



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ **ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: 1692

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΡΓΑΝΩΝ RTS &
GPS.

ΟΝΟΜΑ: ΧΑΜΖΑ ΑΜΑΛΙΑ

Επιβλέπων Καθηγητής: Καρέλης Δημήτριος

Πάτρα, 2018

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (GPS)	10
1.1 Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης GPS.....	10
1.1.1 Ιστορία του GPS.....	12
1.2 Πως λειτουργεί το GPS.	14
1.3 Τα μέρη του GPS	21
1.4 Σφάλματα του GPS.....	26
1.5 Μέθοδοι Μετρήσεων του GPS	28
1.6 Εφαρμογές του GPS στην παρακολούθηση εύκαμπτων κατασκευών και δυναμικών κινήσεων.	30
1.7 Εφαρμογή του GPS στην παρακολούθηση γεφυρών.	31
1.8 Εφαρμογή του GPS στην παρακολούθηση ψηλών κτιρίων, πύργων και κεραιών.....	35
1.9 Χρήση του GPS ως σειсмоγράφου.....	37
1.10 Το πρόβλημα του προσδιορισμού της αξιοπιστίας και της ακρίβειας των ορίων εφαρμογών του GPS.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΣ ΘΕΟΔΟΛΙΧΟΣ (RTS)	41
2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας.....	41
2.1.1 Αυτόματη περιστροφή τηλεσκοπίου.	44
2.1.2 Αυτόματη αναγνώριση στόχου (ATR-Automatic Target Recognition).....	46
2.1.3 Κλείδωμα και παρακολούθηση κινούμενου στόχου (Auto Lock Mode).....	48
2.1.4 Αυτόματα ελεγχόμενη λειτουργία μέσω ασύρματου τηλεχειριστηρίου.....	48
2.1.5 Αμφιπρισματικός ανακλαστήρας 360°.....	50
2.2 Προδιαγραφές ρομποτικών θεοδολίχων.	51
2.2.1 Εφαρμογές του RTS στην καταγραφή αργών-στατικών μετακινήσεων	51
2.2.2 Εφαρμογές Παρακολούθησης δυναμικών μετακινήσεων κατασκευών με χρήση RTS.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΥ ΤΗΣ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ ΜΕ EDM ΚΑΙ GPS.....	56
3.1 Ιστορία ηφαιστείου	56
3.1.1 Η Δημιουργία Σαντορίνης	57
3.2 Μετρήσεις επιφανειακής παραμόρφωσης με γεωδαιτικές μεθόδους.....	59
3.2.1 Αναγκαιότητα γεωδαιτικής παρακολούθησης ηφαιστείων.	59

3.2.2 Κλασσικές τεχνικές.....	60
3.3 Γεωδαιτικές Μετρήσεις από το ηφαίστειο της Σαντορίνης.....	62
3.3.1 Ροή μάγματος και εδαφικές παραμορφώσεις στο ηφαίστειο της Σαντορίνης.....	62
3.4 Έρευνα με GPS.....	63
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	70
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	71

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της υποχρεωτικής για την απόκτηση του Πτυχίου Πτυχιακής Εργασίας για το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Τ.Ε.Ι Δυτικής Ελλάδας με τίτλο : **ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΓΑΝΩΝ RTS ΚΑΙ GPS.** Σαν παράδειγμα θα δούμε τις εφαρμογές του GPS και του RTS στις εύκαμπτες κατασκευές και δυναμικών κινήσεων, επίσης θα δούμε τη χρήση του GPS ως σειсмоγράφος, και τέλος τη παρακολούθηση του ηφαιστείου της Σαντορίνης με τη χρήση δικτύου GPS.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία στο πρώτο μέρος της διερευνήθηκε η δυνατότητα του GPS-RTS στη μελέτη ταλαντώσεων ως προς την ακρίβεια προσδιορισμού του εύρους και της συχνότητας ταλάντωσης και το διάστημα των συχνοτήτων που μπορούν να καταγραφούν.

Συμπερασματικά, οι μέθοδοι επίγειων αλλά και δορυφορικών μεθόδων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των ταλαντώσεων/μετακινήσεων των εύκαμπτων κατασκευών, ενώ με βελτίωση των διατάξεών τους και των λογισμικών τους με στόχο να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν, αναμένεται ακόμα καλύτερη ακρίβεια.

Επίσης στο δεύτερο μέρος αναφερόμαστε στην αναγκαιότητα της γεωδαιτικής παρακολούθησης των ηφαιστείων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση EDM και GPS.Επιπλέον θα δούμε την ιστορία των γεωδαιτικών μετρήσεων που έχουν λάβει χώρα στη Σαντορίνη. Οι μετρήσεις αυτές έχουν γίνει σε διάφορους περιόδους με συστήματα EDM και GPS.Ακολουθως αναφέρεται η καθημερινή παρακολούθηση του ηφαιστείου από το ΙΜΠΗΣ και το UNAVCO, από την οποία αντλούνται συνεχώς νέες πληροφορίες σχετικά με τη δυναμική του ηφαιστείου.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όσο αφορά το πρώτο μέρος της εργασίας (Κεφάλαιο 1,2) :

Η αλματώδης ανάπτυξη σε διάφορους τομείς της επιστήμης τα τελευταία χρόνια δημιούργησε τις κατάλληλες συνθήκες για την κατασκευή δύσκολων και μεγάλων τεχνικών έργων, όπως φράγματα, γέφυρες, ψηλά κτίρια κ.α. στα οποία πρωταρχικό ρόλο παίζει η ασφάλεια κατά την φάση της κατασκευής τους όσο και κατά την λειτουργία τους.

Η άνθηση στον τομέα των κατασκευών δεν συνοδεύτηκε πάντα και από την ανάλογη ανάπτυξη στον τομέα της ασφάλειας των κατασκευών. Πιο συγκεκριμένα, μεγάλα τεχνικά έργα αστόχησαν ολικά (Tacoma Bridge, σχ.α) ή μερικά (Millenium Bridge; Arup, 2005) λόγω του κακού σχεδιασμού ή συσσώρευσης μικρών παραμορφώσεων που είχαν ή θα μπορούσαν να είχαν ανιχνευτεί και αντιμετωπιστεί έγκαιρα (π.χ. φράγμα Malpasset). Οι διαπιστώσεις αυτές οδήγησαν στην υιοθέτηση συνεχούς και συστηματικής ενόργανης παρακολούθησης (monitoring) των κατασκευών, τόσο κατά την φάση της κατασκευής όσο και κατά την φάση λειτουργίας, με στόχο την ασφάλεια αλλά και την βελτιστοποίηση της οικονομίας του έργου.

Η ενόργανη παρακολούθηση της κινηματικής, ιδιαίτερα των εύκαμπτων κατασκευών, κρίνεται απαραίτητη καθώς λόγω του σχεδιασμού τους και της εφαρμογής δυναμικών φορτίων παρατηρούνται συνεχώς σημαντικές μετακινήσεις και αποκλίσεις από τον αρχικό σχεδιασμό με αποτέλεσμα διαφοροποίηση των δυναμικών χαρακτηριστικών των κατασκευών και έκθεσή τους σε διάφορους κινδύνους. Μέχρι πρόσφατα, η ενόργανη παρακολούθηση στις εύκαμπτες κατασκευές στηριζόταν σε μετρήσεις των τάσεων-παραμορφώσεων (μηκυνσιόμετρα, παραμορφωσίμετρα) και επιταχύνσεων (επιταχυνσιογράφοι). Οι μέθοδοι αυτών εμφανίζουν το μειονέκτημα ότι η εκτίμηση των μετατοπίσεων/παραμορφώσεων είτε είναι συνήθως αδύνατη (π.χ. ημιστατικές μετακινήσεις λόγω

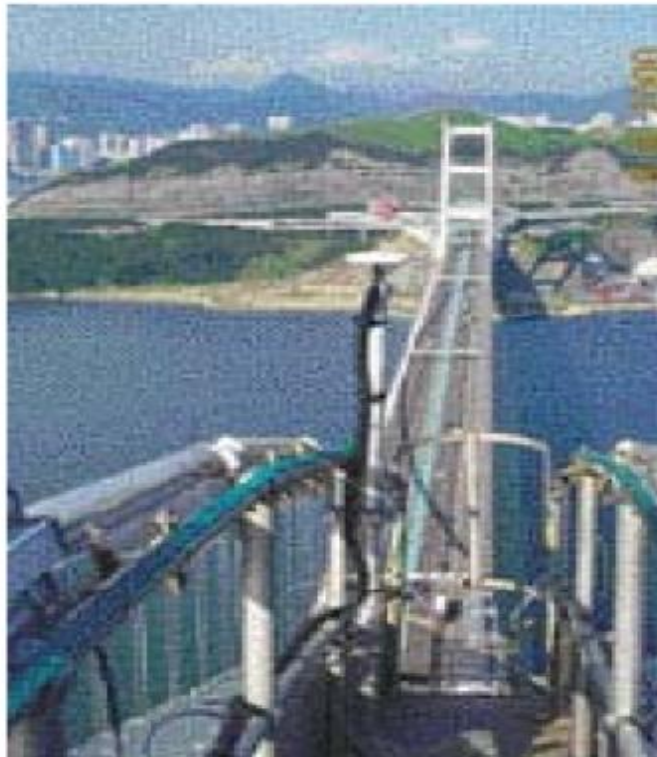
ανεμοπίεσης), είτε συνήθως έχει μεγάλη αβεβαιότητα (εκτίμηση μετακινήσεων μέσω επιταχυνσιογραφήματος). Την αδυναμία αυτή έρχονται να καλύψουν τα γεωδαιτικά όργανα νέας γενιάς: **το δορυφορικό σύστημα αναφοράς (GPS) και ο ρομποτικός θεοδόλιχος (RTS).**



Σχήμα : α) Αστοχία γέφυρας Tacoma λόγω κακού σχεδιασμού Σχήμα 1.1 β) ολική αστοχία κεραίας κινητής τηλεφωνίας από την επίδραση του τυφώνα Michelle

Το σύστημα **GPS** μέχρι πρόσφατα χρησιμοποιείτο στα έργα του Πολιτικού Μηχανικού κυρίως στην χάραξη έργων οδοποιίας. Πλέον όμως το σύστημα αυτό βρίσκει πιλοτική, κυρίως, εφαρμογή και στην παρακολούθηση ταλαντώσεων γεφυρών (σχ.Wong et al., 2001) και άλλων εύκαμπτων κατασκευών, όπως κεραίες και ψηλά κτίρια (Wasilewski et al., 2001, Çelebi et al., 1999, Lovse et al., 1995). Όσον αφορά το RTS αποτελεί εξέλιξη του γεωδαιτικού σταθμού, με δυνατότητα την συνεχή παρακολούθηση κινούμενου στόχου και την αυτόματη καταγραφή της θέσης ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Το RTS έχει εισαχθεί πρόσφατα στο αντικείμενο του Πολιτικού Μηχανικού κυρίως για χαράξεις/αποτυπώσεις και την παρακολούθηση του εδάφους κυρίως κατά την διάνοιξη σηράγγων (Kaalberg et al., 2003). Εφαρμογές του σε παρακολούθηση ταλαντώσεων αναφέρονται ελάχιστες στην διεθνή βιβλιογραφία (π.χ. Lekidis et al., 2004).

Η παρακολούθηση των εύκαμπτων κατασκευών με τα νέα γεωδαιτικά όργανα έχει δύο στόχους: **1.** τον έλεγχο των ταλαντώσεων των κατασκευών λόγω δυναμικών φορτίων (π.χ. σεισμός, άνεμος, κυκλοφοριακός φόρτος), ώστε να ελέγχεται η λειτουργία και η ασφάλεια τους, καθώς και οι μόνιμες και ημιστατικές μετακινήσεις τους .



Σχήμα: Παρακολούθηση μετακινήσεων-ταλαντώσεων της γέφυρας TsingMa του Χονγκ Κονγκ με τη χρήση GPS.

2. τον προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών των κατασκευών (κυρίως ιδιοσυχνότητες και εύρος ταλάντωσης) με στόχο τον εντοπισμό τυχόν αποκλίσεων των χαρακτηριστικών αυτών από τον αρχικό σχεδιασμό (π.χ. λόγω κακής εφαρμογής των μελετών σχεδιασμού ή αστοχιών).

Η χρήση των δύο αυτών οργάνων όμως δεν έχει συνοδευτεί από τον απαραίτητο έλεγχο της ακρίβειας και της αξιοπιστίας στην παρακολούθηση μετακινήσεων/ταλαντώσεων εύκαμπτων κατασκευών και τον προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών τους. Μία από τις ελάχιστες μελέτες που καλύπτουν το θέμα αυτό είναι του Tamura (2004) ο οποίος με βάση περιορισμένο αριθμό πειραμάτων έχει

συμπεράνει ότι το GPS έχει την δυνατότητα να εντοπίσει με ακρίβεια ταλαντώσεις με εύρος >2 cm και συχνότητα κίνησης ≤ 2 Hz.

Όσο αφορά το δεύτερο μέρος (Κεφάλαιο3) :

Στις μέρες μας υπάρχουν διάφορες μέθοδοι παρακολούθησης ενός ηφαιστείου όπως μέτρηση της χημικής σύστασης των ελκυόμενων αερίων, παρατήρηση υπόγειας θερμοκρασίας και σεισμικότητας και η μελέτη της επιφανειακής παραμόρφωσης και μετακίνησης. Η τελευταία μέθοδος αποτελεί το ένα μέρος της εργασίας. Παρακάτω θα γίνει παρουσίαση της μεθοδολογίας παρακολούθησης του ηφαιστείου της Σαντορίνης με τοπογραφικές μεθόδους με χρήση **GPS**.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (GPS)

1.1 Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης GPS

Το GPS είναι ένα σύστημα εντοπισμού γεωγραφικής θέσης ενός ακινήτου ή κινητού στόχου. Δημιουργήθηκε από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ για στρατιωτική χρήση. Στα μέσα της δεκαετίας του 1960 το σύστημα δορυφορικής πλοήγησης, γνωστό τότε και ως Transit system, δοκιμάζεται από το αμερικάνικο ναυτικό. Περνώντας τα χρόνια εξελίχθηκε σε ένα σύστημα με δυνατότητα να καλύψει τις ανάγκες εντοπισμού, με οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες, οποιαδήποτε ώρα της ημέρας για απεριόριστο αριθμό χρηστών. Ρυθμίζεται καθημερινά από τη βάση της πολεμικής αεροπορίας Σρίβερ.

- Αποτελείται από 34 δορυφόρους σήμερα, ενώ η πλήρης ανάπτυξη του συστήματος απαιτεί 24 δορυφόρους (Σχήμα 1.2), είναι τοποθετημένοι ομοιόμορφα στον πλανήτη και ο καθένας κινείται σε καθορισμένη τροχιά γύρω από τη Γη. Οι δορυφόροι είναι τοποθετημένοι ομοιόμορφα σε 6 τροχιακά επίπεδα (4 τουλάχιστον δορυφόρους κάθε θέση πάνω στη Γη), ανά 60 μοίρες στο ισημερινό επίπεδο και έχουν γωνία κλίσης 55 μοίρες ως προς αυτό. Το μέσο ύψος των δορυφόρων από την επιφάνεια της γης είναι 20.189 χιλιόμετρα. Οι δορυφόροι έχουν κάποιες ειδικές συσκευές που ονομάζονται πομποδέκτες GPS, σε αυτές οφείλεται η ικανότητα του GPS, να δίνει πληροφορίες για την ακρίβεια της θέσης, της ταχύτητας, του υψομέτρου, της κατεύθυνσης, ακόμα και ώρας σε όλα τα σημεία της Γης.
- Το επίγειο τμήμα ελέγχου που αποτελείται από:
 - a) 5 απομακρυσμένους μεταξύ τους σταθμούς παρακολούθησης .
 - b) 3 σταθμούς επικοινωνίας με τους δορυφόρους.

c) 1 κεντρικό σταθμό ελέγχου που ελέγχει τη λειτουργία του συστήματος και έχει τη δυνατότητα επέμβασης στο δορυφαρικό σχηματισμό, τροποποιώντας τη θέση στη τροχιά του και τη λειτουργία δορυφόρων.

- Το τμήμα χρηστών που αποτελείται από όλους τους χρήστες (επίγειους, επιθαλάσσιους και εναέριους). Αυτοί με κατάλληλο εξοπλισμό δεκτών μπορούν κάθε στιγμή να προσδιορίσουν τη θέση τους, τη ταχύτητα και τη κατάσταση του χρονομέτρου τους εκμεταλλευόμενοι τις δυνατότητες του συστήματος (από Εφαρμοσμένη Γεωδαισία, εκδόσεις Ζητη και βικιπαίδεια).



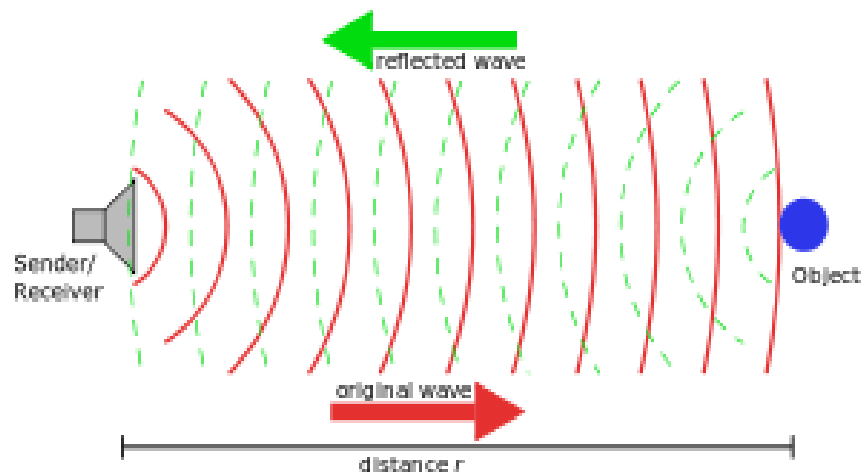
Σχήμα 1.1 Ένας δορυφόρος του συστήματος GPS.



Σχήμα 1.2 Το δίκτυο των 24 δορυφόρων που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε 6 σχεδόν κυκλικές τροχιές.

1.1.1 Ιστορία του GPS

Στην αρχαιότητα για τον προσανατολισμό τους οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν τα σημεία του ορίζοντα μέχρι και τα άστρα. Γνώριζαν την γεωγραφική θέση ενός άστρου οπότε ήταν εύκολο να εντοπίσουν την πορεία τους. Στη συνέχεια ανακαλύφθηκαν άλλα μέσα που βοηθούσαν στον προσανατολισμό, τα οποία είναι η πυξίδα, ο εξάντας και το ραντάρ. Ο εξάντας προσδιορίζει με ευκολία το γεωγραφικό πλάτος, αντιθέτως μειονεκτεί στον προσδιορισμό του γεωγραφικού μήκους. Το ραντάρ είναι το πρώτο σύστημα που βασίζεται σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα, έδινε όμως ανακριβείς πληροφορίες. Στη τεχνολογία του ραντάρ και άλλων μεθόδων στηρίχτηκε το σημερινό GPS, καθώς χρησιμοποιεί τη τεχνολογία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τη παρατήρηση ενός τεχνητού ουράνιου σώματος.



Σχήμα 1.3 Η αρχή λειτουργίας του ραντάρ όπως και του GPS βασίζεται στην εκπομπή και λήψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μετά από ανάκλαση σε κάποιο αντικείμενο.

1.2 Πως λειτουργεί το GPS.

Παρακάτω περιγράφεται η λειτουργία του GPS σε πέντε βήματα:

1^οβήμα. Διαδικασία ‘τριγωνισμού’ από τους δορυφόρους.

2^οβήμα. Μέτρηση απόστασης από τους δορυφόρους χρησιμοποιώντας τον χρόνο μετάδοσης των ράδιο-σημάτων.

3^οβήμα. Συγχρονισμός ρολογιών δέκτη-δορυφόρου.

4^οβήμα. Εύρεση θέσης των δορυφόρων στον ουρανό.

5^οβήμα. Διόρθωση καθυστερήσεων στις οποίες υπόκειται το σήμα καθώς αυτό μεταδίδεται μέσω της ατμόσφαιρας και αντανακλάται σε διάφορα εμπόδια στην επιφάνεια της γης.

