



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ



*Μέτρηση αποστάσεων:
Ιστορική αναδρομή, σύγχρονες δυνατότητες,
προοπτικές και τάσεις.*

ΚΑΣΚΟΥΡΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ
Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπουσα:
Ο. Αραμπατζή
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

Πρόλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια αναφοράς και περιγραφής των μεθόδων και οργάνων μέτρησης μήκους (κυρίως επίγειων αλλά και δορυφορικών)

Η περιγραφή ξεκινάει από τις μεθόδους και τα όργανα που δημιούργησαν και χρησιμοποιούσαν οι πρόγονοί μας, πριν από αρκετές χιλιάδες χρόνια και καταλήγει στη σημερινή εποχή, αναλύοντας εκτενέστερα το προσδιορισμό του μήκους με άμεσο ή έμμεσο τρόπο, όπως γίνεται τους δύο τελευταίους αιώνες, φτάνοντας μέχρι το δορυφορικό εντοπισμό θέσης και τις καινούριες προοπτικές και τάσεις που υπάρχουν.

Στο οπισθόφυλλο επισυνάπτεται CD με την εργασία σε ψηφιακή μορφή.

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την καθηγήτριά μου και επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας, κα Ο. Αραμπατζή, για τη συμβολή και την υπεύθυνη καθοδήγησή της σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Abstract

Distance measurement: historical retrospection, modern capabilities, future perspectives and trends

The thesis that you have at hand, comprise of historical retrospection, documentation and analysis of the methods and apparatus of length measurement, focusing in short and medium lengths (up to some km), that can be measured in the atmosphere. This documentation is intended to present the main characteristics of each method and tool, the advantages and disadvantages of each one, as well as the rapid progress made during the last years, which is in turn mainly attributed to the technological breakthroughs in the fields of electronics and computing. This technological growth is very significant for the science of geodesy and for the cumbersome outdoor occupation of a surveyor engineer.

Engineers measure lengths on the Earth's surface (or very close to it, within its atmosphere), under the Earth's surface, but also in the sea. This essay is mainly focused in the prior cases (effectively excluding the depth measuring-sonar devices, which in the last few years in combination with GPS have detrimentally increased the accuracy of marine imprints). Moreover, in this text, for reasons of plenitude, there is a comprehensive reference of apparatus and methods of distance measurements to geodetic satellites (distances of the scale of Mm), which could on their own be the sole object of another paper.

Kaskoura Vasiliki

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος.....	i
Abstract.....	ii
Πίνακας περιεχομένων.....	iii
Πίνακες εικόνων, σχημάτων και πινάκων.....	v
Περίληψη	vii
1. Εισαγωγή.....	1
2. Ιστορική αναδρομή	2
3. Όργανα – Μέθοδοι μέτρησης μήκους	17
3.1. Μετροταινίες – γενικά στοιχεία.....	17
3.1.1. Απλές μετροταινίες.....	18
3.1.2. Μεταλλικές μετροταινίες	19
3.1.3. Ταινίες και σύρματα Invar.....	20
3.1.4. Ηλεκτρονικές μετροταινίες.....	21
3.2. Οπτικά τηλέμετρα - Γενικά στοιχεία.....	22
3.2.1. Θεοδόλιχο και βοηθητικά όργανα.....	23
3.2.2. Οριζόντια βάση – δίδυμη βάση	24
3.2.3. Ερευνητές αποστάσεων – μικρά τηλέμετρα	27
3.2.3.1. Ερευνητές αποστάσεων.....	28
3.2.3.2. Μικρά τηλέμετρα	28
3.3. Ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης μήκους - γενικά – EDM.....	29
3.3.1. Αρχές λειτουργίας.....	30
3.3.2. Διορθώσεις και αναγωγές των μετρήσεων	32
3.3.3. Κατηγορίες οργάνων EDM.	33
3.3.4. Εξέλιξη των ηλεκτρομαγνητικών οργάνων μέτρησης μήκους.....	35
3.4. Μετρήσεις laser προς γεωδαιτικούς δορυφόρους.....	42
3.5. Ψηφιακοί ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί (total station).....	45
3.5.1. Ψηφιακοί ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί χωρίς την χρήση ανακλαστήρα (reflectorless total stations).....	49
3.5.2. Γεωδαιτικός σταθμός με αυτόματη αναγνώριση στόχου - Ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός.....	52

3.5.3. Έξυπνοι γεωδαιτικοί, εικονογεωδαιτικοί, χωροεικονο-γεωδαιτικοί σταθμοί	54
3.6. Όργανα αποτύπωσης επιφανειών με σάρωση (Laser Scanners)	58
3.7. Συστήματα δορυφορικού εντοπισμού	62
3.7.1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης δορυφορικού συστήματος εντοπισμού	64
3.7.2. Μέθοδοι προσδιορισμού θέσης με συστήματα δορυφορικού εντοπισμού	65
3.7.3. Σφάλματα προσδιορισμού θέσης με συστήματα δορυφορικού εντοπισμού - ακρίβειες.....	67
3.7.4. Προσδιορισμός βάσης.....	68
3.7.5. Διάφορα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού θέσης - Το Ελληνικό δίκτυο των μόνιμων σταθμών (HEPOS)	70
3.7.5.1. Το Ελληνικό δίκτυο των μόνιμων σταθμών (HEPOS)	76
3.8. Μέτρηση πολύ μικρών και πολύ μεγάλων αποστάσεων	78
4. Συμπεράσματα – Προοπτικές – Τάσεις.....	82
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	87
Βιβλιογραφία.....	91
Ηλεκτρονική βιβλιογραφία.....	93

Πίνακες εικόνων, σχημάτων και πινάκων

Εικόνα 1: Όργανα χάραξης στην αρχαία Αίγυπτο	3
Εικόνα 2: Παράσταση σε τοίχο τάφου στην Αίγυπτο γύρω στα 1400 π.χ. Μέτρηση χωραφιού, με κόμπους σε τεταμένο σχοινί.	4
Εικόνα 3: Ευπαλίνειο όρυγμα. Οριζοντιογραφία και τομή του αγωγού.....	6
Εικόνα 4: Ο αστρολάβος.....	7
Εικόνα 5: Χάρτης που οι ιστορικοί αποδίδουν στον Πτολεμαίο.....	8
Εικόνα 6: Το δεύτερο θεοδόλιχο του Ramsden και το μηχανικό θεοδόλιχο Starke & Kammerer	10
Εικόνα 7: Χαλύβδινη αλυσίδα μήκους 100 ποδών	11
Εικόνα 8: Μετροταινία Invar (Ramsden, 1784).....	11
Εικόνα 9: Θεοδόλιχα Wild Th1 (1923) και T2 (1927).....	12
Εικόνα 10: Τελλουρόμετρο (αρχική μορφή, σχεδιασμένο από τον Wadley το 1957 (Λονδίνο Μουσείο επιστημών)	13
Εικόνα 11: Το αποστασιόμετρο Dior 3002S προσαρμοζόμενο στο ψηφιακό θεοδόλιχο T1610 και ο γεωδαιτικός σταθμός TC702 (Leica)	14
Εικόνα 12: Δορυφόρος του GPS και δέκτης G.P.S.	15
Εικόνα 13: Απλή μετροταινία	18
Εικόνα 14: Μεταλλική αλυσίδα	19
Εικόνα 15: PMB 300 L Ψηφιακή μετροταινία laser BOSCH	22
Εικόνα 16: Το αυτοαναγωγικό ταχύμετρο RDH	23
Εικόνα 17 : Δίμετρη μεταλλική βάση Wild	26
Εικόνα 18: Ράβδος για μετρήσεις σε εφαρμογές βιομηχανικής γεωδαισίας ...	27
Εικόνα 19: Το τηλέμετρο BRT 006 της Zeiss Jena.....	29
Εικόνα 20: Το τελλουρόμετρο CA1000 κατά τη διάρκεια μέτρησης.....	36
Εικόνα 21: Το γεωδίμετρο AGA 8	37
Εικόνα 22: Το Distomat DI 10 (Wild)	38
Εικόνα 23: Το Distomat DI3S (Wild).....	39
Εικόνα 24: Το Mecometer ME 3000 (Kern).....	40
Εικόνα 25: Το MA 100 της Tellurometer	41
Εικόνα 26: Το αποστασιόμετρο Dior3002S προσαρμοζόμενο στο ψηφιακό θεοδόλιχο T1610.....	42
Εικόνα 27: Ο Ψηφιακός ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός Stonex STS .	46
Εικόνα 28: Ο reflectorless ψηφιακός ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός Leica TCR 1201	51

Εικόνα 29: Ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός Trimble S3 (α), με το χειριστήριο TSC2 (β), και ο Leica TM30 (γ)	54
Εικόνα 30: Έξυπνοι γεωδαιτικοί σταθμοί των εταιρειών Leica (TPS 1200+GS10) και Trimble (S3 Robotic Total Station+R6 II GPS).....	55
Εικόνα 31: Ο εικονογεωδαιτικός σταθμός Topcon IS 205.....	56
Εικόνα 32: Ο χωροεικονογεωδαιτικός σταθμός Trimble VX.....	57
Εικόνα 33: Ο laser scanner GLS1500 της Topcon.....	61
Εικόνα 34: Ο Leica ScanStation C10.....	61
Εικόνα 35: Δέκτης GNSS που λειτουργούσε σαν ενεργό σημείο ελέγχου κατά τη διάρκεια της κατασκευής του πύργου Landmark στο Abu Dhabi.....	63
Εικόνα 36: Κεραία και χειριστήριο του Leica Viva GNSS.....	64
Εικόνα 37: Δέκτης GPS CHC στην Ανταρκτική (Οκτώβριος 2009 - Απρίλιος 2010).....	72
Εικόνα 38: Δορυφόρος της σειράς GLONASS M.....	73
Εικόνα 39: Δορυφόρος του συστήματος Galileo	75

Σχήμα 1: Μέθοδος οριζόντιας βάσης	25
Σχήμα 2: Μέθοδος ερευνητών αποστάσεων – μικρών τηλεμέτρων	27
Σχήμα 3: Μέθοδος μέτρησης πολύ μεγάλων αποστάσεων.....	78
Σχήμα 4: Αναγωγές μηκών	88

Πίνακας 1: Ενδεικτικές τιμές εμβέλειας, χωρίς τη χρήση πρίσματος.....	51
Πίνακας 2: Βασικά χαρακτηριστικά μερικών ψηφιακών γεωδαιτικών σταθμών	58
Πίνακας 3: Σαρωτές Laser	62
Πίνακας 4: Βασικά στοιχεία δεκτών δορυφορικού εντοπισμού.....	76
Πίνακας 5: Εξέλιξη οργάνων μέτρησης αποστάσεων.....	84

Στην παρούσα εργασία περιγράφονται τα όργανα και οι μέθοδοι μέτρησης μηκών, (με άμεσο ή έμμεσο τρόπο), ξεκινώντας από την προϊστορική εποχή και καταλήγοντας στην σημερινή, καθώς επίσης και οι προοπτικές που υπάρχουν για το μέλλον.

Στο Κεφάλαιο 1, την εισαγωγή, παρουσιάζεται το αντικείμενο της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια συνοπτική ιστορική αναδρομή των οργάνων και των μεθόδων μέτρησης μήκους, όσο το δυνατό πληρέστερη.

Στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται και αναλύονται τα διάφορα όργανα, κυρίως αυτά που εμφανίστηκαν από την αρχή του 20^{ου} αιώνα, μέχρι σήμερα. Πιο συγκεκριμένα γίνεται λόγος για τις μετροταινίες (απλές, μεταλλικές, σύρματα Invar και ηλεκτρονικές), για τα οπτικά τηλέμετρα (θεοδόλιχο, οριζόντια – δίμετρα βάση, ερευνητές αποστάσεων, μικρά τηλέμετρα) και για τα ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης μήκους (EDM). Στη συνέχεια περιγράφονται άλλα σύγχρονα όργανα και μέθοδοι, όπως οι μετρήσεις laser προς γεωδαιτικούς δορυφόρους, οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί (με ή χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα), οι ρομποτικοί, καθώς επίσης οι έξυπνοι γεωδαιτικοί, οι εικονογεωδαιτικοί και χωροεικονογεωδαιτικοί σταθμοί. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στα όργανα αποτύπωσης επιφανειών με σάρωση (laser scanner), στα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού (GPS, GLONASS, GALILEO, κλπ.) και σε μεθόδους μέτρησης πολύ μικρών και πολύ μεγάλων αποστάσεων.

Στο Κεφάλαιο 3 υπάρχουν συγκεντρωτικά στοιχεία, συμπεράσματα, προοπτικές και τάσεις.

1. Εισαγωγή

Στην εργασία αυτή γίνεται μια ιστορική αναδρομή, καταγραφή και ανάλυση των μεθόδων και των οργάνων μέτρησης μήκους, εστιάζοντας στα μικρά και μεσαία μήκη (μέχρι μερικά km) που μπορεί κανείς να μετρήσει μέσα στην ατμόσφαιρα. Η καταγραφή αυτή έχει σκοπό να παρουσιάσει τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου και οργάνου, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, καθώς επίσης και τη ραγδαία εξέλιξή τους τα τελευταία χρόνια, που κυρίως οφείλεται στην αλματώδη ανάπτυξη της ηλεκτρονικής και των ηλεκτρονικών υπολογιστών, με σημαντικότερες θετικές συνέπειες στην επιστήμη της γεωδαισίας και στην επίπονη εργασία υπαίθρου του Τοπογράφου Μηχανικού.

Οι Μηχανικοί μετρούν μήκη πάνω στην επιφάνεια της γης (ή πολύ κοντά σ'αυτή, μέσα στην ατμόσφαιρα), κάτω από την επιφάνεια της γης (υπόγειες αποτυπώσεις και χαράξεις), αλλά και μέσα στη θάλασσα (υδρογραφικές και υποβρύχιες αποτυπώσεις). Η εργασία αυτή εστιάζεται κυρίως στις δύο πρώτες περιπτώσεις (εξαιρώντας ουσιαστικά τα βυθόμετρα-ηχοβολιστικά, που τα τελευταία χρόνια σε συνδυασμό με τα GPS, έχουν βελτιώσει δραματικά τις ακρίβειες των υδρογραφικών αποτυπώσεων). Επίσης στο κείμενο, για λόγους πληρότητας, αναφέρονται περιληπτικά και όργανα και συστήματα μέτρησης αποστάσεων προς γεωδαιτικούς δορυφόρους (αποστάσεις της τάξης των Mm) που από μόνα τους θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο ξεχωριστής εργασίας.

2. Ιστορική αναδρομή

Από την αρχαιότητα, με την εξέλιξη της ανθρώπινης σκέψης και του πολιτισμού, σημαντική ανάπτυξη είχαν και οι τεχνικές μέτρησης μηκών και υπολογισμού αποστάσεων. Οι μετρήσεις αυτές και η ανάγκη της επεξεργασίας τους συνετέλεσαν ώστε να αναπτυχθεί η Γεωδαισία (Γη + δαίωμα = διαιρώ, μοιράζω τη Γη), ως πρακτική εφαρμογή της Γεωμετρίας (= μέτρηση της γης) και σε αντιδιαστολή, σύμφωνα με τον Αριστοτέλη, από την Θεωρητική Γεωμετρία.

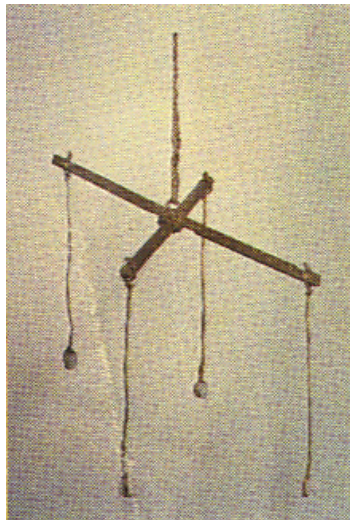
Η γεωδαισία, ως γνωστό, είναι η επιστήμη που έχει ως κύριο αντικείμενο τον ακριβή προσδιορισμό του σχήματος, του μεγέθους και του πεδίου βαρύτητας της Γης καθώς και τις μεταβολές τους στο χρόνο. Ασχολείται δε με τη θεωρητική και πρακτική σπουδή οργάνων και μεθόδων για την εκτέλεση μετρήσεων, υπολογισμών και απεικονίσεων που είναι χρήσιμες για τον προσδιορισμό της μορφής και του μεγέθους ολόκληρης της γήινης επιφάνειας ή τμημάτων αυτής.

Η Τοπογραφία ως κλάδος της Γεωδαισίας ασχολείται με τη μέτρηση, τον υπολογισμό και την απεικόνιση των μικρών σχετικά τμημάτων της γήινης επιφάνειας.

Η επιστήμη της γεωδαισίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη χρήση κατάλληλων γεωδαιτικών οργάνων μέτρησης και ως εκ τούτου, η ιστορική εξέλιξη των οργάνων μέτρησης αποστάσεων ακολουθεί παράλληλη πορεία με την εξέλιξη της γεωδαισίας και των λοιπών τοπογραφικών οργάνων και μεθόδων.

Η γεωδαισία άρχισε να αναπτύσσεται από τα αρχαία χρόνια, σαν μια εφαρμοσμένη, κατ' αρχάς, επιστήμη, προκειμένου να καλυφθούν πρακτικές ανάγκες του ανθρώπου και με το πέρασμα του χρόνου αναπτύχθηκε τόσο σε θεωρητικό, όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Οι πρακτικές αυτές ανάγκες έγιναν περισσότερο επιτακτικές από τότε που ο άνθρωπος άρχισε να ζει ομαδικά, να καλλιεργεί την γη και να δημιουργεί οικισμούς.

Ξεκινώντας από μονάδες μέτρησης, που είχαν βασισθεί σε μέλη του σώματός του (δάκτυλοι, πόδες), προχώρησε σε σχεδιασμό και κατασκευή των πρώτων τοπογραφικών οργάνων, όπως σχοινιά με κόμπους και ξύλινους πήχεις για τη μέτρηση μηκών, νήμα της στάθμης, για την υλοποίηση της κατακόρυφου, όργανα χάραξης ορθών γωνιών, μέτρησης υψομετρικών διαφορών κλπ., προκειμένου να τα χρησιμοποιεί στις κατασκευές του και τα οποία χρησιμοποιούσε για τουλάχιστον 5000 χρόνια.



Εικόνα 1: Στην αρχαία Αίγυπτο χρησιμοποιούσαν όργανα σαν το εικονιζόμενο, προκειμένου να παρατηρήσουν και να χαράξουν γωνίες. Αργότερα, επί Ρωμαϊκής εποχής, το όργανο αυτό σε πιο εξελιγμένη μορφή, ονομαζόταν «groma». Είναι επινόηση Έλληνα μηχανικού και εμφανίστηκε για πρώτη φορά στην Ελληνιστική Αλεξάνδρεια.

Ο Ηρόδοτος, σε κείμενό του, που είναι και το αρχαιότερο γνωστό κείμενο που αφορά στην γεωδαισία, αναφέρει ότι, γύρω στο 1400 π.Χ., ο βασιλιάς της Αιγύπτου Ραμσής Β' μοίρασε τη γη σε γεωργούς, για να καλλιεργεί ο καθένας τον κλήρο του και να καταβάλει αντίστοιχο φόρο. Επειδή όμως πολλές φορές κάποιοι κλήροι κατακλύζονταν από τα νερά του ποταμού Νείλου, άνθρωποι του βασιλιά έκαναν αυτοψίες και μετρούσαν με το «σχοινίο» ή την «κάλαμο» ή με άλλο τρόπο τους κλήρους που απέμεναν.



Εικόνα 2: Παράσταση σε τοίχο τάφου στην Αίγυπτο γύρω στα 1400 π.χ. Μέτρηση χωραφίου, με κόμπους σε τεταμένο σχοινί.

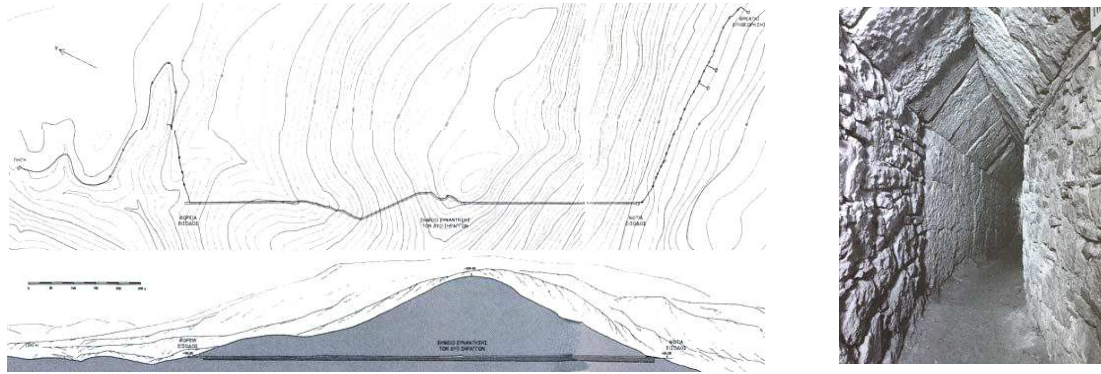
Η γεωδαισία, εξελίχθηκε σε διάφορα στάδιά της, από πολλούς αρχαίους λαούς, όπως Αιγυπτίους, Άραβες, Ασσυρίους, Βαβυλώνιους, Ινδούς, Κινέζους, Πέρσες, Σουμέριους. Υπάρχουν αρχαία κείμενα με πληροφορίες για τοπογραφικά όργανα και μεθόδους μέτρησης, καθώς και υπολείμματα αρχαίων τοπογραφικών οργάνων, σχέδια κλπ., που το αποδεικνύουν. Από ευρήματα του 1200 π.Χ. περίπου, αποδεικνύεται ότι οι αρχαίοι Βαβυλώνιοι είχαν χαρτογραφήσει την εύφορη πεδιάδα της Μεσοποταμίας, όπου τα ορόσημα των καταμετρημένων εκτάσεων ήταν ειδικά διαμορφωμένα πήλινα είδωλα, που τα προστάτευαν οι Θεοί. Στην Βαβυλώνα επίσης, βρέθηκε σε κεραμικό, χάρτης του 1000 π.Χ., που παρουσιάζει την γη στρογγυλή και επίπεδη. Στην αρχαία Κίνα αναφέρονται χάρτες σε αρκετά κείμενα, ενώ βρέθηκαν τρεις σχετικά ακριβείς χάρτες, (πολιτικός, στρατιωτικός και τοπογραφικός) σε έναν τάφο του 2000 π.χ. περίπου. Το αραβικό μίλι των 4.000 κύβιτων (1.972 μέτρα) αναφέρεται σε ένα σφηνοειδές κείμενο του 6ου π.Χ. αιώνα.

Πολλοί αρχαίοι Έλληνες προήγαγαν με τις μελέτες τους την επιστήμη της Γεωδαισίας. Οι Έλληνες μετρητές της γης (οι γεωδαίτες, σύμφωνα με τον ορισμό της γεωδαισίας του Αριστοτέλη), ασχολούνται με τη μέτρηση, το χωρισμό της γης κυρίως σε ορθογώνια σχήματα καθώς και με τις χαράξεις των τεχνικών έργων. Ως στρατιωτικοί μηχανικοί, δίνουν πληροφορίες, όπως για παράδειγμα το πλάτος ενός ποταμού που πρέπει να περάσει ο στρατός ή το ύψος των τειχών μιας πόλης που πρέπει να καταλάβουν, μετρούν αποστάσεις και σχεδιάζουν χάρτες. Οι χωρογράφοι (ή γεωγράφοι) κατασκευάζουν χάρτες ευρύτερης περιοχής, απεικονίζουν μέχρι και όλη την

οικουμένη. Θεωρούν τη γη σφαίρα και επινοούν τη χαρτογραφική προβολή. Εισάγουν την έννοια των συντεταγμένων, του γεωγραφικού μήκους και πλάτους, που τις προσδιορίζουν με συνδυασμούς αστρονομικών και επίγειων παρατηρήσεων. Παράλληλα ασχολούνται με το σχήμα της γης, τη μέτρηση της περιμέτρου της και τη μέτρηση υψών από απόσταση. Τα όργανα που χρησιμοποιούν είναι οι διάφορες μορφές του γνώμονα, η μετρητική αλυσίδα, το σχοινίο ή η αρπεδώνη (διηρημένο σε ίσα διαστήματα με κόμβους σχοινί), και αργότερα, στα ελληνιστικά χρόνια, ο αστερίσκος, ο χωροβάτης, η διόπτρα και το οδόμετρο.

Σ' αυτούς, μεταξύ άλλων, ανήκουν:

- Ο Θαλής ο Μιλήσιος (635 π.Χ – 546 π.Χ), που προέβλεψε την έκλειψη Ηλίου και πήρε τον τίτλο του ενός από τους 7 σοφούς. Ως περιηγητής βρέθηκε στην Αίγυπτο, όπου δίδαξε την ομοιότητα των σχημάτων και μέτρησε το ύψος πυραμίδας με τη ράβδο, χρησιμοποιώντας τον σταθερό λόγο μεταξύ του ύψους του αντικειμένου και της σκιάς του. Χρησιμοποιώντας θεωρήματα της στοιχειώδους Γεωμετρίας που ο ίδιος διατύπωσε, προσδιόρισε την απόσταση πλοίου από την ακτή.
- Ο Ευπαλίνος ο Μεγαρεύς (550 π.Χ), ο οποίος κατασκεύασε στη Σάμο και υδραγωγείο (Ευπαλίνειο όρυγμα), που αποτελεί μνημείο αρχαίας ελληνικής τεχνικής και περιλαμβάνει εκτός από τον εξωτερικό αγωγό με τα κάθετα ορύγματά του για τον καθαρισμό του νερού και σήραγγα μήκους περίπου 1000 μέτρων, διατομής 1.80 m X 1.80 m, διανοιγμένη από δύο διαφορετικά μέτωπα, τα οποία συναντήθηκαν με ελάχιστη απόκλιση, παρά τα γεωλογικά προβλήματα που αντιμετώπισαν.



Εικόνα 3: Ευπαλίνειο όρυγμα. Οριζοντιογραφία και τομή του αγωγού.

