

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ  
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



ΔΠΜΣ

Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία

Διπλωματική Εργασία

GNSS: Μελέτη του διαστημικού τμήματος

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΑΤΣΑΡΟΣ

ΜΝΣΝΔ21023

Επιβλέπων:

Χρήστος Βαζούρας

Πειραιάς

Απρίλιος 2024

## ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ/ΖΗΤΗΜΑΤΑ COPYRIGHT

Το άτομο το οποίο εκπονεί την Διπλωματική Εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στην βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (εμπορικός, μη κερδοσκοπικός ή εκπαιδευτικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες ή χάρτες), του ποσοστού και της σημαντικότητας των πιθανών συνεπειών αυτής στην αγορά ή στη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου.

«Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή που ορίσθηκε από τη ΕΔιΕ του ΔΠΜΣ σύμφωνα με τον Κανονισμό Λειτουργίας του ΔΠΜΣ 'Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία'.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΜΕΛΟΣ Α': Καθηγητής Μ. Φαφαλιός

ΜΕΛΟΣ Β': Καθηγητής Α. Τσιγκόπουλος

ΜΕΛΟΣ Γ': Αναπληρωτής Καθηγητής Χ. Βαζούρας

Η έγκριση της Διπλωματικής Εργασίας από το Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών του Πανεπιστημίου Πειραιώς δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.»



*Κωνσταντίνος Κατσαρός,  
GNSS: Μελέτη του διαστημικού τμήματος*

### **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Χ. Βαζούρα για τη λεπτομερή καθοδήγηση και ανατροφοδότηση που παρείχαν σε όλα τα στάδια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, το θερμό ενδιαφέρον του για την πορεία της υλοποίησής της και την άμεση και ευγενική του ανταπόκριση στις ανησυχίες και τους προβληματισμούς που αντιμετώπισα.



## Περίληψη

Τα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GNSS) είναι τα αυτόνομα συστήματα γεω-εντοπισμού με παγκόσμια κάλυψη. Τα GNSS χρησιμοποιούν τεχνητούς δορυφόρους σε τροχιές γύρω από τη Γη που εκπέμπουν ραδιοκύματα σε διάφορες συχνότητες με πληροφορίες για τον χρόνο και τη θέση τους. Όταν ένας δέκτης έχει ανεμπόδιστο οπτικό πεδίο σε τουλάχιστον 4 δορυφόρους, το σύστημα μπορεί να προσδιορίσει τη θέση του με ακρίβεια που κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέτρα μέχρι και εκατοστά. Τα τέσσερα GNSS που βρίσκονται σε λειτουργία είναι τα GPS, GLONASS, Galileo και BeiDou που αναπτύσσονται και ελέγχονται από τις ΗΠΑ, την Ρωσία, την Ευρωπαϊκή Ένωση και την Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας αντίστοιχα. Οι δορυφόροι των συστημάτων αυτών αποτελούν τον δορυφορικό αστερισμό κάθε συστήματος και κινούνται επί το πλείστον σε μεσαίες γήινες τροχιές, πλην του συστήματος της Λαϊκής Δημοκρατίας της Κίνας που έχει υβριδικές τροχιές, συνδυάζοντας τις μεσαίες γήινες τροχιές με γεωσύγχρονες. Οι δορυφόροι είναι συνήθως καταναμημένοι σε 3 τροχιακά επίπεδα εκτός από το GPS, που χρησιμοποιεί 6 τροχιακά επίπεδα. Οι μελλοντικές προοπτικές εξέλιξης συμπεριλαμβάνουν την ενσωμάτωση των σημάτων από πολλαπλά συστήματα ώστε να επιτραπεί η ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια προσδιορισμού θέσης ακόμα και σε δύσκολα περιβάλλοντα διάδοσης H/M σημάτων.

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are autonomous geo-location systems with global coverage. GNSS use satellites in orbit around Earth and transmit radio signals in various frequencies with time and location data. When a receiver has an unobstructed line of sight to at least four satellites it can determine its geo-location with an accuracy ranging from a few dozen meters down to a centimeter. There are four GNSS in operation, namely GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou that are being developed and monitored by the USA, Russia, European Union, and People's Republic of China (PRC) respectively. Satellites in orbit are combined to create the satellite constellation of each system and they are usually in Middle Earth Orbits (MEO), except for BeiDou that uses hybrid orbits. Specifically, it combines satellites in MEO and Geostationary Orbits. All satellite constellations besides the GPS, are divided in three orbital planes. The GPS constellation on the other hand uses six orbital planes. The future challenges for the GNSS include the integration of signals from multiple systems to achieve better accuracy even in harsh environments that impede the propagation of electromagnetic waves.



*Κωνσταντίνος Κατσαρός,  
GNSS: Μελέτη του διαστημικού τμήματος*

### **Λέξεις–Κλειδιά**

Παγκόσμια Συστήματα Δορυφορικής Πλοήγησης, GPS, GLONASS, Galileo, Bei-Dou, Χαμηλές Γήινες Τροχιές, Μεσαίες Γήινες Τροχιές, Γεωσύγχρονες Τροχιές, Υβριδικές Τροχιές, Τροχιακά Επίπεδα, Ακρίβεια προσδιορισμού θέσης.

Global Navigation Satellite Systems, GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, Low Earth Orbit, Middle Earth Orbit, Geostationary Orbit, Hybrid Orbit, Orbital Planes, Positioning accuracy.



## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	v
Πίνακας Σχημάτων.....	viii
Συντμήσεις.....	ix
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GNSS).....	1
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	1
1.2 Βασικές αρχές λειτουργίας των GNSS.....	2
1.3 Χρήσεις των GNSS.....	4
Κεφάλαιο 2: Τροχιές παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης (GNSS).....	5
2.1 Χαμηλές Γήινες Τροχιές - Low Earth Orbits.....	6
2.2 Μεσαίες Γήινες τροχιές - Medium Earth Orbit.....	7
2.3 Γεωσύγχρονες και υψηλές Γήινες Τροχιές (Geosynchronous Orbits/High Earth Orbits).....	8
2.4 Υβριδικές Γήινες τροχιές – Hybrid Earth Orbits.....	9
Κεφάλαιο 3: Κύρια παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GNSS) και τα χαρακτηριστικά τους.....	10
3.1 Global Positioning System (GPS).....	10
3.2 GLONASS.....	13
3.3 Galileo.....	14
3.4 BeiDou.....	16
3.5 Σύγκριση των κύριων GNSS και των δορυφορικών αστερισμών τους....	17
Κεφάλαιο 4: Νέες τεχνολογίες και προοπτικές για τα GNSS.....	20
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	22
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	23



## Πίνακας Σχημάτων

Εικόνα 1: Ο πρώτος τεχνητός δορυφόρος Sputnik-1 .....	1
Εικόνα 2: Τα 3 βασικά τμήματα (segments) ενός GNSS .....	3
Εικόνα 3: Κατηγορίες τροχιάς δορυφόρου (LEO, MEO, GEO, Lunar).....	5
Εικόνα 4: Τροχιά Molniya .....	7
Εικόνα 5: Τα 5 σημεία Lagrange .....	8
Εικόνα 6: Δορυφορικός αστερισμός 24 θέσεων του Global Positioning System ..	11
Εικόνα 7: Ο δορυφορικός αστερισμός του GPS .....	12
Εικόνα 8: Ο δορυφορικός αστερισμός του GLONASS .....	13
Εικόνα 9: Ο δορυφορικός αστερισμός του Galileo .....	14
Εικόνα 10: Galileo status report .....	15
Εικόνα 11: Ο δορυφορικός αστερισμός του BeiDou.....	16
Εικόνα 12: Συγκριτικό γράφημα βασικών παραμέτρων GNSS .....	18
Εικόνα 13: Δείκτης PDOP, αριθμός δορυφόρων σε ενέργεια και γεωγραφική κάλυψη GNSS.....	19





## Συντμήσεις

DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency  
ESA: European Space Agency  
GDOP: Geometric Dilution of Precision  
GEO: Geosynchronous Earth Orbit  
GLONASS: Global Navigation Satellite System  
GNSS: Global Navigation Satellite System  
GPS: Global Positioning System  
GSA: European Global Navigation Satellite Systems Agency  
HDOP: Horizontal Dilution of Precision  
HEO: Highly Elliptical Orbit  
IAC: Russian Interstate Aviation Committee  
IGSO: Inclined Geosynchronous Orbit  
LEO: Low Earth Orbit  
MEO: Medium Earth Orbit  
NASA: National Aeronautics and Space Administration  
NNSS: Navy Navigation Satellite System  
PDOP: Position Dilution of Precision  
RNSS: Regional Navigation Satellite System  
SAR: Search and Rescue