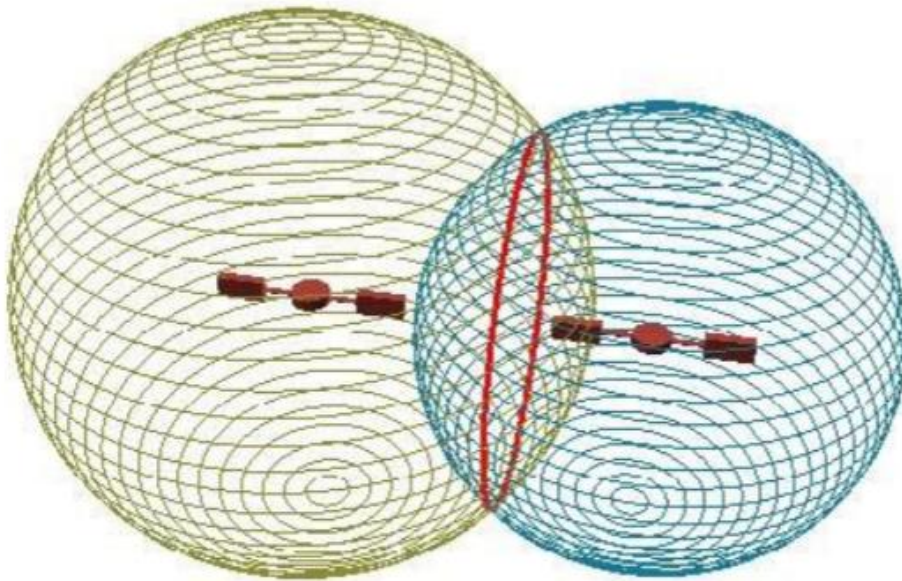
Βήμα 1^ο : Τριγωνισμός από τους δορυφόρους

Αν και φαίνεται περίεργο, η βασική ιδέα στην οποία στηρίζεται το GPS είναι η χρήση δορυφόρων στο διάστημα για τον προσδιορισμό σημείων πάνω στη γη. Πράγματι, μετρώντας με πολύ μεγάλη ακρίβεια την απόσταση που έχουμε από τρεις δορυφόρους μπορούμε να ‘τριγωνοποιήσουμε’ τη θέση μας οπουδήποτε πάνω στη γη. Προς το παρόν θα εξετάσουμε γεωμετρικά, πώς η μέτρηση των αποστάσεων από τρεις δορυφόρους καθορίζει με ακρίβεια τη θέση μας.

Ας υποθέσουμε ότι μετράμε την απόσταση που έχουμε από έναν δορυφόρο και βρίσκουμε ότι αυτή είναι 700 χλμ. Γνωρίζοντας ότι βρισκόμαστε 17.000 χλμ. Μακριά από ένα συγκεκριμένο δορυφόρο, οι πιθανές θέσεις που θα μπορούσαμε να είμαστε στο σύμπαν περιορίζονται στην επιφάνεια μιας σφαίρας με κέντρο το δορυφόρο και ακτίνα την απόσταση από αυτόν.

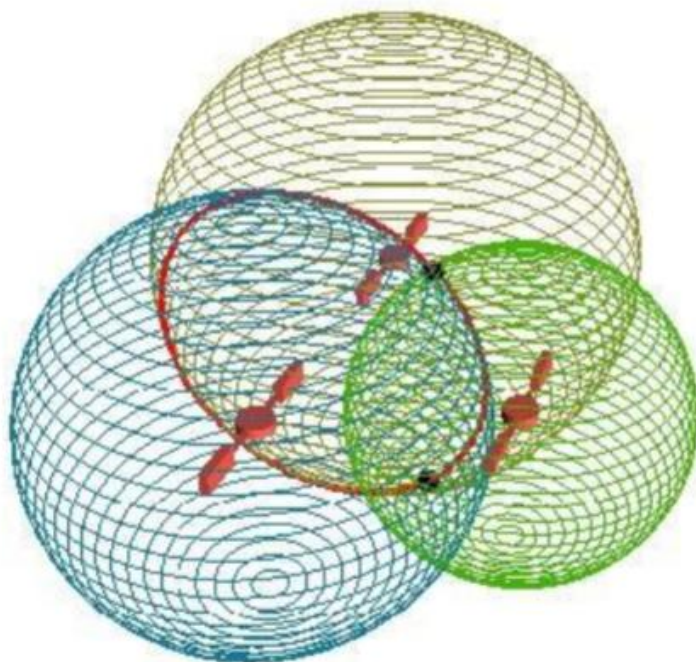
Κατόπιν, μετράμε την απόσταση μας από ένα δεύτερο δορυφόρο και βρίσκουμε ότι αυτή είναι 20.000 χλμ. Αυτό μας λέει ότι, εκτός από την επιφάνεια της πρώτης σφαίρας βρισκόμαστε επίσης και στην επιφάνεια μιας δεύτερης σφαίρας, η οποία ως κέντρο έχει το

δεύτερο δορυφόρο και ακτίνα την απόσταση που απέχουμε από αυτόν. Δηλαδή, με άλλα λόγια, βρισκόμαστε κάπου στην τομή των δύο αυτών σφαιρών. Επειδή όμως η τομή δυο σφαιρών σχηματίζει κύκλο, ουσιαστικά βρισκόμαστε κάπου επάνω στην περιφέρεια ενός κύκλου (σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2 Η τομή δύο σφαιρών που αντιστοιχούν στους δορυφόρους Α και Β.

Εάν πάρουμε και μία ακόμη μέτρηση από έναν τρίτο δορυφόρο, τότε εκτός από τον κύκλο που σχηματίζεται από την τομή των δύο πρώτων σφαιρών, βρισκόμαστε και στην επιφάνεια μιας τρίτης σφαίρας, η οποία ως κέντρο έχει τον τρίτο δορυφόρο και ακτίνα την απόσταση που απέχουμε από αυτόν. Επειδή, όμως η επιφάνεια μιας σφαίρας τέμνεται με την περιφέρεια ενός κύκλου σε δύο μόνο σημεία, ουσιαστικά βρισκόμαστε επάνω στα δύο αυτά σημεία (σχήμα 1.3).



Σχήμα 2.9 Η τομή των τριών σφαιρών που αντιστοιχούν στους δορυφόρους A,B,C.

Έτσι, με τρεις δορυφόρους μπορούμε να περιορίσουμε τη θέση μας σε ακριβώς δύο σημεία. Για να αποφασίσουμε ποιο από τα δύο αυτά σημεία είναι η πραγματική μας θέση, θα μπορούσαμε να κάνουμε και μία τέταρτη μέτρηση. Αλλά, συνήθως είναι προφανές, ότι αποκλείεται να βρισκόμαστε σε ένα από τα δύο σημεία και έτσι μπορούμε να το απορρίψουμε χωρίς να κάνουμε καμία επιπλέον μέτρηση.

Βήμα 2^ο : Μετρώντας την απόσταση από έναν δορυφόρο

Στην προηγούμενη παράγραφο, είδαμε πώς μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θέση μας γνωρίζοντας την απόσταση που έχουμε από τρεις τουλάχιστον δορυφόρους. Αλλά πώς γίνεται να μετρήσουμε την απόσταση από ένα δορυφόρο, ο οποίος περιφέρεται στο διάστημα γύρω από τη γη. Αυτό επιτυγχάνεται μετρώντας το χρόνο που χρειάζεται ένα ράδιο-σήμα να φθάσει από το δορυφόρο στο δέκτη. Ο χρόνος αυτός πολλαπλασιαζόμενος με την ταχύτητα μετάδοσης του ράδιο-σήματος

μας δίνει, σύμφωνα με το μαθηματικό τύπο (1) την απόσταση που απέχει ο δορυφόρος από το δέκτη.

$$\text{Απόσταση} = \text{Ταχύτητα} \times \text{Χρόνος} \quad (1)$$

Συγκεκριμένα, ο χρόνος αυτός μπορεί να είναι πάρα πολύ μικρός ειδικά αν ο δορυφόρος βρίσκεται κοντά μας. Έτσι, χρειαζόμαστε ρολόγια με μεγάλη ακρίβεια.

Βήμα 3^ο : Επιτυγχάνοντας τον τέλειο συγχρονισμό

Εάν η μέτρηση του χρόνου μετάδοσης ενός ράδιο-σήματος είναι το κλειδί για να μετρηθεί η ακριβής απόσταση από τους δορυφόρους, τότε τα χρονόμετρα μας θα πρέπει να είναι υπερβολικά ακριβή, ώστε να είναι τέλεια συγχρονισμένα. Μία λανθασμένη χρονομέτρηση, έστω και ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου, με την ταχύτητα του φωτός, μεταφράζεται σε 300χλμ σφάλμα.

Στους δορυφόρους, η χρονομέτρηση είναι σχεδόν τέλεια, επειδή αυτοί διαθέτουν ρολόγια μεγάλης ακρίβειας, τα ατομικά ρολόγια. Εάν οι δέκτες μας είχαν και αυτοί ατομικά ρολόγια τότε δεν θα υπήρχε κανένα πρόβλημα χρονικού συγχρονισμού μεταξύ των δορυφόρων και των δεκτών. Σε αυτή την περίπτωση όμως, το GPS θα ήταν μία τεχνολογία που δε θα είχε μεγάλη εφαρμογή, λόγω υπερβολικού κόστους. Το τέχνασμα που βρήκαν οι σχεδιαστές του GPS είναι να γίνεται μία επί πλέον μέτρηση απόστασης από ένα τέταρτο δορυφόρο. Η τέταρτη μέτρηση θεωρείται μία από τις θεμελιώδεις του GPS, εφόσον με αυτό τον τρόπο κάθε GPS δέκτης συγχρονίζεται με τον παγκόσμιο χρόνο. Με τη λήψη μιας επί πλέον δορυφορικής μέτρησης και με λίγη άλγεβρα ένας GPS δέκτης μπορεί να απαλείψει οποιοσδήποτε ανακρίβειες που πιθανόν στο ρολόι του.

Βήμα 4^ο : Βρίσκοντας τη θέση των δορυφόρων στον ουρανό

Εκτός από την απόσταση από ένα δορυφόρο, ένα δέκτης πρέπει να ξέρει τη ακριβή θέση του δορυφόρου στον ουρανό. Μέχρι τώρα έχουμε υποθέσει ότι γνωρίζουμε πού βρίσκονται οι GPS δορυφόροι και έτσι μπορούμε να τους χρησιμοποιήσουμε ως σημεία αναφοράς. Αλλά, πώς εμείς ξέρουμε πού ακριβώς βρίσκονται αυτοί όταν περιφέρονται στο διάστημα περίπου 20.000χλμ μακριά από τη γη.

Το ύψος των 20.000χλμ προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα στις τροχιές των δορυφόρων. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτά είναι ότι στο ύψος αυτό δεν υπάρχει ατμόσφαιρα, οπότε δεν υπάρχει αντίσταση στην κίνηση του δορυφόρου από τον αέρα. Επίσης, ο χρόνος ζωής των δορυφόρων αυξάνεται και μπορούν, σε αυτό το ύψος, να τεθούν εύκολα σε σταθερή τροχιά με απλά μαθηματικά.

Η Πολεμική Αεροπορία των Ηνωμένων Πολιτειών έχει θέσει κάθε GPS δορυφόρο σε τροχιά με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Οι GPS δέκτες, που βρίσκονται στο έδαφος, έχουν ένα ημερολόγιο στους υπολογιστές τους, στο οποίο καταχωρούνται δεδομένα σχετικά με τα ακριβή σημεία στα οποία βρίσκονται οι δορυφόροι στον ουρανό. Οι βασικές τροχιές είναι αρκετά ακριβείς, αλλά για να γίνονται όλα σωστά οι GPS δορυφόροι ελέγχονται συνεχώς από το Υπουργείο Άμυνας, το οποίο χρησιμοποιεί ραντάρ μεγάλης ακρίβειας για να ελέγχει το ακριβές ύψος κάθε δορυφόρο, τη θέση και την ταχύτητα του. Ελέγχονται τα σφάλματα, τα οποία προκαλούνται από τα πεδία βαρύτητας της σελήνης και του ήλιου και από την πίεση της ηλιακής ακτινοβολίας στους δορυφόρους. Τα σφάλματα αυτά, συνήθως, είναι πολύ μικρά αλλά εάν θέλουμε να έχουμε μεγάλη ακρίβεια πρέπει αυτά να ληφθούν υπόψη.

Όταν ανιχνευτεί κάποιο σφάλμα στα δεδομένα που στέλνει ο δορυφόρος στη γη, μετράει την ακριβή θέση του στον ουρανό και μεταδίδει την πληροφορία αυτή στον δορυφόρο. Ο δορυφόρος διορθώνει τα δικά του δεδομένα και τα περιλαμβάνει στα ράδιο-σήματα που μεταδίδει. Έτσι, το σήμα κάθε δορυφόρου δεν περιέχει μόνο έναν ψευδο-τυχαίο κώδικα συγχρονισμού. Αυτό μεταφέρει, επίσης, πληροφορίες ημεροδεικτών σχετικές με την ακριβή τροχιακή θέση του.

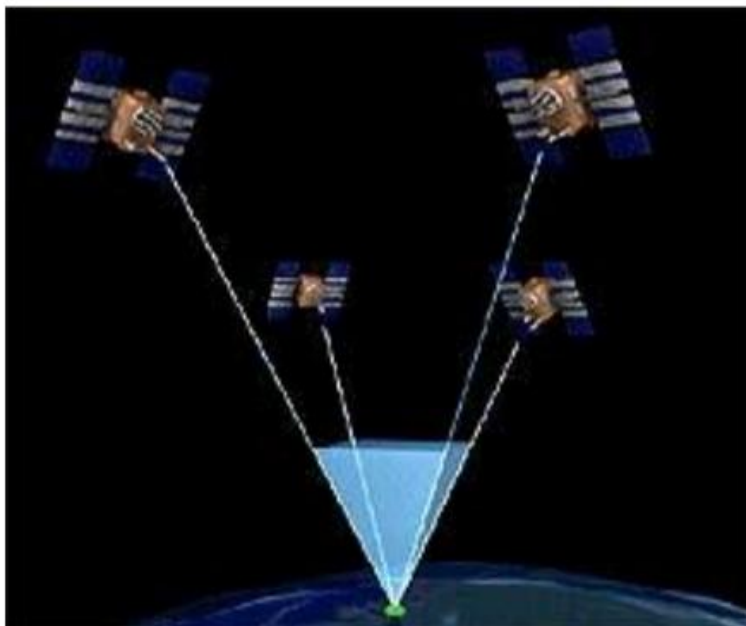
Ακολούθως, ο GPS δέκτης ενημερώνει συνεχώς το ημερολόγιο του καθώς λαμβάνει αυτές τις πληροφορίες και κατόπιν τις χρησιμοποιεί για να καθορίσει την ακριβή θέση του δορυφόρου.

Βήμα 5^ο Διόρθωση Λαθών

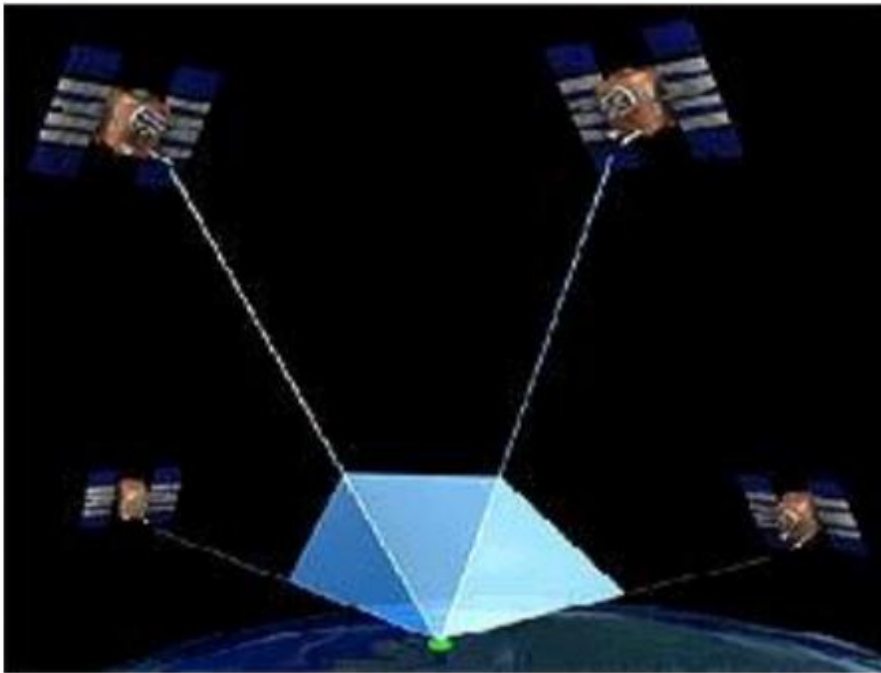
Μέχρι τώρα έχουμε μεταχειριστεί τους υπολογισμούς στο GPS πολύ αφηρημένα. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν αρκετά πράγματα που μπορούν να συμβούν σε ένα GPS σήμα, τα οποία μπορούν να το αλλοιώσουν ή να του αλλάξουν την πορεία. Ένας δείκτης της ποιότητας της γεωμετρίας του δορυφορικού αστερισμού είναι η “

Γεωμετρική Απώλεια της Ακρίβειας “ ή GDOP (geometric dilution of precision). Το GDOP εξαρτάται από το πλήθος των δορυφόρων που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις. Βασικά, όμως, εξαρτάται από τη θέση των δορυφόρων, δηλαδή από το ύψος και τη θέση που βρίσκονται αυτοί στον ουρανό. Αυτό αναφέρεται συχνά και ως γεωμετρία των δορυφόρων.

Ανάλογα με τη γεωμετρία που έχουν οι δορυφόροι, είναι δυνατόν να αυξηθεί ή να ελαττωθεί το λάθος θέσης στις μετρήσεις. Μία μεγάλη γωνία μεταξύ των δορυφόρων χαμηλώνει το GDOP, και παρέχει μία καλύτερη μέτρηση. Αντίθετα, μία μικρή γωνία μεταξύ των δορυφόρων δίνει υψηλότερο GDOP με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να είναι χειρότερες. Εάν ο δέκτης επιλέξει δορυφόρους οι οποίοι είναι ευρέως διασκορπισμένοι στον ουρανό τότε το GDOP είναι χαμηλό, ενώ αν επιλέξει δορυφόρους οι οποίοι βρίσκονται κοντά ο ένας στον άλλον τότε το GDOP είναι υψηλό (σχήμα 2.10, 2.11). Οι καλοί δέκτες προσδιορίζουν τους δορυφόρους που θα δώσουν το χαμηλότερο GDOP.



Σχήμα 1.4 Οι θέσεις των δορυφόρων σε υψηλό GDOP.



Σχήμα 1.4 Οι θέσεις των δορυφόρων σε χαμηλό GDOP.

Τέλος, το GDOP είναι ένα μέτρο της ποιότητας των δεδομένων που λαμβάνονται από τους δορυφόρους και μετρά τη συνολική απόκλιση από την πραγματική θέση ενός GPS συστήματος. Μία αποδεκτή τιμή του GDOP είναι μικρότερη από 5.

1.3 Τα μέρη του GPS

Ο δέκτης GPS (σχήμα 1.5) είναι μια συσκευή-όργανο πολύ υψηλής τεχνολογίας που μπορεί να συντονίζεται πάνω σε δύο βασικές συχνότητες. Ένας δέκτης χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη που είναι η κεραία και ο κυρίως δέκτης. Η κεραία συνήθως περιλαμβάνει και τον προενισχυτή του σήματος και μπορεί να είναι εξωτερική ή εσωτερική ώστε όλο το σύστημα δέκτης-κεραία να είναι μια συμπαγής συσκευή. Ο κυρίως δέκτης αποτελείται από διάφορα επιμέρους τμήματα : το τμήμα των ραδιοσυχνοτήτων, τους διαύλους παρακολούθησης του δορυφορικού σήματος με τους βρόγχους παρακολούθησης, τον μικροεπεξεργαστή και τη μονάδα επικοινωνίας με τον χρήστη.



Σχήμα 1.5 Δέκτης GPS της εταιρίας TOPCON.

Οι δέκτες του συστήματος λαμβάνουν τα σήματα των δορυφόρων και στη συνέχεια υπολογίζουν την απόσταση μεταξύ δορυφόρου-δέκτη είτε με τη μέτρηση ψευδοαποστάσεων (χρήση κώδικα) είτε με τη μέτρηση της διαφοράς φάσης της φέρουσας συχνότητας μεταξύ δορυφόρου-δέκτη, δηλαδή ανάλογα με τη μέθοδο μέτρησης που θα χρησιμοποιήσουμε.

Η κεραία λαμβάνει το αρκετά εξασθενημένο δορυφορικό σήμα από όλους τους ορατούς δορυφόρους, το ενισχύει με τον προενισχυτή και το διοχετεύει εσωτερικά στο δέκτη για περαιτέρω επεξεργασία. Η κεραία μετατρέπει στην ουσία την ενέργεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ηλεκτρικό ρεύμα, δηλαδή μετατρέπει τα δορυφορικά ηλεκτρομαγνητικά σήματα σε ηλεκτρικά σήματα. Αν η κεραία είναι εξωτερική συνδέεται με ένα ειδικό καλώδιο με τον κυρίως δέκτη ή χωρίς καλώδιο με ασύρματη επικοινωνία Bluetooth.