- Ο Πυθαγόρας ο Σάμιος (580 π.Χ - 500 π.Χ) και οι μαθητές του, οι οποίοι, εκτός των άλλων, ανέπτυξαν και τα μαθηματικά και την γεωμετρία,
- Ο γεωγράφος και συγγραφέας Σκύλακας Ο Καρυανδέας (6ος – 5ος π.Χ. αιώνας),
- Ο Αριστοτέλης ο Σταγειρίτης (384 π.Χ - 322 π.Χ), που απέδειξε ότι η γη είναι σφαιρική,
- Ο Αρίσταρχος ο Σάμιος (320 – 250 π.Χ.), ο οποίος στηριζόμενος και σε απόψεις προγενέστερων σοφών, θεμελίωσε την ύπαρξη του ηλιοκεντρικού συστήματος,
- Ο Αρχιμήδης του Συρακούσιος (287 π.Χ - 212 π.Χ).
- Ο Ερατοσθένης ο Κυρηναίος (276 π.Χ - 195 π.Χ), που θεωρείται ο πρώτος Γεωδαίτης και θεμελιωτής της Γεωδαισίας, ήταν ο πρώτος που ασχολήθηκε με τον προσδιορισμό των διαστάσεων της γης. Στα περίφημα Γεωγραφικά του παρουσίασε την πρώτη ακριβή μαθηματική μέτρηση της περιφέρειας της Γης, με την βοήθεια σκιοθηρικών γνωμόνων και την βρήκε ίση με 250.000 στάδια (=39.400-41.000 χλμ, έναντι της πραγματικής 40.000 χλμ.). Ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε τους όρους γεωγραφία, γεωγραφικό πλάτος και μήκος και κατασκεύασε τον πρώτο παγκόσμιο μαθηματικό χάρτη της τότε οικουμένης, από τη χερσόνησο του Γιβραλτάρ μέχρι τον ποταμό Γάγγη,

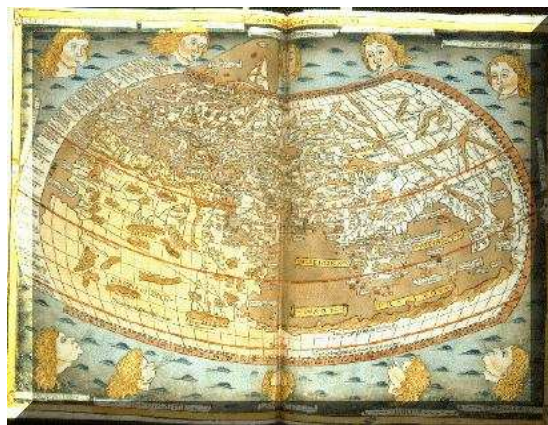
την οποία σχεδίασε πάνω σε ένα πλέγμα καθέτων ευθειών (μεσημβρινών και παραλλήλων κύκλων), αξιοποιώντας τις πληροφορίες των γεωγραφικών έργων της βιβλιοθήκης της Αλεξάνδρειας και των έργων των συνοδών του Μ. Αλεξάνδρου στην εκστρατεία της Ασίας. Υπολόγισε, επίσης, την απόσταση Γης-Ηλίου (804.000.000 στάδια) και Γης-Σελήνης (780.000 στάδια) χρησιμοποιώντας στοιχεία των σεληνιακών εκλείψεων.

- Ο Ίππαρχος ο Ρόδιος ή Ίππαρχος ο Νικαεύς (περ.190 π.Χ. - 120 π.Χ.), ο οποίος επινόησε και θεμελίωσε την τριγωνομετρία, για την ανάλυση των παρατηρήσεών του. Ο ίδιος υποστήριξε ότι η διαφορά του μήκους δύο τόπων υπολογίζεται από τις διαφορές της τοπικής ώρας, με τη βοήθεια των εκλείψεων της σελήνης. Κατασκεύασε βαθμολογημένα όργανα για ακριβέστερες παρατηρήσεις, καθώς και ουράνια σφαίρα, τοποθετώντας σε αυτή τα αστέρια που προσδιόριζε. Επινόησε τη στερεογραφική προβολή. Η προσφορά του στην κατασκευή μετρητικών οργάνων κυριαρχεί μέχρι τον 17ο αιώνα. Τα όργανα του αναφέρονται και περιγράφονται στη Μεγίστη Σύνταξη του Πτολεμαίου, απ'όπου τα γνωρίζουμε σήμερα. Ένα, από τα πλέον σημαντικά όργανα μέτρησης, είναι ο (επίπεδος) αστρολάβος, που χρησιμοποιήθηκε έως και τον 17ο αιώνα. Η αρχή της κατασκευής του ανάγεται στον Ίππαρχο. Βασίζεται στο ανάλημμα, τη στερεογραφική προβολή, την απεικόνιση σφαίρας πάνω σε επίπεδο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρούνται οι γωνίες και οι αναλογίες των μηκών.



Εικόνα 4: Ο αστρολάβος

- Ο Ήρωνας ο Αλεξανδρέας, γύρω στα 120 π.Χ, ασχολήθηκε με πιο εφαρμοσμένα θέματα και έγραψε και σχετικά συγγράμματα. Κατασκεύασε το πρώτο γεωδαιτικό όργανο, τη διόπτρα, πρόδρομο του θεοδόλιχου, που μετρούσε οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες, ορίζοντας μια μηχανική σκοπευτική διάταξη. Το σύγγραμμά του περί διόπτρας ήταν το εγκόλπιο του γεωδαίτη μέχρι τον 16ο αιώνα. Περιέγραψε επίσης ένα όργανο προσδιορισμού υψομετρικών διαφορών με βάση τη στάθμη νερού που ηρεμεί, το Οδόμετρο και το Δρομόμετρο (για μετρήσεις μεγάλων αποστάσεων σε ξηρά και θάλασσα αντίστοιχα) και μεθόδους μετρήσεων και υπολογισμών.
- Ο Ποσειδώνιος ο Απαμέας (135 π.Χ - 51 π.Χ), ο οποίος ασχολήθηκε με μετρήσεις των διαστάσεων της γης και κατασκεύασε την υδρόγειο σφαίρα.
- Ο Πτολεμαίος, ο οποίος στο έργο του Μαθηματική Σύνταξις περιγράφει 7 όργανα, από τα οποία το τριγωνικόν και ο σφαιρικός αστρολάβος είναι δικές του επινοήσεις, ενώ τα υπόλοιπα τα αποδίδει στον Ήππαρχο. Η Γεωγραφική Υφήγησις του, αποτελεί την αρχή της προβολικής χαρτογραφίας, με οδηγίες για την κατασκευή χαρτών και με το γεωγραφικό μήκος και πλάτος 8000 περίπου τόπων.



Εικόνα 5: Χάρτης που οι ιστορικοί αποδίδουν στον Πτολεμαίο

Οι Ρωμαίοι ενδιαφέρονταν κυρίως για πρακτικές εφαρμογές της Τοπογραφίας και όχι τόσο για θεωρητικές μελέτες. Συστηματοποίησαν τις τοπογραφικές

μετρήσεις χρησιμοποιώντας, με κάποιες βελτιώσεις, τα απλά τοπογραφικά όργανα των Ελλήνων και των Αιγυπτίων (σχοινιά, μετρητικές ράβδους, μπρούτζινα διαστημόμετρα και οδόμετρα για τη μέτρηση μηκών, τη «groma»/αστέρα για τη χάραξη ορθών γωνιών, το χωροβάτη (chorobates) για τη μέτρηση υψομετρικών διαφορών). Ο Κλαύδιος Πτολεμαίος (90-168 μ.Χ.) συνέταξε τους χάρτες του γνωστού τότε κόσμου, στη Γεωγραφική Υφήγηση.

Από το 529 μ.Χ., όταν ο Ρωμαίος αυτοκράτορας Ιουστινιανός έκλεισε τις φιλοσοφικές σχολές της Αθήνας, ουσιαστικά ξεκινά ο μεσαίωνας, όπου οι άνθρωποι, ζώντας μέσα στον σκοταδισμό, είναι υποχρεωμένοι να πιστεύουν, με την απειλή της θανατικής καταδίκης, ότι η γη είναι επίπεδος δίσκος. Η γεωδαισία κατά την διάρκεια του μεσαίωνα παρέμεινε στάσιμη. Ο μεσαίωνας διήρκεσε χίλια χρόνια περίπου.

Κατά την περίοδο της Αναγέννησης, με την ανάπτυξη των επιστημών και τις μεγάλες κοινωνικές αλλαγές που χαρακτηρίζουν αυτή την περίοδο, δημιουργήθηκαν και οι προϋποθέσεις ανάπτυξης της Τοπογραφίας. Σημειώθηκε μεγάλη πρόοδος στην τοπογραφική χαρτογράφηση, κυρίως λόγω των μεγάλων ταξιδιών από τους θαλασσοπόρους, Μάρκο Πόλο (1488), Χριστόφορο Κολόμβο (1496), Μαγγελάνο (1540) και τις ανακαλύψεις τους.

Η ανακάλυψη νέων τόπων από τους μεγάλους θαλασσοπόρους, απαιτούσε τη σύνταξη χαρτών, ενώ παράλληλα είχε σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη νέων μεθόδων προσανατολισμού και ναυσιπλοΐας. Την περίοδο αυτή άρχισαν να εμφανίζονται και χάρτες βασισμένοι στις γεωγραφικές συντεταγμένες του Πτολεμαίου. Οι πολιτικές αλλαγές, με τον περιορισμό της φεουδαρχίας, απαιτούσαν τη μέτρηση και διανομή της γης στους αγρότες. Για την εξυπηρέτηση του πυροβολικού στις πολεμικές επιχειρήσεις, ήταν απαραίτητη η μέτρηση διευθύνσεων, κατακόρυφων γωνιών και αποστάσεων. Η επιβεβαίωση του ηλιοκεντρικού συστήματος του Κοπέρνικου απαιτούσε όργανα μετρήσεων υψηλής ακριβείας. Όλες αυτές οι ανάγκες είχαν σαν αποτέλεσμα την σημαντική πρόοδο της γεωδαισίας παγκόσμια, με την συμβολή των αστρονόμων Κοπέρνικος (1473 – 1543) και Κεπλερ (1571 – 1630), του Γαλιλαίου (1564 – 1642) και του Γάλλου γιατρού Fernel.

Το 1525 μ.Χ. ο Fernel, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του Ερατοσθένη και με τη βοήθεια παραλλακτικού κανόνα που είχε κατασκευαστεί και βαθμονομηθεί από τον Κοπέρνικο, προσδιόρισε την ακτίνα της γης με απόκλιση $\pm 0.1\%$, από τη μέση ακτίνα καμπυλότητας.

Κατά τον 17ο αιώνα η Γεωδαισία, η Τοπογραφία και η κατασκευή τοπογραφικών οργάνων συστηματοποιούνται. Κατασκευάζονται αλυσίδες για τη μέτρηση μηκών, γωνιομετρικά όργανα σε συνδυασμό με μαγνητικές πυξίδες και κλισίμετρα. Σημαντικές εξελίξεις ήταν η εφεύρεση του τηλεσκοπίου, η επινόηση των λογαρίθμων από τον Napier και η ανάπτυξη της τριγωνομετρίας, η επινόηση της αεροστάθμης από τον Γάλλο Thevenot γύρω στο 1600 μ.Χ. και η εφαρμογή της στα γεωδαιτικά όργανα και ασφαλώς η κατασκευή του θεοδόλιχου από τον Άγγλο Sisson το 1730. Η λειτουργία του θεοδόλιχου βασίζεται στην αρχή λειτουργίας της διόπτρας. Η λέξη είναι ελληνική και προέρχεται από το ρήμα "θεώμαι" (παρατηρώ, εξετάζω με προσοχή) και το επίθετο «δολιχόν» (μακρύ, επίμηκες). Είναι αξιοσημείωτο το ότι το θεοδόλιχο, ήταν από τότε και μέχρι των ημερών μας, το κατεξοχήν τοπογραφικό όργανο μέτρησης γωνιών, και είναι χαρακτηριστικό ότι για τους επόμενους αιώνες, οι αρχές λειτουργίας του θεοδόλιχου παρέμειναν οι ίδιες, με την προσθήκη βέβαια σημαντικών βελτιώσεων.



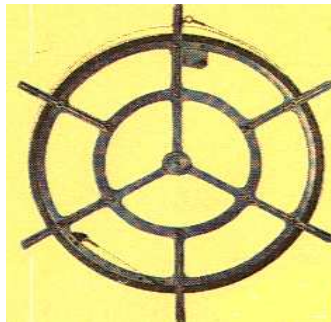
Εικόνα 6: Το δεύτερο θεοδόλιχο του Ramsden και το μηχανικό θεοδόλιχο Starke & Kammerer

Οι Γεωδαίτες και οι Τοπογράφοι έχουν πλέον επιστημονική κατάρτιση και ασχολούνται και με ερευνητικές δραστηριότητες. Στα Πανεπιστήμια συστηματοποιείται η διδασκαλία των Μαθηματικών και πολλά βιβλία με σχετικά θέματα τυπώνονται και κυκλοφορούν.

Στις αρχές του 18ου αιώνα, ως όργανα άμεσης μέτρησης ενός μήκους χρησιμοποιούνταν οι ξύλινοι μετρητικοί κανόνες, οι οποίοι ήταν κατασκευασμένοι από έλατο και είχαν εμποτιστεί σε λινέλαιο, προκειμένου να προστατεύονται από την υγρασία. Με την πάροδο του χρόνου, οι ξύλινοι μετρητικοί κανόνες αντικαταστάθηκαν από χαλύβδινες αλυσίδες και μεταλλικούς κανόνες, με γνωστό συντελεστή διαστολής και ειδικές μικρομετρικές διατάξεις, ενώ εξελίχθηκαν στα σύρματα Invar, το 1896, για άμεσες μετρήσεις μεγαλύτερων μηκών με μεγάλες ακρίβειες.



Εικόνα 7: Χαλύβδινη αλυσίδα μήκους 100 ποδών



Εικόνα 8: Μετροταινία Invar (Ramsden, 1784)

Κατά τον 18ο αιώνα, σε διάφορα κράτη συστήνονται τοπογραφικές υπηρεσίες, ιδρύονται και μετρούνται τριγωνομετρικά δίκτυα και εκτελούνται και άλλες τοπογραφικές εργασίες μεγάλης κλίμακας. Τα θεοδόλιχα, που ήταν πλέον εύχρηστα όργανα, με αεροστάθμες κλπ., χρησιμοποιούνται ευρύτατα. Θεοδόλιχα και χωροβάτες αρχίζουν να παράγονται οργανωμένα σε εργοστάσια που ανοίγουν σε διάφορες χώρες. Η χρησιμοποίησή

σταδιομετρικών νημάτων και σταδίας οδηγεί στην οπτική μέτρηση αποστάσεων με ικανοποιητική ακρίβεια.

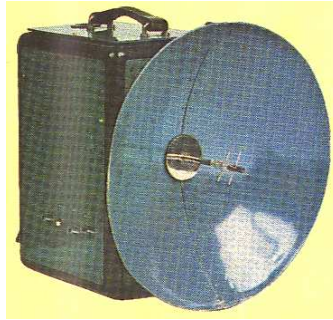


Εικόνα 9: Θεοδόλιχα Wild Th1 (1923) και T2 (1927)

Κατά τον 19ο αιώνα, οι βελτιώσεις των γεωδαιτικών οργάνων είναι ακόμη πιο ταχείες. Κατασκευάζονται θεοδόλιχα και χωροβάτες υψηλής ακριβείας, λινές και μεταλλικές μετροταινίες, κανόνες και ειδικά σύρματα, όπως προαναφέρθηκε, για τη μέτρηση μηκών. Δημιουργούνται συνεχώς μεγαλύτερες ανάγκες τοπογραφικών σχεδίων, χαρτών και ειδικών μετρήσεων. Η κατάσταση συνεχίζεται με παρόμοιο τρόπο και τον επόμενο αιώνα.

Από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα μέχρι και την δεκαετία του 1960, για τις έμμεσες μετρήσεις μηκών, χρησιμοποιήθηκαν τα οπτικομηχανικά θεοδόλιχα και τα αυτοαναγωγικά ταχύμετρα - με αναγνώσεις σε βαθμονομημένο μετρητικό πήχυ (σταδία) , τα οπτικά τηλέμετρα, καθώς και η δίμετρη βάση σε εργασίες με απαιτήσεις υψηλότερης ακρίβειας (προσδιορισμός κλίμακας σε τριγωνομετρικά δίκτυα, βιομηχανική γεωδαισία, κλπ.). Για τις άμεσες μετρήσεις μηκών, στις τρέχουσες τοπογραφικές εργασίες, χρησιμοποιούνταν οι μετροταινίες.

Σταθμό αποτελεί τη δεκαετία του 1950, η ηλεκτρομαγνητική μέτρηση των αποστάσεων, η μέτρηση δηλαδή μηκών με τη βοήθεια οργάνων που εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (E.D.M), που είχε ξεκινήσει από την περίοδο του 2^{ου} παγκόσμιου πολέμου και η οποία δημιούργησε νέες δυνατότητες στην γεωδαισία και την τοπογραφία.



Εικόνα 10: Τελλουρόμετρο (αρχική μορφή, σχεδιασμένο από τον Wadley το 1957 (Λονδίνο Μουσείο επιστημών)

Ενώ από την κατασκευή του θεοδόλιχου (1730) μέχρι την εμφάνιση των πρώτων ηλεκτρομαγνητικών οργάνων μέτρησης μηκών (E.D.M) (1950), η εξέλιξη των οργάνων μέτρησης δεν ήταν ραγδαία, εντούτοις, η γεωδαισία εξελίσσεται σημαντικά. Δημιουργούνται χάρτες στρατιωτικοί καθώς και πολιτικοί, για την οριοθέτηση των συνόρων των κρατών. Επίσης ιδρύονται γεωδαιτικές χαρτογραφικές υπηρεσίες για να υπηρετήσουν τους σκοπούς της γεωδαισίας.

Προφανώς, όλες αυτές οι μεταβολές, όταν εμφανίστηκαν σε διάφορες χρονικές στιγμές, επηρέασαν καθοριστικά και την αναβάθμιση των γεωδαιτικών μεθοδολογιών. Έτσι, με την ανάπτυξη των EDM ενισχύονται κατά πολύ οι μετρήσεις μηκών στα γεωδαιτικά δίκτυα, τα οποία στηρίζονταν μέχρι τότε κυρίως σε μετρήσεις γωνιών και υψομετρικών διαφορών.

Από την εμφάνιση των πρώτων E.D.M, η εξέλιξη των τοπογραφικών οργάνων, και προφανώς και των οργάνων μέτρησης μηκών, ακολουθεί ραγδαία εξέλιξη.

Σημαντικοί σταθμοί σε αυτή την εξέλιξη είναι:

- Η κατασκευή του ψηφιακού θεοδόλιχου (γύρω στο 1970) και η ενσωμάτωση του EDM σε αυτό, με αποτέλεσμα την μέτρηση γωνιών και μηκών από το ίδιο όργανο ομοαξονικά.
- Η κατασκευή του total station (γύρω στο 1990), που ήταν συνέπεια της ραγδαίας εξέλιξης των μικροϋπολογιστών και της ενσωμάτωσής τους

στο παραπάνω τοπογραφικό όργανο. Με τον τρόπο αυτόν, επιτυγχάνεται τόσο η επικοινωνία του χρήστη με το όργανο, όσο και η δυνατότητα της ταυτόχρονης ψηφιακής ανάγνωσης του μετρούμενου μήκους, της στοχευόμενης διεύθυνσης, των εμμέσως παραγομένων μεγεθών (οριζόντια και κατακόρυφη γωνία, αζιμούθιο, υψομετρική διαφορά, συντεταγμένες, κλπ.), καθώς και η ηλεκτρονική καταγραφή τους.

- Η κατασκευή EDM (και total stations) με δυνατότητα ηλεκτρομαγνητικής μέτρησης μήκους χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα στο άλλο άκρο της απόστασης (reflectorless).



Εικόνα 11: Το αποστασιόμετρο Dior 3002S προσαρμοζόμενο στο ψηφιακό θεοδόλιχο T1610 και ο γεωδαιτικός σταθμός TC702 (Leica)

Έκτοτε, με την παράλληλη ραγδαία ανάπτυξη της ηλεκτρονικής και των ηλεκτρονικών υπολογιστών, παρουσιάζεται μία αλματώδης εξέλιξη των τοπογραφικών οργάνων, με την κατασκευή total stations με συνεχώς βελτιούμενες ιδιότητες και δυνατότητες, όπως μείωση του βάρους τους, του όγκου τους, του κόστους τους και ταυτόχρονη αύξηση της ακρίβειάς τους, του βεληνεκούς τους καθώς και των υπολογιστικών δυνατοτήτων τους, με ενσωματωμένα προγράμματα για εκτέλεση υπολογισμών στο πεδίο, αυτόματη κίνηση του οργάνου με σερβοκινητήρες, αυτόματη αναζήτηση στόχου για μέτρηση, ενσωματωμένη αποθήκευση χιλιάδων σημείων μέτρησης κ.ά.

Η ανάπτυξη της δορυφορικής γεωδαισίας ήταν ένας άλλος σημαντικότερος σταθμός στην εξέλιξη των τοπογραφικών οργάνων μέτρησης μηκών.

Ήδη, από την εκτόξευση του πρώτου Ρωσικού τεχνητού δορυφόρου (Sputnik 1), το 1957, άρχισε να αναπτύσσεται η δορυφορική γεωδαισία, η οποία περνώντας από διάφορα στάδια πολύ σημαντικών εφαρμογών, συνεχώς εξελίσσεται.

Από τα συστήματα προσδιορισμού διευθύνσεων μέσω των φωτογραφικών μηχανών (δεκαετία 1960), όπου φωτογραφίζεται ο δορυφόρος με φόντο τα αστέρια σε ακίνητη θέση ή παρακολουθώντας την κίνηση του δορυφόρου, περάσαμε στη μέτρηση αποστάσεων προς δορυφόρους με χρήση laser (Satellite Laser Ranging – SLR) (δεκαετίες 1960 – 1970) και κατόπιν σε μετρήσεις με τη χρήση του φαινομένου Doppler (δεκαετίες 1970 -1980). Η άνθηση όμως της Δορυφορικής Γεωδαισίας στην καθημερινή ζωή του Μηχανικού, ήρθε με την εξέλιξη και την πολιτική χρήση του συστήματος GPS.



Εικόνα 12: Δορυφόρος του GPS και δέκτης G.P.S.

Ήδη, το Αμερικάνικο παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης, που έχει αναπτυχθεί τα τελευταία τριάντα χρόνια, και το οποίο από ένα σύστημα που δημιουργήθηκε για στρατιωτικούς σκοπούς, χρησιμοποιείται εδώ και χρόνια και σε πληθώρα πολιτικών εφαρμογών, το ακολουθούν το αντίστοιχο Ρωσικό GLONASS και το ευρωπαϊκό GALILEO. Τα συστήματα αυτά, συνεχώς συμπληρώνονται και εξελίσσονται, ενώ αναπτύσσονται και άλλα συστήματα (αδρανειακά) προς υποστήριξή τους. Με τη χρήση των επίγειων δεκτών, οι οποίοι λαμβάνουν κωδικοποιημένα σήματα, μετρούν το χρόνο και υπολογίζουν τις αποστάσεις τους από τους δορυφόρους, είναι πλέον δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης σημείων της γήινης επιφάνειας και έμμεσα της

μεταξύ τους απόστασης, με μικρή αβεβαιότητα και εύκολο τρόπο. Έτσι, εκτός από τον έλεγχο της κίνησης μεταφορικών μέσων κλπ., τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται πλέον σαν εύχρηστα και υψηλής ακριβείας συστήματα μετρήσεων για τοπογραφικές και γεωδαιτικές εφαρμογές, δημιουργώντας νέα δεδομένα στην γεωδαισία όσον αφορά στις μεθόδους μετρήσεων και υπολογισμών.

Μια άλλη τεχνολογία που έχει τις ρίζες της στην επιστήμη της ραδιοαστρονομίας και χρησιμοποιείται για μέτρηση πολύ μεγάλων αποστάσεων είναι η «συμβολομετρία μεγάλων αποστάσεων» (VLBI). Στην παρούσα εργασία θα δοθούν μόνο μερικές βασικές πληροφορίες μια και η τεχνολογία αυτή που συνεχώς αναπτύσσεται, αποτελεί από μόνη της ευρύτατο πεδίο έρευνας.

3. Όργανα – Μέθοδοι μέτρησης μήκους

Η μέθοδος και τα όργανα με τα οποία θα μετρηθεί μία απόσταση μεταξύ δύο σημείων ποικίλουν και εξαρτώνται κυρίως από την απαιτούμενη ακρίβεια, την μορφολογία του εδάφους, τις δυσκολίες που παρουσιάζει γενικά ο περιβάλλον χώρος καθώς και το κόστος της μεθόδου.

Οι μετρήσεις μηκών, ανάλογα με τη μέθοδο και τα όργανα που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες.

Τα όργανα μέτρησης μηκών, σε γενικές γραμμές, μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

- Μετροταινίες
- Οπτικά τηλέμετρα
- Ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης αποστάσεων
- Σύγχρονα εξελιγμένα συστήματα

3.1. Μετροταινίες – γενικά στοιχεία

Οι μετροταινίες είναι χαλύβδινες, λινές ή κατασκευασμένες από υλικό Fiberglass. Γύρω στο 1995 κυκλοφόρησαν στην αγορά και ηλεκτρονικές μετροταινίες, οι οποίες εμφανίζουν το αποτέλεσμα της μέτρησης σε ψηφιακή οθόνη. Οι μετροταινίες χρησιμοποιήθηκαν για την άμεση μέτρηση μικρών μηκών καθ' όλη τη διάρκεια του 20ου αιώνα και εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα σε απλές τοπογραφικές εργασίες.

Οι μετρήσεις μηκών που πραγματοποιούνται με μετροταινίες, προκειμένου να είναι αξιόπιστες, πρέπει να διορθωθούν. Οι διορθώσεις αυτές ^[14] εξαρτώνται από το είδος της μετροταινίας, από τις συνθήκες της μέτρησης και από την επιδιωκόμενη ακρίβεια, είναι δε στο σύνολό τους, οι εξής:

- Διόρθωση για διαφορά από το πρότυπο.
- Αναγωγή στη θερμοκρασία ελέγχου.

- Αναγωγή στη τάση ελέγχου.
- Διόρθωση για βέλος κάμψης.
- Διόρθωση για κλίση.
- Αναγωγή στη μέση στάθμη θαλάσσης.
- Διόρθωση λόγω χαρτογραφικής προβολής.

Επίσης, οι μετρήσεις μηκών με μετροταινίες πρέπει να γίνονται δύο φορές σε μετάβαση και επιστροφή (aller – retour), και να υπολογίζεται ο μέσος όρος των δύο μετρήσεων.

Οι μετροταινίες, ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων τους, μπορούν να καταταχθούν στις παρακάτω κατηγορίες.

3.1.1. Απλές μετροταινίες

Οι απλές μετροταινίες κατασκευάζονται από διάφορα υλικά όπως λινό, πανί, πλαστικό ή και fiberglass. Έχουν συνήθως μήκος από 15 – 50 m και υποδιαιρέσεις ανά 1 cm.



Εικόνα 13: Απλή μετροταινία

Η μέτρηση γίνεται με απλό οριζόντιο τέντωμα της ταινίας πάνω από τα σημεία που ορίζουν το μήκος που πρέπει να μετρηθεί. Δεν χρειάζεται η χρήση τάσης ούτε η λήψη θερμοκρασίας για διόρθωση. Η μετροταινία μπορεί επίσης να τοποθετηθεί και να τεντωθεί πάνω στο έδαφος, εφόσον είναι ομαλό και οριζόντιο ή ακόμα και κεκλιμένο. Στην περίπτωση αυτή, που το έδαφος έχει

κλίση, ή θα πρέπει να μετρηθεί η κλίση του με κλισίμετρο, ή η υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο σημείων, που ορίζουν το μετρούμενο μήκος και να γίνει η σχετική αναγωγή. Επίσης, πρέπει να γίνει η διόρθωση για τη διαφορά από το πρότυπο.