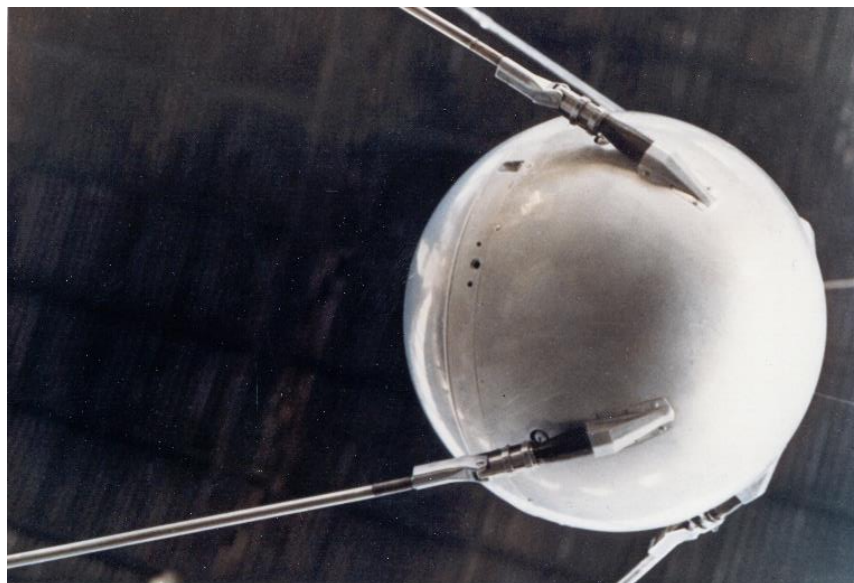


## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GNSS).

### 1.1 Ιστορική αναδρομή

Ο όρος παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (Global Navigation Satellite Systems – GNSS εφεξής), είναι ο γενικευμένος όρος που χρησιμοποιείται για τα αυτόνομα συστήματα γεω-εντοπισμού με παγκόσμια κάλυψη, που αποτελούνται από τεχνητούς δορυφόρους σε τροχιά γύρω από τη Γη καθώς και επίγειους σταθμούς παρακολούθησεων και ελέγχου των συστημάτων αυτών (Bonnor 2012).

Το έναυσμα για την έκτοτε αλματώδη εξέλιξη στα GNSS, έδωσε η εκτόξευση από τους Ρώσους το 1957, του πρώτου τεχνητού δορυφόρου με το όνομα Sputnik-1. Ο Sputnik-1 είχε σφαιρικό σχήμα διαμέτρου 58 εκατοστών και συνολικά 4 κεραίες μήκους 2,4 μέτρων (2 κεραίες) και 2,9 μέτρων (2 κεραίες) (Εικόνα 1). Όταν τέθηκε σε τροχιά για 21 μέρες, μέχρι και την εξάντληση των μπαταριών του, εξέπεμπε ραδιοκύματα, ενώ ο χρόνος που εκτελούσε μια πλήρη περιφορά της Γης ήταν 96,2 λεπτά (Zelenyi and Zakutnyaya 2017). Από την παρατήρηση των εκπεμπόμενων ραδιοκυμάτων του Sputnik-1, επιστήμονες στις ΗΠΑ έδειξαν ότι είναι δυνατός ο υπολογισμός παραμέτρων αυτών των σημάτων σε σχέση με την θέση του δορυφόρου ώστε να επιτρέπει τον προσδιορισμό της θέσης του, ανακάλυψη η οποία οδήγησε στην ιδέα της εξέλιξης ενός συστήματος μέσω του οποίου θα μπορούμε να προσδιορίζουμε τη θέση αντικειμένων στην επιφάνεια της Γης με τη χρήση τεχνητών δορυφόρων (Παλληκάρης et al. 2016).



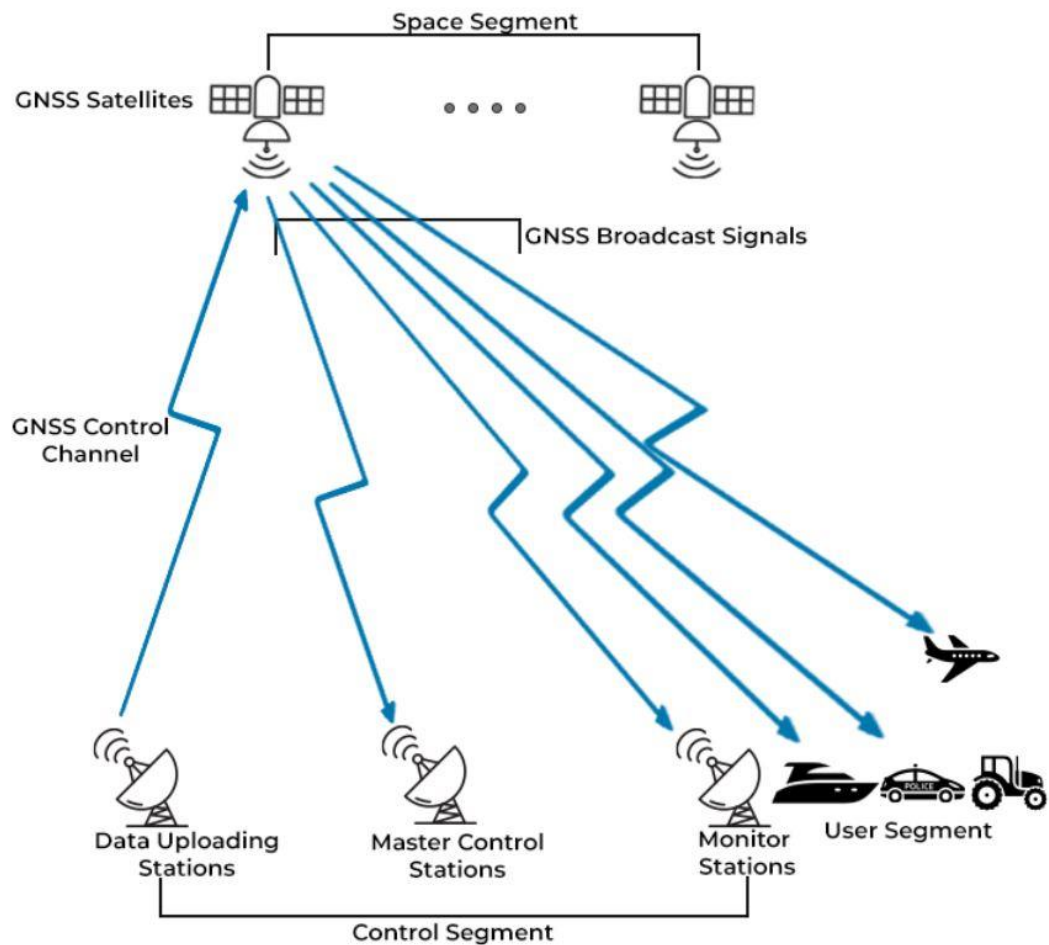
Εικόνα 1: Ο πρώτος τεχνητός δορυφόρος Sputnik-1



Έτσι, οι ΗΠΑ ανέπτυξαν κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 1960 το πρώτο Navy Navigation Satellite System (NNSS) με το όνομα Transit ενώ ακολούθησε η Σοβιετική Ένωση το 1979 με το Tsikada. Το Transit (ή αλλιώς NAVSAT) σχεδιάστηκε από το εργαστήριο Εφαρμοσμένης Φυσικής του πανεπιστημίου Johns Hopkins, είχε ακρίβεια μερικών δεκάδων μέτρων ενώ στην αρχή είχε σχεδιαστεί ως σύστημα με 4 τεχνητούς δορυφόρους σε τροχιά (Danchik 1984). Παρόλα αυτά μέχρι το 1968, ο δορυφορικός αστερισμός του Transit, δηλαδή η ομάδα τεχνητών δορυφόρων που συνεργάζονται ως σύστημα αποτελούνταν από 36 δορυφόρους (DARPA). Ο αρχικός του σκοπός ήταν να παρέχει ακριβή προσδιορισμό θέσης για τον στόλο υποβρυχίων των ΗΠΑ, αλλά μέσα στα χρόνια η χρήση του επεκτάθηκε και στα αεροπλάνα ενώ από το 1967 και μετά έγινε διαθέσιμο στο κοινό τόσο για εταιρική όσο και για ατομική χρήση. Με το Transit να βρίσκεται ήδη σε λειτουργία, το ναυτικό των ΗΠΑ είχε εστιάσει τις έρευνες του στην ανάπτυξη ενός νέου συστήματος που θα μπορούσε να προσδιορίσει την θέση με μεγαλύτερη ακρίβεια από αυτή του υπάρχοντος συστήματος. Έτσι το 1973 αναπτύχθηκε το Global Positioning System (GPS εφεξής) του οποίου ο πρώτος δορυφόρος εκτοξεύθηκε το 1978 ενώ ο δορυφορικός αστερισμός του ολοκληρώθηκε το 1993 με 24 δορυφόρους σε τροχιά. Αρχικά, το GPS ήταν ένα σύστημα που χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά από τις ένοπλες δυνάμεις των ΗΠΑ. Το 1983 με αφορμή την ρίψη Κορεάτικου αεροσκάφους από τη Ρωσία εξαιτίας λάθους στην πλοήγηση, ο τότε πρόεδρος των ΗΠΑ, Ronald Reagan ανακοίνωσε την διάθεση του συστήματος GPS στο κοινό. Μετά την ανάπτυξη του GPS από τις ΗΠΑ, ακολούθησαν και άλλες χώρες στην ανάπτυξη ανάλογων συστημάτων τόσο παγκόσμιας όσο και τοπικής κάλυψης που χρησιμοποιούνται σήμερα για διάφορους σκοπούς και θα αναλυθούν στο Κεφάλαιο 3.