Οι κεραίες είναι μικρών διαστάσεων, μικρού βάρους και συνήθως πολυκατευθυντήριες για λήψη σημάτων από τις διευθύνσεις. Διακρίνονται σε διάφορους τύπους, με πιο διαδεδομένο για τις γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές τον τύπο των μικρολωρίδων (microstrip) , που έχουν και το πλεονέκτημα καλής λήψης σημάτων από δορυφόρους χαμηλά στον ορίζοντα. Σχεδιάζονται έτσι ώστε να μπορούν να λαμβάνουν είτε το σήμα L1 (δέκτες μιας συχνότητας) είτε και στην L2 (δέκτες δύο συχνοτήτων). Οι γεωδαιτικοί δέκτες έχουν τη δυνατότητα λήψης και στις συχνότητες. Για τη σωστή λήψη των δορυφορικών σημάτων οι κεραίες δεν πρέπει να επισκιάζονται από γειτονικά αντικείμενα, όπως μεγάλα κτίρια, δέντρα κλπ. Στις περιπτώσεις αυτές δημιουργούνται πολλαπλές διαδρομές του σήματος εξαιτίας της ανάκλασης του στις γειτονικές επιφάνειες με αποτέλεσμα τη δημιουργία σημαντικών σφαλμάτων στις παρατηρήσεις . Παρόμοια επίδραση δημιουργεί και η επιφάνεια του εδάφους κάτω από την κεραία, ωστόσο το σφάλμα αυτό είναι δύσκολο να απαλειφθεί. Για την περίπτωση των ανακλάσεων του σήματος κάτω από το έδαφος οι κεραίες ανθίστανται ικανοποιητικά.

Ιδιαίτερα ανθεκτικές στις πολυανακλάσεις είναι οι κεραίες που συνδυάζονται με μια διάταξη βάσης σπειροειδών, διαθέτουν

προστατευτικό θόλο, στοιχίζουν πολλαπλάσια από μια κοινή κεραία και χρησιμοποιούνται κυρίως στους μόνιμους σταθμούς (σχήμα 1.6).



Σχήμα 1.6 Κεραία δαχτυλιδίων.

Άλλα βασικά χαρακτηριστικά μιας κεραίας είναι η ευαισθησία στη λήψη σημάτων διαφορετικής διεύθυνσης και διαφορετικής γωνίας ύψους, καθώς και η σταθερότητα του κέντρου φάσης, δηλαδή του ηλεκτρικού κέντρου αναφοράς των μετρήσεων, τόσο για την L1 όσο και για την L2 συχνότητα. Το ηλεκτρικό με το μηχανικό μέρος μιας κεραίας δεν ταυτίζονται. Οι πιθανές συστηματικές αποκλίσεις του κέντρου φάσης από το γεωμετρικό ή μηχανικό κέντρο της κεραίας πρέπει να είναι γνωστές στις γεωδαιτικές εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Στην πράξη έχουν παρατηρηθεί αποκλίσεις μέχρι και ένα εκατοστό. Κεραίες του ίδιου κατασκευαστή έχουν την ίδια συμπεριφορά στη μεταβολή του κέντρου φάσης και έτσι οι επιδράσεις ελαχιστοποιούνται εάν οι κεραίες προσανατολίζονται στην ίδια περίπτωση κατεύθυνση π.χ πάντα προς το βορρά. Απαιτείται, λοιπόν, προσοχή όταν σε μια εργασία υψηλής ακρίβειας χρησιμοποιούνται δέκτες διαφορετικών εταιριών.



Σχήμα 1.7 Συστοιχία από κεραίες GPS.

Το πρώτο τμήμα του δέκτη που αναλαμβάνει την επεξεργασία του εισερχόμενου δορυφορικού σήματος, μετά την προενίσχυση, είναι το τμήμα των ραδιοσυχνοτήτων, το οποίο περιλαμβάνει διάφορες διατάξεις όπως είναι οι ταλαντωτές ή ρολόγια χαλαζιακού τύπου για την παραγωγή των ημιτονοειδών σημάτων αναφοράς, οι πολλαπλασιαστές για τη δημιουργία μεγαλύτερων συχνοτήτων, τα φίλτρα για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων συχνοτήτων και οι μίκτες για τον πολλαπλασιασμό δυο διαφορετικών σημάτων και οι βρόγχοι παρακολούθησης και εξαγωγής μετρήσεων. Η βασική παρέμβαση του τμήματος των ραδιοσυχνοτήτων είναι η μετατροπή της συχνότητας του εισερχόμενου σήματος σε μικρότερη συχνότητα για να είναι εύκολα διαχειρίσιμο από το δέκτη.

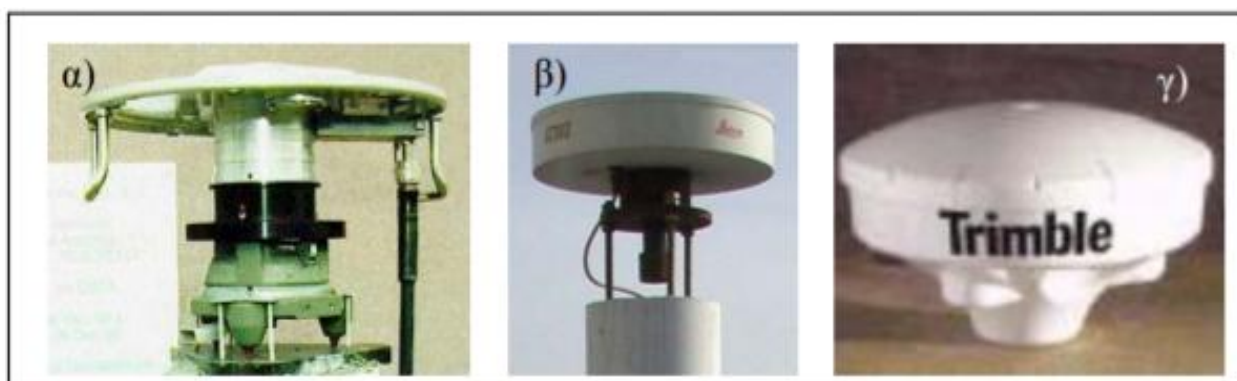
Ο μικροεπεξεργαστής του δέκτη ελέγχει όλες τις λειτουργίες του, από τον εγκλωβισμό των δορυφόρων και την επεξεργασία του σήματος μέχρι τον υπολογισμό της θέσης σε πραγματικό χρόνο και την επικοινωνία με το χρήστη. Εκτελείται κάθε φορά που ο δέκτης τίθεται σε λειτουργία του δέκτη και προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα.

Η πηγή τροφοδοσίας του δέκτη είναι πάντοτε κάποιου είδους μπαταρίες και κατά περίπτωση και μετασχηματιστής για τροφοδοσία από μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος. Πολλές εταιρίες δεκτών προσφέρουν δικές τους μπαταρίες και ειδικά καλώδια συνδέσεων. Η διάρκεια των παρατηρήσεων με μπαταρίες είναι των μερικών ωρών. Κατά τη διάρκεια των παρατηρήσεων είναι δυνατή η αλλαγή ή προσθήκη επιπλέον μπαταριών χωρίς να διακόπτονται οι παρατηρήσεις.

Η μονάδα αποθήκευσης δεδομένων είναι στην ουσία μνήμη κάποιου τύπου , και ο σκληρός δίσκος ενός υπολογιστή όταν υπάρχει σύνδεση. Η χωρητικότητα της μνήμης αρκεί για πολλές ώρες παρατηρήσεων έως και μερικούς μήνες ανάλογα με τον τύπο μνήμης και την εφαρμογή του GPS. Το κατέβασμα των δεδομένων σε ένα pc είναι μια απλή διαδικασία .



Σχήμα 1.8 Διάφοροι δέκτες GPS των εταιριών α)Leica 510, β)Leica 1200 και γ)Topcon



Σχήμα 1.9 Διάφορες κεραίες GPS των εταιριών α) Ashtech AgGPS 106, β) Leica choked-ring AT303 (έχει μικρότερη επίδραση από τα σφάλματα ανάκλασης) και γ) Trimble .

1.4 Σφάλματα του GPS

Όπως αναφέρθηκε απαιτούνται 4 δορυφόροι για τον προσδιορισμό ενός σημείου στο χώρο. Παρόλα αυτά όμως εξαιτίας των σφαλμάτων που εμπεριέχουν οι μετρήσεις του GPS συνήθως απαιτούνται τουλάχιστον 6 με 7 δορυφόρους για να είναι οι μετρήσεις ακριβείς. Τα σφάλματα που εμφανίζονται στο GPS οφείλονται σε διάφορους τομείς της λειτουργίας και τα πιο σημαντικά είναι τα εξής :

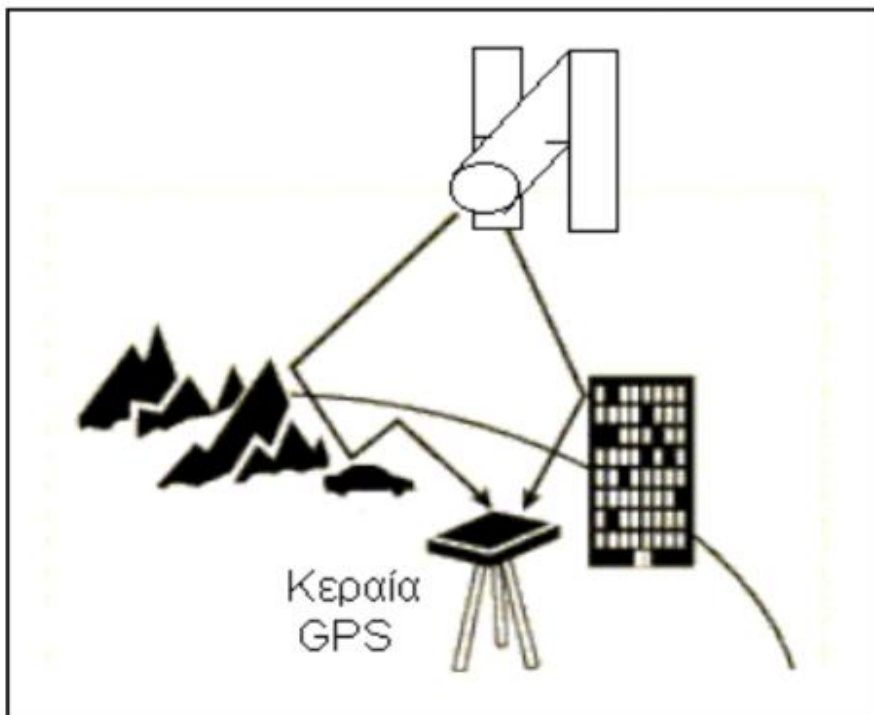
α) Τα σφάλματα των χρονομέτρων των δορυφόρων, τα οποία ελέγχονται πάντως από τα επίγεια κέντρα ελέγχου του GPS (Colorado, 1999).

β) Τα σφάλματα λόγω επίδρασης των στρωμάτων της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας καθώς το σήμα του GPS διέρχεται μέσα από αυτά τα στρώματα και διαθλάται εισάγοντας σφάλματα στα μήκη. Τα σφάλματα της ιονόσφαιρας μπορούν να αντιμετωπιστούν με χρήση δεκτών διπλής συχνότητας και την απόρριψη δορυφόρων που βρίσκονται χαμηλά στο ορίζοντα, των οποίων το σήμα υφίσταται μεγαλύτερη διάθλαση (Ge et al., 2000).

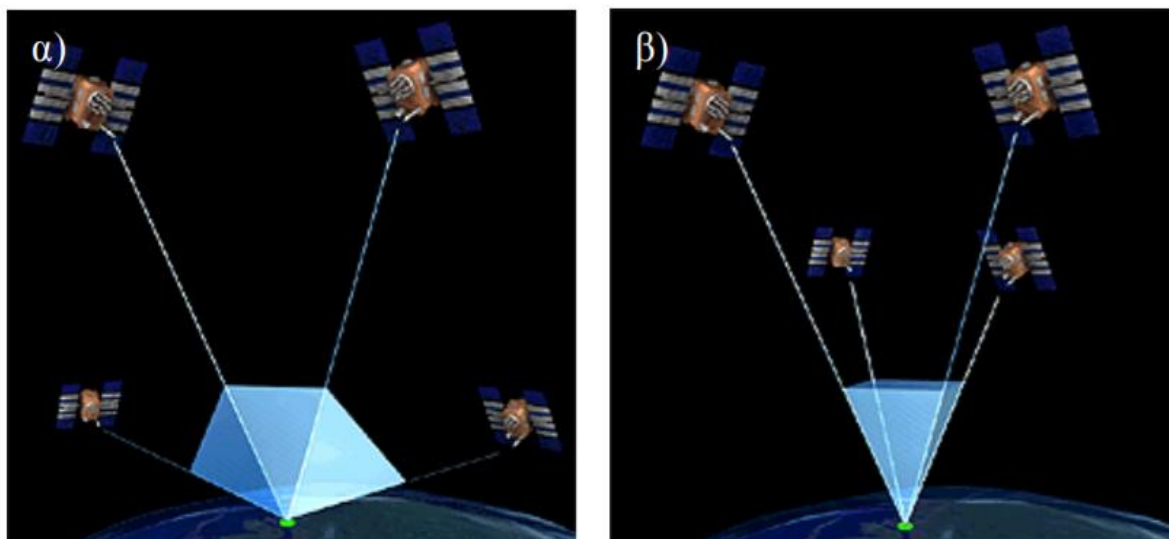
γ) Τα σφάλματα των πολλαπλών διαδρομών λόγω ανάκλασης του σήματος (multipath error). Το σφάλμα αυτό προκαλείται όταν το σήμα δεν μεταδίδεται απευθείας από τον δορυφόρο στον δέκτη αλλά πρώτα έχει γίνει ανάκλαση του πάνω σε επιφάνειες που βρίσκονται κοντά (Hartinger and Brunner, 1998). Τέτοιου είδους ανακλάσεις προκαλούν συνήθως το νερό, οι μεταλλικές επιφάνειες και τα κτίρια (σχ 1.10).

δ) Τα σφάλματα που προκαλούνται λόγω των λίγων δορυφόρων που χρησιμοποιούνται ή λόγω της κακής γεωμετρικής τους διάταξης (satellite constellation, σχ.1.11). Τα σφάλματα αυτά μειώνονται με την αύξηση του πλήθους των δορυφόρων που είναι ορατοί από τον δέκτη (6 με 8 δορυφόροι θεωρούνται αρκετοί), την καταλληλότητα της θέσης τους (σχ. 1.6) και με την αύξηση της γωνίας e που σχηματίζει ο χαμηλότερος ορατός δορυφόρος με τον ορίζοντα, δηλαδή το οριζόντιο επίπεδο (elevation mask, συνήθως $>10-15^\circ$, Rizos, 2001).

ε) Τα σφάλματα λόγω των «εποχιακών» επιδράσεων (seasonal effects). Είναι συστηματικά σφάλματα τα οποία υπεισέρχονται στις μετρήσεις λόγω των μεγάλων μεταβολών της θερμοκρασίας και της υγρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας (Eckl et al., 2001).



Σχήμα 1.10 Ανάκλαση σήματος GPS σε κτίρια, μεταλλικές επιφάνειες και ορεινούς όγκους, οδηγεί σε φαινομενικά μεγαλύτερες αποστάσεις δορυφόρου-δέκτη, γνωστό ως σφάλμα πολλαπλής διαδρομής (multipath effect).



Σχήμα 1.11 Σχέση γεωμετρικής διάταξης δορυφόρων και σφάλματος GPS: μεγάλος όγκος τετράεδρου που δημιουργείται από τους δορυφόρους και το δέκτη οδηγεί σε μικρό σφάλμα (α) ενώ μικρός όγκος τετράεδρου οδηγεί σε μεγάλο σφάλμα(β).

1.5 Μέθοδοι Μετρήσεων του GPS

Το σύστημα GPS είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μπορεί να προσδιορίζει την θέση σημείου στο χώρο είτε αυτό είναι σταθερό είτε αυτό κινείται. Ο προσδιορισμός αυτός μπορεί να γίνει με δύο μεθόδους:

- Με την μέθοδο «stand-alone» όπου έχουμε τις καταγραφές μόνο ενός GPS τοποθετημένου σε συγκεκριμένου σημείου. Στην περίπτωση αυτή η ακρίβεια δεν μπορεί να πέσει κάτω από τα 5 μέτρα (Smith, 1997). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την ναυσιπλοΐα κλπ. (Moore and Roberts, 1999).
- Με την μέθοδο «differential», ευρύτερα γνωστή ως DGPS όπου έχουμε καταγραφές δύο GPS: ενός στο σημείο που μας ενδιαφέρει (κινητού ή ακίνητου) και ενός δεύτερου GPS αναφοράς (λειτουργεί ταυτόχρονα με το πρώτο) τοποθετημένου ακίνητο σε ένα παρακείμενο σημείο αναφοράς. Οι δύο δέκτες GPS θεωρείται ότι λαμβάνουν σήματα που ακολουθούν κοινή διαδρομή, αντιστοιχούν σε κοινή γεωμετρική διάταξη και πλήθος κοινών ορατών δορυφόρων και έτσι απαλείφονται σε μεγάλο βαθμό σφάλματα που εμφανίζονται επιτυγχάνοντας ακρίβεια έως μερικών χιλιοστών (Smith, 1997).

Μία εφαρμογή της μεθόδου αυτής είναι ότι επιτρέπει να έχουμε ένα δέκτη σταθερό (δέκτη αναφοράς, base receiver) και ένα δέκτη κινούμενο (rover receiver). Οι συνεχείς μετρήσεις του δέκτη αναφοράς εμφανίζουν μεταβολή των συντεταγμένων του που οφείλεται σε σφάλματα.

Εκτιμώντας μία μέση τιμή της πραγματικής θέσης του, μπορούμε να εκτιμήσουμε τα σφάλματα κάθε στιγμής και με αυτά να διορθώσουμε τη θέση ενός κινούμενου δέκτη (rover receiver). Η επεξεργασία των μετρήσεων μπορεί να γίνει είτε εκ των υστέρων (Post-processing), εφόσον οι δέκτες διαθέτουν καταγραφικό, είτε με άμεσο προσδιορισμό (real-time) συντεταγμένων.

Η μέθοδος DGPS επιτρέπει να προσδιορίσουμε με ακρίβεια συντεταγμένες σημείων που είναι ακίνητα είτε που κινούνται. Στην πρώτη περίπτωση εφαρμόζεται η μέθοδο static, εκτιμώντας ουσιαστικά μία μέση τιμή των αποτελεσμάτων. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμογή και σε μελέτη πολύ αργών, ημιστατικών κινήσεων (π.χ. την παρακολούθηση σημείων ενός φράγματος, τεκτονικού ρήγματος ή και ηφαιστείου, όποιο ρυθμός κίνησης των σημείων θεωρείται πρακτικά μηδενικός κατά την διάρκεια των μετρήσεων).

Στη δεύτερη περίπτωση, γνωστή ως μέθοδο kinematic, εντελώς απλουστευτικά οι συντεταγμένες του σταθερού σημείου υπολογίζονται ως μέση τιμή όλων των διαθέσιμων τιμών, και οι διαφορές των συντεταγμένων κάθε στιγμής από τη μέση τιμή εισάγονται ως διορθώσεις στις αντίστοιχες τιμές των μετρήσεων του κινούμενου σημείου σε σχετικά μικρή απόσταση (<1-5km) δέκτη. Μία παραλλαγή της μεθόδου αυτής είναι η RTK (real-time kinematic) όπου κάθε στιγμή οι διορθώσεις από τον base receiver εισάγονται στον rover με ραδιοζεύξη (σχ.1.12), καλωδιακή σύνδεση ή άλλο πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας (πχ.GSM).



Σχήμα1.12 Σύστημα GPS-RTK το οποίο λειτουργεί με ραδιοζεύξη.

1.6 Εφαρμογές του GPS στην παρακολούθηση εύκαμπτων κατασκευών και δυναμικών κινήσεων.

Λόγω του σχεδιασμού του, το GPS βρίσκει πολλές εφαρμογές σε πολιτικές εφαρμογές όπως είναι η ναυσιπλοΐα (πλοήγηση πλοίων, αεροπλάνων, αυτοκινήτων, κλπ), διάφορες τοπογραφικές εφαρμογές κλπ. Τα τελευταία χρόνια εκτός από την οδοποιία, βρίσκει εφαρμογή και σε πολλές ειδικές εργασίες του πολιτικού μηχανικού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η τοποθέτηση των πυλώνων της γέφυρας ΡίουΑντιρρίου, το οποίο έγινε με την χρήση του GPS (Marchetti et al., 2004).