Οι δυνατές ακρίβειες είναι της τάξης του 1:1000 έως 1:2000.

Χρησιμοποιούνται με ελάχιστο κόστος και μικρή δυσκολία, για μετρήσεις κοινής ακρίβειας, στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων αλλά και σε απλές τοπογραφικές εργασίες.

3.1.2. Μεταλλικές μετροταινίες

Οι μεταλλικές μετροταινίες είναι κατασκευασμένες από ατσάλι. Είναι στενές λουρίδες ομοιόμορφου πάχους (0.3 – 0.75 mm) και πλάτους (10 – 20 mm) που το μήκος τους συνήθως ποικίλει από 15 – 100 m, με υποδιαιρέσεις ανά 0.5 cm ή και ανά 1 mm ανάλογα με την ποιότητα.

Υπάρχουν τυλιγμένες και στρωμένες σε ειδικά στελέχη που καταλήγουν σε μια λαβή (όπως και οι απλές μετροταινίες), έχοντας στην αρχή ένα δακτύλιο. Επίσης υπάρχουν μεταλλικές μετροταινίες τυλιγμένες σε ειδικές μεταλλικές θήκες έχοντας ελεύθερα και τα δυο τους άκρα. Τα άκρα τους αυτά καταλήγουν σε ειδικούς δακτυλίους από όπου μπορούν να κρατηθούν ή και να αναρτηθούν.



Εικόνα 14: Μεταλλική αλυσίδα

Ανάλογα με την επιδιωκόμενη ακρίβεια, μπορεί να εφαρμοσθεί διαδικασία μέτρησης κοντά ή πάνω στο έδαφος ή, για εργασίες που απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια, μέτρηση πάνω από το έδαφος με χρήση ψηλών

πασσάλων ή ακοντίων και λιναίης για τον ακριβή καθορισμό των άκρων της μέτρησης, οπότε το ίδιο της το βάρος την κάνει να ισορροπεί παίρνοντας τη μορφή της αλυσοειδούς καμπύλης.

Και στις δύο περιπτώσεις, πρέπει να εφαρμοσθεί τάση και να ληφθεί η θερμοκρασία για τη σχετική διόρθωση. Στην πρώτη περίπτωση, η μέτρηση της κλίσης μεταξύ των σημείων μπορεί να γίνει με κλισίμετρο, και η πύκνωση της ευθυγραμμίας με το μάτι ή θεοδόλιχο, ενώ αντίστοιχα, στην δεύτερη περίπτωση, η μέτρηση της κλίσης με κλισίμετρο ή θεοδόλιχο και η ευθυγραμμία με θεοδόλιχο.

Και στις δύο περιπτώσεις επίσης, πρέπει να γίνονται οι διορθώσεις και αναγωγές για κλίση, για τη διαφορά από το πρωτότυπο, για θερμοκρασίες και τάση. Στη δεύτερη περίπτωση απαιτείται και διόρθωση για βέλος κάμψης και ενδεχόμενα για αναγωγή στη μέση στάθμη θαλάσσης.^[14]

Οι ακρίβειες που μπορούν να επιτευχθούν είναι της τάξης 1:1000 έως 1:20000 στην πρώτη περίπτωση και 1: 5000 έως 1:50000 στη δεύτερη.

Οι μεταλλικές μετροταινίες χρησιμοποιούνταν σε μετρήσεις πλευρών οδεύσεων ακριβείας και σε μετρήσεις μικρών βάσεων τριγωνομετρικών δικτύων. Η διαδικασία μέτρησης ήταν αρκετά επίπονη. Μετά την δεκαετία του 1960, με τη ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρομαγνητικών οργάνων μέτρησης αποστάσεων (EDM) και των ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών (total stations), η χρήση τους περιορίσθηκε πολύ, ή ακόμα και καταργήθηκε.

3.1.3. Ταινίες και σύρματα Invar

Το βασικό χαρακτηριστικό των ταινιών και των συρμάτων Invar είναι το ότι το υλικό κατασκευής τους είναι ένα κράμα μετάλλων (36% νικελίου και 64% σιδήρου), του οποίου ο συντελεστής γραμμικής διαστολής είναι πολύ μικρότερος (περίπου 10 φορές) από το συντελεστή γραμμικής διαστολής του ατσαλιού, με αποτέλεσμα να είναι σημαντικά μικρότερη η επίδραση της μεταβολής των συνθηκών του περιβάλλοντος στα αποτελέσματα των μετρήσεων, απ' ό,τι στις ασάλινες μετροταινίες. Έχουν σταθερή διατομή, μήκος 4, 24, 30, 48 και 50 m, ενώ σε κάθε τους άκρο υπάρχει από ένας

μικρός κανόνας διηρημένος σε mm, που βοηθά στην ακριβέστερη ανάγνωση των μετρήσεων.

Προκειμένου οι μετρήσεις των μηκών να είναι υψηλής ακρίβειας, που είναι το ζητούμενο, οι ταινίες και τα σύρματα Invar συνδυάζονται με ένα βοηθητικό σύστημα, τη βασιμετρική συσκευή, η οποία, εκτός της ταινίας ή του σύρματος Invar συμπεριλαμβάνει και τη συσκευή τάσης καθώς και τους τρίποδες (με ειδική χαραγή που βοηθά στην ακρίβεια της ανάγνωσης). Η υψομετρική διαφορά μεταξύ των τριπόδων προσδιορίζεται με χωροστάθμηση, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στις αναγωγές.

Απαιτούμενες διορθώσεις και αναγωγές των μετρήσεων, είναι η διόρθωση για διαφορά από το πρότυπο, η αναγωγή στη θερμοκρασία ελέγχου, η αναγωγή στη τάση ελέγχου, η διόρθωση για βέλος κάμψης, η διόρθωση για κλίση και η αναγωγή στη μ.σ.θ..^[14]

Οι ακρίβειες που μπορούν να επιτευχθούν είναι της τάξης του 1:500000 έως 1:1000000.

Οι Ταινίες και σύρματα Invar χρησιμοποιούνταν όπου απαιτούνταν πολύ μεγάλη ακρίβεια, όπως οι μετρήσεις για τις Γεωδαιτικές Βάσεις, για την ίδρυση πεδίων ελέγχου ηλεκτρομαγνητικών οργάνων μέτρησης αποστάσεων, κλπ. Η διαδικασία μέτρησης ήταν επίπονη. Με την ανάπτυξη των ηλεκτρομαγνητικών οργάνων μέτρησης αποστάσεων (EDM) και των ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών (total stations), η χρήση τους περιορίστηκε πολύ.

3.1.4. Ηλεκτρονικές μετροταινίες

Οι ηλεκτρονικές μετροταινίες έχουν μικρό όγκο, το βάρος τους δεν ξεπερνά τα 250 gr και είναι, συνήθως, αδιάβροχες. Χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κόκκινου ορατού laser. Διαθέτουν μικροϋπολογιστή, με την βοήθεια του οποίου μπορούν να υπολογισθούν και να εμφανισθούν στη φωτιζόμενη οθόνη τους, εκτός της απόστασης, και άλλα πολύ χρήσιμα μεγέθη, όπως υψομετρικές διαφορές προς απρόσιτα σημεία, κλίσεις κλπ. Στην εξελιγμένη μορφή τους διαθέτουν και ψηφιακή κάμερα, όπου μπορεί να

μεταφερθεί το οπτικό τους πεδίο και με μεγέθυνση να γίνει σωστότερη σκόπευση.

Οι ηλεκτρονικές μετροταινίες, που εμφανίσθηκαν στην αγορά την τελευταία δεκαπενταετία, είναι ιδιαίτερος εύχρηστα όργανα μετρήσεων μικρών αποστάσεων, μικρού σχετικά κόστους και χρησιμοποιούνται σε συνήθεις και απλές εργασίες, όπως αποτυπώσεις εσωτερικών χώρων κτηρίων, κλπ. με αβεβαιότητα που μπορεί να φθάσει τα $\pm 1\text{cm}$. Η εμβέλειά τους είναι συνήθως μέχρι 200 m.



Εικόνα 15: PMB 300 L Ψηφιακή μετροταινία laser BOSCH

3.2. Οπτικά τηλέμετρα - Γενικά στοιχεία

Η έμμεση μέτρηση μηκών με τα οπτικά τηλέμετρα, στηρίζεται στην απλή τριγωνομετρική επίλυση των στοιχείων ενός ορθογωνίου τριγώνου, του οποίου υπολογίζεται η μεγάλη κάθετη πλευρά του (ζητούμενο μήκος L) από δύο άλλα στοιχεία του, την μικρή του κάθετη πλευρά (b) και την απέναντί της οξεία γωνία του (παραλλακτική γωνία γ), εκ των οποίων το ένα είναι γνωστό (σταθερό) ενώ το άλλο μετράται (Σχήμα 2, παράγραφος 3.2.3.).

Ανάλογα με το ποίο ακριβώς στοιχείο του (κάθετη πλευρά (b) ή παραλλακτική γωνία (γ)) είναι γνωστό και ποίο μετράται, την θέση των δύο αυτών στοιχείων ως προς τον παρατηρητή και την θέση του μήκους b στον χώρο (δηλαδή εάν αυτό είναι οριζόντιο, κατακόρυφο ή βρίσκεται σε πλάγια θέση) διακρίνουμε διάφορες μεθόδους οπτικού έμμεσου προσδιορισμού του μήκους.

Οι κύριες, από αυτές τις μεθόδους, είναι:

- Με θεοδόλιχο και βοηθητικά όργανα (κατακόρυφη βάση)
- Με τη μέθοδο της οριζόντιας βάσης

- Με ερευνητές αποστάσεων και μικρά τηλέμετρα

3.2.1. Θεοδόλιχο και βοηθητικά όργανα

Με τα θεοδόλιχα, τα οποία βασικά είναι γωνιομετρικά όργανα μέτρησης οριζοντίων και κατακόρυφων γωνιών, μετά την προσθήκη στην σκοπευτική τους διάταξη του σταυρονήματος και τη μέτρηση, με την βοήθειά του, του αποκοπτόμενου τμήματος της σταδίας, μπορεί, έμμεσα, να υπολογισθεί και η απόσταση μεταξύ δύο σημείων (ταχυμετρία).

Το θεοδόλιχο μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι εξέλιξη της αρχαίας διόπτρας, που σχεδιάστηκε από τον Ήρωνα (120 π.Χ.) και το οποίο μετρούσε οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες, με απλές σκοπευτικές και μετρητικές διατάξεις.

Το πρώτο οπτικομηχανικό θεοδόλιχο, με τα γνωστά χαρακτηριστικά του, κατασκευάστηκε το 1730 από τον Άγγλο μηχανικό SISSON και τελειοποιήθηκε μετά από τον 1^ο Παγκόσμιο πόλεμο από τον Ελβετό γεωδαίτη H. WILD.

Διάφορα οπτικομηχανικά θεοδόλιχα (ταχύμετρα) χρησιμοποιήθηκαν για την έμμεση μέτρηση μηκών από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα μέχρι και τη δεκαετία του '60, όπως το Hilger Watts, Wild T16, Zeiss κ.α. σε συνδυασμό με μετρητικούς πήχεις (σταδίες), που τοποθετούνταν στην άλλη άκρη της προς μέτρηση απόστασης.



Εικόνα 16: Το αυτοαναγωγικό ταχύμετρο RDH

Με τη μέτρηση του αποκοπτόμενου τμήματος της σταδίας, του μήκους δηλαδή του τμήματος της σταδίας, που βρίσκεται μεταξύ των δύο μικρών βοηθητικών σταυρονημάτων που έχει το τηλεσκόπιο, πάνω και κάτω από το κεντρικό σταυρόνημα και της ζενίθιας γωνίας, υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ του οργάνου και του σημείου τοποθέτησης της σταδίας. Για να είναι δυνατή η ανάγνωση, με ικανοποιητική ακρίβεια, του αποκοπτόμενου μήκους της σταδίας από τον παρατηρητή, η μετρούμενη απόσταση δεν μπορεί να ξεπερνά τα μερικές δεκάδες μέτρα ^[2].

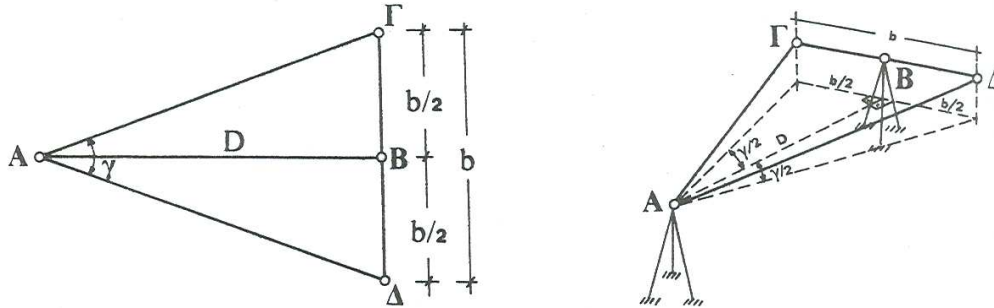
Μία παραλλαγή της μεθόδου αυτής είναι η έμμεση μέτρηση μηκών με την χρήση αυτοαναγωγικών ταχυμέτρων, με αναγνώσεις σε βαθμονομημένο μετρητικό πήχυ (σταδία). Ένα τέτοιο όργανο κατασκευάστηκε, για πρώτη φορά, από τον Bosshardt το 1926. Η απόσταση στα όργανα αυτά, η οποία δεν ξεπερνούσε τις μερικές δεκάδες μέτρα, προσδιοριζόταν με την βοήθεια σταδιομετρικών νημάτων στο τηλεσκόπιο, των οποίων το μεταξύ τους διάστημα μεταβαλλόταν και από τα οποία διαβαζόταν απευθείας η ανάγνωση της απόστασης πάνω στη σταδία.

Η μέθοδος της ταχυμετρίας, η οποία ήταν μια όχι ιδιαίτερα επίπονη μέθοδος και της οποίας το κόστος ήταν σχετικά μικρό, εφαρμόστηκε πάρα πολύ στις συνήθεις και με όχι ιδιαίτερες απαιτήσεις σε ακρίβεια, τοπογραφικές εργασίες (τοπογραφικές αποτυπώσεις, κλπ.), μέχρι την δεκαετία του 1980, οπότε, πρακτικά, αντικαταστάθηκε από τα ψηφιακά θεοδόλιχα και τα ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης αποστάσεων (EDM), τα οποία την εποχή αυτή άρχισαν να εμφανίζονται σε πρακτικές εφαρμογές. Εξάλλου και τα όργανα αυτά, δεν χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μορφή για μεγάλο χρονικό διάστημα, αφού η εξέλιξη της τεχνολογίας πολύ γρήγορα τα ενσωμάτωσε στους σύγχρονους ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς (total stations), οι οποίοι μετρούν ταυτόχρονα γωνίες και μήκη.

3.2.2. Οριζόντια βάση – δίδμετρη βάση

Προκειμένου να εφαρμοστεί η μέθοδος της οριζόντιας βάσης, είναι απαραίτητο ένα θεοδόλιχο (που τοποθετείται στο σημείο A του σχήματος 1) και η υλοποίηση μίας βάσης (ΓΔ) γνωστού μήκους (b), τοποθετημένης σε

οριζόντια θέση (που τοποθετείται στο σημείο Β του σχήματος, κάθετα προς την ΑΒ).



Σχήμα 1: Μέθοδος οριζόντιας βάσης

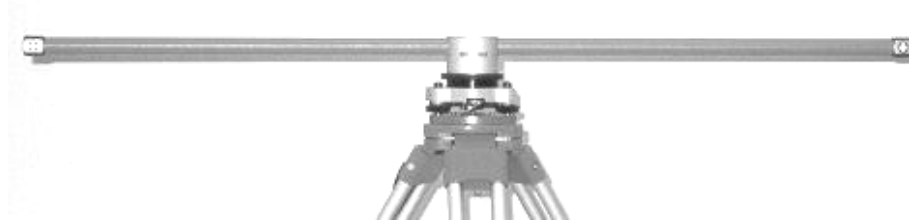
Στη συνέχεια μετρίεται η παραλλακτική (οριζόντια) γωνία (γ), οπότε η οριζόντια απόσταση D υπολογίζεται έμμεσα και ανεξάρτητα από την υψομετρική διαφορά των σημείων Α, Β και Γ, με την βοήθεια της τριγωνομετρικής σχέσης:

$$D = AB = (b/2) \cdot \cot(\gamma/2)$$

Προφανώς, η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται από την ακρίβεια μέτρησης της παραλλακτικής γωνίας (γ) και του μήκους της βάσης (ΓΔ). Προκειμένου να έχουμε όσο το δυνατόν σωστότερα αποτελέσματα, θα πρέπει η βάση (ΓΔ) να είναι μετρημένη με πολύ μεγάλη ακρίβεια και επί πλέον, τα σημεία Γ και Δ να υλοποιημένα με μεγάλη σαφήνεια, ώστε η μέτρηση της παραλλακτικής γωνίας (γ), να μπορεί να γίνει με την απαιτούμενη ακρίβεια. Οι ανάγκες αυτές καλύπτονται, κατά τον καλύτερο τρόπο, με την χρησιμοποίηση μιας έτοιμης βάσης, που να μετακινείται εύκολα, με όσο το δυνατόν πιο σταθερό μήκος.

Η σχεδόν αποκλειστικά χρησιμοποιούμενη βάση, είναι μια δίμετρη μεταλλική βάση. Το μήκος της βάσης που είναι μετρημένο με πολύ μεγάλη ακρίβεια υλοποιείται με δύο στόχους στα άκρα της. Η βάση συνήθως τοποθετείται πάνω σε ένα τρίποδο, με ένα κοινό τρικόχλιο θεοδόλιχου, έτσι ώστε να είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί σε μεθόδους εναλλαγής θεοδόλιχου και βάσης (μέθοδος 3 τριπόδων). Ειδικές διατάξεις, όπως ο κεντρικός στόχος, το μικρό τηλεσκόπιο, η οπτική κέντρωση καθώς και ηλεκτρικός φωτισμός στους

στόχους εξυπηρετούν τις σκοπεύσεις καθώς και το σωστό στήσιμο (τον προσανατολισμό, την ευθυγράμμιση και τον έλεγχο καθετότητας) του συστήματος.



Εικόνα 17 : Δίμμετρη μεταλλική βάση Wild

Για να αντιμετωπισθεί η επίδραση των θερμοκρασιακών μεταβολών στη σταθερότητα του μήκους της βάσης, η βάση είναι κατασκευασμένη από ειδικά μέταλλα. Για παράδειγμα, η δίμμετρη βάση της Wild η οποία είναι κατασκευασμένη από έναν συνδυασμό ασαλιού, μπρούτζου και ειδικού σύρματος Invar, έχει σαν αποτέλεσμα μία μεταβολή 20°C από τη θερμοκρασία βαθμονόμησής της, να μεταβάλλει το μήκος της κατά 0.02mm , δηλαδή μπορεί να υπάρξει μια αναλογική μεταβολή της τάξης του $1/100000$. Αντίστοιχα, το μήκος σε μια δίμμετρη βάση Kern παραμένει σε όρια $\pm 0.03\text{mm}$, δηλαδή μπορεί να υπάρξει μια αναλογική μεταβολή της τάξης του $1/67000$.

Η μέθοδος της δίμμετρης βάσης, η οποία με απλό τρόπο (με την χρήση ενός θεοδόλιχου απόδοσης $1''$ και με μόνο μια σειρά μετρήσεων της οριζόντιας παραλλακτικής γωνίας $\Gamma\Delta\Delta = \gamma$), μπορούσε να έχει αποτελέσματα ακρίβειας από $1:5000$ έως $1:10000$, χρησιμοποιούνταν κυρίως σε γεωδαιτικές εργασίες, που απαιτούσαν υψηλές σχετικά ακρίβειες, όπως στον προσδιορισμό της κλίμακας μικρών γεωδαιτικών δικτύων, στη μέτρηση πλευρών οδεύσεων, κλπ., έως ότου αντικαταστάθηκε από τις σύγχρονες μεθόδους και όργανα.

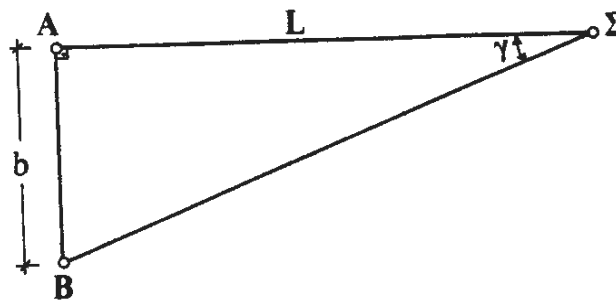
Σήμερα, εξακολουθεί να χρησιμοποιείται μια εξελιγμένη μορφή της δίμμετρης βάσης, η ράβδος, σε δίκτυα βιομηχανικής γεωδαισίας. Η ράβδος αυτή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 18: Ράβδος για μετρήσεις σε εφαρμογές βιομηχανικής γεωδαισίας

3.2.3. Ερευνητές αποστάσεων – μικρά τηλέμετρα

Μία άλλη μέθοδος έμμεσης μέτρησης μηκών είναι η μέτρηση με την βοήθεια ερευνητών αποστάσεων ή μικρών τηλέμετρων. Κατά την διαδικασία αυτής της μέτρησης, το όργανο βρίσκεται στη βάση ($AB = b$) του ορθογωνίου τριγώνου που σχηματίζεται μεταξύ του σκοπευόμενου σημείου και του οργάνου, ενώ το σκοπευόμενο σημείο βρίσκεται στην κορυφή της μικρότερης οξείας γωνίας του (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Μέθοδος ερευνητών αποστάσεων – μικρών τηλεμέτρων

Με την βοήθεια πρισμάτων, που υπάρχουν στα σημεία A και B, μεταφέρεται από καθένα από αυτά το είδωλο του στόχου στο προσοφθάλμιο σύστημα του οργάνου. Η ένδειξη της κλίμακας του οργάνου όταν τα δύο αυτά είδωλα συμπέσουν, είναι το μετρούμενο μήκος AS .

Τα όργανα αυτά, ανάλογα με το ποίο από τα στοιχεία του ορθογωνίου τριγώνου, η βάση b ή η γωνία γ , διατηρείται σταθερό, κατατάσσονται αντίστοιχα σε ερευνητές αποστάσεων και σε μικρά τηλέμετρα.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζοταν κυρίως σε μετρήσεις αποστάσεων προς απρόσιτα σημεία, με περιορισμένες απαιτήσεις ακρίβειας.

3.2.3.1. Ερευνητές αποστάσεων

Στους ερευνητές αποστάσεων, που έχουν μέσα στο όργανο ενσωματωμένη μια βάση σταθερού μήκους, η γωνία στο σημείο A (σχήμα 2), είναι εκ κατασκευής ορθή, ενώ, με ένα ειδικό ρυθμιστικό πρίσμα, η γωνία στο σημείο B μπορεί να μεταβάλλεται.

Κατά την διάρκεια της μέτρησης, η γωνία στο σημείο B ρυθμίζεται έτσι ώστε να συμπέσουν τα δύο είδωλα του στόχου, που εμφανίζονται μέσα στο προσοφθάλμιο, οπότε μπορεί να διαβαστεί αμέσως, σε διηρημένη κλίμακα του οργάνου, η κεκλιμένη απόσταση μεταξύ της στάσης του οργάνου και του στόχου, χωρίς να υπάρχει ανάγκη μέτρησης της γωνίας στο B από τον παρατηρητή. Η κλίμακα αυτή είναι ρυθμισμένη έτσι ώστε να δίνει τιμές ίσες με $L=b \cdot \cos \gamma$.

Οι μετρήσεις με τους ερευνητές αποστάσεων έχουν σχετικά μικρή ακρίβεια, μικρότερη του 1/600, με το σφάλμα να αυξάνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης.

Τέτοια όργανα κατασκευάζονταν από τον οίκο Barr and Stround και από τον οίκο Wild. Χαρακτηριστικοί ερευνητές αποστάσεων της Wild είναι ο TM-0, που μπορεί να μετρήσει αποστάσεις από 35 έως 300m με ακρίβεια 1/600 και ο TM-2, που έχει μια σταθερή βάση 80 cm και μετράει αποστάσεις από 300 – 5000 m με ακρίβεια έως 1/30.

3.2.3.2. Μικρά τηλέμετρα

Στα μικρά τηλέμετρα, τα οποία είναι όργανα παρόμοια με τους ερευνητές αποστάσεων, η ενσωματωμένη βάση τους είναι μεταβλητού μήκους, η γωνία B παραμένει σταθερή, ενώ η γωνία στο σημείο A είναι - και σε αυτά – από κατασκευής ορθή (Σχήμα 2).

Για να παραμείνει σταθερή η γωνία B χρησιμοποιείται ένα μικρό πρίσμα, το οποίο έχει τοποθετηθεί με απόκλιση $\arccot 1/x$, σε τρόπο ώστε : $L = b \cdot x$

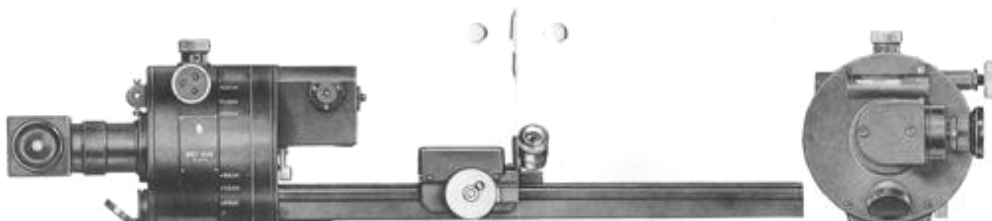
Το μήκος της βάσης b , που χρησιμοποιείται στην παραπάνω σχέση υπολογισμού της απόστασης L , προκύπτει με ανάγνωση της βαθμονομημένης βάσης $AB = b$ τη στιγμή που το πρίσμα αυτό - το οποίο ολισθαίνει πάνω σε αυτή τη βάση - βρεθεί στη θέση, που οι δυο χωρισμένες φαινομενικά εικόνες του ειδώλου του στόχου συμπίψουν.

Τα όργανα αυτά, με τα οποία μπορούν να μετρηθούν κεκλιμένα μήκη, έχουν τη δυνατότητα άμεσης αναγωγής του μήκους σε οριζόντιο. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται εξαρτάται από το όργανο και είναι ανάλογη της απόστασης, που μετράται, στην καλύτερη δε περίπτωση δεν είναι καλύτερη του $1/1600$.

Τα γνωστότερα μικρά τηλέμετρα είναι τα BRT 006 και Teletop του οίκου Zeiss Jena και το Todis του οίκου Breithaupt Kassel.

Το αυτοαναγωγικό τηλέμετρο BRT 006 μετρά οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες με δυνατότητα ανάγνωσης μέχρι $5'$, δε χρειάζεται ιδιαίτερο στόχο για τις σκοπεύσεις και εμφανίζει αυτόματα τα οριζόντια μήκη. Τα αποτελέσματά του μέχρι 60 m είναι ικανοποιητικά.

