙΟ ΤΜΗΜΑ

Το επίγειο τμήμα Galileo είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των δορυφόρων πλοήγησης, τον έλεγχο των βασικών λειτουργιών της αποστολής πλοήγησης, όπως ο προσδιορισμός τροχιάς δορυφόρων και ο συγχρονισμός ρολογιού. Το παγκόσμιο επίγειο τμήμα θα παρέχει επίσης διασυνδέσεις με κέντρα εξυπηρέτησης. Το τμήμα ελέγχου εδάφους θα αποτελείται από περίπου 12-15 σταθμούς αναφοράς, 5 σταθμούς άνω ζεύξης και δύο κέντρα ελέγχου. Το επίγειο τμήμα θα περιλαμβάνει επίσης 16-20 σταθμούς παρακολούθησης, τρεις σταθμούς σύνδεσης για δεδομένα ακεραιότητας και δύο κεντρικούς σταθμούς για υπολογισμούς ακεραιότητας.

1.6.1.3 ΤΜΗΜΑ ΧΡΗΣΤΗ

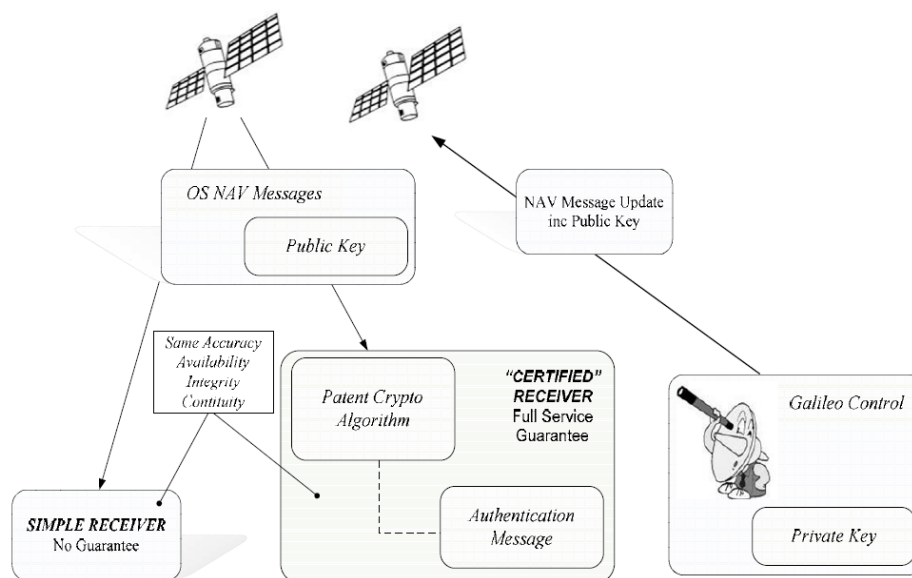
Το τμήμα χρήστη αποτελείται από διαφορετικούς τύπους δεκτών χρηστών, με διαφορετικές δυνατότητες που σχετίζονται με τα διαφορετικά σήματα GALILEO προκειμένου να εκπληρωθούν οι διάφορες υπηρεσίες GALILEO (Εικόνα 6).

1.6.2 ΣΗΜΑΤΑ GALILEO

Η συχνότητα GALILEO θα πρέπει να σέβεται τους ραδιοκανονισμούς όπως αυτοί συζητούνται και συμφωνούνται στα φόρουμ της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών

(ITU), όπως η Παγκόσμια Διάσκεψη Ραδιοεπικοινωνίας (WRC). Υπήρχαν διαφορετικές μελέτες που διεξήχθησαν πριν από τον προσδιορισμό των εκχωρήσεων σημάτων Galileo προκειμένου να αποφευχθούν παρεμβολές στα συστήματα GPS και Glonass, τα οποία λειτουργούν στο ίδιο τμήμα του φάσματος ραδιοσυχνότητας (Hein et al., 2003).

Το Galileo θα παρέχει πολλά σήματα πλοήγησης σε δεξιόστροφη κυκλική πόλωση (RHCP) στις περιοχές συχνοτήτων 1164 – 1215 MHz (E5a και E5b), 1260 – 1300 MHz (E6) και 1559 – 1592 MHz (E2-L1-E1) αποτελούν μέρος της κατανομής της δορυφορικής υπηρεσίας ραδιοπλοήγησης (RNSS) (Hein et al., 2003). Όλοι οι δορυφόροι Galileo θα μοιράζονται την ίδια ονομαστική συχνότητα, χρησιμοποιώντας τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (CDMA). Το Galileo θα χρησιμοποιήσει ένα διαφορετικό σχήμα διαμόρφωσης για τα σήματα του, τον φορέα δυαδικής μετατόπισης (BOC) και την παράκαμψη φάσης τετραγωνισμού (QPSK).



Εικόνα 6 - Αρχιτεκτονική Συστήματος GALILEO (GALILEO 2003)

(Πηγή: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>).

1.6.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ

Ο Galileo προσφέρει τη δυνατότητα εκπομπής σε παγκόσμιο επίπεδο ενός συνόλου έξι σημάτων που υποστηρίζουν τις ανοιχτές, εμπορικές, ασφαλείς και ρυθμιζόμενες από το κοινό υπηρεσίες (Hein et al., 2003). Κάθε σήμα πλοήγησης αποτελείται από έναν ή δύο κωδικούς εμβέλειας και δεδομένα πλοήγησης καθώς και, ανάλογα με το σήμα,

ακεραιότητα, εμπορικά δεδομένα και δεδομένα έρευνας και διάσωσης (SAR). Οι μετρήσεις απόστασης δορυφόρου-touser με βάση κωδικούς και δεδομένα εμβέλειας χρησιμοποιούνται στους δέκτες χρηστών GALILEO για την εκπλήρωση των διαφορετικών υπηρεσιών GALILEO (GALILEO, 2003). Οι κύριες υπηρεσίες είναι:

1. Δεδομένα ανοικτής υπηρεσίας (OS): Αυτά μεταδίδονται στις συχνότητες φορέα E5a, E5b και E2-L1-E1. Τα δεδομένα του λειτουργικού συστήματος είναι διαθέσιμα σε όλους τους χρήστες και αποτελούνται κυρίως από τα δεδομένα πλοήγησης και SAR. Η ανοιχτή υπηρεσία προσφέρει σήματα εντοπισμού θέσης, πλοήγησης και χρονισμού, στα οποία μπορείτε να έχετε πρόσβαση δωρεάν.

2. Commercial Service (CS), δεδομένα: Αυτά μεταδίδονται στους φορείς E5b, E6 και E2-L1-E1. Όλα τα δεδομένα CS είναι κρυπτογραφημένα και παρέχονται από παρόχους υπηρεσιών που διασυνδέονται με το Κέντρο Ελέγχου Galileo. Η πρόσβαση σε αυτά τα εμπορικά δεδομένα παρέχεται απευθείας στους χρήστες από τους παρόχους υπηρεσιών. Το σήμα έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει πολύ ακριβείς τοπικές διαφορικές εφαρμογές (ακρίβεια υπομέτρου) χρησιμοποιώντας το ανοιχτό (προαιρετικά κρυπτογραφημένο) σήμα που επικαλύπτεται με το σήμα PRS στο E6 και υποστηρίζει επίσης την ενοποίηση εφαρμογών εντοπισμού θέσης GALILEO και δικτύων ασύρματων επικοινωνιών.

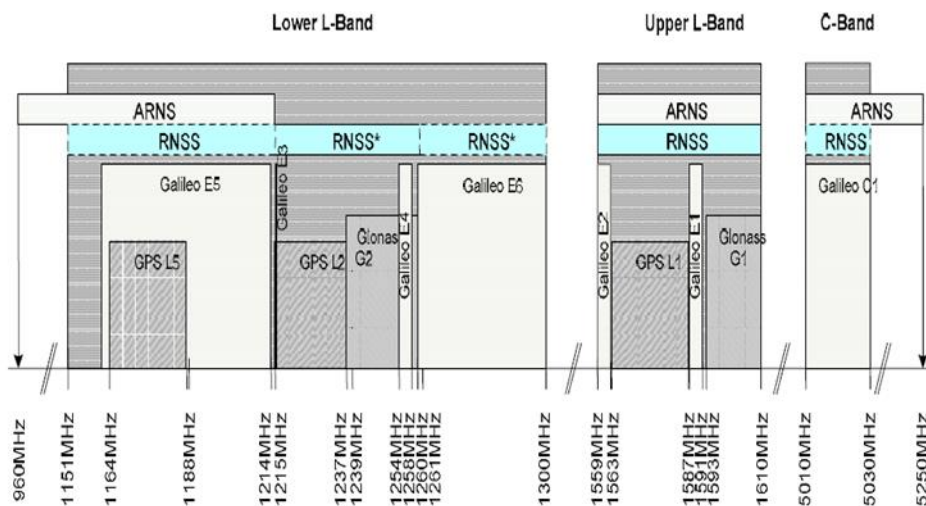
3. Δεδομένα Υπηρεσιών Ασφάλειας Ζωής (SOL): Αυτά περιλαμβάνουν κυρίως δεδομένα ακεραιότητας και ακρίβειας σήματος στο διάστημα (SISA). Συνδυασμός αυτών των υπηρεσιών Galileo είτε με το τρέχον GPS που έχει επαυξηθεί από τις διορθώσεις του EGNOS, είτε με το μελλοντικό βελτιωμένο GPS και μόνο ακεραιότητα EGNOS. Ειδικότερα, το SOL βασίζεται στα σήματα δορυφορικής πλοήγησης χωρίς τη χρήση πρόσθετων στοιχείων όπως το WAAS και το EGNOS. Η απαιτούμενη ακρίβεια είναι περίπου 4 μέτρα πάνω από την υδρόγειο. Αυτό θα μπορούσε να είναι εφικτό με την εισαγωγή του ιονοσφαιρικού μοντέλου που βασίζεται σε μετρήσεις πολλαπλών συχνοτήτων και μοντελοποίηση των άλλων σφαλμάτων GNSS.

4. Δεδομένα Δημόσιας Ρυθμιζόμενης Υπηρεσίας (PRS): Αυτά μεταδίδονται σε συχνότητες φορέα E6 και L1. Η Δημόσια Ρυθμιζόμενη Υπηρεσία παρέχεται σε ειδικές συχνότητες για να παρέχει τη δυνατότητα για μεγαλύτερη συνέχεια της υπηρεσίας που τελεί υπό τον έλεγχο των Κυβερνήσεων της ΕΕ για Δημόσιες εφαρμογές αφιερωμένες στην Ευρωπαϊκή ή/και Εθνική Ασφάλεια, όπως αστυνομία, πολιτική προστασία, επιβολή του νόμου, πολιτική προστασία, όπως ορισμένες υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, καθώς και άλλες κυβερνητικές δραστηριότητες. Το PRS είναι στιβαρό για να είναι ανθεκτικό σε παρεμβολές, εμπλοκές και άλλα τυχαία ή κακόβουλες επιθέσεις.

1.7 ΣΗΜΑΤΑ GNSS

Το σύνολο των αναφερθέντων σημάτων (εκσυγχρονισμένα σήματα GPS, Galileo, BeiDou και Glonass), συνθέτουν τα σήματα GNSS. Κάθε δορυφορικό σύστημα έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σήματος, αλλά κάθε σύστημα προσπαθεί να είναι συμβατό με τα άλλα για να αποτρέψει τις παρεμβολές και την εξασθένηση μεταξύ των σημάτων.

Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ότι η επεξεργασία όλων των σημάτων πρέπει να πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τον ίδιο δέκτη, έτσι υποτίθεται ότι σχεδιάζεται και κατασκευάζεται ένας πολύπλοκος σχεδιασμός δέκτη. Όπως προαναφέρθηκε, το σχέδιο συχνοτήτων GNSS σέβεται τους ραδιο-κανονισμούς όπως συζητούνται και συμφωνούνται στα φόρουμ της ITU. Το διαθέσιμο φάσμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη δορυφορικών συστημάτων ραδιοπλοήγησης (RNSS) φαίνεται στην Εικόνα 7.



Εικόνα 7 - Φάσμα συχνοτήτων δορυφορικών συστημάτων ραδιοπλοήγησης (RNSS) που ορίζεται για το GNSS σήματα (GALILEO, 2005)

(Πηγή: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>).

1.7.1 ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΑ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ

1.7.1.1 NAVIC

Το NavIC ή NAVigation with Indian Constellation είναι ένα αυτόνομο περιφερειακό σύστημα δορυφορικής πλοήγησης που αναπτύχθηκε από τον Ινδικό Οργανισμό Διαστημικής Έρευνας (ISRO). Η κυβέρνηση ενέκρινε το έργο τον Μάιο του 2006 και αποτελείται από 7 δορυφόρους πλοήγησης. Τρεις από τους δορυφόρους τοποθετούνται

στη Γεωστατική τροχιά (GEO) και οι υπόλοιποι 4 στη Γεωσύγχρονη τροχιά (GSO) για να έχουν μεγαλύτερο αποτύπωμα σήματος και μικρότερο αριθμό δορυφόρων για τη χαρτογράφηση της περιοχής.

Προορίζεται να παρέχει απόλυτη ακρίβεια θέσης παντός καιρού, καλύτερη από 7,6 μέτρα σε ολόκληρη την Ινδία και σε μια περιοχή που εκτείνεται περίπου 1.500 km γύρω από αυτήν. Μια εκτεταμένη περιοχή εξυπηρέτησης βρίσκεται μεταξύ της κύριας περιοχής εξυπηρέτησης και μιας ορθογώνιας περιοχής που περικλείεται από τον 30ο παράλληλο νότια προς τον 50ο παράλληλο βόρεια και τον 30ο μεσημβρινό ανατολικά έως τον 130ο μεσημβρινό ανατολικά, 1.500–6.000 km πέρα από τα σύνορα. Ένας στόχος πλήρους ινδικού ελέγχου έχει δηλωθεί, με το δορυφορικό τμήμα, το επίγειο τμήμα και τους δέκτες χρηστών να κατασκευάζονται όλα στην Ινδία.

Το NavIC παρέχει δύο επίπεδα υπηρεσίας, την «τυπική υπηρεσία εντοπισμού θέσης», η οποία θα είναι ανοιχτή για μη στρατιωτική χρήση και μια «περιορισμένη υπηρεσία» (μια κρυπτογραφημένη) για εξουσιοδοτημένους χρήστες (συμπεριλαμβανομένων των στρατιωτικών). Υπάρχουν σχέδια για επέκταση του συστήματος NavIC αυξάνοντας το μέγεθος από 7 σε 11.

1.7.1.2 QZSS

Το Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) είναι ένα περιφερειακό σύστημα μεταφοράς χρόνου με τέσσερις δορυφόρους και βελτίωση για το GPS που καλύπτει την Ιαπωνία και τις περιοχές Ασίας - Ωκεανίας. Οι υπηρεσίες QZSS ήταν διαθέσιμες σε δοκιμαστική βάση από τις 12 Ιανουαρίου 2018 και ξεκίνησαν τον Νοέμβριο του 2018. Ο πρώτος δορυφόρος εκτοξεύτηκε τον Σεπτέμβριο του 2010. Ένα ανεξάρτητο σύστημα δορυφορικής πλοήγησης (από το GPS) με 7 δορυφόρους έχει προγραμματιστεί για το 2023.

1.7.1.3 DORIS

Το Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite (DORIS) είναι ένα γαλλικό σύστημα πλοήγησης ακριβείας. Σε αντίθεση με άλλα συστήματα GNSS, βασίζεται σε σταθμούς στατικής εκπομπής σε όλο τον κόσμο, με τους δέκτες να βρίσκονται σε δορυφόρους, προκειμένου να προσδιοριστεί με ακρίβεια η τροχιακή τους θέση. Το σύστημα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για κινητούς δέκτες στην ξηρά με πιο περιορισμένη χρήση και κάλυψη. Χρησιμοποιείται με παραδοσιακά συστήματα GNSS, ωθεί την ακρίβεια των θέσεων σε εκατοστομετρική ακρίβεια (και σε χιλιοστομετρική ακρίβεια για υψομετρική εφαρμογή και επιτρέπει επίσης την παρακολούθηση πολύ μικροσκοπικών εποχιακών αλλαγών της περιστροφής και των παραμορφώσεων της Γης), προκειμένου να δημιουργηθεί ένα πολύ πιο ακριβές γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς.

1.7.1.4 ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ LEO

Τα δύο τρέχοντα λειτουργικά δορυφορικά τηλεφωνικά δίκτυα χαμηλής τροχιάς της Γης (LEO) είναι σε θέση να παρακολουθούν μονάδες πομποδέκτη με ακρίβεια μερικών χιλιομέτρων χρησιμοποιώντας υπολογισμούς μετατόπισης doppler από τον δορυφόρο. Οι συντεταγμένες αποστέλλονται πίσω στη μονάδα πομποδέκτη όπου μπορούν να διαβαστούν χρησιμοποιώντας εντολές AT ή μια γραφική διεπαφή χρήστη. Αυτό μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί από την πύλη για την επιβολή περιορισμών σε γεωγραφικά δεσμευμένα σχέδια κλήσεων.

1.8 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΕΚΤΗ

Η κύρια λειτουργία του επεξεργαστή σήματος στον δέκτη είναι η ανακατασκευή των φορέων και η εξαγωγή κωδικών και μηνυμάτων πλοήγησης. Μετά από αυτό το στάδιο, ο δέκτης πραγματοποιεί τη μέτρηση μετατόπισης Doppler συγκρίνοντας το λαμβανόμενο σήμα με ένα σήμα αναφοράς που δημιουργείται από τον δέκτη. Λόγω της κίνησης του δορυφόρου, το λαμβανόμενο σήμα μετατοπίζεται με Doppler.

Τα εύρη κωδικών προσδιορίζονται στον βρόχο κλειδώματος καθυστέρησης (DLL) χρησιμοποιώντας συσχέτιση κώδικα. Η τεχνική συσχέτισης παρέχει όλα τα συστατικά των διδιαμορφωμένων σημάτων. Η τεχνική συσχέτισης εκτελείται μεταξύ του παραγόμενου σήματος αναφοράς και του λαμβανόμενου σήματος (Hofmann-Wellenhof et al., 2001). Τα σήματα μετατοπίζονται σε σχέση με το χρόνο έτσι ώστε να αντιστοιχίζονται βέλτιστα με βάση τη μαθηματική συσχέτιση.

Επί του παρόντος, ορισμένοι δέκτες γεωδαιτικού τύπου είναι διαθέσιμοι στην αγορά που παρακολουθούν δορυφόρους GPS και Glonass ταυτόχρονα και στις δύο συχνότητες, ιδιαίτερα στον δέκτη Ashtech Z18 και στο TPS (Topcon Positioning Systems) δέκτης παλαιού τύπου. Ο μελλοντικός δέκτης GNSS θα μπορούσε να σχεδιαστεί για να παρακολουθεί τα διαφορετικά σήματα GNSS και θα μπορούσε να είναι πολλών τύπων:

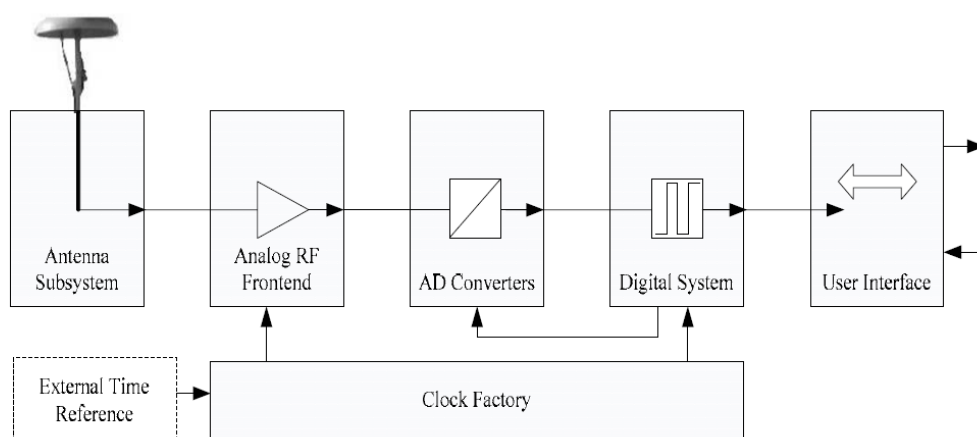
- Ο πρώτος τύπος μπορούσε να επεξεργαστεί όλα τα σήματα GNSS GPS L1, L2, L5 και Galileo OS, CS χρησιμοποιώντας L1, E5 και E6 και επίσης Glonass L1 και L2.
- Ο δεύτερος τύπος χρησιμοποιεί δωρεάν σήμα και κωδικούς, GPS L1 και L2C και Galileo OS, σε L1 και E5.
- Ο τρίτος τύπος χρησιμοποιεί L1 και E5.
- Ο τέταρτος τύπος χρησιμοποιεί GPS L1 και L2 (τα οποία είναι ήδη στην αγορά), (Ries et al., 2002).

- Ο πέμπτος τύπος χρησιμοποιεί σήματα GPS και Glonass (τα οποία υπάρχουν ήδη), (Leick, 2003).

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι δεκτών είναι ο δέκτης ενδιάμεσης συχνότητας (IF) και ο ραδιοφωνικός δέκτης που καθορίζεται από το λογισμικό (SDR). Στον μπροστινό δέκτη RF το σήμα μετατρέπεται σε μια ενδιάμεση συχνότητα και στη συνέχεια γίνεται δειγματοληψία, αλλά το SDR χρησιμοποιεί άμεση ψηφιοποίηση ή διέλευση ζώνης δειγματοληψία. Λεπτομέρειες για το σχεδιασμό του δέκτη GNSS μπορούν να βρεθούν στο (Schmid et al., 2004; Julien et al., 2004a).

Τα κύρια στοιχεία του συνδυασμένου δέκτη RF-FE GNSS φαίνονται στην Εικόνα 8. Μετά τη δειγματοληψία και τη μετατροπή αναλογικού σε ψηφιακό (ADC) του λαμβανόμενου σήματος, ο δέκτης εκτελεί παράλληλη διασπορά. Το λαμβανόμενο σήμα της ζώνης βάσης πολλαπλασιάζεται παράλληλα με τους κωδικούς διασποράς όλων των ορατών δορυφόρων.

Το λαμβανόμενο σήμα κάθε δορυφόρου πολλαπλασιάζεται παράλληλα με διαφορετικές μετατοπίσεις καθυστέρησης κώδικα. Αυτά τα προϊόντα στη συνέχεια συσσωρεύονται για να υπολογιστεί η συνάρτηση διασταυρούμενης συσχέτισης.



Εικόνα 8 - Έννοια Hybrid Galileo/GPS Receiver

(Πηγή: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>).

Επειδή τα σήματα BOC χρησιμοποιούνται στο Galileo, είναι απαραίτητα συμπληρωματικά μέτρα λόγω των πολλαπλών κορυφών συσχέτισης της λειτουργίας αυτόματης συσχέτισης. Η παρακολούθηση φορέα εκτελείται χρησιμοποιώντας βρόχο κλειδώματος φάσης ή κλειδώματος συχνότητας (PLL ή FLL). Η συνεκτική συσχέτιση σε συνδυασμό με διαφορική ή μη συνεκτική συσχέτιση μπορεί να γίνει για τον πιλότο και το κανάλι δεδομένων (Schmid et al., 2004).

Πολλαπλά σήματα θα είναι διαθέσιμα στο L1 μέσα στα επόμενα χρόνια (Hein et al., 2004). Το Galileo θα χρησιμοποιήσει διαφορετικό σχήμα διαμόρφωσης για τα σήματα του, όπως BOC και QPSK, ενώ το GPS χρησιμοποιεί διαμόρφωση δυαδικής μετατόπισης φάσης (BPSK) για τα ανοιχτά σήματα στα L1 και L2. Το σήμα L5 που θα εμφανιστεί με τους δορυφόρους Block IIF το 2006, θα έχει τετραγωνική μετατόπιση φάσης (QPSK).

Το σχήμα διαμόρφωσης φορέα δυαδικής μετατόπισης (BOC) του Galileo παρέχει καλύτερη απόδοση θορύβου πολλαπλών διαδρομών και δέκτη σε σύγκριση με τη διαμόρφωση δυαδικής μετατόπισης φάσης GPS (BPSK). Πιο πολύπλοκες τεχνικές έχουν ήδη αναπτυχθεί για την παρακολούθηση του σήματος BOC, όπως το bump jump και το BPSK-like.

1.9 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

1.9.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

Ο ορισμός του συστήματος συντεταγμένων αναφοράς είναι ζωτικής σημασίας για την περιγραφή της κίνησης του δορυφόρου, τη μοντελοποίηση των παρατηρήσιμων και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Το σύστημα συντεταγμένων αναφοράς στη δορυφορική γεωδαισία είναι παγκόσμιο και γεωκεντρικό από τη φύση του, καθώς η δορυφορική κίνηση αναφέρεται στο κέντρο μάζας της γης (Seeber, 2003 Hofmann-Wellenhof et al., 2001). Στη δορυφορική γεωδαισία, απαιτούνται δύο συστήματα αναφοράς: (α) σταθερό, αδρανειακό σύστημα αναφοράς για την περιγραφή της κίνησης του δορυφόρου και (β) επίγειο, επίγειο σύστημα αναφοράς για τις θέσεις των σταθμών παρατήρησης και για την περιγραφή αποτελέσματα από δορυφορική γεωδαισία.

Ο εντοπισμός θέσης με τη χρήση GNSS εξαρτάται κυρίως από τη γνώση των συντεταγμένων του δορυφόρου. Η θέση του δέκτη υπολογίζεται σε σχέση με τη στιγμιαία θέση του δορυφόρου. Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση διανύσματος εύρους μεταξύ δορυφόρου και δέκτη, η συντεταγμένη του δορυφόρου και του δέκτη θα πρέπει να εκφράζεται στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων.

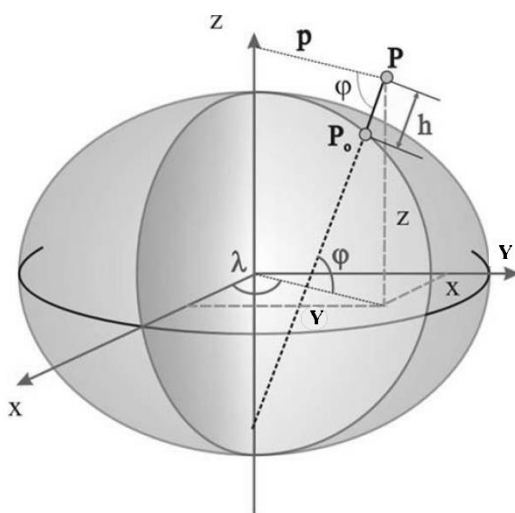
Στη δορυφορική γεωδαισία, χρησιμοποιούνται τα δύο συστήματα και οι παράμετροι μετασχηματισμού μεταξύ του σταθερού χώρου και της σταθερής γης είναι πολύ

γνωστοί και χρησιμοποιούνται απευθείας στο λογισμικό δέκτη GNSS και μετά την επεξεργασία για τον υπολογισμό της θέσης των δεκτών στο σταθερό σύστημα γης.

Το επίγειο σύστημα αναφοράς ορίζεται συμβατικά με τρεις άξονες, όπου ο άξονας Z συμπίπτει με τον άξονα περιστροφής της γης όπως ορίζεται από τη Συμβατική Διεθνή Προέλευση (CIO). Το Xaxis σχετίζεται με τον μέσο μεσημβρινό του Γκρήνουιτς και ο άξονας Y είναι ορθογώνιος και στους δύο άξονες Z και X και ολοκληρώνει το δεξιόχειρο σύστημα συντεταγμένων, (Εικόνα 9). Ένα παράδειγμα του χερσαίου συστήματος αναφοράς είναι το WGS84. Το GPS έχει χρησιμοποιήσει το WGS84 ως σύστημα αναφοράς (Leick, 2003), και με το WGS84 συσχετίζεται με ένα γεωκεντρικό ισοδύναμο ελλειψοειδές της επανάστασης. Η βασική ιδέα, στη γεωδαισία, πίσω από τη χρήση των ελλειψοειδών αναφοράς είναι ότι ταιριάζουν στο πραγματικό σχήμα της γης.

Ένα άλλο παράδειγμα επίγειου πλαισίου αναφοράς είναι το Διεθνές Επίγειο Πλαίσιο Αναφοράς (ITRF), το οποίο ιδρύθηκε από το Κεντρικό Γραφείο της Διεθνούς Υπηρεσίας Περιστροφής Γης (IERS). Το ITRF ενημερώνεται τακτικά και είναι πιο ακριβές από το WGS84, αλλά η διαφορά μεταξύ του WGS84 και του ITRF είναι τώρα της τάξης των λίγων εκατοστών. Αυτή η διαφορά οφείλεται κυρίως στη διαφορά μεταξύ των σταθμών αναφοράς που χρησιμοποιεί κάθε σύστημα όταν υλοποιείται.

Και τα δύο συστήματα είναι γεωκεντρικά και οι παράμετροι μετασχηματισμού μεταξύ τους δημοσιεύονται τακτικά από το IERS. Η αναπαράσταση της θέσης σε γεωκεντρικές καρτεσιανές συντεταγμένες (X, Y και Z) έχει μικρότερη σημασία στη πλοήγηση. Ως εκ τούτου, η ελλειψοειδής αναπαράσταση (γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος και ύψος πάνω από το ελλειψοειδές) χρησιμοποιούνται πιο συχνά για αναπαράσταση συντεταγμένων.



Εικόνα 9 - Σύστημα συντεταγμένων ECEF και ελλειψοειδείς συντεταγμένες

(Πηγή: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>).

Η σχέση μεταξύ καρτεσιανών συντεταγμένων (X, Y, Z) και ελλειψοειδών συντεταγμένων (φ , λ και h) είναι ευρέως γνωστή χρησιμοποιώντας τους ακόλουθους τύπους:

$$\begin{aligned} X &= (N+h) \cos\varphi \cos\lambda \\ Y &= (N+h) \cos\varphi \sin\lambda \\ Z &= ((b^2/\alpha^2) * N + h) \sin\varphi \end{aligned} \quad (2)$$

όπου N είναι η ακτίνα καμπυλότητας στην πρώτη κατακόρυφο και προκύπτει από την ακόλουθη έκφραση:

$$N = \alpha^2 / \sqrt{\alpha^2 \cos^2\varphi + b^2 \sin^2\varphi} , \quad (3)$$

Εδώ, α , β είναι οι ημιαξόνιοι του ελλειψοειδούς. Η καρτεσιανή συντεταγμένη του WGS84 ονομάζεται επίσης σύστημα συντεταγμένων ECEF (Earth Centered Earth-Fixed).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η υλοποίηση του πλαισίου αναφοράς εξαρτάται από τις συντεταγμένες των επίγειων σταθμών αναφοράς. Το Επίγειο Πλαίσιο Αναφοράς Galileo (GTRF) αναμένεται να είναι παρόμοιο με το ITRF, αλλά θα βασίζεται στις συντεταγμένες των επίγειων σταθμών Galileo. Οι διαφορές μεταξύ WGS84, ITRF και GTRF αναμένεται να είναι της τάξης των λίγων εκατοστών. Τα δύο συστήματα συντεταγμένων είναι συμβατά και η ακρίβεια που λαμβάνεται είναι αρκετά καλή για τις περισσότερες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της πλοήγησης.

Για μετρήσεις υψηλής ακρίβειας και για εκατομετρική ακρίβεια μεταξύ των διαφόρων συστημάτων, οι παράμετροι μετασχηματισμού αναμένεται να δημοσιευτούν από τους παρόχους γεωδαιτικών υπηρεσιών όπως το IERS. Το Glonass χρησιμοποιεί το PZ90 ως σύστημα συντεταγμένων αναφοράς που είναι βασικά ένα σύστημα ECEF. Οι παράμετροι μετασχηματισμού μεταξύ PZ90 και WGS84 δημοσιεύονται από την IERS (Leick, 2003).

1.10 ΧΡΟΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Υπάρχουν πολλά συστήματα αναφοράς χρόνου που χρησιμοποιούνται και βασίζονται σε διάφορες περιοδικές διαδικασίες όπως η περιστροφή της γης. Οι κύριοι τύποι αυτών των συστημάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα I. Η μετατροπή μεταξύ συστημάτων

χρόνου πραγματοποιείται με γνωστούς τύπους. Στο GNSS (π.χ. GPS), αντί για το ίδιο το δυναμικό σύστημα χρόνου, το σύστημα ατομικής ώρας χρησιμεύει ως αναφορά.

Το δορυφορικό ρολόι Glonass μετακινείται σύμφωνα με το UTC (SU). Ο χρόνος συστήματος Galileo (GST) θα είναι μια συνεχής κλίμακα συντεταγμένων που κατευθύνεται προς τη Διεθνή Ατομική Ώρα (ITA) με μετατόπιση μικρότερη από 33 νανοδευτερόλεπτα. Τα όρια GST, εκφραζόμενα ως χρονική μετατόπιση σε σχέση με το ITA, θα πρέπει να είναι 50 νανοδευτερόλεπτα για το 95 τοις εκατό του χρόνου σε οποιοδήποτε ετήσιο χρονικό διάστημα.

Η διαφορά μεταξύ GST και ITA και μεταξύ GST και UTC μεταδίδεται στους χρήστες χρησιμοποιώντας το σήμα στο διάστημα κάθε υπηρεσίας Galileo. Το τμήμα εδάφους Galileo θα παρακολουθεί την αντιστάθμιση του GST σε σχέση με το χρόνο του συστήματος GPS και τελικά θα μεταδίδει το offset στους χρήστες.

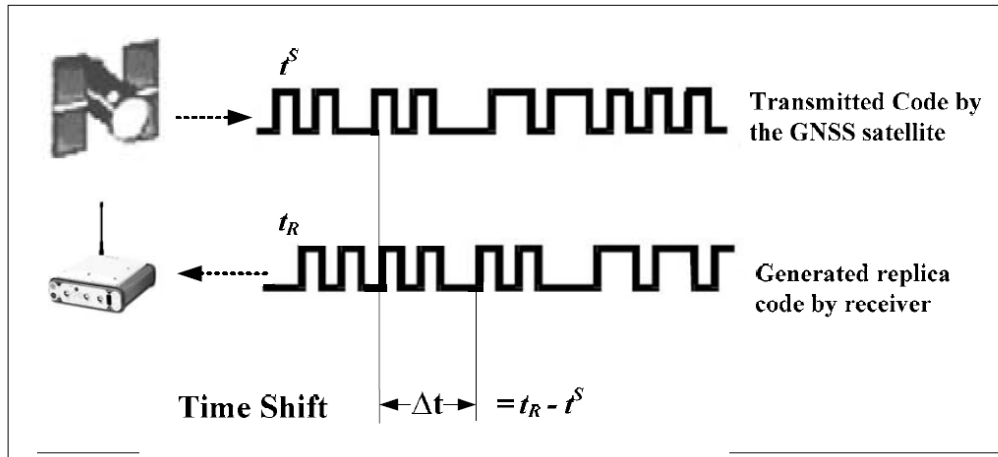
Πίνακας I. Χρονικά συστήματα (Hofmann-Wellenhof et al., 2001)

Περιοδική διαδικασία	Σύστημα χρόνου	Συντομογραφία
Περιστροφή της γης	Universal Time	UT
Γη επανάσταση	Επίγειος Δυναμικός Χρόνος	TDT
Ατομική ταλάντωση	Διεθνής Ατομική Ώρα	ITA
	Συντόνισε το UT	UTC
	Ώρα GPS	

1.11 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ

Η βασική ιδέα του GNSS είναι η μέτρηση του χρόνου διαδρομής του σήματος μεταξύ τεχνητού δορυφόρου και δέκτη. Πολλαπλασιάζοντας αυτόν τον χρόνο με την ταχύτητα φωτός (c), παίρνουμε το εύρος μεταξύ του δορυφόρου και του δέκτη (Hofmann-Wellenhof et al., 2001, Leick, 2003) (βλέπε Εικόνα 10) :

$$Range = c * (t_R - t^S) = \Delta t_R^S * c \quad (4)$$



Εικόνα 10 - Βασική έννοια μέτρησης εύρους

(Πηγή: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>).