Μία άλλη από τις νέες εφαρμογές του GPS στην επιστήμη του Μηχανικού είναι η παρακολούθηση ταλαντώσεων των εύκαμπτων κατασκευών όπως οι γέφυρες (Roberts et al., 2004; Wong et al., 2001), τα ψηλά κτίρια (Brownjohn, 2004; Ogaja et al., 2003) και οι κεραίες (Wasilewski et al., 1999). Πρώτες προσπάθειες εφαρμογής του στην παρακολούθηση εύκαμπτων κατασκευών άρχισαν περίπου πριν μία δεκαετία (Lonse et al, 1995) παρόλο που υπήρχαν αρκετοί περιορισμοί, όπως η μία μόνο διαθέσιμη (L2 signal) από τις δύο συχνότητες εκπομπής του σήματος του γεωδαιτικών δορυφόρων λόγω δέσμευσης από τον αμερικανικό στρατό (Fontana et al., 2001) ενώ η μεγαλύτερη συχνότητα καταγραφής ήταν μόλις 1 Hz. Τα τελευταία χρόνια όμως, με την αποδέσμευση της συχνότητας L2, την αύξηση της συχνότητας καταγραφής σε 20 Hz και με την γενική βελτίωση της τεχνολογίας των GPS είναι δυνατή η παρακολούθηση ταλαντώσεων κατασκευών με μεγάλη ακρίβεια. Δύο είναι οι κύριοι λόγοι που κάνουν τόσο σημαντική την παρακολούθηση των ταλαντώσεων των κατασκευών :

1. είναι δυνατή η μέτρηση των δυναμικών χαρακτηριστικών μίας κατασκευής και πιο συγκεκριμένα της συχνότητας και το εύρους ταλάντωσης και
2. είναι δυνατή η χρήση του ως σύστημα συναγερμού, στην περίπτωση που η μετακίνηση που θα προκύψει θα υπερβαίνει κάποιο όριο ασφαλείας.

1.7 Εφαρμογή του GPS στην παρακολούθηση γεφυρών.

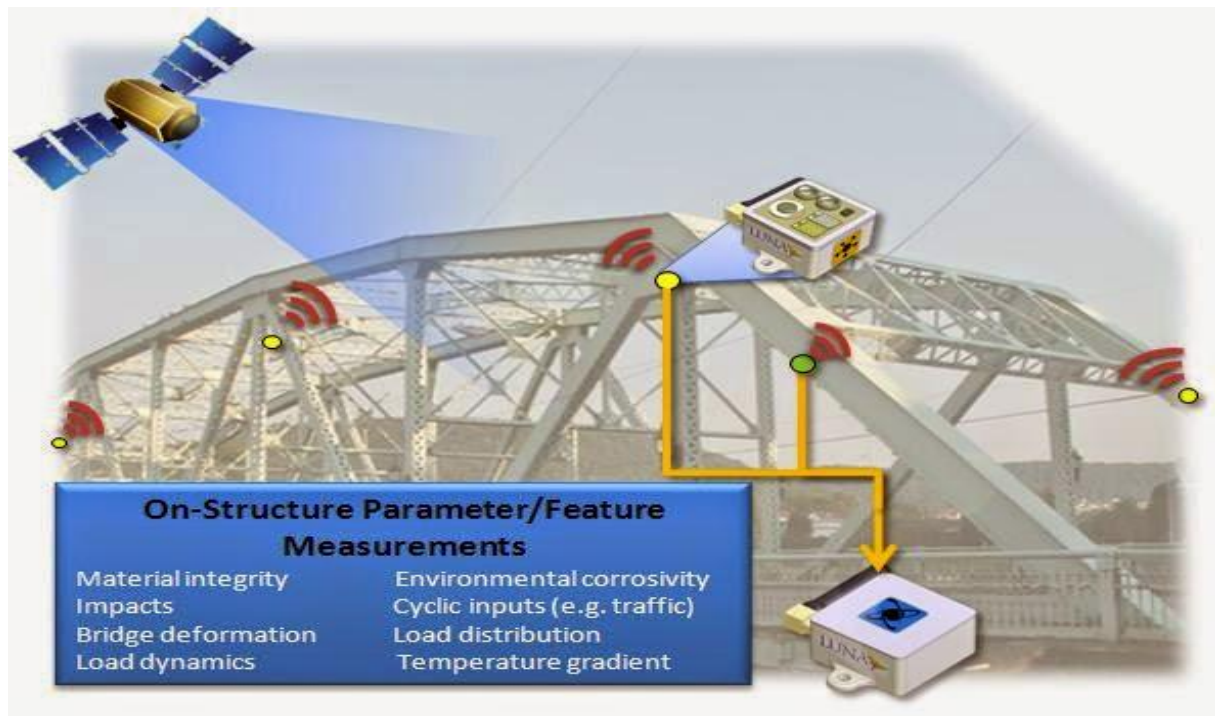
Με αφορμή αστοχίες γεφυρών κυρίως λόγω κακού σχεδιασμού (Tacoma, Millennium Bridge) έχει καθιερωθεί η συστηματική παρακολούθηση της κινηματικής των μεγάλων γεφυρών τόσο για την σωστή λειτουργία τους όσο και για την ασφάλειά τους. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες χρήσης του GPS για την παρακολούθηση των ταλαντώσεων γεφυρών που προέρχεται από δυναμικά φορτία (σεισμός, άνεμος, κυκλοφοριακός φόρτος, κλπ.; Ashkenazi and Roberts, 1997; Wong et al, 2001; Xu et al, 2002; Larocca and Schaal; 2005; Lekidis et al., 2005).

Humber Bridge

Η παρακολούθηση της Humber Bridge στην Αγγλία (σχ1.13,1.14) αποτελεί μία κλασική εφαρμογή του GPS στην παρακολούθηση της ταλάντωσης γέφυρας. Πρόκειται για μία εύκαμπτη κρεμαστή γέφυρα, με το μεγαλύτερο κεντρικό άνοιγμα μεταξύ όλων των κρεμαστών γεφυρών στο κόσμο. Για την παρακολούθηση της Humber Bridge έχουν δοκιμαστεί διάφορες εφαρμογές του GPS (π.χ. με την χρήση pseudolites, Meng et al, 2004). Η πιο ολοκληρωμένη εφαρμογή ήταν με ένα υβριδικό σύστημα παρακολούθησης αποτελούμενο από επιταχυνσιογράφους Kistler με δυνατότητα καταγραφής των επιταχύνσεων στους τρεις άξονες και συστήματα GPS.



Σχήμα1.13 Παρακολούθηση της Humber Bridge στην Αγγλία με την χρήση του GPS.

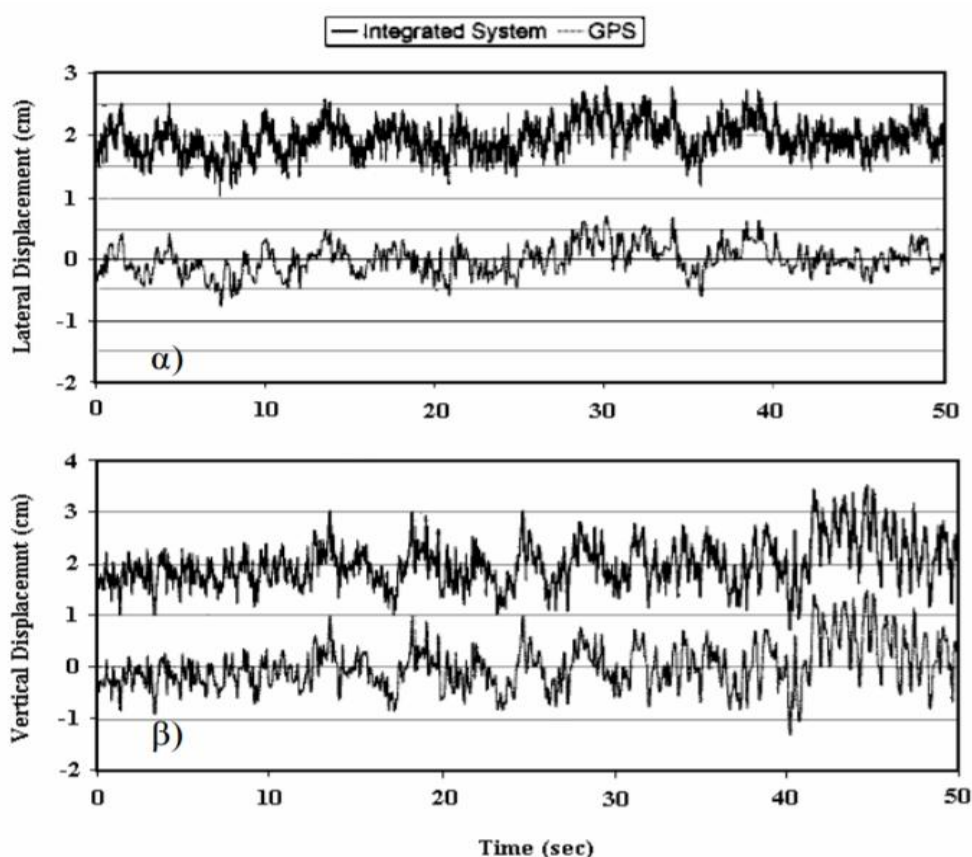


Σχήμα 1.14 Παρακολούθηση της Humber Bridge στην Αγγλία με την χρήση του GPS.

Με την χρήση κατάλληλης συσκευής τοποθετήθηκε η κεραία του GPS πάνω από τον επιταχυνσιογράφο ώστε να έχουν κοινό κατακόρυφο άξονα. Στην συνέχεια, οι καταγραφές του επιταχυνσιογράφου και του συστήματος GPS μετασχηματίστηκαν με κατάλληλο τρόπο και ανάχθηκαν σε κοινό σύστημα αναφοράς για να είναι οι μετρήσεις συγκρίσιμες.

Επόμενο βήμα ήταν να αφαιρεθούν συστηματικά σφάλματα από τις μετρήσεις των επιταχυνσιογράφων με την χρήση φίλτρου φασματικής ανάλυσης (low-pass filter), το οποίο είχε προκύψει από πειράματα κι ενώ οι επιταχυνσιογράφοι ήταν ακίνητοι. Επίσης, ειδικά φίλτρα χρησιμοποιήθηκαν για την απαλοιφή σφαλμάτων (multipath effect) των μετρήσεων του GPS. Τέλος, προσδιορίστηκε η ταχύτητα και η μετακίνηση από τις μετρήσεις των επιταχυνσιογράφων με αριθμητική ολοκλήρωση. Κατά την διαδικασία αυτή χρησιμοποιόταν ειδικός αλγόριθμος για την αφαίρεση της τάσης απόκλισης της ταχύτητας και της μετακίνησης από την πραγματική τιμή που παρουσιάζαν εξαιτίας του σημαντικού αθροιστικού σφάλματος. Στην διόρθωση αυτή συνέβαλαν και οι μετρήσεις του GPS ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Στο (σχήμα 1.15) παρουσιάζονται οι μετακινήσεις της γέφυρας στον κατακόρυφο και τον εγκάρσιο άξονα που προέκυψαν από την ολοκλήρωση των επιταχύνσεων του επιταχυνσιογράφου και τις διορθώσεις τους με βάση τις μετρήσεις του GPS, καθώς και οι μετακινήσεις με βάση μόνο τις μετρήσεις του GPS. Από την σύγκριση των διαγραμμάτων παρατηρείται ότι οι μετακινήσεις που προέκυψαν από το GPS είναι παρόμοιες με αυτές που προέκυψαν από το υβριδικό σύστημα παρακολούθησης (επιταχυνσιογράφοι και GPS).



Σχήμα 1.15 Διαγράμματα της μετακίνησης της γέφυρας Humber **α)** στον εγκάρσιο και **β)** στον κατακόρυφο άξονα. Με την μαύρη γραμμή είναι οι μετακινήσεις που προέρχονται από το υβριδικό σύστημα (επιταχυνσιογράφος και GPS) ενώ με την γκρι γραμμή είναι οι μετακινήσεις από το σύστημα GPS. Οι μετακινήσεις του υβριδικού συστήματος μετατοπίστηκαν κατά 2 cm έτσι ώστε να είναι πιο εποπτικός ο έλεγχος. Προκύπτει ότι το GPS μπορεί να καταγράψει με μεγάλη ακρίβεια τις μετακινήσεις της γέφυρας. Τροποποιημένο από Roberts et al. (2004).

Άλλες εφαρμογές

Εκτός από την παρακολούθηση της Humber Bridge η οποία είναι ιδιαίτερα γνωστή στη βιβλιογραφία, υπάρχουν και άλλες εφαρμογές παρακολούθησης γεφυρών με σύστημα GPS ιδιαίτερα στην ανατολική Ασία. Μία τέτοια εφαρμογή είναι αυτή των Wong et al. (2001) για την παρακολούθηση της γέφυρας Tsing Ma στη Κορέα. Το σύστημα παρακολούθησης της γέφυρας βασίζεται σε σύστημα GPS το οποίο παρακολουθεί τις κινήσεις κομβικών σημείων της γέφυρας σε πραγματικό χρόνο (realtime monitoring) και σε συνδυασμό με μετρήσεις από άλλα συστήματα παρακολούθησης (μηκυνσιόμετρα κ.λ.π.) δίνουν με ακρίβεια και αξιοπιστία την κινηματική κατάσταση της γέφυρας, για διάφορες καιρικές αλλά και κυκλοφοριακές συνθήκες.

Εκτός όμως από την απλή παρακολούθηση των μετακινήσεων γεφυρών έχουν γίνει και προσπάθειες για τον προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών (ιδιοσυχνότητες των κύριων ιδιόμορφων) των γεφυρών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εργασία του Nakamura (2000) για μία γέφυρα της Ιαπωνίας όπου προσδιορίστηκαν οι κύριες ιδιοσυχνότητες της με βάση τις μετρήσεις GPS, επιταχυνσιογράφων, ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία (FEM) και πειραματικές διατάξεις (πιν.2.1). Από την εργασία αυτή συνάγεται ότι οι ιδιοσυχνότητες της γέφυρας προσδιορίζονται από τις μετρήσεις του GPS με πολύ μεγάλη ακρίβεια.

Πίνακας 1.1: Συγκριτικά αποτελέσματα ιδιοσυχνοτήτων γέφυρας όπως αυτά προέκυψαν από μετρήσεις GPS, επιταχυνσιογράφων, δοκιμών φορτίου και ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Παρατηρείται ότι το GPS προσδιορίζει με μεγάλη ακρίβεια τις συχνότητες της γέφυρας, συμφωνώντας με τις ιδιοσυχνότητες που έχουν προκύψει από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και από δοκιμαστικές τεχνικές (Nakamura, 2000).

Ιδιομορφή	GPS	Επιταχυνσιογράφοι	FEM	Δοκιμαστικές Τεχνικές
Εγκάρσια (πρώτη)	0.095	0.096	0.101	0.099
Κατακόρυφη (πρώτη)	0.125	0.128	0.123	0.129
Κατακόρυφη(δεύτερη)	0.223	0.225	0.217	0.218
Διαμήκης (πρώτη)	0.152	0.151	0.149	0.149
Διαμήκης (δεύτερη)	0.202	0.203	0.196	0.196

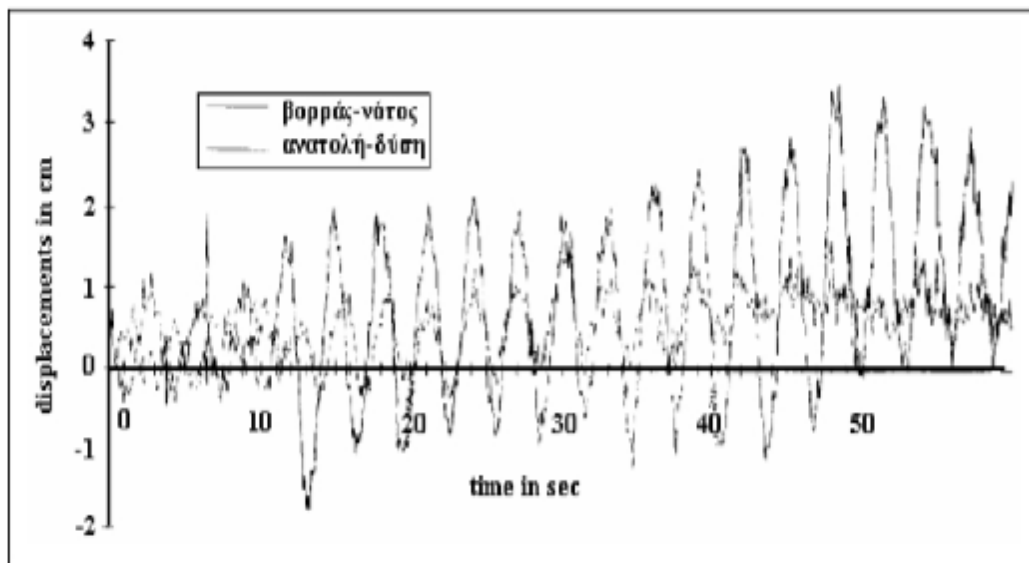
Παρακολούθηση και πρόβλεψη μετακινήσεων με την χρήση συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης και GPS.

Τέλος μία διαφορετική εφαρμογή του GPS στην παρακολούθηση των γεφυρών αποτελεί η εργασία των Alkymaz et al. (2004). Στην εργασία αυτή συνδυάστηκαν οι μετακινήσεις της γέφυρας Fatih Sultan Mehmet της Κωνσταντινούπολης που προέκυψαν από τις καταγραφές GPS, με μετρήσεις των καιρικών συνθηκών (άνεμος, υγρασία, θερμοκρασία και πίεση) και με μετρήσεις του κυκλοφοριακού φόρτου. Με βάση τα στοιχεία αυτά προγραμματίστηκε ένα νευρωνικό δίκτυο, το οποίο έπαιρνε σαν δεδομένα τις καιρικές-ατμοσφαιρικές συνθήκες και τον κυκλοφοριακό φόρτο και σαν αποτέλεσμα προέκυπταν οι μετακινήσεις της γέφυρας. Συνεπώς, το νευρωνικό δίκτυο θα μπορούσε με γνωστές τις καιρικές συνθήκες και τον κυκλοφοριακό φόρτο να προβλέπει την μετακίνηση της γέφυρας.

1.8 Εφαρμογή του GPS στην παρακολούθηση ψηλών κτιρίων, πύργων και κεραιών.

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν ορισμένες αναφορές για τις μέχρι τώρα εφαρμογές του GPS για την παρακολούθηση και άλλων εύκαμπτων κατασκευών όπως είναι τα ψηλά κτίρια, οι πύργοι και οι κεραίες, καθώς σημαντικές είναι οι μετακινήσεις που οφείλονται σε δυναμικές φορτίσεις και κυρίως στον άνεμο (Lovse et. al. 1995; Li et al., 2004; Li, 2004; Tamura et al., 2002; Brownjohn et. al., 2004.; Ogaja et al, 2003).

Μία αρχική εφαρμογή αποτελεί αυτή των Lovse et al. (1995) στην οποία με την χρήση GPS παρακολουθήθηκαν οι μετακινήσεις του Calgary Tower, εξαιτίας ισχυρού ανέμου. Το αξιοσημείωτο συμπέρασμα που προέκυψε από τις καταγραφές του GPS είναι ότι ενώ ο άνεμος ήταν δυτικός, παρουσιάστηκε μεγαλύτερη μετακίνηση κατά την διεύθυνση βορρά-νότου (σχ.1.16). Αυτό το φαινόμενο, γνωστό ως Karman-Vortex, δεν είναι ευρέως γνωστό και οφείλεται στο ότι γύρω από τον πύργο δημιουργήθηκαν στρόβιλοι στη νότια και την βόρεια πλευρά του πύργου, οι οποίοι προκάλεσαν ζώνες



Σχήμα 1.16 Διάγραμμα μετακίνησης του Calgary Tower κατά την διάρκεια πνέοντας δυτικού ανέμου. Παρατηρούμε ότι μεγαλύτερη μετακίνηση παρατηρείται κατά την διεύθυνση βορρά-νότου το οποίο οφείλεται σε στροβιλισμούς που δημιουργεί ο άνεμος και διαφοράς πίεσης που εμφανίζεται στη διεύθυνση βορρά-νότου (Τροποποιημένο από Lovse et al., 1995).

χαμηλής και υψηλής πίεσης. Λόγω της διαφοράς πίεσης εμφανίστηκε τάση για ώθηση της κατασκευής από την πλευρά που η πίεση ήταν υψηλή, ενώ εμφανίστηκε τάση για έλξη από την πλευρά που η πίεση ήταν χαμηλή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί κατά την διεύθυνση βορρά-νότου ισχυρότερη πίεση από αυτή της διεύθυνσης ανατολής-δύσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι ίσως είναι η πρώτη φορά που το φαινόμενο αυτό καταγράφεται σε κατασκευές του πολιτικού μηχανικού (Nickitoroulou et al., 2005).

Μία ακόμα γνωστή εργασία στη βιβλιογραφία αποτελεί η παρακολούθηση με GPS των μετακινήσεων του Republic Plaza στην Σιγκαπούρη (Li et al., 2004). Πρόκειται, για το ψηλότερο κτίριο (280m) μίας περιοχής η οποία δοκιμάζεται από τυφώνες και μακρινούς σεισμούς. Το σύστημα παρακολούθησης αποτελείται από σύστημα GPS, επιταχυνσιογράφο και ανεμόμετρο, τα οποία λειτουργούν συνεχώς, έτσι ώστε να υπάρχει μία συνολική εικόνα για τις φορτίσεις και την κινηματική κατάσταση του κτιρίου.