Τα Teletop και Todis μετρούν κεκλιμένα μήκη και τις κλίσεις, οπότε τα μήκη αυτά μπορούν να αναχθούν σε οριζόντια. Η ακρίβειά τους είναι της τάξης $1/600$ και $1/200$ έως $1/800$, αντίστοιχα.



Εικόνα 19: Το τηλέμετρο BRT 006 της Zeiss Jena

3.3. Ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης μήκους - γενικά – EDM

Μέχρι την δεκαετία του 1970, η επιστήμη της γεωδαισίας, παρά την θεαματική εξέλιξή της, είχε τον περιορισμό της μεγάλης δυσκολίας με την οποία γίνονταν οι μετρήσεις αποστάσεων, ιδιαίτερα σε εργασίες με απαιτήσεις υψηλής

ακρίβειας, όπως τα τριγωνομετρικά δίκτυα κλπ., όπου για την μέτρηση ενός μήκους μερικών χιλιομέτρων απαιτούνταν επίπονη εργασία ημερών. Η δυσκολία αυτή είχε σαν συνέπεια τον προσανατολισμό της γεωδαισίας σε μεθόδους, οι οποίες, για τις εργασίες αυτές, χρησιμοποιούσαν κυρίως μετρήσεις διευθύνσεων και ελάχιστες μετρήσεις μηκών, όπως π.χ. η μέτρηση της βάσης τριγωνομετρικού δικτύου για τον προσδιορισμό της κλίμακάς του.

Έτσι, οι μετρήσεις μηκών, στις μεν απλές και συνηθισμένες τοπογραφικές εργασίες γίνονταν κυρίως με μετροταινίες ή ταχυμετρικά, στις δε μετρήσεις με απαιτήσεις υψηλής ακριβείας, γίνονταν με μεθόδους και όργανα που απαιτούσαν επίπονες και χρονοβόρες διαδικασίες, όπως, συνήθως, με σύρματα invar.

Συνεπώς, η δημιουργία συστημάτων μέτρησης μήκους με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτέλεσε την επανάσταση στις γεωδαιτικές μετρήσεις, καθώς αυτά, με την ραγδαία πρόοδο της τεχνολογίας των τελευταίων δεκαετιών, από τα βαριά, δύσχρηστα και με όχι ικανοποιητική ακρίβεια όργανα της πρώτης εποχής, εξελίχθηκαν γρήγορα σε πολύ εύχρηστα και με πολύ υψηλή ακρίβεια όργανα EDM, όπως είναι διεθνώς γνωστά, από τα αρχικά των λέξεων Electromagnetic Distance Measurement, τα οποία χρησιμοποιούνταν επικαθίμενα στα συμβατικά θεοδόλιχα και, όπως περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο της εργασίας, ενσωματώθηκαν τελικά σε αυτά.

Στην συνέχεια, αφού γίνει μία συνοπτική αναφορά στις αρχές λειτουργίας των ηλεκτρομαγνητικών οργάνων μέτρησης μήκους, ακολουθεί η αναφορά των διαφόρων διορθώσεων και αναγωγών, που είναι απαραίτητες προκειμένου τα αποτελέσματα των μετρήσεων να είναι όσο το δυνατόν ακριβέστερα.

Ακολούθως γίνεται μία προσπάθεια κατάταξης των οργάνων αυτών σε κατηγορίες και τέλος παρουσιάζονται τα βασικότερα εξ αυτών των οργάνων, στην πορεία εξέλιξής τους.

3.3.1. Αρχές λειτουργίας

Η μέτρηση μήκους με τη χρήση EDM γίνεται μέσω της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, βασιζόμενη, σε γενικές γραμμές, στην αρχή της

Φυσικής ότι η απόσταση μεταξύ δύο σημείων ισούται με την ταχύτητα του μέσου μεταφοράς επί τον απαιτούμενο χρόνο μετάβασης. Εάν επομένως είναι γνωστή η συχνότητα - περίοδος της ακτινοβολίας και το μήκος κύματος της ώστε να προσδιορίζεται ανά πάσα στιγμή η ταχύτητα του εκπεμπόμενου σήματος μέσα στην ατμόσφαιρα, είναι απαραίτητο να μετρηθεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια ο χρόνος που χρειάζεται ένα σήμα (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) για να διανύσει τη μετρούμενη απόσταση. Ενδεικτικά μπορούμε να πούμε, ότι αν επιδιώκεται ακρίβεια στη μέτρηση ενός μήκους της τάξης των $\pm 3\text{mm}$, τότε πρέπει ο χρόνος να μετράται με ακρίβεια της τάξης των $\pm 10\text{ nsec}$. Η μέτρηση του χρόνου με τόσο μεγάλη ακρίβεια είναι αρκετά δύσκολη και δημιουργεί προβλήματα, τα οποία λύνονται από τους κατασκευαστές των οργάνων, οι οποίοι στηρίζονται σε αυτή την αρχή και την εξειδικεύουν ανάλογα με ποιά από τις παρακάτω μεθόδους χρησιμοποιούν.

Οι δύο αυτές μέθοδοι (όπως αναφέρονται και στο κεφάλαιο 3.3.3) είναι :

- Η μέθοδος μέτρησης της διαφοράς φάσης συνεχούς διαμορφωμένης ακτινοβολίας. Με τη μέθοδο αυτή, το διαμορφωμένο φως εκπέμπεται από το όργανο (πομπός). Μετά την πλήρη διαδρομή μετάβασης στον δέκτη (κάτοπτρο) και την επιστροφή του, η ακτινοβολία προσλαμβάνεται πάλι από το κυρίως όργανο. Κατά τη μέθοδο αυτή, μετράται έμμεσα ή άμεσα η διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων εκπομπής και λήψης (ποσότητα $\Delta\phi$), οπότε υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ οργάνου και κατόπτρου.
- Η μέθοδος μέτρησης με τη διαμόρφωση του φωτός σε παλμούς. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εκπομπή συγκεντρωμένης φωτεινής ενέργειας σε τακτά χρονικά διαστήματα με ορισμένη χρονική διάρκεια. Και με αυτό τον τρόπο το μήκος υπολογίζεται έμμεσα, από τη μέτρηση του χρόνου Δt μετάβασης – επιστροφής ενός παλμού.

Σε γενικές γραμμές, τα στάδια της διαδικασίας μέτρησης μίας απόστασης με ένα όργανο EDM, μπορούν να περιγραφούν ως εξής:

- παράγεται το φως που θα χρησιμοποιηθεί σαν φέρουσα ακτινοβολία

- διαμορφώνεται η φέρουσα ακτινοβολία
- μετατρέπεται η διαμορφωμένη φωτεινή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό σήμα της ίδιας συχνότητας και φάσης
- γίνεται μια ετεροδυναμική μίξη του ηλεκτρικού σήματος και άλλων σημάτων με μικρότερη συχνότητα
- με κατάλληλο τρόπο μετριέται η διαφορά φάσης ($\Delta\phi$) ή η διαφορά του χρόνου (Δt), από την στιγμή της εκπομπής μέχρι την στιγμή της λήψης.

Ενώ παλαιότερα ο παρατηρητής έπρεπε να κάνει κάποιους υπολογισμούς για να υπολογίσει την απόσταση, σήμερα υπάρχουν μικροϋπολογιστές ενσωματωμένοι στα EDM που υπολογίζουν αυτόματα το μήκος και η μέτρηση της φάσης γίνεται ψηφιακά.

3.3.2. Διορθώσεις και αναγωγές των μετρήσεων ^[14]

Τα μετρούμενα με όργανα EDM μήκη χρειάζονται διορθώσεις:

1. Που οφείλονται σε επιδράσεις της ατμόσφαιρας στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και που είναι οι:

- διόρθωση λόγω μείωσης της ισχύος της ακτινοβολίας
- διόρθωση λόγω καθυστέρησης της ακτινοβολίας (αλλαγή ταχύτητας)
- διόρθωση λόγω καμπύλωσης της τροχιάς

2. Που οφείλονται σε συστηματικά σφάλματα του οργάνου και του ανακλαστήρα, οι οποίες επιγραμματικά, είναι:

- διόρθωση λόγω σταθεράς του οργάνου
- διόρθωση λόγω σταθεράς του συστήματος 'όργανο – ανακλαστήρας'
- διόρθωση λόγω κυκλικού σφάλματος
- διόρθωση λόγω αλλαγής της συχνότητας διαμόρφωσης

3. Γεωμετρικές διορθώσεις

Το κεκλιμένο μήκος που θα προκύψει μετά από τις παραπάνω διορθώσεις πρέπει, αναλόγως του μεγέθους του και της επιδιωκόμενης ακρίβειας να υποστεί τις παρακάτω αναγωγές, ή κάποιες εξ αυτών, προκειμένου να αξιοποιηθεί για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των σημείων ή για την κατασκευή των γεωμετρικών σχημάτων, κλπ.:

- διόρθωση για καμπυλότητα των οπτικών ακτινών
- διόρθωση για κλίση
- αναγωγή στη χορδή του ελλειψοειδούς (ή μ.σ.θ.)
- αναγωγή σε τόξο ελλειψοειδούς
- αναγωγή λόγω χαρτογραφικής προβολής
- ειδική γεωμετρική αναγωγή

3.3.3. Κατηγορίες οργάνων EDM.

Από την εμφάνιση των οργάνων EDM και ανάλογα με την φάση της εξέλιξής τους, έγιναν διάφορες προσπάθειες κατηγοριοποίησής τους. Οι σημαντικότερες από αυτές τις κατηγοριοποιήσεις, είναι οι ακόλουθες:

1. Με βάση το μέγιστο μήκος (βεληνεκές), που είχαν δυνατότητα να μετρήσουν.

Τα EDM κατατάσσονταν σε μικρού, μεσαίου και μεγάλου βεληνεκούς.

Τα περισσότερα EDM μικρού βεληνεκούς (δηλ. μέχρι 3 km) ονομαζόντουσαν ταχυμετρικά EDM, γιατί μπορούσαν να επικάθονται σε θεοδόλιχα και να χρησιμοποιούνται με αυτόν τον τρόπο στις συνηθισμένες τοπογραφικές εργασίες.

Ο παραπάνω διαχωρισμός, με την πάροδο του χρόνου, έχει πρακτικά καταστεί μη ουσιώδης, καθώς με την εξέλιξη της τεχνολογίας:

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

- Όλα τα παραγόμενα EDM με βεληνεκές μέχρι και 15 km μπορούσαν να επικαθίσουν και να συνεργασθούν με θεοδόλιχο.
 - Με την ενσωμάτωση των EDM στα ψηφιακά θεοδόλιχα και την μαζική παραγωγή ολοκληρωμένων ψηφιακών γεωδαιτικών σταθμών (Total stations) υπάρχουν πια πολλά όργανα με μεγάλη ποικιλία σε εμβέλεια και ακρίβεια, που καλύπτουν πολύ μεγάλο φάσμα τοπογραφικών αναγκών.
 - Με την ανάπτυξη των Συστημάτων δορυφορικού εντοπισμού (GPS), τα όργανα μεγάλου βεληνεκούς τείνουν να εκλείψουν.
2. Σε E.O.D.M. (ηλεκτροπτικά όργανα μέτρησης μηκών) και σε M.D.M. (όργανα μέτρησης μηκών με μικροκύματα)

Οι βασικές διαφορές αυτών ήταν :

- Τα M.D.M. χρησιμοποιούσαν σαν φέρουσα ακτινοβολία για διαμόρφωση τα μικροκύματα, ενώ τα E.O.D.M ορατό ή υπέρυθρο φως.
- Τα M.D.M. διέθεταν ενεργητικό δέκτη που ενίσχυε το σήμα και το έστελνε πίσω στο κυρίως όργανο ενώ τα E.O.D.M. χρησιμοποιούν παθητικό δέκτη (κάτοπτρο ειδικά κατασκευασμένο).
- Τα M.D.M. ήταν όργανα κυρίως μεγάλου βεληνεκούς, αλλά παρείχαν μετρήσεις μειωμένης ακρίβειας σε σχέση με τα E.O.D.M.

Σήμερα τα M.D.M. έχουν ουσιαστικά εκλείψει, ενώ σχεδόν όλα τα παραγόμενα όργανα είναι E.O.D.M.

3. Με βάση την αρχή λειτουργίας τους

Σύμφωνα με αυτή την κατηγοριοποίηση τα EDM διακρίνονται σε όργανα :

- που χρησιμοποιούν τη μέθοδο της διαφοράς φάσης (Phase Shift, PS) μιας συνεχούς διαμορφωμένης ακτινοβολίας, που είναι μεν ακριβέστερη, αλλά με μικρότερη εμβέλεια μετρήσεων και πιο χρονοβόρα και

- που χρησιμοποιούν τη μέθοδο του "χρόνου πτήσης" του παλμού, Time Of Flight. (T.O.F.), της μέτρησης δηλαδή της διαφοράς χρόνου από την εκπομπή και τη λήψη μιας διαμορφωμένης σε παλμούς ακτινοβολίας, που έχει μεγαλύτερη εμβέλεια, είναι ταχύτερη αλλά λιγότερο ακριβής.

Τα περισσότερα από τα σύγχρονα EDM χρησιμοποιούν την αρχή μέτρησης της διαφοράς φάσης. Υπάρχουν όμως και όργανα όπως το DIOR 3000 της WILD που ακολουθούν τη δεύτερη αρχή.

3.3.4. Εξέλιξη των ηλεκτρομαγνητικών οργάνων μέτρησης μήκους

- Η συσκευή **Radar**, που την εμφάνισε ο Hartl κατά το 2ο παγκόσμιο πόλεμο, ήταν η πρώτη επιτυχημένη προσπάθεια εφαρμογής των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον προσδιορισμό μίας απόστασης.

Η λέξη RADAR σχηματίζεται από τα αρχικά των λέξεων Radio Detection and Ranging (ραδιοανίχνευση και μέτρηση απόστασης).

Προκειμένου να μετρηθεί μία απόσταση, προσδιορίζεται με τη συσκευή αυτή ο χρόνος που χρειάζεται ένας μεμονωμένος παλμός για να την διατρέξει και, στη συνέχεια, καθώς είναι γνωστή η ταχύτητα διάδοσης του παλμού, υπολογίζεται η απόσταση.

Η ακρίβεια των μετρήσεων, που επιτυγχάνεται με το Radar (Loran, Shoran, Decca, κλπ.), ενώ καλύπτει τις συνηθισμένες στρατιωτικές ανάγκες και τις ανάγκες της Ναυτιλίας και της Αεροπλοΐας, δεν είναι ικανοποιητική για τις απαιτήσεις των γεωδαιτικών εφαρμογών.

Με το σύστημα Hiran, το οποίο είναι μία εξέλιξη του συστήματος Shoran μετρήθηκαν μήκη της τάξης των 400km. Χρησιμοποιήθηκε στην Ελλάδα για πρώτη φορά το 1953, κατά τη γεωδαιτική σύνδεση μεταξύ Ελλάδας – Λιβύης.

- Το πρώτο **Τελλουρόμετρο** σχεδιάστηκε το 1957, από τον Νοτιο- Αφρικανό, Dr. T.L. Wadley. Το όργανο χρησιμοποιούσε μικροκύματα για μέτρηση αποστάσεων μέρα και νύχτα. Το τελλουρόμετρο περιελάμβανε δύο ανεξάρτητες συσκευές, που η κάθε μια τους λειτουργούσε ταυτόχρονα και σαν πομπός και σαν δέκτης. Κατά την λειτουργία του εξέπεμπε από τη μία

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

συσκευή συνεχή μικροκύματα παραγόμενα από ταλαντούμενο κρύσταλλο χαλαζία, μήκους κύματος $\lambda=3-10\text{cm}$ και διαμορφωμένης συχνότητας 10MHz., τα οποία, όταν έφθαναν στην δεύτερη συσκευή επανεκπέμπονταν στην πρώτη. Με την μέτρηση της διαφοράς φάσης της ακτινοβολίας που επέστρεφε, σε σχέση με την αρχική, υπολογιζόταν η απόσταση. Η αβεβαιότητα της μέτρησης ήταν $\pm 3\text{cm} \pm 3 \cdot 10^{-5} \cdot D$ ενώ το βεληνεκές του έφθανε τα 150km.



Εικόνα 20: Το τελλουρόμετρο CA1000 κατά τη διάρκεια μέτρησης

- Αργότερα, το 1965 εμφανίζεται το **γεωδόμετρο AGA 6**. Κατά τη λειτουργία του εξέπεμπε συνεχώς ορατό φως, από κοινή ή ειδική λυχνία, το οποίο διαμορφωνότανε μέσω κυττάρου – Kerr, που ελεγχόταν από ταλαντωτή συχνότητας πάνω από 10MHz. Η ακρίβεια της μέτρησης ήταν ίση με $\pm 10\text{mm} \pm 2 \text{ ppm}$. Η εμβέλειά του εξαρτάτο από το είδος της λυχνίας του. Έτσι, με την κοινή λυχνία το βεληνεκές του κυμαινόταν από 5km την ημέρα μέχρι 15km τη νύχτα, ενώ με τη λυχνία υδραργύρου από 10km μέχρι 25km, αντίστοιχα. Ο χρόνος μιας πλήρους μέτρησης ήταν 5-10min.

Το **γεωδόμετρο AGA 8**, χρησιμοποιήθηκε από το Εργαστήριο Γεωδαισίας του Ε.Μ.Π τον Οκτώβριο του 1973 για τη γεωδαιτική σύνδεση Ελλάδας – Ιταλίας και τη μέτρηση της πλευράς Οθωνοί – Παντοκράτωρ (προέκυψε μήκος 44024.526 m με αβεβαιότητα $\pm 0.016\text{m}$). Η μέτρηση της πλευράς Οθωνοί

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

Specchia – Cristi, έγινε χρησιμοποιώντας για πρώτη φορά στην Ελλάδα το σύστημα παλμών laser, του Κέντρου Δορυφόρων Διονύσου. Η απόσταση μεταξύ των δύο σημείων μετρήθηκε 81967.80 m με αβεβαιότητα $\pm 0.55\text{m}$ ^[3]. (παράγραφος 3.4)

Το ίδιο όργανο χρησιμοποιήθηκε και σε μετρήσεις μηκών για τη μελέτη μικρομετακινήσεων (φράγμα Μόρνου, Διαύλος Ωρεών), και από την ΓΥΣ στο τριγωνομετρικό δίκτυο της Ελλάδας.



Εικόνα 21: Το γεωδόμετρο AGA 8

Τα όργανα, που παρουσιάστηκαν παραπάνω, θεωρούνται, ηλεκτρομαγνητικά όργανα μέτρησης μήκους μεγάλου βεληνεκούς. Όπως όμως προαναφέρθηκε, τα όργανα αυτά εκτοπίστηκαν από το συνεχώς αναπτυσσόμενο δορυφορικό σύστημα εντοπισμού, αφού με αυτό, μεγάλα μήκη μετρούνται πιο εύκολα και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Μετά από αυτό, η τεχνολογία ηλεκτρομαγνητικών οργάνων μέτρησης μεγάλων αποστάσεων σταμάτησε να αναπτύσσεται, ενώ παρουσιάσθηκε μεγάλη εξέλιξη στην ανάπτυξη και κατασκευή οργάνων μέτρησης μηκών με μικρό βεληνεκές και μεγαλύτερη ακρίβεια.

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, εμφανίζονται τα πρώτα όργανα μέτρησης μήκους με εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας, τα γνωστά EDM, τα οποία ήταν όργανα επικαθίμενα και συνεργαζόμενα με θεοδόλιχα, μικρού σχετικά βάρους (9kg – 12kg), εύκολα στην χρήση τους, με βεληνεκές, που εξαρτώμενο και από τους ανακλαστήρες, έφτανε τα 3 km, με μικρό σχετικά χρόνο διεξαγωγής

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

της μέτρησης, και με αβεβαιότητα στην μέτρηση του μήκους της τάξης του $\pm 1\text{cm}$.

Τα πλεονεκτήματά τους αυτά, σε συνδυασμό με την ποικιλία τους στο εμπόριο και τις προσιτές τιμές τους, κατέστησαν αυτά τα όργανα σαν τα κυρίως χρησιμοποιούμενα σε πλήθος γεωδαιτικών και τοπογραφικών εργασιών, όπως τριγωνισμούς, πολυγωνομετρία, ταχυμετρία, κτηματογραφικές εφαρμογές, χαράξεις τεχνικών έργων, κλπ.

Παρακάτω περιγράφονται ενδεικτικά, τα γνωστότερα όργανα αυτής της κατηγορίας.

- Το **Distomat DI 10 της Wild**, που κυκλοφόρησε στην αγορά το 1968, επικαθόταν σε οπτικομηχανικό θεοδόλιχο (T16, T2), ώστε να μετρούνται ταυτόχρονα και οι γωνίες. Η μέγιστη διαμορφωμένη συχνότητα ήταν 15MHz, είχε βάρος 15kg και εμφάνιζε το μετρούμενο κεκλιμένο μήκος σε συνδεδεμένη με αυτό, συσκευή.



Εικόνα 22: Το Distomat DI 10 (Wild)

- Το **Distomat DI3S της Wild**. Αυτό αποτελείται από δύο μέρη, το οπτικό σύστημα και την μονάδα χειρισμού.

Το οπτικό σύστημα συνδυαζόταν με οπτικομηχανικό θεοδόλιχο, ενώ η μονάδα χειρισμού, περιείχε έναν μικρό ηλεκτρονικό υπολογιστή, με τον οποίο διόρθωνε τα μετρούμενα μεγέθη και υπολόγιζε και εμφάνιζε σε μικρή οθόνη

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

το μετρούμενο μήκος. Η ακτινοβολία που χρησιμοποιούσε ήταν υπέρυθρη με μήκος κύματος $0.885\mu\text{m}$, που την εξέπεμπε μια δίοδος Ga – As. Το βεληνεκές του κυμαινόταν από 1000m (με ένα κατάφωτο) μέχρι 2000m (με 9 κατάφωτα), ενώ η ακρίβεια μέτρησης ήταν $\pm 5\text{mm} \pm 5\text{ppm}$.



Εικόνα 23: Το Distomat DI3S (Wild)

- Το **Mecometer ME 3000** της **Kern**. Η πηγή της φέρουσας ακτινοβολίας του ήταν μια λυχνία εκλάμψεων xenon με μήκος κύματος $0.48\mu\text{m}$. Η εμβέλειά του ήταν από μερικά m μέχρι 1500m με ένα κατάφωτο και μέχρι 3000m με τρία κατάφωτα. Η διάρκεια της μέτρησης του μήκους ήταν περίπου 2 – 3 min. Το όργανο έφερε σύστημα αυτόματης διόρθωσης της επίδρασης των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Θεωρούνταν ένα από τα ακριβέστερα όργανα, καθώς μπορούσε να φτάσει σε ακρίβεια $\pm 0.2\text{mm} \pm 1\text{ppm}$.



Εικόνα 24: Το Mecometer ME 3000 (Kern)

- Το **γεωδόμετρο AGA 12** της εταιρείας AGA. Η εμβέλεια του ήταν από 0.20m έως 700m με ένα απλό κατάφωτο και 1700m με ένα τριπλό κατάφωτο. Χαρακτηριστικό του στοιχείο ήταν η ευκολία χρήσης αλλά και το γεγονός ότι μπορούσε να προσαρμοστεί σε πλήθος οπτικομηχανικών θεοδόλιχων, όπως το Wild T2, τα Kern DKM2 και DKM2A, τα Zeiss Th2 και Th3 και τα Zeiss Jena 010A και 020A, με το κατάλληλο σύστημα σύνδεσης του θεοδόλιχου.

- Το **MA 100** της εταιρείας Tellurometer. Σε αυτό, η διαμορφωμένη συχνότητα της υπέρυθρης ακτινοβολίας ήταν υψηλή (75MHz), η διάρκεια της μέτρησης ήταν σχετικά μικρή (20sec) και η ακρίβεια του της τάξης $\pm 2\text{mm}$. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων τα κατέγραφε σε ειδική διάτρητη ταινία.



Εικόνα 25: Το MA 100 της Tellurometer

- Το **DIOR 3002S** της εταιρείας **Wild**. Κυκλοφόρησε στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και είχε τη χαρακτηριστική δυνατότητα μέτρησης μήκους με ή χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα. Το όργανο αυτό, επικαθόταν σε οπτικομηχανικό ή ψηφιακό θεοδόλιχο. Κατά την μέτρηση του μήκους, εξέπεμπε ορατή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (laser), η οποία όταν προσέπιπτε σε οποιαδήποτε επιφάνεια, ανακλάτο και επέστρεφε στο όργανο. Είχε την δυνατότητα μετρήσεων μήκους μέχρι 100m, χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα και 2Km με χρήση ανακλαστήρα. Η ακρίβειά του έφτανε τα $\pm 3\text{mm} \pm 3\text{ppm}$. Η επαναστατική τεχνολογία αυτών των EDM εξυπηρέτησε κυρίως σε αποτυπώσεις μεγάλης κλίμακας, σε γεωμετρικές τεκμηριώσεις αρχαιολογικών χώρων κ.λ.π., αλλά και σε ειδικές γεωδαιτικές εργασίες ακριβείας βιομηχανικής γεωδαισίας (πλοία, υποβρύχια) κλπ.



Εικόνα 26: Το αποστασιόμετρο Diors3002S προσαρμοζόμενο στο ψηφιακό θεοδόλιχο T1610

Σήμερα, όσον αφορά στη μέτρηση του μήκους, το ενδιαφέρον εξακολουθεί να εστιάζεται όχι τόσο στη κατασκευή οργάνων μεγάλου βεληνεκούς, όσο στη βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων. Όργανα που μετρούν με μεγάλες ακρίβειες είναι οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί, των οποίων το βεληνεκές, πολλές φορές, δεν ξεπερνά τα 2-3km. Η μέτρηση μεγάλων δικτύων γίνεται με τη βοήθεια συστημάτων δορυφορικού εντοπισμού (GPS), που αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο.

3.4. Μετρήσεις laser προς γεωδαιτικούς δορυφόρους

Στο σημείο αυτό θα έπρεπε κανείς να κάνει μια σύντομη αναφορά σε συστήματα μέτρησης laser για πολύ μεγάλες αποστάσεις (της τάξης των Mm) από σημεία της φ.γ.ε. προς γεωδαιτικούς δορυφόρους.

Η τεχνική των συστημάτων (τηλέμετρων) laser (Satellite Laser System, SLR) συνίσταται στην εκπομπή ενός παλμού λέιζερ, εξαιρετικά μικρής διάρκειας (μερικών nsec), ο οποίος, αφού ανακλασθεί από ειδικά κατάφωτα (ανακλαστήρες) σε κατάλληλα εξοπλισμένους δορυφόρους επιστρέφει στο σταθμό. Με ένα χρονόμετρο μεγάλης ακρίβειας, μετράται ο χρόνος t της διπλής διαδρομής και γνωρίζοντας τη ταχύτητα του φωτός c υπολογίζεται η απόσταση σταθμού – δορυφόρου ως $\rho = ct/2$. Από την ανάλυση των μετρήσεων SLR μπορούν να καθοριστούν όχι μόνο η δορυφορική τροχιά αλλά και πολλές γεωδαιτικές παράμετροι όπως οι συντεταγμένες των σταθμών.