Η μέτρηση χρόνου ή φάσης που εκτελεί ο δέκτης βασίζεται στη σύγκριση μεταξύ του λαμβανόμενου σήματος στην κεραία του δέκτη και του δημιουργούμενου σήματος αναφοράς από τον δέκτη. Τα δύο σήματα επηρεάζονται από τα σφάλματα ρολογιών. Δεδομένου ότι το σήμα ταξιδεύει μέσω των ατμοσφαιρικών στρωμάτων, θα πρέπει να μοντελοποιηθεί περαιτέρω θόρυβος για να υπολογιστεί το ακριβές εύρος.

1.11.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΨΕΥΔΟ - ΚΩΔΙΚΑ

Η τεχνική συσχέτισης κώδικα χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της χρονικής διαφοράς μεταξύ του ληφθέντος και του παραγόμενου αντιγράφου κώδικα. Το εύρος μπορεί να διαμορφωθεί ως εξής:

$$R_R^S = c [(t_{R(GNSS)} - \delta_R) - (t^{S(GNSS)} - \delta^S)] \quad (5)$$

όπου δ^S είναι η μετατόπιση ρολογιού του δορυφόρου δ^S και δ_R είναι η μετατόπιση ρολογιού του δέκτη δ_R . Ένα ατομικό ρολόι υψηλής σταθερότητας χρησιμοποιείται γενικά στο δορυφόρο, επομένως το δ^S είναι μικρό και θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί από ένα πολυώνυμο με τους συντελεστές να μεταδίδονται στο μήνυμα πλοήγησης. Ωστόσο, η μετατόπιση ρολογιού του δέκτη δ_R είναι μεγάλη και αντιμετωπίζεται ως άγνωστη για να εκτιμηθεί στη συνάρτηση:

$$R_R^S = c * \Delta t_{GNSS} + c * (\delta^S - \delta_R) = \rho + c * \Delta\delta \quad (6)$$

όπου ρ είναι η πραγματική απόσταση μεταξύ δορυφόρου και δέκτη και εκφράζεται από το διάνυσμα στο γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων αναφοράς ως:

$$\rho = \sqrt{(X^S - X_R)^2 + (Y^S - Y_R)^2 + (Z^S - Z_R)^2} \quad (7)$$

1.11.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΨΕΥΔΟΠΕΡΙΟΧΗΣ

Το φάσμα ψευδοπεριοχής βασίζεται στις μετρήσεις της διαφοράς φάσης μεταξύ του λαμβανόμενου και του παραγόμενου σήματος $\Delta\phi^S_R$ στον δέκτη. Ο μεταφορέας που λαμβάνεται μετατοπίζεται μέσω Doppler λόγω της κίνησης του δορυφόρου (Hofmann-Wellenhof et al., 2001).

Για να υπολογίσουμε το εύρος χρησιμοποιώντας τη μέτρηση φάσης, πρέπει να προσθέσουμε στο $\Delta\phi^S_R$ τον αριθμό των κύκλων μεταξύ του δορυφόρου και του δέκτη, ο οποίος είναι μια διαφορούμενη τιμή και συχνά ονομάζεται ασάφεια (N).

Λαμβάνοντας υπόψη τα αρχικά σφάλματα φάσης του δορυφόρου και του δέκτη λόγω των ρολογιών τους, το μαθηματικό μοντέλο της ψευδοεμβέλειας φάσης μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\Delta\phi^S_R + N = - (f/c) * p - f \delta^S + f \delta_R \quad (8)$$

Αν αναδιατάξουμε την παραπάνω εξίσωση και χρησιμοποιήσουμε $\Phi = -\Delta\phi^S_R$ και $\Delta\delta = \delta^S - \delta_R$, γίνεται παρόμοια με την εξίσωση ψευδοεμβέλειας του κωδικού, αλλά με πρόσθετη την τιμή ασάφειας (N):

$$\lambda * \Phi = \rho + c * \Delta\delta + \lambda * N \quad (9)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος.

1.12 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΙΜΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ GNSS

Οι μετρήσεις κώδικα και φάσης επηρεάζονται από θόρυβο και σφάλματα λόγω της διάδοσης σημάτων μέσω των ατμοσφαιρικών στρωμάτων και λόγω των μετρήσεων θορύβου. Αυτά τα σφάλματα μπορούν να περιγραφούν εν συντομία ως εξής:

1. Σφάλμα δορυφορικού ρολογιού: Αυτό μπορεί να μοντελοποιηθεί από τους πολυωνυμικούς συντελεστές που μεταδίδονται στο μήνυμα πλοήγησης σε σχέση με έναν χρόνο αναφοράς (π.χ. GPS).

$$\delta^S = \alpha_0 + \alpha_1 (t - t_0) + \alpha_2 (t - t_0)^2 \quad (10)$$

2. Τροχιακό σφάλμα: Αυτό μπορεί να εξαλειφθεί με διαφορική τοποθέτηση. Ακριβείς τροχιές θα μπορούσαν να ληφθούν σε σχεδόν πραγματικό χρόνο μέσω Διαδικτύου από τα κέντρα υπηρεσιών όπως το International GNSS Service (IGS).

3. Ιονοσφαιρικό σφάλμα: Αυτό το σφάλμα μοντελοποιείται ή εξαλείφεται χρησιμοποιώντας τον γραμμικό συνδυασμό δύο ή πολλαπλών συχνοτήτων (Julien et al., 2004b). Η σχέση μεταξύ της ιονόσφαιρας επίδρασης στο μελλοντικό GNSS (L5, L2 και L1 για το GPS· E5a, E5b και E1 για το GALILEO) χρησιμοποιώντας την τριπλή συχνότητα θα μπορούσε να γραφτεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \lambda_1 * \Phi_1 &= \rho + c * \Delta\delta + \lambda_1 * N - I_{L1} \\ \lambda_2 * \Phi_2 &= \rho + c * \Delta\delta + \lambda_2 * N - (f_1^2/f_2^2) * I_{L1} \\ \lambda_3 * \Phi_3 &= \rho + c * \Delta\delta + \lambda_3 * N - (f_1^2/f_3^2) * I_{L1} \end{aligned} \quad (11)$$

όπου, ιονόσφαιρα = I_{L1} .

Η επίδραση της ιονόσφαιρας στη μέτρηση του GNSS παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την επίλυση του αριθμού N (Liu και Lachapelle, 2002). Η ύπαρξη πολλαπλών συχνοτήτων μπορεί να δώσει περισσότερα πλεονεκτήματα στα μοντέλα ιονόσφαιρας για την εκτίμηση της πρώτης και δεύτερης τάξης επίδρασης της ιονόσφαιρας. Επιπλέον, επιτρέπει περισσότερες δυνατότητες στη διαδικασία επίλυσης ασάφειας (Zhang, et al., 2003). Η ιονόσφαιρα θα μπορούσε επίσης να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας τον συντελεστή ιονόσφαιρας που μεταδίδεται από το μήνυμα πλοήγησης.

4. Η τροπόσφαιρα: Αποτελείται από δύο στρώματα: Υγρό στρώμα (έως 10 km πάνω από την επιφάνεια του εδάφους) και ξηρό στρώμα από 10 έως 40 km πάνω από το έδαφος. Η τροπόσφαιρα προκαλεί καθυστέρηση και στις παρατηρήσεις του κώδικα και του φορέα. Δεδομένου ότι δεν εξαρτάται από τη συχνότητα, δεν μπορεί να ακυρωθεί χρησιμοποιώντας διπλές μετρήσεις συχνότητας, αλλά μπορεί, ωστόσο, να μοντελοποιηθεί επιτυχώς. Τα τροποσφαιρικά μοντέλα εξαρτώνται από εμπειρικά μοντέλα λαμβάνοντας υπόψη όλες τις τιμές θερμοκρασίας, πίεσης, σχετικής υγρασίας

και λειτουργίας χαρτογράφησης. Παραδείγματα τέτοιων μοντέλων είναι τα μοντέλα Hopfield και Saastamoninen.

5. Σφάλμα ρολογιού δέκτη: Αυτό οφείλεται στη χρήση μη ακριβούς ρολογιού στον δέκτη (π.χ. ρολόι χαλαζία), που προκαλεί μετατόπιση και μετατόπιση στο ρολόι του δέκτη και στο χρόνο αναφοράς GNSS. Αυτό το σφάλμα αντιμετωπίζεται ως άγνωστο στους υπολογισμούς ψευδοεμβέλειας. Το σφάλμα του δέκτη ρολογιού θα μπορούσε να εξαλειφθεί στην εξίσωση διπλής διαφοράς όπως φαίνεται στην ενότητα που ακολουθεί.

6. Multipath: Αυτό προκαλείται από πολλαπλές ανακλάσεις των σημάτων στον δέκτη ή στο δορυφόρο λόγω πολλαπλών διαδρομών που ακολουθεί το σήμα για να φτάσει στον προορισμό. Ο καλύτερος τρόπος για τη μείωση του φαινομένου πολλαπλών διαδρομών είναι να επιλέξετε την τοποθεσία μακριά από την επιφάνεια ανάκλασης (όπως κτίρια, αυτοκίνητα, δέντρα κ.λπ.) και με κατάλληλο σχεδιασμό κεραίας. Οι φάσεις φέροντος επηρεάζονται λιγότερο από τη διάδοση πολλαπλών διαδρομών σε σχέση με τις περιοχές κώδικα, επειδή η πολλαπλή διαδρομή εξαρτάται από τη συχνότητα. Το σφάλμα πολλαπλών διαδρομών θα μπορούσε να φτάσει σε επίπεδο ενός μέτρου. Η εξάλειψη της πολλαπλής διαδρομής είναι δυνατή με την επιλογή μιας κεραίας που εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα της πόλωσης σήματος.

1.13 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ GNSS

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι τεχνικών εντοπισμού θέσης στις μετρήσεις GNSS: η τοποθέτηση ενός σημείου και η διαφορική τοποθέτηση.

1.13.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΕ ΕΝΑ ΣΗΜΕΙΟ

Η βασική έννοια της θέσης του σημείου εξαρτάται από την τριγωνική διάσταση μεταξύ του δέκτη και του δορυφόρου.

Απαιτούνται μετρήσεις εύρους από τέσσερις δορυφόρους για τον προσδιορισμό των τεσσάρων αγνώστων X, Y, Z και της μετατόπισης ρολογιού του δέκτη ($\Delta\delta$). Η αναλυτική λύση για δέκτες A και τέσσερις δορυφόρους θα μπορούσε να γραφτεί ως εξής:

$$\begin{aligned}R_A^1(t) &= \sqrt{[(X^1(t) - X_A)^2 + (Y^1(t) - Y_A)^2 + (Z^1(t) - Z_A)^2]} + c * \Delta\delta \\R_A^2(t) &= \sqrt{[(X^2(t) - X_A)^2 + (Y^2(t) - Y_A)^2 + (Z^2(t) - Z_A)^2]} + c * \Delta\delta \\R_A^3(t) &= \sqrt{[(X^3(t) - X_A)^2 + (Y^3(t) - Y_A)^2 + (Z^3(t) - Z_A)^2]} + c * \Delta\delta\end{aligned}\tag{12}$$

$$R_A^4(t) = \sqrt{[(X^4(t) - X_A)^4 + (Y^4(t) - Y_A)^2 + (Z^4(t) - Z_A)^2]} + c * \Delta\delta$$

Γενικά, απαιτείται γραμμικοποίηση σε σχέση με την κατά προσέγγιση θέση του δέκτη για την επίλυση αυτού του μοντέλου, όπου η εμβέλεια R μετράται από τον δέκτη και η συντεταγμένη του δορυφόρου εξάγεται από το μήνυμα πλοήγησης. Οι άγνωστοι στην παραπάνω εξίσωση είναι X, Y, Z και το σφάλμα ρολογιού Δδ. Σε περίπτωση παρατήρησης περισσότερων από τέσσερις δορυφόρων, πραγματοποιείται η προσαρμογή του ελάχιστου τετραγώνου για την εκτίμηση των αγνώστων.

Ως εκ τούτου, οι συντεταγμένες του δέκτη και η χρονική μετατόπιση θα μπορούσαν να ληφθούν απευθείας σε πραγματικό χρόνο με μία μέτρηση εποχής. Οι γεωμετρικές πληροφορίες μπορούν να ληφθούν από το μοντέλο εξίσωσης ως PDOP που υποδεικνύει την ποιότητα της λύσης σε σχέση με τη γεωμετρία του δορυφόρου. Η κακή δορυφορική διανομή δίνει μεγάλο PDOP. Λόγω μη μοντελοποιημένων σφαλμάτων σε ψευδοπεριοχές όπως ιονόσφαιρα, τροπόσφαιρα και τροχιακά σφάλματα, το επίπεδο ακρίβειας της απόλυτης θέσης είναι εντός 10 μέτρων.

1.13.2 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΙΜΗ ΔΙΑΦΟΡΑ

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα συστηματικά και τυχαία λάθη στην παρατήρηση, μπορούμε να γράψουμε το μαθηματικό μοντέλο για παρατηρήσιμη διαφορά για μετρήσεις κώδικα και φάση, αντίστοιχα, όπως παρακάτω:

$$R_A^I(t_0) = \rho_A^I(t_0) + \Delta\rho_A^I(t_0) + c\delta^I(t_0) - c\delta_A(t_0) + I_A + T_A + \varepsilon \quad (13)$$

$$\lambda\phi_A^I(t_0) = \rho_A^I(t_0) + \Delta\rho_A^I(t_0) + \lambda N_A^I + c\delta^I(t_0) - c\delta_A(t_0) - I_A + T_A + \varepsilon \quad (14)$$

Όπου $\Delta\rho_R^S$ είναι το τροχιακό σφάλμα, I είναι το σφάλμα ιονόσφαιρας, T είναι το σφάλμα τροπόσφαιρας και ε είναι οι άλλοι τύποι θορύβου και σφαλμάτων όπως αυτά που οφείλονται σε πολλαπλές διαδρομές.

Χρησιμοποιώντας δύο δέκτες A και B και δορυφόρο (1), μπορούμε να εκτελέσουμε Μονές Διαφορές (SD). Στην SD το τροχιακό σφάλμα και το σφάλμα ρολογιού του δορυφόρου ακυρώνονται. Χρησιμοποιώντας δύο δέκτες και δύο δορυφόρους (1, 2), μπορούμε να εκτελέσουμε Διπλές Διαφορές (DD). Στο DD το σφάλμα του δέκτη ρολογιού ακυρώνεται. Χρησιμοποιώντας δύο δέκτες, δύο δορυφόρους και δύο επόμενες εποχές, μπορούμε να εκτελέσουμε Triple Differences (TD). Στο TD η ασάφεια ακυρώνεται.

$$\begin{aligned}
SD &= \lambda \varphi_{AB}^1(t) = \lambda \varphi_B^1(t) - \lambda \varphi_A^1(t) = \rho_{AB}^1(t) + \lambda N_{AB}^1 - c\delta_{AB}(t_0) \\
DD &= \varphi_{AB}^{I2}(t) = (1/\lambda)\rho_{AB}^{I2}(t) + N_{AB}^{I2} \\
TD &= \varphi_{AB}^{I2}(t) = (1/\lambda)\rho_{AB}^{I2}(t_{12})
\end{aligned} \tag{15}$$

Όπως βλέπουμε, τα περισσότερα από τα συστηματικά σφάλματα ακυρώνονται ή μειώνονται με τη χρήση των παρατηρήσιμων διαφορών. Κατά συνέπεια, η ακρίβεια του υπολογισμού θέσης θα βελτιωθεί μετά την εξάλειψη ή τη μείωση αυτών των προκαταλήψεων. Η λύση που λαμβάνεται σε DD με ασάφεια μπορεί να δώσει α ακρίβεια στο εκατοστό επίπεδο.

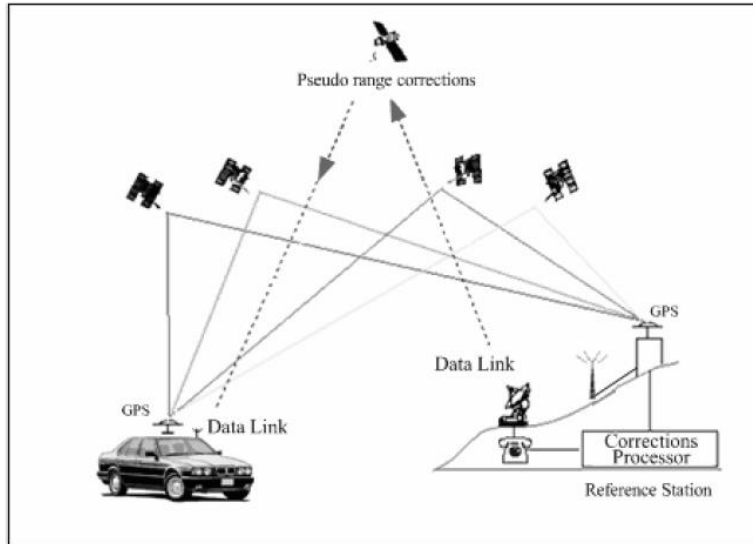
1.13.3 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΘΕΣΗ

Υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον για τη διαφορική τοποθέτηση λόγω των πολυάριθμων πλεονεκτημάτων των ασύρματων επικοινωνιών και δικτύων. Τα περισσότερα από τα σφάλματα που επηρεάζουν το GNSS είναι κοινά μεταξύ των δεκτών, οι οποίοι παρατηρούν το ίδιο σύνολο δορυφόρων (Leick, 2003· Hofmann-Wellenhof et al., 2001). Έτσι, κάνοντας διαφορική μέτρηση μεταξύ δύο ή περισσότερων δεκτών, τα περισσότερα από αυτά τα σφάλματα θα μπορούσαν να ακυρωθούν.

Η βασική έννοια της διαφορικής θέσης είναι ο υπολογισμός της διόρθωσης θέσης ή της διόρθωσης εύρους στον δέκτη αναφοράς και στη συνέχεια αποστολή αυτής της διόρθωσης στον άλλο δέκτη μέσω ραδιοζεύξης. Με αυτόν τον τρόπο τα περισσότερα σφάλματα ακυρώνονται (βλέπε Εικόνα 11). Η μεταδιδόμενη διόρθωση θα μπορούσε να είναι πολλών τύπων: η διόρθωση θέσης ή ψευδο εμβέλειας, η διόρθωση ψευδοεύρους εξομάλυνσης φορέα και η διόρθωση φάσης φορέα. Το μαθηματικό μοντέλο του DGNSS θα μπορούσε να γραφτεί όπως φαίνεται παρακάτω. Χρησιμοποιούνται δύο δέκτες, όπου ο δέκτης A είναι εγκατεστημένος σε γνωστό σταθμό αναφοράς και ο B είναι δέκτης rover/κινούμενος. Το ψευδο εύρος στο A δίνεται από:

$$R_A^1(t_0) = \rho_A^1(t_0) + \Delta\rho_A^1(t_0) + c\delta^1(t_0) - c\delta_A(t_0) \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
PRC^1(t_0) &= -R_A^1(t_0) + \rho_A^1(t_0) \\
&= -\Delta\rho_A^1(t_0) - c\delta^1(t_0) + c\delta_A(t_0)
\end{aligned} \tag{17}$$



Εικόνα 11 - Διόρθωση διαφορικής

(Πηγή: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>).

Πρέπει να προσθέσουμε τη διόρθωση ρυθμού εύρους για μια αυθαίρετη εποχή (t).

$$PRC^1(t) = PRC^1(t_0) + RRC^1(t_0) (t-t_0) \quad (18)$$

όπου ($t - t_0$), ονομάζεται λανθάνουσα κατάσταση λόγω του χρόνου μετάδοσης μεταξύ της αναφοράς και του δέκτη rover.

Το ψευδοεύρος στον δέκτη B θα μπορούσε να γραφτεί ως:

$$R^1_B(t) = \rho^1_B(t) + \Delta\rho^1_B(t) + c\delta^1(t) - c\delta_B(t) \quad (19)$$

Προσθέτοντας το ψευδοεύρος από το σταθμό αναφοράς, λαμβάνουμε:

$$\begin{aligned} R^1_B(t)_{corr} &= R^1_B(t) + PRC^1(t) \\ &= \rho^1_B(t) + (\Delta\rho^1_B(t) - \Delta\rho^1_A(t)) - (c\delta_B(t) - c\delta_A(t)) \end{aligned} \quad (20)$$

$$R^1_B(t)_{corr} = \rho^1_B(t) - c\Delta\delta_{AB}(t) \quad (21)$$

Όπως βλέπουμε το τροχιακό σφάλμα ακυρώνεται και το σφάλμα ρολογιού του δορυφόρου εξαλείφεται. Μπορούμε επίσης να μεταδώσουμε τη διόρθωση φάσης στον δέκτη του rover. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να προσθέσουμε ένα άλλο άγνωστο. η

ασάφεια N , στις εξισώσεις. Η διόρθωση εύρους φάσης μεταξύ της αναφοράς και του δέκτη rover κατά την εφαρμογή της ίδιας παραπάνω διαδικασίας θα δοθεί από:

$$\lambda\varphi^1_{B(t)_{\text{corr}}} = \rho^1_{B(t)} + \lambda\Delta N^1_{AB} - c\Delta\delta_{AB}(t) \quad (22)$$

Το DGNSS με διόρθωση εύρους φάσης χρησιμοποιείται για τις περισσότερες κινηματογραφικές κινηματικές σε πραγματικό χρόνο (RTK) ακριβείας. Αλλά η ασάφεια θα πρέπει να επιλυθεί ή να διορθωθεί χρησιμοποιώντας τις τεχνικές On The Fly (OTF). Στην τεχνική μέτρησης φάσης η ακρίβεια που προκύπτει θα είναι στο επίπεδο του εκατοστού.

Η μοντελοποίηση της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας θα εξαλείψει ή θα μειώσει τα σφάλματα στο DGNSS. Αυτή η μέθοδος δίνει περισσότερες δυνατότητες απόκτησης υψηλής ακρίβειας στην τοποθέτηση σημείου χρησιμοποιώντας έναν δέκτη.

1.13.4 ΔΙΑΦΟΡΙΚΟ GNSS ΕΥΡΕΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ (WADGNSS)

Το WADGNSS είναι ένα σχήμα που θα επέτρεπε στον χρήστη να εκτελέσει διαφορική τοποθέτηση και να αποκτήσει αξιόπιστη θέση με υψηλή ακρίβεια σε πραγματικό χρόνο σε μεγάλη περιοχή. Το WADGNSS αποτελείται από έναν κύριο σταθμό ελέγχου και έναν αριθμό τοπικών ή παγκόσμιων σταθμών παρακολούθησης και σύνδεση επικοινωνίας.

Οι σταθμοί παρακολούθησης συγκεντρώνουν τα δεδομένα από το δορυφόρο GNSS και στη συνέχεια τα στέλνουν στον κύριο σταθμό ελέγχου. Ο κύριος έλεγχος εκτιμά την παράμετρο της ιονόσφαιρας, τις παραμέτρους της τροπόσφαιρας, τα εφήμερα δορυφόρου και τα σφάλματα ρολογιού. Όλες αυτές οι διορθώσεις μεταδίδονται στον χρήστη μέσω Διαδικτύου, ασύρματων επικοινωνιών ή δορυφορικών επικοινωνιών.

Ανάλογα με την κατανομή των σταθμών παρακολούθησης αναφοράς και την ακρίβεια της μοντελοποίησης σφαλμάτων και των δυνατοτήτων επικοινωνίας, η ακρίβεια του δέκτη rover μπορεί να κυμαίνεται από 1 - 3 μέτρα. Η τετραμετρική ακρίβεια θα μπορούσε να επιτευχθεί λαμβάνοντας διόρθωση φάσης και διόρθωση ασάφειας, όπως ο RTK και ο εικονικός σταθμός αναφοράς (VRS). Προγράμματα έχουν ήδη αναπτυχθεί για την αποστολή των διορθώσεων GNSS στον χρήστη για μεγαλύτερη ακρίβεια. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μετάδοση μιας διόρθωσης φάσης με μοντέλα σφαλμάτων για τον καθορισμό της ασάφειας θα δώσει κεντρομετρική ακρίβεια για τον δέκτη του rover.

Οι ασύρματες επικοινωνίες και το Διαδίκτυο μάς έχουν προσφέρει νέες δυνατότητες εφαρμογής εντοπισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο για να αποκτήσουμε εκατοστολογική ακρίβεια χρησιμοποιώντας έναν δέκτη (Leick, 2003).

Το μαθηματικό μοντέλο του WADGNSS μπορεί να γραφτεί προσθέτοντας όλα τα σφάλματα που επηρεάζουν τα δορυφορικά σήματα:

$$\lambda\varphi^1_A(t_0) = \rho^1_A(t_0) + \Delta\rho^1_A + \lambda N^1_A + c\delta^1(t_0) - c\delta_A(t_0) - I_A + T_A \quad (23)$$

Τα πιο κοινά προγράμματα Satellite-Based Augmentation System (SBAS) που χρησιμοποιούνται στο WADGNSS είναι: WAAS, EGNOS και MSAS (WAAS, 2002, GALILEO, 2003)

ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΥΞΗΣΗΣ ΕΥΡΕΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ (WAAS)

Το Σύστημα Αύξησης Ευρείας Περιοχής (WAAS) είναι μια νέα αύξηση του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (GPS) του Υπουργείου Άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών (DoD) που έχει σχεδιαστεί για να βελτιώνει την ακεραιότητα και την ακρίβεια της βασικής ικανότητας GPS.

Το WAAS χρησιμοποιεί γεωστατικούς δορυφόρους για τη λήψη δεδομένων που μετρώνται από πολλούς επίγειους σταθμούς και στέλνει πληροφορίες στους χρήστες GPS για διόρθωση θέσης. Δεδομένου ότι οι δορυφόροι WAAS είναι γεωστατικού τύπου, η συχνότητα Doppler που προκαλείται από την κίνησή τους είναι πολύ μικρή.

Έτσι, το σήμα που μεταδίδεται από το WAAS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βαθμονόμηση της συχνότητας δειγματοληψίας σε έναν δέκτη GPS. Η συχνότητα σήματος WAAS είναι στα 1575,42 MHz. Οι υπηρεσίες WAAS θα είναι διαθέσιμες τόσο στο L1 όσο και στο L5.

GNSS-1 : EGNOS

Η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Επικάλυψης Γεωστατικής Πλοήγησης (EGNOS) αναπτύσσεται από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA), για την ασφάλεια της αεροναυτιλίας (Eurocontrol). Το EGNOS θα συμπληρώσει τα συστήματα GNSS. Αποτελείται από τρεις εγκατεστημένους αναμεταδότες σε γεωστατικούς δορυφόρους και ένα επίγειο δίκτυο 34 σταθμών εντοπισμού θέσης και τεσσάρων κέντρων ελέγχου, όλα διασυνδεδεμένα. Το EGNOS ως WAAS μετέδωσε τις διαφορικές διορθώσεις στους χρήστες GNSS μέσω γεωστατικών δορυφόρων, στην ευρωπαϊκή περιοχή και όχι μόνο.

MSAS

Παρόμοια με το WAAS και το EGNOS, το ιαπωνικό σύστημα αύξησης με βάση το δορυφόρο MTSAT (MSAS) χρησιμοποιείται για την αποστολή της διαφορικής διόρθωσης για χρήστες GNSS (βλέπε την Εικόνα 12).



Εικόνα 12 - Αποτύπωμα των Υπηρεσιών Παγκόσμιων Διορθώσεων Διόρθωσης του GNSS: ΗΠΑ (WAAS), Η.Π.Α. (EGNOS) και Ιάπωνες (MSAS)

(Πηγή: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>).

1.14 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ GNSS

Τα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας και δικτύου προσφέρουν μια νέα σειρά εφαρμογών GNSS στέλνοντας τις διορθώσεις διαφορικής θέσης στους χρήστες GNSS. Άλλες εφαρμογές ανάγκασαν το GNSS να ενσωματωθεί με ασύρματες επικοινωνίες, όπως τα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς (3G) για δίκτυο RTK (VRS). Άλλες εφαρμογές είναι επίσης ενσωματωμένες με GIS και ασύρματες επικοινωνίες, όπως εφαρμογές LBS (έκτακτη κλήση και AVL).

Από την άλλη πλευρά, το GNSS χρησιμοποιείται σε ψηφιακά δίκτυα επικοινωνίας για να καλύψει την απαίτηση για ακριβή συγχρονισμό χρονισμού και πληροφορίες θέσης. Η αυξημένη ακρίβεια χρονισμού παρέχει γενικές βελτιώσεις στην απόδοση του συστήματος όσον αφορά την ποιότητα και την αποτελεσματικότητα. Η τηλεπικοινωνιακή υποδομή χρησιμοποιεί το σήμα GNSS ως αναπόσπαστο και βασικό μέρος του συστήματος.

Το GNSS θα μπορούσε να βελτιώσει την ικανότητα επικοινωνίας των δικτύων, ειδικά για την τρίτη γενιά UMTS χρησιμοποιώντας τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (CDMA). Ένας ακριβής χρονικός συγχρονισμός των διαφορετικών σταθμών βάσης (οι κεραιές εκπομπής UMTS) μπορεί σημαντικά αυξήσει την κυκλοφοριακή ικανότητα του συστήματος.

1.14.1 ΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ

Το χαρακτηριστικό της καλής τηλεπικοινωνιακής υπηρεσίας είναι να είναι συνεχής και η μετάδοση πληροφοριών (πακέτο μετάδοσης) να είναι χαμηλού ποσοστού σφάλματος και θορύβου. Μια τέτοια καλή απόδοση μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ακριβούς χρονισμού και αποτελεσματικών μηχανισμών συγχρονισμού. Η τεχνολογία GNSS χρησιμοποιείται συχνά για το σκοπό αυτό, επειδή το με ρυθμό GNSS (στην πραγματικότητα με ρυθμό GPS), έχει χαμηλό κόστος και οι πληροφορίες χρονισμού μπορούν να ληφθούν εύκολα από ένα δορυφόρο με υψηλά χαρακτηριστικά ευστάθειας.

Όλα τα ρολόγια που είναι εγκατεστημένα στους κόμβους των ασύρματων δικτύων θα πρέπει να ταιριάζουν ή να παρακολουθούν το Πρότυπο συγχρονισμού που καθιερώθηκε από το Αμερικανικό Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων (ANSI) για την απόδοση μιας κύριας πηγής αναφοράς ως 1×10^{-11} . Το με ρυθμό GNSS είναι σχετικά φθινό. Φυσικά παρεμβολές ή εμπλοκές του σήματος GNSS θα μπορούσαν να επηρεάσουν τον συγχρονισμό χρονισμού στο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, που κατά συνέπεια υποβαθμίζει τις τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες (Omar and Rizos, 2003).

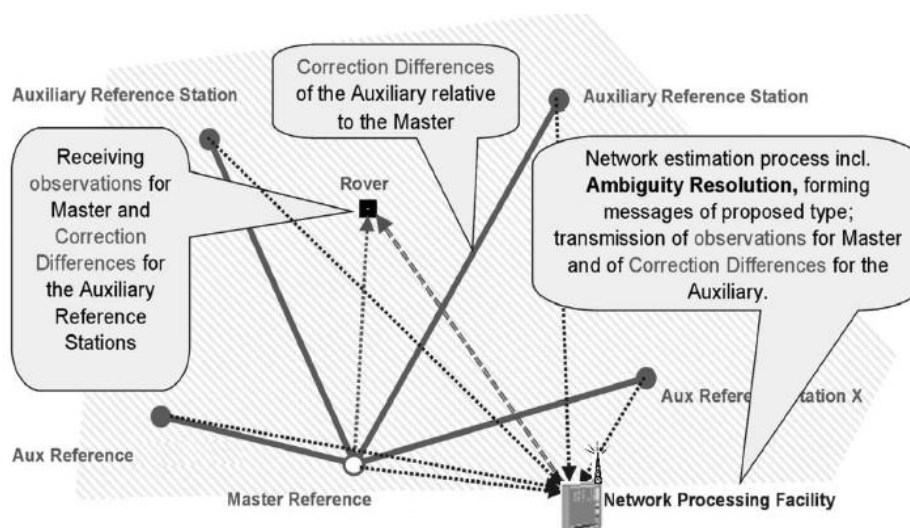
1.14.2 GNSS ΚΑΙ ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

Υπάρχουν πολλοί τύποι ασύρματων δικτύων, κυψελοειδών δικτύων, ασύρματων τοπικών δικτύων (WLAN) και ασύρματων δικτύων πολλαπλών πτήσεων για την παροχή υπηρεσιών Διαδικτύου και συστημάτων ελέγχου (Nicopolitidis et al., 2003). Η τεχνολογία GNSS δεν χρησιμοποιείται ευρέως σε ασύρματα δίκτυα για τον εντοπισμό θέσης πληροφοριών, καθώς τα περισσότερα πρωτόκολλα και αλγόριθμοι σε ασύρματα δίκτυα δεν χρησιμοποιούν πληροφορίες θέσης στη λειτουργία τους. Παρόλο που είναι πολύ συμφέρουσα για πολλούς εφαρμογές όπως η παροχή υπηρεσιών Διαδικτύου για χρήστες κινητών (αυτοκίνητα, τρένα κλπ) (Jain et al., 2001).

Ο αλγόριθμος γεωγραφικής δρομολόγησης (GRA) χρησιμοποιείται γενικά σε ασύρματα δίκτυα για προορισμό πακέτων μεταξύ κόμβων χωρίς καλή γνώση τοπολογίας δικτύου. Η χρήση GNSS για πληροφορίες τοποθεσίας και συγχρονισμό χρόνου θα βοηθήσει στη βελτιστοποίηση των διαδρομών των πακέτων προς το προορισμό μεταξύ των κόμβων στο Ad hoc ασύρματο δίκτυο και αύξηση της αποτελεσματικότητας των υπηρεσιών επιλέγοντας τους πλησιέστερους κόμβους (συντομότερη διαδρομή).

1.14.3 ΔΙΚΤΥΟ RTK

Η ιδέα του δικτύου RTK είναι παρόμοια με το WADGNSS, αλλά οι σταθμοί αναφοράς είναι γενικά καταναμημένοι σε μια περιφερειακή περιοχή και το κέντρο ελέγχου δικτύου είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση της διόρθωσης μέτρησης φάσης στον χρήστη GNSS (δέκτης rover). Τα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (GSM, GPRS, EDGE, CDMA2000 και UMTS) χρησιμοποιούνται γενικά σε αυτόν τον τύπο εφαρμογών λόγω της ανάγκης αμφίδρομης επικοινωνίας όπου ο δέκτης rover θα πρέπει να στείλει αρχικά το κατά προσέγγιση θέση στο κέντρο επεξεργασίας δικτύου. Το κέντρο επεξεργασίας δικτύου υπολογίζει τις παρατηρήσεις VRS και τις στέλνει στον χρήστη (Euler, 2005), (βλέπε Εικόνα 13). Αυτό το σχήμα χρησιμοποιείται συνήθως σε πολλά συστήματα παγκοσμίως λόγω των οικονομικών πλεονεκτημάτων και της ακρίβειας. Ο αριθμός των σταθμών αναφοράς στην ενιαία προσέγγιση RTK είναι 30 σταθμοί σε 10.000 km², ωστόσο, χρησιμοποιώντας το δίκτυο RTK, οι σταθμοί αναφοράς θα μπορούσαν να μειωθούν σε 5 σταθμούς στην έκταση των 10.000 km².