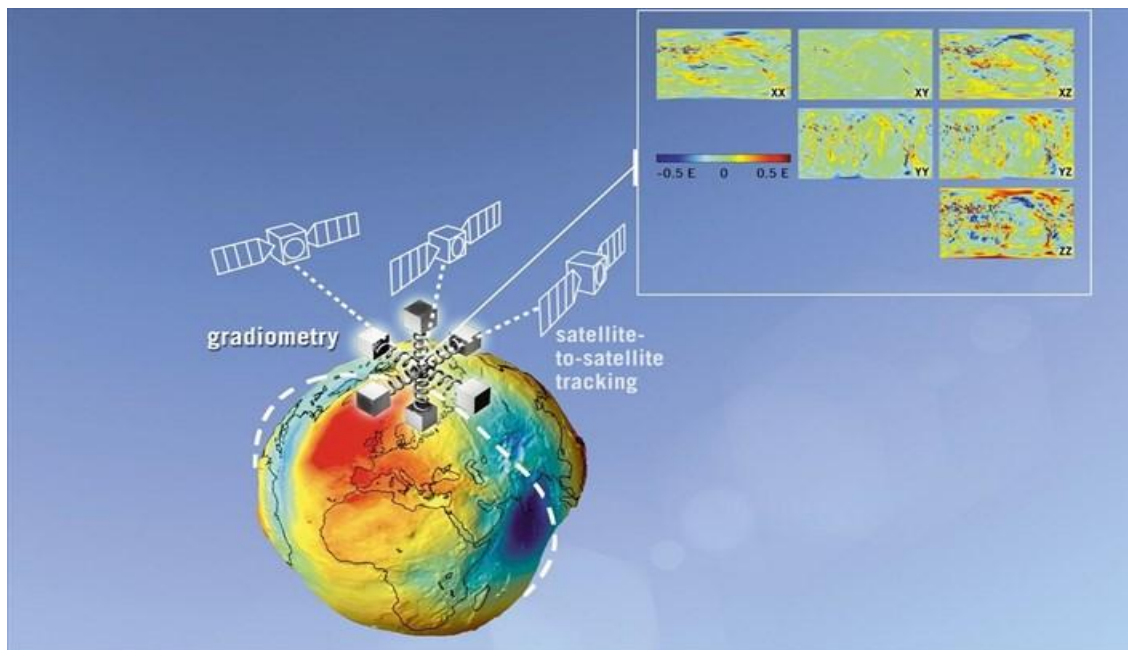
Το 2000 κατά την διάρκεια καταγραφών συνέβησαν ένας σεισμός μεγέθους 8.0 της κλίμακας Ρίχτερ και μία καταιγίδα κατά την διάρκεια της οποίας ο άνεμος είχε ταχύτητα 21 m/sec. Από την καταγραφή του GPS προσδιορίστηκαν οι μετακινήσεις της κορυφής του κτιρίου, ενώ στην συνέχεια με την χρήση της μεθόδου Wavelet Transform έγινε φασματική ανάλυση των μετακινήσεων. Από την φασματική ανάλυση παρατηρήθηκε ότι κατά την διάρκεια του σεισμού το κτίριο ταλαντώθηκε με την πρώτη (0.1 Hz) και την δεύτερη ιδιοσυχνότητα (0.7 Hz), ενώ κατά την διάρκεια της καταιγίδας κατά την ταλάντωση συμμετείχε μόνο η πρώτη ιδιομορφή (0.1 Hz). Συνεπώς, παρατηρούμε ότι το σύστημα παρακολούθησης GPS λειτούργησε με ακρίβεια καθώς τα αποτελέσματα ήταν σύμφωνα με αυτά που προέβλεπε ο δυναμικός σχεδιασμός του κτιρίου.

1.9 Χρήση του GPS ως σειсмоγράφου

Τέλος, μία ακόμα χρήση του GPS είναι για την καταγραφή σεισμών (σχήμα 1.17, 1.18), ιδιαίτερα σεισμογενείς περιοχές (Ιαπωνία, Καλιφόρνια). Ειδικότερα στην Ιαπωνία έχει εγκατασταθεί ένα ολόκληρο δίκτυο GPS, αποτελούμενο από περισσότερα από 1000 GPS, το οποίο λειτουργεί συνεχώς για την καταγραφή των παραμορφώσεων του στερεού φλοιού της γης λόγω των σεισμών, καθώς και άλλες λειτουργίες, πχ. πλοήγηση σκαφών, αυτοκινήτων, κλπ. (Miyazaki, et al, 2004).

Με τις καταγραφές των GPS όμως γίνεται και η προσομοίωση των ρηγμάτων και των σεισμών. Μία τέτοια προσπάθεια παρουσιάστηκε και στην εργασία των Miyazaki et. al. (2004) για τον σεισμό Tokachi-Oki που συνέβη το Σεπτέμβριο του 2003 και είχε μέγεθος περίπου 8 Ρίχτερ. Η εργασία τους βασίστηκε στις καταγραφές 37 δεκτών GPS με συχνότητα καταγραφής 1 Hz. Με βάση την ήδη γνωστή γεωμετρία και διάταξη του ρήγματος στο χώρο και με την βοήθεια των συναρτήσεων Green προσδιόρισαν την κίνηση του ρήγματος κατά την διάρκεια του σεισμού και γενικότερα την εξέλιξη της σεισμικής δραστηριότητας (σχ.1.19). Αξιοσημείωτο είναι ότι το μοντέλο για την σεισμική δράση του ρήγματος που προέκυψε συμφωνούσε με τα συμπεράσματα ανεξάρτητων παρατηρήσεων.

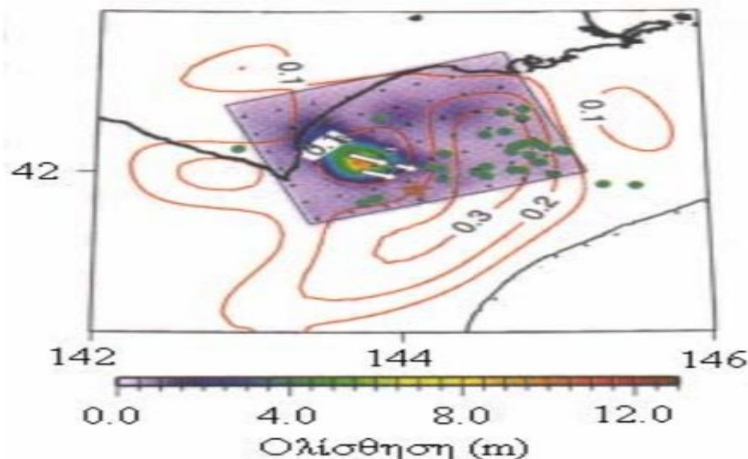
Συνεπώς, συνάγεται ότι ένα καλά οργανωμένο δίκτυο GPS μπορεί να επιτρέψει τη λεπτομερή γνώση της σεισμικής δραστηριότητας. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να έχει πολύ καλά αποτελέσματα αν κανείς αναλογιστεί οι δέκτες μπορούν πλέον να καταγράφουν και σε υψηλές συχνότητες (20 Hz).



Σχήμα 1.17 Ο πρώτος δορυφόρος σειсмоγράφος.



Σχήμα 1.18 Ο πρώτος δορυφόρος σειсмоγράφος.



Σχήμα 1.19 Απεικόνιση του μοντέλου ολίσθησης του ρήγματος κατά την διάρκεια του σεισμού Tokachi-Oki του 2003, μεγέθους 8 στην Ιαπωνία με βάση τις μετρήσεις GPS.

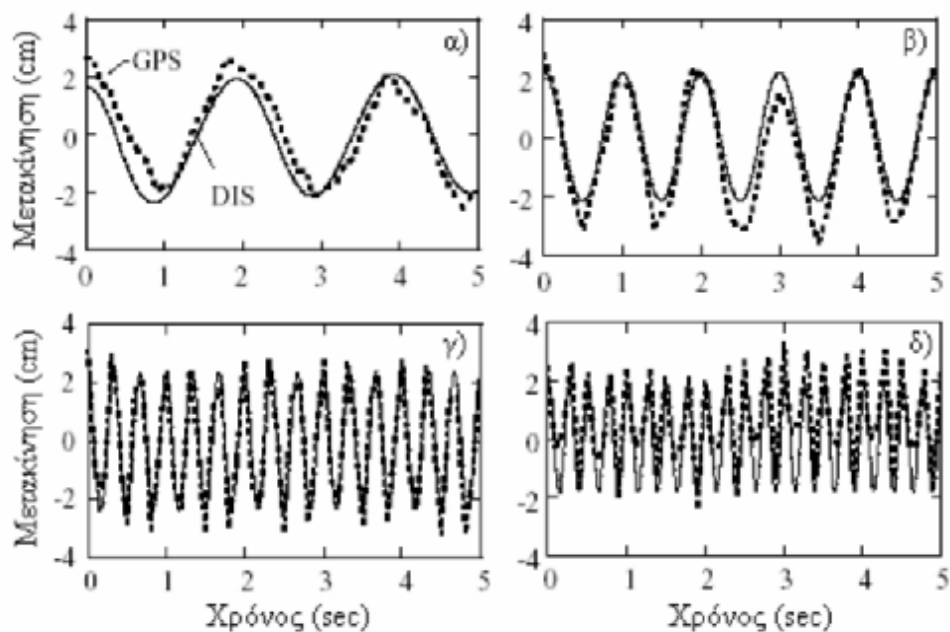
1.10 Το πρόβλημα του προσδιορισμού της αξιοπιστίας και της ακρίβειας των ορίων εφαρμογών του GPS.

Παρότι το GPS έχει εφαρμοστεί σε αρκετές περιπτώσεις παρακολούθησης ταλαντώσεων/μετακινήσεων κατασκευών ή και του εδάφους λόγω φυσικών φαινομένων (σεισμών, κατολισθήσεων και ηφαιστειών), οι μελέτες τεκμηρίωσης της ακρίβειας και των ορίων εφαρμογής του είναι εξαιρετικά περιορισμένες, και τα μέχρι τώρα γνωστά πειράματα πολύ λίγα.

Η εργασία των Tamura et al. (2002) είναι από τις ελάχιστες που έχουν μέχρι τώρα πραγματοποιηθεί για τον προσδιορισμό των κινήσεων που μπορεί να καταγράψει με ακρίβεια το σύστημα GPS. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε μία συσκευή διέγερσης η οποία εκτελούσε αρμονικές ταλαντώσεις. Οι μετρήσεις του GPS ήταν real-time, δηλαδή τα αποτελέσματα προέκυπταν άμεσα και δεν γινόταν περαιτέρω επεξεργασία για την απαλοιφή σφαλμάτων. Η συχνότητα καταγραφής του GPS ήταν 10 Hz. Στα πειράματα που διεξήχθησαν δοκιμάστηκαν κινήσεις με συνολικό εύρος ταλάντωσης από 1 έως 10cm, ενώ η συχνότητα κίνησης κυμαινόταν από 0.5 έως 4 Hz. Οι ταλαντώσεις της συσκευής καταγράφονταν με την βοήθεια ενός μετρητή μηκών (transducer) ο οποίος συνδεόταν με τον ταλαντωτή μέσω καλωδίου. Τα αποτελέσματα της ταλάντωσης που προέκυπταν από το GPS

συγκρίθηκαν με τις καταγραφές του μετρητή και προέκυψε ότι το GPS μπορεί να καταγράψει με ακρίβεια ταλαντώσεις με εύρος ταλάντωσης μεγαλύτερο από 2 cm και συχνότητα κίνησης μικρότερη από 2 Hz (σχ.1.20).

Συνεπώς, ελάχιστες είναι οι προσπάθειες για τον προσδιορισμό της ακρίβειας του GPS στην καταγραφή ταλαντώσεων, ενώ μέχρι τώρα δεν έχει επιχειρηθεί πειραματικά κανένας έλεγχος της ακρίβειας στην καταγραφή ταλαντώσεων με την χρήση φασματικών μεθόδων.



Σχήμα 1.20 Διάγραμμα καταγραφής της ταλάντωσης της συσκευής με GPS (διακεκομμένη γραμμή) και transducer(συνεχής γραμμή) για συνολικό εύρος ταλάντωσης 4 cm και συχνότητα κίνησης α) 0.5 Hz, β) 1Hz, γ) 3Hz και 4 Hz. Προκύπτει ότι για ταλαντώσεις μέχρι 2 Hz το GPS μπορεί να καταγράψει την ταλάντωση με ακρίβεια. (Τροποποιημένο από Tamura et al., 2004).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΣ ΘΕΟΔΟΛΙΧΟΣ (RTS)

2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας.

Το RTS (Robotic Total Station) είναι γεωδαιτικό όργανο νέας γενιάς και αποτελεί την εξέλιξη του ηλεκτρονικού θεοδολίχου. Βασίζεται στον εφοδιασμό του ηλεκτρονικού θεοδολίχου με σερβοκινητήρα και έναν μικροεπεξεργαστή που επιτρέπουν είτε προγραμματισμένες σκοπεύσεις, είτε παρακολούθηση και μέτρηση των συντεταγμένων του κινητού στόχου. Η λειτουργία του βασικά στηρίζεται στην εκπομπή μιας ακτίνας laser, η οποία ανακλάται σε έναν ανακλαστήρα, επιστρέφει στο όργανο και μετράται η θέση του κινούμενου ή σταθερού ανακλαστήρα σε τοπικό σύστημα πολικών συντεταγμένων (απόσταση μεταξύ οργάνου και ανακλαστήρα και η γωνία της ακτίνας ως προς τον κατακόρυφο και κάποιον οριζόντιο άξονα αναφοράς). Στη συνέχεια, οι συντεταγμένες μετασχηματίζονται σε καρτεσιανό σύστημα αναφοράς που ορίζεται από τον χρήστη. (Π.Ψιμούλης 2009)

Ο ρομποτικός θεοδολίχος άρχισε να χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια για τις ανάγκες χαράξεων τεχνικών έργων αλλά και ως σύστημα παρακολούθησης κτιρίων (π.χ παρακολούθηση μετακινήσεων κτιρίων που βρίσκονται σε περιοχές διάνοιξης σήραγγας), φραγμάτων κλπ. καθώς επίσης και στην παρακολούθηση της εξέλιξης πολλών φυσικών φαινομένων όπως η ηφαιστειακή δραστηριότητα, η κίνηση κατολισθήσεων και οι θαλάσσιοι κυματισμοί.



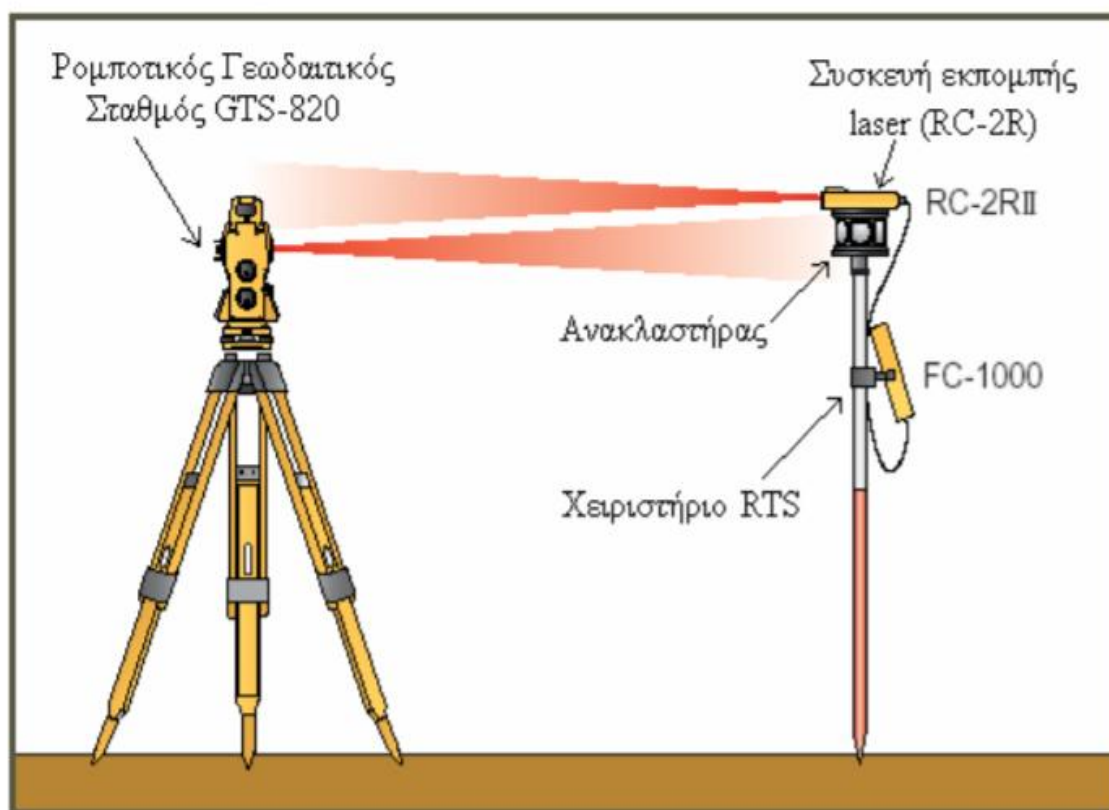
Σχήμα 2.1 α) Ρομποτικός θεοδόλιχος Trimble 5600 και β) ρομποτικός θεοδόλιχος της Topcon.

Τα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τον ρομποτικό θεοδόλιχο από τους κοινούς γεωδαιτικούς σταθμούς και του δίνουν τη δυνατότητα παρακολούθησης μεγαλύτερου πλήθους σημείων είναι τα εξής:

- Μπορεί να περιστρέφεται προγραμματισμένα και αυτόματα προς όλες τις διευθύνσεις και κλίσεις με την βοήθεια ενός σερβο-κινητήρα περιστροφής του τηλεσκοπίου και να εκτελεί προγραμματισμένες μετρήσεις (αυτόματη περιστροφή τηλεσκοπίου).
- Χάρη σε ένα ειδικό σύστημα laser που διαθέτει μπορεί να εντοπίζει της ανακλαστικές σαρώνοντας επιλεγμένη περιοχή σκόπευσης με βάση τη δυνατότητα κίνησης που του δίνει ο σερβο-κινητήρας.
- Σύμφωνα με τις εντολές του χρήστη μπορεί να καταγράφει μετρήσεις αυτόματα (ανά τακτά χρονικά διαστήματα ανά

συγκεκριμένη υψομετρική διαφορά ή και ανά τακτές αποστάσεις). Οι μετρήσεις αποθηκεύονται σε εσωτερική μνήμη ή με κατάλληλη σύνδεση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Όλοι οι ρομποτικοί θεοδόλιχοι διαθέτουν την ίδια βασική λειτουργία, μπορεί να διαφέρουν στα τμήματα από τα οποία αποτελούνται, ορισμένοι συνοδεύονται από συσκευή-πομπό η οποία επιτρέπει να γίνεται ο εντοπισμός του ανακλαστήρα αυτόματα (Π. Ψιμούλης 2009), (Σχήμα 2.2).

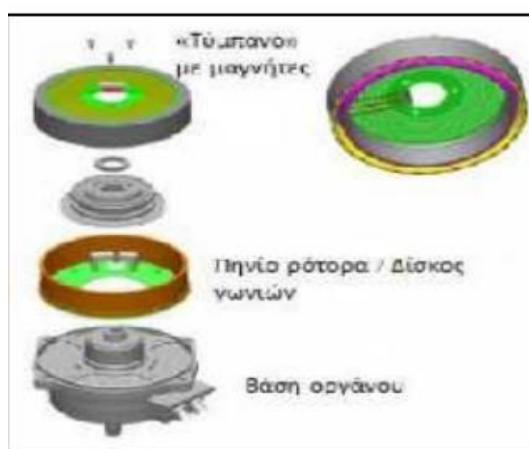


Σχήμα 2.2 Σύστημα εντοπισμού του RTS από τον ανακλαστήρα της εταιρίας Topcon (Topcon, 2005).

2.1.1 Αυτόματη περιστροφή τηλεσκοπίου.

Η αυτόματη περιστροφή τηλεσκοπίου υλοποιείται με τρεις διαφορετικές τεχνολογίες:

- Η πρώτη αποτελεί ευρεσιτεχνία της εταιρείας Trimble και είναι γνωστή με το όνομα MagDrive (Σχήμα 2.3). Η βασική αρχή λειτουργίας στηρίζεται στη χρήση ενός ομοαξονικά τοποθετημένου τυμπάνου με ενσωματωμένους μαγνήτες, το οποίο περιστρέφεται γύρω από ένα πηνίο σταθερά συνδεδεμένο με τη βάση του οργάνου. Στο πηνίο διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα που παράγει ηλεκτρομαγνητική δύναμη η οποία περιστρέφει το τύμπανο με τους μαγνήτες, το οποίο με τη σειρά του είναι σταθερά συνδεδεμένο με το όργανο. Πανω στον ίδιο μηχανισμό είναι επίσης ομοαξονικά τοποθετημένος και ο δίσκος ανάγνωσης των γωνιών. Αντίστοιχα επιτυγχάνεται και η περιστροφή γύρω από τον δευτερεύοντα άξονα του οργάνου. Βασικό πλεονέκτημα αυτού του συτήματος είναι, αφενός είναι ότι η ίδια διάταξη μπορεί να επιταχύνει ή να επιβραδύνει γωνιακά την κίνηση του οργάνου χωρίς να γίνεται απαραίτητη η χρήση επιπλέον μηχανισμού επιβράδυνσης, γεγονός που συνεπάγεται απλούστερα μηχανικά μέρη, μικρότερο αναρτώμενο βάρος, και μειωμένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και αφετέρου, ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία, έχει εν γένει την ικανότητα επίτευξης πολύ υψηλών γωνιακών ταχυτήτων, συγκρινόμενη με την κίνηση των κλασικών σερβομηχανισμών (Lemmon, Jung, 2005).