Τα πρώτα συστήματα SLR λειτούργησαν στις αρχές της δεκαετίας του '60. Τα παλαιότερα συστήματα χρησιμοποιούσαν συνήθως ένα λέιζερ ρουβιδίου (με αντίστοιχο μήκος κύματος περίπου 700nm), με παλμούς διάρκειας 10-30 nsec, με εκπεμπόμενη ενέργεια 1-10 Joules και με επαναληπτικότητα 2-60 παλμούς ανά λεπτό.

Τα περισσότερα σύγχρονα γεωδαιτικά συστήματα SLR χρησιμοποιούσαν τα πράσινα laser, τύπου Nd:YAG, με κρύσταλλο νεοδυμίου βαπτισμένου σε μίγμα Yttrium Aluminum Garnet (YAG). Τα laser Nd:YAG εκπέμπουν στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος και με μια διαδικασία διπλασιασμού της συχνότητας εκπομπής τους λειτουργούν στο πράσινο χρώμα, με μήκος κύματος περίπου 532nm. Το σημαντικότερο πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητά τους να εκπέμπουν σε πολύ μικρούς παλμούς, διάρκειας 50-200 picosec και με επαναληπτικότητα μετρήσεων μέχρι 20 Hz.

Τα συστήματα SLR για δέκτη χρησιμοποιούν συνήθως ένα κατοπτρικό τηλεσκόπιο, με άνοιγμα τουλάχιστον 28cm, στην άκρη του οποίου υπάρχει ένας εξαιρετικά ευαίσθητος φωτοπολλαπλασιαστής (photomultiplier), που το ηλεκτρικό του σήμα σταματάει το χρονομετρητή του συστήματος. Ο αριθμός των φωτονίων που επιστρέφουν είναι αντίστροφα ανάλογος της τέταρτης δύναμης της απόστασης του δορυφόρου από το σταθμό. Συνεπώς το φως, που επιστρέφει από το δορυφόρο, είναι πάρα πολύ αμυδρό. Τα χρησιμοποιούμενα συστήματα laser συνήθως δέχονται από 1 μέχρι 100 φωτόνια. Με άλλα λόγια η τεχνική SLR μετρά τον απόλυτο χρόνο της πτήσης των φωτονίων έτσι ώστε η γεωμετρία του δορυφόρου και των σταθμών λέιζερ μπορεί να καθοριστεί ακριβώς εφόσον τα σφάλματα των συστημάτων λέιζερ διατηρούνται και ελέγχονται σε ένα αμελητέο επίπεδο. Αυτό είναι δυνατό να γίνει σήμερα με ακρίβεια ± 50 picosec ή και καλύτερα, που είναι ισοδύναμο με ακρίβεια ± 1 cm ή λιγότερο σε μια παρατήρηση laser. Τυπικά οι αντίστοιχες εφικτές ακρίβειες των μετρούμενων αποστάσεων (συνήθως διηπειρωτικού μήκους), μεταξύ σταθμών SLR, είναι της τάξης $\pm(1-3)$ cm.

Σήμερα λειτουργούν, σε παγκόσμια κλίμακα, περίπου 4 μόνιμα συστήματα SLR. Επιπλέον η NASA έχει αναπτύξει 4 κινητά συστήματα laser τύπου MOBLAS (Mobile Laser Systems) και 4 τύπου TLRS (Transportable Laser

Ranging System). Επίσης δύο ευρωπαϊκά συστήματα, τα MTLRS-1 και MTLRS-2, χρησιμοποιούνται κυρίως για τη συστηματική μελέτη των σεισμογενών περιοχών της Μεσογείου. Από το 1999, στον γερμανικό δορυφορικό σταθμό Wettzell λειτουργεί πειραματικά ο τελευταίος τύπος κινητού σταθμού SLR που αποτελεί τμήμα των εν εξελίξει κινητών ολοκληρωμένων Γεωδαιτικών Παρατηρητηρίων (Transportable Integrated Geodetic Observatories, TIGO)

Σήμερα τα συστήματα SLR που χρησιμοποιούνται είναι κατά κανόνα πολύπλοκα, πολυδάπανα και γενικά πολυέξοδα για τη λειτουργία τους. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται μόνο σε ένα σχετικά μικρό αριθμό εξειδικευμένων σταθμών και για ειδικά επιστημονικά προγράμματα. Αξίζει επίσης να αναφερθεί, ότι ειδικά τηλέμετρα laser, χρησιμοποιούνται και για τις μετρήσεις αποστάσεων της Σελήνης, με τη βοήθεια ανακλαστήρων, που έχουν τοποθετηθεί στην επιφάνειά της από τους αστροναύτες των διαστημικών πτήσεων του προγράμματος Apollo στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν ένα μεγάλο τηλεσκόπιο για την εκπομπή των παλμών laser (και το ίδιο τηλεσκόπιο για την επιστροφή τους), ώστε η διασπορά της δέσμης να περιορίζεται σε μερικά arcsec για μεγαλύτερη συγκέντρωση της ενέργειας laser. Στα συστήματα αυτά οι απαιτήσεις, για την «καλή» σκόπευση των κατάφωτων στην επιφάνεια της Σελήνης, είναι ιδιαίτερα αυστηρές.

Οι εξελίξεις της τεχνολογίας laser τα τελευταία χρόνια, έχουν δημιουργήσει τις προϋποθέσεις για τη σκοπιμότητα κατασκευής καθαρά διαστημικών ή «αντίστροφων» συστημάτων laser, όπου ολόκληρο το σύστημα λειτουργίας θα είναι τοποθετημένο σε δορυφόρο, ενώ τα κατάφωτα θα τοποθετούνται στην επιφάνεια της Γης.

Το κύριο πλεονέκτημα τέτοιων συστημάτων είναι ότι, για το ίδιο κόστος λειτουργίας, πολλαπλασιάζεται απεριόριστα ο αριθμός των κατάφωτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις, αφού το κόστος των κατάφωτων αποτελεί ένα πολύ μικρό ποσοστό του συνολικού κόστους λειτουργίας ενός laser.

Ένα τέτοιο σύστημα τηλεμετρίας Laser λειτούργησε για αρκετά χρόνια στο Κέντρο Παρακολούθησης Τεχνητών Δορυφόρων (Κ.Π.Τ.Δ.) του ΕΜΠ στο Διόνυσο. Ήταν ένα laser παλμών ρουβιδίου σε συνδυασμό με ένα τηλεσκόπιο τύπου Cassegrain και ένα ηλεκτρονικό σύστημα χρονομέτρου και απαριθμητή χρόνου. Το σύστημα αυτό, χρησιμοποιήθηκε και ως EDM μεγάλου βεληνεκούς για μετρήσεις αποστάσεων μεταξύ σημείων της φ.γ.ε., στη γεωδαιτική καμπάνια για την ένωση των γεωδαιτικών δικτύων Ελλάδας και Ιταλίας (1977). Αυτό έγινε εφικτό με τη δημιουργία μιας όδευσης υψηλής ακρίβειας μεταξύ του ιταλικού τριγωνομετρικού σημείου 'Specchia – Cristi' και του ελληνικού 'Παντοκράτωρ' (Κέρκυρα) με ένα ενδιάμεσο νέο σημείο που ιδρύθηκε στο νησί των Οθωνών. Οι δύο πλευρές της όδευσης είχαν μήκη 82km και 44km αντίστοιχα και γωνία θλάσης περίπου 180°.

3.5. Ψηφιακοί ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί (total station)

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, τα παλαιότερα μηχανικά θεοδόλιχα αντικαταστάθηκαν από τα ψηφιακά και σε αυτά ενσωματώθηκαν τα όργανα EDM, με αποτέλεσμα την δημιουργία των ολοκληρωμένων ψηφιακών γεωδαιτικών σταθμών (total stations). Τα όργανα αυτά είναι σήμερα τα κατ'εξοχήν χρησιμοποιούμενα τοπογραφικά όργανα, με υψηλές απαιτήσεις αυτοματοποιημένης χρήσης και ακρίβειας, καθώς συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών θεοδόλιχων με εκείνα των EDM και εκμεταλλεύονται την αλματώδη πρόοδο της ηλεκτρονικής και της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Το γεωδίμετρο 700 της εταιρείας AGA, με εξωτερική καταγραφική μονάδα, που κατασκευάστηκε γύρω στο 1970, ήταν το πρώτο όργανο αυτής της λογικής. Ακολουθούν το TC1 της εταιρείας Wild και το EOT της Zeiss, ενώ στη συνέχεια, ιδίως από το 1990 και μετά, αυτά εξελίσσονται και παράγονται με ραγδαίους ρυθμούς.

Τόσο οι μετρήσεις των οριζοντίων και κατακόρυφων γωνιών, όσο και οι μετρήσεις των μηκών αναφέρονται στο κέντρο του οργάνου, καθώς το αποστασιόμετρο είναι ομοαξονικά τοποθετημένο στο τηλεσκόπιό του.



Εικόνα 27: Ο Ψηφιακός ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός Stonex STS

Η μέτρηση της απόστασης, από το κέντρο του σκοπευτικού άξονα ενός ψηφιακού ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού έως το κέντρο του ανακλαστήρα, σε γενικές γραμμές, ακολουθεί την εξής πορεία:

Με την ενεργοποίηση από τον παρατηρητή ενός πλήκτρου του πληκτρολογίου του γεωδαιτικού σταθμού, εκπέμπεται μια διαμορφωμένη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, γνωστής συχνότητας και μήκους κύματος, η οποία, αφού διανύσει την απόσταση μέχρι τον ανακλαστήρα, που βρίσκεται στο άλλο άκρο της προς μέτρηση απόστασης, ανακλάται και επιστρέφει στον γεωδαιτικό σταθμό. Καθώς η ταχύτητα διάδοσής του σήματος μέσα στην ατμόσφαιρα είναι γνωστή, προκειμένου να υπολογιστεί η απόσταση, αρκεί, σε γενικές γραμμές, να μετρηθεί ο χρόνος που απαιτήθηκε για να διανύσει το σήμα αυτή την απόσταση. Επειδή η ταχύτητά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι διαφορετική μέσα στο σώμα του ανακλαστήρα από αυτή στην ατμόσφαιρα, πρέπει κατά την μέτρηση να λαμβάνεται υπόψη τόσο η καθυστέρηση διάδοσης της στην ατμόσφαιρα, όσο και στον ανακλαστήρα. Ο χρόνος αυτός μεταφραζόμενος σε μήκος είναι γνωστός σαν σταθερά του ανακλαστήρα, εξαρτάται από το υλικό και τον τρόπο κατασκευής του και δίνεται από την κατασκευάστρια εταιρία.

Οι εξελίξεις των ψηφιακών θεοδόλιχων εφαρμόζονται και στους ψηφιακούς ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς. Για παράδειγμα, η ανάγνωση των γωνιών δεν λαμβάνεται πια από τον παρατηρητή οπτικά, αλλά εμφανίζεται σε ειδική ψηφιακή οθόνη, καθώς ειδικοί αισθητήρες διαβάζουν τούς

ραβδοκώδικες (barcodes), που είναι ενσωματωμένοι, με μεγάλη ακρίβεια, στον οριζόντιο και στον κατακόρυφο δίσκο τους. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται και το σφάλμα βαθμονόμησης των μηχανικών δίσκων, που είχαν τα παλαιότερα γωνιομετρικά όργανα. Έτσι, δεν χρειάζεται πλέον η μέτρηση κάθε μίας από τις πολλές περιόδους μέτρησης μιας γωνίας να γίνεται από διαφορετική αφετηρία, αλλά μπορεί να γίνεται πάντα από την ίδια, καθώς αποβλέπει μόνον στην ελαχιστοποίηση του τυχαίου σφάλματος της σκόπευσης του παρατηρητή, το οποίο είναι και το μοναδικό σφάλμα που εξακολουθεί να υπεισέρχεται στις μετρήσεις γωνιών.

Με την παραπάνω εξέλιξη, σε συνδυασμό και με την δυνατότητα αυτόματης καταγραφής και αποθήκευσης των μετρήσεων του γεωδαιτικού σταθμού σε ειδική καταγραφική μονάδα, από την οποία μεταφέρονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με πολύ εύκολο τρόπο, εκτός από την ευκολία και την ταχύτητα των μετρήσεων, που παρέχεται στον παρατηρητή, αποφεύγονται εντελώς τα σφάλματα εκτίμησης, ανάγνωσης, γραφής και πληκτρολόγησης.

Σημαντική εξέλιξη είναι και η ενσωμάτωση του ισοσταθμιστή, στον γεωδαιτικό σταθμό, με σκοπό την παρακολούθηση, τον έλεγχο και την διόρθωση, σε πραγματικό χρόνο, των βασικών συνθηκών λειτουργίας τους. (κέντρωση, οριζοντίωση, κλπ.).

Για τη λειτουργία των σταθμών απαιτείται μπαταρία τροφοδοσίας, γεγονός που δημιουργεί κάποιες δεσμεύσεις στην λειτουργία τους, οι οποίες βέβαια αντιμετωπίζονται με την κατασκευή εύχρηστων και εξελιγμένων μπαταριών μεγάλης χωρητικότητας.

Οι ψηφιακοί ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί ακριβείας είναι πολύ εύχρηστα όργανα, παρέχουν ανάγνωση των γωνιακών μεγεθών, από 0.1° έως 3° , η εμβέλειά τους στην μέτρηση μηκών, ανάλογα και με τους χρησιμοποιούμενους ανακλαστήρες, είναι από μερικά μέτρα έως μερικά χιλιόμετρα, με ακρίβεια, που μπορεί να φθάσει το $\pm 1 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των γεωδαιτικών σταθμών είναι:

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

1. Σε ένα εύχρηστο και ελαφρύ όργανο συνδυάζονται οι δυνατότητες του ψηφιακού θεοδόλιχου και του EDM.
2. Με τη σκόπευση και το πάτημα ενός πλήκτρου εμφανίζονται σε οθόνη άμεσα το μήκος, η ένδειξη του οριζόντιου κύκλου και η κατακόρυφη γωνία και έμμεσα το υψόμετρο, και οι συντεταγμένες του σημείου που σκοπεύεται, ενώ αν το επιθυμεί ο χειριστής, υπάρχει η δυνατότητα αυτόματης καταγραφής αυτών των στοιχείων.
3. Διαθέτουν υπολογιστή και κατάλληλο λογισμικό, που διευκολύνουν τις εργασίες υπαίθρου επιλύοντας, την ώρα των μετρήσεων, διάφορα βασικά τοπογραφικά προβλήματα.
4. Μπορούν άμεσα να συνδεθούν και να επικοινωνήσουν με ηλεκτρονικό υπολογιστή, με συνέπεια την άμεση μεταφορά και επεξεργασία των μετρήσεων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, ακόμα και στο ύπαιθρο, κάτι που μερικές φορές είναι απαραίτητο για ορισμένες, εξειδικευμένες, τοπογραφικές εργασίες, ενώ παράλληλα αποφεύγονται διάφορα χονδροειδή σφάλματα (ανάγνωσης, αντιγραφής κλπ.).

Τα σημαντικότερα κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού σε γεωδαιτικές εργασίες και ειδικότερα σε μετρήσεις ακριβείας, είναι :

- η παρεχομένη ακρίβεια στη μέτρηση γωνιών και μηκών ($\pm a \text{ mm} \pm b \text{ ppm}$).
- το βεληνεκές του για τη μέτρηση μήκους
- Το πλήθος και η ποιότητα (γυαλί, πλαστικό, φωσφορίζουσα ταινία) των κατάφωτων για τη μέτρηση του μήκους
- η διάρκεια της μοναδιαίας μέτρησης ενός μήκους
- το βάρος και ο όγκος του
- η δυνατότητα προσαρμογής άλλων παρελκόμενων

- οι διάφορες υπολογιστικές του ικανότητες (π.χ. η άμεση εξαγωγή μέσου όρου μετρήσεων και άλλων στατιστικών μεγεθών)
- ο τρόπος αποθήκευσης και διαχείρισης των μετρήσεων (σε καταγραφική μονάδα, απευθείας σύνδεση με Η/Υ, κλπ)
- το λογισμικό (software) που διαθέτει.

3.5.1. Ψηφιακοί ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί χωρίς την χρήση ανακλαστήρα (reflectorless total stations)

Όπως ήδη περιγράφηκε (παράγραφος 3.3.1), σήμερα, η συνηθισμένη περίπτωση μέτρησης ενός μήκους αρκετών χιλιομέτρων με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και την χρήση ανακλαστήρα, είναι μία εύκολη διαδικασία που διαρκεί 2 - 3 δευτερόλεπτα από την ενεργοποίηση του αντίστοιχου πλήκτρου στην οθόνη του ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού.

Όμως, η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, είχε σαν αποτέλεσμα μία ακόμα πολύ σημαντική εξέλιξη των σύγχρονων ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών, που είναι η δυνατότητα μέτρησης του μήκους χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα (RL).

Η αρχή έγινε με το EDM DIOR 3002S, που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.3.4.

Η χαρακτηριστική δυνατότητα του, να μετρά αποστάσεις και χωρίς την χρήση ανακλαστήρα, υλοποιήθηκε και στους γεωδαιτικούς σταθμούς. Η αρχή μέτρησης είναι η ίδια με αυτήν που γίνεται και με τη χρήση ανακλαστήρα. Στην περίπτωση αυτή, το μήκος προκύπτει συνήθως, από μία διαδικασία μέτρησης φάσεων ενός παλμού ορατού laser, που εκπέμπεται από το όργανο, δεν προσπίπτει σε κάποιον ανακλαστήρα αλλά ανακλάται ακόμα και σε χαμηλής αντανακλαστικότητας στόχους και επιστρέφει στο γεωδαιτικό σταθμό. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνονται μετρήσεις μηκών, που κυμαίνονται από 100m έως και 2000m.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτών των γεωδαιτικών σταθμών είναι τα εξής:

- είναι δυνατή η αποτύπωση και απρόσιτων σημείων
- δεν χρειάζεται στοχοφόρος για τη εκτέλεση αυτών των μετρήσεων
- μειώνει τον κόπο και το χρόνο παραμονής στο πεδίο για την εκτέλεση μιας εργασίας
- είναι εύκολη η αναγνώριση των σημείων που μετρώνται με την ορατή δέσμη laser και η σκόπευσή τους ακριβής
- εάν η μέτρηση με το ορατό laser γίνεται πάνω σε ανακλαστήρα η εμβέλειά τους αυξάνεται σημαντικά
- η αβεβαιότητα στη μέτρηση του μήκους μπορεί να φθάσει έως και $\pm 2\text{mm} \pm 1\text{ppm}$, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό.

Κάποια μειονεκτήματα αυτών των οργάνων είναι:

- η εμβέλειά τους, στις μετρήσεις χωρίς ανακλαστήρα, είναι περιορισμένη και δεν ξεπερνά συνήθως 400m.
- η αγορά τους κοστίζει περισσότερο από ότι των απλών γεωδαιτικών σταθμών.
- Η εμβέλειά τους και η ακρίβεια της μέτρησης εξαρτώνται από την επιφάνεια (το υλικό, το χρώμα, την αντανακλαστικότητα κλπ.) που προσπίπτει η ακτινοβολία, τη γωνία πρόσπτωσης και τις συνθήκες του περιβάλλοντος
- το μέγεθος της προβολής της δέσμης laser πάνω στην προς αποτύπωση επιφάνεια, αυξάνεται όσο αυξάνει το μήκος. Το σχήμα της, ενώ σε μικρά μήκη είναι κανονικό σχήμα, με την αύξηση του μήκους μπορεί να αποκτήσει ακανόνιστο και ασαφές σχήμα, το μέγεθος της επιφάνειας πρόσπτωσης της δέσμης να μην είναι επαρκές, ενώ υπάρχει και ο κίνδυνος να προσπέσει η ακτινοβολία σε οποιοδήποτε αντικείμενο βρεθεί νωρίτερα ή μακρύτερα στη διαδρομή της. Για τους λόγους αυτούς, σε σχετικά μεγάλα για τις δυνατότητες του

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

οργάνου μήκη, υπάρχει μερικές φορές ο κίνδυνος χονδροειδών σφαλμάτων.



Εικόνα 28: Ο reflectorless ψηφιακός ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός Leica TCR 1201

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1) εμφανίζεται ενδεικτικά, η εμβέλεια γεωδαιτικών σταθμών χωρίς τη χρήση πρίσματος (RL), αναλόγως της επιφάνειας ανάκλασης και με τις δύο μεθόδους μέτρησης.^[18]

Επιφάνεια	Μέθοδος T.O.F	Μέθοδος P.S.
Τσιμέντο	400m	50m
Ξύλο	400m	60m
Ανοιχτόχρωμος βράχος	300m	50m
Σκουρόχρωμος βράχος	200m	40m

Πίνακας 1: Ενδεικτικές τιμές εμβέλειας, χωρίς τη χρήση πρίσματος.

Από τον πίνακα προκύπτει ότι η μέθοδος T.O.F υπερτερεί ως προς το βεληνεκές, κατά πολύ (5 έως 8 φορές) της μεθόδου διαφοράς φάσης (P.S).

Σήμερα, οι ψηφιακοί γεωδαιτικοί σταθμοί που μετρούν μήκη χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα είναι συνεχώς εξελισσόμενοι, κυρίως ως προς το βεληνεκές και την ακρίβειά τους, με την βελτίωση των ηλεκτρονικών συστημάτων παραγωγής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και την αύξηση της ισχύος

του παλμού laser, εξασφαλίζοντας πάντα την ασφάλεια του χρήστη ως προς το χρησιμοποιούμενο laser. Επιπλέον, οι ανάγκες της αγοράς έχουν σαν αποτέλεσμα την κατασκευή ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών, που έχουν την δυνατότητα μέτρησης μηκών, τόσο με την χρήση ανακλαστήρα, όσο και χωρίς ανακλαστήρα, με ανάλογα αποτελέσματα σε εμβέλεια, ακρίβεια, ταχύτητα και ευκολία.

3.5.2. Γεωδαιτικός σταθμός με αυτόματη αναγνώριση στόχου - Ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός

Μία ακόμα σημαντική εξέλιξη των γεωδαιτικών σταθμών είναι η δυνατότητα της αυτόματης αναγνώρισης του στόχου ATR (Automatic Target Recognition), η οποία του επιτρέπει να εντοπίζει αυτόματα το στόχο (ανακλαστήρα). Προς τούτο, εκπέμπεται από τον σταθμό μια ακτίνα laser, η οποία ανακλώμενη συλλαμβάνεται από την ενσωματωμένη στον σταθμό κάμερα CCD (Charge Couple Devise), όπου, αφού υπολογισθούν οι οριζόντιες και κατακόρυφες αποκλίσεις της θέσης του ίχνους της ανακλώμενης ακτινοβολίας από το κέντρο της κάμερας, μετακινείται το τηλεσκόπιο οριζόντια και κατακόρυφα όσο και το μέγεθος των αποκλίσεων, με τη βοήθεια ενσωματωμένου στο όργανο σερβομηχανισμού. Με τον τρόπο αυτό, το κέντρο του σταυρονήματος του τηλεσκοπίου μετακινείται αυτόματα και σκοπεύει στο κέντρο του κατάφωτου.

Η ακρίβεια της αυτόματης σκόπευσης του κατάφωτου κυμαίνεται από 2mm έως και 5mm και εξαρτάται από:

- την εσωτερική ακρίβεια του ATR, η οποία επηρεάζεται κυρίως από την ποιότητα της κάμερας CCD του γεωδαιτικού σταθμού, την απόσταση που μετράται, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, κλπ.
- την εξωτερική ακρίβεια του ATR, που εξαρτάται από τον τύπο του κατάφωτου και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά τη μέτρηση.

Στην περίπτωση που το κατάφωτο βρίσκεται, τουλάχιστον κατά το 1/3 του, στο κεντρικό τμήμα του οπτικού πεδίου του τηλεσκοπίου του γεωδαιτικού σταθμού, η σκόπευση γίνεται άμεσα και αυτόματα, ειδάλλως, με διαδικασία που δεν διαρκεί πάνω από 2 – 4 sec, σαρώνεται αυτόματα σπειροειδώς το

πεδίο όρασης του τηλεσκοπίου, έως ότου βρεθεί το κατάφωτο μέσα στην περιοχή αυτή, οπότε και σκοπεύεται. Η συνήθης γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του γεωδαιτικού σταθμού είναι της τάξης του 0.01 rad/sec. Προκειμένου να λειτουργήσει η διαδικασία ATR, η απόσταση μεταξύ σταθμού και κατάφωτου, που εξαρτάται από τον γεωδαιτικό σταθμό, τον ανακλαστήρα και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, μπορεί πλέον να φθάσει και τα 3000m.

Μία ακόμα διευκόλυνση που παρέχουν αυτά τα όργανα, είναι η δυνατότητά τους, αφού σκοπεύσουν έναν στόχο στην 1^η θέση τηλεσκοπίου, να αναστρέφουν – περιστρέφουν το όργανο σε 2^η θέση, με τη βοήθεια του σερβομηχανισμού τους και στη συνέχεια να αναγνωρίζουν και σκοπεύουν τον ίδιο στόχο, απλουστεύοντας και συντομεύοντας την όλη διαδικασία.

Επιπλέον, αυτοί οι γεωδαιτικοί σταθμοί εξελισσόμενοι, απέκτησαν τη δυνατότητα παρακολούθησης κινούμενου στόχου, μπορούν δηλαδή, με ένα πλήκτρο, αφού κάνουν την πρώτη μέτρηση του στόχου, στη συνέχεια να τον παρακολουθούν και να μετρούν συνεχώς, εφ' όσον η ταχύτητα με την οποία μετακινείται ο στόχος επιτρέπει την εκτέλεση των μετρήσεων με την προκαθορισμένη ακρίβεια. Σε περίπτωση που η ταχύτητα του στόχου δεν επιτρέπει μετρήσεις με αυτή την ακρίβεια, ο σταθμός εξακολουθεί να παρακολουθεί τον στόχο και μετρά όταν η ταχύτητα του στόχου του το επιτρέψει.

Μία ακόμα εξέλιξη αυτών των γεωδαιτικών σταθμών είναι η ρομποτική λειτουργία τους. Κατ' αυτήν το όργανο παρακολουθεί τον στόχο, μετρά και αποθηκεύει αυτόματα τη μέτρηση στη μνήμη του, λαμβάνοντας εντολή από τον στοχοφόρο, ο οποίος βρίσκεται σε απόσταση μέχρι 800m από τον σταθμό και διαθέτει στον ειδικό στυλεό του κατάφωτου πληκτρολόγιο (χειριστήριο) αντίστοιχο με αυτό του γεωδαιτικού σταθμού (ή ακόμα και το ίδιο το οποίο μπορεί να αποσπάται από τον σταθμό). Ο γεωδαιτικός σταθμός διαθέτει radio – modem για την επικοινωνία του με το πληκτρολόγιο.

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σημαντική οικονομία, επειδή οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν μόνο από ένα άτομο.

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

Οι ρομποτικοί γεωδαιτικοί σταθμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις κοινές τοπογραφικές εργασίες (αποτυπώσεις, χαράξεις, οδοποιία, κλπ.), αλλά και σε εξειδικευμένες γεωδαιτικές εργασίες, όπως ο έλεγχος και η αυτόματη παρακολούθηση μικρομετακινήσεων τεχνικών έργων, μεγάλων φραγμάτων, κλπ.