Εικόνα 13 - Δίκτυο RTK (Euler, 2005)

(Πηγή: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>).

1.14.4 ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΑΣΕΙ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ (LBS)

Οι Υπηρεσίες βάσει τοποθεσίας (LBS) παρέχουν εξατομικευμένες υπηρεσίες στον συνδρομητή με βάση την τρέχουσα θέση του. Τα LBS χρησιμοποιούν ακριβή εντοπισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο για τη σύνδεση των χρηστών σε κοντινά σημεία ενδιαφέροντος. Η LBS τους συμβουλεύει για τις τρέχουσες συνθήκες, όπως η κίνηση και ο καιρός, ή παρέχει πληροφορίες δρομολόγησης και παρακολούθησης-όλα μέσω ασύρματων συσκευών.

Η θέση του καλούντος καθορίζεται γενικά από διάφορες τεχνικές προσδιορισμού θέσης. Αυτές περιλαμβάνουν Cell-ID, Enhanced Observed Time Difference (E-OTD), Observed Time Difference of Arrival (OTDOA), Wireless Assisted GNSS (A-GNSS) και υβριδικές τεχνολογίες (που συνδυάζουν το A-GNSS με άλλες τυπικές τεχνολογίες).

Οι τεχνικές εντοπισμού θέσης που βασίζονται στη χρήση ενός GNSS ή μιας ίδιας της υποδομής δικτύου κινητής τηλεφωνίας αναπτύσσονται ραγδαία στην κοινότητα κινητής τηλεφωνίας. Υπάρχουν πολλά έργα LBS που βασίζονται ήδη στον συνδυασμό ασύρματων επικοινωνιών (π.χ. GPRS), δορυφορικής πλοήγησης (GNSS) και συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών (GIS). Μερικά από αυτά τα έργα βασίζονται στην αρχιτεκτονική Mobile Client / Server (Lohnert et al., 2001).

Οι εφαρμογές και οι ανάγκες του LBS θα μπορούσαν να χωριστούν σε τέσσερις κύριους τομείς:

1. Υπηρεσίες πληροφοριών και πλοήγησης: Αυτές οι υπηρεσίες παρέχουν δεδομένα απευθείας στους τελικούς χρήστες, ιδίως την τοποθεσία προορισμού και κριτήρια για τη βελτιστοποίηση του ταξιδιού.

2. Βοήθεια έκτακτης ανάγκης: Αυτός ο τύπος υπηρεσίας παρέχει την τοποθεσία των χρηστών κινητής τηλεφωνίας σε περίπτωση δυσφορίας και ανάγκης για βοήθεια όπως: E-911 στις ΗΠΑ και E-112 στην Ευρώπη. Οι δυνατότητες GIS είναι απαραίτητες σε τέτοιες υπηρεσίες.

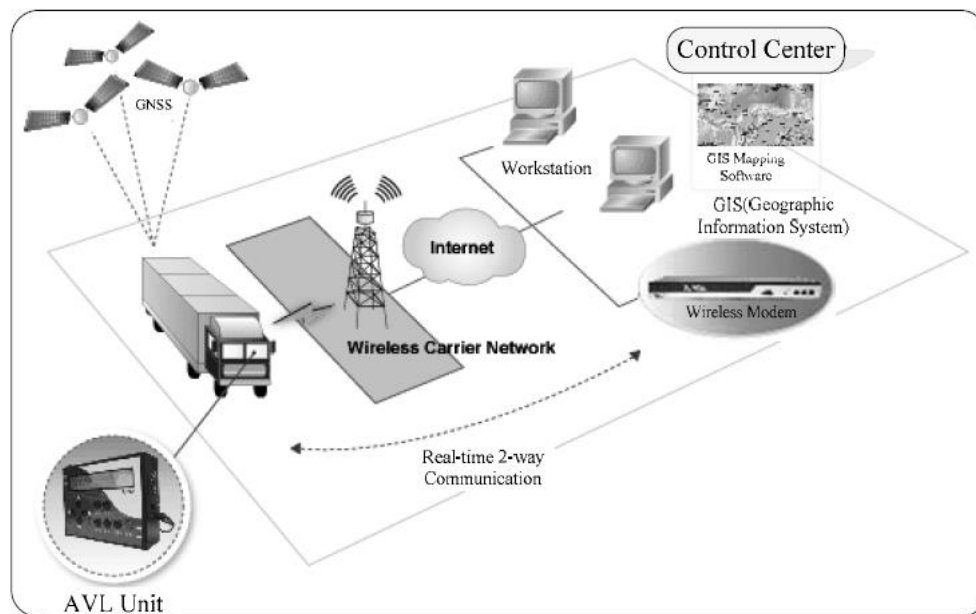
3. Υπηρεσίες παρακολούθησης: Γενικά, ένα σύστημα AVL αποτελείται από δέκτη GNSS ενσωματωμένο με μονάδα GSM/GPRS τοποθετημένη στο όχημα, σύνδεση επικοινωνίας μεταξύ του οχήματος και αποστολέα και λογισμικό παρακολούθησης που βασίζεται σε υπολογιστή για αποστολή (Εικόνα 14) (Al-Bayari και Sadoun, 2005).

4. Υπηρεσίες που σχετίζονται με το δίκτυο: Εδώ η γνώση της θέσης του χρήστη βελτιώνει τις υπηρεσίες επικοινωνίας. Η τοποθεσία μπορεί να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση ενός δέκτη GNSS στο κινητό τηλέφωνο (λύση χειρός) ή με τη χρήση του ίδιου του δικτύου επικοινωνίας.

Οι τεχνικές LBS που βασίζονται σε δίκτυα GSM, GPRS και WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) από μόνες τους δεν προσφέρουν υψηλή ακρίβεια. Επιπλέον, το GNSS από μόνο του είναι ανεπαρκές για τη διατήρηση της συνεχούς τοποθέτησης λόγω των αναπόφευκτων δυσκολιών που προκαλούνται από τα εμπόδια. Όταν τα σήματα GNSS μπλοκάρονται ή χάνονται, η ακρίβεια της τοποθέτησης θα

ελαχιστοποιείται σε απαράδεκτο επίπεδο. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να βελτιωθεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία της θέσης GNSS.

Η ακρίβεια του προσδιορισμού θέσης θα μπορούσε να βελτιωθεί με το Διαφορικό GNSS (DGNSS), το Dead Reckoning (DR), το GNSS εσωτερικού χώρου ή την ενσωμάτωση του GNSS με τα προαναφερθέντα σχήματα όπως το Cell-ID (Τεχνολογία υβριδικής τοποθεσίας).



Εικόνα 14 - Στοιχεία συστήματος AVL

(Πηγή: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΧΡΗΣΗ GNSS ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΜΕΤΑ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την χρήση του GNSS για τον υπολογισμό των μετακινήσεων μετά το σεισμό, μέσα από την έρευνα που πραγματοποίησαν τέσσερις ερευνητικές ομάδες.

Η πρώτη ομάδα ασχολείται με την δυναμική μετακίνηση της στάθμης της θάλασσας που προκλήθηκε λόγω του τσουνάμι στους νήσους Shumagin (Αλάσκα, ΗΠΑ) το 2020 αλλά και λόγω του τυφώνα Laura, και γίνεται χρήση του GNSS ώστε να παρέχει πληροφορίες για τη δυναμική μετακίνηση της στάθμης της θάλασσας, για να βοηθήσει στην έγκαιρη λήψη μέτρων.

Έπειτα, η δεύτερη ομάδα μελέτησε τον σεισμό των 6.7 βαθμών της κλίμακας ρίχτερ στο Ιόνιο Πέλαγος και συγκεκριμένα στη Ζάκυνθο που πραγματοποιήθηκε στις 25 Οκτωβρίου του 2018. Χρησιμοποιώντας το GNSS κατέγραψε μια σειρά από σεισμικές ακολουθίες.

Στην τρίτη ομάδα μελετήθηκε η καταγραφή των σεισμικών κυμάτων σε πραγματικό χρόνο που προκλήθηκαν από το σεισμό των 7.8 βαθμών της κλίμακας ρίχτερ στο Νεπάλ το 2015 με την χρήση GNSS και με τη συμβολή των δεδομένων BDS (Beidou Navigation Satellite System).

Τέλος, στην τέταρτη ομάδα μελετήθηκε μια πιθανή αντιμετώπιση σεισμού στα νησιά Sumatra – Andaman (Ινδικό Ωκεανό) στις 26 Δεκεμβρίου το 2004, με την χρήση δεδομένων GNSS και την συμμετοχή των σταθμών IGS και την συμβολή της μεθόδου PPP (Precise Point Positioning).

2.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΣΤΟΥΣ ΝΗΣΟΥΣ SHUMAGIN, ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ GNSS

Πιο αναλυτικά, στην πρώτη ομάδα που αποτελείται από τους: Kristine M. Larson, Thorne Lay, Yoshiki Yamazaki, Kwok Fai Cheung, Lingling Ye, Simon D.P. Williams, και James L. Davis, μελετήθηκε η δυναμική μετακίνηση της στάθμης της θάλασσας που εκδηλώθηκε λόγω του τσουνάμι στους νήσους Shumagin αλλά και λόγω του τυφώνα Laura, και γίνεται χρήση του GNSS.

Εξ αιτίας των δυναμικών μετακινήσεων που συμβαίνουν στην στάθμη της θάλασσας, που προκαλούνται είτε από τσουνάμι είτε από ισχυρές καταιγίδες, πρέπει να λαμβάνονται μέτρα ώστε να προστατευθούν οι ακτές, οι περιουσίες και κυρίως οι ανθρώπινες ζωές.

Σε αυτό το άρθρο, αναφέρονται παραδείγματα, όπως το τσουνάμι στους νήσους Shumagin αλλά και τον τυφώνα Laura που προκλήθηκε λόγω της καταιγίδας. Τα οποία καταγράφονται από τα όργανα του παγκόσμιου δορυφορικού συστήματος πλοήγησης (GNSS) που έχουν εγκατασταθεί κατά μήκος των παράκτιων περιοχών για τη παρακολούθηση των τεκτονικών κινήσεων των πλακών, όπου είναι ικανά να παρέχουν πληροφορίες για τη στάθμη της θάλασσας σε σχεδόν πραγματικό χρόνο.

Η ομάδα καταλήγει στο συμπέρασμα, ότι με την τοποθέτηση ενός αισθητήρα GNSS στους νήσους Shumagin, θα καταγράψει την αλλαγή της στάθμης της θάλασσας σε περιοχές που ενδέχεται να εκτεθούν σε κινδύνους για μεγάλα τσουνάμι, θα βοηθήσει στην ταχεία προειδοποίηση και στη λήψη αποφάσεων για εκκένωση της πληγείσας περιοχής. Το GNSS μπορεί επίσης να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις εξελίξεις καταιγίδων σε παράκτιες περιοχές.

Η έρευνα της ομάδας συμβάλει σημαντικά, στην κατανόηση και στην αντιμετώπιση της δυναμικής μετακίνησης της στάθμης της θάλασσας, όπου με την τοποθέτηση ενός αισθητήρα στους νήσους Shumagin, καταγράφονται οι μετακινήσεις της στάθμης της θάλασσας με τη χρήση του GNSS (βλέπε εικόνα 1). Αυτό θα βοηθήσει στην έγκαιρη προειδοποίηση και στη λήψη άμεσων μέτρων για την προστασία των ακτών.



Εικόνα 15 - (α) Αναπαράσταση της λήψης του σήματος GNSS. Η είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του κέντρου της κεραίας GNSS και της ανακλούμενης επιφάνειας και e είναι η γωνία μεταξύ του δορυφόρου και του οριζοντα. Τα απευθείας σήματα GNSS εμφανίζονται με μπλε χρώμα και η πρόσθετη διαδρομή που διανύει το ανακλώμενο σήμα εμφανίζεται με κόκκινο. (β) Δέκτης GNSS AC12 στο νησί Chernabura, Αλάσκα (Φωτογραφία: UNAVCO). (γ) Οι ζώνες ανάκλασης που εμφανίζονται με χρώμα χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις της στάθμης του νερού AC12 (Roesler & Larson, 2018). Ο χάρτης είναι ευγενική προσφορά του Google Earth (Πηγή: Larson, K. M., et al. 2021).

2.3 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΣΤΗΝ ΖΑΚΥΝΘΟ ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ GNSS

Έπειτα, στην δεύτερη ομάδα που αποτελείται από τους: Athanassios Ganas, Pierre Briole, George Bozionelos, Aggeliki Barberopoulou, Panagiotis Elias, Varvara Tsironi, Sotiris Valkaniotis, Alexandra Moshou, Ioannis Mintourakis, μελετήθηκε ο σεισμός των 6.7 βαθμών της κλίμακας ρίχτερ στη Ζάκυνθο, όπου χρησιμοποιώντας το GNSS καταγράφονται μια σειρά από σεισμικές ακολουθίες.

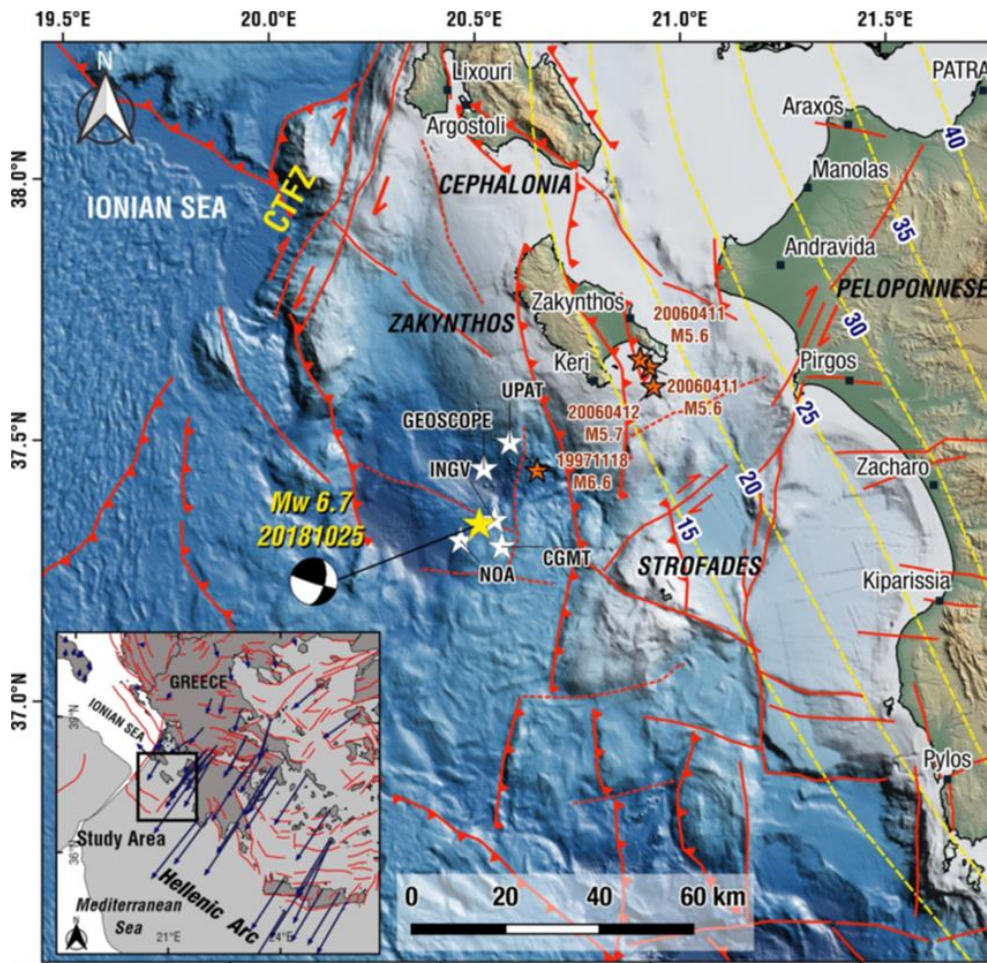
Η ερευνητική ομάδα παρουσιάζει τη σεισμική ακολουθία που ξεκίνησε στις 25 Οκτωβρίου το 2018 με έναν ρηχό σεισμό των 6.7 βαθμών της κλίμακας ρίχτερ στη θάλασσα της Ζακύνθου (Ιόνιο Πέλαγος, Ελλάδα), μέσω της χρήσης των δεδομένων του δορυφορικού συστήματος (GNSS).

Τα δεδομένα του δορυφορικού συστήματος (GNSS) δείχνουν την ενεργοποίηση ενός εντυπωσιακού ρήγματος στη σύνδεση μεταξύ της πλάκας Αφρικής – Αιγαίου σε μήκος ~ 26 km, και βάθος μικρότερο από 15 km.

Η ανάλυση των σεισμικών δεδομένων που πραγματοποιεί η δεύτερη ομάδα αναδεικνύει τον υψηλό βαθμό σεισμικού κινδύνου στην δυτική περιοχή του ελληνικού τόξου. Αυτό διαπιστώνεται και μέσα από την σεισμική ακολουθία που συνέβη το 1976 και το 2018 στη Ζάκυνθο, ενώ το 1997 στις Στροφάδες.

Η ομάδα καταλήγει στο συμπέρασμα, ότι μέσα από την μελέτη που πραγματοποίησε για τον σεισμό των 6.7 βαθμών της κλίμακας ρίχτερ της Ζακύνθου, αναδεικνύεται ο υψηλός βαθμός της σεισμικής ακολουθίας στην δυτική περιοχή του ελληνικού τόξου, που μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή δεν ήταν τόσο γνωστό. Ακόμη, το παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα δείχνει την ενεργοποίηση ενός ρήγματος (μεταξύ της πλάκας Αφρικής – Αιγαίου) σε μήκος 26 km και βάθος μικρότερο από 15 km (βλέπε εικόνα 16).

Η έρευνα της ομάδας συμβάλει σημαντικά, αφού μέσα από την μελέτη που πραγματοποιεί κάνει γνωστό τον υψηλό βαθμό σεισμικών κινδύνων που πραγματοποιούνται στον ελλαδικό χώρο και συγκεκριμένα στη Ζάκυνθο. Ακόμη, το GNSS δείχνει την ενεργοποίηση ενός ρήγματος μεταξύ της πλάκας Αφρικής – Αιγαίου, όπου συμβάλλει (GNSS) στην έγκαιρη προειδοποίηση και στη λήψη μέτρων για την προστασία της πληγείσας περιοχής.



Εικόνα 16 - Χάρτης του νότιου Ιονίου. Το κίτρινο αστέρι σηματοδοτεί τη θέση του σεισμού 25 Οκτωβρίου 2018 M_w (NOA) = 6,7 (το επίκεντρο αυτής της μελέτης). Τα χερσαία και υπεράκτια ρήγματα (κόκκινο) είναι από τους Ganas et al. (2013), Παπούλια κ.ά. (2014), Wardell et al. (2014). Οι διακεκομμένες κίτρινες γραμμές δείχνουν τα βάθη της αφρικανικής πλάκας που υποχωρεί από τους Halraar et al. (2018). Ο ένθετος χάρτης δείχνει τη θέση της περιοχής μελέτης στο δυτικό τμήμα του Ελληνικού Τόξου. Τα μπλε διανύσματα δείχνουν ταχύτητες GPS κατά την Ευρασία από τους Devoti et al. (2017). (Για την ερμηνεία των αναφορών στο χρώμα σε αυτό το υπόμνημα σχήματος, ο αναγνώστης παραπέμπεται στην έκδοση web αυτού του άρθρου) (Πηγή: Ganas A., et al., 2020).

2.4 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΝΕΠΑΛ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ GNSS

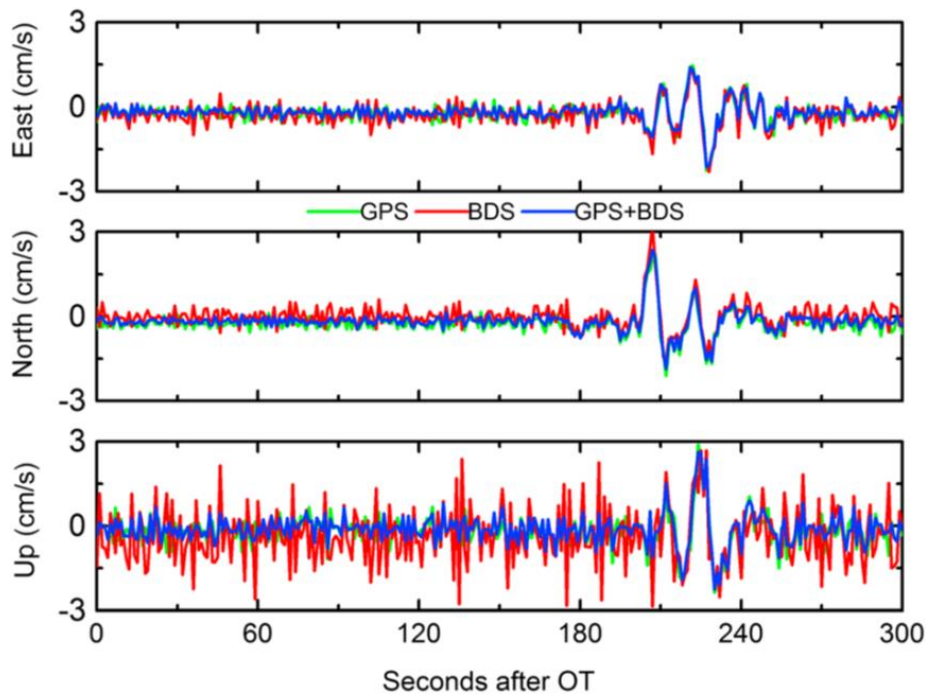
Συνάμα, στην τρίτη ομάδα που αποτελείται από τους: Tao Geng, Xin Xie, Rongxin Fang, Xing Su, Qile Zhao, Gang Liu, Heng Li, Chuang Shi, και Jingnan Liu, μελετήθηκε η καταγραφή σεισμικών κυμάτων σε πραγματικό χρόνο στο Νεπάλ με την χρήση GNSS και με τη συμβολή των δεδομένων BDS.

Η ερευνητική ομάδα παρουσιάζει το σεισμό των 7.8 βαθμών της κλίμακας ρίχτερ που συνέβη στο Νεπάλ το 2015 με την χρήση των δεδομένων GNSS και με την συμβολή δεδομένων BDS. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το BDS μπορεί να επιτύχει ακρίβεια 2 - 3 mm / s στον οριζόντιο άξονα και 8 - 9 mm / s στον κατακόρυφο άξονα για τη λήψη σεισμικών κυμάτων, όπου η ταχύτητα θα είναι σε πραγματικό χρόνο.

Μετά τον συνδυασμό των δεδομένων GPS και BDS, η εκτίμηση της ταχύτητας έχει μια επιπλέον βελτίωση περίπου 20 % , όσον αφορά τα δεδομένα μόνο για GPS. Επίσης, ανακατασκεύασαν τις μετατοπίσεις (των σταθμών GPS) ενσωματώνοντας τις ταχύτητες που προέρχονται από το GNSS με την συμβολή της μεθόδου IGV (βλέπε εικόνα 17).

Η ομάδα καταλήγει στο συμπέρασμα ότι είναι εφικτό να καταγραφούν τα σεισμικά κύματα σε πραγματικό χρόνο με δεδομένα GNSS χρησιμοποιώντας την μέθοδο IGV, όπου η IGV θα συμβάλλει στην έγκαιρη προειδοποίηση του σεισμού, στην πρόβλεψη για τσουνάμι και στην ταχεία εκτίμηση του κινδύνου.

Η έρευνα της ομάδας συμβάλει σημαντικά, διότι καταδεικνύει τη σκοπιμότητα της λήψης σεισμικών κυμάτων σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση δεδομένων GNSS και με την συμβολή της μεθόδου IGV, η οποία θα βοηθήσει σημαντικά στην ταχεία προειδοποίηση του σεισμού και λήψη μέτρων για εκκένωση της πληγείσας περιοχής.



Εικόνα 17 - Σύγκριση των κυματομορφών ταχύτητας που προέρχονται από μετρήσεις GPS, BDS και GPS + BDS στο σταθμό LASA χρησιμοποιώντας τη μεταβλητή προσέγγιση. Η ώρα εκκίνησης (OT) του σεισμού του Νεπάλ είναι 06:11:26 (UTC) στις 25 Απριλίου 2015 (Πηγή: Geng T., et al. 2016).

2.5 ΠΙΘΑΝΗ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΣΕΙΣΜΟΥ ΣΤΑ ΝΗΣΙΑ SUMATRA – ANDAMAN, ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ GNSS

Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο αυτό, με την τέταρτη εργασία, με συγγραφέα τον J. Kouba, όπου μελέτησε μια πιθανή αντιμετώπιση σεισμού στα νησιά Sumatra – Andaman, με την χρήση δεδομένων GNSS, την συμμετοχή των σταθμών IGS και την βοήθεια της μεθόδου PPP.

Η ερευνητική ομάδα παρουσιάζει τον έλεγχο που πραγματοποίησε σε σταθμούς IGS με την χρήση της μεθόδου PPP, προκειμένου να αναδειχθεί η δυνατότητα τους ώστε να συμβάλουν στις μελέτες μεγάλων σεισμών, όπως αυτός που προκάλεσε τεράστιες καταστροφές στη Νοτιοανατολική Ασία στις 26 Δεκεμβρίου το 2004.

Λόγω πιθανής ανίχνευσης των 9.0 βαθμών της κλίμακας ρίχτερ στα Νησιά Sumatra – Andaman, εξετάστηκαν λύσεις για τη θέση των σταθμών, που κυμαίνονται από διαστήματα ετών έως και ένα δευτερόλεπτο.

Ως σημείο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ο σταθμός IGS (IGS04P51), που αποτελείται από δεδομένα της ταχύτητας του σταθμού και βασίζεται σε δεδομένα αρκετών ετών πριν από τον σεισμό. Τα εβδομαδιαία δεδομένα στο σταθμό IGS (igs04P1301- 4), που δόθηκαν δυο εβδομάδες πριν και μετά τον σεισμό, χρησιμοποιήθηκαν για την εβδομαδιαία ανάλυση των λύσεων.

Η ομάδα καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο συνδυασμός των σταθμών IGS και της μεθόδου PPP, μπορεί να διευκολύνει τις μετρήσεις μετασεισμικών παραμορφώσεων για ένα ευρύ φάσμα χωρικής και χρονικής ανάλυσης, που μπορεί να γίνει από χρόνια έως ένα δευτερόλεπτο.

Η έρευνα της ομάδας συμβάλει πολύ, διότι μου αναφέρει έναν ακόμη σημαντικό συνδυασμό των σταθμών IGS και της μεθόδου PPP, που δεν είχαμε δει στα προηγούμενα άρθρα, που μπορεί να διευκολύνει τις μετρήσεις των παραμορφώσεων μετά το πέρας του σεισμού, για ένα ευρύ φάσμα χωρικής και χρονικής ανάλυσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΧΡΗΣΗ GNSS ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την χρήση του GNSS κατά την διάρκεια του σεισμού, μέσα από το άρθρο ανασκόπησης που έγραψαν οι: Ting-Hua Yi, Hong-Nan Li and Ming Gu.

Η παρακολούθηση της απόκρισης των κατασκευών, ιδιαίτερα των ψηλών κτιρίων, υπό σοβαρές συνθήκες φόρτισης είναι μια σημαντική προϋπόθεση για την επικύρωση του σχεδιασμού και της κατασκευής τους, καθώς και της συντήρησής τους. Αυτή η εργασία παρουσιάζει μια ανασκόπηση των τρεχουσών δραστηριοτήτων έρευνας και ανάπτυξης (από το 1995) στον τομέα της παρακολούθησης των πολυώροφων κατασκευών χρησιμοποιώντας το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GNSS). Αρχικά περιγράφεται εν συντομία η τεχνολογία παρακολούθησης GNSS και η ακριβής μέθοδος αξιολόγησής της.

Στη συνέχεια, συζητούνται λεπτομερώς η πρόοδος στην παρακολούθηση της μετατόπισης της πολυκατοικίας που προκαλείται από τις περιβαλλοντικές επιδράσεις, συμπεριλαμβανομένου του ανέμου, της θερμικής διακύμανσης και των αποκρίσεων που προκαλούνται από σεισμό. Κατόπιν αυτού, επανεξετάζονται οι τελευταίες εξελίξεις της τεχνολογίας παρακολούθησης GNSS. Τέλος, δίνονται τα υπάρχοντα προβλήματα και οι ελπιδοφόρες ερευνητικές προσπάθειες για την παρακολούθηση των κτιρίων με βάση το GNSS.

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σήμερα υπάρχουν πολύ περισσότερες μεγάλες και/ή ψηλές κατασκευές μηχανικής από ό,τι στο παρελθόν. Αυτές οι κατασκευές σχεδιάζονται για να είναι πιο ευέλικτες και να αντιστέκονται σε εκτεταμένες ζημιές από αλλαγές στη θερμοκρασία, έντονες ριπές ανέμου και σεισμούς. Η ανάλυση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (FEM), οι δοκιμές του τραπεζιού ανακίνησης και της αεροσήραγγας των κλιμακωτών μοντέλων πραγματοποιούνται συχνά για να βοηθήσουν τον δομικό σχεδιασμό (π.χ., Li και Huo).

Ωστόσο, οι συνθήκες στο πραγματικό περιβάλλον είναι πάντα πολύ πιο περίπλοκες από ό,τι θεωρούν οι μηχανικοί. Από την άλλη πλευρά, κατά τη διάρκεια του χρόνου, είναι αναπόφευκτο ότι αυτές οι λεπτές κατασκευές υποφέρουν από περιβαλλοντική διάβρωση, γήρανση του υλικού, κόπωση, με μακροχρόνιο φορτίο και ακραίο φορτίο. Η προκαλούμενη συσσώρευση ζημιών και της απόδοσης λόγω των προαναφερθέντων παραγόντων θα μείωνε την ικανότητα αντίστασης των κατασκευών σε καταστροφές, ακόμη και με αποτέλεσμα την κατάρρευση λόγω δομικής αστοχίας υπό ακραία φορτία.

Επομένως, υπάρχει σημαντικό ενδιαφέρον για την εξασφάλιση της επένδυσης με δύο μέτωπα: πρώτον, την ασφαλή λειτουργία και συντήρηση του έργου για τη διασφάλιση μεγάλης διάρκειας ζωής και, δεύτερον, τη διασφάλιση της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας της σύγχρονης σχεδιαστικής πρακτικής. Και οι δύο αυτές προθέσεις μπορεί να ωφεληθούν από την οργάνωση και την παρακολούθηση των δομών. Η δομική παρακολούθηση εξυπηρετεί πολλούς σκοπούς. Για παράδειγμα, μπορεί να παρέχει τα δεδομένα δομικής απόκρισης επέτρεψαν τον έλεγχο της κατασκευαστικής απόδοσης με βάση τα κριτήρια σχεδιασμού, κάτι που θα είναι μια ολοένα και πιο χρήσιμη άσκηση για την κίνηση προς «σχεδιασμό με βάση την απόδοση» των κατασκευών. Για μεγάλο χρονικό διάστημα, η παρακολούθηση μπορεί επίσης να παρέχει τον εντοπισμό «ανωμαλιών» που μπορεί να σηματοδοτούν ασυνήθιστες συνθήκες φόρτωσης ή τροποποιημένη δομική συμπεριφορά, οι οποίες μπορούν, σε ακραία περίπτωση, να περιλαμβάνουν ζημιά.

Γενικά, η δυνατότητα συντήρησης των πολυώροφων κτιρίων έναντι εξωτερικών φορτίων, όπως τα φορτία ανέμου, αξιολογείται με βάση δύο τύπους δομικών αποκρίσεων: πλευρική μετατόπιση και επίπεδο οριζόντιας επιτάχυνσης.

Η υπερβολική πλευρική μετατόπιση μπορεί να προκαλέσει δομικά προβλήματα καθώς και άλλα ποικίλα προβλήματα σε μη δομικά στοιχεία, όπως ζημιά στα υλικά φινιρίσματος, ενώ το υπερβολικό επίπεδο οριζόντιας επιτάχυνσης μπορεί να προκαλέσει αισθήματα δυσάρεστης κατάστασης στους ενοίκους του κτιρίου. Για τους λόγους αυτούς, έχουν διεξαχθεί διάφορες μελέτες σχετικά με τις μεθόδους μέτρησης και ελέγχου των σχετικών πλευρικών μετατοπίσεων και της οριζόντιας επιτάχυνσης των πολυώροφων κτιρίων. Για πολλά χρόνια, η παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των πολυώροφων κατασκευών βασίζεται σε μετρήσεις που πραγματοποιούνται από επιταχυνσιόμετρα που είναι εγκατεστημένα στη δομή ενδιαφέροντος. Σε κάποιο βαθμό, οι καταγραφές της απόκρισης επιτάχυνσης των κατασκευών έχουν εξυπηρετήσει καλά την επιστημονική και τεχνική κοινότητα και ήταν χρήσιμες στην αξιολόγηση των διαδικασιών σχεδιασμού/ανάλυσης, στη βελτίωση των διατάξεων του κώδικα και στο συσχετισμό της απόκρισης του συστήματος με τη ζημιά.

Ωστόσο, η παρακολούθηση της συνολικής απόκρισης μέσω επιταχυνσιόμετρων μπορεί να παρέχει μόνο μια ένδειξη συντονιστικής απόκρισης και αποτυγχάνει να καταγράψει στατικές και οιονεί στατικές συμπεριφορές. Αν και η μετατόπιση μπορεί να ληφθεί με μια διαδικασία διπλής ολοκλήρωσης της απόκρισης επιτάχυνσης, η διαδικασία δεν αυτοματοποιείται εύκολα λόγω της φύσης της επεξεργασίας σήματος, η οποία απαιτεί την επιλογή των φίλτρων και τη διόρθωση της γραμμής βάσης (οι σταθερές ολοκλήρωσης). Κατά συνέπεια, αυτή η διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα στον υπολογισμό των ταχυτήτων και των μετατοπίσεων. Αυτό το πρόβλημα είναι πιο έντονο για μόνιμες μετατοπίσεις. Είναι αμφίβολο ότι οι μετρήσεις του επιταχυνσιόμετρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάκτηση των μόνιμων

μετατοπίσεων σε επίπεδο εκατοστών, και ακόμη κι αν μπορούσαν, είναι αμφίβολο αν μπορούν να πραγματοποιηθούν σε πραγματικό χρόνο. Άλλες μέθοδοι ανίχνευσης μετατόπισης αναπτύχθηκαν επίσης για αυτές τις ανάγκες. Τεχνικές που περιλαμβάνουν τεχνικές γεωγραφικής έρευνας (θεοδόλιθος, επίπεδο, ολικός σταθμός, κ.λπ.), ρομπότ μέτρησης, αισθητήρες μετατόπισης λέιζερ και τεχνικές απεικόνισης φωτογραφίας/βίντεο έχουν λάβει όλες πρόσφατη προσοχή, αλλά έχουν περιορισμένη χρησιμότητα υπό δυσμενείς ατμοσφαιρικές συνθήκες και συχνά δεν είναι εφικτές για συνεχή, χωρίς επίβλεψη και μακροπρόθεσμη παρακολούθηση, επειδή βασίζονται στην παρουσία επιθεωρητών για τη συλλογή δεδομένων και έτσι απαιτούν ανθρώπινο δυναμικό, το οποίο είναι συχνά ανέφικτο.