Σχήμα 2.3 Τεχνολογία MagDrive.

- Η δεύτερη τεχνολογία εισήχθη και χρησιμοποιείται από τις εταιρείες Topcon και Leica Geosystems και βασίζεται στη χρήση σερβομηχανισμών, οι οποίοι είναι ηλεκτρικοί κινητήρες με δυνατότητα πλήρους ελέγχου της ταχύτητας και της γωνίας περιστροφής του άξονα τους. Οι μηχανισμοί αυτοί δεν είναι συνδεδεμένοι με ομοαξονικά με τον πρωτεύοντα και δευτερεύοντα άξονα των οργάνων, αλλά συνδέονται με αυτούς μέσω ενός συστήματος μετάδοσης της κίνησης (gearbox).

Τα βασικότερα μειονεκτήματα τους σε σχέση με την τεχνολογία MagDrive είναι ότι με την προσθήκη επιπλέον μηχανικών μερών, αυξάνεται το βάρος και η πολυπλοκότητα του συστήματος, ενώ απαιτείται μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία τους. Σημαντικό όμως πλεονέκτημα των σερβομηχανισμών είναι το χαμηλότερο κόστος τους λόγω της ευρείας χρήσης τους σε πληθώρα μηχανημάτων.

- Η Τρίτη τεχνολογία η οποία εισήχθη πρόσφατα από την εταιρεία Leica βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει απειροελάχιστες μικροκινήσεις της τάξης των νανομέτρων στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα του γεωδαιτικού σταθμού με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον έχει πολύ αθόρυβη κίνηση και αρκετά μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής (180μοίρες/ sec) από τους μέχρι σήμερα αντίστοιχους γεωδαιτικούς σταθμούς (πιν.2.1). Τέλος, μια καινοτομία αυτών των σταθμών είναι ότι μπορούν να περιστραφούν από τον χρήστη με τρεις διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιοι ρομποτικοί σταθμοί με τις αντίστοιχες ταχύτητες περιστροφής τους.

Γεωδαιτικός σταθμός	Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής
Leica TS30	180°/sec
Trimble VS	115°/sec
Trimble S6	115°/sec
Topcon IS	85°/sec
Leica TPS-1200	15°/sec
Topcon GTP-8200	50°/sec

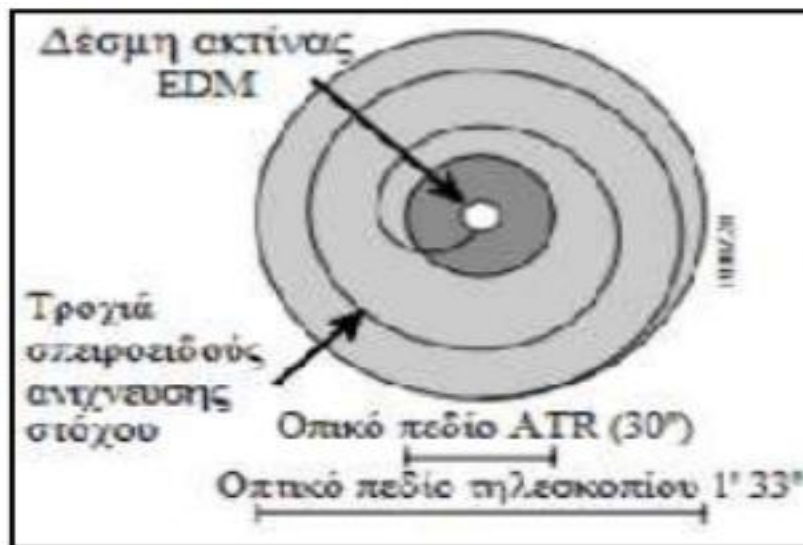
2.1.2 Αυτόματη αναγνώριση στόχου (ATR-Automatic Target Recognition).

Βασιζόμενοι οι κατασκευαστές των οργάνων στην αυτόματη κίνηση του τηλεσκοπίου, το επόμενο βήμα αφορά στη δυνατότητα αναγνώρισης ενός γεωδαιτικού στόχου και στην παρακολούθησή του όσο είναι σε κίνηση. Όπως και στην παραπάνω περίπτωση, οι εταιρείες κατασκευής των οργάνων, έχουν αναπτύξει δύο διαφορετικές τεχνολογίες αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου, το σύστημα ενεργητικής αναγνώρισης στόχου και το σύστημα παθητικής αναγνώρισης στόχου.

Το σύστημα αναγνώρισης στόχου βασίζεται στην εκπομπή μιας αόρατης ακτίνας laser χαμηλής ισχύος από το όργανο, η οποία ανακλώμενη στο στόχο, επιστρέφει στο όργανο πάνω στον ίδιο άξονα εκπομπής της (ομοαξονικά). Κατόπιν αφού διαχωριστεί από τις υπόλοιπες ακτίνες (ακτίνα EDM και ορατό φως) προσπίπτει σε μια διάταξη CCD. Ανάλογα με τη θέση της προσπίπτουσας ακτίνας laser ως προς το κέντρο της διάταξης CCD, δίνεται εντολή στους σερβομηχανισμούς να εκτελέσουν μικροδιορθώσεις στις γωνιακές θέσεις του οργάνου (οριζόντια και κατακόρυφη γωνία), έως ότου η απόκλιση της προσπίπτουσας ακτίνας από τον σκοπευτικό άξονα δηλαδή από το κέντρο του σταυρονήματος να μην ξεπερνά μια προκαθορισμένη τιμή.

Πρακτικά για την έναρξη της λειτουργίας της αυτόματης αναγνώρισης στόχου, απαιτείται ο αρχικός εντοπισμός του στόχου από τον παρατηρητή. Αν ο ανακλαστήρας βρίσκεται στο 1/3 του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου του γεωδαιτικού σταθμού, η αναγνώριση γίνεται αυτόματα και στιγμιαία. Σε διαφορετική περίπτωση το όργανο εκτελεί σπειροειδής κινήσεις διάρκειας 2-4sec, απομακρυνόμενο από το κέντρο του άξονα σκόπευσης, έως ότου μπορέσει να λάβει την ανακλώμενη από τον στόχο ακτίνα (Σχήμα 2.4). Εάν κάτι τέτοιο δεν καταστεί εφικτό, δηλαδή εάν ο στόχος είναι εκτός του πεδίου του τηλεσκοπίου, τότε η διαδικασία αναγνώρισης στόχου αποτυγχάνει. Η εμβέλεια λειτουργίας της διαδικασίας της αυτόματης αναγνώρισης στόχου εξαρτάται από τον

γεωδαιτικό σταθμό, τον ανακλαστήρα, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και στη μέγιστη τιμή της φτάνει τα 300m.



Σχήμα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος ανίχνευσης στόχου Leica TCA-1800.

Στην περίπτωση που η οριζόντια και η κατακόρυφη γωνιακή απόσταση στο κέντρο του σταυρονήματος από το κέντρο του στόχου είναι μικρότερη από τα 50, τότε το όργανο υπολογίζει τη διόρθωση και παράγει τις τιμές των διευθύνσεων διορθωμένες, χωρίς να βρίσκεται στο κέντρο του στόχου. Έτσι, ενώ η μέτρηση λαμβάνεται έκκεντρα η καταγραφή της τιμής είναι η σωστή.

Η αβεβαιότητα με την οποία τοποθετείται το κέντρο του σταυρονήματος στο κέντρο του ανακλαστήρα από 2mm έως 5mm και εξαρτάται από:

- Την εσωτερική ακρίβεια του ATR, η οποία εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα της διάταξης CCD που διαθέτει το RTS.
- Την εξωτερική ακρίβεια του ATR, που είναι συνάρτηση του τύπου του ανακλαστήρα και των ατμοσφαιρικών συνθηκών τη στιγμή της μέτρησης και της απόστασης του ανακλαστήρα από το RTS (Λάμπρου, Πανταζής, 2010).

Στην περίπτωση της παθητικής αναγνώρισης, όπως συμβαίνει με το ρομποτικό σταθμό GTS-8200 της εταιρείας Topcon, το όργανο λειτουργεί πλέον ως δέκτης μιας ακτινοβολίας που

εκπέμπεται από τον στόχο (ενεργός στόχος) και όχι από το ίδιο το όργανο. Επίσης στα παθητικά συστήματα, η ακτίνα δεν εκπέμπεται ομοαξονικά με τον άξονα σκόπευσης, αλλά παρουσιάζει μια εκκεντρότητα ως προς αυτόν, με αποτέλεσμα να μην επιτρέπεται η λειτουργία του συστήματος σε δεύτερη θέση τηλεσκοπίου.

2.1.3 Κλείδωμα και παρακολούθηση κινούμενου στόχου (Auto Lock Mode).

Από τις πιο σημαντικές λειτουργίες των ρομποτικών σταθμών που τους κάνει να ξεχωρίζουν από τους απλούς είναι το κλείδωμα και η παρακολούθηση στόχου η οποία αποτελεί πραγματικό εργαλείο για τον Μηχανικό αφού έχει πολλές εφαρμογές.

Σε αυτή τη λειτουργία αφού ανιχνευτεί ο στόχος, πραγματοποιηθεί η μέτρηση και αφού ενεργοποιηθεί στον σταθμό η κατάσταση παρακολούθησης στόχου, τότε αυτό κλειδώνει τον στόχο και ανάλογα με τις δυνατότητες του ρομποτικού σταθμού μπορεί να συνεχίσει τη λήψη μετρήσεων ανά κάποιο χρονικό διάστημα ή ανά τακτή απόσταση. Κατά τη λειτουργία παρακολούθησης στόχου (tracking), η διαδικασία αναγνώρισης στόχου επαναλαμβάνεται με τη μορφή βρόγχου, ενώ εμπλέκονται στη διαδικασία ειδικοί αλγόριθμοι παρεμβολής.

Η λειτουργία της αυτόματης εύρεσης και παρακολούθησης στόχου βρίσκει εφαρμογή σε χαράξεις τεχνικών έργων οδοποιίας, όπου με αυτόν τον τρόπο παρέχεται η δυνατότητα καθοδήγησης του μηχανήματος διάνοιξης μιας οδού (Λάμπρου, Πανταζής,2010).

2.1.4 Αυτόματα ελεγχόμενη λειτουργία μέσω ασύρματου τηλεχειριστηρίου.

Με την προσθήκη του χαρακτηρισμού του αυτόματου τηλεχειριστηρίου του οργάνου σε πραγματικό χρόνο καθιστά τους γεωδαιτικούς σταθμούς αυτόματα ελεγχόμενους από απόσταση (robotic).

Ο χειρισμός τους μπορεί να γίνεται για πεπερασμένη απόσταση, της τάξης των 800m, μέσω ενός πληκτρολογίου, το οποίο έχει τη δυνατότητα να αποσπάζεται από το όργανο και να τοποθετείται πάνω σε ειδικό στύλο μαζί με τον ανακλαστήρα (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5 Ασύρματο τηλεχειριστήριο Leica

Η επικοινωνία του πληκτρολογίου με το RTS γίνεται ασύρματα μέσω ενός radio-modem, που είναι ενσωματωμένο στον ρομποτικό θεοδόλιχο. Έτσι οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιούνται από ένα μόνο άτομο. Το όργανο παρακολουθεί τον ανακλαστήρα που κινείται με τον στοχοφόρο. Λαμβάνοντας εντολή από αυτόν εκτελεί την μέτρηση αποθηκεύοντας την αυτόματα στην μνήμη του. Με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει εργασίες όπως η χάραξη ή η αποτύπωση σημείων, από τη θέση του κατάφωτου.

2.1.5 Αμφιπρισματικός ανακλαστήρας 360°.

Το χαρακτηριστικό αυτού του τύπου πρίσματος είναι ότι δεν είναι απαραίτητη η μετωπική στροφή προς τον θεοδόλιχο. Ένας αμφιπρισματικός ανακλαστήρας, όπως στο (Σχήμα 2.6), διαθέτει έξι πρίσματα, τοποθετημένα ομοαξονικά σε ίνες γωνίες, με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η επιστροφή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο RTS, ανεξάρτητα από την γωνία πρόπτωσης.



Σχήμα 2.6 Αμφιπρισματικός ανακλαστήρας Leica 360°.

2.2 Προδιαγραφές ρομποτικών θεοδόλιχων.

Ένα βασικό στοιχείο που πρέπει να εξετάσει κανείς με προσοχή πριν προβεί στην αγορά ρομποτικού θεοδόλιχου είναι οι προδιαγραφές που δίνονται από τον κατασκευαστή και οι προοπτικές βελτίωσης ή εξέλιξης του οργάνου. Οι εταιρείες που κατασκευάζουν ρομποτικούς θεοδόλιχους παγκοσμίως είναι τέσσερις: η Leica, η Trimble, η Topcon και η Sokkia. Στον παρακάτω πίνακα 2.2 αναφέρονται οι προδιαγραφές για χαρακτηριστικούς τύπους ρομποτικών θεοδόλιχων των παραπάνω τεσσάρων γνωστών εταιρειών:

Τύπος RTS	Συχνότητα Καταγραφής (HZ)	Ακρίβεια Μέτρησης (mm)	Μέγιστη Απόσταση Μέτρησης (m)
Leica TCA 1200	Έως και 10	5 +- 2ppm	3000
Trimble S6	Έως και 2,5	5 +- 2ppm	3000
Trimble5605	Έως και 2,5	10 +- 3ppm	2500
Topcon GTS-900A	Έως και 5	2 +- 2ppm	3000
Sokkia SRX		5 +- 2ppm	5000

Πίνακας 2.2 Προδιαγραφές για χαρακτηριστικούς τύπους ρομποτικών θεοδόλιχων.

2.2.1 Εφαρμογές του RTS στην καταγραφή αργών-στατικών μετακινήσεων.

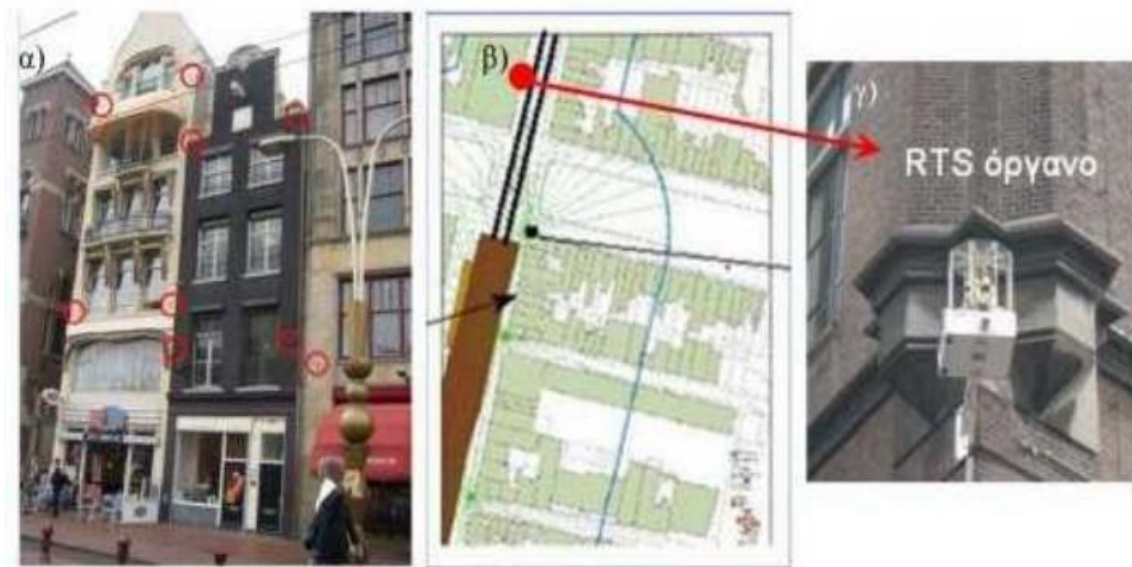
Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του RTS (προγραμματισμένη μέτρηση, μέτρηση κινούμενου στόχου) το καθιέρωσαν σε πολλές μηχανικές εφαρμογές κάνοντας τις εργασίες πιο αυτοματοποιημένες, οικονομικές και γρήγορες. Ιδιαίτερα η δυνατότητα του εντοπισμού των ανακλαστήρων και της αυτόματης μέτρησης βρήκε εφαρμογή σε δίκτυα ελέγχου μετακινήσεων.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η συστηματική καταγραφή των μετακινήσεων των κτιρίων που βρίσκονται στην περιοχή της διάνοιξης νέας σήραγγας, του μετρό στο Άμστερνταμ (Σχήμα 2.7). Ένα δίκτυο RTS τοποθετήθηκε σε θέσεις κατάλληλες ώστε να μπορούν να στοχεύουν τις προκαθορισμένες θέσεις ελέγχου στις προσόψεις των κτιρίων, ώστε να μπορούν να στοχεύουν τις προκαθορισμένες θέσεις

ελέγχου στις προσόψεις των κτιρίων, ώστε να ελέγχεται αν και κατά πόσο μετακινούνται τα κτίρια πριν, κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας και μετά την αποπεράτωση των εργασιών. Όμοιες εφαρμογές αφορούν παρακολούθηση φράγματος κατολισθήσεων κτλ.

Ο πρόσφατος εφοδιασμός ορισμένων RTS με σερβοκινητήρα, με υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας (ονομαστική συχνότητα ακόμη και 10HZ) δίνει την δυνατότητα να καταγράφονται μετακινήσεις κατασκευών υπό φορτίσεις.

Λόγω όμως της πρόσφατης εισαγωγής του RTS είναι λίγες οι σχετικές εφαρμογές.



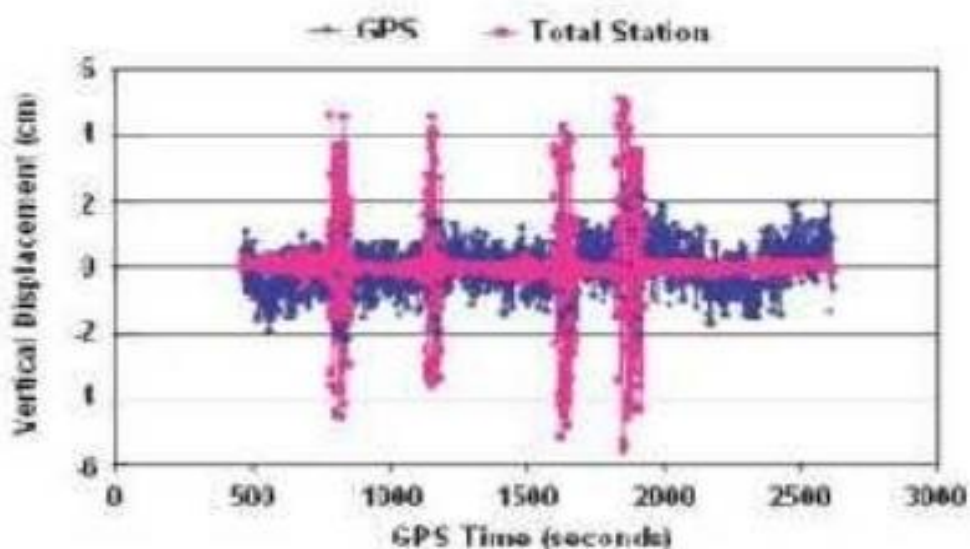
Σχήμα 2.7 α) Σημεία ελέγχου κτιρίων σε περιοχή διάνοιξης σήραγγας του μετρό του Άμστερνταμ β) Περιοχή ελέγχου ενός σταθμού RTS που καταγράφει τις μετακινήσεις των ορατών σημείων ελέγχου γ) Σταθμός RTS στην γωνία του οικοδομικού τετραγώνου, τοποθετημένος κατάλληλα για να προστατεύεται από βρωδαλισμούς και καιρικές συνθήκες.

2.2.2 Εφαρμογές Παρακολούθησης δυναμικών μετακινήσεων κατασκευών με χρήση RTS.

Στη διεθνή βιβλιογραφία είναι γνωστές τέσσερις, προκαταρκτικές μελέτες ταλαντώσεων κατασκευών πολιτικού μηχανικού με χρήση RTS.