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 29: Ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός Trimble S3 (α), με το χειριστήριο TSC2 (β), και ο Leica TM30 (γ)

3.5.3. Έξυπνοι γεωδαιτικοί, εικονογεωδαιτικοί, χωροεικονογεωδαιτικοί σταθμοί

Η τελειοποίηση των ηλεκτρονικών συστημάτων έχει σαν συνέπεια μία ιδιαίτερη σταθερότητα στη ποιότητα μέτρησης με γεωδαιτικούς σταθμούς, ιδίως όταν χρησιμοποιείται και κατάφωτο, που οφείλεται και στη διόρθωση ή ακόμα και στην εξάλειψη σφαλμάτων όπως του μηδενός, του κατάφωτου ή και του κυκλικού σφάλματος. Τα σύγχρονα υλικά κατασκευής τους, έχουν βελτιώσει την ποιότητά τους, ενώ έχουν περιορίσει σημαντικά, σε σχέση με τα όργανα παλαιότερης τεχνολογίας, διάφορα επιπρόσθετα σφάλματα στις μετρήσεις μηκών, όπως π.χ. το σφάλμα λόγω γήρανσης κρυστάλλων.

Η επικοινωνία του σταθμού με ηλεκτρονικό υπολογιστή ή άλλα περιφερειακά κλπ. γίνεται τόσο ενσύρματα (με θύρες RS232, USB), όσο και ασύρματα

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

(bluetooth), ενώ η αποθήκευση των μετρήσεων και λοιπών στοιχείων γίνονται σε βάσεις δεδομένων σε κάρτες μνήμης.

Σήμερα ακόμα πιο εξελιγμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί διευκολύνουν το έργο του τοπογράφου και παρέχουν ακόμα πιο μεγάλες δυνατότητες στην εκτέλεση των εργασιών του.

Τέτοιοι εξελιγμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί είναι:

- Οι **έξυπνοι γεωδαιτικοί σταθμοί (smart stations)**, που έχουν τη δυνατότητα να δέχονται επικαθίμενη στο σώμα τους μία κεραία δέκτη του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού και να συνδυάζουν επίγειες μετρήσεις με δορυφορικά δεδομένα, κατά τη βούληση του τοπογράφου.



Εικόνα 30: Έξυπνοι γεωδαιτικοί σταθμοί των εταιρειών Leica (TPS 1200+GS10) και Trimble (S3 Robotic Total Station+R6 II GPS)

Με το σταθμό αυτόν, με την ενεργοποίηση ενός πλήκτρου, ο δορυφορικός δέκτης με λειτουργία RTK (Real Time Kinematic) προσδιορίζει τη θέση του σταθμού με ακρίβεια της τάξης του εκατοστού, μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα της ώρας και σε απόσταση μέχρι και 50 km από τον σταθμό αναφοράς. Με το λογισμικό που διαθέτει ο γεωδαιτικός σταθμός, ελέγχει και τα δύο συστήματα, ενώ όλες οι μετρήσεις αποθηκεύονται στην ίδια βάση δεδομένων στη κάρτα μνήμης.

- Οι **εικονογεωδαιτικοί σταθμοί (imaging stations)** που έχουν ενσωματωμένη μία CCD κάμερα υψηλής ανάλυσης στο κέντρο του τηλεσκοπίου τους, καθώς και μία εξωτερική τοποθετημένη παράλληλα, με αποτέλεσμα να μεταφέρεται στην οθόνη του οργάνου η εικόνα που παρατηρείται από το τηλεσκόπιο και αφού μεγεθυνθεί κατάλληλα, να σκοπεύεται επί της οθόνης με αντίστοιχο σταυρόνημα το σημείο που θέλει ο παρατηρητής ώστε να γίνεται ασφαλέστερα η μέτρηση, ενώ είναι δυνατή και η ταυτόχρονη λήψη και αποθήκευση εικόνων των σημείων που μετρούνται.



Εικόνα 31: Ο εικονογεωδαιτικός σταθμός Topcon IS 205

- Οι **χωροεικονογεωδαιτικοί σταθμοί (spatial imaging stations)**, οι οποίοι εκτός της ψηφιακής κάμερας έχουν ενσωματωμένο στο τηλεσκόπιό τους και έναν σαρωτή, που μπορεί να σαρώνει επιφάνειες και να προβάλλει στην οθόνη του σταθμού ή σε ηλεκτρονικό υπολογιστή τη τρισδιάστατη απεικόνισή τους, ενώ αυτή συμπληρώνεται από κατάλληλα ανοιγμένες εικόνες της περιοχής, οι οποίες προβάλλονται ταυτόχρονα σαν υπόβαθρο στην οθόνη.

Το τηλεσκόπιο στρέφεται αυτόματα και σκοπεύει όποιο αντικείμενο επιλέγει ο παρατηρητής στην οθόνη.

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

Με τον σταθμό αυτόν είναι δυνατή η ταυτόχρονη συλλογή τόσο συντεταγμένων σημείων με μεγάλη ακρίβεια, όσο και χωρικής πληροφορίας για λεπτομερή απόδοση σε απαιτητικές εφαρμογές όπως σήραγγες, μνημεία, ναυπηγεία, βιομηχανικές / μηχανολογικές αποτυπώσεις, κλπ.

Ο σταθμός αυτός συλλέγει, με επίγεια μέθοδο, δεδομένα τοπογραφικής ακρίβειας, όπως ένας συμβατικός γεωδαιτικός σταθμός. Επιπλέον σαρώνει το αντικείμενο χρησιμοποιώντας την τεχνολογία laser, συλλέγοντας μεγάλο όγκο δεδομένων για την πιστή του απόδοση. Τέλος με την ενσωματωμένη video camera, που διαθέτει αποδίδεται η πραγματική υφή του αντικειμένου. Οι τρεις τεχνολογίες (γεωδαιτικός σταθμός, σαρωτής laser και ψηφιακή video camera) χρησιμοποιούνται παράλληλα, ελέγχονται από ένα και μόνο χειριστήριο, με ένα και μόνο λογισμικό πεδίου συνήθως σε περιβάλλον Windows.



Εικόνα 32: Ο χωροεικονογεωδαιτικός σταθμός Trimble VX

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

Ακολουθεί πίνακας που παρουσιάζει τα βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία ορισμένων γεωδαιτικών σταθμών, όπως αναφέρονται στις ηλεκτρονικές σελίδες των κατασκευαστών τους :

Εργοστάσιο κατασκευής	τύπος οργάνου	σημαντικά χαρακτηριστικά	έτος	με ανακλαστήρα		χωρίς ανακλαστήρα		ακρίβεια μέτρησης γωνιών
				ακρίβεια μέτρησης μηκών	Βεληνεκές	ακρίβεια μέτρησης μηκών	Βεληνεκές	
Leica	TCRP1200 + R1000	και ρομποτικό /δυνατότητα ενσωμάτωσης σε GPS	2007	±1mm ±1.5ppm	έως 12km	±2mm ±2ppm	έως 1km	1", 2", 3", 5"
Leica	TS30/ TM30	total station	2009	±0.6mm ±1ppm	έως 12km	±2mm ±2ppm	έως 1km	0.5", 1"
SOKKIA	NET05X	total station	2009	±0.8mm ±1ppm	έως 3.5km	±1mm ±1ppm	έως 100m	0.5"
Spectra Precision	Focus 30	ρομποτικό	2009	±2mm ±2ppm	έως 7km	±3mm ±2ppm	έως 800m	1", 3", 5"
Topcon	IS01/IS03	total station	2007	±2mm ±2ppm	έως 4km		έως 2km	1", 3"
Topcon	MS05A	total station	2010	±0.8mm ±1ppm	έως 3.5km	±1mm ±1ppm	έως 100m	0.5", 1"
Trimble	S6	total station	2005	±1mm ±2ppm	έως 5.5km	±2mm ±2ppm	έως 2.2km	2", 3", 5"
Trimble	S3	total station	2009	±1.5mm ±2ppm	έως 5km	±3mm ±2ppm	έως 400m	2", 5"

Πίνακας 2: Βασικά χαρακτηριστικά μερικών ψηφιακών γεωδαιτικών σταθμών

3.6. Όργανα αποτύπωσης επιφανειών με σάρωση (Laser Scanners)

Μία άλλη σύγχρονη εξέλιξη των γεωδαιτικών οργάνων είναι τα όργανα αποτύπωσης επιφανειών με σάρωση (Laser Scanners). Αυτά έχουν τη δυνατότητα να αποτυπώνουν μια επιφάνεια, σαρώνοντάς την και

δημιουργώντας το τρισδιάστατο μοντέλο της, ακολουθώντας σε γενικές γραμμές την παρακάτω διαδικασία:

Ορίζονται, κατ' αρχάς, τα όρια της επιφάνειας που πρόκειται να αποτυπωθεί και η πυκνότητα σάρωσης. Στη συνέχεια, ο συνδεδεμένος ηλεκτρονικός υπολογιστής, αφού λάβει με τη βοήθεια της κάμερας CCD του σαρωτή, την εικόνα της επιφάνειας και την επεξεργαστεί, ξεκινά την εκπομπή παλμού laser, που στην πράξη είναι ένα πλήθος μοναδιαίων παλμών, προς αυτή. Ο παλμός αυτός, αφού ανακλαστεί στην επιφάνεια, που αποτυπώνεται, επιστρέφει στον σαρωτή, όπου ολοκληρωμένοι οπτικοί κωδικοποιητές αφού μετρήσουν το χρόνο μετάβασης και επιστροφής και τις γωνίες ανάκλασης της δέσμης, μεταφέρουν τις πληροφορίες αυτές, σε πραγματικό χρόνο, στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, που δημιουργεί το τρισδιάστατο ανάγλυφο της επιφάνειας.

Από το πλήθος των μοναδιαίων παλμών laser, που εκπέμπονται, λαμβάνονται ένα πλήθος μετρήσεων προς σημεία της επιφάνειας, που αποτυπώνεται. Με τον τρόπο αυτό μετρούνται 1000 έως 100000 σημεία ανά δευτερόλεπτο, για το καθένα από τα οποία προσδιορίζονται οι συντεταγμένες του (X, Y, Z) και στις τρεις διαστάσεις, ως προς το σύστημα αναφοράς, που έχει αρχικά οριστεί, δημιουργώντας μια αντίστοιχης ακρίβειας τρισδιάστατη εικόνα της επιφάνειας.

Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του Laser Scanner, επειδή η αρχή λειτουργίας του, εμπεριέχει και την αρχή λειτουργίας του γεωδαιτικού σταθμού που δε χρησιμοποιεί κατάφωτο για τις μετρήσεις μηκών, επηρεάζονται από τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές ιδιότητες αυτού του σταθμού.

Έτσι, η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων εξαρτάται εκτός από:

- τη μέθοδο σάρωσης που κάθε σύστημα χρησιμοποιεί και
- την ταχύτητα σάρωσης,

και από:

- την απόσταση από το αντικείμενο και

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

- το υλικό της επιφάνειας που μετράται και στην οποία προσπίπτουν οι δέσμες.

Το βεληνεκές μέτρησης των σαρωτών κυμαίνεται από 1.5m έως 1500m και η ακρίβεια προσδιορισμού των συντεταγμένων από $\pm 6\text{mm}$ έως $\pm 45\text{mm}$.

Ομοίως και σαν μειονεκτήματα των οργάνων αυτών μπορούν να αναφερθούν εκτός:

- της μικρής ταχύτητας σάρωσης της επιφάνειας, όταν η επιφάνεια έχει πολλές λεπτομέρειες και το βήμα σάρωσης είναι μικρό,
- του μεγάλου σχετικά βάρους τους, που κυμαίνεται από 10kg έως 30kg, το οποίο αυξάνεται από το βάρος των απαραίτητων παρελκόμενων, (όπως ειδικού τρίποδα, ηλεκτρονικού υπολογιστή, μπαταρίας, κ.ά.), με συνέπεια τη δυσκολία στη μεταφορά και την εγκατάσταση στο σημείο μέτρησης,
- του περιορισμένου οπτικού πεδίου, που έχουν την δυνατότητα να καλύψουν, ειδικά κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, που έχει σαν συνέπεια, αν η προς αποτύπωση επιφάνεια εκτείνεται σε μεγάλο ύψος, την αναγκαστική τοποθέτησή τους σε μεγάλη απόσταση από αυτήν

και:

- το υψηλό κόστος αγοράς
- το μέγεθος της μοναδιαίας κουκίδας παλμού λέιζερ που εκπέμπουν, η οποία εξαρτάται από την απόσταση και σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις μειώνει την διακριτική ικανότητα του.

Οι προσπάθειες, τώρα των κατασκευαστών αυτών των οργάνων έχουν προσανατολιστεί στην εξάλειψη αυτών των μειονεκτημάτων, με την απαραίτητη βέβαια προϋπόθεση της ασφαλούς λειτουργίας τους για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, ιδίως σε ότι έχει σχέση με την ένταση κλπ. της ακτινοβολίας laser.

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

Έτσι, γίνεται προσπάθεια εντοπισμού και αποφυγής ανεπιθύμητων δεδομένων (αποτύπωση περιττών σημείων), συνεχής έλεγχος και διακρίβωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων αυτών των οργάνων αναλόγως της υψής και του υλικού της προς αποτύπωση επιφάνειας, της απόστασης κλπ. και προσπάθεια βελτίωσης αυτών των ιδιοτήτων τους.

Στο εμπόριο υπάρχουν αρκετοί τύποι σαρωτών, οι οποίοι διαφέρουν ως προς τα χαρακτηριστικά τους, τα βασικότερα των οποίων είναι η εμβέλεια, η ακρίβεια, η διακριτική ικανότητα, η πληρότητα του παραγόμενου τρισδιάστατου ανάγλυφου, η ταχύτητα, το κόστος αγοράς τους , κλπ..



Εικόνα 33: Ο laser scanner GLS1500 της Topcon



Εικόνα 34: Ο Leica ScanStation C10

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικά συστήματα λέιζερ σάρωσης με τα αντίστοιχα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, όπως αναφέρονται στις ηλεκτρονικές σελίδες των κατασκευαστών τους :

κατασκευαστής	τύπος σαρωτή	έτος	ακρίβεια μέτρησης απόστασης/ συντεταγμένων	διάμετρος κουκίδας laser	εμβέλεια	βάρος
Leica	HDS6200	2010	μέχρι 2mm στα 25m	14mm στα 50m	0.4m - 79m	14kg
3rdTech	DeltaSpere-3000IR	2005	7mm στα 10m	11.8mm στα 15m	0.5m - 10m	10kg
FARO	Photon 120	2009	2mm στα 10m και 25m		0.6m - 120m	14.5kg
Trimble	CX	2010	2mm	13mm στα 50m	1m - 80m	11.8kg
Maptek	I-Site 8800	2010	1mm	12mm στα 50m	2.5m - 2km	13.8kg
Optech Incorporated	ILRIS-HD	2008	7mm	12mm στα 50m	3m - 2km	14kg
Basis Software, Inc	Superhaser 25HSX	2009	0.5mm στα 20m/5mm στα 50m	16mm στα 50m	0.2m - 70m	11kg

Πίνακας 3: Σαρωτές Laser

3.7. Συστήματα δορυφορικού εντοπισμού

Η κλασική γεωδαιτική και τοπογραφική μεθοδολογία άλλαξε ριζικά από τα τέλη του 20^{ου} αιώνα, με τη χρήση των δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης GNSS (Global Navigation Satellite Systems). Με τη χρήση των συστημάτων αυτών, για τον προσδιορισμό της θέσης (συντεταγμένων) ενός σημείου δεν απαιτείται να είναι αυτό αμοιβαία ορατό με άλλα σημεία, ούτε κατάλληλες καιρικές συνθήκες, ενώ οι μετρήσεις μεταξύ των σημείων που μπορεί να απέχουν εκατοντάδες χιλιόμετρα γίνονται και νύχτα. Η μόνη προϋπόθεση είναι η ορατότητα μεταξύ δέκτη και πομπών / δορυφόρων (τουλάχιστον με 4 δορυφόρους).

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

Με τα συστήματα αυτά, με ταυτόχρονες μετρήσεις αποστάσεων προς τέσσερις, το λιγότερο, δορυφόρους, είναι δυνατός οποιαδήποτε στιγμή, υπό οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες και οπουδήποτε στη γη, ο προσδιορισμός στον χώρο, συναρτήσει του χρόνου, της θέσης και της ταχύτητας απεριόριστου πλήθους χρηστών.

Στις γεωδαιτικές τους εφαρμογές, η ακρίβεια αυτού του προσδιορισμού μπορεί να φθάσει τα λίγα mm.



Εικόνα 35: Δέκτης GNSS που λειτουργούσε σαν ενεργό σημείο ελέγχου κατά τη διάρκεια της κατασκευής του πύργου Landmark στο Abu Dhabi.

Τα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού δεν αντικατέστησαν τα κλασικά γεωδαιτικά – τοπογραφικά όργανα (θεοδόλιχα, EDM, total station), αλλά αποτελούν ένα ισχυρό συμπληρωματικό, σε αυτά, μέσο της σύγχρονης τεχνολογίας. Βέβαια, σε αρκετές εφαρμογές, όπως σε μετρήσεις δικτύων αλλά και σε άλλες περιπτώσεις προσδιορισμού συντεταγμένων, κλπ., προτιμάται η χρήση δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού.

Όλα τα συστήματα συνοδεύονται από κατάλληλα λογισμικά, διαφορετικά για κάθε τύπο δεκτών και κάθε εταιρία, για την επεξεργασία και διαχείριση των δεδομένων. Έχουν δυνατότητα σύνδεσης με Η/Υ προκειμένου να μεταφερθούν τα διάφορα στοιχεία, συντεταγμένες κλπ., αμφίδρομα από και προς αυτά.



Εικόνα 36: Κεραία και χειριστήριο του Leica Viva GNSS

3.7.1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης δορυφορικού συστήματος εντοπισμού

Σαν σημαντικότερα πλεονεκτήματα της χρήσης δορυφορικού συστήματος εντοπισμού, σε γεωδαιτικές – τοπογραφικές εργασίες, μπορεί να αναφερθούν τα εξής:

- είναι συνεχώς διαθέσιμο στους χρήστες, παντού, όπου έχουν ορατότητα προς 4 τουλάχιστον δορυφόρους.
- η αβεβαιότητα προσδιορισμού της θέσης κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέτρα έως μερικά mm, αναλόγως των δεκτών και της χρησιμοποιούμενης μεθόδου.
- για τις μετρήσεις αρκεί ένα άτομο
- δεν απαιτείται αμοιβαία ορατότητα των σημείων της φ.γ.ε. που συνδέονται χρησιμοποιώντας το σύστημα, είναι απαραίτητη όμως, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, η ορατότητα προς 4 τουλάχιστον δορυφόρους.
- οι μετρήσεις γίνονται χωρίς σκόπευση και σε σύντομο χρονικό διάστημα
- οι δέκτες είναι απλοί στη χρήση και τη μεταφορά τους

Ως μειονεκτήματα του συστήματος μπορούν να καταγραφούν :

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

- το υψηλό κόστος ενός συστήματος. Κάθε σύστημα πρέπει να αποτελείται από τουλάχιστον από δύο δέκτες. Σημειώνεται ότι τώρα πλέον και στην Ελλάδα υπάρχει η δυνατότητα λήψης δεδομένων από κάποιο μόνιμο σταθμό λειτουργίας, από το εγκαταστημένο δίκτυο (πρόγραμμα HEPOS).
- η αναγκαιότητα άμεσης πρόσβασης σε κάθε σημείο που πρέπει να γίνουν μετρήσεις
- η αδυναμία λειτουργίας του συστήματος σε κλειστούς, εσωτερικούς ή υπόγειους χώρους
- η αδυναμία του συστήματος να λειτουργεί αν οποιοδήποτε εμπόδιο (δέντρο, κατασκευή, τοίχος, κλπ) εμποδίζει έστω και λίγο το οπτικό τους πεδίο προς τους δορυφόρους («ορίζοντας»)
- σφάλματα που προκύπτουν στις μετρήσεις από ηλεκτρονικές παρεμβολές άλλων συστημάτων ή από άλλες αιτίες.

3.7.2. Μέθοδοι προσδιορισμού θέσης με συστήματα δορυφορικού εντοπισμού

Στις μετρήσεις με GPS (και γενικότερα με όλα τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού), η απαιτούμενη ακρίβεια, κάθε συγκεκριμένης εφαρμογής, καθορίζει τη μέθοδο μέτρησης και προσδιορισμού θέσης. Οι μέθοδοι προσδιορισμού θέσης μπορούν να διακριθούν ως εξής :

- στατικός προσδιορισμός θέσης (static positioning). Στην περίπτωση αυτή, ο δέκτης ή οι δέκτες παραμένουν ακίνητοι στα διάφορα σημεία που αναπτύσσονται, σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων κάθε μετρητικής περιόδου. Η σχετική ακρίβεια, που επιτυγχάνεται - σε σχέση με το μήκος της βάσης-, είναι της τάξης των $5\text{mm} \pm (0.5-1)\text{ppm}$ για δέκτες δύο συχνοτήτων και $(5-10)\text{mm} \pm (1-2)\text{ppm}$ για δέκτες μίας συχνότητας.
- κινηματικός προσδιορισμός θέσης (kinematic positioning). Ο όρος αυτός αφορά στον προσδιορισμό των συντεταγμένων, που ορίζουν τη

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

διαδρομή ενός κινητού μέσου, πάνω στην οποία βρίσκεται ο δέκτης, ο οποίος κινείται και καταγράφει παρατηρήσεις.

Μια άλλη διάκριση για προσδιορισμό θέσης, έχει να κάνει με τον υπολογισμό των συντεταγμένων σε σχέση με το χρόνο εκτέλεσης των μετρήσεων. Οι κατηγορίες αυτές είναι :

- προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο (real time positioning), όπου ο προσδιορισμός γίνεται την ίδια ή σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή εκτέλεσης των μετρήσεων
- εκ των υστέρων προσδιορισμός θέσης (post processing positioning), όπου ο προσδιορισμός γίνεται μετά το τέλος των μετρήσεων

Μια τρίτη κατηγοριοποίηση του προσδιορισμού θέσης, έχει να κάνει με την ακρίβεια στον προσδιορισμό και αφορά :

- στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης (absolute/point positioning)
- στον σχετικό προσδιορισμό θέσης (relative positioning, differential positioning)

Τέλος, ο διαφορικός εντοπισμός μπορεί να γίνει με:

- χρήση του κώδικα του φέροντος κύματος (DGPS), ή
- χρήση της φάσης του φέροντος κύματος (CPD - Carrier Phase Differential)

Οι παραπάνω μέθοδοι συνδυάζονται μεταξύ τους στην πλειοψηφία των εφαρμογών. Έτσι, στις τοπογραφικές και γεωδαιτικές εφαρμογές συνήθως χρησιμοποιείται :

- η μέθοδος του σχετικού στατικού προσδιορισμού με επεξεργασία εκ των υστέρων (για προσδιορισμούς σημείων αναφοράς με αυξημένες απαιτήσεις ακριβείας)

- η μέθοδος του σχετικού κινηματικού προσδιορισμού με προσδιορισμό εκ των υστέρων (για αποτυπώσεις σημείων λεπτομερειών)

- η μέθοδος του σχετικού κινηματικού προσδιορισμού σε πραγματικό χρόνο (για χαράξεις)

3.7.3. Σφάλματα προσδιορισμού θέσης με συστήματα δορυφορικού εντοπισμού - ακρίβειες

Τα σφάλματα προσδιορισμού θέσης κατά την χρησιμοποίηση συστημάτων δορυφορικού εντοπισμού, μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- σε αυτά που σχετίζονται με τους δορυφόρους
- σε αυτά που σχετίζονται με τους δέκτες και τις παρατηρήσεις
- σε αυτά που σχετίζονται με τη διάδοση του σήματος

Τέτοια σφάλματα, που συναντούμε στις μετρήσεις με συστήματα GPS είναι :

- το σφάλμα προσδιορισμού των συντεταγμένων της θέσης των δορυφόρων που παρατηρούνται (τροχιά δορυφόρων)
- τα σφάλματα των παρατηρήσεων (τυχαία, συστηματικά, χονδροειδή)
- το σφάλμα της αβεβαιότητας του γνωστού σημείου
- το τροποσφαιρικό σφάλμα
- το ιονοσφαιρικό σφάλμα
- το σφάλμα πολυανάκλασης
- το σφάλμα ολίσθησης των κύκλων

καθώς και άλλα σφάλματα που εξαρτώνται από:

- το πλήθος των δορυφόρων, που παρακολούθησε ο δέκτης
- τη γεωμετρία των δορυφόρων και τη σχετική τους θέση ως προς το σημείο, που είναι τοποθετημένος ο δέκτης
- τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου δέκτη

- τις μεταβολές των κέντρων φάσης της κεραίας
- τη μέθοδο μέτρησης που εφαρμόζεται
- τον τρόπο επεξεργασίας των μετρήσεων (λογισμικό που χρησιμοποιείται, κλπ.)

Η ακρίβεια που παρέχει κάθε δέκτης εξαρτάται από :

- τις δυνατότητές του για μετρήσεις σε μια ή δύο συχνότητες και στον P ή C/A κώδικα
- την διαδικασία μέτρησης που θα ακολουθηθεί
- το μήκος της βάσης που μετριέται κάθε φορά
- τον χρόνο που διαρκεί η μέτρηση
- την επεξεργασία των μετρήσεων
- τον αριθμό και τη γεωμετρία των δορυφόρων, με τους οποίους επικοινωνεί κάθε δέκτης κατά τη διάρκεια της μέτρησης

Η διαδικασία μετρήσεων και υπολογισμού με το δορυφορικό σύστημα εντοπισμού φαίνεται να είναι απλή. Για το λόγο αυτό, πολλές κατηγορίες επιστημών (μη Τοπογράφων) τα χρησιμοποιούν θεωρώντας ότι έχουν αξιοπιστία και γρήγορα αποτελέσματα. Στην πραγματικότητα πρέπει κανείς να γνωρίζει πολύ καλά τα συστήματα αναφοράς, που εμπλέκονται στην εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων και τη διαδικασία διορθώσεων και υπολογισμών, που ακολουθεί κάθε έτοιμο πακέτο επεξεργασίας αποτελεσμάτων. Οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εντοπισμό θέσης είναι πολλές και έτσι η αβεβαιότητα προσδιορισμού της θέσης κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέτρα έως μερικά mm.

3.7.4. Προσδιορισμός βάσης

Η μέτρηση μήκους με δορυφορικά συστήματα, γίνεται έμμεσα, με τον προσδιορισμό βάσης. Με τον όρο βάση (baseline) ορίζεται ένα προσανατολισμένο διάνυσμα (έχει δηλαδή γνωστές συνιστώσες,

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

προσανατολισμό και μέτρο), που τα άκρα του είναι 2 σημεία της ΦΓΕ και στο καθένα από αυτά, έχει τοποθετηθεί μια κεραία του συστήματος του δορυφορικού εντοπισμού. Για το ένα από αυτά τα σημεία, είναι συνήθως γνωστές οι συντεταγμένες του. Επομένως, με τον όρο «προσδιορισμός βάσης», εννοείται ο προσδιορισμός των συντεταγμένων του 2^{ου} σημείου και συνήθως γίνεται με τη μέθοδο του σχετικού στατικού εντοπισμού.