Αντίθετα, η τεχνολογία Global Positioning System (GNSS) μπορεί να μετρήσει άμεσα τόσο τις στατικές όσο και τις δυναμικές αποκρίσεις και στις μέρες μας, οι σχετικές μετατοπίσεις μπορούν να μετρηθούν σε ρυθμούς 20 Hz και ακόμη υψηλότερα έως 100 Hz. Η ακρίβεια της μέτρησης δυναμικής μετατόπισης με χρήση του GNSS είναι σε επίπεδο κάτω από εκατοστό σε χιλιοστό και σε μέγιστη απόσταση από τους δέκτες αναφοράς GNSS έως τους δέκτες κτιρίου έως 30 km. Αυτά παρέχουν μια εξαιρετική ευκαιρία παρακολούθησης, σε πραγματικό χρόνο, της συμπεριφοράς μετατόπισης ή εκτροπής των κατασκευών υψηλής ανύψωσης υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, μέσω αυτοματοποιημένων διαδικασιών ανίχνευσης αλλαγών και ειδοποίησης συναγερμού.

Τα τελευταία 20 χρόνια έχουν γίνει μάρτυρες έντονης έρευνας και εφαρμογών στον τομέα του GNSS. Στις επόμενες ενότητες, η εργασία θα περιγράψει αυτήν την τεχνολογία ενεργοποίησης και θα εξετάσει τις εφαρμογές της στην παρακολούθηση της των ψηλών κτιρίων.

3.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΟ GNSS

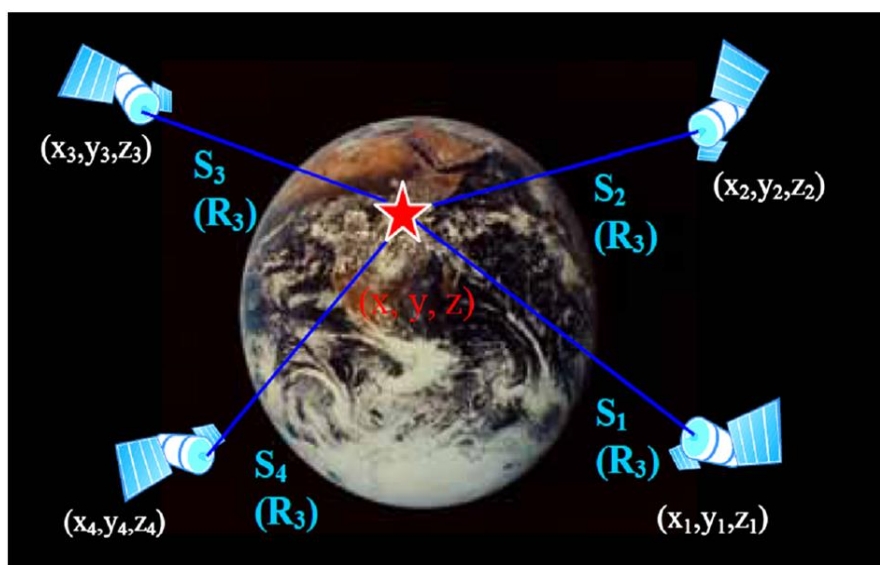
3.2.1 ΑΡΧΕΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ GNSS

Το GNSS αποτελείται από τρία μέρη: δορυφόρους σε τροχιά γύρω από τη Γη, σταθμούς ελέγχου και παρακολούθησης στη Γη και δέκτες GNSS που ανήκουν σε χρήστες.

Οι θέσεις GNSS υπολογίζονται με την έννοια του τριγωνισμού, χρησιμοποιώντας τη γνωστή θέση των δορυφόρων από πάνω για να προσδιοριστεί η θέση ενός ζεύγους δέκτη GNSS στη Γη (Εικόνα 18). Κάθε δορυφόρος μεταδίδει συνεχώς την τρέχουσα ώρα, καθώς και πληροφορίες για την τρέχουσα θέση του (x_i, y_i, z_i) στην τροχιακή του διαδρομή. Η απόσταση ή το εύρος κλίσης (S_i), του i δορυφόρου στην άγνωστη θέση στη Γη (x_i, y_i, z_i) καθορίζεται από τον χρόνο ταξιδιού των εκπεμπόμενων σημάτων GNSS. Αυτή η θέση (x_i, y_i, z_i) ορίζεται με βάση το σύστημα συντεταγμένων του World Geodetic System 1984 (WGS-84), το οποίο παρέχει, σε καρτεσιανές συντεταγμένες, τη θέση στην επιφάνεια ενός ελλειψοειδούς αντιπροσωπευτικού της γης. Αυτό μπορεί στη

συνέχεια να προβληθεί σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων προκαθορισμένο για κάθε περιοχή από το κλασικό μοντέλο μετασχηματισμού συντεταγμένων επτά παραμέτρων. Για έναν αστερισμό δορυφόρων N_{sat} , μια σειρά κεκλιμένων περιοχών μπορεί να οριστεί ως

$$S_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad \text{όπου } i = 1, 2, \dots, N_{sat} \quad (24)$$



Εικόνα 18 - Στρατηγική GNSS για τον προσδιορισμό της θέσης (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).

Για να ληφθούν υπόψη οι ανακρίβειες του ρολογιού μεταξύ δορυφόρων και μη στρατιωτικών δεκτών GNSS, μια χρονική μεροληψία b εισάγεται στη συνέχεια στην εξίσωση (24), όπου το εύρος κλίσης αντικαθίσταται καταλληλότερα από ψευδοαπόσταση, R_i , με αποτέλεσμα

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - b \quad \text{όπου } i = 1, 2, \dots, N_{sat} \quad (25)$$

Είναι απαραίτητο να επεκταθεί ο αριθμός των απαιτούμενων δορυφόρων σε τουλάχιστον τέσσερις για επίλυση όλων των αγνώστων του συστήματος.

Συνήθως, καθώς είναι διαθέσιμοι περισσότεροι από τέσσερις δορυφόροι, μπορεί να δημιουργηθεί ένα υπερκαθορισμένο σύνολο εξισώσεων χρησιμοποιώντας την εξίσωση (25) για να ληφθεί μια ακόμη πιο ακριβής θέση για τον δέκτη.

Τα δορυφορικά σήματα GNSS είναι ελεύθερα διαθέσιμα σε όλους τους πολίτες. Για οποιονδήποτε διαθέτει δέκτη GNSS, το σύστημα θα παρέχει πληροφορίες τοποθεσίας και ώρας σε όλες τις καιρικές συνθήκες, οποιαδήποτε στιγμή, οπουδήποτε στον κόσμο.

3.2.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΕΤΑΙ ΣΕ GNSS ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΠΟΛΥΩΡΟΦΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ

Οι τεχνικές τοπογραφίας GNSS αποτελούνται από στατική, γρήγορη στατική και κινηματική σε πραγματικό χρόνο (RTK). Ο Πίνακας II παραθέτει τις δυνατότητες ακρίβειας των διαφορετικών λειτουργιών εντοπισμού θέσης GNSS.

Η πρώτη εργασία στην παρακολούθηση των κατασκευών πολιτικού μηχανικού με GNSS μπορεί να ανιχνευθεί στη στατική παρακολούθηση των οικισμών, στη θερμική επέκταση και σε άλλες τάσεις μετατόπισης μακράς περιόδου στο ψηλό σημείο και στα φράγματα. Από την επίλυση του GNSS Ambiguity Resolution on the Fly, η τεχνολογία RTK αναπτύσσεται γρήγορα στην παρακολούθηση της δομικής υγείας (SHM). Υπό τη λειτουργία του RTK, ο σταθμός αναφοράς χρησιμεύει ως σταθερό σημείο ελέγχου του οποίου οι τρισδιάστατες συντεταγμένες έχουν προηγουμένως προσδιοριστεί με τη συμβατική μέθοδο στατικού GNSS και καταγράφει συνεχώς τη διαφορά μεταξύ της γνωστής του θέσης και της θέσης που υπολογίζεται από τα δορυφορικά δεδομένα.

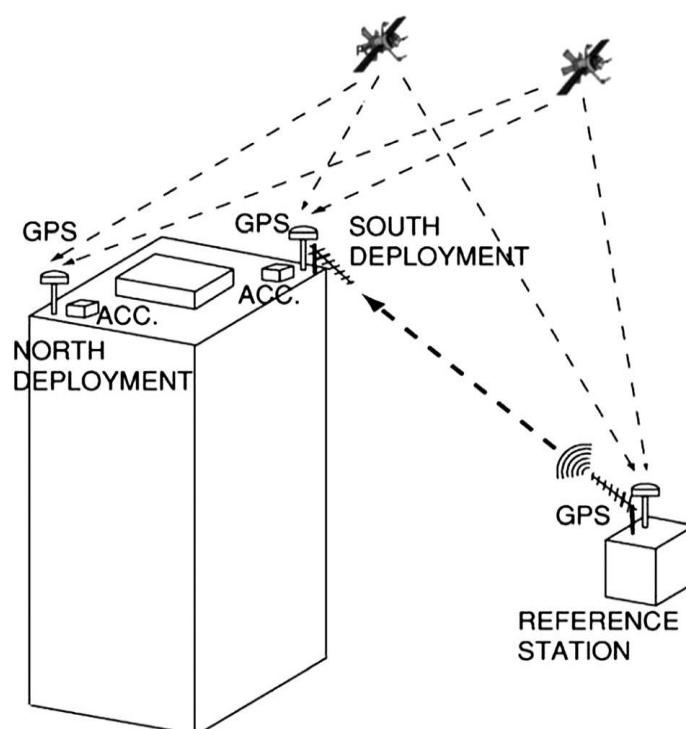
Οι διαφορές που ανιχνεύθηκαν είναι ενδεικτικές των σφαλμάτων από το δορυφορικό υλικό και το πιο σημαντικό, χαμηλότερες ατμοσφαιρικές καθυστερήσεις. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ένα ραδιόφωνο υπερυψηλών συχνοτήτων (ή άλλη μέθοδος μετάδοσης δεδομένων, όπως επικοινωνία με οπτικές ίνες ή σύνδεση υψηλής ταχύτητας στο Διαδίκτυο) για την αποστολή των σφαλμάτων στο rover. Το rover, που είναι ο δέκτης GNSS του οποίου η θέση παρακολουθείται, χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες σφάλματος για να βελτιώσει την ακρίβειά του. Οι μετατοπίσεις του ρολογιού στους δέκτες και τους δορυφόρους και οι καθυστερήσεις διάδοσης στην ατμόσφαιρα μπορούν να αγνοηθούν επειδή οι δύο δέκτες βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, πράγμα που σημαίνει ότι τα σφάλματα συσχετίζονται έντονα. Με αυτή την προσέγγιση, η θέση του σταθμού rover μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια. Η εικόνα 19 δείχνει το γενικό σχηματικό σχήμα της ανάπτυξης του GNSS σε μια πολυώροφα κατασκευή.

3.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΟΥ GNSS

Η τεχνολογία GNSS είναι ένα αναδύομενο εργαλείο για τη μέτρηση και την παρακολούθηση τόσο στατικών όσο και δυναμικών αποκρίσεων μετατόπισης λεπτών μηχανικών κατασκευών σε φορτία περιβάλλοντος.

Πίνακας II. Επίπεδα ακρίβειας για διαφορετικές λειτουργίες εντοπισμού θέσης GNSS.

Είδος	Στατικός	Γρήγορη-στατική	RTK
Χρόνος που απαιτείται για τον υπολογισμό μιας θέσης	Αρκετές ώρες	8 – 25 λεπτά	Περίπου 15 δευτ
Θέσεις μετρημένες εντός	0,5 – 2 cm	1 – 5 cm	1 – 5 cm



Εικόνα 19 - Γενικό σχηματικό διάγραμμα της ανάπτυξης του GNSS σε μια πολώροφη κατασκευή (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).

Η απόδοση του GNSS πρέπει να επικυρωθεί πλήρως πριν από την εφαρμογή του σε πλήρη κλίμακα. Πολλοί ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει δοκιμές σκοπιμότητας για να διερευνήσουν τα ακόλουθα προβλήματα:

- (1) Ποιο είναι το εύρος και το επίπεδο ακρίβειας των τροπικών συχνοτήτων που προσδιορίζονται με το GNSS;
- (2) Αυτή η ακρίβεια εξαρτάται από τη συχνότητα των καταγεγραμμένων ταλαντώσεων;
- (3) Μπορούν να εντοπιστούν διακυμάνσεις στις συχνότητες των τρόπων μεταφοράς και στις πολλαπλές συχνότητες μεταφορών σε μία εγγραφή μετατόπισης;

3.3.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΔΕΚΤΩΝ GNSS ΣΕ ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Υπάρχουν γενικά δύο προσεγγίσεις αξιολόγησης της απόδοσης των δεκτών GNSS: η δοκιμή μηδενικής γραμμής βάσης (ZBL) και η δοκιμή σύντομης γραμμής βάσης (SBL). Οι κατευθυντήριες γραμμές δεν είναι πολύ δεσμευτικές όσον αφορά το συχνότητα τέτοιων δοκιμών, απαιτώντας απλώς ότι η δοκιμή πρέπει να εκτελείται σε τακτά χρονικά διαστήματα ή πριν από τη διεξαγωγή οποιασδήποτε δραστηριότητας παρακολούθησης GNSS.

Εκτελείται ένα ZBL για τον προσδιορισμό της σωστής λειτουργίας ενός ζεύγους δεκτών GNSS, σχετικών κεραιών και καλωδίων και λογισμικού επεξεργασίας δεδομένων. Η δοκιμή πραγματοποιείται με τη σύνδεση των δύο δεκτών GNSS σε μία μόνο κεραία χρησιμοποιώντας έναν διαχωριστή κεραίας κατάλληλο για τη μάρκα του δέκτη/κεραία. Αυτή είναι μια σχετικά απλή δοκιμή που μπορεί να επαληθεύσει την ακρίβεια των μετρήσεων του δέκτη καθώς και να επικυρώσει το λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων.

Ένα SBL είναι μια πιο αληθινή αναπαράσταση των συνθηκών έρευνας, και έτσι, η απόδοση των δεκτών στην πράξη μπορεί να αξιολογηθεί. Δύο κεραίες είναι τοποθετημένες σε δύο καθορισμένα σημεία, οι συντεταγμένες του που είναι γνωστά από προηγούμενες στατικές έρευνες. Τα δύο σημεία δεν απέχουν περίπου 50 μέτρα μεταξύ τους.

Σε κάθε άκρο της γραμμής βάσης, κάθε δέκτης συνδέεται με το ίδιο είδος κεραίας, που σημαίνει ότι οι γραμμές βάσης που μετρώνται από κάθε συνδυασμό δέκτη είναι οι ίδιες. Παρόμοια με το ZBL, τα ατμοσφαιρικά σφάλματα και τα ρολόγια εξακολουθούν να μετριάζονται, αλλά το φαινόμενο πολλαπλών διαδρομών θα παρουσιαστεί στη λύση.

3.3.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΔΕΚΤΩΝ GNSS ΣΕ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Αν και η ευελιξία της τεχνολογίας δέκτη GNSS έχει βελτιωθεί δραματικά, τα αποτελέσματα κινηματικής παρακολούθησης GNSS εξακολουθούν να υποφέρουν από πολλούς παράγοντες, όπως ο ρυθμός δειγματοληψίας δεδομένων, η δορυφορική κάλυψη, οι ατμοσφαιρικές προκαταλήψεις, τα εφέ πολλαπλών διαδρομών, ο θόρυβος του δέκτη και οι μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων GNSS. Πολλές δοκιμές βαθμονόμησης έχουν διεξαχθεί για να διερευνηθεί η σκοπιμότητα εφαρμογής της τεχνολογίας GNSS για την παρακολούθηση των δομικών δυναμικών αποκρίσεων από διάφορα είδη εξοπλισμού.

3.3.2.1 ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΑΠΕΖΙΟΥ ΑΝΑΚΙΝΗΣΗΣ

Ο Ogaja et al., ερεύνησε τη σκοπιμότητα του GNSS για τον εντοπισμό και τη διάκριση της μετατόπισης του ψηλού κτιρίου από ένα πείραμα σεισμομέτρου GNSS.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το GNSS είναι ικανό να επιλύσει την δόνηση υψηλής συχνότητας, υπό την προϋπόθεση ότι τηρείται το θεώρημα δειγματοληψίας Nyquist. Την ίδια χρονιά, ο Ge et al., χρησιμοποίησε δύο δέκτες GNSS Trimble MS750 (Trimble Navigation Ltd., Sunnyvale, CA, USA) σε λειτουργία RTK με γρήγορο ρυθμό δειγματοληψίας έως και 20 Hz για να ελέγξει τη σκοπιμότητα ενός «σεισμομέτρου GNSS» στην απευθείας μέτρηση των μετατοπίσεων. Η κεραία GNSS, ένα επιταχυνσιόμετρο και ένα ταχύμετρο εγκαταστάθηκαν στην οροφή ενός φορτηγού προσομοιωτή σεισμού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 20. Οι προσομοιωμένες σεισμικές κυματομορφές που επιλύθηκαν από τη χρονοσειρά RTK ήταν σε πολύ καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα από το επιταχυνσιόμετρο και το βελόμετρο, αφού ενσωματωθούν δύο φορές και μία φορά, αντίστοιχα.

Οι Tamura et al. συνέκρινε τις χρονικές διακυμάνσεις των μετατοπίσεων που μετρήθηκαν από το RTK - GNSS και τον μορφοτροπέα μετατόπισης σύρματος. Όπως φαίνεται στις εικόνες 21 και 22, όταν η συχνότητα δόνησης του τραπέζιου ανακίνησης ήταν χαμηλότερη από 2 Hz και το πλάτος δόνησης ήταν μεγαλύτερο από 2 cm, τα αποτελέσματα RTK - GNSS φάνηκαν να ακολουθούν στενά την πραγματική μετατόπιση.

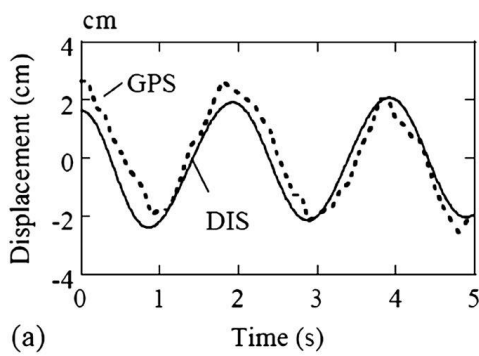


(α) Φορτηγό προσομοιωτή σεισμού

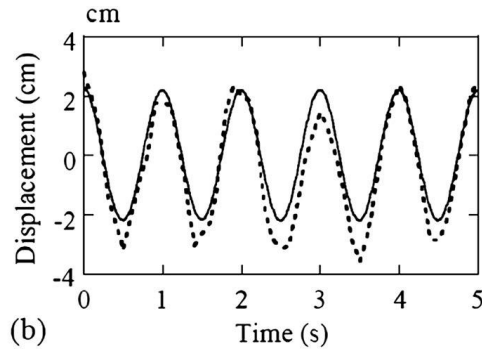


(β) Εγκατάσταση του εξοπλισμού

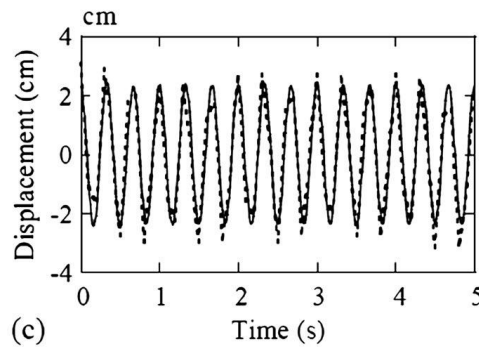
Εικόνα 20 - Πείραμα σεισομέτρου GNSS (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).



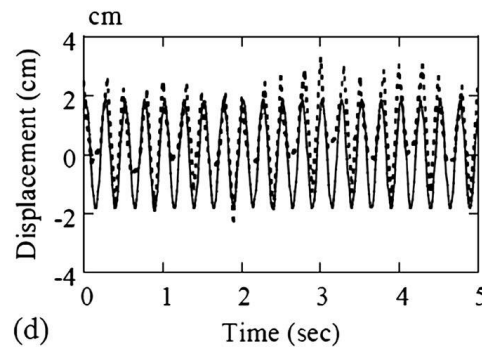
(a)



(b)

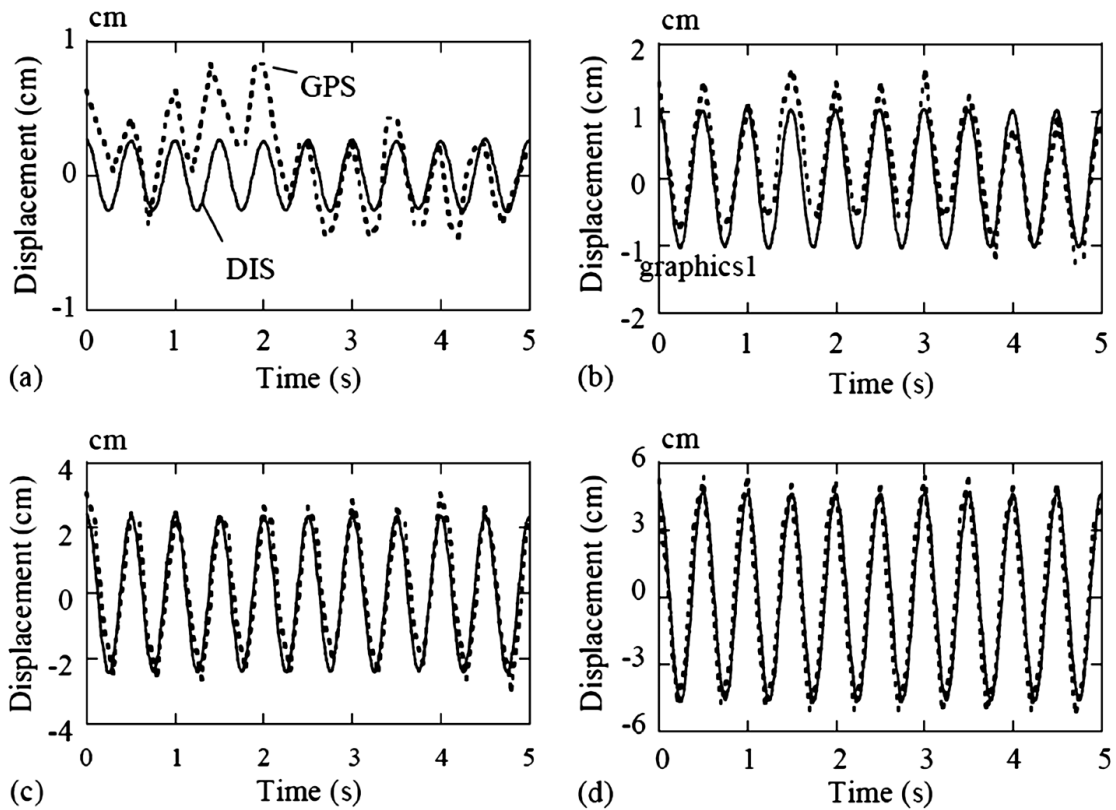


(c)



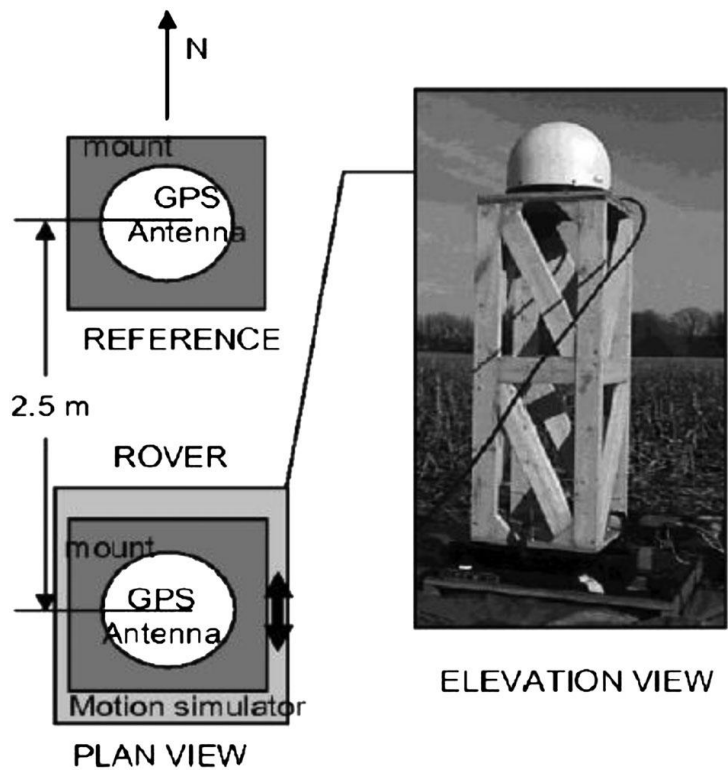
(d)

Εικόνα 21 - Σύγκριση της εξόδου RTK - GNSS και της πραγματικής μετατόπισης από τον μορφοτροπέα μετατόπισης σύρματος ($Y = 2 \text{ cm}$): (α) $f = 0,5 \text{ Hz}$, (β) $f = 1 \text{ Hz}$, (γ) $f = 3 \text{ Hz}$ και (δ) $f = 4 \text{ Hz}$. (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).

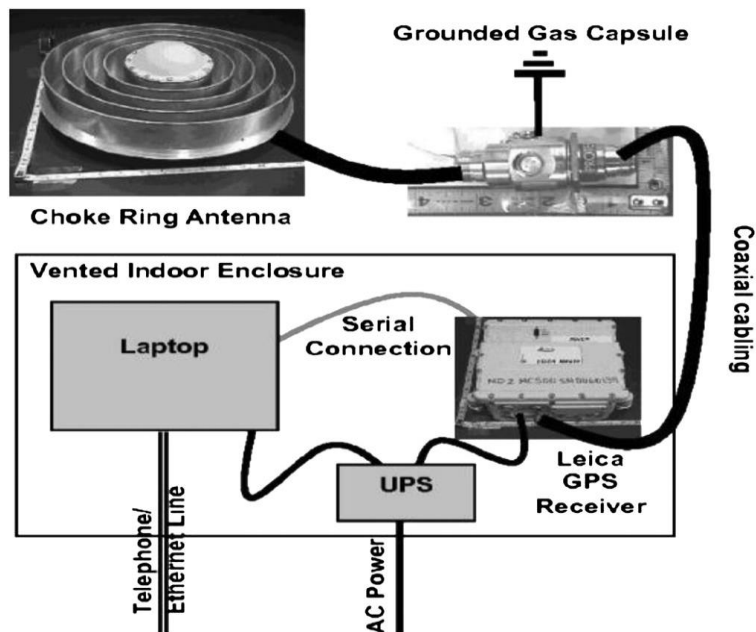


Εικόνα 22 - Σύγκριση εξόδου RTK - GNSS και πραγματικής μετατόπισης από μορφοτροπέα μετατόπισης σύρματος ($f = 2$ Hz): (α) $Y = 0,25$ cm, (β) $Y = 1$ cm, (γ) $Y = 2$ cm, και (δ) $Y = 5$ cm. (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).

Ο Kijewski - Correa και Kochly, διεξήγαγαν περίπου 40 δοκιμές από ένα ζευγάρι δεκτών διπλής συχνότητας Leica MC500 (Leica Geosystems, Heerbrugg, Ελβετία) και δέκτες 12 καναλιών για να διερευνήσουν τη δυναμική ικανότητα παρακολούθησης του δέκτη, τον θόρυβο του περιβάλλοντος, την επίδραση της προστασίας από υπερτάσεις, επιρροή της δυναμικής τοποθέτησης και διορθώσεις για προσανατολισμούς που δεν ευθυγραμμίζονται με τον πραγματικό Βορρά. Οι κεραιές GNSS τοποθετήθηκαν σε ξύλινες πλατφόρμες για να αποφευχθούν μπλοκαρίσματα κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χωρίστηκαν από μια γραμμή βάσης 2,5 μέτρων και προσανατολίστηκαν έτσι ώστε οι κινήσεις του προσομοιωτή να είναι κατά μήκος της κατεύθυνσης N - S, όπως φαίνεται στην εικόνα 23 και 24.



Εικόνα 23 - Σχηματικό σχέδιο αναφοράς και κεραία rover (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).



Εικόνα 24 - Σχηματική διαμόρφωση στοιχείων GNSS (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).

Το πρόγραμμα βαθμονόμησης δείχνει ότι σε αρκετά μεγάλα πλάτη, η απόδοση του GNSS ήταν ανεξάρτητη από τη συχνότητα της κίνησης ωστόσο, για χαμηλό πλάτος κινήσεις, η παρακολούθηση είναι ανώτερη σε χαμηλότερες συχνότητες, παρακινώντας περαιτέρω την εφαρμογή της στην παρακολούθηση ευέλικτων ψηλών κτιρίων. Ομοίως, ο Chan et al. πραγματοποίησε μια σειρά δοκιμών πεδίου σε ανοιχτό χώρο χρησιμοποιώντας επίσης έναν πίνακα προσομοίωσης κίνησης και ένα GNSS που αποτελείται κυρίως από δύο σετ δέκτη Leica GX1230 και κεραία δακτυλίου AT504 (Leica Geosystems). Τα αποτελέσματα της δοκιμής έδειξαν ότι ο θόρυβος περιβάλλοντος που μετρήθηκε από τον κινούμενο δέκτη ήταν πολύ κοντά σε αυτόν που μετρήθηκε από τον ακίνητο δέκτη μεταξύ αστρονομικών ημερών. Αυτά έδειξαν επίσης ότι για τις 2D ημιτονοειδείς και κυκλικές κινήσεις στο οριζόντιο επίπεδο και για την 1D ημιτονοειδή κίνηση στην κατακόρυφη κατεύθυνση, το GNSS μπορούσε να μετρήσει με ακρίβεια τις δυναμικές μετατοπίσεις εάν το πλάτος κίνησης δεν ήταν μικρότερο από 5 mm στο οριζόντιο επίπεδο ή 10 mm στο κατακόρυφη κατεύθυνση, με την προϋπόθεση ότι η συχνότητα κίνησης ήταν μικρότερη ή ίση με 1 Hz.

Ο Casciati και Fuggini (2009) σχεδίασαν ένα συγκεκριμένο σύνολο συστημάτων για την αξιολόγηση της επιτεύξιμης ακρίβειας των μονάδων GNSS για μακροπρόθεσμες εφαρμογές ακριβούς παρακολούθησης που συχνά αγνοείται τόσο στην πρακτική όσο και στη βιβλιογραφία στον τομέα του πολιτικού μηχανικού. Τα πλάτη των ταλαντώσεων που επιβάλλονται στην κινούμενη κεραία GNSS ποικίλλουν σε ένα εύρος από $\pm 0,5$ cm έως ± 5 cm με συχνότητες 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 και 2,0 Hz. Η χρονική ιστορία οποιουδήποτε πιθανού συνδυασμού αυτών των παραμέτρων έχει διάρκεια 300 δευτερολέπτων, υποτίθεται ότι είναι μεγάλη αρκετά για να εκτιμηθεί η σταθερότητα των μετρήσεων. Το κύριο αποτέλεσμα της μελέτης έδειξε ότι το GNSS επιτρέπει μετατοπίσεις της τάξης των υπο εκατοστών που πρέπει να παρακολουθούνται με συχνότητες κίνησης έως 2,0 Hz και ότι η ακρίβεια του GNSS εξαρτάται από το συνδυασμό του πλάτους και του ρυθμού των επιβαλλόμενων κινήσεων. Αυτό το πειραματικό εύρημα είναι πολύ ενδιαφέρον και χρήσιμο για την ενίσχυση του SHM μηχανικών κατασκευών που βασίζεται σε GNSS.

3.3.2.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΠΤΗΣ ΔΟΜΗΣ

Οι Celebi και Sanli, επέλεξαν δύο δείγματα ράβδων από χάλυβα σύμφωνα με το μήκος, το πάχος και το πλάτος για να δώσουν μια θεμελιώδη περίοδο περίπου 4 δευτερολέπτων στην ασθενή κατεύθυνση για να προσομοιώσουν ένα ευέλικτο κτίριο 30 ορόφων έως 40 ορόφων. Παρέχοντας μια αρχική μετατόπιση, κάθε ράβδος τέθηκε σε ελεύθερη δόνηση και η κίνησή της καταγράφηκε. Η δοκιμή έδειξε ότι η δειγματοληψία στα 10 Hz με τις μονάδες GNSS θα μπορούσε να παρέχει ένα σαφές και ακριβές ιστορικό απόκρισης μετατόπισης (με υψηλή αναλογία σήματος προς θόρυβο) από το οποίο θα μπορούσαν να προκύψουν οι λόγοι μετατόπισης και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του δείγματος.

Ο Roberts et al., ερευνήσε τη χρήση δεκτών GNSS φάσης φορέα υψηλής ταχύτητας για την παρακολούθηση εκτροπής των κατασκευών. Αγόρασαν δύο πίνακες OEM

GNSS JNS100 από την Javad Navigation Systems, Inc. (Σαν Χοσέ, Καλιφόρνια, ΗΠΑ), οι οποίες ήταν σε θέση να εξάγουν ακατέργαστα δεδομένα και θέσεις στα 100 Hz χωρίς παρεμβολή (Εικόνα 25).



Εικόνα 25 - Ο δέκτης GNSS της πλακέτας JNS100 OEM (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).

Ένα ξύλινο πλαίσιο αναρτήθηκε από ένα ψηλό τρίποδο μέσω ενός καλωδίου bungee, το οποίο επέτρεπε την ελεύθερη ταλάντωση της πλατφόρμας, όπως φαίνεται στην εικόνα 6. Ο δέκτης αναφοράς βρισκόταν περίπου 10 μέτρα μακριά από την εξέδρα δοκιμής, όπου μια κεραία AT503 συνδέθηκε μέσω ενός διαχωριστή με τη Leica Δέκτης SR510 και JNS100. Η κεραία πλοήγησης AT502 τοποθετήθηκε στην εξέδρα δοκιμής, η οποία στη συνέχεια, μέσω ενός διαχωριστή, συνδέθηκε με τους δέκτες JNS100 και Leica SR510. Χρησιμοποιώντας το εξέδρα δοκιμών, πραγματοποίησαν δύο διαφορετικές δοκιμές. Για την πρώτη δοκιμή, η πλατφόρμα ήταν σε περιστροφή είτε κρατήθηκε ακίνητη είτε ενοχλήθηκε από τη θέση ηρεμίας από κάποιον που ανάγκασε την πλατφόρμα να κινηθεί πάνω-κάτω. Για τη δεύτερη δοκιμή, η πλατφόρμα απλώς αφέθηκε να αιωρείται. Τα αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι οι δέκτες Leica είχαν ελαφρώς καλύτερη απόδοση από τον JNS100 στις στατικές δοκιμές, αλλά η διαφορά ήταν μικρή. Οι δέκτες JNS100 είχαν όντως παρατηρήσιμα φέροντα φάσης υψηλής ακρίβειας. Αυτές οι μελέτες επέκτειναν σημαντικά την έγκυρη μετρήσιμη συχνότητα του δέκτη GNSS σε υψηλότερα από 100 Hz.