## 1.2 Βασικές αρχές λειτουργίας των GNSS

Αυτή τη στιγμή λειτουργούν 4 GNSS με διαφορετικό σχεδιασμό, ηλικία και προέλευση, παρόλα αυτά οι βασικές αρχές λειτουργίας τους παραμένουν ίδιες και στηρίζονται στην θεωρία του προσδιορισμού θέσης ενός αντικειμένου με γνωστές αποστάσεις από τουλάχιστον 3 σημεία γνωστής θέσης. Κάθε GNSS αποτελείται από 3 τμήματα. Το διαστημικό τμήμα (Space Segment), το επίγειο τμήμα ελέγχου (Control Segment) και το τμήμα τελικού χρήστη (User Segment). Αρχικά το διαστημικό τμήμα αποτελείται από τον αστερισμό δορυφόρων του συστήματος. Οι δορυφόροι εκτοξεύονται σε καθορισμένες τροχιές και εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα με συχνότητα από 1,2–1,6 GHz (L-Band). Οι συχνότητες αυτές έχουν την δυνατότητα να επιτρέπουν μετρήσεις ικανοποιητικής ακρίβειας ενώ δεν απαιτούν πολύπλοκο εξοπλισμό και παρουσιάζουν χαμηλή εξασθένηση (Bousquet 2017). Το επίγειο τμήμα ελέγχου με τη σειρά του αποτελείται από επίγειους σταθμούς (κεντρικός σταθμός και σταθμοί παρακολούθησης), καθώς και από επίγειες κεραιές (Εικόνα 2). Τέλος, το τμήμα τελικού χρήστη απαρτίζεται από τους χιλιάδες χρήστες δεκτών GPS ανά την υφήλιο. Οι δέκτες αυτοί συνδυάζονται με ειδικό λογισμικό, που προβάλλει ένα χάρτη στην οθόνη της συσκευής GPS ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη ακρίβεια και αξιοποίηση από το χρήστη.



Εικόνα 2: Τα 3 βασικά τμήματα (segments) ενός GNSS

Ο γεωεντοπισμός μέσω GNSS μπορούν να αναλυθεί σε 5 επιμέρους στάδια. Το πρώτο στάδιο αφορά τους δορυφόρους που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη. Οι τεχνητοί αυτοί δορυφόροι φέρουν όργανα μέσω των οποίων υπολογίζουν τον χρόνο καθώς και τις παραμέτρους που προσδιορίζουν την τροχιά τους με μεγάλη ακρίβεια, ενώ σε περίπτωση που κάποιες από αυτές τις παραμέτρους τους χρειαστούν διορθώσεις, τις λαμβάνουν από τον επίγειο σταθμό ελέγχου. Στην συνέχεια, οι δορυφόροι των GNSS στέλνουν συνεχώς σήμα με πληροφορίες τόσο για την τροχιά όσο και για τον χρόνο. Αυτά τα σήματα είναι ικανά να διαπερνούν την ατμόσφαιρα της Γης και να φτάνουν στους δέκτες των χρηστών. Οι δέκτες λαμβάνουν ταυτόχρονα σήμα από πολλούς δορυφόρους που απαρτίζουν τον δορυφορικό αστερισμό του κάθε συστήματος και για κάθε ένα από τους δορυφόρους αναλύουν τις πληροφορίες χρόνου και τροχιάς και προσδιορίζουν με ακρίβεια τον χρόνο που χρειάστηκε το σήμα να φτάσει από τον δορυφόρο στον δέκτη. Με αυτές τις πληροφορίες οι δέκτες υπολογίζουν τον χρόνο και τη θέση τους και ως τελευταίο βήμα παρέχουν στον χρήστη τον προσδιορισμό της θέσης του για χρήση σε πλοήγηση, χαρτογράφηση κ.ά.



### 1.3 Χρήσεις των GNSS

Τα GNSS αποτελούν πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας μας, καθώς πέρα από την πλοήγηση χρησιμοποιούνται σε μια πλειάδα από δραστηριότητες. Οι εφαρμογές των GNSS μπορούν να προσδιοριστούν με βάση την κρισιμότητά τους από ζωτικές μέχρι μη-ζωτικές και απαιτούν, ανάλογα την κρισιμότητα, διαφορετικά χαρακτηριστικά και επιδόσεις. Στην κατηγορία των μη-ζωτικών ανήκουν οι υπηρεσίες που παρέχονται βασικά δεδομένα τοποθεσίας και χρονισμού. Σε αυτή την κατηγορία, ο χρήστης συνήθως χρησιμοποιεί ως δέκτη το κινητό του τηλέφωνο για να αποκτήσει πρόσβαση σε ροή πληροφοριών βάσει τοποθεσίας, σε τουριστικές πληροφορίες για το μέρος στο οποίο βρίσκεται, σε υπηρεσίες μεταφοράς, καθώς και σε παιχνίδια που χρησιμοποιούν τοποθεσία σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες όπως αυτή της επαυξημένης πραγματικότητας για να δημιουργήσουν ένα πρωτοποριακό περιβάλλον για τον χρήστη. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται στον εμπορικό τομέα μέσω εφαρμογών πλοήγησης, στην ναυτιλία, την αεροπορία, στο δίκτυο των σιδηροδρόμων και στη βιομηχανία.

Στον τομέα των επιστημών, οι εφαρμογές των GNSS χρησιμοποιούνται τόσο για χαρτογράφηση όσο και στα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) καθώς και για εναέριες έρευνες. Επιπρόσθετα, έχουν βοηθήσει στην καταγραφή και παρακολούθηση φαινομένων που σχετίζονται με την επιστήμη της Γεωλογίας (κατολισθήσεις, ρήγματα, σεισμικές δονήσεις, μετακινήσεις πλακών κ.ά.), της ατμοσφαιρικής φυσικής μέσω της μελέτης της ατμοσφαιρικής σύστασης. Τέλος, τα GNSS παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη αυτόνομων συστημάτων πλοήγησης και αεροπλοΐας.

Στην κατηγορία των ζωτικών εφαρμογών, εντάσσονται οι στρατιωτικές χρήσεις που ήταν και ο λόγος της ανάπτυξης των πρωταρχικών GNSS. Χρησιμοποιούνται για πλοήγηση και κατεύθυνση στρατιωτικών οχημάτων, πλοίων και υποβρυχίων καθώς και για τον προσδιορισμό στόχων και κινηματικών στοιχείων αυτών. Συνήθως για τις στρατιωτικές χρήσεις χρησιμοποιούνται κρυπτογραφημένα σήματα τα οποία παρέχουν ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό της θέσης από ότι αυτά που χρησιμοποιούνται για εμπορική χρήση.



