



UNIVERSITY OF
PATRAS
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

Σημειώσεις διαλέξεων «Στοιχεία Γεωδαισίας»

Διάλεξη 8
07/06/2022

Λευθεριώτης Γεώργιος
Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
Πανεπιστήμιο Πατρών

Δορυφορικός Εντοπισμός

- Ο δορυφορικός εντοπισμός αναφέρεται στη χρήση τεχνητών δορυφόρων για τον ακριβή εντοπισμό σημείων στην ΦΓΕ.
- Σήμερα χρησιμοποιείται ο γενικός όρος **Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης (GNSS)** για να περιγράψει τα συστήματα δορυφορικής πλοήγησης (satellite navigation) που παρέχουν αυτόνομο εντοπισμό με παγκόσμια κάλυψη σε συγκεκριμένο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς.
- Οι χρήστες των συστημάτων GNSS προσδιορίζουν τη θέση τους με ακρίβεια που ποικίλει από λίγα cm έως λίγα m μέσω ειδικών δεκτών οι οποίοι λαμβάνουν τα δορυφορικά σήματα .
- Μέχρι το 2010, το μόνο πλήρως λειτουργικό GNSS ήταν το στρατιωτικό σύστημα **NAVSTAR Global Positioning System (GPS)**.
- Σήμερα το GPS εξακολουθεί να είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα GNSS στον κόσμο, αλλά οι μεγάλες χώρες έχουν πλέον αναπτύξει τα δικό τους συστήματα: **GLONASS** (Russia), **Beidou** (Κίνα) και **Galileo** (Ευρώπη).

Δορυφορικός Εντοπισμός

Αρχή Λειτουργίας του GPS

- Το **GPS** είναι ένα στρατιωτικό σύστημα πλοήγησης, το οποίο σχεδιάστηκε, χρηματοδοτήθηκε και ελέγχεται από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ.
- Ο πρωταρχικός στόχος του GPS ήταν για αμυντικούς/στρατιωτικούς σκοπούς, αλλά η χρήση του είναι ελεύθερη για όλους τους μη στρατιωτικούς χρήστες.
- Ο πρώτος δορυφόρος ετέθη σε τροχιά το 1978 ενώ σήμερα αποτελείται από περισσότερους από **24** δορυφόρους (31-34), οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε έξι (**6**) τροχιακά επίπεδα έτσι ώστε κάθε τροχιακό επίπεδο να περιλαμβάνει τουλάχιστον τέσσερεις (**4**) δορυφόρους.
- Οι δορυφόροι περιστρέφονται σε απόσταση περίπου **20.200 km** πάνω από την επιφάνεια της Γης εκτελώντας μια ολόκληρη περιστροφή γύρω από τη Γη σε **12 ώρες**.
- Οι θέσεις τους είναι τέτοιες ώστε ένας δέκτης στη Γη λαμβάνει ανά πάσα χρονική στιγμή τα σήματα τουλάχιστον από 4 δορυφόρους.

Δορυφορικός Εντοπισμός

Εφαρμογές του GPS

- ✓ **Τοπογραφία/Χαρτογραφία** στη στεριά, θάλασσα και στον αέρα, συλλογή δεδομένων για Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS), τοπογραφικές εργασίες ακριβείας, χρήση σε γεωφυσικές εργασίες.
- ✓ **Γεωδαιτικές εφαρμογές**, όπως ίδρυση γεωδαιτικών δικτύων ελέγχου σε τοπική ή εθνική κλίμακα, προσδιορισμός γεωειδούς και υψομετρικού υποβάθρου, ακριβείς εργασίες παρακολούθησης μετακινήσεων.
- ✓ **Γεωδυναμικές εφαρμογές**, με σκοπό να διαπιστωθεί πιθανή κίνηση τεκτονικών πλακών.
- ✓ **Πλοήγηση** σε στεριά, θάλασσα και αέρα, που περιλαμβάνει εφαρμογές κινηματικού εντοπισμού μεγάλης ή μικρής ακρίβειας.
- ✓ **Στρατιωτικές εφαρμογές**
- ✓ **Χρήσεις αναψυχής**
- ✓ **Άλλες χρήσεις** όπως προσδιορισμός θέσης ατράκτου αεροσκαφών κλπ