Αν και ο ευθύς κανόνας, ή οι άκρες ενός ορθογώνιου τριγώνου, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως βολικό πρότυπο για μια δοκιμή, κατά μήκος των άκρων του οποίου η κεραία rover GNSS μετακινείται σε ευθεία γραμμή χειροκίνητα, το μειονέκτημα μιας χειροκίνητης κατευθυνόμενης κεραίας είναι η ανακρίβεια στο να ακολουθεί το άκρο και η απώλεια της κατακόρυφου της κεραίας που προκαλείται από την τριβή κατά μήκος του προτύπου και την τραχύτητα της επιφάνειας. Σε προκειμένου να επαληθευτεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η αξιοπιστία των δεδομένων μέτρησης GNSS, Park et al. σχεδίασε ένα φυσικό μοντέλο που είχε μια ξύλινη σανίδα 2,44m 1,24m υποστηριζόμενη από έξι κάθετες παραμορφωμένες ράβδους D10, όπως φαίνεται στο εικόνα 27.



Εικόνα 26 - Πλατφόρμα για τη δυναμική δοκιμή (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).



Εικόνα 27 - Πειραματικό μοντέλο (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).

Στο μοντέλο, τοποθέτησαν στηρίγματα στα κατακόρυφα στοιχεία με παραμορφωμένη ράβδο οπλισμού προκειμένου να αποτραπεί η δόνηση του άξονα Y όταν το μοντέλο δονείται προς την κατεύθυνση του άξονα X .

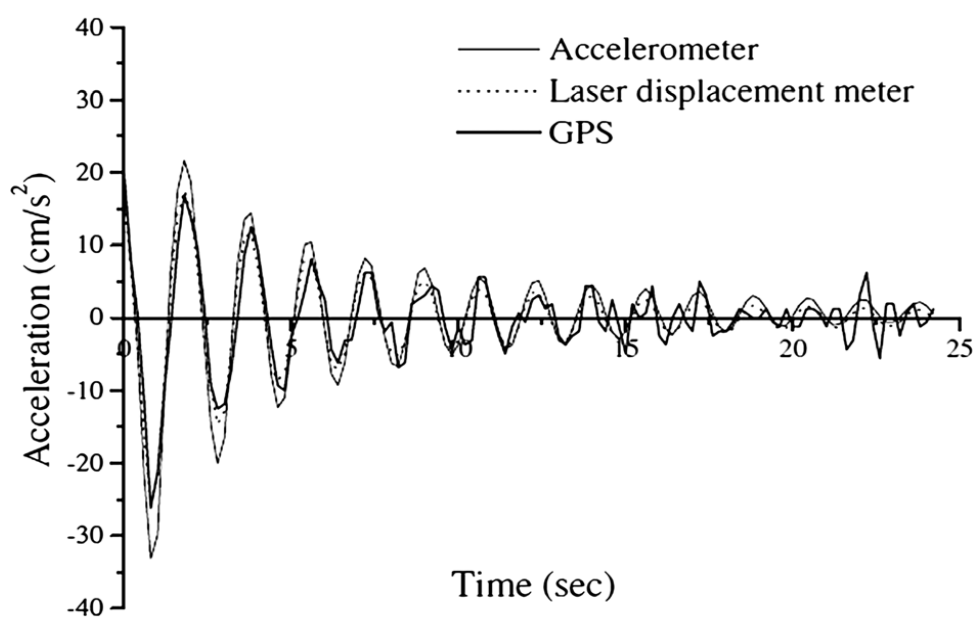
Επιπλέον, τοποθέτησαν ελαστικά μαξιλαράκια σε όλες τις συνδέσεις για να μειώσουν την απώλεια ενέργειας σε τέτοια σημεία κατά την ελεύθερη δόνηση του μοντέλου. Ένας δέκτης GNSS, επιταχυνσιόμετρα τύπου σερβομετρητή και ένας μετρητής μετατόπισης λέιζερ λήφθηκαν στα 5 Hz για τη συλλογή των δεδομένων, που είναι περισσότερο από διπλάσια από τη φυσική συχνότητα της δομής.

Σύγκριση με την επιτάχυνση όπως διαφοροποιείται από τις μετρούμενες μετατοπίσεις χρησιμοποιώντας το GNSS και το μετρητή μετατόπισης λέιζερ έναντι της πραγματικής μετρούμενης επιτάχυνσης χρησιμοποιώντας το επιταχυνσιόμετρο τύπου σερβομηχανισμού είναι όπως την Εικόνα 28. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 28, η επιτάχυνση που ελήφθη χρησιμοποιώντας έναν δέκτη GNSS συνέπεσε καλά με την πραγματική επιτάχυνση που μετρήθηκε με ένα επιταχυνσιόμετρο.

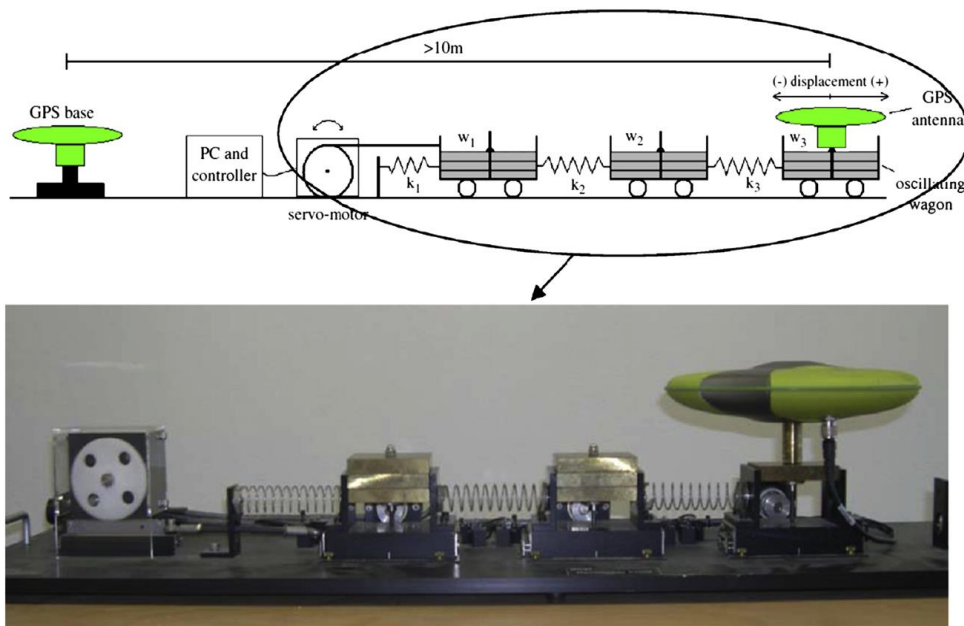
Ο Ψιμούλης κ.ά. δημιούργησε μια πειραματική συσκευή που αποτελείται από έναν ταλαντωτή, υπολογιστή που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών ταλάντωσης (συχνότητα, πλάτος δύναμης, επαναλήψεις ταλάντωσης, κ.λπ.), και έναν ελεγκτή που μετατρέπει το ψηφιακό σήμα του υπολογιστή σε αναλογικό και το μεταφέρει στον ταλαντωτή. Το τελευταίο αποτελούνταν από έναν σερβοκινητήρα, ο

οποίος παρήγαγε γραμμικές ταλαντώσεις ενός βαγονιού που γλιστρούσε πάνω σε μια γραμμική, οριζόντια ράγα. Για κάθε πείραμα, τα ρυθμισμένα από υπολογιστή χαρακτηριστικά ταλάντωσης μεταφέρθηκαν στον σερβοκινητήρα, ο οποίος τελικά διεγείρει το βαγόνι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 29. Τρία συρόμενα βαγόνια (W1, W2, W3) συνδέθηκαν με ελατήρια (K1, K2, K3) επιτρέποντας έως και 3 ταλαντώσεις. Η κεραία GNSS του rover τοποθετήθηκε στο βαγόνι W3 και ο βασικός δέκτης GNSS στο σταθερό έδαφος. Για τις περιπτώσεις πειραμάτων ενός βαθμού ελευθερίας, η κεραία GNSS τοποθετήθηκε στο βαγόνι W1.

Το αποτέλεσμα της μελέτης έδειξε ότι το GNSS ήταν κατάλληλο για την αναγνώριση δυναμικών χαρακτηριστικών ακόμη και σχετικά άκαμπτης δομής του πολίτη. Επίσης, διερεύνησαν τη δυνατότητα χρήσης του GNSS και των ρομποτικών συνολικών σταθμών (RTS) για μετρήσεις ταλαντώσεων σχετικά άκαμπτων δομών (τροπικές συχνότητες έως 3 – 4 Hz). Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το GNSS μπορούσε να καταγράψει ταλαντώσεις με συχνότητες έως και 4 Hz με ελάχιστο πλάτος 5 – 10 mm με ακρίβεια μερικών χιλιοστών και ότι το RTS μπορούσε να καταγράψει κορυφές ταλαντώσεων με ακρίβεια υποχιλιοστών έως λίγα χιλιοστά. στις υψηλές συχνότητες χάθηκαν κάποιοι κύκλοι.



Εικόνα 28 - Μέτρηση επιτάχυνσης με GNSS, μετρητή μετατόπισης λέιζερ και επιταχυνσιόμετρο (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).



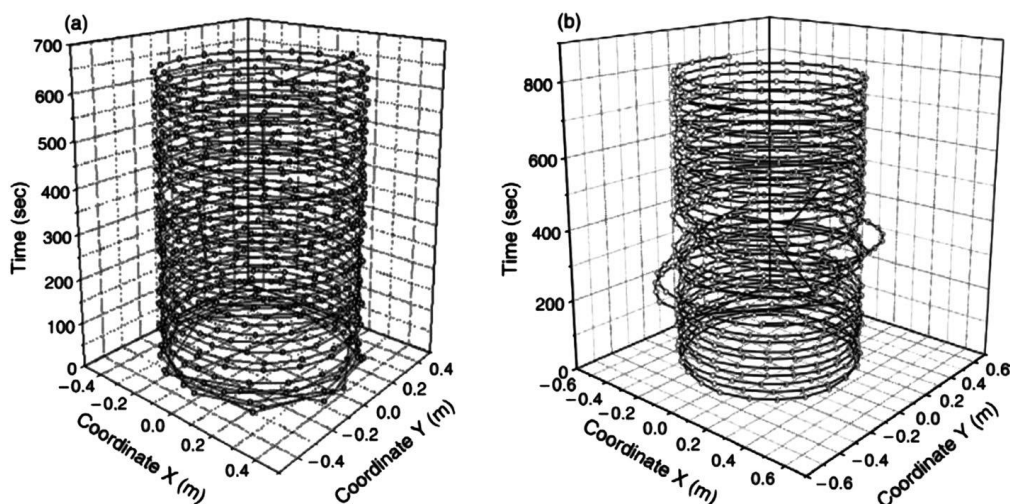
Εικόνα 29 - Η πειραματική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα του Ψιμούλη (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).

Με βάση τις καταγραφές και των δύο, οι συχνότητες των οργάνων των ταλαντώσεων ήταν προσδιορίζεται επίσης με ακρίβεια, αν και ο θόρυβος φαίνεται να αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας. Αυτό δείχνει ότι αυτά τα δύο γεωδαιτικά όργανα είναι συμβατά, ακόμη και αλληλοσυμπληρώνονται.

3.3.2.3 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ

Η κυκλική πορεία είναι ένας πολύ κατάλληλος τρόπος για να ελέγξετε την ακρίβεια της ιχνηλάτησης προς κάθε κατεύθυνση. Ο Breuer et al., χρησιμοποίησε μια μονάδα GNSS Leica 300 προσαρτημένη στην άκρη της οριζόντιας ράβδου, η οποία κινούνταν περιστροφικά με σταθερή γωνιακή ταχύτητα για να ανακαλύψει την εξάρτηση του μήκους της γραμμής βάσης απόστασης μεταξύ της μονάδας rover GNSS και η μονάδα αναφοράς GNSS στην ακρίβεια των μετρήσεων. Για την απόσταση μεταξύ της μονάδας rover και της μονάδας αναφοράς που άλλαξε από 10, 100, 250, 1000, 5000, σε 10 000 m, τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τυπικές αποκλίσεις, που υπολογίζονται από δεδομένα δείγματος προς την κατεύθυνση της ακτίνας περιστροφής, κυμαινόταν από 2 έως 6 mm. Αυτή η παραλλαγή εξαρτάται από τον αριθμό των διαθέσιμων δορυφόρων. Το 2006 η Νικητοπούλου κ.ά., έκανε μεγάλο αριθμό πειραμάτων, στα οποία οι αρμονικές κινήσεις προσομοιώθηκαν από μια περιστρεφόμενη κεραία δέκτη GNSS και οι καταγεγραμμένες συντεταγμένες συγκρίθηκαν με τις πραγματικές.

Το κύριο αποτέλεσμα αυτής της μελέτης ήταν ότι το GNSS μπορούσε να παρακολουθεί μετατοπίσεις με πλάτος καλύτερο από 15 mm, σε επίπεδο ακραίων τιμών < 1,5%, όπως φαίνεται στην εικόνα 30. Οι προσεκτικές μελέτες GNSS, τόσο η κινηματική μετά την επεξεργασία όσο και η RTK, θα μπορούσαν επομένως να επιτρέψουν τη μοντελοποίηση οιονεί στατικών και αρμονικών κινήσεων χαμηλής συχνότητας των περισσότερων μεγάλων λεπτών δομών μηχανικής.



Εικόνα 30 - Διάγραμμα έλικας Helix οριζόντιων συντεταγμένων του κινούμενου rover συναρτήσει του χρόνου. Στο (α) είναι εμφανές ένα σχεδόν ιδανικό κυλινδρικό διάγραμμα, ενώ στο (β) παρατηρούνται ορισμένες ακραίες τιμές

(Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).

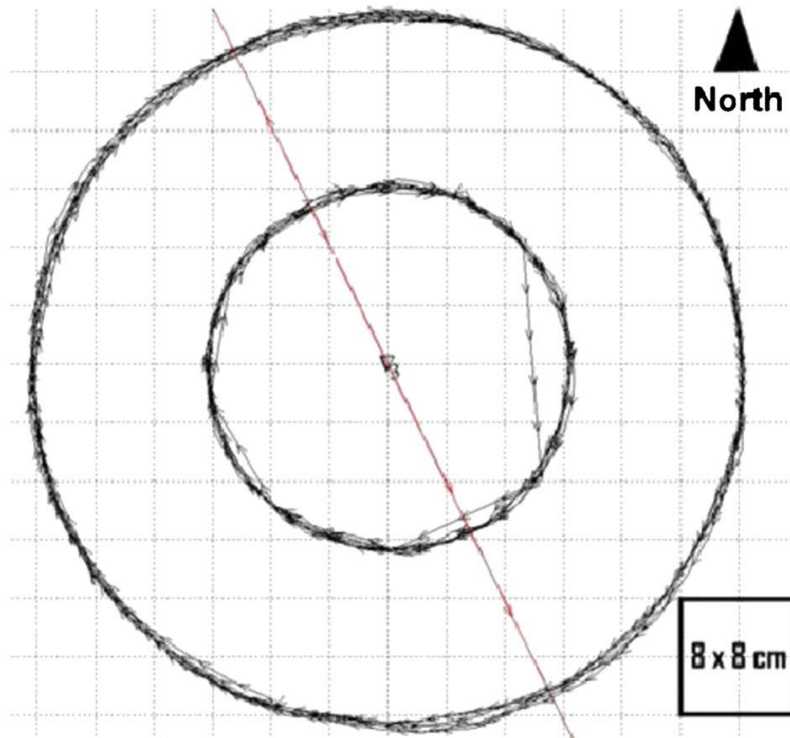
Αφού πραγματοποιήθηκε το πρώτο πείραμα το 1998, ο Breuer et al. θεώρησε ότι μια κανονική ταχύτητα περιστροφής κατά τη διάρκεια της δοκιμής δεν ήταν απαραίτητη γιατί στην πραγματικότητα, η μετατόπιση των δομών, κυρίως δόνηση, δεν εμφανίστηκε με γραμμική ταχύτητα αλλά με θετική και αρνητική επιτάχυνση, και στερέωσαν μια κεραία GNSS σε έναν περιστρεφόμενο βραχίονα που περιστρέφεται γύρω από ένα σταθερό κέντρο για να δοκιμάσουν την ακρίβεια του εντοπισμού GNSS προς κάθε κατεύθυνση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 31. Η Εικόνα 32 εμφανίζει τα αποτελέσματα παρακολούθησης του ίχνους της κεραίας GNSS με δύο διαφορετικές διαμέτρους κύκλου (25 και 49 cm) και διαφορετική ταχύτητα περιστροφής. Η μέση τετραγωνική απόκλιση από τη δεδομένη πορεία είναι περίπου 3 – 4 mm εάν η περίοδος παρακολούθησης δεν υπερβαίνει τα 5 λεπτά. Διαφορετικά, οι πιθανές συστηματικές επιρροές που περιγράφηκαν προηγουμένως παράγουν μια συστηματική μετατόπιση.

3.4 ΠΡΟΟΔΟΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΥΨΗΛΩΝ ΟΡΟΦΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Το GNSS προσφέρει μεγάλες δυνατότητες για εφαρμογές παρακολούθησης ψηλών κτιρίων. Η σημασία τους για τις εφαρμογές παρακολούθησης πηγάζει από τα ακόλουθα γεγονότα: (1) Δεν υπάρχει διαφάνεια μεταξύ σταθμούς και οι τιμές παρατήρησης είναι ανεξάρτητες. (2) Λειτουργίες παντός καιρού. Ο δέκτης σήματος GNSS μπορεί να λειτουργεί συνεχώς σε οποιοδήποτε μέρος και οποιαδήποτε στιγμή, γενικά χωρίς τις επιπτώσεις των καιρικών συνθηκών. (3) Τοποθέτηση υψηλής ακρίβειας.



Εικόνα 31 - Κεραία Rover τοποθετημένη σε τρίποδο εφοδιασμένο με περιστρεφόμενο βραχίονα (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).



Εικόνα 32 - Αποτέλεσμα της κινηματικής ανίχνευσης GNSS του Rover Antenna που εφαρμόζεται σε δύο διαφορετικές ακτίνες (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).

Η ακρίβεια εντοπισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο μπορεί να είναι έως και 10 mm για αεροπλάνο, 20 mm για ύψος. (4) Σύντομος χρόνος παρατήρησης. Η χρονική καθυστέρηση εξόδου των σημείων υψηλής ακρίβειας είναι μικρότερη από 0,05 s. (5) Οι στατικές και οι δυναμικές τρισδιάστατες συντεταγμένες μπορούν να προσδιοριστούν ταυτόχρονα. (6) Τα αποτελέσματα δεν έχουν συσσώρευση σφαλμάτων και είναι μηδενική μετατόπιση. (7) Εύκολο στη λειτουργία. Οι μετρήσεις GNSS έχουν υψηλή αυτοματοποίηση. Έτσι, είναι εύκολο να κατασκευαστεί το αυτοματοποιημένο συνεχώς λειτουργικό σύστημα.

Από την προαναφερθείσα συζήτηση, θα ήταν σωστό να πιστεύουμε ότι το GNSS είναι ικανό ως χρήσιμο εργαλείο για (1) ανίχνευση απόκρισης ψηλού κτιρίου σε πραγματικό χρόνο σε ακραία γεγονότα φόρτισης, όπως ανεμοθύελλες με υψηλές ταχύτητες και σεισμούς μέτριου έως υψηλού μεγέθους, (2) εκτίμηση των «μόνιμων» μετατοπίσεων που αντιμετωπίζουν τα ψηλά κτίρια μόλις σταματήσει το συμβάν ανακίνησης και (3) ανίχνευση μακροπρόθεσμης παραμόρφωσης ψηλού κτιρίου λόγω καθίζησης του εδάφους και διακύμανσης της θερμοκρασίας.

Η ενσωμάτωση του GNSS με υψηλές κατασκευές για το SHM έχει γίνει ένα ενεργό ερευνητικό πεδίο. Αν και τα πλεονεκτήματα της μακροπρόθεσμης δομικής παρακολούθησης GNSS δεν έχουν ακόμη γίνει πλήρως αντιληπτά, αρκετές εφαρμογές έχουν αποδειχθεί μέχρι σήμερα. Το υπόλοιπο αυτής της ενότητας θα εξετάσει αυτές τις επιδείξεις.

3.4.1 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΝΕΜΟ

Το GNSS έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε ψηλές κατασκευές για μέτρηση μετατόπισης λόγω ανέμων για μεγάλο χρονικό διάστημα. Στις αρχές του 1995, ένας δέκτης GNSS της NovAtel (Novatel Wireless Inc., San Diego, CA, USA) εγκαταστάθηκε από τους Lovse et al., στον Πύργο του Κάλγκαρι (160 μέτρα πάνω από το επίπεδο του εδάφους) για τη μέτρηση των δομικών δονήσεων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο Πύργος του Κάλγκαρι, υπό φόρτιση ανέμου, δονείται με συχνότητα περίπου 0,3 Hz και στις δύο κατευθύνσεις βορρά-νότου και ανατολής-δύσης. Η συχνότητα δόνησης 0,3 Hz που μετράται στον πύργο είναι εντός της περιοχής από 0,1 Hz έως 10 Hz που αναμένεται για κατασκευές αυτού του τύπου. Όταν η ικανότητα του GNSS να παρακολουθεί τους δομικούς κραδασμούς επαληθεύεται με περαιτέρω δοκιμή, θα μπορούσε να υιοθετηθεί ως τυπική τεχνική.

Ο Ogaja et al., τοποθέτησε δύο δέκτες Trimble 4700 στην κορυφή του Republic Plaza (280 m, το μέγιστο ύψος οποιουδήποτε κτιρίου στη Σιγκαπούρη) δειγματοληψία με ρυθμό 1 Hz για τη μέτρηση των κραδασμών του κτιρίου λόγω των ανέμων.

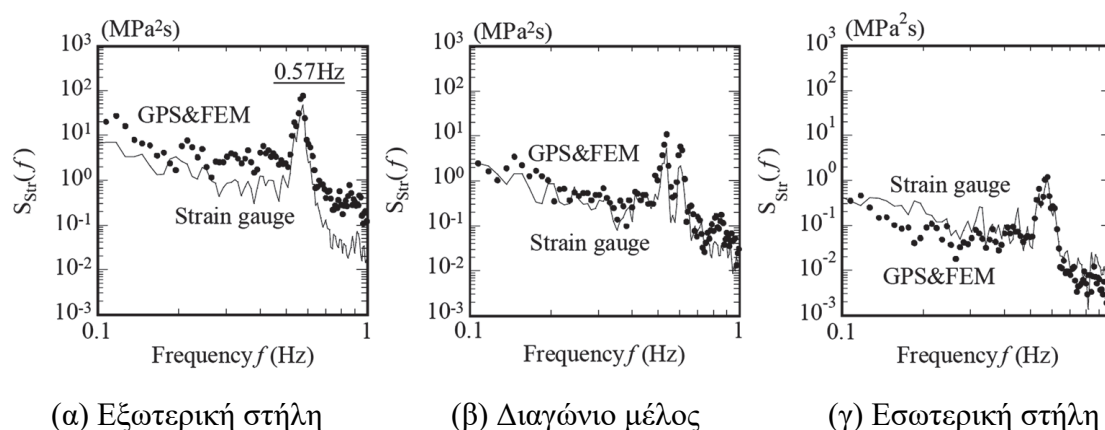
Τα αποτελέσματα από την ανάλυση των δεδομένων του πειράματος έδειξαν ότι η δονητική υπογραφή χαμηλής συχνότητας ψηλών κτιρίων δεν μπορούσε εύκολα να αναγνωριστεί στο χρόνο και τομέας συχνότητας των δεδομένων που δειγματοληπτήθηκαν στο 1 Hz υπό κανονικές συνθήκες φόρτωσης. Αργότερα την ίδια χρονιά, ο Ogaja et al. χρησιμοποίησε ξανά ένα ζευγάρι δεκτών Leica GNSS εγκατεστημένους στο κτίριο Republic Plaza δημιούργησε ξανά χρονοσειρές θέσεων κεραίας. Η μελέτη έδειξε ότι το προφίλτράρισμα των δεδομένων παρακολούθησης GNSS με ένα υβριδικό διάμεσο φίλτρο πεπερασμένης απόκρισης παλμών (FMH) και η ανάπτυξη του μοντέλου βαθμονόμησης από ένα σύνολο συντελεστών που ελήφθησαν από έναν μετασχηματισμό κυματιδίων Haar (FMH) των φιλτραρισμένων δεδομένων FMH θα μπορούσε να παράγει μια παρακολούθηση μοντέλο με καλύτερα χαρακτηριστικά ταξινόμησης.

Ο Chen et al., πραγματοποίησε ένα πείραμα πεδίου για να χρησιμοποιήσει δύο δέκτες GNSS διπλής συχνότητας NovAtel Outrider DL RT2 για να μετρήσει τους κραδασμούς του κτιρίου Di Wang ύψους 384 μέτρων στο Shenzhen της Κίνας, κάτω από σχετικά ισχυρότερους ανέμους. Πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι όταν χρησιμοποιήθηκαν σύντομες γραμμές βάσης GNSS, τα εφέ πολλαπλών διαδρομών GNSS ήταν η πιο κυρίαρχη πηγή σφάλματος, που μπορεί εύκολα να φτάσει το επίπεδο

πολλών εκατοστών. Βρήκαν ότι οι τυπικές περίοδοι των σφαλμάτων πολλαπλών διαδρομών GNSS στο κτίριο Di Wang είναι περίπου 72 δευτερόλεπτα ή μεγαλύτερες, οι οποίες είναι πολύ μεγαλύτερες από τις περιόδους των κραδασμών του κτιρίου και επομένως μπορεί εύκολα να διαχωριστεί χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως ο μετασχηματισμός κυματιδίων. Ο Tamura και Yoshida, εγκατέστησαν μια κεραία RTK - GNSS στην κορυφή ενός χαλύβδινου πύργου ύψους 108 μέτρων και η χρονική παραλλαγή του ανέμου και λήφθηκαν τα δεδομένα απόκρισης κατά τον τυφώνα 0211.

Με υπολογισμό, βρήκαν ότι το σύστημα GNSS μπορούσε να παρακολουθεί τις τάσεις που υπολογίζονται από τη χρονική διακύμανση της μετατόπισης της κορυφής του πύργου σε όλα τα μέλη κατά τη διάρκεια των τυφώνων και θα μπορούσε ακόμη και να στείλει μια προειδοποίηση εάν μία από τις τάσεις του μέλους υπερέβαινε ένα επιτρεπόμενο επίπεδο. Η Εικόνα 33 δείχνει το φάσμα ισχύος των τάσεων των μελών που λαμβάνεται από τους μετρητές καταπόνησης και την υβριδική χρήση ανάλυσης FEM και GNSS. Για το φάσμα ισχύος των τάσεων στην εξωτερική στήλη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 33 (α), εκείνες με την υβριδική χρήση της ανάλυσης FEM και του GNSS έδειξαν υψηλότερη ενέργεια σε όλα τα μέρη από εκείνη του μετρητή τάσης. Ωστόσο, για τα φάσματα ισχύος των τάσεων στο διαγώνιο μέλος (Εικόνα 33 (β)) και στην εσωτερική στήλη (Εικόνα 33 (γ)), αυτό από το μετρητή καταπόνησης και αυτό με την υβριδική χρήση ανάλυσης FEM και GNSS έδειξαν καλή συμφωνία.

Ο πύργος της τηλεόρασης στη Στουτγάρδη σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τον καθηγητή Fritz Leonhardt από το 1953 έως το 1955. Ήταν ο πρώτος πύργος τηλεόρασης στον κόσμο, ο οποίος κατασκευάστηκε ως τσιμεντένιος σωλήνας. Το φρεάτιο από σκυρόδεμα έχει ύψος 161 μέτρα. Η διάμετρος του είναι 10,8μ στο κάτω μέρος και 5,04μ στο τέλος, και το πάχος του τοίχου μειώνεται από 60 σε 19 cm.



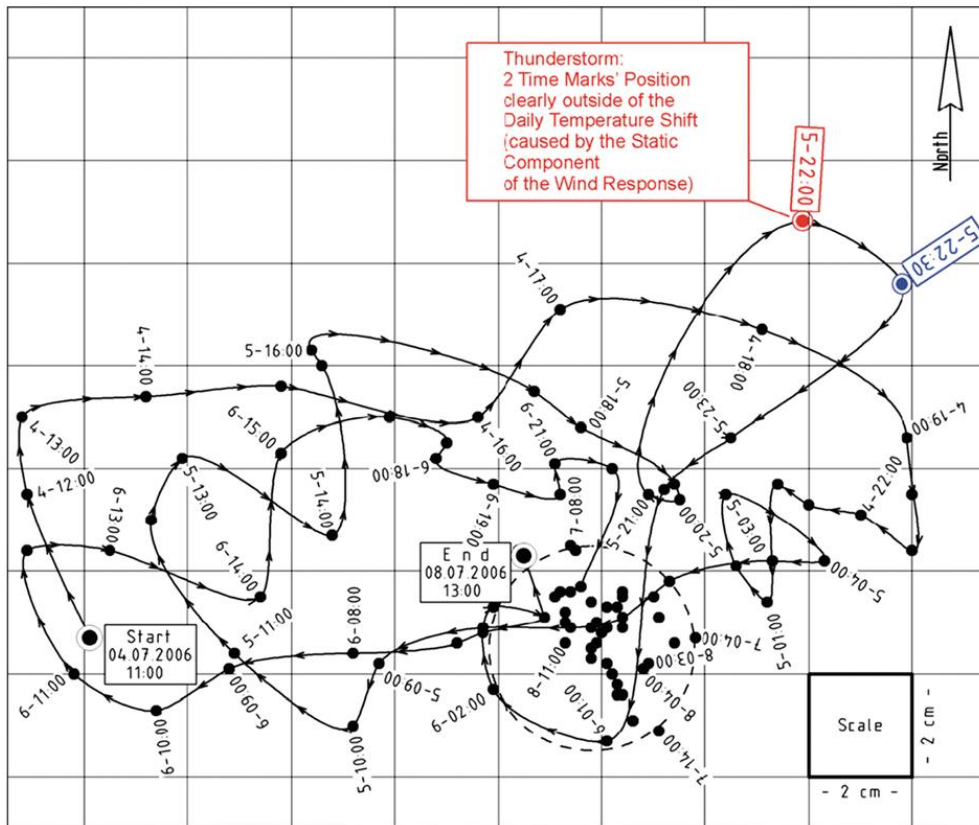
Εικόνα 33 - Φάσμα ισχύος τάσεων μελών κατά τη διάρκεια του Typhoon 0221 (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).

Στο πάνω άκρο του άξονα είναι τοποθετημένος ένας αστάλινος ιστός κεραίας, ο οποίος έχει ύψος 51 μέτρα. Ο πύργος τηλεόρασης της Στουτγάρδης παρακολούθηθηκε προσωρινά με τη μέθοδο RTK - GNSS από τον Breuer et al. από το 1998. Πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν μια τυπική και ελλειπτική κίνηση του πύργου τηλεόρασης όπου η μετατόπιση του πλευρικού ανέμου ήταν περίπου ίση με 4 cm και η μετατόπιση κατά μήκος του ανέμου ήταν ίση με 2,5 cm. Το χρονικό ιστορικό των δονήσεων στην κατεύθυνση του πλευρικού ανέμου ήταν πολύ παρόμοιο με ένα ημιτονοειδές κύμα με σταθερή συχνότητα 0,2 Hz - αυτή η τιμή μετρήθηκε επίσης από τους Leonhard et al. Το απόγευμα της 5ης Ιουλίου 2006, σημειώθηκε καταιγίδα από τις 22:00 έως τις 23:00. Η μέγιστη ταχύτητα ανέμου των 11 m/s παρατηρήθηκε σε απόσταση 7 χλμ νοτιοδυτικά του Τηλεοπτικού Πύργου της Στουτγάρδης. Χρησιμοποιώντας τον νόμο ισχύος, υπολογίστηκε μια μέση ταχύτητα 17 – 18 m/s στην κορυφή του πύργου.

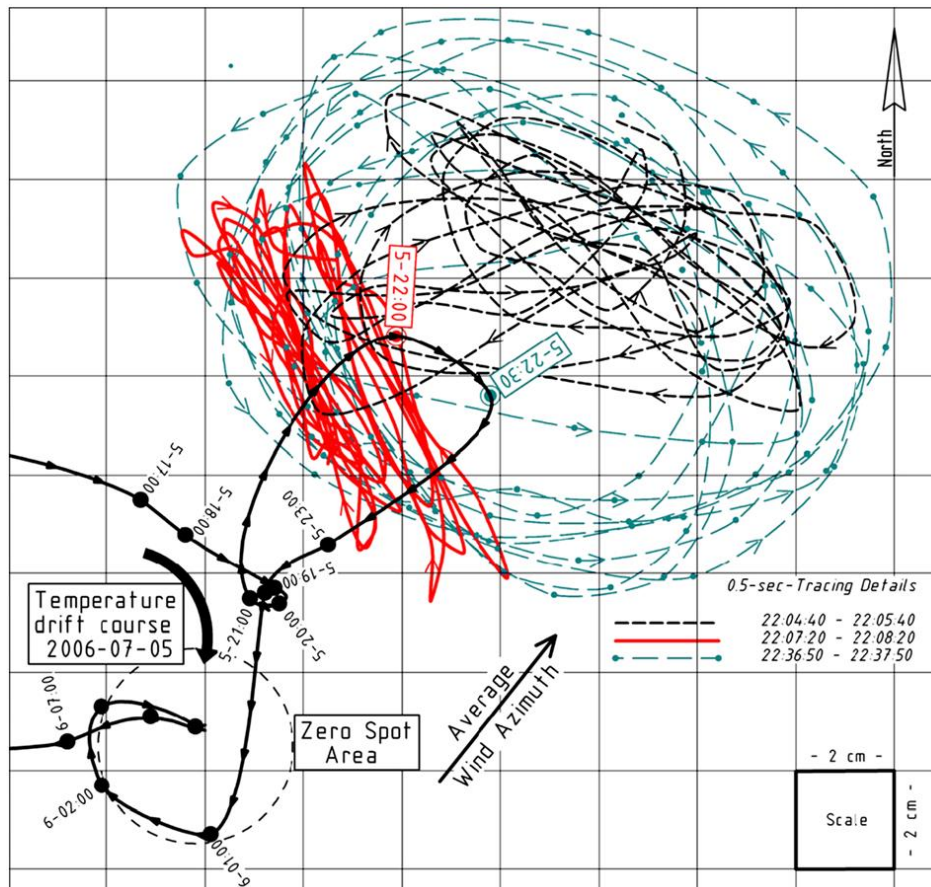
Η επάνω δεξιά γωνία στην Εικόνα 34, η οποία φαίνεται ξεχωριστά ως Εικόνα 35, απεικόνισε την απόκριση στον άνεμο μεταξύ 22:00 και 22:30 h, και οραματίστηκε το ίχνος δόνησης για τρία χωριστά χρονικά διαστήματα πάνω από 1 λεπτό εντός του δύο συνεδρίες 10 λεπτών. Κάθε ίχνος δόνησης κλίνει προς μια ελλειπτική μορφή, της οποίας το αξιμούθιο του άξονα αλλάζει ελαφρώς.

Η γραφική σχεδίαση δείχνει δύο στοιχεία: (1) Η στατική συνιστώσα = η μετατόπιση προς Βορειοανατολικά περίπου 6 cm από την ημερήσια διαδρομή θερμοκρασίας και περίπου 10 cm από την περιοχή μηδενικού σημείου και (2) η δυναμική συνιστώσα = η δόνηση στην κατεύθυνση του πλευρικού ανέμου με πλάτος 7 cm.