## Κεφάλαιο 2: Τροχιές παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης (GNSS)

Με τον όρο τροχιές των δορυφόρων αναφερόμαστε στην πορεία που ακολουθούν οι δορυφόροι καθώς περιστρέφονται γύρω από ένα πλανήτη, ένα ήλιο ή κάποιον άλλο σώμα. Κινούμενοι σε συγκεκριμένες τροχιές οι δορυφόροι παραμένουν σε γνωστές θέσεις και σταθερές αποστάσεις από το αντικείμενο γύρω από το οποίο περιστρέφονται. Οι τροχιές τόσο των φυσικών όσο και των τεχνητών δορυφόρων κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την παράμετρο που είναι υπό εξέταση. Για παράδειγμα, σε σχέση με το αντικείμενο γύρω από το οποίο περιστρέφονται υπάρχουν ηλιοκεντρικοί, γαλαξιοκεντρικοί, γεωκεντρικοί κ.ά. δορυφόροι. Κατηγοριοποιούνται επίσης ως προς την ελλειπτικότητα τους, τον συγχρονισμό τους, την κατευθυντήριο, την κλίση τους και τέλος το ύψος (την απόσταση) τους από το σώμα γύρω από το οποίο περιστρέφονται. Συγκεκριμένα, ανάλογα το ύψος της τροχιάς οι δορυφορικές τροχιές χωρίζονται σε 3 βασικές κατηγορίες. Τις χαμηλές γήινες τροχιές (Low Earth Orbits – LEO εφεξής), τις μεσαίες Γήινες Τροχιές (Medium Earth Orbits – MEO εφεξής) και τις γεωσύγχρονες και υψηλές Γήινες Τροχιές (High Earth Orbit/ Geosynchronous Orbits – GEO εφεξής) που θα αναλυθούν εκτενώς στα αντίστοιχα υποκεφάλαια (Εικόνα 2). Το ύψος της τροχιάς των τεχνητών δορυφόρων της Γης ουσιαστικά καθορίζει την ταχύτητα κίνησης του δορυφόρου γύρω από αυτήν, καθώς η κίνηση των δορυφόρων της Γης ελέγχεται κυρίως από τη βαρύτητά της. Έτσι, ένας δορυφόρος LEO δέχεται μεγαλύτερη βαρυτική έλξη από έναν MEO με αποτέλεσμα ο πρώτος να κινείται ταχύτερα και να ολοκληρώνει μια περιστροφή σε μικρότερο χρόνο (Πίνακας 1).



Εικόνα 3: Κατηγορίες τροχιάς δορυφόρου (LEO, MEO, GEO, Lunar)





Πίνακας 1: Παράμετροι δορυφορικών συστημάτων σε σχέση με την τροχιά τους.

Παράμετρος	GEO	MEO	LEO
Ύψος τροχιάς* (km)	>35.786	2.000 - 35.786	180-2000
Γεωγραφική κάλυψη	Υψηλή	Μεσαία	Χαμηλή
Ταχύτητα σήματος	Χαμηλή	Μεσαία	Υψηλή
Αποστάσεις επίγειων σταθμών	Μεγάλες	Περιφερειακές	Τοπικές

\* το Ύψος τροχιάς εξάγεται από την μέση επιφάνεια της θάλασσας (MSL).

## 2.1 Χαμηλές Γήινες Τροχιές - Low Earth Orbits

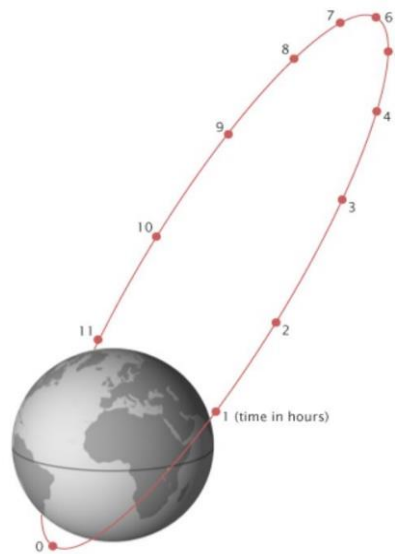
Οι LEO είναι τροχιές γύρω από την Γη σε χαμηλό ύψος που μπορεί να κυμαίνεται από τα 180 έως τα 2.000 χιλιόμετρα και εκτελούν μια πλήρη περιστροφή της Γης κάθε το πολύ 128 λεπτά, ενώ η εκκεντρότητα της τροχιάς του είναι μικρότερη από 0.25 (Samraio et al. 2014). Η μέση ταχύτητα περιστροφής για την διατήρηση ενός δορυφόρου εντός της ζώνης LEO είναι τα 7,8 km/s, αριθμός που μεταβάλλεται αναλόγως με το ύψος της τροχιάς (Australian Space Academy, 2016). Το ύψος των LEO δεν ξεπερνά τη διάμετρο της Γης με αποτέλεσμα η βαρυτική έλξη που ασκείται στους δορυφόρους εντός της ζώνης αυτής να είναι ελάχιστα μικρότερη από την βαρυτική έλξη στην επιφάνεια της Γης. Επιπρόσθετα, εντός της ζώνης των LEO, οι δορυφόροι δέχονται τριβές από τα αέρια που βρίσκονται στην θερμόσφαιρα και την εξώσφαιρα.

Οι χαμηλές τροχιές έχουν τις μικρότερες ενεργειακές ανάγκες σε σχέση με τους δορυφόρους σε υψηλότερες τροχιές τόσο για την εκτόξευση τους όσο και για την τοποθέτησή τους σε τροχιά, ενώ παράλληλα έχουν την μικρότερη καθυστέρηση στην επικοινωνία τους με την Γη. Επιπλέον, στους δορυφόρους αυτούς η τροχιά δεν είναι υποχρεωτικά παράλληλη με τον ισημερινό, αλλά αλλάζοντας το επίπεδο τους μπορούν να εκτελούν τροχιές παρεκκλινόντάς από τον ισημερινό, δημιουργώντας έτσι περισσότερες διαθέσιμες πορείες γεγονός που καθιστά τους δορυφόρους σε χαμηλές τροχιές τους πιο διαδεδομένους και ευρείας χρήσης. Εξαιτίας της μικρής απόστασης από την Γη οι LEO δορυφόροι έχουν ένα αρκετά μικρό οπτικό πεδίο με αποτέλεσμα να χρειάζεται η χρήση πολλών δορυφόρων για την κάλυψη της Γης, την δημιουργία δηλαδή δορυφορικών αστερισμών (ESA, 2020). Παρόλα αυτά η μικρή τους απόσταση από τη Γη τους καθιστά κατάλληλους για παρατήρηση και απεικόνιση του πλανήτη, για ερευνητικούς σκοπούς, για κάποια συστήματα επικοινωνίας όπως το τηλεφωνικό σύστημα Iridium, για στρατιωτικές και κατασκοπευτικές χρήσεις κ.ά.



## 2.2 Μεσαίες Γήινες τροχιές - Medium Earth Orbit

Οι ΜΕΟ είναι γεωκεντρικές τροχιές εντός της ζώνης μεταξύ 2.000 και 35.786 χιλιομέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας. Η περίοδος περιστροφής των δορυφόρων εντός της ζώνης ΜΕΟ ξεκινά από τα 128 λεπτά που είναι και το ανώτατο όριο περιστροφής των δορυφόρων της LEO ενώ το ανώτατο όριο των ΜΕΟ, δεν ξεπερνά τις 24 ώρες. Εντός της ζώνης ΜΕΟ, υπάρχουν 2 τροχιές που είναι πιο διαδεδομένες. Συγκεκριμένα η ημι-σύγχρονη τροχιά και η τροχιά Molniya (NASA Earth Observatory). Η ημι-σύγχρονη τροχιά έχει πολύ μικρή εκκεντρότητα, πλησιάζοντας τον κύκλο στα 20.200 χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Σε αυτό το υψόμετρο οι δορυφόροι εκτελούν μια πλήρη περιφορά γύρω από τη Γη κάθε 12 ώρες, είναι σταθερή και προσδιορίζεται εύκολα. Η τροχιά Molniya, έχει υψηλή εκκεντρότητα (0,722) και έτσι οι δορυφόροι κινούνται σε μια μεγάλη ελλειπτική τροχιά όπου το ένα άκρο της βρίσκεται κοντά στη Γη, ενώ το δεύτερο βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από αυτό. Έτσι η συγκεκριμένη τροχιά είναι κατάλληλη για την παρατήρηση μεγάλων γεωγραφικών πλατών είτε στον Νότο είτε στον Βορρά. Η περίοδος περιστροφής είναι 12 ώρες και περνά από το ίδιο σημείο 2 φορές το 24ωρο (Εικόνα 4).