Στοιχεία Γεωδαισίας

5/20

Δορυφορικός Εντοπισμός

GPS (Global Positioning System - Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης)



Δορυφορικός Εντοπισμός

Πλεονεκτήματα του GPS

- ✓ **Σχετικά μεγάλες ακρίβειες** προσδιορισμού θέσης, που κυμαίνονται από δεκάμετρα ως λίγα χιλιοστά.
- ✓ Ο προσδιορισμός θέσης γίνεται ταυτόχρονα σε **τρεις διαστάσεις**, δηλαδή **οριζοντιογραφικός** και **υψομετρικός** εντοπισμός.
- ✓ Προσδιορισμός της **ταχύτητας** και του **χρόνου** σε επίπεδα ακρίβειας που αντιστοιχούν σε αυτά του προσδιορισμού θέσης.
- ✓ Διαθέσιμο στους χρήστες **οπουδήποτε** και αν βρίσκονται, στον αέρα, στη ΦΓΕ ή στη θάλασσα.
- ✓ Σχετικά **μικρό κόστος** για το σύστημα δέκτη/κεραίας, ενώ επίσης **δεν απαιτείται συνδρομή** χρήσης του GPS.
- ✓ Σύστημα **παντός καιρού**, διαθέσιμο **24 ώρες** καθημερινά.

Δορυφορικός Εντοπισμός

Τμήματα του GPS

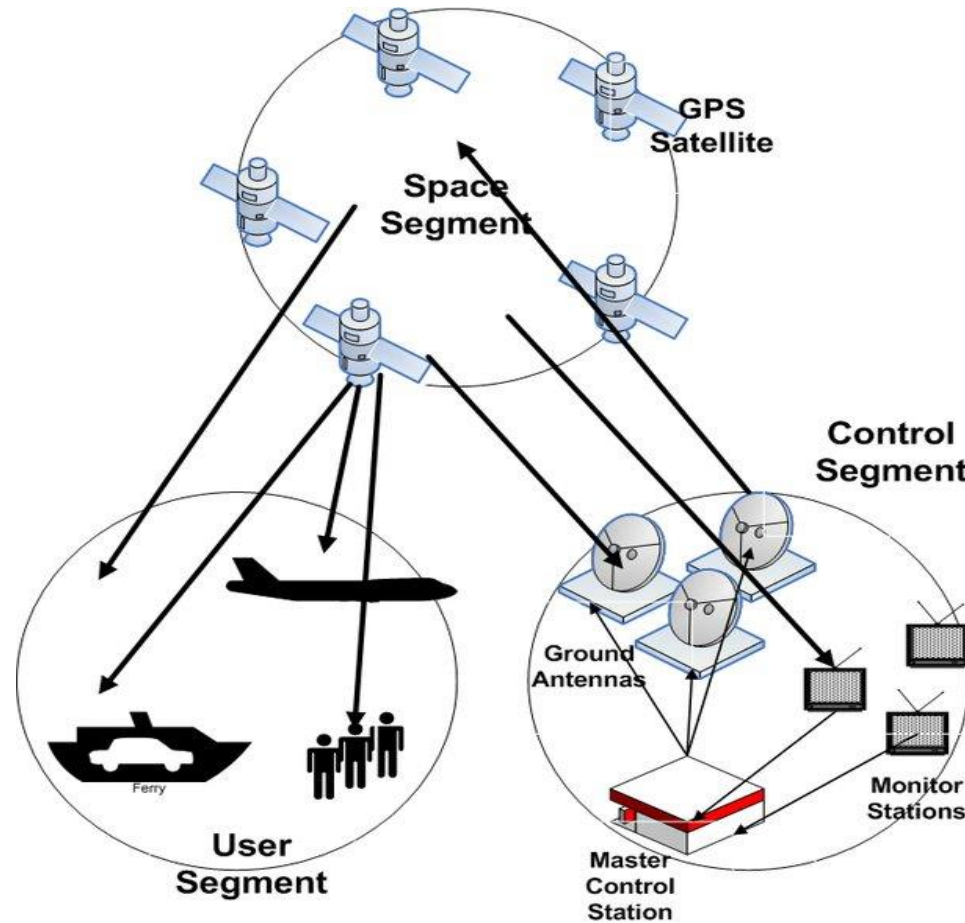
Το σύστημα GPS χωρίζεται σε τρία τμήματα:

1. Το **Τμήμα του Διαστήματος**, το οποίο περιλαμβάνει τους δορυφόρους οι οποίοι εκπέμπουν τα σήματα που είναι απαραίτητα για την λειτουργία του συστήματος.
2. Το **Τμήμα Ελέγχου**, το οποίο περιλαμβάνει τους γήινους σταθμούς ελέγχου που έχουν την ευθύνη της παρακολούθησης των δορυφόρων, των υπολογισμών για τις τροχιές τους καθώς και όλο τον απαραίτητο καθημερινό έλεγχο του Τμήματος του Διαστήματος.
3. Το **Τμήμα των Χρηστών**, το οποίο περιλαμβάνει την ποικιλία εφαρμογών, οργάνων και υπολογιστικών τεχνικών που δίνουν στους χρήστες τις λύσεις εντοπισμού θέσης.

Στοιχεία Γεωδαισίας

Δορυφορικός Εντοπισμός

Τμήματα του GPS



Δορυφορικός Εντοπισμός

Αρχή Λειτουργίας του GPS

- Η αρχή λειτουργίας του προσδιορισμού θέσης με το GPS βασίζεται θεωρητικά στην **οπισθοτομία** στο χώρο, δηλαδή την ταυτόχρονη μέτρηση μηκών από τους δορυφόρους στους δέκτες.
- Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει ο δέκτης GPS να μετρήσει τον **χρόνο** που απαιτείται να ταξιδέψει το σήμα από τον δορυφόρο στον δέκτη.
- Για να μετρηθεί ο χρόνος αυτός απαιτείται ακριβής **χρονόμετρηση**.
- Είναι απαραίτητη η ακριβής γνώση της **θέσης των δορυφόρων** στην τροχιά τους κάθε χρονική στιγμή.
- Τέλος, πρέπει να γίνουν **διορθώσεις** για καθυστερήσεις που οφείλονται στην ατμόσφαιρα καθώς το σήμα ταξιδεύει μέσα σε αυτή.
- Η μέτρηση με χρήση του GPS βασίζεται στο ότι οι δορυφόροι στο διάστημα είναι **σημεία αναφοράς** που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό της θέσης στην γήινη επιφάνεια.

Δορυφορικός Εντοπισμός

Αρχή Λειτουργίας του GPS

- Η μέτρηση της απόστασης προς τους δορυφόρους όταν αυτοί συνεχώς κινούνται στο διάστημα επιτυγχάνεται μετρώντας το χρόνο που απαιτείται για το σήμα που στέλνει ο δορυφόρος να φτάσει στον δέκτη.
- **Απόσταση = Ταχύτητα x Χρόνος** που χρειάστηκε να διανυθεί η απόσταση
- Στην περίπτωση του GPS η ταχύτητα είναι ίση με την ταχύτητα του φωτός στο κενό επειδή αναφερόμαστε σε ραδιοσήματα.
- Μετράται λοιπόν ο χρόνος διάδοσης του σήματος από το δορυφόρο προς τον δέκτη, δηλαδή της παρέλευσης του χρόνου μεταξύ της χρονικής στιγμής εκπομπής (τ_E) του σήματος από ένα δορυφόρο GPS και της χρονικής στιγμής λήψης (τ_A) του ίδιου σήματος σε ένα δέκτη GPS.
- Η μετρούμενη διαφορά $\tau = \tau_A - \tau_E$ πολλαπλασιαζόμενη με την ταχύτητα του φωτός ($c = 299792458 \text{ km/sec}$) δίνει την απόσταση δορυφόρου-δέκτη.