Η ώρα σηματοδοτεί 5 – 22:00 και 5 – 22:30 υποδεικνύει τη μέση θέση του πύργου εντός του νέφους σημείων των 1020 θέσεων GNSS. Το κέντρο και των δύο σημειακών νεφών βρίσκεται περίπου 10 cm βορειοανατολικά της περιοχής μηδενικής κηλίδας. Η απόσταση της πραγματικής διαδρομής θερμοκρασίας, δηλαδή μεταξύ των χρονικών σημάτων 5 – 21:00 και 5 – 22:00, είναι 6 cm. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η βορειοανατολική μετατόπιση 6 cm από την πραγματική πορεία θερμοκρασίας προκαλείται από τη στατική συνιστώσα της απόκρισης ανέμου.



Εικόνα 34 - Ο πύργος τηλεόρασης της Στουτγάρδης, καθημερινή μετατόπιση της κορυφής λόγω ηλιακής ακτινοβολίας και ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας με ωριαίες θέσεις και χρονικά σημάδια (4 – 8 Ιουλίου 2006). Στα βορειοανατολικά της κάτωφης φαίνονται δύο ακραία σημεία, που προκαλούνται από καταιγίδα με άνεμο από Νοτιοδυτικά με ταχύτητα περίπου 1 m/s (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).



Εικόνα 35 - Ο πύργος τηλεόρασης της Στουτγάρδης, στατικά και δυναμικά στοιχεία της απόκρισης του ανέμου κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας που παράγει ένα περίγραμμα της ημερήσιας μετατόπισης της θερμοκρασίας. Ο άνεμος από Νότιο-Δυτικό με ταχύτητα περίπου 17 m/s προκαλεί βορειοανατολική μετατόπιση περίπου 6 cm. Η κύρια κατεύθυνση της δόνησης είναι σε ορθή γωνία προς την κατεύθυνση του ανέμου με μετατόπιση 9 – 14 cm (5 Ιουλίου 2006) (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).

Οι Kijewski - Correa et al., καθιέρωσε ένα «Πρόγραμμα Πλήρους Κλίμακας Παρακολούθησης του Σικάγου» (καλέστε την πόλη με ανέμους) το 2001 για να διευκολύνει την παρακολούθηση πολλών ψηλών κτιρίων για την επικύρωση της απόδοσης έναντι της προβλεπόμενης αεροσήραγγας και αναλυτικών μοντέλων προκειμένου να βαθμονομηθεί η τρέχουσα κατάσταση της τέχνη στο σχέδιο. Τα ευρήματά τους πρότειναν την ανάγκη για αναλύσεις χρόνου-συχνότητας για τον εντοπισμό των τρόπων συνένωσης και των μηχανισμών που τους ωθούν. Η μελέτη τόνισε επίσης την επίδραση αυτού του φαινομένου στις τιμές απόσβεσης.

Οι υπερεκτιμήσεις θα μπορούσαν να προκύψουν λόγω της εξάρτησης από το πλάτος, καθώς και του συγκριτικά μεγαλύτερου βαθμού διαρροής ενέργειας που βιώνουν τα

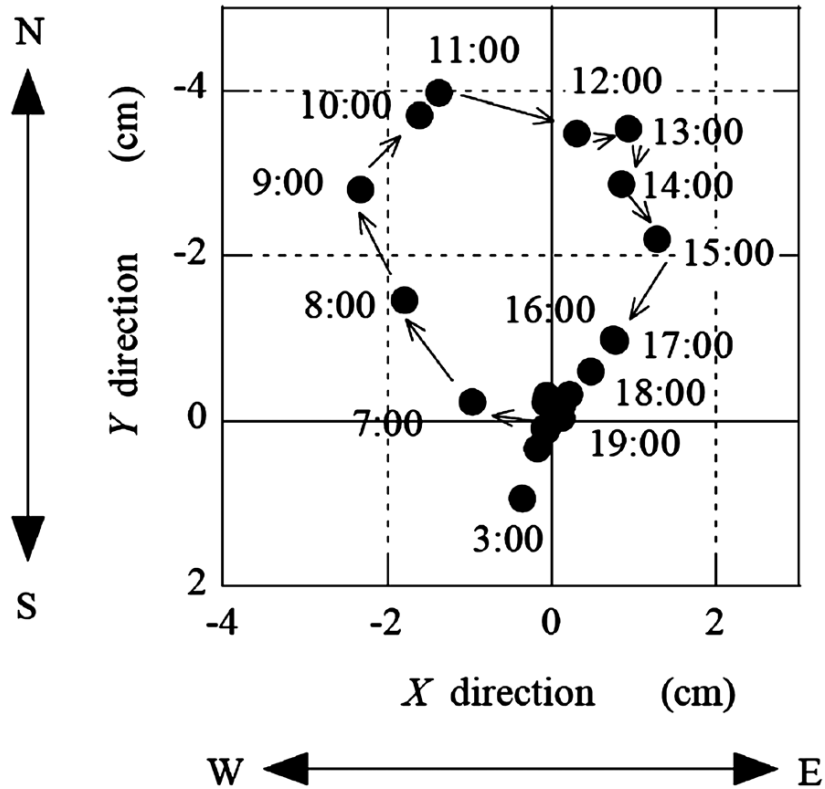
κτίρια στα οποία κυριαρχεί η δράση του πλαισίου. Ο Li et al., επινόησε επίσης ένα σύστημα SHM βασισμένο στο GNSS για ένα πολυώροφο κτίριο. Τα δεδομένα πεδίου, όπως η ταχύτητα ανέμου, η κατεύθυνση του ανέμου και οι αποκρίσεις μετατόπισης μετρήθηκαν ταυτόχρονα και συνεχώς υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου. Οι αποκρίσεις του πολυώροφου κτιρίου διερευνήθηκαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του περιοδογραφήματος για να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα που προσδιορίστηκαν συμφωνούσαν καλά με τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

3.4.2 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ

Επειδή το RTK - GNSS μπορεί να μετρήσει τη στατική μετατόπιση, μπορεί επίσης να ανιχνευθεί η παραμόρφωση των υψηλών κατασκευών που προκαλείται από το φαινόμενο της ηλιακής θέρμανσης. Η Εικόνα 36 δείχνει μια παραμόρφωση πύργου από χάλυβα ύψους 160 μέτρων που προκαλείται από την ηλιακή θέρμανση σε μια ήρεμη και καθαρή μέρα. Κάθε διάγραμμα δείχνει τη μέση μετατόπιση της προηγούμενης ώρας με το χρόνο. Αμέσως μετά την ανατολή του ηλίου, ο πύργος άρχισε να κινείται περίπου 4 εκατοστά στη ΒΔ κατεύθυνση. Η κορυφή του πύργου κινούνταν σε σχεδόν κυκλικό σχήμα κατά τη διάρκεια της ημέρας και επέστρεψε στο σημείο μηδέν μετά τη δύση του ηλίου.

Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί στατιστικά η σχέση μεταξύ των περιβαλλοντικών συνθηκών και της κίνησης του κτιρίου, ο Seco et al., παρακολούθησαν συνεχώς ένα κτίριο από σκυρόδεμα 30 μέτρων μεταξύ 1ης Μαρτίου και 3 Ιουλίου 2003 για 125 ημέρες. Κατά τη διάρκεια της περιόδου παρατήρησης, οι υπολογισμένες παραλλαγές στη θέση είχαν τυπικές αποκλίσεις 3,1 mm στον άξονα XX, 6,6 mm στον άξονα YY και 9,1 mm στον άξονα ZZ. Οι τιμές αποκαλύπτουν ότι οι μετατοπίσεις του κτιρίου είναι πολύ μικρές και ότι καλύπτονται από τα χαρακτηριστικά λάθη των παρατηρήσεων GNSS.

Η συσχέτιση μεταξύ των παρατηρούμενων μετατοπίσεων και του καιρού, οι μεταβλητές αναλύθηκαν, όπως φαίνεται στον Πίνακα III, και μόνο η θερμοκρασία και η άμεση ακτινοβολία ήταν σημαντικές, αλλά η σχέση ήταν ασθενής, με χαμηλές τιμές των συντελεστών συσχέτισης. Με την οπτική ανάλυση από τις διακυμάνσεις των συντεταγμένων, παρατήρησαν ότι το κτίριο υπέστη αρνητική μετατόπιση ως προς τον άξονα XX το πρωί μέχρι το μεσημέρι, όταν οι μετατοπίσεις έγιναν θετικές, με παρατηρούμενη διακύμανση στη θέση αναφοράς ± 2 mm.



Εικόνα 36 - Παραμόρφωση του πύργου που προκαλείται από θερμική καταπόνηση (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).

Πίνακας III. Ανάλυση συσχέτισης μετατοπίσεων με μεταβλητές καιρού.

		Θερμοκρασία	Άμεση ακτινοβολία	Άνεμος
Μετατόπιση στον άξονα XX	Συσχέτιση Pearson	-0.054	-0.059	0.000
	Διμερής σημασία	0.000	0.000	0.963
Μετατόπιση στον άξονα YY	Συσχέτιση Pearson	0.199	0.070	0.000
	Διμερής σημασία	0.000	0.000	0.969
Μετατόπιση στον άξονα ZZ	Συσχέτιση Pearson	0.099	0.091	0.016
	Διμερής σημασία	0.000	0.000	0.134

Ως προς τον άξονα YY, το κτίριο παρέμεινε αρκετά σταθερό μέχρι το απόγευμα, στο οποίο κινήθηκε προς τα βόρεια περίπου 2mm σε σχέση με τη θέση αναφοράς. Ως προς τον άξονα ZZ, παρατήρησαν αύξηση του ύψους του κτιρίου κατά τις κεντρικές ώρες της ημέρας κατά 1 cm περίπου. Αυτές οι μετατοπίσεις που παρατηρούνται στο κτίριο συμφωνούν ποιοτικά με τις εκ των προτέρων αναμενόμενες μετατοπίσεις ως συνάρτηση της κίνησης του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Ο Breuer et al., μελέτησε επίσης την ημερήσια μετατόπιση και την εποχιακή μετατόπιση του Τηλεοπτικού Πύργου της Στουτγάρδης λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας και της ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας του αέρα. Αφού μελέτησε προσεκτικά την ημερομηνία παρακολούθησης, ο ίδιος αναγνώρισε ότι η κατανομή θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια ενός άξονα τηλεόρασης ποικίλλει ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Κατά τη διάρκεια της ηλιόλουστης ημέρας, η φωτισμένη επιφάνεια του φρεατίου του πύργου υποβλήθηκε σε θερμική διαστολή λόγω μη συμμετρικής θέρμανσης. Ως αποτέλεσμα των αλλαγών στην κλίση θερμοκρασίας εντός της διατομής του άξονα του πύργου, προκλήθηκαν πρόσθετες τάσεις και οριζόντιες παραμορφώσεις του πύργου.

Κατά τη διάρκεια μιας ηλιόλουστης ημέρας, το μονοπάτι της κορυφής του πύργου περιέγραφε μια έλλειψη που σχετίζεται με τη θέση του ήλιου. Η πλευρά που ήταν εκτεθειμένη στον ήλιο θα εκτεινόταν και ο πύργος και η κορυφή του θα είχαν κλίση μακριά από τον ήλιο. Γιατί κατά τη διάρκεια της ημέρας, ο ήλιος κινούνταν από την Ανατολή, μέσω του Νότου, στη Δύση, την κορυφή του ο πύργος περιέγραφε ένα ελλειπτικό μονοπάτι Δύση - Βορρά - Ανατολή.

Το μέγεθος της μετατόπισης εξαρτιόταν από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εκτεθειμένης πλευράς και της σκιασμένης πλευράς, δηλαδή από την ένταση της άμεσης ηλιακή ακτινοβολία. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των δύο πλευρών εξισορροπήθηκαν και ο πύργος επιστρέφει σε μια ορισμένη περιοχή μηδέν.

Οι Εικόνες 34 και 35 δείχνουν τα τυπικά χρονικά εξαρτώμενα αρχεία ημερήσιας μετατόπισης του κορυφαίου πύργου κατά τη διάρκεια 4 ημερών μετρήσεων (4 - 8 Ιουλίου 2006).

3.4.3 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΟ

Επειδή οι δορυφόροι GNSS δεν επηρεάζονται από σεισμούς, ο αστερισμός GNSS μπορεί να θεωρηθεί ως ένα «ιδανικό εκκρεμές». Έτσι, ένας δέκτης GNSS στη Γη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σεισμόμετρο για την ανάκτηση της μετατόπισης κεραίας πολύ καλά. Αυτή η νέα εφαρμογή «GNSS Seismology» είναι πολύ απλοποιημένη χάρη στα ελεύθερα διαθέσιμα προϊόντα τροχιάς/ρολόι της Διεθνούς Υπηρεσίας GNSS (IGS)

και τα δεδομένα από το παγκόσμιο κατανεμημένο δίκτυο σταθμών παρακολούθησης GNSS υψηλής ταχύτητας. Η δειγματοληψία 5 λεπτών των δορυφορικών ρολογιών IGS φαίνεται να είναι επαρκής ακόμη και για τις λύσεις θέσης υψηλής συχνότητας με ανάλυση εκατοστών, που απαιτείται για αυτήν την εφαρμογή, αν και αυτή η απαιτητική εφαρμογή πιθανότατα θα επωφεληθεί από μια πιο συχνή δειγματοληψία ρολογιού. Το GNSS είναι σε θέση να παρατηρεί κατά κύριο λόγο οριζόντιες συνιστώσες επιφανειακών σεισμικών κυμάτων που δημιουργούνται από μεγάλους σεισμούς μεγέθους 7 ή μεγαλύτερου, υπό την προϋπόθεση ότι η απόσταση του δικτύου και η δειγματοληψία δεδομένων είναι επαρκής.

Η τυπική δειγματοληψία δεδομένων GNSS 30 δευτερολέπτων (αποδεκατισμένη ή εξομαλυνθείσα) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτό το σκοπό. Για πολύ μεγάλους σεισμούς, όπως ο σεισμός Denali Fault, τα δεδομένα GNSS 1-s μπορούν να παρατηρήσουν σεισμικά κύματα σχεδόν σε ολόκληρη την ήπειρο.

Το GNSS μπορεί να ανιχνεύσει σεισμικά κύματα με περιόδους τόσο σύντομες όσο λίγα δευτερόλεπτα και πλάτη λίγων εκατοστών. Τέτοιες μετρήσεις σεισμικών κυμάτων GNSS μπορούν να συμπληρώσουν και ακόμη και να ενισχύσουν τις τυπικές σεισμικές παρατηρήσεις, οι οποίες συχνά κορεσθούν κοντά στο επίκεντρο ενός πολύ μεγάλου σεισμού.

Η σκοπιμότητα του GNSS για την καταγραφή σεισμικών κινήσεων απεικονίζεται στο αρχείο ενός σεισμού $M_s = 7,0$, ο οποίος ενθουσίασε έναν χαλύβδινο πύργο ύψους 108 μέτρων και πλάτους 13 μέτρων και 13 μέτρων στο Τόκιο. Τα φάσματα γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) των δεδομένων GNSS που καταγράφηκαν στην κορυφή του πύργου σε συχνότητα 10 Hz αποκάλυψαν μια κύρια κορυφή που αντιστοιχεί στην κυρίαρχη συχνότητα των 0,57 Hz και μια δευτερεύουσα κορυφή (2, 16 Hz) τόσο για την ανατολή όσο και για τη βόρεια συντεταγμένη στοιχείο, που αντιστοιχούν στον δεύτερο τρόπο λειτουργίας της δομής, σε συμφωνία με φάσματα που προέρχονται από επιταχυνσίμετρο. Αυτή η σεισμική κίνηση αντιστοιχούσε σε μια οριζόντια ταλάντωση με πλάτος 2 - 4 cm, ενώ η κατακόρυφη ταλάντωση ήταν κάτω από το επίπεδο θορύβου (1-2 cm).

3.5 ΠΡΟΣΦΑΤΕΣ ΠΡΟΟΔΟΙ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ GNSS

Αν και το GNSS προσφέρει λύσεις σε πραγματικό χρόνο, έχει τους δικούς του περιορισμούς. Για παράδειγμα, τα δορυφορικά σήματα GNSS είναι επιρρεπή σε πολλά είδη πηγών σφαλμάτων, όπως ιονοσφαιρικά και τροποσφαιρικά σφάλματα, τροχιακά σφάλματα, σφάλματα ρολογιού και φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών. Παρόλο που η τεχνική της διπλής διαφοροποίησης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του λειτουργικού μοντέλου, καθώς μπορεί να εξαλείψει ή να μειώσει πολλά από τα ενοχλητικά GNSS προκαταλήψεις.

Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν δύο μη μοντελοποιημένες προκαταλήψεις που δεν έχουν εξαιρεθεί καλά ακόμη και μετά τη διαφορά των δεδομένων από προηγούμενες ερευνητικές προσπάθειες. Το πρώτο είναι η αραίωση του σφάλματος ακρίβειας που προκύπτει από τη μη βέλτιστη προσανατολισμένους δορυφόρους. Αυτό το σφάλμα είναι εγγενές στην τεχνολογία και μπορεί να διορθωθεί πρακτικά μόνο με την προσθήκη περισσότερων δορυφόρων. Η άλλη πηγή σφάλματος είναι το φαινόμενο πολλαπλών διαδρομών που εμφανίζεται όταν διπλές δορυφορικές μεταδόσεις λαμβάνονται από την κεραία GNSS. Επιπλέον, ο τυπικός ρυθμός δειγματοληψίας RTK - GNSS 20 Hz θα περιορίσει την ικανότητά του να ανιχνεύει ορισμένα σήματα υψηλής λειτουργίας ορισμένων δομών.

Επιπλέον, οι τιμές των δεκτών GNSS είναι πολύ υψηλές, γεγονός που θα εμποδίσει την εφαρμογή της τεχνολογίας παρακολούθησης GNSS στην πράξη. Έτσι, ένα ολοκληρωμένο σύστημα αισθητήρων που αποτελείται από δέκτες GNSS, Τα επιταχυνσιόμετρα, οι μετατροπείς μετατόπισης ή ακόμα και οι επίγειοι πομποί ψευδοδορυφόρων (ψευδολίτης) μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την ακρίβεια, την αξιοπιστία και την παραγωγικότητα του συνολικού συστήματος παρακολούθησης.

3.5.1 ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΔΕΚΤΗ GNSS ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε, στην πολιτική μηχανική, τα επιταχυνσιόμετρα είναι πιο ακριβή για υψηλότερες συχνότητες και υψηλότερους ρυθμούς δειγματοληψίας από τους αισθητήρες μετατόπισης. Έτσι, η συμπλήρωση των επιταχυνσιομέτρων με τους δέκτες GNSS που μετρούν σε υψηλές συχνότητες, τόσο τα στατικά όσο και τα δυναμικά στοιχεία θα είναι αρκετά χρήσιμα. Ο Celebi et al., ανέπτυξε μια μονάδα GNSS και ένα τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο σε δύο διαγώνιες γωνίες της στέγης ενός κτιρίου 34 ορόφων στο Σαν Φρανσίσκο. Οι αποκρίσεις μετατόπισης και επιτάχυνσης σε πραγματικό χρόνο συλλέχθηκαν συγχρονισμένα.

Οι λύσεις GNSS επιβεβαιώθηκαν από τα δεδομένα επιτάχυνσης και οι δύο προσεγγίσεις έδειξαν ότι η παρακολούθηση δομών μακράς περιόδου με GNSS θα μπορούσε να παρέχει επαρκώς ακριβείς μετρήσεις των σχετικών μετατοπίσεων. Ένα σύστημα παρακολούθησης σε μια καμινάδα του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής της Piacenza (Ιταλία), ύψους 120 μέτρων, εγκαταστάθηκε από τους Cazzaniga et al. Το σύστημα απέκτησε δεδομένα σε συχνότητα 10 Hz από τρεις δέκτες GNSS Leica GRX1200 (ένας rover στην καμινάδα, συνδεδεμένος στη μονάδα λήψης και επεξεργασίας μέσω συστήματος Wi-Fi και δύο αναφορές) και στα 100 Hz από δύο Crossbow CXL02LF3 τριαξονικά επιταχυνσιόμετρα (Crossbow Technology, Inc., Milpitas, CA, USA), ένα στο πάνω μέρος της καμινάδας και ένα άλλο στο μέσο του ανοίγματος της καμινάδας, για να συμπληρώνει τα δεδομένα GNSS και να παρακολουθεί τρόπους δόνησης υψηλότερης τάξης.

Τα αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν συμφωνούσαν μεταξύ τους πολύ καλά, εκτός από το ότι το στατικό στοιχείο έλειπε από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το επιταχυνσιόμετρο. Οι Safak και Hudnut, θεώρησαν ότι η ζημιά θα μπορούσε να ανιχνευθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια εάν οι μηχανικοί ερευνούσαν όχι μόνο τις αλλαγές στις φυσικές συχνότητες, αλλά και τις αλλαγές στα χαρακτηριστικά διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στη δομή και τυχόν μόνιμες αλλαγές στη δομική διαμόρφωση. Παρακολούθησαν ένα κτίριο 17 ορόφων, ανθεκτικό στη στιγμή από χάλυβα πλαισίου στην πανεπιστημιούπολη του UCLA στο Λος Άντζελες, σε πραγματικό χρόνο με μια πολύ πυκνή δομική διάταξη επιταχυνσιομέτρων, συν τρεις αισθητήρες GNSS στην οροφή. Με προσαρμοστικά εργαλεία επεξεργασίας σήματος και αναγνώρισης συστήματος και εργαλεία λήψης στατιστικών αποφάσεων, οι αλλαγές στο κτίριο λόγω πραγματικών ζημιών από αυτές που οφείλονται σε περιβαλλοντικούς παράγοντες εντοπίστηκαν.

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα που αποτελείται από το RTK - GNSS και επιταχυνσιόμετρα εγκαταστάθηκε σε έναν πύργο από χάλυβα ύψους 108 μέτρων από τους Li et al., με στόχο την αξιολόγηση των δομικών αποκρίσεων πλήρους κλίμακας με την εκμετάλλευση των συμπληρωματικών χαρακτηριστικών του GNSS και των αισθητήρων επιταχυνσιόμετρο. Το σύστημα συνέλεξε με επιτυχία τις δομικές αποκρίσεις κατά τη διάρκεια ενός τυφώνα την 1η Οκτωβρίου 2002 και ενός σεισμού Ms 7,0 στις 26 Μαΐου 2003. Τα αποτελέσματα που παρακολούθηθηκαν έδειξαν ότι το γενικό GNSS μπορούσε να λαμβάνει σήματα στο άκρο χαμηλής συχνότητας (0–0,2 Hz), πιθανώς επηρεάζεται από τον ειδικό θόρυβο του GNSS, όπως η πολλαπλή διαδρομή, ενώ είναι ευκολότερο για το επιταχυνσιόμετρο να καταγράφει σήματα υψηλής συχνότητας (2Hz και άνω). Επομένως, οι δύο αισθητήρες ήταν συμπληρωματικοί.

Από την άλλη πλευρά, οι δύο αισθητήρες είχαν κάποια επικαλυπτόμενη ικανότητα στη ζώνη μεταξύ 0,2 και 2 Hz, δηλαδή ό,τι συλλαμβανόταν από το επιταχυνσιόμετρο θα λάμβανε και το RTK - GNSS. Αυτή η επικάλυψη θα μπορούσε να προσφέρει πλεονασμό εντός του ολοκληρωμένου συστήματος, γεγονός που επέτρεψε την ισχυρή διασφάλιση ποιότητας.

Ο Park et al., μέτρησαν την οριζόντια και στρεπτική ανταπόκριση ενός πραγματικού πολυώροφου κτιρίου στην καταιγίδα και τον τυφώνα κίτρινης σκόνης με δύο επιταχυνσιόμετρα και τρεις δέκτες GNSS. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μετατόπιση και η επιτάχυνση που μετρήθηκαν με GNSS ήταν παρόμοια σε περιπτώσεις πλάτους δόνησης μεγαλύτερο από 1 cm. Τα σχήματα στρεπτικής λειτουργίας του ψηλότερου τηλεοπτικού πύργου — Guangzhou New TV Tower (610 m) στην Κίνα κατά τη διάρκεια του τυφώνα Nuri αναλύθηκε με ακρίβεια για πρώτη φορά χρησιμοποιώντας ένα ολοκληρωμένο δίκτυο κατασκευασμένο από δέκτη GNSS και πολλά μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα.

Δύο παράμετροι στρέψης υπολογίστηκαν σε συνάρτηση με το χρόνο: η γωνία περιστροφής της ωειδούς διατομής και η γωνία περιστροφής του εσωτερικός κύλινδρος άξονα. Η εξάρτησή τους από τις μετρήσεις των αισθητήρων και τις τοποθεσίες τους διερευνήθηκε επίσης σε βάθος. Διαπίστωσαν ότι τα αποτελέσματα λόγω της διαδικασίας ολοκλήρωσης των μετρήσεων επιτάχυνσης και ο μη συγχρονισμός μεταξύ των αισθητήρων θα μπορούσαν να αφαιρεθούν χρησιμοποιώντας αρκετούς αισθητήρες GNSS. Αυτό το σημαντικό εύρημα των πειραματικών αποτελεσμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της απόδοσης της τεχνολογίας GNSS.

Προκειμένου να αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα τόσο του RTK - GNSS όσο και των επιταχυνσιόμετρων, πρέπει να αναπτυχθούν δύο επεξεργασία δεδομένων, δηλαδή να μετατραπεί η μετατόπιση που μετράται με GNSS σε επιτάχυνση μέσω διπλής διαφοροποίησης ή να μετατραπούν οι μετρήσεις επιταχυνσιόμετρου σε μετατόπιση μέσω διπλής ολοκλήρωσης. Η μεταγενέστερη προσέγγιση είναι πολύ πιο δύσκολη επειδή οι δύο σταθερές ολοκλήρωσής της πρέπει να προσδιοριστούν προκειμένου να ανακτηθούν όλες οι συνιστώσες της μετατόπισης (στατική, οιονεί στατική και δυναμική). Ο Li et al., σχεδίασε μια μεθοδολογία για την αντιμετώπιση του προβλήματος, η οποία συνίστατο σε ένα FFT για ταυτοποίηση συσχετισμένου σήματος, μια τεχνική φιλτραρίσματος, αντιστάθμιση καθυστέρησης και εκτίμηση γραμμικής τάσης ταχύτητας από μετρήσεις GNSS και επιταχυνσιόμετρο. Οι Smyth και Wu, πρότειναν μια τεχνική φιλτραρίσματος και εξομάλυνσης Kalman, η οποία ήταν ικανή να αντιμετωπίσει εκτιμήσεις πολλαπλών ρυθμών, είχε διερευνηθεί για την ακριβή εκτίμηση της ταχύτητας και της μετατόπισης από μετρήσεις επιτάχυνσης και μετατόπισης που μολύνθηκαν με θόρυβο.

Τα οποία συγκεντρώθηκαν από επιταχυνσιόμετρο και δέκτες GNSS, αντίστοιχα. Οι Casciati και Fuggini, έκαναν μια ενδιαφέρουσα μελέτη για την ικανότητα των αισθητήρων GNSS να ανιχνεύουν την απόκριση μιας μεταλλικής κατασκευής σε παλμικές ενέργειες (δράσεις μικρής διάρκειας) ως τις κινήσεις της γέφυρας-γερανού μέσα στο κτίριο. Το δυναμικό που προσφέρει η προσέγγιση GNSS για την παρακολούθηση των δυναμικών μετατοπίσεων τονίστηκε συγκρίνοντας, τόσο στον τομέα του χρόνου όσο και στη συχνότητα, τις μετατοπίσεις που μετρήθηκαν από τις μονάδες GNSS με τις μετατοπίσεις που αναπτύχθηκαν από δεδομένα τριαξονικών επιταχυνσιόμετρων. Αναπτύχθηκε μια αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιώντας ένα FEM του κτιρίου και οι επεξεργασίες από τις μετρήσεις θέσης GNSS συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αυτή η μοναδική έρευνα σκιαγραφεί έναν κατάλληλο τρόπο επεξεργασίας δεδομένων GNSS προς δομική παρακολούθηση και προσφέρει ειδικές αξίες σε μηχανικούς και ερευνητές.

Οι κύριοι περιορισμοί του GNSS είναι η απαίτηση για ανεμπόδιση θέαση των δορυφόρων και η αποφυγή επιφανειών στις οποίες ανακλάται και παραμορφώνεται το δορυφορικό σήμα πριν φτάσει στην κεραία GNSS. Η αρχή λειτουργίας του RTS,

αντίθετα, είναι πολύ διαφορετική επειδή βασίζεται σε ένα κύμα που εκπέμπεται από το όργανο, ανακλάται σε έναν ανακλαστήρα και λαμβάνεται πίσω και αναλύεται από το ρομποτικό θεοδόλιχος. Οι περιορισμοί σε αυτή την περίπτωση είναι οι απαιτήσεις για σταθερή θέση για το RTS και για ανεμπόδιση θέα του ανακλαστήρα. Το τελευταίο θα πρέπει να βρίσκεται σε απόσταση έως και μερικές εκατοντάδες μέτρα από το RTS και η εκπεμπόμενη ακτίνα πρέπει να διέρχεται από καθαρό αέρα. Η σκόνη και η ομίχλη, για παράδειγμα, ενοχλούν πολύ αυτό το σήμα, μειώνοντας το εύρος των μετρήσεων και την ποιότητά τους. Σχετικά με αυτά, ο Ψιμούλης και ο Στύρος, διερεύνησαν τη δυνατότητα χρήσης του GNSS και του RTS μαζί για μετρήσεις ταλαντώσεων σχετικά άκαμπτων δομών (τροπικές συχνότητες έως 3 – 4 Hz). Πειραματικά αποτελέσματα έδειξε ότι αυτά τα δύο γεωδαιτικά όργανα ήταν συμβατά, συμπληρωματικά μεταξύ τους.

Το GNSS και το RTS έχουν ένα πολύ ευρύτερο δυνατό φάσμα εφαρμογών από αυτό που πιστεύαμε προηγουμένως, αλλά και πάλι, υπάρχουν όρια στη χρήση τους. Οι Yigit et al., αξιολόγησε τη δυναμική ποιότητα μέτρησης και την αξιοπιστία των κλινομέτρων για εφαρμογές παρακολούθησης κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα 30 ορόφων και συζήτησε τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες του GNSS σε σχέση με τη χρήση αισθητήρων κλίσης για την παρακολούθηση της δυναμικής απόκρισης ψηλών κτίρια υπό φορτίο ανέμου. Από τις αναλύσεις στη συχνότητα τομέα, η φυσική συχνότητα πρώτου τρόπου του κτιρίου που προσδιορίζεται και από τους δύο αισθητήρες συμφωνούσε πολύ καλά μεταξύ τους. Η απόκλιση της μετρούμενης φυσικής συχνότητας πρώτου τρόπου σε σύγκριση με αυτήν που προέκυψε από την πρόβλεψη FEM ήταν 7%.

3.5.2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΨΕΥΔΟΛΙΘΟ

Είναι ευρέως γνωστό ότι, για τέτοια συστήματα παρακολούθησης παραμορφώσεων που βασίζονται σε δορυφόρους, η ακρίβεια, η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία της λύσης θέσης που προέρχεται από το GNSS εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των παρακολουθούμενων δορυφόρων.

Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως η παρακολούθηση πολυώροφων κατασκευών σε δομημένα αστικά περιβάλλοντα, η διαθεσιμότητα δορυφόρων GNSS μπορεί να είναι ανεπαρκής για τις απαιτήσεις εντοπισμού θέσης. Επιπλέον, λόγω των περιορισμών της γεωμετρίας του δορυφόρου, η ακρίβεια της συνιστώσας ύψους είναι γενικά δύο ή τρεις φορές χειρότερη από τις οριζόντιες συνιστώσες.

Οι ψευδόλιθοι, τα οποία είναι επίγεια όργανα που μεταδίδουν σήματα που μοιάζουν με το GNSS, μπορούν να βελτιώσουν τη γεωμετρία του δορυφόρου-δέκτη. Ως εκ τούτου, κατ' αρχήν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρόσθετες παρατηρήσεις εύρους για τη βελτίωση της απόδοσης ενός συστήματος παρακολούθησης παραμορφώσεων που βασίζεται σε GNSS, με αρκετές συσκευές, που θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν πλήρως τον αστερισμό του GNSS. Υπάρχουν τρία γενικά σενάρια για τη χρήση ψευδόλιθων σε συστήματα παρακολούθησης παραμορφώσεων:

(1) Η πρώτη περίπτωση είναι η αύξηση GNSS με ψευδόλιθους, η οποία είναι κατάλληλη όπου η γεωμετρία του υπάρχοντος αστερισμού GNSS είναι ανεπαρκής για τις απαιτήσεις εντοπισμού θέσης.

(2) Στη δεύτερη περίπτωση, ένα σύστημα μόνο με ψευδόλιθο αντικαθιστά πλήρως τον αστερισμό του GNSS. Αυτό μπορεί να επεκτείνει τις εφαρμογές παρακολούθησης παραμόρφωσης βάσει δορυφόρου σε εσωτερικούς χώρους, σε σήραγγες ή υπόγεια, όπου τα σήματα GNSS δεν μπορούν να παρακολουθηθούν.

(3) Η τελική περίπτωση είναι ένα σύστημα παρακολούθησης παραμόρφωσης που βασίζεται σε ανεστραμμένο ψευδόλιθο, όπου ένας «αστερισμός» δεκτών GNSS παρακολουθεί έναν κινητό ψευδόλιθο. Πολλοί πολιτικοί μηχανικοί έχουν πραγματοποιήσει έρευνες για τη χρήση ψευδολίθων για την παρακολούθηση λεπτών κατασκευών.

Τα αποτελέσματα από αυτές τις δοκιμές ήταν ενθαρρυντικές και απέδειξαν την απόδειξη της ιδέας για την αύξηση του GNSS με ψευδόλιθους για την παρακολούθηση παραμορφώσεων. Ωστόσο, η θέση των ψευδόλιθων είναι κρίσιμης σημασίας, όχι μόνο από γεωμετρική προοπτική, αλλά και από την άποψη της αξιόπιστης παρακολούθησης σήματος τόσο στον «σταθερό» δέκτη αναφοράς όσο και στις θέσεις του «κινηματικού» rover στη δομή που παρακολουθείται.

Επιπλέον, αυτά περιορίζονται λόγω του αστερισμού ψευδόλιθων κοντινού πεδίου. Ως αποτέλεσμα, οι θέσεις αναφοράς και rover πρέπει να βρίσκονται σε παρόμοιες αποστάσεις από τους ψευδόλιθους, και στην πράξη, η ικανοποίηση αυτής της συνθήκης μπορεί να αποτελεί σημαντικό περιορισμό της τεχνολογίας. Επιπλέον, για παρακολούθηση παραμόρφωσης σε πραγματικό χρόνο, απαιτούνται μόντεμ ραδιοφώνου για να επιτρέπεται η διαφορική επεξεργασία των δεδομένων αναφοράς και rover μαζί.

Το Locata είναι ένα είδος συστήματος εντοπισμού θέσης με βάση ψευδόλιθους (PPS) που λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων Βιομηχανικής Επιστημονικής και Ιατρικής χωρίς άδεια 2,4 GHz. Σε αντίθεση με τους προκατόχους του, το Locata χρησιμοποιεί μεθόδους χρονικής διαφοροποίησης για να ξεπεράσει το κοντινό-μακρινό πρόβλημα. Η ιδέα εντοπισμού θέσης Locata χρησιμοποιεί ένα δίκτυο επίγειων πομπών που καλύπτουν μια επιλεγμένη περιοχή με ισχυρά σήματα, μαζί με σήματα από το GNSS.