Η διαδικασία για τον προσδιορισμό αυτόν είναι η εξής :

Αρχικά γίνεται κέντρωση και κατακορύφωση των δεκτών του δορυφορικού συστήματος στα δύο σημεία και ακολουθεί μέτρηση του ύψους της κεραίας από αυτά. Στη συνέχεια, αρχίζει η λειτουργία των δύο δεκτών και λαμβάνονται ταυτόχρονες παρατηρήσεις για όσο χρόνο είναι απαραίτητο. Η διαδικασία τελειώνει με το σταμάτημα της λειτουργίας των δύο δεκτών.

Ο δέκτης που βρίσκεται σε θέση γνωστών συντεταγμένων ονομάζεται διεθνώς "base", ενώ ο άλλος που είναι σε θέση, που δεν γνωρίζουμε τις συντεταγμένες της, ονομάζεται "rover". Ο base δέκτης υπολογίζει τη στιγμιαία απόστασή του προς κάθε δορυφόρο, βασιζόμενος στη γνωστή του θέση και τη στιγμιαία θέση κάθε δορυφόρου. Η διαφορά της υπολογισμένης από τη μετρημένη απόσταση είναι η τιμή της διόρθωσης για κάθε ένα δορυφόρο. Μεταδιδόμενες οι διορθώσεις αυτές στον rover, επιτρέπουν στον τελευταίο να ανάγει τις δικές του μετρημένες αποστάσεις προς όλους τους δορυφόρους, υπολογίζοντας τελικά τη θέση του, με πολύ καλύτερη ακρίβεια.

Εξαιτίας της διαρκούς κίνησης των δορυφόρων, αλλά και των ολισθήσεων των χρονομέτρων τους, οι παραγόμενες διορθώσεις αλλάζουν ραγδαία σε συνάρτηση με το χρόνο. Επομένως ο base δέκτης πρέπει να παράγει τις διορθώσεις και να τις μεταδίδει στο rover το συντομότερο δυνατό.

Αυτονόητο είναι ότι η ορθότητα των συντεταγμένων του base επηρεάζει άμεσα και τις συντεταγμένες του rover. Εάν εισαχθεί η θέση του base λανθασμένα προς κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση, τότε όλες οι διορθώσεις, που θα υπολογίσει ο base και θα μεταδώσει στο rover, θα είναι κατά τέτοιο τρόπο λανθασμένες, ώστε να προσδίνουν στο rover εντοπισμό θέσης, που θα έχει το ίδιο λάθος σε μέγεθος και διεύθυνση με τον base.

Όταν η βάση είναι μικρή, τότε τα σφάλματα απόστασης των δύο δεκτών προς τους δορυφόρους είναι σχεδόν ίδια, επιτρέποντας τη χρήση των παραγόμενων διορθώσεων από τον base για τον προσδιορισμό της θέσης του rover. Όσο αυξάνεται το μήκος της βάσης, τόσο διαφοροποιούνται τα σφάλματα απόστασης. Με άλλα λόγια θα προκύπτουν υπολείποντα σφάλματα στον προσδιορισμό της θέσης του rover, τα οποία αυξάνονται με την αύξηση του μήκους της βάσης. Σαν γενικός κανόνας, θα πρέπει να προστίθεται επιπλέον ασάφεια ενός χιλιοστού για κάθε χιλιόμετρο αύξησης στο μήκος της βάσης, δηλαδή 1ppm. Στη περίπτωση δεκτών μίας συχνότητας, το σφάλμα αυτό αυξάνει στα 2ppm.

3.7.5. Διάφορα δορυφορικά συστήματα εντοπισμού θέσης - Το Ελληνικό δίκτυο των μόνιμων σταθμών (HEPOS)

Τα γνωστά συστήματα εντοπισμού θέσης μέσω δορυφόρου, που λειτουργούν σήμερα ή αναμένεται να μπουν σε λειτουργία, ή να ολοκληρωθούν το επόμενο διάστημα, είναι τα εξής:

- Το **Global Positioning System (GPS)**, το οποίο ξεκίνησε να λειτουργεί το 1983, είναι το μόνο πλήρως λειτουργικό σύστημα εντοπισμού θέσης μέσω δορυφόρου μέχρι και σήμερα.

Το σύστημα αυτό διαδέχθηκε το TRANSIT ή NAVSAT, ένα σύστημα εντοπισμού θέσης πέντε δορυφόρων του Ναυτικού των ΗΠΑ, της δεκαετίας του 1960, στο οποίο η ενημέρωση των συστημάτων λήψης γινόταν ανά μία ώρα.

Το GPS κατασκευάστηκε από την Αμερικανική Κυβέρνηση και χρησιμοποιήθηκε σε πρώτη φάση για στρατιωτικούς σκοπούς, ονομαζόμενο τότε ως NAVSTAR-GPS. Το 1983 δόθηκε σε δημόσια χρήση.

Αποτελείται από τρία κυρίως λειτουργικά τμήματα. Το τμήμα του διαστήματος χρησιμοποιεί ένα πλέγμα 24ων έως 32 δορυφόρων, οι οποίοι ίπτανται στο γεωστατικό τόξο σε μέσο ύψος 20189 km από την επιφάνεια της γης, ομοιόμορφα κατανεμημένων σε 6 τροχιακά επίπεδα, με κλίση 55° ως προς το

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

ισημερινό επίπεδο και οι οποίοι εκπέμπουν σήματα και κωδικοποιημένες πληροφορίες στην περιοχή των μικροκυμάτων (L-band). Το επίγειο τμήμα ελέγχου παρακολουθεί και κατευθύνει τη λειτουργία των δορυφόρων του συστήματος. Το τμήμα χρηστών, που παρακολουθεί τα σήματα των δορυφόρων, αποτελείται από όλους τους χρήστες που μπορούν να εκμεταλλευτούν τις δυνατότητες του συστήματος για ναυσιπλοΐα, γεωδαισία και λοιπές χρήσεις.

Οι δέκτες του συστήματος GPS, που έχουν αναπτυχθεί για γεωδαιτικές εφαρμογές, διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες :

- δέκτες μέτρησης μονής συχνότητας
- δέκτες μέτρησης διπλής συχνότητας
- δέκτες μέτρησης σε πραγματικό χρόνο (Real Time Kinematic, RTK)
- δέκτες σταθμών αναφοράς μόνιμης λειτουργίας.

Κάθε δέκτης αποτελείται από την κεραία και το χειριστήριο, που διαφέρουν ανάλογα με τις δυνατότητες και τη χρήση τους.

Η αβεβαιότητα του στιγμιαίου εντοπισμού, που επιτυγχάνεται, είναι κατ' αρχάς καλύτερη των 10 m και της ταχύτητας της τάξης των 0.05 m/sec. Στις γεωδαιτικές εφαρμογές η αβεβαιότητα αυτή μπορεί να φθάσει το 1 ppm, αναλόγως της μεθόδου που χρησιμοποιείται κάθε φορά.

Οι δυνατότητες του GPS βρίσκουν εφαρμογή σε πλήθος γεωδαιτικών – τοπογραφικών εργασιών. Με το σύστημα GPS, με κατάλληλες προϋποθέσεις και μεθόδους μπορούν να υπολογισθούν αξιόπιστα και με ακρίβεια της τάξης των λίγων mm οι συντεταγμένες κορυφών γεωδαιτικών δικτύων, φωτοσταθερών σημείων, να υλοποιηθούν χαράξεις τεχνικών έργων, κλπ.



 Εικόνα 37: Δέκτης GPS CHC στην Ανταρκτική (Οκτώβριος 2009 - Απρίλιος 2010)

Το GPS είναι σύστημα ευρείας αποδοχής και χρήσης. Παρόλα αυτά ορισμένα προβλήματα παραμένουν, όπως η περιστασιακά μειωμένη ακρίβεια λόγω της επιλεκτικής διαθεσιμότητας (SA).

- Το **GLObal Navigation Satellite System (GLONASS)** είναι το αντίστοιχο Ρώσικο σύστημα εντοπισμού θέσης μέσω δορυφόρων. Αρχικά, ο χαρακτήρας του συστήματος GLONASS ήταν στρατιωτικός, αντίστοιχος με του GPS. Ο σχεδιασμός του συστήματος ξεκίνησε το 1976 στην εποχή του ψυχρού πολέμου. Στις 12 Οκτωβρίου 1982 ξεκίνησε μια σειρά εκτοξεύσεων πυραύλων και τερματίστηκε σε πρώτη φάση, το 1995. Με τις αλλαγές σε πολιτικό επίπεδο, μετά τη διάλυση της Σοβιετικής Ένωσης, η χρήση του συστήματος GLONASS άρχισε να επεκτείνεται και εκτός των συνόρων της πρώην Σοβιετικής Ένωσης.

Έχει σχεδιαστεί σε τρία τροχιακά επίπεδα και υπάρχουν σε τροχιά 6 δορυφόροι σε πλήρη επιχειρησιακή δραστηριότητα. Η τελευταία εκτόξευση τριών δορυφόρων στο πλαίσιο επέκτασης του συστήματος με τη νέα σειρά M πραγματοποιήθηκε το 2006 και τα επόμενα χρόνια αναμένονται κι άλλες για να ολοκληρωθεί ο σχηματισμός των 24 δορυφόρων με τη σειρά M.

Το σύστημα αυτό, στην πλήρη εξέλιξή του, θα αποτελείται από 24 δορυφόρους σε τρία τροχιακά επίπεδα, με real-time απεικόνιση συντεταγμένων. Από αυτούς οι 21 θα είναι δορυφόροι και οι 3 θα είναι Orbital plane, δηλαδή αεροπλάνα με 8 μικροδορυφόρους το καθένα, που θα εκπέμπουν παράλληλα.



Εικόνα 38: Δορυφόρος της σειράς GLONASS M

Το σύστημα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε κάθε ζεύγος δορυφόρων, οι οποίοι βρίσκονται σε αντιδιαμετρικές θέσεις να εκπέμπει σε διαφορετικές συχνότητες. Οι κώδικες που μεταδίδονται από τους δορυφόρους του GLONASS είναι διαμορφωμένοι και στις δύο συχνότητες, με αποτέλεσμα να προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια στον απόλυτο προσδιορισμό θέσης σε σχέση με το GPS που έχει κώδικα C/A διαμορφωμένο μόνο στην L1 και τον κωδικό P κρυπτογραφημένο. Επίσης, στο σύστημα GLONASS δεν έχει εφαρμοστεί και ούτε προβλέπεται να εφαρμοστεί η κατάσταση της επιλεκτικής διαθεσιμότητας.

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μια σημαντική προσπάθεια συνεργασίας των συστημάτων GPS και GLONASS, για τη μεγαλύτερη κάλυψη της γήινης επιφάνειας, ώστε οι χρήστες των συστημάτων δορυφορικού εντοπισμού να έχουν στη διάθεσή τους μεγαλύτερο πλήθος παρατηρούμενων δορυφόρων.

- Το **GALILEO** είναι το αντίστοιχο Ευρωπαϊκό προηγμένο σύστημα εντοπισμού θέσης, που πήρε το όνομά του από το διάσημο Ιταλό αστρονόμο Galileo Galilei. Ξεκίνησε στις 26 Μαΐου του 2003 , έπειτα από μεμονωμένες προσπάθειες διαφόρων χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αναπτύσσεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση, συμμετέχουν σε αυτό όλα τα κράτη μέλη της και υλοποιείται από την Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (ESA).

Το σύστημα αυτό είναι σχεδιασμένο με στόχο τη δημιουργία ενός αξιόπιστου πολιτικού παγκόσμιου συστήματος προσδιορισμού θέσης, χρόνου και ταχύτητας σε πλήθος εφαρμογών, χωρίς τις όποιες δεσμεύσεις των δύο

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

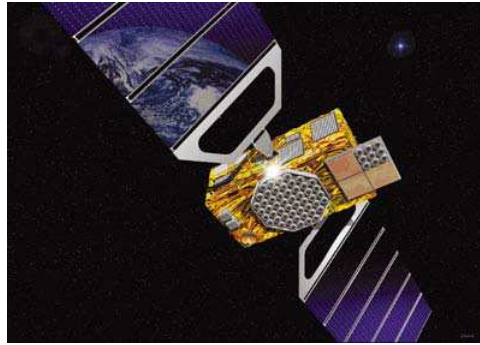
άλλων συστημάτων, θα εγγυάται τη διαθεσιμότητα κάτω από τις πιο ακραίες καταστάσεις παρατήρησης, θα καλύπτει με μεγάλη ακρίβεια σχεδόν το 99% της γης, ενώ προβλέπεται ότι στις πιο πολλές περιοχές θα είναι ορατοί 6 έως 8 δορυφόροι.

Το σύστημα θα αποτελείται από 30 δορυφόρους επί τριών τροχιακών επιπέδων, με γωνία κλίσης 56° ως προς το ισημερινό επίπεδο και περίοδο περιστροφής περίπου 14 ώρες. Το ύψος της τροχιάς των δορυφόρων θα είναι περίπου 23600km. Το επίγειο τμήμα θα αποτελείται από δύο κέντρα ελέγχου και από 20 σταθμούς παρακολούθησης. Ο χρόνος ζωής κάθε δορυφόρου εκτιμάται να είναι 12 χρόνια.

Θα υπάρχουν οι εξής διαφορετικές υπηρεσίες κάλυψης:

- Η ελεύθερη “Open service (OS)”, θα είναι διαθέσιμη προς όλους και θα έχει ακρίβεια μικρότερη των 4m οριζοντίως και 8m καθέτως.
- Η κωδικοποιημένη “Commercial Service (CS)”, η εμπορική εφαρμογή δηλαδή, θα έχει ακρίβεια καλύτερη από ένα μέτρο.
- Οι κωδικοποιημένες “Public Regulated Service (PRS)” και
- “Safety of Life Service (SoL)” θα έχουν ακρίβεια όπως και η ελεύθερη και θα χρησιμοποιούνται από τις δημόσιες υπηρεσίες, όπως αστυνομία, πυροσβεστική, πρώτες βοήθειες κλπ. Θα ενεργοποιούνται μόλις σε δέκα δευτερόλεπτα.

Η εκτόξευση του πρώτου δορυφόρου GIOVE-A πραγματοποιήθηκε στις 28 Δεκεμβρίου 2005, ενώ του δεύτερου δορυφόρου GIOVE-B στις 27 Απριλίου 2008. Αναμένεται ότι η το σύστημα θα τεθεί σε επιχειρησιακή ετοιμότητα το 2013.



 Εικόνα 39: Δορυφόρος του συστήματος Galileo

- Το **Compass navigation system**, που αναπτύσσει η Κίνα, βασίζεται σε ένα σύστημα 35 δορυφόρων, εκ των οποίων οι 5 θα είναι γεωστατικής τροχιάς (GEO) και οι 30 μέσης τροχιάς (MEO) , με απώτερο σκοπό να καλύψουν όλη τη γη.

Η χρήση του θα είναι σε δύο λειτουργίες, την Open και την Restricted. Η Open θα χρησιμοποιείται ελεύθερα από όλους τους πολίτες και η Restricted θα χρησιμοποιείται για στρατιωτικούς σκοπούς.

Η Κίνα λειτούργησε το σύστημα με 5 δορυφόρους, κατά τη διάρκεια των Ολυμπιακών αγώνων, σε δοκιμαστική μορφή, με καλά αποτελέσματα. Η ακρίβεια του συστήματος εκτιμάται να είναι στα 10 μέτρα .

- Το **Indian Regional Navigational Satellite System (IRNSS)** είναι το Ινδικό σύστημα εντοπισμού θέσης. Το σύστημα αυτό ανακοινώθηκε από την Ινδική κυβέρνηση το 2006 , με την προοπτική ολοκλήρωσης το 2012. Μέχρι σήμερα έχουν εκτοξευθεί 7 δορυφόροι, ενώ στην πλήρη ανάπτυξη του συστήματος προβλέπονται 20. Το σύστημα αυτό θα χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά από την Ινδική κυβέρνηση και θα καλύπτει την Ινδία μόνο.

Η ακρίβεια του θα κυμαίνεται στα 20 μέτρα. Επειδή όμως υπάρχει ήδη συνεργασία με τη Ρωσία , υπάρχει ενδεχόμενο περαιτέρω συνεργασίας τους στο θέμα των συστημάτων εντοπισμού θέσης.

- Το **Quasi - Zenith Satellite System** είναι το Ιαπωνικό τοπικό σύστημα, για το οποίο προβλέπεται στην πλήρη ανάπτυξή του να έχει 30 δορυφόρους, εκ των οποίων έχουν ήδη εκτοξευθεί οι τρεις.

Ακολουθεί πίνακας που παρουσιάζει τα βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία ορισμένων δεκτών δορυφορικού εντοπισμού, όπως αναφέρονται στις ηλεκτρονικές σελίδες των κατασκευαστών τους:

εργοστάσιο κατασκευής	τύπος οργάνου	έτος	βασικά χαρακτηριστικά	ακρίβεια		βάρος
				με Static	με RTK	
Altus Positioning System Inc.	APS-3	2007	GPS/Glonass	±5mm ±0.5ppm	±10mm ±1ppm	1.2kg
Geomax	ZGP800	2008	GPS/Glonass	±10mm ±1ppm	±20mm ±1ppm	3.07kg
JAVAD GNSS	ALPHA G3	2008	GPS/Glonass /Galileo	±5mm ±0.5ppm	±15mm ±1.5ppm	430g
JAVAD GNSS	ALPHA G3T	2008	GPS/Glonass /Galileo	Op: ±3mm ±0.5ppm K: ±5mm ±0.5ppm	Op: ±10mm ±1ppm K: ±15mm ±1.5ppm	448g
Leica	GRX1200	2008	GPS/Glonass /Galileo	±5mm ±0.5ppm		
Magellan Professional	ProFlex 500	2009	GPS/Glonass	Op: ±5mm ±0.5ppm K: ±1mm ±1ppm	Op: ±10mm ±1ppm K: ±15mm ±1.5ppm	2.1kg

Πίνακας 4: Βασικά στοιχεία δεκτών δορυφορικού εντοπισμού

3.7.5.1. Το Ελληνικό δίκτυο των μόνιμων σταθμών (HEPOS)

Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκε και το Ελληνικό δίκτυο των μόνιμων σταθμών του συστήματος δορυφορικού εντοπισμού. Το ελληνικό σύστημα εντοπισμού **HEPOS (Hellenic Positioning System)** είναι ένα σύστημα, το οποίο αξιοποιώντας το υφιστάμενο παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα εντοπισμού GPS, εξασφαλίζει τον προσδιορισμό θέσης, με υψηλή ακρίβεια. Το HEPOS είναι ένα σύγχρονο σύστημα, αντίστοιχο με αυτά που λειτουργούν τα τελευταία χρόνια στις περισσότερες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

Το σύστημα αυτό στηρίζεται στη λογική ότι κάθε χρήστης, προκειμένου να προσδιορίσει με ακρίβεια τις συντεταγμένες των άγνωστων σημείων που μετρά, να έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιεί ένα μόνο δέκτη του δορυφορικού συστήματος, αξιοποιώντας τις ομόλογες μετρήσεις που χρειάζεται για το συγκεκριμένο χρόνο, από τον ή τους κοντινότερους σε αυτόν μόνιμους σταθμούς του δικτύου, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε ικανοποιητική απόσταση και λειτουργούν συνεχώς. Με τον τρόπο αυτό, ο χρήστης, πληρώνοντας μία μικρή σχετικά συνδρομή, αποφεύγει την αγορά δεύτερου δέκτη καθώς και επιπλέον εργασίες πεδίου.

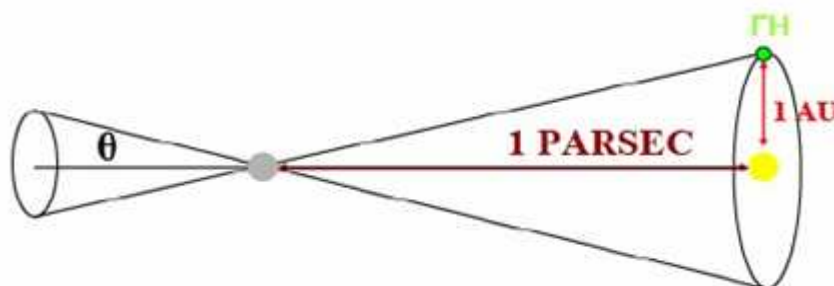
Το HEPOS αποτελείται από ένα δίκτυο 98 μόνιμων δορυφορικών σταθμών αναφοράς (που είναι εγκατεστημένοι έτσι ώστε να εξασφαλίζουν ομοιογένεια και ενιαία ακρίβεια σε ολόκληρη την Ελλάδα) και ένα Κέντρο Ελέγχου που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε.. Το Κέντρο Ελέγχου επεξεργάζεται τα στοιχεία των σταθμών αναφοράς και αποστέλλει στο χρήστη τα δεδομένα που χρειάζονται για τον ακριβή προσδιορισμό θέσης. Τα στοιχεία αυτά αποστέλλονται είτε σε «πραγματικό χρόνο», οπότε η θέση ενός σημείου προσδιορίζεται κατά τη στιγμή της μέτρησης με ακρίβεια, από λίγα εκατοστά (τεχνικές RTK) έως της τάξης του μισού μέτρου (τεχνικές DGPS), είτε μεταγενέστερα, οπότε η θέση ενός σημείου προσδιορίζεται εκ των υστέρων, μετά από επεξεργασία των μετρήσεων. Η επεξεργασία των στοιχείων που αποστέλλονται γίνεται μέσω της τεχνικής στατικών εντοπισμών (χρήση αρχείων Rinex) και παρέχουν τη μέγιστη ακρίβεια που μπορεί να φτάσει έως την τάξη λίγων χιλιοστών, η δε επικοινωνία με τους χρήστες γίνεται με σύγχρονα και ασφαλή μέσα.

Το HEPOS αναπτύχθηκε από την Κτηματολόγιο Α.Ε. για να καλύψει τις ανάγκες σύνταξης του Εθνικού Κτηματολογίου. Παράλληλα, ως έργο υποδομής μπορεί να έχει και μια σειρά εφαρμογών σε άλλους τομείς, όπου υπάρχουν αυξημένες ανάγκες χωρικής ακρίβειας, όπως σε τομείς της Τοπογραφίας, Γεωδαισίας, Χαρτογραφίας, Υδρογραφίας, κατασκευής τεχνικών έργων καθώς και σε τομείς όπως η Γεωδυναμική, η Γεωλογία, η Σεισμολογία κλπ.

3.8. Μέτρηση πολύ μικρών και πολύ μεγάλων αποστάσεων

Για τη μέτρηση πολύ μικρών αποστάσεων, της τάξης μεγέθους του ατόμου, δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε φως στην ορατή περιοχή του φάσματος γιατί το μήκος κύματος του φωτός θέτει περιορισμούς στην ακρίβεια της μέτρησης. Με φως στην ορατή περιοχή του φάσματος μπορούμε να πάρουμε μετρήσεις για αποστάσεις μέχρι $5 \cdot 10^{-7} \text{m}$. Για να δούμε αντικείμενα με μικρότερες διαστάσεις από 10^{-8}m έως 10^{-10}m , που είναι και η τάξη μεγέθους της διαμέτρου του ατόμου, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε φως με μικρότερο μήκος κύματος, όπως είναι οι ακτίνες Χ. Χρησιμοποιώντας επομένως ηλεκτρονικό μικροσκόπιο και παρατηρώντας τη σκέδαση των ακτινών Χ σε ένα κρύσταλλο μπορούμε να μετρήσουμε το μέγεθος του ατόμου.

Από την άλλη μεριά για τη μέτρηση πολύ μεγάλων αποστάσεων, που συνήθως χρειάζονται στην αστρονομία, εφαρμόζεται η μέθοδος του τριγωνισμού. Έτσι κατά την ετήσια κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο μετρώντας την παράλλαξη των κοντινών άστρων (γωνία θ στο σχήμα) και εφαρμόζοντας τη μέθοδο του τριγωνισμού με βάση την ακτίνα της τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο (1 AU), μπορεί να μετρηθεί η απόσταση των κοντινών άστρων. Η μέθοδος εφαρμόζεται για άστρα σε απόσταση έως 300 έτη φωτός.



Σχήμα 3: Μέθοδος μέτρησης πολύ μεγάλων αποστάσεων.

Με την ανάπτυξη της ραδιοαστρονομίας αναπτύχθηκε και η τεχνολογία των VLBI. Η ραδιοαστρονομία, αν και η αρχή της ανάγεται στα 1894, όταν έγιναν οι πρώτες απόπειρες ανίχνευσης της ηλιακής θερμικής ακτινοβολίας στα μήκη κύματος των εκατοστόμετρων, ουσιαστικά αρχίζει το 1931 όταν ο Αμερικανός μηχανικός Karl Jansky, επιφορτίστηκε από τα Εργαστήρια Bell της ομώνυμης

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

τηλεφωνικής εταιρίας, να ερευνήσει τα αίτια των στατικών θορύβων στις επικοινωνίες φωνής. Η γεωδαιτική χρήση της Συμβολομετρίας ραδιοκυμάτων ή αλλιώς της Συμβολομετρίας πολύ μεγάλων βάσεων (Very Long Baseline Interferometry, VLBI), παρέχει τη δυνατότητα για τη μέτρηση γεωδαιτικών παραμέτρων, που σχετίζονται με τις φυσικές ιδιότητες της Γης, με ακρίβειες που δεν ήταν εφικτές στο παρελθόν.