Δορυφορικός Εντοπισμός

Αρχή Λειτουργίας του GPS

- Οι μετρήσεις αυτές καλούνται **μετρήσεις ψευδοαπόστασης** δεδομένου ότι διαφέρουν από την πραγματική απόσταση λόγω **σφαλμάτων** (ατμοσφαιρικών καθυστερήσεων του σήματος, μη συγχρονισμού των χρονομέτρων του δέκτη με τα χρονόμετρα των δορυφόρων).
- Οι μετρήσεις ψευδοαπόστασης γίνονται συνήθως με μια αβεβαιότητα της τάξης μερικών μέτρων.
- Η ακριβής θέση των δορυφόρων είναι απαραίτητη. Επειδή βρίσκονται σε πολύ μεγάλο ύψος (21000 km) οι τροχιές τους είναι εύκολα προβλέψιμες. Μικρές αποκλίσεις μετρώνται και διορθώνονται από τους σταθμούς ελέγχου.
- Τέλος, επειδή τα σήματα GPS ταξιδεύουν μέσα από τη γήινη ατμόσφαιρα (ιονόσφαιρα-τροπόσφαιρα) προκαλούνται καθυστερήσεις που μεταφράζονται σε σφάλματα της μετρημένης απόστασης. Πολλά από αυτά μπορούν να υπολογιστούν και να απομακρυνθούν από τις μετρήσεις.

Δορυφορικός Εντοπισμός

Αρχή Λειτουργίας του GPS

- Ο προσδιορισμός θέσης GPS γίνεται στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς **WGS84 (World Geodetic System 1984)** του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ.
- Το WGS84 είναι ένα επίγειο γεωκεντρικό σύστημα κατά το οποίο θεωρείται ότι δεν υπάρχει σχετική περιστροφή του συστήματος ως προς το φλοιό της γης συναρτήσει του χρόνου.
- Το WGS84, από τη αρχή της δημιουργίας του (μέσα του 1980), έχει υποστεί διάφορες βελτιώσεις, που για τις τρέχουσες πρακτικές τοπογραφικές εργασίες δεν έχουν ουσιαστική επίδραση.
- Το ελλειψοειδές του WGS84 ορίζεται από τις εξής παραμέτρους:
 - ✓ $a = 6378137.0 \text{ m}$ (μεγάλος ημιάξονας)
 - ✓ $1/f = 298.257223563$ (επιπλάτυνση),
 - ✓ $GM = (3986004.418 \pm 0.008) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$ (γήινη βαρυτική σταθερά)
 - ✓ $\omega = 7292115 \times 10^{-11} \text{ rad/sec}$ (γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γης).

Δορυφορικός Εντοπισμός

Μετρήσεις GPS

- Κάθε δορυφόρος GPS μεταδίδει ένα μοναδικό σήμα ναυσιπλοΐας το οποίο επικεντρώνεται σε δύο συχνότητες της L ζώνης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου: η L_1 στα **1575.42 MHz** και η L_2 στα **1227.60 MHz**.
- Εκτός από μετρήσεις ψευδοαποστάσεων, το GPS παρέχει και τις μετρήσεις **φάσης του φέροντος κύματος** που στηρίζονται στη δυνατότητα μέτρησης της απόστασης μεταξύ του εκάστοτε δορυφόρου GPS και ενός δέκτη.
- Η μέτρηση της φάσης του φέροντος κύματος γίνεται με μια ακρίβεια της τάξης του 1% του αντιστοίχου μήκους κύματος λ του χρησιμοποιούμενου σήματος, δηλ. είναι της τάξης του 0.19 cm για τη συχνότητα L_1 ($\lambda_1 = 19.029$ cm) και 0.24 cm για τη συχνότητα L_2 ($\lambda_2 = 24.421$ cm).
- Οι μετρήσεις αυτές είναι ακριβέστερες κατά δύο τουλάχιστον τάξεις μεγέθους από τις μετρήσεις ψευδοαπόστασης και αποτελούν τον μόνο τύπο μετρήσεων υψηλής ακριβείας στις οποίες βασίζονται οι γεωδαιτικές και τοπογραφικές εφαρμογές.

Δορυφορικός Εντοπισμός

Πηγές σφαλμάτων στις μετρήσεις GPS

Τα σφάλματα που επηρεάζουν τις παρατηρήσεις GPS χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες.