Α.Πεζογέφυρα Wilford (Αγγλία)

Η πρώτη ίσως εφαρμογή παρακολούθησης δυναμικών μετακινήσεων με RTS είναι αυτή της γέφυρας Wilford στο Νόττινγχαμ της Αγγλίας, η οποία είναι κρεμαστή πεζογέφυρα μήκους 60 μέτρων . Η μελέτη μετακινήσεων της γέφυρας λόγω διέλευσης πεζών έγινε από τους Cosser et al. (2003) με χρήση RTS με 1Hz συχνότητα καταγραφής και GPS με 10Hz συχνότητα καταγραφής. Ομάδες ανθρώπων περνούσαν πάνω από τη γέφυρα είτε περπατώντας είτε τρέχοντας με στόχο να προκαλέσουν την ταλάντωση της. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στο Σχήμα 2.8 το οποίο δείχνει μη συμβατές μετακινήσεις μεταξύ GPS και RTS. Ως αίτιο οι Cosser et al.(2003) αναφέρουν την αβεβαιότητα που προκλήθηκε από χρήση πολλαπλού ανακλαστήρα ο οποίος θεωρήθηκε ότι εισάγει σφάλμα κλίμακας.



Σχήμα 2.8 Διάγραμμα μετακινήσεων της Wilford Bridge όπως κατεγράφησαν από τα GPS-RTS.

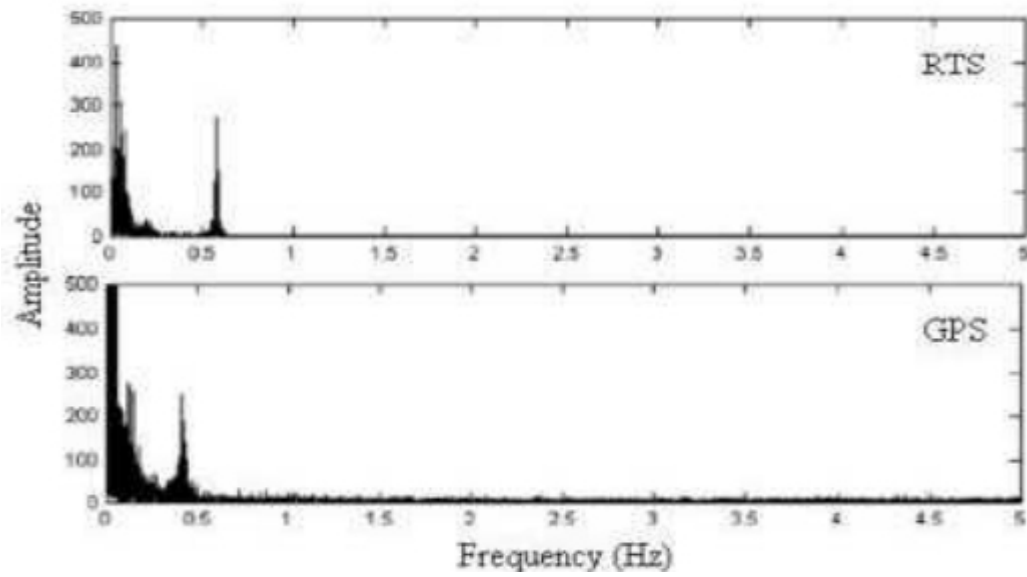
Β.Γέφυρα Ευρίπου

Η γέφυρα Ευρίπου είναι καλωδιωτή γέφυρα συνολικού μήκους 395 μέτρων στην οποία υπάρχει μόνιμο δίκτυο 43 επιταχυνσιογράφων των οποίων οι καταγραφές συγχρονίζονται με χρήση GPS. Για την καταγραφή των μετακινήσεων λόγω κυκλοφοριακού φόρτου τοποθετήθηκαν ένας δέκτης GPS και ένας ανακλαστήρας στο μέσο του κεντρικού ανοίγματος, ενώ παραπλεύρως τοποθετήθηκαν ένα δεύτερο GPS και ένα RTS τύπου Leica TCA1800(Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.9 Γέφυρα Ευρίπου.

Κατά τους Lekidis et al (2006) από τις καταγραφές του RTS προέκυψαν μετρήσεις με ακρίβεια περίπου 5mm για τις οριζόντιες συντεταγμένες και 3mm για την κατακόρυφη. Με φασματική ανάλυση FFT προέκυψε κύρια συχνότητα στα 0,56Hz, καθώς και άλλες μη στατιστικά σημαντικές περίπου στα 0,35Hz, Σχήμα(2.10). Από την αντίστοιχη ανάλυση FFT των καταγραφών του GPS προέκυψε κύρια συχνότητα στα 0,45Hz, ενώ από τις καταγραφές επιταχυνσιογράφων 0,40Hz. Η διαφορά των εκτιμημένων συχνοτήτων οφείλεται πιθανότατα σε σφάλμα της περιόδου δειγματοληψίας των καταγραφών του RTS.



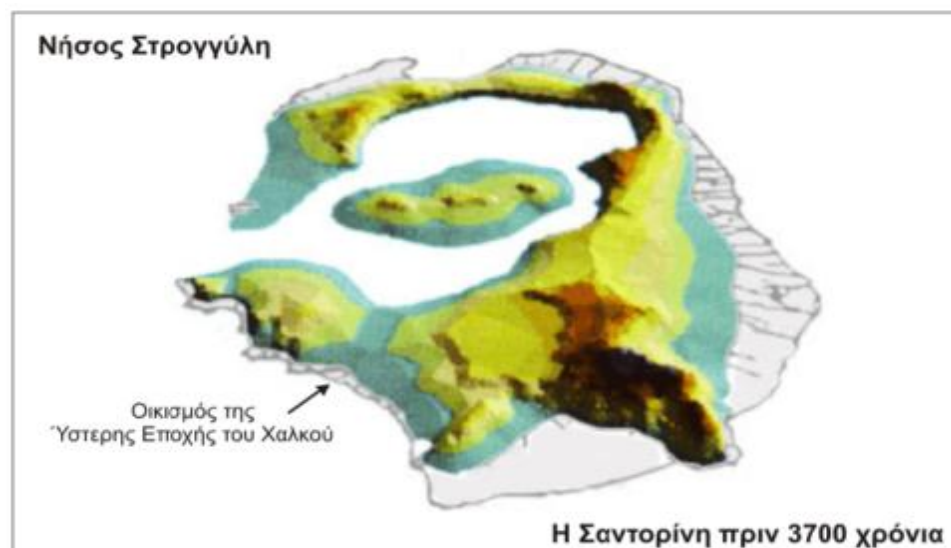
Σχήμα 2.10 Φασματικές αναλύσεις FFT των κατακόρυφων μεταβολών θέσης ελέγχου της γέφυρα του Εύριππου με βάση RTS και GPS.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΥ ΤΗΣ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ ΜΕ EDM ΚΑΙ GPS

3.1 Ιστορία ηφαιστείου

Η Σαντορίνη είναι μια από τις πιο θεαματικές καλδέρες στο κόσμο. Η σημερινή ημικυκλική και περισσότερο πεταλοειδής μορφή της νήσου οφείλεται στις κατά καιρούς ηφαιστειακές εκρήξεις που μετέβαλαν το αρχικό στρογγυλό σχήμα της. Ουσιαστικά, η Θήρα (Σαντορίνη) και τα νησάκια Θηρασία και Ασπρονήσι είναι τα απομεινάρια του ηφαιστειογενούς νησιού Στρογγυλή (Σχήμα 3.1).

Η ιστορία του ηφαιστείου μετρά δύο εκατομμύρια χρόνια, ωστόσο για τη δημιουργία της καλδέρας και την καταστροφή του προϊστορικού πολιτισμού του νησιού, ουσιαστικά, υπεύθυνη θεωρείται η γνωστή ως Μινωική έκρηξη που σημειώθηκε στο νησί κατά την Ύστερη Εποχή του Χαλκού.



Σχήμα 3.1 Η νήσος στρογγυλή.

3.1.1 Η Δημιουργία Σαντορίνης

Πέντε εκατομμύρια χρόνια πριν, η Σαντορίνη ήταν ένα μικρό νησάκι, με διάμετρο περίπου 6 χιλιομέτρων, που ξεπρόβαλε μερικές εκατοντάδες μέτρα πάνω από τα κύματα του Αιγαίου, στη θέση της νοτιοανατολικής Θήρας.

Η πρώτη ηφαιστειακή δραστηριότητα εκδηλώνεται στην ευρύτερη περιοχή της Σαντορίνης πριν 2,5 εκατομμύρια χρόνια περίπου, νοτιοδυτικά του νησιού και δημιουργεί ένα μεγάλο ηφαιστειακό οικοδόμημα, στην περιοχή του νησιώτικου συμπλέγματος της Σαντορίνης, το μάγμα αναβλύζει για πρώτη φορά από τα έγκατα της γης πριν περίπου 1 εκατομμύριο χρόνια. Τα παλαιότερα ηφαιστειακά κέντρα εντοπίζονται στη νοτιοδυτική Θήρα, στην περιοχή του Ακρωτηρίου. Την εποχή αυτή, μόλις που χέρσευε η κορυφή του Προφήτη Ηλία, και τα πρώτα ηφαιστειακά προϊόντα αποτίθενται σε μια θάλασσα βάθους 200-300 μέτρων. Με τη συσσώρευση των ηφαιστειών και τη θερμική αναθόλωση της περιοχής, φτάνουν τα ηφαιστειακά κέντρα να χερσεύουν και να σχηματίζουν τους σημερινούς λόφους του Ακρωτηρίου, από το Φάρο ως τον Αρχάγγελο. Το ηφαίστειο ξαποσταίνει για λίγες χιλιάδες χρόνια και ξαναρχίζει τη δράση του μετατοπίζοντας τη βορειότερα, στην περιοχή Θηρασιάς και Βόρειας Θήρας. Εκεί, μεταξύ 530.000 και 430.000 έτη πριν οικοδομεί ένα μεγάλο ηφαίστειο, το ηφαίστειο του Περιστεριού. Το ύψος του δεν ξεπερνούσε τα 400 μέτρα και η κορυφή του βρισκόταν λίγες εκατοντάδες μέτρα δυτικότερα από τη σημερινή κορυφή του Μικρού Προφήτη. Παράλληλα με τη δράση του μεγάλου αυτού ηφαιστείου, δραστηριοποιούνται και μικρά ηφαιστειακά κέντρα νοτιότερα από αυτό, γύρω από το τότε νησί του Ακρωτηριού, ο Μπάλος, η Κόκκινη παραλία και η Κοκκινόπετρα.

Αυτή είναι η εποχή που αρχίζουν οι μεγάλες εκρήξεις στη Σαντορίνη. Περίπου κάθε 20.000 χρόνια εκδηλώνεται μια τεράστια έκρηξη που τινάζει δειλά στρώματα τέφρας που καλύπτουν όλη την περιοχή και οικοδομούν μεγάλο μέρος της. Ο κυριότερος όγκος στάχτης που καταλήγει στη βαθιά θάλασσα, ενώ η λεπτότερη τινάζεται δεκάδες

χιλιόμετρα ψηλά και ταξιδεύει σε όλο τον πλανήτη. Ορίζοντες λεπτής στάχτης από αυτές τις εκρήξεις έχουν βρεθεί σε ιζήματα της Μεσογείου.

Η καταστροφικότερη δράση αυτών των εκρήξεων είναι η κατακρήμνιση του προϋπάρχοντος ηφαιστείου και η δημιουργία καλδέρας. Καθώς δεκάδες κυβικά χιλιόμετρα λιωμένο πέτρωμα έχουν τιναχθεί στον αέρα, αδειάζει η περιοχή στην οποία ήταν αποθηκευμένο το μάγμα και τα πετρώματα που βρίσκονται πάνω από αυτήν, κατακρημνίζονται σε βάθη αρκετών χιλιομέτρων, δημιουργώντας μια τεράστια χοάνη που αμέσως κατακλύζεται από τη θάλασσα. Μέσα στη κοιλότητα αυτή, συνεχίζει μετά την έκρηξη να αναβλύζει το μάγμα και σιγά σιγά την γεμίζει και αρχίζει να οικοδομεί ένα χερσαίο όρος, ένα νέο ηφαιστειακό οικοδόμημα.

Αυτός ο κύκλος καταστροφής και ανοικοδόμησης του ηφαιστείου, επαναλήφθηκε στη Σαντορίνη 12 φορές τα τελευταία 400.000 χρόνια. Έτσι, ενώ τα παχιά στρώματα της τέφρας πιστοποιούν τις μεγάλες εκρήξεις, οι όγκοι των συμπαγών ηφαιστειακών κέντρων που κατόπιν καταστρέφονται από τις εκρήξεις. Τα συμπαγή στρώματα λάβας των γκρεμνών κάτω από το Ημεροβίγλι και αυτά που αποτελούν το ανώτερο μέρος των γκρεμνών της Θηρασίας, είναι ότι απόμεινε από ένα μεγάλο ηφαιστειακό οικοδόμημα, το ηφαίστειο του Σκάρου, το οποίο δέσποζε στην περιοχή της κεντρικής και βόρειας Σαντορίνης πριν 40.000 με 250.000 χρόνια.

3.2 Μετρήσεις επιφανειακής παραμόρφωσης με γεωδαιτικές μεθόδους.

3.2.1 Αναγκαιότητα γεωδαιτικής παρακολούθησης ηφαιστειών.

Συχνά, η ρηχή συσσώρευση μάγματος στο γήινο φλοιό έχει σαν επίδραση ελαφρές μετακινήσεις στην επιφάνεια του εδάφους, ο οποίες μπορούν να μετρηθούν χρησιμοποιώντας γεωδαιτικές μεθόδους. Η επιστήμη της γεωδαισίας χρησιμοποιεί μετρήσεις εδαφικής παραμόρφωσης και μικρές αλλαγές στην επιτάχυνση της βαρύτητας προκειμένου να μελετήσει διαδικασίες ηφαιστειακής ανησυχίας και να ψάξει αποθέματα μάγματος κάτω από περιοχές ενεργών ηφαιστειών. Μία βασική υπόθεση στη γεωδαιτική παρακολούθηση είναι ότι η παραμόρφωση στην επιφάνεια της γης αντανακλά τεκτονικές, μαγματικές και υδροθερμικές διαδικασίες σε βάθος, επιδρώντας στην τάση που διαβιβάζεται στην επιφάνεια εξ αιτίας των μηχανικών ιδιοτήτων του φλοιού. Σχετικές αλλαγές στην επιτάχυνση της βαρύτητας αντανακλούν και μεταφορά μάζας και αλλαγές στο υψόμετρο του εδάφους. Συνδυάζοντας τις μετρήσεις στις αλλαγές του υψομέτρου του εδάφους και στη βαρύτητα με πληροφορίες για τις ιδιότητες του φλοιού, οι ηφαιστειολόγοι μπορούν να μοντελοποιήσουν αλλαγές μάζας κάτω από την επιφάνεια αποκτώντας επίγνωση της ηφαιστειακής προόδου.

Συνδεδεμένες οι μετρήσεις και η μοντελοποίηση των μετατοπίσεων του εδάφους και των αλλαγών βαρύτητας αποτελούν απαραίτητο συστατικό κάθε στρατηγικής παρακολούθησης ηφαιστείου. Τα κρίσιμα ζητήματα που προκύπτουν στην παρακολούθηση ηφαιστειών είναι α) η κατανόηση της φύσης της διαδικασίας που οδηγεί την ανησυχία ,β) η βελτιστοποίηση της αξιολόγησης των κινδύνων που συνδέονται με την ανησυχία και γ) η τελειοποίηση των προβλέψεων μελλοντικής ηφαιστειακής δραστηριότητας .

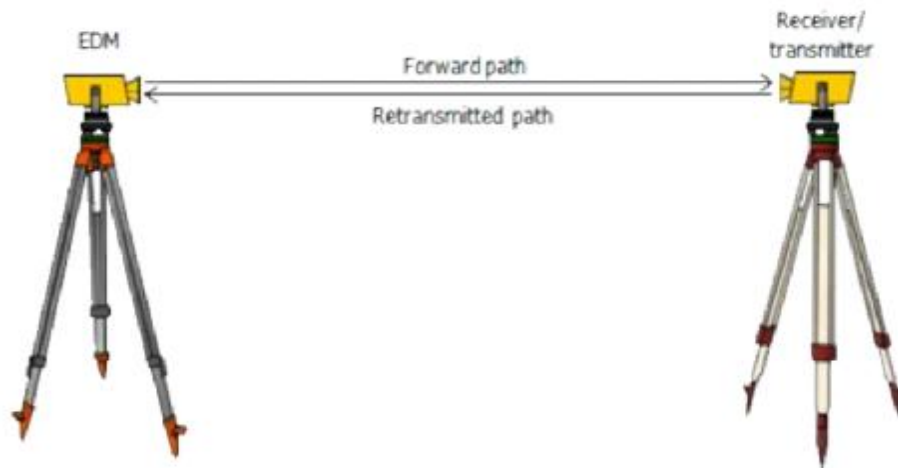
Η επιφανειακή μετατόπιση έχει μετρηθεί σε αρκετά ηφαίστεια ανά τον κόσμο, όμως μόνο έξι περίπου από αυτά έχουν μελετηθεί έντονα για πάνω από δύο δεκαετίες. Για παράδειγμα τα ηφαίστεια Campi Flegrei (Italy), Enta (Italy), Kilauea volcano (Hawaii), υπάρχουν και πολλά που βρίσκονται σε αναπτυσσόμενες χώρες.

3.2.2 Κλασσικές τεχνικές

Ιστορικά, τα σχέδια των εδαφικών μετατοπίσεων προσδιορίζονταν κυρίως χρησιμοποιώντας τεχνικές εδαφικής αποτύπωσης υψηλής ακρίβειας, που είχαν αρχικά εξελιχθεί για τοπογραφικές έρευνες . Αυτές οι τεχνικές μετρούν αλλαγές υψομέτρων, αποστάσεων , ή κλίσεως. Στην παρούσα θεωρητική εργασία όλες οι μετρήσεις από μελέτες που έκαναν ειδικοί επηστήμονες προέρχονται από EDM και GPS.

3.2.2.1 Electronic distance meter (EDM)

Ένα ηλεκτρονικό όργανο μέτρησης (EDM) μετρά την κατά μήκος απόσταση μεταξύ δύο σημείων κατευθύνοντας μία ακτίνα laser σε ένα απομακρυσμένο κάτοπτρο και συγκρίνοντας τις φάσεις της εξερχόμενης και της αντανακλώμενης ακτίνας. Οι μετρήσεις του EDM είναι ιδιαίτερα χρήσιμες όταν μετριέται η περιοχή της κορυφής ενός ηφαιστείου, όπου οι αλλαγές στα μήκη των γραμμών πολύ συχνά θεωρούνται σαν σήματα διόγκωσης ή μείωσης του όγκου του μαγματικού υλικού. Η τεχνική διαθέτει το πλεονέκτημα της απλότητας αλλά το μειονέκτημα του είναι ότι απαιτείται καθαρός ορίζοντας ανάμεσα στο όργανο και τους σταθμούς που είναι τοποθετημένα τα κάτοπτρα και η ανάγκη ενός ατόμου στην περιοχή που θα λειτουργεί το όργανο. Η κύρια πηγή λάθους είναι η αλλαγή στην ατμοσφαιρική πυκνότητα, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αέρα, την πυκνότητα και στο περιεχόμενο των υδρατμών, το καθένα από τα οποία επηρεάζουν την ταχύτητα του φωτός στον αέρα. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να μετρηθούν στις απολήξεις μιας γραμμής ή από ένα αεροσκάφος που θα πετά κατά μήκος της γραμμής που στοχεύει το όργανο. Σε πολλές περιοχές περιοχές η τεχνική του EDM έχει αντικατασταθεί από το GPS σαν το κύριο σύστημα παρακολούθησης της ηφαιστειακής παραμόρφωσης. Ωστόσο, οι μετρήσεις με EDM χρησιμοποιούνται ακόμα, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου προτιμούνται απλές και πιο φθηνές τεχνικές.



Σχήμα 3.2 Λειτουργία EDM.

Στο GPS αναφερθήκαμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 1.

3.3 Γεωδαιτικές Μετρήσεις από το ηφαίστειο της Σαντορίνης.

3.3.1 Ροή μάγματος και εδαφικές παραμορφώσεις στο ηφαίστειο της Σαντορίνης.

Μελέτης και Παρακολούθησης του ηφαιστείου της Σαντορίνης. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα στη Σαντορίνη ήταν σε πολλές περιπτώσεις συνδεδεμένη με εδαφικές παραμορφώσεις, καθιζήσεις και ανυψώσεις. Τα καλύτερα παραδείγματα ήταν ο σχηματισμός κατά την ιστορική εποχή, των ενδοκαλδερικών νησίδων της Νέας Καμένης. Την τελευταία χιλιετία, η ηφαιστειακή δραστηριότητα στη Σαντορίνη ήταν περιορισμένη στην καλδέρα και οποιοσδήποτε μαγματικές κινήσεις θα προκαλούσαν γεωδαιτικά παρατηρούμενες αλλαγές στις αποστάσεις μεταξύ σημείων της καλδέρας.