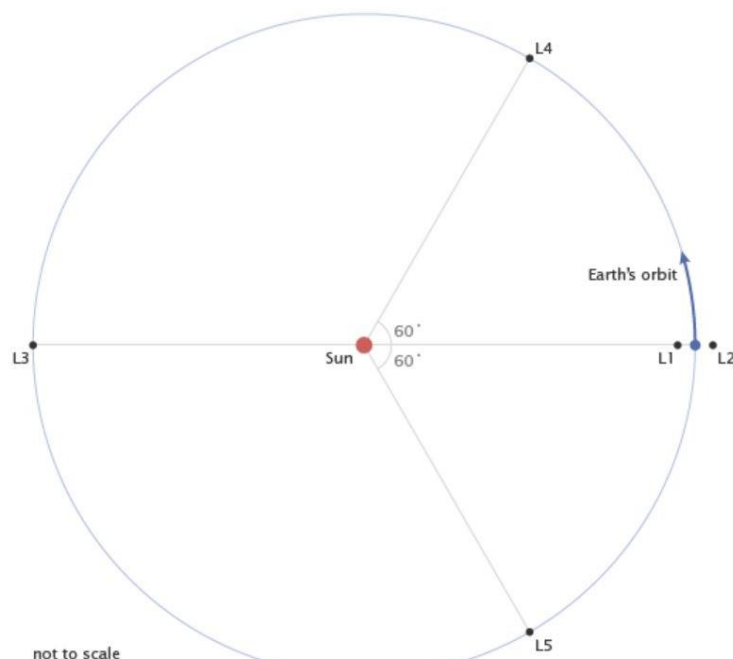
Εικόνα 4: Τροχιά Molniya





### 2.3 Γεωσύγχρονες και υψηλές Γήινες Τροχιές (Geosynchronous Orbits/High Earth Orbits)

Οι ΗΕΟ δορυφόροι περιστρέφονται γύρω από την Γη σε υψόμετρο μεγαλύτερο από 35.786 χιλιόμετρα από την επιφάνεια της θάλασσας. Σε αυτή την απόσταση, η ταχύτητα περιστροφής του δορυφόρου είναι ίση με αυτή της Γης με αποτέλεσμα ο δορυφόρος να περιστρέφεται ταυτόχρονα με αυτή και να παραμένει σταθερά στο ίδιο σημείο πάνω από το έδαφος. Αυτές οι υψηλές τροχιές ονομάζονται γεωσύγχρονες και είναι εξαιρετικά χρήσιμες για την παρακολούθηση και καταγραφή των μετεωρολογικών φαινομένων και της ηλιακής δραστηριότητας καθώς παρέχουν μια ανεμπόδιστη θέαση ενός μεγάλου μέρους του πλανήτη. Η ταχύτητα περιφοράς είναι περίπου 11.265 km/h, σημαντικά μικρότερη σε σχέση με τις LEO και MEO ενώ λόγω της μεγάλης απόστασης από την Γη ο χρόνος επικοινωνίας μεταξύ των δορυφόρων αυτής της ζώνης με την Γη παρουσιάζει καθυστέρηση που κυμαίνεται από 0,1 έως 4,5 δευτερόλεπτα. Πέρα από το κατώτερο όριο στο οποίο περιστρέφονται οι γεωσύγχρονοι δορυφόροι, η ζώνη ΗΕΟ εκτείνεται και πέρα από τη ζώνη βαρυτικής επιρροής της Γης. Για τροχιές σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις που ξεπερνούν το ένα εκατομμύριο χιλιόμετρα από την επιφάνεια της θάλασσας, υπάρχουν τα σημεία Lagrange ή αλλιώς σημεία L, στα οποία ο συνδυασμός των βαρυτικών πεδίων του Ήλιου και της Γης επιτρέπει σε δορυφόρους ή άλλα αντικείμενα όπως τηλεσκόπια να κινούνται σε σταθερή τροχιά σε σχέση με την Γη. Υπάρχουν 5 διαφορετικά τέτοια σημεία (Εικόνα 5), ενώ αυτά που χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι τα L1 και L2.



Εικόνα 5: Τα 5 σημεία Lagrange



## 2.4 Υβριδικές Γήινες τροχιές – Hybrid Earth Orbits

Οι περισσότεροι τεχνητοί δορυφόροι που χρησιμοποιούνται για την μετάδοση πληροφοριών προκειμένου να επιτύχουν τη μεγαλύτερη γεωγραφική και χρονική κάλυψη, συνδυάζονται μεταξύ τους και δημιουργούν έναν αστερισμό δορυφόρων. Μέχρι πρόσφατα, ο κάθε δορυφορικός αστερισμός ανήκε και συνεργαζόταν με ένα μόνο σύστημα το οποίο ελέγχεται από την εκάστοτε χώρα που το κατασκεύασε. Τα τελευταία χρόνια με την ταχεία ανάπτυξη ιδιωτικών δορυφόρων για εμπορική χρήση που ενσωματώνουν νέες τεχνολογίες και δυνατότητες, έχουν αρχίσει να αναπτύσσεται η λεγόμενη Υβριδική Διαστημική Αρχιτεκτονική (Hybrid Space Architecture). Πρόκειται για μια αρχιτεκτονική που υποστηρίζει την ενσωμάτωση νέων συνήθως μικρών δορυφόρων που κινούνται σε χαμηλή τροχιά με τους παραδοσιακούς κρατικούς δορυφόρους, δημιουργώντας έτσι την δυνατότητα χρήσης μιας γκάμας από διαφορετικές τροχιές και την χρήση των δορυφόρων που κινούνται σε κατάλληλες τροχιές ανάλογα με την αποστολή (National Academy of Sciences US, 2022). Επιπλέον, τα παραδοσιακά συστήματα που λειτουργούν με δορυφόρους στην ίδια τροχιά, στηρίζονται στην επαρκή γεωγραφική κάλυψη όχι μόνο από δορυφόρους αλλά και από τους αντίστοιχους επίγειους σταθμούς. Παρόλα αυτά, για πολλές χώρες η εγκατάσταση επίγειων σταθμών σε σημεία εκτός των συνόρων της εκάστοτε χώρας που ελέγχει το δορυφορικό σύστημα δεν είναι πάντα εφικτή (Zhang et al. 2019). Με τις υβριδικές τροχιές η ανάγκη για μεγάλη γεωγραφική διασπορά των επίγειων σταθμών περιορίζεται ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το κόστος. Πέρα από το κόστος και τις ανεπτυγμένες δυνατότητες των υβριδικών τροχιών, η συνεργασία μεταξύ κρατών και ιδιωτικών εταιριών περιορίζει το ρίσκο καθώς τα συστήματα αποτελούνται από περισσότερους δορυφόρους, προάγει την καινοτομία με την ένταξη των νέων τεχνολογιών που αναπτύσσονται πολύ ταχύτερα, ενώ προωθούν την συνεργασία μεταξύ ιδιωτικού και δημόσιου τομέα (National Academy of Sciences US, 2022).

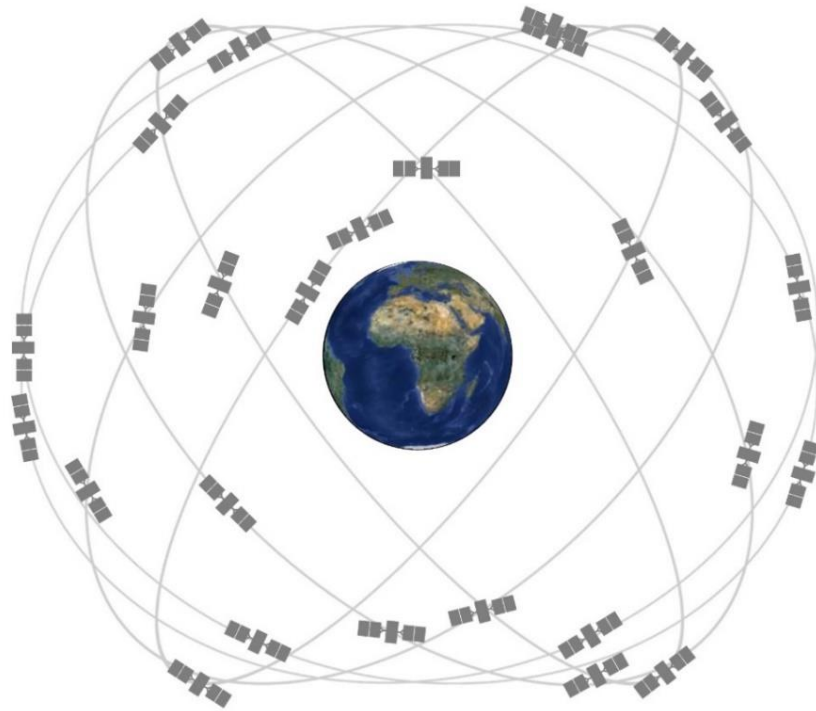


### Κεφάλαιο 3: Κύρια παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GNSS) και τα χαρακτηριστικά τους.

Τα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GNSS) είναι τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης τα οποία παρέχουν αυτόνομο γεω-εντοπισμό με παγκόσμια κάλυψη (Bonnor 2012). Μέχρι στιγμής, υπάρχουν 4 GNSS τα οποία βρίσκονται σε τροχιά και κάθε ένα από αυτά ανήκει και ελέγχεται από διαφορετική χώρα και θα αναπτυχθούν ξεχωριστά στα αντίστοιχα υποκεφάλαια που ακολουθούν.