- Τα σφάλματα που σχετίζονται με τους δορυφόρους, όπως το σφάλμα της τροχιάς και το σφάλμα των χρονομέτρων των δορυφόρων.
- Τα σφάλματα που σχετίζονται με τους δέκτες, το σφάλμα της μεταβολής του κέντρου φάσης της κεραίας και το σφάλμα λόγω των μεταβολής στην καθυστέρηση μετάδοσης του σήματος από τα ηλεκτρονικά των δεκτών.
- Τα σφάλματα που σχετίζονται με τη διάδοση του σήματος και αφορούν τα ατμοσφαιρικά σφάλματα (τροποσφαιρικά και ιονοσφαιρικά) και το σφάλμα της πολυανάκλασης του σήματος (multipath).

Κάποια από τα παραπάνω σφάλματα δύνανται να μοντελοποιηθούν και να εκτιμηθούν διορθώσεις στις παρατηρήσεις.

Δορυφορικός Εντοπισμός

Τεχνικές Μέτρησης GPS

Οι δύο βασικές τεχνικές μέτρησης με το GPS είναι:

- Ο **απόλυτος εντοπισμός** θέσης
- Ο **σχετικός εντοπισμός** θέσης.

Το αποτέλεσμα και με τις δύο αυτές τεχνικές είναι οι τρισδιάστατες καρτεσιανές συντεταγμένες θέσης συνήθως σε μορφή **X, Y, Z** (ή σε γεωδαιτικές συντεταγμένες **ϕ, λ, h**) στο WGS84 σύστημα αναφοράς.

Εάν τα αποτελέσματα απαιτούνται να μετατραπούν σε διαφορετικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (π.χ. **ΕΓΣΑ87**) τότε αυτά μετατρέπονται εύκολα με χρήση κατάλληλων παραμέτρων μετασχηματισμού.

Ο σχετικός εντοπισμός θέσης είναι αυτός που εφαρμόζεται συνήθως στις τοπογραφικές εργασίες επειδή οι θέσεις των σημείων προσδιορίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Δορυφορικός Εντοπισμός

Τεχνικές Μέτρησης GPS – Σχετικός Εντοπισμός

- Στον σχετικό εντοπισμό χρησιμοποιούνται κυρίως οι μετρήσεις φέροντος φάσης και για την επεξεργασία τους ισχύουν πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις
- Υπολογίζεται μετά από κατάλληλη επεξεργασία των μετρήσεων μέσω ειδικού λογισμικού, το τρισδιάστατο διάνυσμα $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ της βάσης μεταξύ του δέκτη αναφοράς και του δεύτερου δέκτη (σταθερού ή μετακινούμενου).
- Οι τελικές συντεταγμένες (X, Y, Z) του μετακινούμενου δέκτη δίνονται ως:

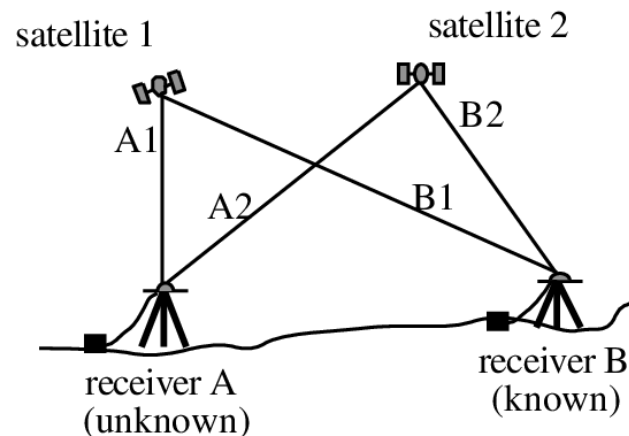
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{μετακινούμενου}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{αναφοράς}} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}$$

Όταν χρησιμοποιούνται παραπάνω από δύο δέκτες (έστω R), τότε ο αριθμός των άγνωστων σταθμών για τους οποίους ζητείται να υπολογιστούν οι τρισδιάστατες συντεταγμένες είναι **R-1** ως προς τον σταθμό αναφοράς.