Για το λόγο αυτό, ένα γεωδαιτικό σύστημα παρακολούθησης, που στοχεύει σε μια πρώιμη αναγνώριση μιας μελλοντικής διαστολής της καλδέρας σαν αποτέλεσμα μαγματικής διόγκωσης, εγκαταστάθηκε το 1994 στα πλαίσια ενός διεπιστημονικού προγράμματος για την επιτήρηση του ηφαιστείου στο πλαίσιο του προγράμματος DG XII Environment Project της Ευρωπαϊκής Ένωσης και του Ινστιτούτου.

3.4 Έρευνα με GPS.

Από τον Οκτώβριο του 2000, μετρήθηκε το ίδιο δίκτυο με GPS, σε συνδυασμό την έρευνα του EDM, προκειμένου να συγκριθούν τα δεδομένα του EDM με αυτά του GPS, με την προοπτική να αντικατασταθούν οι μετρήσεις του EDM από τις μετρήσεις του GPS. Δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές στις συντεταγμένες των σταθμών του GPS ενάντια στο χρόνο, σύμφωνα με τα δεδομένα του EDM.

3.4.1 Τηλεμετρικό δίκτυο παρακολούθησης ηφαιστείου Σαντορίνης.

Από την άνοιξη του 2006. Το εργαστήριο γεωδαισίας και γεωδαιτικών εφαρμογών του Πανεπιστημίου Πατρών, σε συνεργασία με ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου Georgia Tech και της UNAVCO (Διαπανεπιστημιακού consortium Πανεπιστημίων των Κ.Π.Α του οποίου το Εργαστήριο Γεωδαισίας Παν. Πάτρων, είναι αλλοδαπό μέλος), ανέλαβε το έργο της εγκατάστασης τηλεμετρικού δικτύου GPS με σκοπό την παρακολούθηση των μετακινήσεων του ηφαιστείου της Σαντορίνης. Το έργο εντάχθηκε στο ερευνητικό πρόγραμμα ΠΕΝΕΔ 2003 και χρηματοδοτείται από τη ΓΓΕΤ και του Ινστιτούτο Μελέτης και Παρακολούθησης του Ηφαιστείου Σαντορίνης).

Το δίκτυο αποτελείται από τρεις μόνιμους σταθμούς GPS. Κάθε σταθμός έχει δυνατότητα συνεχούς και ακριβούς προσδιορισμού των συντεταγμένων του. Με τη μακροχρόνια καταγραφή και μελέτη των συντεταγμένων κάθε σταθμού, είναι δυνατό να εντοπιστούν μετακινήσεις, οφειλόμενες πιθανώς σε ροή μάγματος. Οι μόνιμοι σταθμοί και τα στοιχεία τους είναι οι εξής:

Κεντρικός Σταθμός (Σχήμα 3.3Α)

- Ονομασία: NOMI
- Θέση εγκατάστασης : Φύρα-Σαντορίνη
- Τροφοδοσία: Μόνιμη εγκατάσταση παροχής ρεύματος

- Μετρήσεις: Αποθηκεύονται σε δέκτη και μέσω router διοχετεύονται στο internet
- Εγκατάσταση και έναρξη λειτουργίας: Μάιος 2006

Περιφερειακός Σταθμός 1 (Σχήμα 3.3B)

- Ονομασία: ΡΚΜΝ
- Θέση εγκατάστασης: Παλαιά Καμμένη
- Τροφοδοσία: Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στοιχείων
- Μετρήσεις: Αποθηκεύονται σε δέκτη και μέσω ραδιοζεύξης αποστέλλονται στον κεντρικό σταθμό από όπου διοχετεύονται στο internet
- Εγκατάσταση και έναρξη λειτουργίας: Η εγκατάσταση του σταθμού έγινε το Μάιο του 2006, αλλά λόγω προβλημάτων που προέκυψαν, και αποκαταστάθηκαν στη συνέχεια, ο σταθμός άρχισε να λειτουργεί τον Ιούνιο του 2008



Σχήμα 3.3.A Κεντρικός Σταθμός ΝΟΜΙ, **Β.** Περιφερειακός Σταθμός ΚΕΡΑ, **Γ.** Περιφερειακός Σταθμός ΡΚΜΝ.

Στην ιστοσελίδα της UNAVCO, διατίθενται στοιχεία σχετικά με τη λειτουργία του δικτύου. Η πρόσβαση γίνεται μέσω της διεύθυνσης <http://facility.unavco.org/data/dai2/app/dai2.html> πληκτρολογώντας "Santorini" στο πλαίσιο "Network Name" και πατώντας Enter (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4 Αρχική σελίδα παρουσίασης στοιχείων του δικτύου παρακολούθησης του ηφαιστείου της Σαντορίνης.

Στην ιστοσελίδα διατίθενται στοιχεία σχετικά με το δίκτυο, όπως:

- Ονομασία, τόπος εγκατάστασης, συντεταγμένες και τελευταία ημερομηνία για την οποία διατίθενται δεδομένα από κάθε σταθμό (μενού metadata). (Σχήμα 3.5)
- Η θέση κάθε σταθμού σε χάρτη μέσω εφαρμογής Google Maps (μενού spatial).
- Διαγράμματα που παρουσιάζουν τη χρονοιστορία των καταγραφών κάθε σταθμού (μενού temporal), με αρχή την ημερομηνία έναρξης λειτουργίας κάθε σταθμού. Από τα διαγράμματα αυτά, φαίνονται τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία οι σταθμοί δεν καταγράφουν (Σχήμα 3.6).

Station Code	Site/Marker Name	Latitude	Longitude	Earliest Date	Latest Date	Movement T
VERA	Thessaly Greece	39.4179	23.2461	2009 May 07 12:00	2009 May 30 23:59	Station
P006	Peloponnese Greece	36.2862	25.2344	2008 Jul 02 00:00	2008 May 29 23:59	Station

Σχήμα 3.5 Στοιχεία σχετικά με τους μόνιμους σταθμούς του δικτύου (ονόματα, τόπος εγκατάστασης, συντεταγμένες και τελευταία ημερομηνία για την οποία διατίθενται δεδομένα από κάθε σταθμό.)



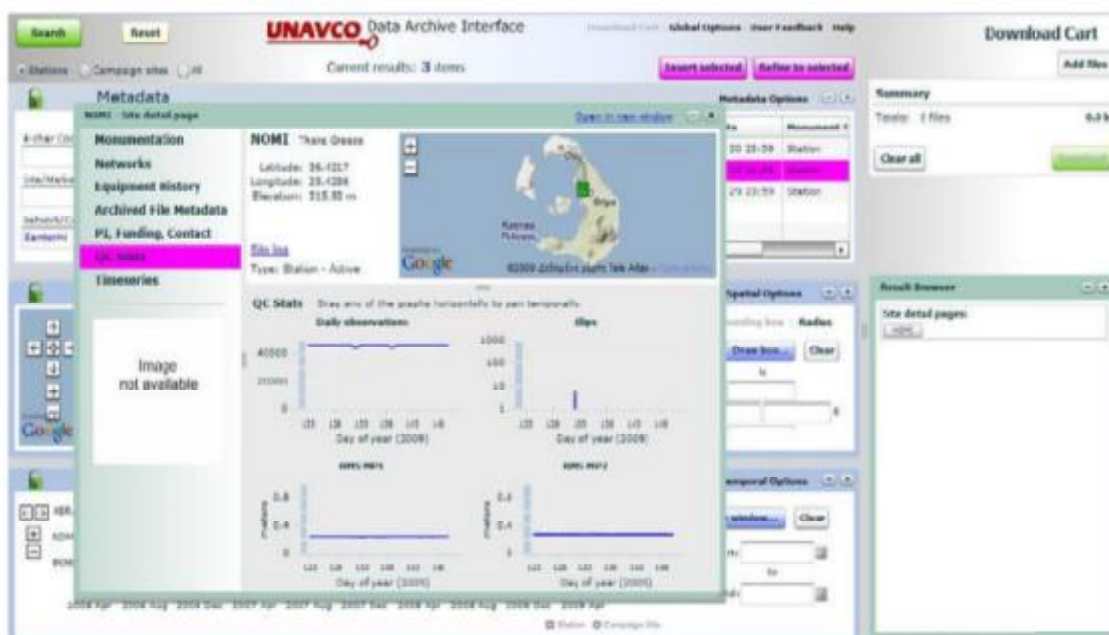
Σχήμα 3.6 Θέση σταθμών δικτύου σε χάρτη.



Σχήμα 3.7 Χρονοιστορία των καταγραφών κάθε σταθμού, με αρχή την ημερομηνία έναρξης λειτουργίας του.

Με διπλό κλικ στη χρονοιστορία των μετρήσεων κάθε σταθμού, στο μενού temporal, είναι δυνατό να εμφανιστούν επιπλέον πληροφορίες για τον κάθε σταθμό (Σχήμα 3.8), όπως:

- Το δίκτυο στο οποίο ανήκει
- Ο εξοπλισμός που διαθέτει
- Τα ονόματα των αρχείων με τις καταγραφές
- Στατιστικά στοιχεία σχετικά με τις καταγραφές
- Άλλα στοιχεία που αφορούν το σταθμό (προσωπικό που ασχολείται, επικοινωνία κ.τ.λ)

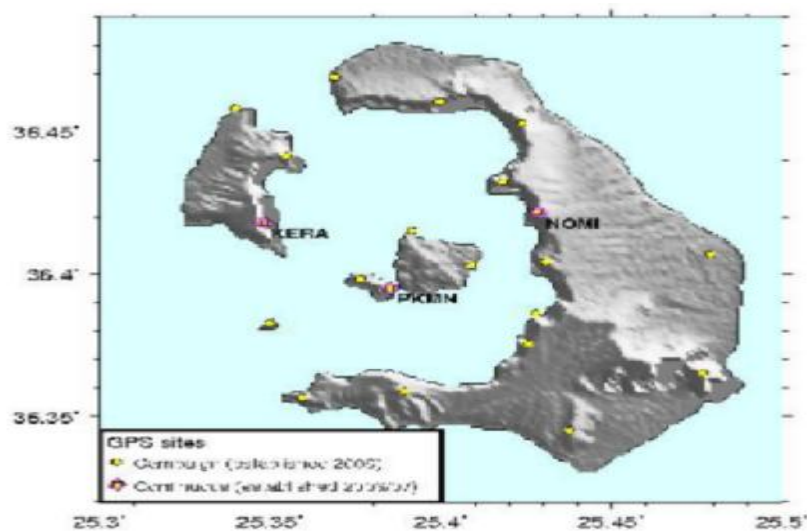


Σχήμα 3.8 Μενού όπου παρέχονται επιπλέον στοιχεία για κάθε μόνιμο σταθμό.

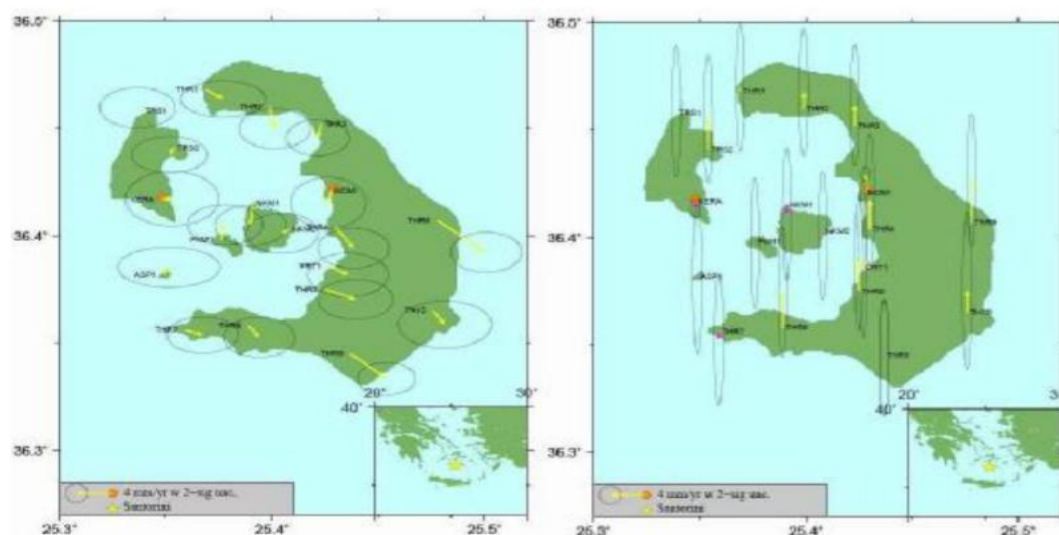
3.4.2 Δίκτυο σημείων γεωδαιτικής παρατήρησης.

Εκτός του δικτύου μόνιμων σταθμών, στα νησιά της καλδέρας του ηφαιστείου της Σαντορίνης έχει εγκατασταθεί δίκτυο σημείων γεωδαιτικής παρατήρησης που χρησιμοποιείται για ανά περιόδους μετρήσεις. Κατά τις μετρήσεις, χρησιμοποιούνται όργανα GPS για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων κάθε σημείου. Με σύγκριση των συντεταγμένων που προκύπτουν από κάθε κύκλο μετρήσεων, είναι δυνατόν να εντοπιστούν μετακινήσεις στην περιοχή που καλύπτει το δίκτυο. Η θέση των σημείων παρουσιάζεται στο χάρτη της (Σχήμα 3.9). Μετρήσεις των συντεταγμένων του δικτύου, έχουν διεξαχθεί τις περιόδους Μάιος-Ιούνιος 2008.

Με την επεξεργασία των καταγραφών από το μόνιμο και μη δίκτυο παρατήρησης μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τις μετακινήσεις που παρουσιάζει το ηφαίστειο. Από την επεξεργασία των μέχρι τώρα μετρήσεων, έχουν παρατηρηθεί μικρής κλίμακας φαινομενικές μετακινήσεις οι οποίες βρίσκονται στα όρια αβεβαιότητας (Σχήμα 3.10) και που αναμένεται να αξιολογηθούν στο μέλλον σε συνδυασμό με παλαιότερες διαδικασίες διόγκωσης της καλδέρας που είχαν παρατηρηθεί τα προηγούμενα χρόνια με βάση μετρήσεις.



Σχήμα 3.9 Θέσεις σημείων γεωδαιτικής παρατήρησης, για ανά περιόδους μετρήσεις. Είναι εμφανείς οι θέσεις των μόνιμων σταθμών.



Σχήμα 3.10 Αριστερά τα αποτελέσματα για τις οριζόντιες μετακινήσεις στο σύμπλεγμα Θήρας από μετρήσεις κατά τα έτη 2006-2008(με βέλος συμβολίζεται το διάνυσμα της ταχύτητας και με έλλειψη η αβεβαιότητα). Δεξιά τα αποτελέσματα για τις κατακόρυφες μετακινήσεις.

Κλείνοντας, πρέπει να τονιστεί πως το ΙΜΠΗΣ και το UNAVCO συνεχίζουν τις μετρήσεις στο ηφαίστειο της Σαντορίνης για την καλύτερη κατανόηση της κίνησης του μαγματικού θύλακα και την έγκαιρη προειδοποίηση σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τόσο το GPS αλλά όσο και το RTS είναι όργανα κατάλληλα για την ακριβή παρακολούθηση ταλαντώσεων και δυναμικών κινήσεων. Βέβαια, παρουσιάστηκαν προβλήματα κατά την καταγραφή των ταλαντώσεων τόσο από το GPS όσο και από το RTS, κυρίως διακοπές καταγραφών.

Επίσης, η χρήση του οργάνου GPS βοήθησε στις μετρήσεις στο ηφαίστειο της Σαντορίνης ώστε να έχουμε καλύτερη κατανόηση της κίνησης του μαγματικού θύλακα και την έγκαιρη προειδοποίηση σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Akyilmaz, O., Celik, R. N., Apaydin, N. and Ayan T., (2004). «GPS monitoring of the Fatih Sultan Mehmet suspension bridge by using assessment methods of neural networks», Proc. of The International archive of Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Science, Vol. 34, Internet address: <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm7/papers/138.pdf>

Alciatore, D., G., Hestand, M., B., (2003). "Introduction in Mechatronics and Measurement Systems", Colorado State University Press. Also available in internet: <http://www.engr.colostate.edu/~dga/mechatronics/figures/>

Ashkenazi V., and Roberts G. (1997). "Experimental monitoring of the Humber bridge using GPS", Civil Engineering, 120, pp 177-182.

Arup, 2005. Internet Address: <http://www.arup.com/millenniumbridge/>

BEI, 2005. Internet Address: www.bei-tech.com/products/displacement_sensors.htm

Biala, N. (2001). "An introduction to fiber-optic sensors", Sensors, December 2001. Internet address: www.sensormag.com/articles/1201/40/pf_main.shtml.

Bomford, B. (1971). "Geodesy". Oxford University Press, 3rd edition.

Brownjohn, J., Rizos, C., Tan, G.-H., Pan, T.-C., (2004). "Real-time Long-Term monitoring of Static and Dynamic displacements of an office tower, combining RTK GPS and Accelerometer data", Proc. of 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Structural Works and Structural Engineering, Nottingham, UK, June, 2004. Internet address: <http://www.fig.net/nottingham>

Brunner, F., K., (2004). "Fiber Optic sensors: an overview", Proc. of 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Structural Works and Structural Engineering, Nottingham, UK, June, 2004. Internet address: <http://www.fig.net/nottingham/>

Çelebi, M., Eeri, M., Prescott, W., Stein, R., Hudnut, K., Behr, J., Wilson, S., (1999), "GPS Monitoring of dynamic behavior of long - period structures", Earthquake Spectra, Vol. 15, No.1, pp.55-66.

Κοντογιάννη, Β., (2005). "Γεωδαιτική μέθοδος παρακολούθησης των παραμορφώσεων σηράγγων: τεκμηρίωση της μεθόδου και ανάλυση παρατηρήσεων", Διδακτορική Διατριβή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών

Νικητοπούλου, Α., (2002). "Ανάπτυξη πρότυπης πειραματικής διάταξης για την εκτίμηση των σφαλμάτων GPS-RTK με στόχο την παρακολούθηση ταλαντώσεων εύκαμπτων κατασκευών", Μεταπτυχιακή Διατριβή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

Στείρος Σ.2010,Θεωρία μετρήσεων και σφαλμάτων, εκδόσεις Συμμετρία,Αθήνα.

Φωτίου Α., και Πικριδάς Χ.2006,GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές, Θεσσαλονίκη2006,Εκδόσεις Ζήτη.

Μεσσαλά Π-Νέστορα Α.2011,Μέτρηση της επιφανειακής θαλάσσιας τοπογραφίας SST με μεθόδους GPS,Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής Τεί Πατρών.

Γιώργης Ε. Βουγιουκλάκης , Ηφαιστειολόγος , Ερευνητής του Ινστιτούτου Γεωλογικών Ερευνών.

Protopsalti, K., Nickitopoulou, A., Psimoulis, P., Pytharouli, S., Kontogianni, V., Triantafyllidis, P., and Stiros, S. (2004). "Accuracy of simple GPS Kinematic Techniques: Evidence from Experiments, and Implications for the Study of Large Flexible Engineering Structures", Proc. of 1st International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Nottingham, June, 2004. Internet address: <http://www.fig.net/nottingham/>

Pagiatakis, S., D., (1999). "Stochastic significance of peaks in the least-squares spectrum", Journal of Geodesy, Vol. 73, pp. 67-78.

Press, W., H., Teukolsky, S., A., Vetterling, W., T., Flannery, B., P., (1992). "Numerical Recipes in C", Cambridge University Press.

Psimoulis P., Kontogianni, V., Nickitopoulou, A., Pytharouli, S., Triantafyllidis, P., Stiros, S., (2004). "Estimating the Optimum Duration of GPS Static Observations for Short Baseline Length Determination in Greece", Proc. of FIG Working Week 2004, The Olympic Spirit in Surveying, Athens. Internet address: http://www.fig.net/pub/athens/papers/ts29/TS29_5_Psimoulis_et_al.pdf

Pytharouli S. and S. Stiros (2004). "Ladon Dam (Greece) Deformation and Reservoir Level Fluctuations: Evidence for a Causative Relationship from the Spectral Analysis of a Geodetic Monitoring Record". Engineering Structures, Vol. 27 (2005), pp. 361-370.

Wasilewski, A., Rzepecka, Z., and Karcia, J., (1999). «Applications of GPS RTK technique to study deformation of Aerial Radio-TV masts», Proc. Of the 9th FIG International Symposium on Deformation Measurements, pp. 168-180, Olsztyn, Poland, September 1999.

Wong, K.-Y., Man, K-L. and Chan,W-Y., (2001). "Monitoring Hong Kong's Bridges Real-Time Kinematic Spans Gap", GPS World, July 2001, p.10-18.

Xu, L., Guo, J. J. and Jiang, J. J., (2002). «Time frequency analysis of a suspension bridge based on GPS», Journal of Sound and Vibration, Vol. 254, 1, pp. 105-116.