Η τεχνική βασίζεται στην ακριβή μέτρηση, από δυο επίγειους σταθμούς, παραμέτρων που σχετίζονται με τη διάδοση στην ατμόσφαιρα ραδιοκυμάτων, που προέρχονται από την ίδια πηγή εκπομπής. Στην προκειμένη περίπτωση, οι πηγές που χρησιμοποιούνται δεν είναι δορυφόροι αλλά αστρικές ραδιοπηγές, όπως οι ημιαστέρες (quasars), που βρίσκονται σε διαγαλαξιακές αποστάσεις και θεωρούνται τα πλέον απομακρυσμένα σημεία του σύμπαντος (και συνεπώς θεωρητικά βρίσκονται στο άπειρο). Τα ραδιοσήματα αυτά λαμβάνονται στις κεραίες μεγάλων ραδιοτηλεσκοπίων, όπου καταγράφονται σαν θόρυβος (επειδή οι ραδιοπηγές δεν εκπέμπουν σήματα σταθερής συχνότητας) συγχρόνως με τη συχνότητα και το χρόνο ενός ατομικού χρονομέτρου, (συνήθως ενός hydrogen maser), ενώ συγχρόνως ενισχύονται και μετατρέπονται σε ψηφιακή πληροφορία που αποθηκεύεται σε ειδικές μαγνητικές ταινίες μεγάλης χωρητικότητας. Η ανάλυσή τους γίνεται σε κεντρικές μονάδες επεξεργασίας, όπου με ειδικές συσκευές αναλυτικής αλληλοσυσχέτισης των καταγραφών (signal correlators), υπολογίζεται η διαφορά του χρόνου άφιξης Δt (group delay) των ραδιοσημάτων στους δύο σταθμούς σαν συνάρτηση του χρόνου. Πρακτικά, η εν λόγω μέτρηση προκύπτει από τον υπολογισμό της χρονικής μετατόπισης μεταξύ των σημάτων που απαιτείται για να επιτευχθεί μέγιστος συσχετισμός τους (maximum correlation). Επίσης μετρούνται η καθυστέρηση φάσης $\Delta\phi$ (phase delay) της αντίστοιχης συνάρτησης συσχέτισης (correlation function) και ο ρυθμός της χρονικής μεταβολής dt/dt (delay rate). Στην πράξη, η διαφορά του χρόνου άφιξης Δt υπολογίζεται από μετρήσεις της καθυστέρησης φάσης $\Delta\phi$ σε διαφορετικές συχνότητες. Στα γεωδαιτικά συστήματα VLBI, οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται είναι από το τμήμα των μικροκυμάτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Για παράδειγμα, τα συστήματα τα συστήματα Mark-III χρησιμοποιούν 14 συχνότητες σε δύο περιοχές του φάσματος, στην

περιοχή S-Band (2.2-2.3 GHz) και στην περιοχή X-Band (8.2-8.6GHz), ώστε να είναι δυνατή η διόρθωση των σημάτων για τις ιονοσφαιρικές επιδράσεις.

Από τις μετρήσεις Δt εξάγεται η γεωμετρική καθυστέρηση $\tau = (B \cdot s) / c$, όπου B είναι το διάνυσμα της βάσης μεταξύ των δύο σταθμών, s είναι το μοναδιαίο διάνυσμα στη διεύθυνση της ραδιοπηγής και c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Συνήθως, από τις μετρήσεις 12 ή περισσότερων ραδιοπηγών σε διάστημα 24 ωρών, μπορούν να υπολογιστούν οι τρεις συνιστώσες του διανύσματος B με μεγάλη ακρίβεια (της τάξης μερικών χιλιοστών ή εκατοστών, ανεξάρτητα από την απόσταση μεταξύ των σταθμών). Η ακρίβεια των μετρήσεων VLBI επηρεάζεται από την αδυναμία επακριβούς εκτίμησης των συνθηκών που επικρατούν στην ατμόσφαιρα κατά μήκος της πορεία των ραδιοκυμάτων. Έτσι απαιτείται η χρήση πολύπλοκων μοντέλων διόρθωσης για τις κύριες επιδράσεις της ατμόσφαιρας στη διάδοση των ραδιοσημάτων, δηλαδή : την εξασθένιση, την καθυστέρηση διάδοσης και την καμπύλωση της τροχιάς του εκάστοτε ραδιοκύματος. Συνήθως τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται βασίζονται στη χρήση δεδομένων από ραδιοβολίσεις και άλλα μετεωρολογικά στοιχεία, που μετρούνται στην περιοχή των επίγειων σταθμών.

Το παγκόσμιο αστρονομικό σύστημα αναφοράς (International Celestial Reference Frame, ICRF) και το παγκόσμιο επίγειο σύστημα αναφοράς (International Terrestrial Reference Frame, ITRF) αποτελούν τη βάση για τις ανάγκες της γεωδαισίας σε επίπεδο ηπείρων και εθνικών περιοχών. Σήμερα οι γεωδαιτικές διαστημικές τεχνικές είναι ιδιαίτερα αποδοτικές για τέτοιες επιστημονικές και πρακτικές εφαρμογές. Τεχνικές όπως η Συμβολομετρία πολύ μεγάλων βάσεων (VLBI), τα δορυφορικά και σεληνιακά συστήματα λέιζερ (SLR/LLR), καθώς και τα συστήματα βασισμένα σε παρατηρήσεις μικροκυμάτων, όπως τα συστήματα GPS και DORIS, υλοποιούν τα συστήματα αναφοράς ITRF και ICRF μέσω ενός διεθνούς δικτύου μόνιμων γεωδαιτικών σταθμών - το διεθνές γεωδαιτικό δίκτυο σταθμών συλλογής δορυφορικών και διαστημικών μετρήσεων (International Space Geodetic Network, ISGN) – που αποτελούνται από ραδιοτηλεσκόπια για μετρήσεις VLBI, μεταφερόμενα συστήματα λέιζερ SLR/LLR και μόνιμους γεωδαιτικούς

Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις

σταθμούς GPS και DORIS. Ωστόσο, η κατανομή των εν λόγω σταθμών είναι ανομοιογενής, δεδομένου ότι συγκεντρώνονται κυρίως στη Βόρεια Αμερική, την Ευρώπη και τμήματα της Ασίας (π.χ. Ιαπωνία), ενώ οι πλέον χαρακτηριστικές ελλείψεις σταθμών παρουσιάζονται στο νότιο ημισφαίριο.

4. Συμπεράσματα – Προοπτικές – Τάσεις

Στην εργασία αυτή έγινε μια προσπάθεια καταγραφής και ανάλυσης των μεθόδων και των οργάνων μέτρησης μήκους, μέσω μιας ιστορικής αναδρομής της εξέλιξης τους, έως την σημερινή εποχή.

Ο πρωτόγονος άνθρωπος, έχοντας ως ισχυρά όπλα την λογική και την φαντασία του και προσπαθώντας να καλύψει ανάγκες, που του δημιουργούσε η δίψα του για διερεύνηση του περιβάλλοντός του και ο κοινωνικός τρόπος διαβίωσής του, αντιλήφθηκε την αναγκαιότητα των μετρήσεων μεγεθών και προσπάθησε να καλύψει την ανάγκη αυτή με την εύρεση μεθόδων και την κατασκευή οργάνων.

Σημαντικότατο ρόλο σε αυτή την εξέλιξη, που συμβάδιζε πάντα με την ανάπτυξη της επιστήμης και της τεχνολογίας, έπαιξε και η αρχαία Ελληνική σκέψη, που και στον τομέα αυτό, πρωτοστάτησε, δημιουργώντας τις απαραίτητες βάσεις.

Ένας μεγάλος σταθμός στην ανάπτυξη των γεωδαιτικών οργάνων και της αντίστοιχης μεθοδολογίας, η εφαρμογή δηλαδή της μέτρησης αποστάσεων με τη βοήθεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, έχει τις ρίζες της στον 2^ο παγκόσμιο πόλεμο.

Έκτοτε, οι εξελίξεις είναι ραγδαίες και θεαματικές. Σε αυτό συνέβαλε ουσιαστικά η αλματώδης ανάπτυξη της ηλεκτρονικής και της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Τα όργανα και οι μέθοδοι μέτρησης μηκών αντικαταστάθηκαν, στην πράξη, από ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης μεγάλων μεσαίων και μικρών αποστάσεων, με τη χρήση, αντίστοιχα, μικροκυμάτων και ακτινών laser ή υπέρυθρης ακτινοβολίας και από τις μεθόδους, που αυτά επέφεραν. Αυτά στη συνέχεια, συνδυάστηκαν, με τα ψηφιακά θεοδόλιχα, που είχαν ήδη αντικαταστήσει τα μηχανικά, για την κατασκευή των ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών, οι οποίοι συνεχώς εξελίσσονται και συμπληρώνονται με καινοτομίες.

Καταλυτική ήταν και η δημιουργία και ανάπτυξη του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού θέσεων και η εφαρμογή του σε πλήθος γεωδαιτικών εφαρμογών.

Σήμερα, ο τοπογράφος έχει στη διάθεσή του ολοκληρωμένους ψηφιακούς γεωδαιτικούς σταθμούς, που μπορούν να μετρήσουν με πολύ μεγάλη ακρίβεια διευθύνσεις και μικρές ή μεγάλες αποστάσεις, με ή χωρίς ανακλαστήρα, με αυτόματη ή μη αναγνώριση στόχου, καθώς ακόμα και ρομποτικούς, εικονογεωδαιτικούς, χωροεικονογεωδαιτικούς, έξυπνους γεωδαιτικούς σταθμούς, οι οποίοι συνδυάζονται και συνεργάζονται με συστήματα δορυφορικού εντοπισμού, καθώς και όργανα αποτύπωσης επιφανειών με σάρωση. Οι σταθμοί αυτοί διαθέτουν μικροεπεξεργαστές και λειτουργικό σύστημα MS-DOS ή Windows, ώστε να είναι συμβατό με το αντίστοιχο των ηλεκτρονικών υπολογιστών, κατάλληλο λογισμικό για την εκτέλεση πλήθους χρήσιμων υπολογισμών και εργασιών στο πεδίο, ενώ έχουν και τη δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλης ποσότητας δεδομένων και άμεσης σύνδεσης και επικοινωνίας με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Μετρήση αποστάσεων:**Ιστορική αναδρομή, Σύγχρονες δυνατότητες, Προοπτικές και Τάσεις**

Στον πίνακα παρουσιάζονται, χρονολογικά, οι κατηγορίες των οργάνων, που παρουσιάστηκαν στην εργασία, με τα βασικά χαρακτηριστικά τους:

Όργανο	Έτος	Σημαντικά χαρακτηριστικά	Ακρίβεια	Βεληνεκές
ταινίες Invar	1896	πολύ μικρός συντελεστής γραμμικής διαστολής	1:500000 - 1:1000000	2 - 3 km
απλές μετροταινίες		λινές , πλαστικές	1:1000 - 1:2000 ή $\pm 1\text{cm}$	μέχρι 50m
μεταλλικές μετροταινίες		ασάλινες	1:50000	μέχρι 100m
ηλεκτρονικές μετροταινίες	1995	ηλεκτρονικές	$\pm 1\text{cm}$ έως $\pm 2\text{cm}$	μέχρι 100m
οπτικομηχανικά θεοδόλιχα	1926	έμμεσος προσδιορισμός μήκους με χρήση σταδίας	$\approx \pm 30\text{cm}$	δεκάδες m
δίμμετρη βάση	1960		1:10000	(2 - 1500)m
ερευνητές αποστάσεων	1960	ενσωματωμένη βάση σταθερού μήκους	1/600	(35 - 300)m
μικρά τηλέμετρα	1960	ενσωματωμένη βάση μεταβλητού μήκους	μέχρι 1/600	μέχρι 60m
ψηφιακά θεοδόλιχα	1975	ψηφιακή ένδειξη ανάγνωσης	$\pm 3\text{cc}$ - $\pm 50\text{cc}$	
EDM (MDM)	1957	με φέρουσα ακτινοβολία	($\pm 4\text{mm}$ $\pm 1\text{ppm}$) - 3cm	150km
EDM (EODM)	1965-1970	με ορατό ή υπέρυθρο φως	$\pm 10\text{mm}$ $\pm 2\text{ppm}$	(3 - 25) km
total station	1970	ψηφιακό θεοδόλιχο + EDM	$\pm 1\text{mm}$ $\pm 2\text{ppm}$	μερικά m - μερικά km
reflectorless	2000	total station χωρίς χρήση ανακλαστήρα	$\pm 2\text{mm}$ - 1cm	μέχρι 2km
smart station		γεωδαιτικός σταθμός με κεραία δέκτη GPS	περίπου $\pm 1\text{cm}$	
imagine station		γεωδαιτικός σταθμός με ενσωματωμένη CCD κάμερα στο τηλεσκόπιο	$\pm 1\text{mm}$ $\pm 2\text{ppm}$	μερικά m - μερικά km
spatial imagine station		γεωδαιτικός σταθμός με CCD κάμερα και σαρωτή	$\pm 1\text{mm}$ $\pm 2\text{ppm}$	μερικά m - μερικά km
ρομποτικός		γεωδαιτικός σταθμός με αυτόματη αναγνώριση στόχου	$\pm 1\text{mm}$ έως $\pm 5\text{cm}$	3km
laser scanner	2000	αυτόματη μέτρηση νέφους πολλών σημείων	$\pm 5\text{mm}$ - $\pm 5\text{cm}$	μέχρι 1500m
Δέκτες 2 συχνοτήτων GPS		Διαφορικός δορυφορικός εντοπισμός	0.01ppm - 1ppm	(1 - δεκάδες)km

Πίνακας 5: Εξέλιξη οργάνων μέτρησης αποστάσεων

Σε γενικές γραμμές, η Γεωδαισία και η Τοπογραφία είναι από τις επιστήμες που ωφελήθηκαν και συνεχίζουν να ωφελούνται από την ραγδαία ανάπτυξη της ηλεκτρονικής τις τελευταίες δεκαετίες. Η σύγχρονη τεχνολογία προσφέρει σημαντικότερες προοπτικές στο σχεδιασμό των τοπογραφικών συστημάτων μέτρησης και στη βελτίωση των μεθόδων επεξεργασίας και παρουσίασης αυτών των μετρήσεων.

Η τάση των κατασκευαστών σύγχρονων ψηφιακών γεωδαιτικών σταθμών φαίνεται να κατευθύνεται μάλλον προς την ακόμα μεγαλύτερη βελτίωση της παρεχόμενης ακρίβειας και όχι προς την αύξηση της εμβέλειας, μια και η ανάγκη αυτή, της μέτρησης μεγάλων αποστάσεων, καλύπτεται πλέον σε πολύ μεγάλο βαθμό από τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού.

Τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού συνεχώς εξελίσσονται και αναμένεται μεγαλύτερη ανάπτυξη τους τα αμέσως επόμενα χρόνια. Το σύστημα GPS αναβαθμίζεται, εκπέμποντας σήμα σε περισσότερες συχνότητες και διαθέσιμους για πολιτική χρήση, κώδικες. Το σοβιετικό σύστημα GLONASS συνεχώς βελτιώνεται ενώ το Ευρωπαϊκό GALILEO αναμένεται να είναι σε πλήρη λειτουργία το 2013. Τα λιγότερο ανεπτυγμένα σήμερα συστήματα (το Κινέζικο COMPASS, το Ιαπωνικό QZSS και το Ινδικό IRNSS), από τους 85 συνολικά δορυφόρους, που έχουν προγραμματίσει να θέσουν σε τροχιά, σήμερα έχουν θέσει μόνο τους 15 και συνεχώς αναπτύσσονται. Νέοι πολυκάναλοι δέκτες παράγονται και το λογισμικό βελτιώνεται. Όλα αυτά αναμένεται να βελτιώσουν ακόμα περισσότερο τις μεθόδους, τις δυνατότητες και τις ακρίβειες αυτών των συστημάτων. Η ανάπτυξη των δικτύων μόνιμων σταθμών και στην Ελλάδα (HEPOS) σε συνδυασμό με τον εμπορικό ανταγωνισμό των κατασκευαστών των δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού, θα έχει σαν οικονομική συνέπεια και τη μείωση του κόστους τους.

Τα πιο πάνω όργανα και συστήματα συμπληρώνονται και από τις νέες εξελισσόμενες μεθόδους και όργανα, όπως είναι ο αερομεταφερόμενος σαρωτής Lidar με περιστρεφόμενο κάτοπτρο σάρωσης και το ραντάρ απλού και συνθετικού διαφράγματος συμβολομετρίας. Το Lidar έχει τη ικανότητα συλλογής μεγάλου όγκου δεδομένων, που καλύπτουν με μεγάλη λεπτομέρεια

την τοπογραφική επιφάνεια, ακόμα και περιοχές που καλύπτονται με βλάστηση, διότι αρκεί μια ακτίνα να περάσει τη βλάστηση και να φτάσει στο έδαφος. Παίρνει δεδομένα ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες, ημέρα και νύχτα. Το ραντάρ (Radiation Detection and ranging) περιλαμβάνεται στις μεθόδους τηλεπισκόπησης και θεωρείται ένα παντός καιρού εικονοληπτικό σύστημα, έχει όμως αρκετά προβλήματα με το ανάγλυφο του εδάφους, τα οποία εξαλείφονται με το IfSAR, το ραντάρ συνθετικού διαφράγματος συμβολομετρίας (Interferometric Synthetic Aperture Radar). Το τελευταίο έχει τη δυνατότητα να μετρήσει με μεγάλη ακρίβεια και τις τρεις διαστάσεις του στόχου στο έδαφος.

Οι νέοι τύποι γεωδαιτικών οργάνων και μεθόδων μέτρησης, που παρουσιάζονται συνεχώς και με γρήγορους ρυθμούς, σε συνδυασμό με τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών, έχουν αυτοματοποιήσει σε σημαντικό βαθμό την εργασία του Τοπογράφου Μηχανικού, διευκολύνοντάς τον κατά την εργασία του και βελτιώνοντας κατά πολύ τα αποτελέσματά του. Τώρα πλέον έχει τη δυνατότητα με την επιλογή των καταλληλότερων για κάθε εργασία οργάνων και μεθόδων, να έχει, σε πολύ συντομότερο χρόνο, με σημαντική οικονομία και με σημαντικά λιγότερο, σε σχέση με το παρελθόν, κόπο, πολύ πιο ακριβή αποτελέσματα, σε πλήθος εφαρμογών, προσφέροντας αξιόπιστο και επιστημονικό έργο.

Η μέθοδος και τα όργανα, που θα επιλεγούν για μια εργασία, εξαρτώνται από το σκοπό για τον οποίο γίνεται η εργασία, καθώς και από την ακρίβεια που απαιτείται. Επομένως, για κάθε κατηγορία οργάνου, αλλά και για κάθε όργανο ακόμα, της συγκεκριμένης κατηγορίας, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να εξετάζεται πού και πώς θα μπορούσε να αξιοποιηθεί, με ποιες διαδικασίες κατά τη μέτρηση, πώς θα πρέπει να διορθωθούν και να αναχθούν τα μετρημένα μήκη, ποια είναι η ακρίβεια που επιδιώκεται και τέλος ποιο είναι το αναμενόμενο κόστος, προκειμένου να προκύψουν τα καλύτερα, από οικονομοτεχνικής άποψης, αποτελέσματα.

ΑΝΑΓΩΓΕΣ ΜΗΚΩΝ

Η μέτρηση ενός κεκλιμένου μήκους από το σημείο Α προς το σημείο Β (L_{AB}) μπορεί να γίνει με:

Επίγειες μεθόδους (EDM – Total Station)

Δορυφορικές μεθόδους (δύο δέκτες GPS τοποθετημένους στα Α και Β).

- 1^η περίπτωση (Επίγεια):

Μετρώ και διορθώνω:

Λόγω σταθεράς του συστήματος «όργανο + ανακλαστήρας»

Λόγω διαθλασιμότητας (μετεωρολογικά δεδομένα)

- 2^η περίπτωση (GPS):

Από ταυτόχρονες μετρήσεις και επεξεργασία δεδομένων προκύπτουν οι συνιστώσες ΔX , ΔY , ΔZ του διανύσματος AB και ισχύει:

$$L_{AB} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$$

Για χρήση μηκών σε

ΚΡΑΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

(Σχήμα)

1. Ανεξάρτητα από τη χρησιμοποιούμενη χαρτογραφική προβολή, **υποχρεωτικά** πρέπει να γίνει **Αναγωγή στη σφαίρα** (ή στο ελλειψοειδές αναφοράς ή στη μ.σ.θ.):

$$D_{AB} = \sqrt{\frac{L^2 - \Delta h^2}{\left(1 + \frac{h_A}{R}\right)\left(1 + \frac{h_B}{R}\right)}}$$

Αυτό ισχύει:

- Για πλευρές τριγωνομετρικών δικτύων
 - Για πλευρές οδεύσεων
 - Για μήκη πολικών συντεταγμένων αποτύπωσης
2. Για μήκη μέχρι 10 – 12 km ισχύει: **D = S**
 3. Το μήκος **d** που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς των συντεταγμένων στο Κ.Σ.Α. είναι:

$$d_{AB} = D_{AB} \cdot m \quad \text{ή} \quad d_{AB} = S_{AB} \cdot m$$

όπου m = συντελεστής χαρτογραφικής απεικόνισης

Για χρήση μηκών σε

ΤΟΠΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

(Σχήμα)

Χρησιμοποιούνται οι οριζόντιες αποστάσεις d_o :

$$d_o = L_{AB} \cdot \sin z_{AB}$$

ή

$$d_o = \sqrt{L_{AB}^2 - (BB')^2}$$

Βιβλιογραφία

- [1] Αγατζά – Μπαλοδήμου Α.-Μ., Μπαλοδήμος Δ.-Δ.: «Εισαγωγή στη Γεωδαισία», Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ, ΣΑΤΜ, Αθήνα, 1996-1997
- [2] Αραμπατζή Ο.: «Σημειώσεις Ταχυμετρίας», Αθήνα, Μάιος 1986
- [3] Balodimos D.: «Geodetic Connection Between Greece and Italy», 1977
- [4] Βέης Γ., Παπαζήση Κ.: «Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας», Αθήνα, 1989
- [5] Δεληκαράογλου Δ.: «Ειδικά Θέματα Δορυφορικής Γεωδαισίας», Αθήνα, 2005
- [6] Εργαστήριο Γεωδαισίας: «Από τον Ήρωνα στους γεωδαιτικούς δορυφόρους. Η ιστορική εξέλιξη των τοπογραφικών οργάνων», ΑΠΘ, ΤΠΜ
- [7] «GIM International» : Περιοδικό, τεύχος 23, Οκτώβριος 2009
- [8] «GIM International»: Περιοδικό, τεύχος 24, Ιούλιος, 2010
- [9] «GIM International»: Περιοδικό, τεύχος 24, Αύγουστος 2010
- [10] «GPS WORLD»: Περιοδικό, τεύχος, Ιανουάριος 2006
- [11] Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ.: «Εφαρμοσμένη Γεωδαισία», Εκδόσεις Ζήτη, Μάρτιος 2010
- [12] Λιβιεράτος Ε., Παπαζήση Κ.: «Ανασκόπησις των μεθόδων και οργάνων της Ηλεκτρονικής Γεωδαισίας», Τεχνικά Χρονικά, Ιούλιος 1972
- [13] Μπαλοδήμος Δ.-Δ., Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ.: «Η εξέλιξη των επίγειων συμβατικών γεωδαιτικών οργάνων τον 20ο αιώνα στην Ελλάδα», Επιστημονικό Συνέδριο, «Η εξέλιξη των οργάνων, των μεθόδων και των συστημάτων μετρήσεων των επιστημών της αποτύπωσης στην Ελλάδα», Θεσσαλονίκη, 2005
- [14] Μπαλοδήμος Δ.-Δ., Σταθάς Δ.: «Γεωδαιτικά όργανα και μέθοδοι μέτρησης γωνιών και μηκών», Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ, ΣΑΤΜ, Αθήνα, 2002
- [15] Μπαλοδήμος Δ.-Δ.: «Ειδικές γεωδαιτικές Αποτυπώσεις», Αθήνα, 1993
- [16] Μπαλοδήμος Δ.-Δ., Λάμπρου Ε., Πανταζής Γ.: «Γεωδαιτικές μετρήσεις ακριβείας», Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ, ΣΑΤΜ, Αθήνα, 2005
- [17] Μπιλλήρης Χ., Μητσακάκη Χ., Αγατζά – Μπαλοδήμου Α.-Μ., Τσακίρη Μ., Σταθάς Δ.: «Εισαγωγή στη Γεωδαισία», Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ, ΣΑΤΜ, Αθήνα, 2006
- [18] Νικολίτσας Κ., Λάμπρου Ε.: «Η εξέλιξη της τεχνολογίας των επίγειων συμβατικών γεωδαιτικών οργάνων και η ανάγκη αλλαγής του προτύπου

- πιστοποιήσής τους», Παρουσίαση στο «2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Οι σύγχρονες διαστάσεις των μετρητικών επιστημών και η συμβολή τους στην απεικόνιση, την παρακολούθηση και το σχεδιασμό του χώρου», Αθήνα, Δεκέμβριος, 2006, πρακτικά συνεδρίου, ηλεκτρονική μορφή
- [19] Πανταζής Γ.: «Γεωμετρική τεκμηρίωση τεχνητών και φυσικών κατασκευών σε μεγάλες κλίμακες», Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ, ΣΑΤΜ, Αθήνα, 2005
- [20] Παραδείσης Δ.: «Σημειώσεις Δορυφορικής Γεωδαισίας, κέντρο δορυφόρων Διονύσου», Σημειώσεις μαθήματος, ΕΜΠ, ΣΑΤΜ, Αθήνα, Νοέμβριος 2000
- [21] Παπαζήση Κ.: «Δορυφορικά δίκτυα αποτυπώσεων χωρίς ταυτόχρονες παρατηρήσεις», Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 1981
- [22] Ρωσσικόπουλος Δ.: «Από τον Όμηρο στον Πτολεμαίο. Αναδρομή στα όργανα και στις μεθόδους της πρώτης γεωμετρίας», Επιστημονικό Συνέδριο, «Η εξέλιξη των οργάνων, των μεθόδων και των συστημάτων μετρήσεων των επιστημών της αποτύπωσης στην Ελλάδα», Θεσσαλονίκη, 2005
- [23] Ρωσσικόπουλος Δ.: «Η μέθοδος του τριγωνισμού από την Πυθαγόρεια τριάδα στα συστήματα αναφοράς των τεσσάρων διαστάσεων»
- [24] Σαββαΐδης Π.: «Μια σύντομη ιστορική αναδρομή στην ιστορική εξέλιξη των τοπογραφικών οργάνων», Επιστημονικό Συνέδριο, «Η εξέλιξη των οργάνων, των μεθόδων και των συστημάτων μετρήσεων των επιστημών της αποτύπωσης στην Ελλάδα», Θεσσαλονίκη, 2005
- [25] Σταθάς Δ.: «Διερεύνηση και Εντοπισμός στη Μέτρηση Μηκών με EDM», Διδακτορικά διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 1985
- [26] Σταθάς Δ.: «Σημειώσεις για αναγωγές μηκών», Σίκινος, 2010
- [27] Τοκμακίδης Κ., Βλάχος Δ.: «Το Ευπαλίνιο όρυγμα», Επιστημονικό Συνέδριο, «Η εξέλιξη των οργάνων, των μεθόδων και των συστημάτων μετρήσεων των επιστημών της αποτύπωσης στην Ελλάδα» Θεσσαλονίκη, 2005
- [28] Torge W.: «Γεωδαισία» / Μετάφραση στα Ελληνικά: Αραμπατζή Ο., Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2000
- [29] Τσακίρη Μ.: «Εισαγωγή στο GPS», Σημειώσεις μαθήματος Γεωδαισία II, ΕΜΠ, ΣΑΤΜ, Αθήνα, 2005
- [30] Τσακίρη Μ. : «Δίκτυα GPS», Σημειώσεις μαθήματος Γεωδαισία II, ΕΜΠ, ΣΑΤΜ, Αθήνα, 2005
- [31] Φωτίου Α., Πικριδάς Χ.: «GPS και γεωδαιτικές εφαρμογές», Εκδόσεις Ζήτη, 2006
- [32] Χαντζόπουλος Ν.: «Τοπογραφία»

Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

- www.Avsite.gr
- www.geotech.gr
- www.GIM-INTERNATIONAL.com
- www.gpsworld.com
- www.HEPOS.gr
- www.metricea.gr
- www.michanikos.gr
- www.topcon.gr