Έτσι, το Locata είναι σε θέση να λειτουργεί σε μεγαλύτερες περιοχές από τα προηγούμενα PPS. Ο Barnes et al., διεξήγαγε μια δοκιμή για να αξιολογήσει την καταλληλότητα της τεχνολογίας εντοπισμού θέσης Locata για εφαρμογές τύπου παρακολούθησης δομικών παραμορφώσεων. Μέσω ενός προσωρινού δικτύου εντοπισμού θέσης LocataNet που έχει εγκατασταθεί στη γέφυρα Parsley Bay στο Σίδνεϊ, έχει αποδειχθεί ξεκάθαρα η κινηματική ακρίβεια εντοπισμού θέσης σε επίπεδο κάτω του εκατοστού.

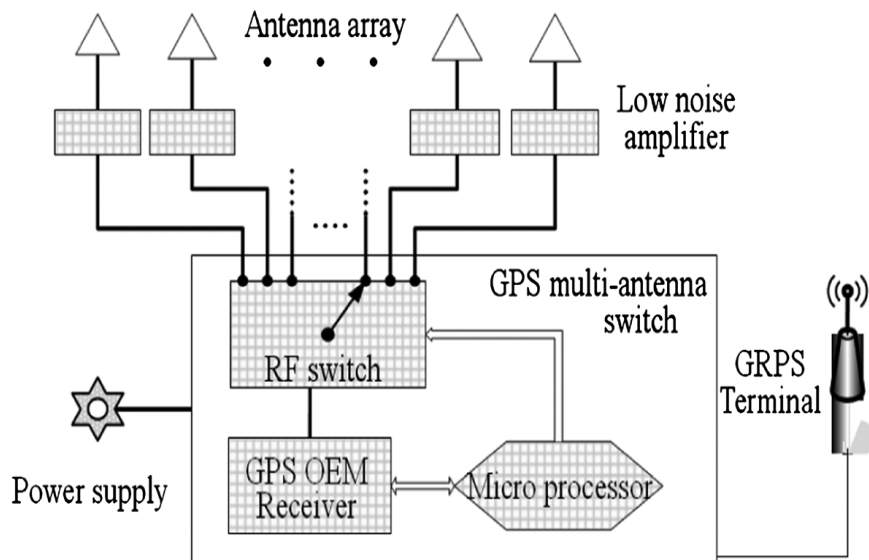
3.5.3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ GNSS

Αν και ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την παρακολούθηση παραμορφώσεων μεγάλων κατασκευών, ένα από τα κύρια μειονεκτήματα του συνεχούς GNSS είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου του εξοπλισμού GNSS που απαιτείται σε κάθε τοποθεσία. Κάθε εγκατάσταση θα περιλαμβάνει δέκτη, κεραία, υλικό και λογισμικό επικοινωνιών, τροφοδοτικό και συσκευές ασφαλείας. Έτσι, είναι επιθυμητό να μετριαστεί αυτή η δαπάνη, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση του επεισοδίου GNSS με τη μορφή συστοιχίας πολλαπλών κεραιών με μεταγωγή. Σε αυτήν την περίπτωση, οι πολλαπλές κεραίες GNSS συνδέονται με έναν δέκτη, ο οποίος καταγράφει δεδομένα συνεχώς ενώ εναλλάσσεται μεταξύ κεραιών περιοδικά.

Αυτό, φυσικά, θα μειώσει σημαντικά το συνολικό κόστος κεφαλαίου της όλης διαδικασίας παρακολούθησης λόγω της μείωσης του αριθμού των δεκτών που χρησιμοποιούνται σε σύγκριση με το συνεχές GNSS. Αν και ο αριθμός των κεραιών GNSS παραμένει αμετάβλητος, αυτές έχουν σημαντικά χαμηλότερο κόστος μονάδας. Κάθε κεραία είναι τοποθετημένη στο απαιτούμενη θέση δοκιμής και το σήμα από κάθε κεραία πολυπλέκεται στον δέκτη μέσω ενός μηχανισμού μεταγωγής, ο οποίος αποτελείται από πολλαπλά κανάλια εισόδου και ένα μόνο κανάλι εξόδου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 36. Αυτό επιτρέπει στον δέκτη να δειγματίζει διαδοχικά τα σήματα από κάθε κεραία για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, παράγοντας περιοδικά δεδομένα GNSS για το δίκτυο σταθερών σταθμών παρακολούθησης.

Η έννοια μιας συστοιχίας πολλαπλών κεραιών έχει συζητηθεί προηγουμένως σε αρκετές έρευνες με διαφορετικές προοπτικές. Ένα από τα πρώτα ήταν από τους Santerre και Beutler, οι οποίοι συνέδεσαν τις πολλαπλές κεραίες με έναν δέκτη GNSS με στόχο τη βελτίωση του προσδιορισμού ύψους για γραμμές βάσης μήκους λίγων χιλιομέτρων. Ο Ding et al., δοκίμασε ένα σύστημα πολλαπλών κεραιών GNSS (GMS), το οποίο ήταν κοντά με την τυπική ακρίβεια που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τα συμβατικά συστήματα τοπογραφίας GNSS, για την παρακολούθηση παραμορφώσεων όπως κατολισθήσεις ή ασταθείς πλαγιές. Ο Forward et al., ανέπτυξε ένα σύστημα συστοιχίας κεραιών με μεταγωγή GNSS που περιλαμβάνει τέσσερις κεραίες μεταγωγής, επιπλέον δύο σταθμών αναφοράς που λειτουργούν συνεχώς και καταγράφουν στο 1Hz. Ανιχνεύθηκαν τρισδιάστατες παραμορφώσεις 2 mm/εβδομάδα. Ο He et al., ανέπτυξε ένα πρωτότυπο GMS με οκτώ κανάλια, που ονομάζεται GMAS (GMS), όπως φαίνεται στην Εικόνα 37.

Η μέση ακρίβεια των γραμμών βάσης για ολόκληρη την περίοδο παρατήρησης μπορεί να φτάσει περίπου το 1 – 2 mm.



Εικόνα 37 - Σχηματικό διάγραμμα συνδέσεων συστοιχίας κεραιών (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).



Εικόνα 38 - Συσκευή μεταγωγής πολλαπλών κεραιών GNSS (Πηγή: Yi Ting-Hua, et al. 2016).

Το GMS παρέχει μια οικονομικά αποδοτική και ακριβή τεχνική για την παρακολούθηση παραμορφώσεων ειδικά για δίκτυα υψηλής πυκνότητας. Ωστόσο, τα δεδομένα GNSS δεν συλλέγονται συνεχώς αλλά για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα σε σταθερές κεραιές συνδεδεμένες σε έναν δέκτη. Δηλαδή, η εναλλαγή μεταξύ κεραιών θα έχει ως αποτέλεσμα κάποιες φτωχές εποχές δεδομένων στην αρχή κάθε συνεδρίας έως ότου επανακτηθεί το κλείδωμα σε επαρκείς υγιείς δορυφόρους για αξιόπιστο εντοπισμό θέσης.

Ο αριθμός αυτών των μεταβατικών εποχών ανακαλύφθηκε ότι είναι περίπου 30 - 50 ανεξάρτητα από το διάστημα μεταγωγής, για το δοκιμασμένο υλικό και περιβάλλον. Αυτό σημαίνει ότι αυτού του είδους η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε σχεδόν στατική κατάσταση, όπως η απόκριση που προκαλείται από τη θερμική διακύμανση των υψηλών κατασκευών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τεχνολογία των Παγκόσμιων Δορυφορικών Συστημάτων Πλοήγησης (GNSS) έχει καταστεί ζωτικής σημασίας για πολλές εφαρμογές που κυμαίνονται από τη μηχανική πολεοδομίας και τον καθορισμό ζωνών έως τις στρατιωτικές εφαρμογές. Έχει γίνει ευρέως αποδεκτό παγκοσμίως από κυβερνήσεις και οργανισμούς. Αυτός είναι ο λόγος που έχουμε τέσσερα συστήματα GNSS: τα συστήματα GNSS των ΗΠΑ, το ευρωπαϊκό Galileo, τα ρωσικά συστήματα Glonass και το BeiDou είναι δίκτυο Ασίας - Ειρηνικού. Υπάρχει μια επένδυση πολλών δισεκατομμυρίων δολαρίων σε αυτόν τον τομέα και εντατικές παγκόσμιες ερευνητικές δραστηριότητες. Η εντυπωσιακή πρόοδος στις ασύρματες επικοινωνίες και τα δίκτυα έχει παίξει μεγάλο ρόλο στην αύξηση του ενδιαφέροντος για το GNSS και στην παροχή μεθοδολογιών και μηχανισμών που επιτρέπουν την εφαρμογή.

Στη συνέχεια, μέσα από το κεφάλαιο 2 εκτός από την ανάδειξη της προσφοράς του GNSS μέσα από μια σειρά από παραδείγματα που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο αυτό, καταγράφεται η αλλαγή της στάθμης της θάλασσας σε περιοχές που ενδέχεται να εκτεθούν σε κινδύνους για μεγάλα τσουνάμι, όπου θα βοηθήσει στην ταχεία προειδοποίηση και στη λήψη αποφάσεων για εκκένωση της πληγείσας περιοχής. Το GNSS μπορεί επίσης να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις εξελίξεις καταγίδων σε παράκτιες περιοχές. Ακόμη, το παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα μπορεί να δείξει την ενεργοποίηση ενός ρήγματος (όπως στο άρθρο με τη περιοχή της Ζακύνθου).

Επίσης, μέσα από το άρθρο που αναφέρεται στο Νεπάλ, τονίζεται η καταγραφή των σεισμικών κυμάτων σε πραγματικό χρόνο με δεδομένα GNSS χρησιμοποιώντας την μέθοδο IGV, όπου η IGV θα συμβάλλει στην έγκαιρη προειδοποίηση του σεισμού, στην πρόβλεψη για τσουνάμι και στην ταχεία εκτίμηση του κινδύνου.

Συνάμα, ο συνδυασμός των σταθμών IGS και της μεθόδου PPP, μπορεί να διευκολύνει τις μετρήσεις μετασεισμικών παραμορφώσεων για ένα ευρύ φάσμα χωρικής και χρονικής ανάλυσης, που μπορεί να γίνει από χρόνια έως ένα δευτερόλεπτο (όπως αναδεικνύεται στο άρθρο στα νησιά sumatra – andaman).

Τέλος, στο κεφάλαιο 3, αναφέρεται ότι η μετατόπιση είναι βασική παράμετρος κατά την αξιολόγηση της ασφάλειας ψηλών και εύκαμπτων τεχνικών κατασκευών. Οι πολιτικοί μηχανικοί απαιτούν ακριβή και αξιόπιστα όργανα για να επιλύσουν τις ανησυχίες τους με γωνιακές κινήσεις, μετατοπίσεις και δομικούς κραδασμούς.

Αν και η πρόοδος της τεχνολογίας παρακολούθησης υγείας GNSS για τη μέτρηση των στατικών, οιονεί στατικών και δυναμικών αποκρίσεων μετατόπισης είναι εντυπωσιακή, δεν έχει ακόμη αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητές της. Τα υπάρχοντα προβλήματα και οι ελπιδοφόρες ερευνητικές προσπάθειες περιλαμβάνουν τουλάχιστον τις ακόλουθες πτυχές.

1. Για να μπορούν οι μετρήσεις πεδίου να επικυρώσουν ένα υπολογιστικό μοντέλο, ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι ένας βασικός δείκτης που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Ωστόσο, μέχρι σήμερα, έχει τον υψηλότερο ρυθμό δεδομένων GNSS που χρησιμοποιείται σε πειράματα ήταν 20 Hz, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούσαν να εντοπιστούν μόνο δυναμικές δομής μικρότερες από 10 Hz, λαμβάνοντας υπόψη άλλους προϋπολογισμούς σφαλμάτων. Τα νέα συστήματα RTK- GNSS δειγματοληψίας 100 Hz και άνω έχουν εμφανιστεί, αλλά πρέπει να πραγματοποιηθούν περαιτέρω δοκιμές για να διασφαλιστεί η ανεξαρτησία των μετρήσεων, καθώς και η αποτελεσματική επίλυση των προβλημάτων υπέρβασης δεδομένων.

2. Η ποιότητα των μετρήσεων GNSS εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, κυρίως από την ορατότητα του δορυφόρου, τη διαθεσιμότητα και τη γεωμετρία, την ποιότητα του σήματος που αποστέλλεται και τις καθυστερήσεις που προκαλούνται από τα κύματα GNSS που διασχίζουν την ιονόσφαιρα και την τροπόσφαιρα. Μετά την υιοθέτηση της τεχνικής της διπλής διαφοροποίησης, το πρωταρχικό μέλημα για την παρακολούθηση GNSS, ιδιαίτερα στις αστικές ζώνες, είναι το φαινόμενο πολλαπλών διαδρομών. Έτσι, η επιλογή της θέσης του δέκτη, η διάρκεια των μετρήσεων και ο κατάλληλος σχεδιασμός λογισμικού για το φιλτράρισμα των σημάτων πολλαπλών διαδρομών θα πρέπει να προκαλούν αρκετή προσοχή.

3. Αναμφίβολα, ένα ολοκληρωμένο σύστημα αισθητήρων που αποτελείται από το GNSS και άλλους αισθητήρες μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ακρίβεια, την αξιοπιστία και την παραγωγικότητα του συνολικού συστήματος παρακολούθησης. Αυτό οδηγεί στην πρόκληση της συγκέντρωσης πρόσθετων δεδομένων, απαιτώντας περισσότερο εύρος ζώνης επικοινωνίας. Έτσι, όλες οι μετρήσεις θα πρέπει να συλλέγονται ανεξάρτητα σε πραγματικό χρόνο και να μετατρέπονται αξιόπιστα σε ένα ενιαίο σύστημα συντεταγμένων.

4. Η μακροχρόνια παρακολούθηση θα οδηγήσει στην πρόκληση της αντιμετώπισης δυνητικά τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων, που απαιτούν μεγάλα υπολογιστικά φορτία. Επομένως, οι αποτελεσματικές τεχνικές μείωσης δεδομένων γίνονται απαραίτητα εργαλεία για το χειρισμό του παραγόμενου συστήματος δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, είναι απαραίτητη μια τεχνική φιλτραρίσματος και εξομάλυνσης που να είναι ικανή να αντιμετωπίσει εκτιμήσεις πολλαπλών ρυθμών. Επομένως, πρέπει να αναπτυχθεί ένα κατάλληλο πακέτο λογισμικού για τον συγχρονισμό των διαφορετικών

χρονοσειρών από τους αισθητήρες κατά τη μετα-επεξεργασία, το οποίο μπορεί να επιτρέψει σε κάθε τύπο αισθητήρα να παίξει με τις εγγενείς δυνάμεις του.

ΓΕΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Δορυφορική πλοήγηση, Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation στις 11/12/2021.
- Παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης (GNSS), Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf> στις 25/12/2021.
- Al-Bayari, O. and Sadoun, B., (2005). New centralized automatic vehicle location communications software system under GIS environment. *International Journal of Communication System*, 18(9): 833-846.
- Aerospace Corporation, (2003). *GPS Primer: A Student Guide to the Global Positioning System*. Los Angeles, USA. Available at : <http://www.aero.org/education/primers/gps/GPS-Primer.pdf> (access date 12/2005).
- Betz, J. W. (2002). Binary offset carrier modulation for radio navigation. *Navigation*, 48 (4): 227-246.
- Dierendonck, A J and Hegarty, C. (2000). The new L5 Civil GPS Signal. *GPS World*, 11, 64-71.
- Euler H. J. (2005): Reference Station Network Information Distribution, IAG Working Group 4.5.1: Network RTK. Available at <http://www.network-rtk.info/euler/euler.html>.
- Feng, Y (2003), Combined Galileo and GPS: A Technical Perspective. *Journal of Global Positioning Systems*, 2 (1): 67-72.
- Fontana, R., W. Cheung, P. Novak, T. Stansell (2001), The New L2 Civil Signal, *Proceedings of US. Institute of Navigation (Salt Lake City, UT, Sept. 11-14)*, pp.

617-631.

- GALILEO (2005). Mission High Level Definition (HLD) (2002), European Commission Communication Document, W. Doc. 2002/05 - Version 3, 23. September 2002 <http://www.galileoju.com> , <http://www.esa.int/esaNA/index.html>.
- GALILEO (2003). Mission Requirement Document (MRD), European Commission, Issue 5– Rev. 1.1, 27. March 2003. Available at <http://www.galileoju.com>.
- GLONASS-ICD (2002). GLONASS Interface Control Document. Version 5, 2002, available from http://www.glonass-center.ru/ICD02_e.pdf.
- ICD-GPS-200C (2003). Interface Control Document: Navstar GPS Space Segment/ Navigation User Interfaces. US DOD, IRN-200C-005R1, 14 Jan 2003. Available at <http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/icd200/default.htm>.
- Lachapelle, G. M.E., Cannon, K. O’Keefe, and P. Alves (2002). How Will Galileo Improve Positioning Performance? GPS World, 13 (9): 38 – 48.
- Leick A., 2003, GPS Satellite Surveying, 3rd ed. New York: John Wiley and Sons.
- Liu G., and Lachapelle G. (2002). Ionosphere Weighted GPS Cycle Ambiguity Resolution, Proceedings of the U.S. Institute of Navigation National Technical Meeting, (San Diego, CA, January 2002), pp.889-899.
- Lohnert E., wittmann E., Pielmeier J. and Sayda F., (2001). PARAMOUNT public safety & commercial Info-Mobility applications & Services in the Mountains. ION GPS 2001 , 11-14 september 2001, salt Lake City, UT, pp 319-325.

- Julien O., Alves P., Cannon M.E., Lachapelle G. (2004b) Improved Triple-Frequency GPS/GALILEO Carrier Phase Ambiguity Resolution Using a Stochastic Ionosphere Modeling, Proceedings of ION NTM 2004 January San Diego, CA.
- Julien O., Zheng B., Dong L., and Lachapelle G. (2004a). A Complete Software-Based IF GNSS Signal Generator for Software Receiver Development, ION GNSS 2004, Sept. 21-24, Long Beach, CA pp 1-12.
- Hein G., Godet J., Issler J.-L., Martin J.-C., Erhard P., Lucas-Rodriguez R., and Pratt T. (2003). Galileo Frequency and Signal Design. GPS World, June 2003, pp30-37.
- Hein G.W., Irsigler M., Avila-Rodriguez J.A., Pany T. (2004). Performance of Galileo L1 Signal Candidates. Proc. ENC-GNSS 2004, Rotterdam, The Netherlands, May 2004. Available at : <http://forschung.unibw-muenchen.de/papers/ktmzvvhb7tqqpis3srpl7anp3bk6izl.pdf>.
- Heinrichs G., Germany G., Winkel J., Drewes C., Maurer L., Springer A., Stuhlberger R., Wicpalek C., (2005). A Hybrid Galileo/UMTS Receiver Architecture for Mass-Market Applications, GNSS 2005, available at : http://www.gawain-receivers.com/publications/IfEN_Paper_GAWAIN_GNSS2005.pdf.
- Hightower J., G. Borriello, (2001). Location Systems for Ubiquitous Computing. Computer, IEEE Computer Society Press, 34(8): 57-66.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., and Collins J. (2001), Global Positioning System: Theory and Practice, 5th ed. New York: Springer Verlag Wien.

- Mulassano P., Dosis F., Clomb F. (2004) European projects for innovative GNSS-related applications. *GPS Solutions*, 7: 268-270.
- Salgado, S, Abbondanza, S, Blondel, R and Lannelongue, S (2001). Constellation availability concepts for Galileo. *Proceedings of ION NTM 2001*, Long Beach, CA, 22-24 January 2001, pp 778-786.
- Wooden W.H., (1985). Navstar Global Positioning System. *Proceedings of the first International Symposium on Precise Positioning with Global Positioning System*, Rockville, Maryland, April 15-19, vol. 1, pp 23-32.
- Ries L., Macabiau C., Nouvel O., Jeandel Q., Vigneau W., Calmettes V. and Issler JL. (2002). A Software Receiver for GPS-IIF L5 Signal. *Proc ION-GPS 2002*, Sep 2002, pp1540-1553.
- Schmid A., Neubaur A., Ehm H., Weigel R., Lemke N., Heinrichs G., Winkel J., AvilaRodriguez J. A., Kaniuth R., Pany Thomas, Eissfeller B., Rohmer G., Niemann B., and Overbeck M. (2004). Combined Galileo/GPS Architecture for Enhanced Sensitivity Reception. *AEU Int. J. Electron. Commun.* 51(1):1-8.
- Seeber G. (2003). *Satellite Geodesy: Foundation, Methods, and applications*. Walter de Gruyter, Berlin New York.
- Omar, S. and Rizos, C. (2003). *Incorporating GPS into Wireless Networks: Issues And Challenges*. Presented at SatNav 2003 The 6th International Symposium on Satellite Navigation Technology Including Mobile Positioning & Location Services Melbourne, Australia 22–25 July 2003 . Available at: http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/omar_etal2003a.pdf.

- Nicopolitidis, P., Obaidat, M. S., Papadimitriou G. I., and Pomportsis, A. S. (2003) Wireless Networks, John Wiley & Sons.
- WAAS (2002). <http://www.gps.faa.gov/Programs/WAAS/waas.htm>.
- Zhang, W., Cannon M.E., Julien O., and Alves P. (2003). Investigation of Combined GPS/GALILEO Cascading Ambiguity Resolution Schemes, Proceedings of U.S. Institute of Navigation GPS/GNSS (Portland, OR, Sept. 9-12), pp. 2599-2610.
- Larson, K. M., Lay, T., Yamazaki, Y., Cheung, K. F., Ye, L., Williams, S. D., & Davis, J. L. (2021). Dynamic sea level variation from GNSS: 2020 Shumagin earthquake tsunami resonance and Hurricane Laura. Geophysical Research Letters, 48(4), e2020GL091378.
- Blewitt, G., Hammond, W. C., & Kreemer, C. (2018). Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary sciences. EOS, 99. <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>
- Chen, N., Han, G., Yang, J., & Chen, D. (2014). Hurricane Sandy storm surges observed by HY-2A satellite altimetry and tide gauges. Journal of Geophysical Research: Oceans, 119(7), 4542–4548. <https://doi.org/10.1002/2013JC009782>
- Cheung, K. F., Bai, Y., & Yamazaki, Y. (2013). Surges around the Hawaiian Islands from the 2011 Tohoku tsunami. Journal of Geophysical Research: Oceans, 118, 5703–5719. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20413>
- Crowell, B. W., & Melgar, D. (2020). Slipping the Shumagin Gap: A kinematic coseismic and early afterslip model of the MW 7.8 Simeon Island, Alaska, earthquake. Geophysical Research Letters, 47(19), e2020GL090308.

<https://doi.org/10.1029/2020GL090308>

- DART. (2020). <https://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/>
- Davies, J., Sykes, L., House, L., & Jacob, K. (1981). Shumagin seismic gap, Alaskan Peninsula: History of great earthquakes, tectonic setting, and evidence for high seismic potential. *Journal of Geophysical Research*, 86, 3821 – 3855. <https://doi.org/10.1029/JB086iB05p03821>
- Fritz, H. M., Blount, C., Sokoloski, R., Singleton, J., Fuggle, A., McAdoo, B. G., et al. (2007). Hurricane Katrina storm surge distribution and field observations on the Mississippi Barrier Islands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 74, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.03.015>
- Geist, E. L. (2012). Near-field tsunami edge waves and complex earthquake rupture. *Pure and Applied Geophysics*, 170(9–10), 1475–1491. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0491-7>
- Hayes, G. P., Moore, G. L., Portner, D. E., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M., & Smoczyk, G. M. (2018). Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. *Science*, 362(6410), 58–61. <https://doi.org/10.1126/science.aat4723>
- Larson, K. M. (2020). GNSSREFL. <https://pypi.org/project/gnssrefl/>
- Larson, K. M., Lofgren, J. S., & Haas, R. (2013a). Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver. *Advances in Space Research*, 51(8), 1301–1310. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.017>
- Larson, K. M., Ray, R. D., Nievinski, F. G., & Freymueller, J. T. (2013b). The Accidental Tide Gauge: A GPS Reflections Case Study from Kachemak Bay,

Alaska IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 10(5), 1200–1204.

<https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2236075>

- Larson, K. M., Ray, R. D., & Williams, S. P. D. (2017). A ten-year comparison of water levels measured with a geodetic GPS receiver versus a conventional tide gauge. *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, 34(2), 295–307.
<https://doi.org/10.1002/2017GL076761>
- Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C. J., Nettles, M., Ward, S. N., Aster, R. C., et al. (2005). The great Sumatra-Andaman earthquake of 26 December 2004. *Science*, 308, 1127–1133. <https://doi.org/10.1126/science.1112250>
- Li, S., & Freymueller, J. T. (2018). Spatial variation of slip behavior beneath the Alaska Peninsula along Alaska-Aleutian subduction zone. *Geophysical Research Letters*, 45, 3453–3460. <https://doi.org/10.1002/2017GL076761>
- Liu, C., Lay, T., Xiong, X., & Wen, Y. (2020). Rupture of the 2020 MW 7.8 earthquake in the Shumagin gap inferred from seismic and geodetic observations. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL090806.
<https://doi.org/10.1029/2020GL090806>
- Melgar, D., Allen, R. M., Riquelme, S., Geng, J., Bravo, F., Baez, J. C., et al. (2016). Local tsunami warnings: Perspectives from recent large events. *Geophysical Research Letters*, 43, 1109–1117.
<https://doi.org/10.1002/2015GL067100>
- Melgar, D., & Ruiz-Angulo, A. (2018). Long-lived tsunami edge waves and shelf resonance from the M8.2 Tehuantepec earthquake. *Geophysical Research Letters*, 45, 12414–12421. <https://doi.org/10.1029/2018GL080823>

- Peng, D., Hill, E. M., Li, L., Switzer, A. D., & Larson, K. M. (2019). Applications of GNSS interferometric reflectometry for detecting storm surges. *GPS Solutions*, 23, 47. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0838-y>
- Roesler, C. J., & Larson, K. M. (2018). Software Tools for GNSS Interferometric Reflectometry. *GPS Solutions*, 22, 80. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0744-8>
- Soria, J. L. A., Switzer, A. D., Villanoy, C. L., Fritz, H. M., Bilgera, P. H. T., Cabrera, O. C., et al. (2006). Repeat storm surge disasters of Typhoon Haiyan and its 1897 predecessor in the Philippines. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(1), 31–48. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00245.1>
- Soulé, B. (2014). Post-crisis analysis of an ineffective tsunami alert: the 2010 earthquake in Maule, Chile. *Disasters*, 38, 375–397. <https://doi.org/10.1111/disa.12045>
- Strandberg, J., Hobiger, T., & Haas, R. (2016). Improving GNSS-R sea level determination through inverse modeling of SNR data. *Radio Science*, 51, 1286–1296. <https://doi.org/10.1002/2016RS006057>
- Williams, S. D. P. (2020). NOctidefit. <https://git.noc.ac.uk/noc-tide-gauges/noc-tgqc/-/blob/master/NOctidefit>
- Yamazaki, Y., & Cheung, K. F. (2011). Shelf resonance and impact of near-field tsunami generated by the 2010 Chile earthquake. *Geophysical Research Letters*, 38, L12605. <https://doi.org/10.1029/2011GL047508>
- Yamazaki, Y., Cheung, K. F., & Kowalik, Z. (2011). Depth-integrated, non-hydrostatic model with grid nesting for tsunami generation, propagation, and run-up. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 67(12), 2081–2107.

<https://doi.org/10.1002/flid.2485>

- Yamazaki, Y., Cheung, K. F., & Lay, T. (2018). A self-consistent fault slip model for the 2011 Tohoku earthquake and tsunami. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 1435–1458.

- Yamazaki, Y., Kowalik, Z., & Cheung, K. F. (2009). Depth-integrated, non-hydrostatic model for wave breaking and run-up. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 61(5), 473–497.

<https://doi.org/10.1002/flid.1952>

- Yoshimoto, M., Watada, S., Fujii, Y., & Satake, K. (2016). Source estimate and tsunami forecast from far-field deep ocean tsunami waveforms — The 27 February 2010 MW 8.8 Maule earthquake. *Geophysical Research Letters*, 43, 659–665.

<https://doi.org/10.1002/2015GL067181>

- Ganas A., Briole P., Bozionelos G., Barberopoulou A., Elias P., Tsironi V., Valkaniotis S., Moshou A. & Mintourakis I. (2020). The 25 October 2018 Mw= 6.7 Zakynthos earthquake (Ionian Sea, Greece): A low-angle fault model based on GNSS data, relocated seismicity, small tsunami and implications for the seismic hazard in the west Hellenic Arc. *Journal of Geodynamics*, 137, 101731.

- Altamimi, Z., Métivier, L., Collilieux, X., 2012. ITRF2008 plate motion model. *J. Geophys. Res.: Solid Earth* 117 (B7). <https://doi.org/10.1029/2011JB008930>.

- Andronikidis, N., Kokinou, E., Vafidis, A., Kamberis, E., Manoutsoglou, E., 2018. Deformation patterns in the southwestern part of the Mediterranean Ridge (South Matapan Trench, Western Greece). *Mar. Geophys. Res.* 1–16.

<https://doi.org/10.1007/s11001-017-9337-0>.

- Baker, C., Hatzfeld, D.L., Lyon-Caen, H., Papadimitriou, E., Rigo, A., 1997. Earthquake mechanisms of the Adriatic Sea and Western Greece: implications for the oceanic subduction-continental collision transition. *Geophys. J. Int.* 131 (3), 559–594. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb06600.x>.
- Bevis, M., Kendrick, E., Smalley Jr., R., Brooks, B., Allmendinger, R., Isacks, B., 2001. On the strength of interplate coupling and the rate of back arc convergence in the central Andes: an analysis of the interseismic velocity field. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2 (11), 1067. <https://doi.org/10.1029/2001GC000198>.
- Briole, P., 2017. Modelling of earthquake slip by inversion of GNSS and InSAR data assuming homogenous elastic medium. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1098399>.
- Briole, P., et al., 2015. The seismic sequence of January–February 2014 at Cephalonia Island (Greece): constraints from SAR interferometry and GPS. *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 203. pp.1528–1540. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv353>. 3.
- Cattin, R., Briole, P., Lyon-Caen, H., Bernard, P., Pinettes, P., 1999. Effects of Superficial layers on coseismic displacements for a dip-slip fault and geophysical implications. *Geophys. J. Int.* 137, 149–158. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1999.00779.x>.
- Chamot-Rooke, N., Rabaute, A., Kreemer, C., 2005. Western Mediterranean Ridge mud belt correlates with active shear strain at the prism-backstop geological contact. *Geology* 33 (11), 861–864. <https://doi.org/10.1130/G21469.1>.
- Chousianitis, K., Konca, A.O., 2019. Intraslab deformation and rupture of the

Entire subducting crust during the 25 October 2018 Mw 6.8 Zakynthos earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 46. <https://doi.org/10.1029/2019GL085845>.

- Cirella, A., Romano, F., Avallone, A., Piatanesi, A., Briole, P., Ganas, A., Theodoulidis, N., Chousianitis, K., Volpe, M., Bozionellos, G., Selvaggi, G., Lorito, S., 2020. The 2018 Mw 6.8 Zakynthos (Ionian Sea, Greece) Earthquake: seismic source and local tsunami characterization. *Geophys. J. Int.* ggaa053. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa053>.
- Clement, Ch., Hirn, A., Charvis, P., Sachpazi, M., Marnelis, F., 2000. Seismic structure and the active Hellenic subduction in the Ionian islands. *Tectonophysics* 329, 141–156.
- Devoti, R., et al., 2017. A combined velocity field of the Mediterranean region. *Ann. Geophys.* 60 (2), 0215. <https://doi.org/10.4401/ag-7059>.
- England, P., Howell, A., Jackson, J., Synolakis, C., 2015. Palaeotsunamis and Tsunami hazards in the Eastern Mediterranean. *Philos. Trans. R. Soc.: Math. Phys. Eng. Sci.* 373 (2053). <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0374>. 20140374.
- Floyd, M.A., Billiris, H., Paradissis, D., Veis, G., Avallone, A., Briole, P., McClusky, S., Nocquet, J., Palamartchouk, K., Parsons, B., England, P.C., 2010. A new velocity field for Greece: implications for the kinematics and dynamics of the Aegean. *J. Geophys. Res.: Solid Earth* 115 (B10). <https://doi.org/10.1029/2009JB007040>.
- Ganas, A., Parsons, T., 2009. Three-dimensional model of Hellenic Arc deformation and origin of the Cretan uplift. *J. Geophys. Res.: Solid Earth* 114 (B6). <https://doi.org/10.1029/2008JB005599>.

- Ganas, A., Drakatos, G., Rontogianni, S., Tsimi, C., Petrou, P., Papanikolaou, M., Argyrakis, P., Boukouras, K., Melis, N., Stavrakakis, G., 2008. NOANET: the new permanent GPS network for Geodynamics in Greece. *Geophysical Research Abstracts Vol. 10 EGU2008-A-04380*.
- Ganas, A., Serpelloni, E., Drakatos, G., Kolligri, M., Adamis, I., Tsimi, C., Batsi, E., 2009. The Mw 6.4 SW-Achaia (western Greece) earthquake of 8 June 2008: seismological, field, GPS observations, and stress modeling. *J. Earthquake Eng.* 13 (8), 1101–1124. <https://doi.org/10.1080/13632460902933899>.
- Ganas, A., Marinou, A., Anastasiou, D., Paradissis, D., Papazissi, K., Tzavaras, P., Drakatos, G., 2013. GPS-derived estimates of crustal deformation in the central and north Ionian Sea, Greece: 3-yr results from NOANET continuous network data. *J. Geodyn.* 67, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.05.010>.
- Ganas, A., Cannavo, F., Chousianitis, K., Kassaras, I., Drakatos, G., 2015. Displacements recorded on continuous GPS stations following the 2014 M6 Cephalonia (Greece) earthquakes: dynamic characteristics and kinematic implications. *Acta Geodyn. Geomater* 12 (1), 5–27. <https://doi.org/10.13168/AGG.2015.0005>. 177.
- Ganas, A., et al., 2016. Coseismic deformation, field observations and seismic fault of the 17 November 2015 M=6.5, Lefkada Island, Greece earthquake. *Tectonophysics* 687, 210–222. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.08.012>. ISSN 0040-1951.
- Ganas, A., Andritsou, N., Kosma, C., Argyrakis, P., Tsironi, V., Drakatos, G., 2018. A 20-yr database (1997-2017) of co-seismic displacements from GPS recordings in the Aegean area and their scaling with Mw and hypocentral distance. *Bull. Geol. Soc. Greece* 52 (1), 98–130.

<https://doi.org/10.12681/bgsg.18070>.