#### 3.1 Global Positioning System (GPS)

Το Global Positioning ήταν το πρωτοπόρο σύστημα πλοήγησης που αναπτύχθηκε από τις ΗΠΑ και είχε ως σκοπό την παγκόσμια κάλυψη και την βέλτιστη ακρίβεια για την πλοήγηση των αμερικανικών πολεμικών πλοίων, υποβρυχίων, αεροπλάνων και οχημάτων. Είναι το παλαιότερο από τα GNSS καθώς η λειτουργία του ξεκίνησε το 1978 ενώ έγινε διαθέσιμο για χρήση εκτός των στρατιωτικών δυνάμεων της Αμερικής και για τους πολίτες ανά τον κόσμο το 1994. Ο δορυφορικός αστερισμός του GPS χρειάζεται τουλάχιστον 24 δορυφόρους για να παρέχει παγκόσμια κάλυψη ενώ μπορεί να υποστηρίξει μέχρι και 32. Συνήθως το σύστημα λειτουργεί με 31 δορυφόρους σε πλήρη λειτουργία ανά πάσα στιγμή την τελευταία δεκαετία, ενώ μέχρι και τις 15 Αυγούστου 2023 έχουν κατασκευαστεί συνολικά 83 δορυφόροι για αυτό το σύστημα. Από αυτούς 31 βρίσκονται σε τροχιά και εν λειτουργία, 41 έχουν αποσυρθεί, 2 καταστράφηκαν κατά την εκτόξευση ενώ 4 βρίσκονται παροπλισμένοι και με μερικές ζημιές (US Government, 2023). Η ακρίβεια προσδιορισμού θέσης για ένα απλό χρήστη του συστήματος είναι περίπου 7 μέτρα στις περισσότερες περιπτώσεις (95% των περιπτώσεων) όπου υπάρχει ανεμπόδιστη οπτική επαφή με τουλάχιστον 4 από τους δορυφόρους του αστερισμού. Για να είναι εφικτή η μόνιμη κάλυψη ενός χρήστη από τουλάχιστον 4 δορυφόρους του συστήματος, οι δορυφόροι έχουν τοποθετηθεί σε έξι τροχιακά επίπεδα που ισαπέχουν μεταξύ τους τα οποία έχουν κλίση  $55^\circ$  με το επίπεδο του ισημερινού το οποίο και τέμνουν ανά  $60^\circ$  (4 θέσεις σε κάθε τροχιακό επίπεδο) για τους δορυφόρους που αποτελούν την βάση του συστήματος. (Εικόνα 6)

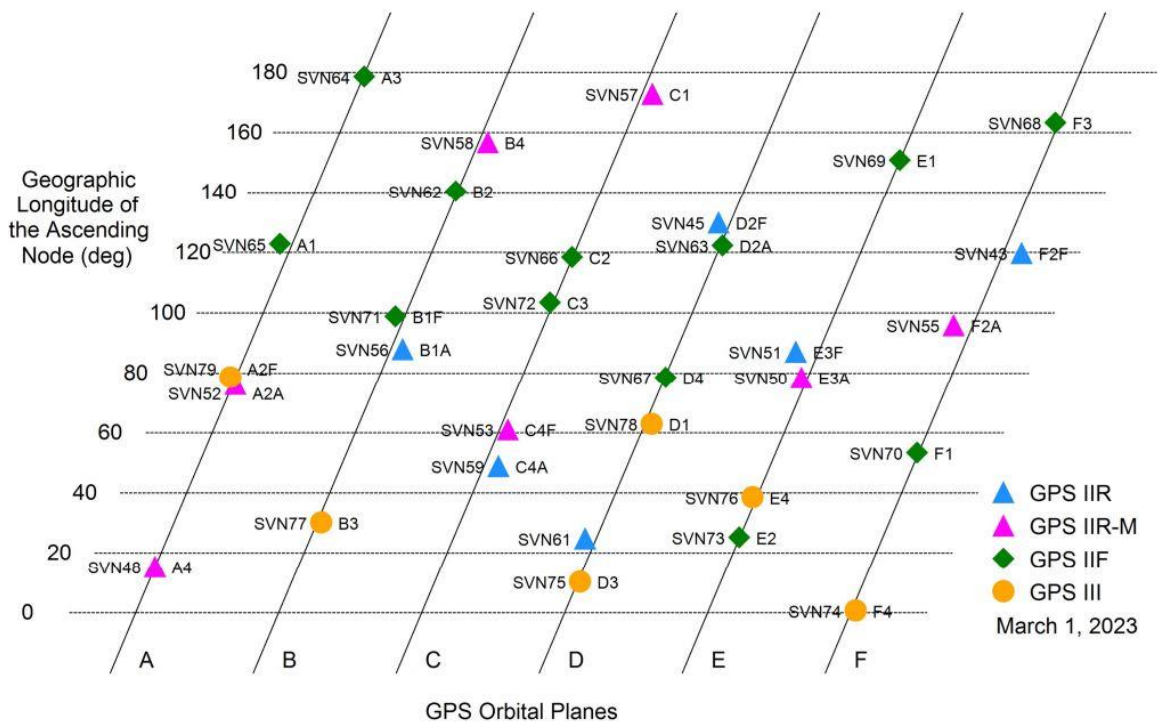


Εικόνα 6: Δορυφορικός αστερισμός 24 θέσεων του Global Positioning System

Για να βελτιστοποιηθεί η κάλυψη ανά τον πλανήτη, το 2011, η πολεμική αεροπορία των ΗΠΑ, η οποία ήταν υπεύθυνη για την λειτουργία και ανάπτυξη του συστήματος, επέκτεινε τον δορυφορικό της αστερισμό αυξάνοντας τους βασικούς σε 27. Η διαμόρφωση αυτή ονομάστηκε «Expandable 24» και για την αύξηση των βασικών θέσεων σε 27 χρειάστηκε να αλλάξουν θέση 6 δορυφόροι (Εικόνα 7). Αυτό έγινε σε 2 φάσεις ανά τρεις δορυφόρους, αρχής γενομένης τον Ιανουάριο του 2010. Οι δύο από τους τρεις δορυφόρους τοποθετήθηκαν στις νέες τους θέσεις σε ένα διάστημα 8 ημερών, ενώ ο τρίτος χρειάστηκε 351 μέρες για να καταλάβει τη νέα του θέση. Η δεύτερη τριάδα δορυφόρων που μετακινήθηκε σε νέες θέσεις ξεκίνησε τον Αύγουστο του 2010 ενώ ο τελευταίος δορυφόρος έφτασε στην νέα του θέση τον Ιούνιο του επόμενου έτους όταν και ολοκληρώθηκε η επέκταση.



Οι δορυφόροι του GPS κινούνται σε μεσαίες γήινες τροχιές (MEO), σε υψόμετρο περίπου 20.200 χιλιομέτρων ενώ ο κάθε δορυφόρος του συστήματος εκτελεί 2 πλήρης περιφορές της Γης ανά ημέρα. Ο δορυφορικός αστερισμός του GPS αποτελείται από ένα κράμα παλαιών και νέων δορυφόρων με διαφορετικές τεχνολογίες και χαρακτηριστικά. Ειδικότερα, 6 από τους δορυφόρους του αστερισμού που βρίσκονται σε λειτουργία έχουν εκτοξευθεί το χρονικό διάστημα 1997-2004 και είναι οι παλαιότεροι του συστήματος (BLOCK IIR). Από τους υπόλοιπους δορυφόρους του συστήματος που κατηγοριοποιούνται ως σύγχρονοι, 7 είναι τύπου BLOCK IIR-M που εκτοξεύθηκαν το διάστημα 2005-2009, 12 τύπου BLOCK IIF που είναι και οι πρώτοι του συστήματος που ενσωματώνουν τεχνολογίες που βελτιώνουν την ακρίβεια, την ένταση του σήματος και την ποιότητά του και εκτοξεύθηκαν το διάστημα 2010-2016, ενώ οι τελευταίες τεχνολογίας δορυφόροι τύπου GPS III/IIIF εκτοξεύθηκαν για πρώτη φορά το 2018 και μέχρι στιγμής υπάρχουν 6 σε λειτουργία (U.S. Space Force, 2022).