Δορυφορικός Εντοπισμός

Τεχνικές Μέτρησης GPS – Σχετικός Εντοπισμός

- Οι βασικές παραλλαγές στην τεχνική μέτρησης του σχετικού εντοπισμού είναι ο στατικός, ο γρήγορος στατικός, ο ψευδοκινηματικός και ο κινηματικός εντοπισμός.
- Ο στατικός εντοπισμός δίνει ακρίβειες της τάξης λίγων mm και απαιτεί ταυτόχρονη χρήση τουλάχιστον δύο δεκτών (receiver). Ο ένας βρίσκεται σε γνωστό σημείο και ο δεύτερος βρίσκεται σε άγνωστο σημείο του οποίου η θέση ζητείται.
- Η Ελλάδα έχει αναπτύξει δίκτυο μόνιμων δορυφορικών σταθμών GPS το οποίο παρέχει υπηρεσίες προσδιορισμού θέσης, τόσο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου (RTK) όσο και για την εκ των υστέρων επεξεργασία μετρήσεων.
- Το δίκτυο ονομάζεται **HEPOS** (HEllenic POsitioning System) και αποτελείται από **98** μόνιμους σταθμούς αναφοράς κατανεμημένους σε ολόκληρη τη χώρα.



Δορυφορικός Εντοπισμός

Τεχνικές Μέτρησης GPS – Απόλυτος Εντοπισμός

- Ο απόλυτος εντοπισμός της θέσης μπορεί να γίνει είτε σε πραγματικό χρόνο και άρα αναφερόμαστε στην λύση ναυσιπλοΐας (**navigation solution**) είτε εκ των υστέρων (**post-processing**) αξιοποιώντας όλες τις μετρήσεις, δίνοντας έτσι μεγαλύτερη ακρίβεια στην τελική λύση.
- Οι ακρίβειες στον απόλυτο εντοπισμό θέσης κυμαίνονται από:
 - ✓ 0-30 m όταν χρησιμοποιείται λειτουργία τυπικού απόλυτου προσδιορισμού (SPS, standard positioning service).
 - ✓ 2-15m όταν χρησιμοποιείται λειτουργία ακριβούς απόλυτου προσδιορισμού (PPS, precise positioning service).
- Βελτιώσεις στην τεχνολογία των SPS δεκτών διπλής συχνότητας μπορεί να δώσει 50% βελτίωση στον τυπικό απόλυτο προσδιορισμό.
- Επίσης, όταν είναι γνωστές υψηλής ακρίβειας παράμετροι των χρονομέτρου των δορυφόρων, τότε υπάρχει βελτίωση 50% στον ακριβή απόλυτο εντοπισμό

Δορυφορικός Εντοπισμός

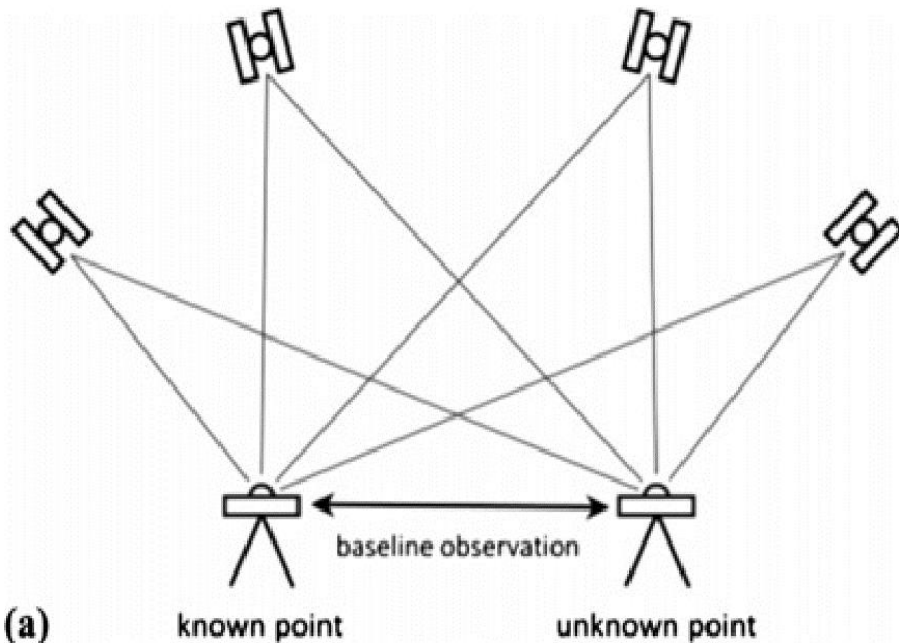
Τεχνικές Μέτρησης GPS – Απόλυτος Εντοπισμός