- Ganas, A., Briole, P., Bozionelos, G., Elias, P., Valkaniotis, S., Tsironi, V., Moshou, A., Andritsou, N., 2019. The October 25, 2018 M6.7 Zakynthos Earthquake Sequence (Ionian Sea, Greece): Fault Modelling from Seismic and GNSS Data and Implications for Seismic Strain Release Along the Western Hellenic Arc. Bull. Geological Society of Greece, Special Publication 7, pp. 602–603.
- Gesret, A., Laigle, M., Diaz, J., Sachpazi, M., Charalampakis, M., Hirn, A., 2011. Slab top dips resolved by teleseismic converted waves in the hellenic subduction zone. Geophys. Res. Lett. 38 (20).
<https://doi.org/10.1029/2011GL048996>.
- Haddad, A., Ganas, A., Kassaras, I., Lupi, M., 2020. Seismicity and geodynamics of western Peloponnese and central Ionian Islands: insights from a local seismic deployment. Tectonophysics 778, 228353.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228353>.
- Halpaap, F., Rondenay, S., Ottemöller, L., 2018. Seismicity, deformation, and Metamorphism in the Western Hellenic subduction zone: new constraints from tomography. J. Geophys. Res.: Solid Earth 123 (4), 3000–3026.
<https://doi.org/10.1002/2017JB015154>.
- Halpaap, F., et al., 2019. Earthquakes track subduction fluids from slab source to Mantle wedge sink. Sci. Adv. 5 (4) eaav7369.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aav7369>.
- Haslinger, F., Kissling, E., Ansorge, J., Hatzfeld, D., Papadimitriou, E., Karakostas, V., Makropoulos, K., Kahle, H.-G., Peter, Y., 1999. 3-D crystal

structure from local earthquake tomography around the Gulf of Arta (Ionian region, NW Greece). *Tectonophysics* 304 (3), 201–218.

[https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00298-4](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00298-4).

- Hatzfeld, D., Pedotti, G., Hatzidimitriou, P., Makropoulos, K., 1990. The strain pattern in the western Hellenic arc deduced from a microearthquake survey. *Geophys. J. Int.* 101 (1), 181–202.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb00767.x>.
- Hirn, A., Sachpazi, M., Siliqi, R., Bride, S.Mc, Marnelis, F., the STREAMERS/PROFILES group, 1996. A traverse front with coincident normal incidence and wide angle seismic. *Tectonophysics* 267, 57–71.
- Hollenstein, C., Geiger, A., Kahle, H.G., Veis, G., 2006. CGPS time-series and Trajectories of crustal motion along the West Hellenic Arc. *Geophys. J. Int.* 164 (1), 182 – 191. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02804.x>.
- Husen, S., Smith, 2004. Probabilistic earthquake relocation in three-dimensional Velocity models for the Yellowstone National Park Region. *Wyoming Bull. Seismol. Soc. Am.* 94 (3), 880–896.
- Husen, S., Kissling, E., Deichmann, N., Wiemer, S., Giardini, D., Baer, M., 2003. Probabilistic earthquake location in complex three-dimensional velocity models: application to Switzerland. *J. Geophys. Res.: Solid Earth* 108 (B2).
<https://doi.org/10.1029/2002JB001778>.
- Ilieva, M., Briole, P., Ganas, A., Dimitrov, D., Elias, P., Mouratidis, A., Charara, R., 2016. Fault plane modelling of the 2003 August 14 Lefkada Island (Greece) earthquake based on the analysis of ENVISAT SAR interferograms. *Tectonophysics* 693, 47–65. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.10.021>.

- INGV RING Working Group, 2016. Rete Integrata Nazionale GPS. 10.13127. .

- ITSAK, 2018. On-Line Report. . (Accessed 4 April 2019).
http://www.itsak.gr/uploads/news/earthquake_reports/EQ_ZAKYNTHOS_20181026_M6.8_v2_el.pdf.

- Jolivet, L., Menant, A., Sternai, P., Rabillard, A., Arbaret, L., Augier, R., Laurent, V., Beaudoin, A., Grasemann, B., Huet, B., Labrousse, L., Le Pourhiet, L., 2015. The geological signature of a slab tear below the Aegean. *Tectonophysics* 659, 166–182. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.08.004>.

- Kahle, H.-G., et al., 1995. The strain field in NW Greece and the Ionian Islands: Results inferred from GPS measurements. *Tectonophysics* 249, 41–52.

- Kahle, H.-G., Cocard, M., Peter, Y., Geiger, A., Reilinger, R., Barka, A., Veis, G., 2000. GPS-derived strain rate field within the boundary zones of the Eurasian, African and Arabian Plates. *J. Geophys. Res.: Solid Earth* 105 (B10), 23353–23370. <https://doi.org/10.1029/2000JB900238>.

- Kapetanidis, V., Kassaras, I., 2019. Contemporary crustal stress of the Greek region deduced from earthquake focal mechanisms. *J. Geodyn.* 123, 55–82. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.11.004>.

- Karastathis, V.K., Mouzakiotis, E., Ganas, A., Papadopoulos, G.A., 2015. High-Precision relocation of seismic sequences above a dipping Moho: the case of The January–February 2014 seismic sequence on Cephalonia island (Greece). *Solid Earth* 6 (1), 173 10.5194/se-6-173-2015.

- Kiratzi, A., Louvari, E., 2003. Focal mechanisms of shallow earthquakes in the Aegean Sea and the surrounding lands determined by waveform modelling: a

new database. *J. Geodyn.* 36 (1–2), 251–274.

[https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(03\)00050-4](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(03)00050-4).

- Kokinou, E., Papadimitriou, E., Karakostas, V., et al., 2006. The Kefalonia Transform Zone (offshore Western Greece) with special emphasis to its prolongation towards the Ionian Abyssal Plain. *Mar. Geophys. Res.* 27, 241–252. <https://doi.org/10.1007/s11001-006-9005-2>.
- Kokkalas, S., Kamberis, E., Xypolias, P., Sotiropoulos, S., Koukouvelas, I., 2013. Coexistence of thin-and thick-skinned tectonics in Zakynthos area (western Greece): insights from seismic sections and regional seismicity. *Tectonophysics* 597, 73–84. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.004>.
- Kreemer, C., Chamot-Rooke, N., 2004. Contemporary kinematics of the southern Aegean and the Mediterranean Ridge. *Geophys. J. Int.* 157, 1377–1392.
- Krischer, L., Megies, T., Barsch, R., Beyreuther, M., Lecocq, T., Caudron, C., Wassermann, J., 2015. ObsPy: a bridge for seismology into the scientific python ecosystem. *Comput. Sci. Discovery* 8 (1), 014003. <https://doi.org/10.1088/1749-4699/8/1/014003>.
- Laigle, M., Hirn, A., Sachpazi, M., Clément, C., 2002. Seismic coupling and structure of the Hellenic subduction zone in the Ionian Islands region. *Earth. Planet. Sci. Lett.* 200 (3–4), 243–253. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00654-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00654-4).
- Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C.J., Koper, K.D., Hutko, A.R., Ye, L., Yue, H., Rushing, T.M., 2012. Depth-varying rupture properties of subduction zone

megathrust faults. *J. Geophys. Res.* 117, B04311.

<https://doi.org/10.1029/2011JB009133>.

- Lomax, A., Curtis, A., 2001. Fast, probabilistic earthquake location in 3D models using oct-tree importance sampling. In *Geophys. Res. Abstr.* 3, 955.
- Lomax, A., Virieux, J., Volant, P., Berge-Thierry, C., 2000. Probabilistic earthquake location in 3D and layered models. *Advances in Seismic Event Location*. Springer, Dordrecht, pp. 101–134.
- Louvari, E., Kiratzi, A.A., Papazachos, B.C., 1999. The Cephalonia Transform Fault and its extension to western Lefkada island (Greece). *Tectonophysics* 308, 223–236.
- Loveless, J.P., Meade, B.J., 2011. Spatial correlation of interseismic coupling and coseismic rupture extent of the 2011 MW = 9.0 Tohoku-oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 38, L17306. <https://doi.org/10.1029/2011GL048561>.
- Makropoulos, K., Kaviris, G., Kouskouna, V., 2012. An updated and extended earthquake catalogue for Greece and adjacent areas since 1900. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12 (5), 1425–1430. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1425-2012>.
- Melgar, D., Ganas, A., Geng, J., Liang, C., Fielding, E.J., Kassaras, I., 2017. Source characteristics of the 2015 Mw6. 5 Lefkada, Greece, strike-slip earthquake. *J. Geophys. Res.: Solid Earth* 122 (3), 2260–2273. <https://doi.org/10.1002/2016JB013452>.
- Melgar, D., Ruiz-Angulo, A., Garcia, E.S., et al., 2018. Deep embrittlement and Complete rupture of the lithosphere during the Mw 8.2 Tehuantepec

earthquake. *Nature Geosci* 11, 955–960.

<https://doi.org/10.1038/s41561-018-0229-y>.

- Meng, Q., Heeszel, D.S., Ye, L., Lay, T., Wiens, D.A., Jia, M., Cummins, P.R., 2015. The 3 May 2006 (Mw 8.0) and 19 March 2009 (Mw 7.6) Tonga earthquakes: Intraslab compressional faulting below the megathrust. *J. Geophys. Res.: Solid Earth* 120 (9), 6297–6316.
<https://doi.org/10.1002/2015JB012242>.
- Okada, Y., 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 82 (2), 1018–1040.
- Papadimitriou, P., et al., 2012. The spatially extended 2006 April Zakynthos (Ionian Islands, Greece) seismic sequence and evidence for stress transfer. *Geophys. J. Int.* 190, 1025–1040.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05444.x>.
- Papadimitriou, E., Karakostas, V., Mesimeri, M., Vallianatos, F., 2016. The Mw 6.7 12 October 2013 western Hellenic Arc main shock and its aftershock sequence: implications for the slab properties. *Int. J. Earth Sci.* 105 (7), 2149–2160. <https://doi.org/10.1007/s00531-016-1294-3>.
- Papadopoulos, G., Agalos, A., Annunziato, A., Bocchini, G., Charalampakis, M., Novikova, T., Triantafyllou, I., 2019. The South Ionian Sea earthquake (Mw6.8) of 25 October 2018 and its associated tsunami. *Geophysical Research Abstracts Vol. 21 EGU2019-13705*.
- Papoulia, J., et al., 2014. A new seismogenic model for the Kyparissiakos Gulf And western Peloponnese (SW Hellenic Arc). *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 55 (2).

- Pérouse, E., Sébrier, M., Braucher, R., Chamot-Rooke, N., Bourlès, D., Briole, P., Sorel, D., Dimitrov, D., Arsenikos, S., 2017. Transition from collision to subduction in Western Greece: the Katouna–Stamna active fault system and regional kinematics. *Int. J. Earth Sci.* 106 (3), 967–989.
<https://doi.org/10.1007/s00531-016-1345-9>.

- Reilinger, R., et al., 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal Geophysical Research: Solid Earth* 111 (B5).
<https://doi.org/10.1029/2005JB004051>.

- Roumelioti, Z., Benetatos, C., Kiratzi, A., 2009. The 14 February 2008 earthquake (M6.7) sequence offshore south Peloponnese (Greece): source models of the three strongest events. *Tectonophysics* 471 (3–4), 272–284.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.02.028>.

- Royden, L.H., Papanikolaou, D., 2011. Slab segmentation and late Cenozoic disruption of the Hellenic arc. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 12 (3).

- Ruppert, N.A., Rollins, C., Zhang, A., Meng, L., Holtkamp, S.G., West, M.E., Freymueller, J.T., 2018. Complex faulting and triggered rupture during the 2018 MW 7.9 offshore Kodiak, Alaska, earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 45, 7533–7541. <https://doi.org/10.1029/2018GL078931>.

- Sachpazi, M., Laigle, M., Charalampakis, M., Sakellariou, D., Flueh, E., Sokos, E., Daskalaki, E., Galvé, A., Petrou, P., Hirn, A., 2016. Slab segmentation controls the interplate slip motion in the SW Hellenic subduction: New insight from the 2008 Mw 6.8 Methoni interplate earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 43

(18), 9619–9626. <https://doi.org/10.1002/2016GL070447>.

- Sallarès, V., Ranero, C.R., 2019. Upper-plate rigidity determines depth-varying Rupture behaviour of megathrust earthquakes. *Nature* 576, 96–101. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1784-0>.
- Sokos, E., Gallovič, F., Evangelidis, C.P., Serpetsidaki, A., Plicka, V., Kostelecký, J., Zahradník, J., 2020. The 2018 Mw 6.8 Zakynthos, Greece, earthquake: dominant strike-slip faulting near subducting slab. *Seismol. Res. Lett.* XX, 1–12. <https://doi.org/10.1785/0220190169>.
- Stiros, S.C., Pirazzoli, P.A., Laborel, J., Laborel-Deguen, F., 1994. The 1953 earthquake in Cephalonia (Western Hellenic Arc): coastal uplift and halotectonic faulting. *Geophys. J. Int.* 117 (3), 834–849. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb02474.x>.
- Tarantola, A., Valette, B., 1982. Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion. *Rev. Geophys. Space Phys.* 20 (2), 219–232. <https://doi.org/10.1029/RG020i002p00219>.
- Vassilakis, E., Royden, L., Papanikolaou, D., 2011. Kinematic links between Subduction along the Hellenic trench and extension in the Gulf of Corinth, Greece: a multidisciplinary analysis. *Earth Planetary Science Letters* 303 (1–2), 108–120. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.12.054>.
- Vernant, P., Reilinger, R., McClusky, S., 2014. Geodetic evidence for low coupling on the Hellenic subduction plate interface. *Earth. Planet. Sci. Lett.* 385, 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.10.018>.
- Wagner, et al., 2013. High-precision earthquake locations in Switzerland using

Regional secondary arrivals in a 3-D velocity model. *Geophys. J. Int.* 193, 1589–1607. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt052>.

- Wardell, N., Camera, L., Mascle, J., Nicolich, R., Marchi, M., Barison, E., 2014. The structural framework of the Peloponnese continental margin from Zakynthos to Pylos from seismic reflection and morpho-bathymetric data. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 55 (2).
<https://doi.org/10.4430/bgta0087>.
- Wells, D.L., Coppersmith, K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. America* 84, 974–1002.
- Wessel, P., Smith, W.H., 1998. New, improved version of Generic Mapping Tools released. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 79 (47) 579-579.
- Zahradnik, J., Sokos, E., Plicka, V., 2018. Zakynthos 25/10/2018, Mw 6.8 Earthquake: Superposition of Strike-Slip and Thrust? EMSC Web Report. .
https://www.emscsem.org/Files/news/Earthquakes_reports/Zakynthos_2018_Report.pdf.
- Zelt, C.A., Smith, R.B., 1992. Seismic travelt ime inversion for 2-D crustal velocity structure. *Geophys. J. Int.* 108 (1), 16 – 34.
- Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., Webb, F.H., 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res.: Solid Earth* 102 (B3), 5005–5017.
<https://doi.org/10.1029/96JB03860>.

- Geng T., Xie X., Fang R., Su X., Zhao Q., Liu G., Li H., Shi C., & Liu J. (2016). Real - time capture of seismic waves using high-rate multi-GNSS observations: Application to the 2015 Mw 7.8 Nepal earthquake. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 161-167.
- Allen, R. M., and A. Ziv (2011), Application of real-time GPS to earthquake early warning, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L16310, doi:10.1029/2011GL047947.
- Benedetti, E., M. Branzanti, L. Biagi, G. Colosimo, A. Mazzoni, and M. Crespi (2014), Global navigation satellite systems seismology for the 2012 Mw 6.1 Emilia earthquake: Exploiting the VADASE algorithm, *Seismol. Res. Lett.*, 85(3), 649–656.
- Bock, Y., R. M. Nikolaidis, P. J. de Jonge, and M. Bevis (2000), Instantaneous geodetic positioning at medium distances with the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 105(B12), 28,223–28,253, doi:10.1029/2000JB900268.
- Bock, Y., D. Melgar, and B. W. Crowell (2011), Real-time strong-motion broadband displacements from collocated GPS and accelerometers, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 101(6), 2904–2925.
- Boore, D. M. (2001), Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 91(5), 1199–1211.
- Branzanti, M., G. Colosimo, M. Crespi, and A. Mazzoni (2013), GPS near-real-time coseismic displacements for the great Tohoku-Oki earthquake, *IEEE Geosci. Remote Sens.*, 10(2), 372–376.
- Chen, G., and Q. Zhao (2014), Near-field surface displacement and permanent

deformation induced by the Alaska Mw 7.5 earthquake determined by high-rate real-time ambiguity-fixed PPP solutions, *Chin. Sci. Bull.*, 59(34), 4781–4789.

- Colosimo, G., M. Crespi, and A. Mazzoni (2011), Real-time GPS seismology with a stand-alone receiver: A preliminary feasibility demonstration, *J. Geophys. Res.*, 116, B11302, doi:10.1029/2010JB007941.
- Dreger, D., and A. Kaverina (2000), Seismic remote sensing for the earthquake source process and near-source strong shaking: A case study of the October 16, 1999 Hector Mine earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 27(13), 1941–1944, doi:10.1029/1999GL011245.
- Fan, W., and P. M. Shearer (2015), Detailed rupture imaging of the 25 April 2015 Nepal earthquake using teleseismic P waves, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 5744–5752, doi:10.1002/2015GL064587.
- Fang, R. X., C. Shi, W. W. Song, G. X. Wang, and J. N. Liu (2014), Determination of earthquake magnitude using GPS displacement waveforms from real-time precise point positioning, *Geophys. J. Int.*, 196(1), 461–472.
- Galetzka, J., et al. (2015), Slip pulse and resonance of the Kathmandu basin during the 2015 Gorkha earthquake, Nepal, *Science*, 349, 1091–1095, doi:10.1126/science.aac6383.
- Geng, J., Y. Bock, D. Melgar, B. W. Crowell, and J. S. Haase (2013), A new seismogeodetic approach applied to GPS and accelerometer observations of the 2012 Brawley seismic swarm: Implications for earthquake early warning, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 14, 2124–2142, doi:10.1002/ggge.20144.

- Hoechner, A., M. Ge, A. Y. Babeyko, and S. V. Sobolev (2013), Instant tsunami early warning based on real-time GPS—Tohoku 2011 case study, *Nat. Hazard Earth Sys.*, 13(5), 1285–1292.
- Kouba, J. (2003), Measuring seismic waves induced by large earthquakes with GPS, *Stud. Geophys. Geod.*, 47(4), 741–755.
- Larson, K. M., P. Bodin, and J. Gomberg (2003), Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali fault earthquake, *Science*, 300(5624), 1421–1424.
- Lay, T., and T. C. Wallace (1995), *Modern Global Seismology*, Academic Press, London.
- Li, M., W. Li, R. Fang, C. Shi, and Q. Zhao (2014), Real-time high-precision earthquake monitoring using single-frequency GPS receivers, *GPS Solut.*, 19(1), 27 – 35.
- Melgar, D., B. W. Crowell, J. Geng, R. M. Allen, Y. Bock, S. Riquelme, E. M. Hill, M. Protti, and A. Ganas (2015), Earthquake magnitude calculation without saturation from the scaling of peak ground displacement, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 5197 – 5205, doi:10.1002/2015GL064278.
- Montenbruck, O., A. Hauschild, P. Steigenberger, U. Hugentobler, P. Teunissen, and S. Nakamura (2013), Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-2 regional navigation satellite system, *GPS Solut.*, 17(2), 211 – 222.
- Shi, C., Y. Lou, H. Zhang, Q. Zhao, J. Geng, R. Wang, R. Fang, and J. Liu (2010), Seismic deformation of the Mw 8.0 Wenchuan earthquake from

High - rate GPS observations, *Adv. Space Res.*, 46, 228–235.

- Shi, C., Q. L. Zhao, Z. G. Hu, and J. N. Liu (2013), Precise relative positioning using real tracking data from COMPASS GEO and IGSO satellites, *GPS Solut.*, 17 (1), 103 – 119.
- U.S. Geological Survey (USGS) (2015), Event page. [Available at <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002926>.]
- Xu, A., Z. Xu, M. Ge, X. Xu, H. Zhu, and X. Sui (2013), Estimating zenith tropospheric delays from BeiDou navigation satellite system observations, *Sensors*, 13(4), 4514 – 4526.
- Yue, H., and T. Lay (2011), Inversion of high-rate (1 sps) GPS data for rupture process of the 11 March 2011 Tohoku earthquake (Mw9.1), *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G09, doi:10.1029/2011GL048700.
- Zumberge, J. F., M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, and F. H. Webb (1997), Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.*, 102(B3), 5005–5017, doi:10.1029/96JB03860.
- Kouba, J. (2005). A possible detection of the 26 December 2004 Great Sumatra-Andaman Islands Earthquake with solution products of the International GNSS Service. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 49(4), 463-483.
- Aoyama Y. and Naito I., 2001. Atmospheric excitation of the Chandler wobble, 1983–1998. *J. Geophys Res.*, 106(B5), 8941 – 8954.
- Barnes R.T.H., Hide R., White A.A. and Wilson C.A., 1983. Atmospheric

angular momentum fluctuations, length-of-day changes and polar motion. Proc. R. Soc. Lond., Ser. A, 387, 31 – 73.

- Boucher C., Altamimi Z., Sillard P. and Feissel - Vernier M., 2004. ITRF 2000. IERS Technical Note No. 31, BKG Frankfurt a/M, Germany.
- Ferland R., Gendt G. and Schone T., 2004. IGS Reference frame maintenance. IGS Workshop, Bern, Switzerland, March 1–5, 2004, ftp://ftp.unibe.ch/aiub/igs2004/IGS_Reference_Frame/MOPM1_Gendt.pdf.
- Héroux P and Kouba J., 2001. GPS precise point positioning with IGS orbit products. Phys. Chem. Earth A, 26, 573 – 578.
- Kouba J., Mireault Y., Beutler G., Springer T. and Gendt G., 1998a. A discussion of IGS solutions and their impact on geodetic and geophysical applications. GPS Solutions, 2, 3 – 15.
- Kouba J., Ray J. and Watkins M.M., 1998b. IGS reference frame realization. In: J.M. Dow, J. Kouba and T. Springer (Eds.), The 1998 IGS Analysis Center Workshop Proceedings, Darmstadt, Germany, February 9–11, 1988, 139–171.
- Kouba J., 2003a. A Guide to Using International GPS Service (IGS) Products. A report prepared for IGS, ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/igs2003/IGS_Products/GuideToUsingIGSProducts.pdf.
- Kouba J., 2003b. Measuring seismic waves induced by large earthquake with GPS. Stud. Geophys. Geod., 47, 741–755.
- Kouba J., 2005. Comparison of polar motion with oceanic and atmospheric angular momentum time series for 2-day to Chandler periods. J. Geodesy, 79,

33–42.

- Kouba J. and Vondrák J., 2005. Comparison of length of day with oceanic and atmospheric angular momentum series. *J. Geodesy*, 79, 256–268.
- Larson K., Bodin P. and Gomberg J., 2003. Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali fault earthquake. *Science*, 300, 1421–1424.
- Ponte R.M. and Ali A.H., 2002. Rapid ocean signal in polar motion and length of day. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 10.1029/2002GL015312.
- Salstein D.A., Kann D.M., Miller A.J. and Rosen R.D., 1993. The Sub-Bureau for Atmospheric Angular Momentum of the International Earth Rotation Service: A Meteorological Data Center with Geodetic Applications. *Bulletin of American Meteorological Society*, 71, 67–80.
- Tétreault P., Kouba J., Héroux P. and Legree P., 2005. CSRS-PPP: An internet service for GPS user access to the Canadian Spatial Reference Frame. *Geomatica* (in print).
- Yi, Ting-Hua, Hong-Nan Li, and Ming Gu. "Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures." *Structural Control and Health Monitoring* 20.5 (2013): 649 - 670.
- Li HN, Huo LS. Recent developments of structural vibration control in civil engineering in China. *Journal of Earthquake and Tsunami* 2010; 4(1):9 – 21.
- Yi TH, Li HN, Gu M. Optimal sensor placement for structural health monitoring based on multiple optimization strategies. *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 2011; 20(7):881 – 900.

- Sumitro S, Wang ML. Sustainable structural health monitoring system. *Structural Control and Health Monitoring* 2005; 12(3 – 4):455 – 467.
- Brownjohn JM, Pan TC, Deng X. Correlating dynamic characteristics from field measurements and numerical analysis of a high rise building. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2000; 29(4):523 – 543.
- Brownjohn JMW. Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science* 2007; 365(1851): 589 – 622.
- Xie ZN, Gu M. Across-wind dynamic response of high-rise building under wind action with interference effects from one and two tall buildings. *The Structural Design of Tall Special Buildings* 2009; 18(1):37 – 57.
- Quan Y, Gu M, Tamura Y. Experimental evaluation of aerodynamic damping of square super high-rise buildings. *Wind and Structures* 2005; 8(5):309 – 324.
- Park HS, Hong KP, Seo JH. Drift design of steel-frame shear-wall systems for tall buildings. *The Structural Design of Tall Buildings* 2002; 11 (1): 35 – 49.
- Achenbach JD. Structural health monitoring—what is the prescription? *Mechanics Research Communications* 2009; 36(2): 137 – 142.
- Boore DM. Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2001; 91(5): 1199 – 1211.
- Yi TH, Li HN, Gu M. Full scale measurement of dynamic response of a

suspension bridge subjected to environmental loads
using GPS technology. *Science China Technological Sciences* 2010;
53(2): 469 – 479.

- Leica. Introduction to GPS (Global Positioning System) v. 1.0. Leica Geosystems. Heerbrugg, Switzerland, 1999.
- Yi TH, Li HN. Structural Health Monitoring Based on GPS Technology. China Architecture & Building Press: Beijing, 2009.
- Celebi M, Sanli A. GPS in pioneering dynamic monitoring of long-period structures. *Earthquake Spectra* 2002; 18(1): 47 – 61.
- Casciati F, Fuggini C. Towards global positioning system-based structural health Monitoring. In *Trends in Civil and Structural Engineering Computing*, Topping BHV, Costa Neves LF, Barros RC (eds)(eds).. Saxe-Coburg Publications: Scotland, Stirlingshire, 2009.
- Roberts GW, Meng X, Dodson AH, Cosser ME. Geodetic signal diagnosis and its applications to structural deformation. *Proceedings of the 2nd Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, Berlin, Germany, 21 – 24 May, 2002.
- Ogaja C, Rizos C, Han SW. Is GPS good enough for monitoring the dynamics of high-rise buildings? *Proceedings of the 2nd Trans Tasman Surveyors Congress*, Queenstown, New Zealand, 20–26 August, 2000.
- Ge LL, Han SW, Rizos C, Ishikawa Y, Hoshiba M, Yoshida Y, Izawa M, Hashimoto N, Himori S. GPS seismometers with up to 20 Hz sampling rate. *Earth, Planets and Space* 2000; 52(10): 881 – 884.

- Tamura Y, Matsui M, Pagnini LC, Ishibashi R, Yoshida A. Measurement of wind-induced response of buildings using RTK - GPS. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2002; 90(12–15): 1783 – 1793.
- Kijewski-Correa T, Kochly M. Monitoring the wind-induced response of tall buildings: GPS performance and the issue of multipath effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2007 ; 95 (9 – 11) : 1176 – 1198.
- Chan WS, Xu YL, Ding XL, Xiong YL, Dai WJ. Assessment of dynamic measurement accuracy of GPS in three directions. *ASCE Journal of Surveying Engineering* 2006; 132 (3): 108 – 117.
- Casciati F, Fuggini C. Engineering vibration monitoring by GPS: long duration records. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 2009; 8(3): 459 – 467.
- Roberts GW, Cosser E, Meng XL, Dodson A. High frequency deflection monitoring of bridges by GPS. *Journal of Global Positioning Systems* 2004; 3 (1 – 2) : 226 – 231.
- Park HS, Sohn HG, Kim IS, Park JH. Application of GPS to monitoring of wind-induced responses of high-rise buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 2008; 17 (1): 117 – 132.
- Psimoulis PA, Stiros SC. Experimental assessment of the accuracy of GPS and RTS for the determination of the parameters of oscillation of major structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 2008; 23 (5): 389 – 403.
- Psimoulis PA, Pytharouli S, Karambalis D, Stiros S. Potential of Global

Positioning System (GPS) to measure frequencies of oscillations of engineering structures. *Journal of Sound and Vibration* 2008; 318 (3): 606 – 623.

- Breuer P, Chmielewski T, Corski P, Konopk E. Application of GPS technology to measurements of displacements of high - rise structures due to weak winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2002; 90 (3): 223 – 230.
- Nickitopoulou A, Protopsalti K, Stiros S. Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: accuracy, limitations and promises. *Engineering Structures* 2006; 28(10): 1471 – 1482.
- Breuer P, Chmielewski T, Górski P, Konopka E, Tarczynski L. The Stuttgart TV Tower—displacement of the top caused by the effects of sun and wind. *Engineering Structures* 2008; 30(10): 2771 – 2781.
- Yi TH, Li HN, Gu M. Recent research and applications of GPS based technology for bridge health monitoring. *SCIENCE CHINA Technological Sciences* 2010; 53(10): 2597 – 2610.
- Lovse JW, Teskey WF, Lachapelle G, Cannon ME. Dynamic deformation monitoring of tall structure using GPS technology. *ASCE Journal of Survey Engineering* 1995; 121(1): 35 – 40.
- Ogaja C, Rizos C, Wang JL, Brownjohn J. GPS and building monitoring case study: Republic Plaza Building, Singapore. *Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Canada, 5 – 8 June, 2001.*
- Ogaja C, Wang JJ, Rizos C. Detection of wind-induced response by wavelet

transformed GPS solutions. *Journal of Surveying Engineering* 2003; 129(3): 99 – 104.

- Chen YQ, Huang DF, Ding XL, Xu YL, Ko JM. Measurement of vibrations of tall buildings with GPS: a case study. *Proceedings of the International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics, SPIE, Newport Beach, California, USA, 6–8 March, 2001.*
- Yoshida A, Tamura Y, Matsui M, Ishibashi S, Pagnini LC. Measurement of wind-induced response of buildings using RTK - GPS and integrity monitoring. *Proceedings of the 17th National Symposium on Wind Engineering, Japan, 2002, pp.173 – 178.*
- Breuer P. Monitoring the horizontal displacement of slim high towers caused by daily temperature variation and wind impact by application of static and kinematic GPS-Mode: Some results. *Proceedings of the 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, Japan, 12–14 July, 2010.*
- Leonhard F, FernsehturmDS, Stahlbau B. Sonderdruck Heft 4/5. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn: Berlin -Wilmersdorf, 1956.
- Kijewski-Correa T, Kareem A, Kochly M. Experimental verification and full-scale deployment of Global Positioning Systems to monitor the dynamic response of tall buildings. *ASCE Journal of Structural Engineering* 2006; 132(8): 1242 – 1253.
- Kijewski-correa T, Pirnia JD. Dynamic behavior of tall buildings under wind: insights from full-scale monitoring. *The structural design of tall and special buildings* 2007; 16(4): 471 – 486.

- Li HN, Yi TH, Yi XD, Wang GX. Measurement and analysis of wind-induced response of tall building based on GPS technology. *Advances in Structural Engineering* 2007; 10 (1): 83 – 93.
- Seco A, Tirapu F, Ramirez F, Garcia B, Cabrejas J. Assessing building displacement with GPS. *Building and Environment* 2007; 42(1): 393 – 399.
- Kouba J. Measuring seismic waves induced by large earthquakes with GPS. *Studia Geophysica et Geodaetica* 2003; 47(4): 741 – 755.
- Li XJ, Ge LL, Tamura Y, Yoshida A, Rirzo C; Peng GD. Seismic response of a tower as measured by an integrated RTK - GPS system. *Proceedings of the 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering*, Nottingham, United Kingdom, 28 June – 1 July, 2004.
- Cazzaniga NE, Pinto L, Forlani G, Abruzzi P. Monitoring oscillations of slender structures with GPS and accelerometers. *Proceedings of the FIG Working Week 2005 and GSDI-8*, Cairo, Egypt, 16 – 21 April, 2005.
- Safak E, Hudnut K. Real-time structural monitoring and damage detection by acceleration and GPS sensors. *Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, USA, 18–22 April, 2006.
- Li XJ, Ge LL, Ambikairajah E, Rizos C, Tamura Y, Yoshida A. Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system. *GPS Solutions* 2006; 10(4): 233 – 247.
- Casciati F, Alsaleh R, Fuggini C. GPS-Based SHM of a tall building: torsional

effects. Proceedings of the 7th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, USA, 9 – 11 September, 2009.

- Faravelli L, Casciati S, Fuggini C. Full-scale experiment using GPS sensors for dynamic tests. Proceedings of the 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, Japan, 12 – 14 July, 2010.
- Li XJ, Rizos C, Ge LL, Ambikairajah E, Tamura Y, Yoshida A. Building monitors: the complementary characteristics of GPS and accelerometers in monitoring structural deformation. *Inside GNSS* 2006; 3: 40 – 47.
- Smyth A, Wu ML. Multi-rate Kalman filtering for the data fusion of displacement and acceleration response measurements in dynamic system monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2007; 21(2): 706 – 723.
- Casciati F, Fuggini C. Monitoring a steel building using GPS sensors. *Smart Structures and Systems* 2011; 7(5): 349 – 363.
- Fuggini C. Using satellites systems for structural monitoring: accuracy, uncertainty, reliability, PhD Dissertation, University of Pavia, Italy, 2009.
- Yigit CO, Li XJ, Inal C, Ge L, Yetkin M. Preliminary evaluation of precise inclination sensor and GPS for monitoring full-scale dynamic response of a tall reinforced concrete building. *Journal of Applied Geodesy* 2010; 4(2): 103–113.
- Dai LW, Zhang J, Rizos C, Han SW, Dai JL. GPS and Pseudolite integration for deformation monitoring applications. Proceedings of the 13th International Technology Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, Salt Lake City, USA, 19 – 22 September, 2000.

- Proгри IF, Bromberg MC, Michalson WR. Requirements of an OFDMA pseudolite indoor geolocation system. Proceedings of the 20th International Technology Meeting of the Satellite Division of the U.S. Institute of Navigation, Texas, USA, 25 – 28 September, 2007.
- Meng X, Roberts GW, Dodson AH. Impact of GPS satellite and pseudolite geometry on structural deformation monitoring: analytical and empirical studies. Proceedings of the 11th International Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 25 – 28 May, 2003.
- Cheong JW, Wei X, Politi N. Characterizing the signal structure of Locata’s pseudolite-based positioning system. Proceedings of the IGNSS Symposium, Gold Coast, Australia, 1 – 3 December, 2009.
- Barnes J, Rizos C, Kanli M. Structural deformation monitoring using locata. Proceedings of the 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Nottingham, United Kingdom, 28 June – 1 July, 2004.
- Chen YQ, Ding XL, Huang DF. A multiantenna GPS system for local area deformation monitoring. *Earth, Planets Space* 2000; 52 (10) : 873 – 876.
- Ding XL. Application of multi-antenna GPS technology in monitoring stability of slopes. Proceedings of the Strategic Integration of Surveying Services, Hong Kong, China, 13 – 17 May, 2007.
- Santerre R, Beutler G. A proposed GPS method with multi-antennae and single receiver. *Journal of Geodesy* 1993; 67 (4) : 210 – 223.
- Ding XL, Chen YQ, Huang DF, Zhu JJ, Tsakiri M, Stewart M. Slope

monitoring using GPS: a multi-antenna approach. *GPS World* 2000; 11 (3) : 52 – 55.

- Forward T, Stewart M, Penna N. Steep wall monitoring using switched antenna arrays and permanent GPS networks. Proceedings of the 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, USA, 19 – 22 March, 2001.
- He XF, Guang Y, Ding XL, Chen YQ. Application and evaluation of a GPS multi-antenna system for dam deformation monitoring. *Earth, Planets Space* 2004; 56 (11) : 1035 – 1039.
- He XF, Sang W, Chen YQ, Ding XL. Steep slope monitoring: GPS multiple antenna system at Xiaowan Dam. *GPS World* 2005; 16 (11) : 20 – 25.
- Ragheb AE, Edwards SJ, Clarke PJ. Using filtered and semi-continuous high rate GPS for monitoring deformations. *Journal of Surveying Engineering* 2010; 136(2) : 72 – 79.