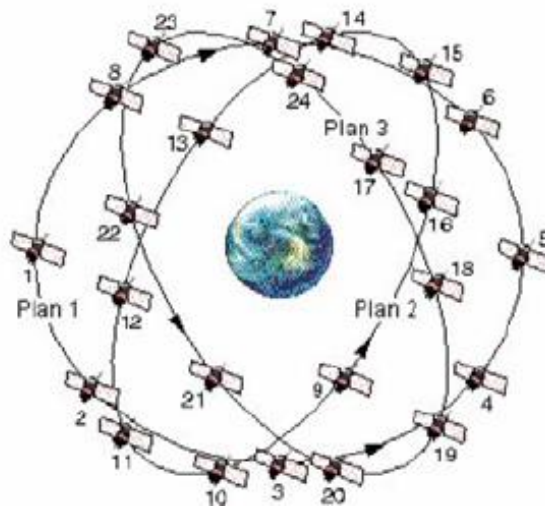
Εικόνα 7: Ο δορυφορικός αστερισμός του GPS

\*Στον κατακόρυφο άξονα αποτυπώνεται το γεωγραφικό μήκος ενώ στον οριζόντιο άξονα τα τροχιακά επίπεδα (U.S. Coast Guard, 2023).



### 3.2 GLONASS

Το σύστημα GLONASS, ξεκίνησε να σχεδιάζεται και να αναπτύσσεται από την Σοβιετική ένωση το 1976. Το 1982 ξεκίνησε η εκτόξευση των δορυφόρων του τύπου KOSMOS-1413 σε τροχιά ενώ το 1995 ο δορυφορικός αστερισμός του ολοκληρώθηκε με 24 δορυφόρους σε λειτουργία. Οι 24 δορυφόροι του συστήματος είχαν τοποθετηθεί σε ίσες αποστάσεις πάνω σε τρία διαφορετικά τροχιακά επίπεδα (Εικόνα 8). Τα τρία τροχιακά επίπεδα έχουν κλίση  $55^\circ$  ως προς το επίπεδο του ισημερινού ενώ τα τροχιακά επίπεδα σχηματίζουν γωνία  $120^\circ$  μεταξύ τους (Ristic et al. 2010). Οι τροχιές τους είναι σχεδόν κυκλικές σε υψόμετρο 19.100 χιλιόμετρα ενώ ολοκληρώνουν μια περιστροφή της Γης σε 11 ώρες 15 λεπτά και 44 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 8: Ο δορυφορικός αστερισμός του GLONASS

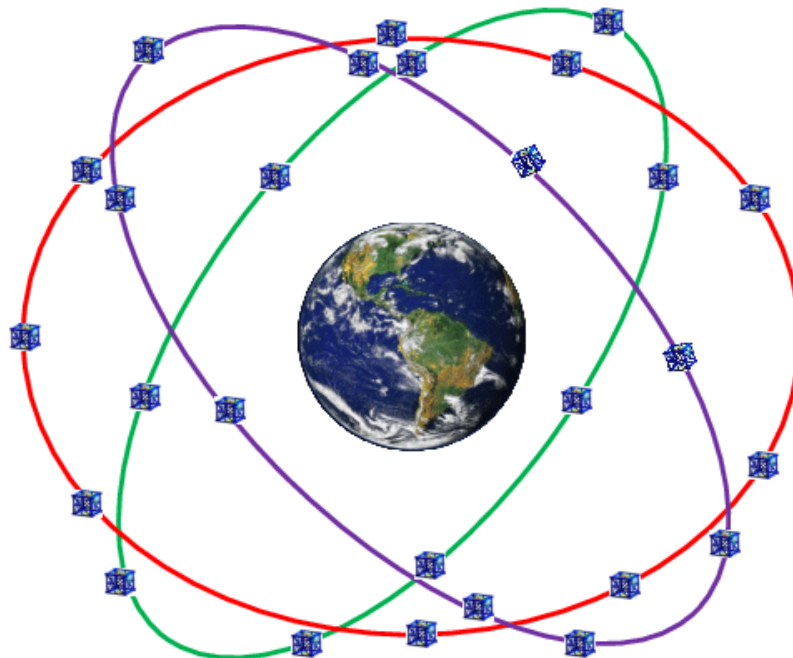
Παρόλα αυτά, η διάλυση της Σοβιετικής Ένωσης σε συνδυασμό με την μείωση της χρηματοδότησης οδήγησε στην υποβάθμιση του συστήματος GLONASS. Χαρακτηριστικά, το 2002 το GLONASS είχε μόλις 7 δορυφόρους σε λειτουργία που δεν επαρκούσαν για την κάλυψη των αναγκών προσδιορισμού θέσης ούτε εντός των συνόρων της Ρωσίας ενώ τεχνολογικά το GLONASS υστερούσε σε σχέση με το GPS τόσο σε ακρίβεια όσο και στα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του. Την ίδια χρονιά όμως, η Ρωσία ανέπτυξε και χρηματοδότησε ένα πρόγραμμα με την ονομασία "Global Navigation System for 2002-2011" για την αναβάθμιση του υπάρχοντος συστήματος. Με αυτό το πρόγραμμα το GLONASS απέκτησε νέας γενιάς δορυφόρους τύπου GLONASS-K, βελτιστοποίησε τα χαρακτηριστικά και τις λειτουργίες του καθώς και την τεχνολογία των επίγειων σταθμών. Η διατήρηση και αναβάθμιση του συστήματος GLONASS συνεχίστηκε με μεταγενέστερα προγράμματα που ως αποτέλεσμα είχαν την εκτόξευση σύγχρονων δορυφόρων, την βελτίωση της ακρίβειας προσδιορισμού θέσης. Μέχρι τον Αύγουστο του 2023, οι δορυφόροι του αστερισμού του συστήματος ανέρχονταν σε 26 με τους 24 να είναι σε λειτουργία και 2 από αυτούς να βρίσκονται στην φάση έναρξης της λειτουργίας τους.





### 3.3 Galileo

Το Galileo είναι το σύστημα που αναπτύχθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή μέσω του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA) με το τελικό του σχέδιο να εγκρίνεται από την ΕΕ το 2003. Ο πρώτος δορυφόρος του αστερισμού εκτοξεύθηκε το 2011 και το σύστημα έγινε διαθέσιμο για χρήση το 2016. Το Galileo δημιουργήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση με σκοπό την παροχή γεω-εντοπισμού υψηλής ακρίβειας που δεν έχει ως προτεραιότητα τη στρατιωτική χρήση, ώστε τόσο οι κυβερνήσεις όσο και οι στρατιωτικές δυνάμεις των χωρών της ΕΕ να ανεξαρτητοποιηθούν από τα συστήματα των άλλων χωρών που σε περίπτωση σύρραξης ή πολέμου έχουν την δυνατότητα να περιορίσουν την πρόσβαση σε αυτά (ESA, 2016). Ο σχεδιασμός του δορυφορικού αστερισμού του Galileo έχει ως στόχο, όταν ολοκληρωθεί το σύστημα, να αποτελείται από 24 βασικούς δορυφόρους και 6 εφεδρικούς οι οποίοι κινούνται σε 3 διαφορετικά τροχιακά επίπεδα των 8 θέσεων και σε υψόμετρο 23.222 χιλιομέτρων, δηλαδή στην ζώνη ΜΕΟ (Εικόνα 9). Η περίοδος περιστροφής των δορυφόρων του συστήματος είναι 14 ώρες και 4 λεπτά. Για χρήση στην πλοήγηση το Galileo θα χρησιμοποιεί 24 δορυφόρους ενώ θα υπάρχουν και δορυφόροι αφιερωμένοι ειδικά για την υπηρεσία έρευνας και διάσωσης (Search and Rescue).