- Η **ψευδοαπόσταση** είναι το μέτρο της παρατηρούμενης απόστασης μεταξύ του δορυφόρου και της κεραίας του δέκτη σε κάποια χρονική στιγμή.
- Η απόσταση προκύπτει από τον χρόνο μετάδοσης του σήματος που μετράται με τον συσχετισμό κωδικών ψευδοαπόστασης που παράγονται από τον κάθε δορυφόρο με πανομοιότυπο κώδικα που παράγεται εσωτερικά από τον δέκτη.
- Εσωτερικά στον δέκτη γίνεται χρονική μετατόπιση του λαμβανόμενου από τον δορυφόρο κώδικα με το πανομοιότυπο σήμα του δέκτη μέχρι να επιτευχθεί μέγιστη συσχέτιση.
- Οι κώδικες του δέκτη παράγονται από το ίδιο χρονόμετρο του δέκτη ενώ οι κώδικες των δορυφόρων παράγονται από το σύστημα του κάθε δορυφόρου.
- Αναπόφευκτα **σφάλματα** χρονομέτρων στους δέκτες και στους δορυφόρους έχουν ως αποτέλεσμα η μετρημένη απόσταση να διαφέρει από την γεωμετρική απόσταση. Έτσι, η μετρημένη απόσταση ονομάζεται **ψευδοαπόσταση**.

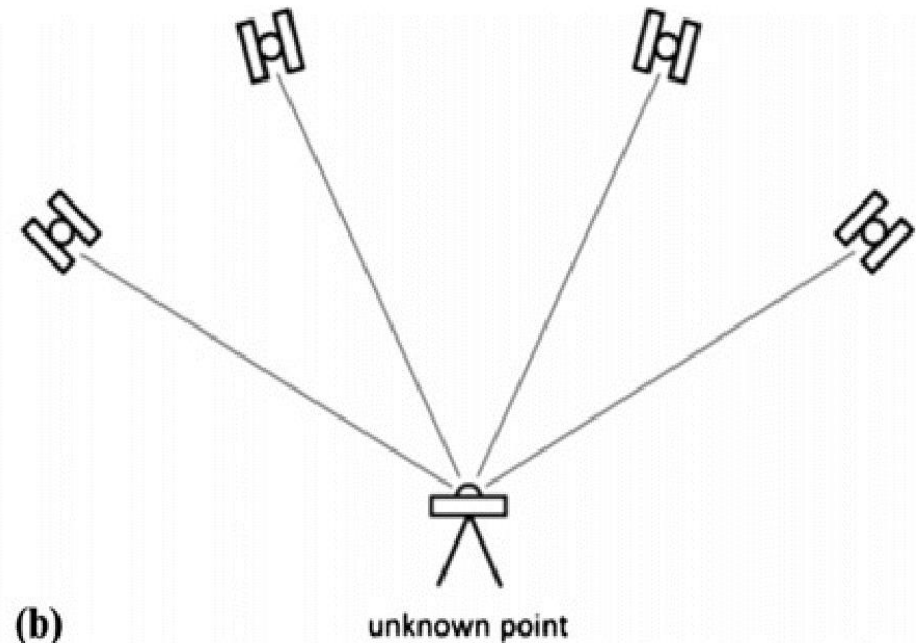
Δορυφορικός Εντοπισμός

Τεχνικές Μέτρησης GPS – Σχετικός και Απόλυτος Εντοπισμός

Σχετικός Εντοπισμός



Απόλυτος Εντοπισμός



Στοιχεία Γεωδαισίας

Βιβλιογραφία

- Μαθήματα Γεωδαισίας, 2^η Έκδοση, Γ. Γεωργόπουλος, Εκδόσεις Τζιόλα, 2019.
- Στοιχεία Τοπογραφίας, Ε. Στυλιανίδη, Εκδόσεις Δίσιγμα, 2011.
- Εφαρμοσμένη Γεωδαισία, 2^η Έκδοση, Ε. Λάμπρου, Γ. Πανταζής, Εκδόσεις Ζήτη, 2010.
- Γεωδαισία, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Γ. Γεωργόπουλος, Β. Γκίκας, Ε. Τελειώνη, Μ. Τσακίρη, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2011.