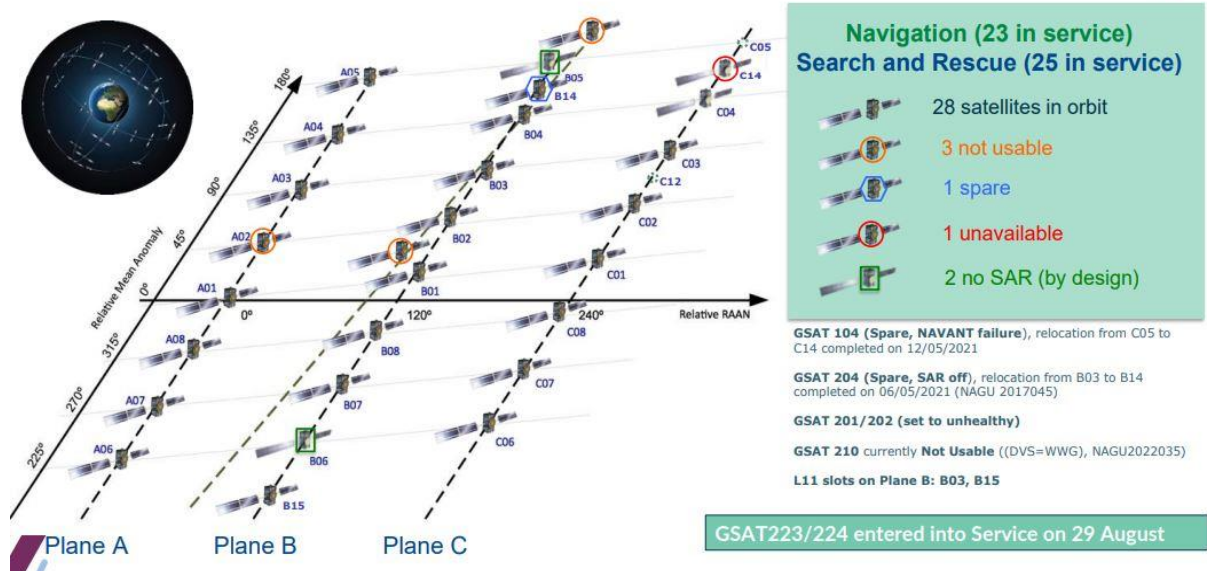


Εικόνα 9: Ο δορυφορικός αστερισμός του Galileo



Κωνσταντίνος Κατσαρός,  
GNSS: Μελέτη του διαστημικού τμήματος

Βάσει της τελευταίας παρουσίασης για την κατάσταση και την εξέλιξη του συστήματος από την ESA το 2022 το Galileo έχει σε τροχιά 28 δορυφόρους, 23 σε χρήση για πλοήγηση, 25 σε χρήση για την υπηρεσία έρευνας και διάσωσης, έναν εφεδρικό και έναν μη διαθέσιμο στις θέσεις και τα τροχιακά επίπεδα που φαίνονται στην Εικόνα 10.



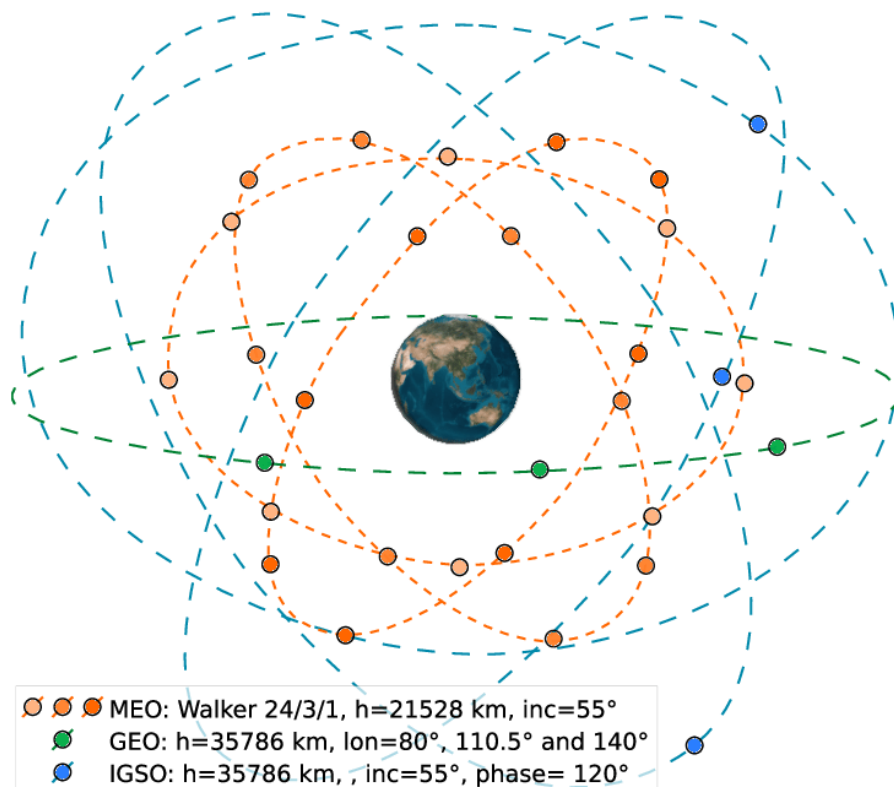
Εικόνα 10: Galileo status report





### 3.4 BeiDou

Στα τέλη της δεκαετίας του '90, η Κίνα στράφηκε στην υλοποίηση ενός σχεδίου για την κατασκευή και ανάπτυξη του δικού της RNSS τόσο για τις στρατιωτικές της δυνάμεις όσο και για εμπορική χρήση. Η αρχή έγινε το 2000 με την ολοκλήρωση του συστήματος BeiDou-1 που είχε ως αρχικό στόχο την παροχή υπηρεσιών γεωεντοπισμού εντός της χώρας. Το 2012 δόθηκε στην λειτουργία το σύστημα BeiDou-2 που με περισσότερους δορυφόρους παρείχε κάλυψη στην περιοχή της Ασίας και του Ειρηνικού Ωκεανού ενώ το 2020 ολοκληρώθηκε το σύστημα BeiDou-3 (BeiDou εφεξής), το οποίο παρέχει παγκόσμια κάλυψη. Το BeiDou είναι το μόνο από τα GNSS που ο δορυφορικός του αστερισμός δεν περιορίζεται σε ενός είδους τροχιάς και συγκεκριμένα της MEO όπως τα άλλα 3 αλλά συνδυάζει ένα σύνολο 30 δορυφόρων σε υβριδικές τροχίες που παρέχουν βελτιωμένη κάλυψη στα μικρά γεωγραφικά πλάτη (Εικόνα 11). Συγκεκριμένα στη MEO υπάρχουν 24 δορυφόροι σε υψόμετρο 21.528 χιλιομέτρων τοποθετημένοι σε τρία τροχιακά επίπεδα των 8 θέσεων και 3 εφεδρικοί δορυφόροι όλοι με  $55^\circ$  κλίση ως προς τον ισημερινό, 3 δορυφόροι σε γεωσύγχρονη τροχιά σε υψόμετρο 35.786 χιλιομέτρων και 3 δορυφόροι σε επικλινή γεωσύγχρονη τροχιά στο ίδιο υψόμετρο.



Εικόνα 11: Ο δορυφορικός αστερισμός του BeiDou



### 3.5 Σύγκριση των κύριων GNSS και των δορυφορικών αστερισμών τους

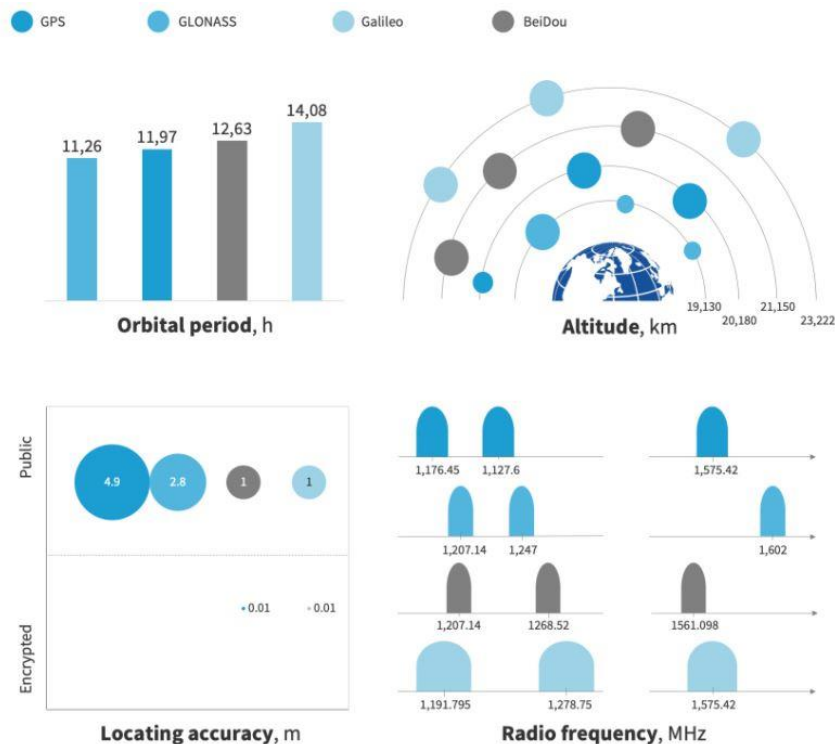
Παρότι τα τέσσερα διαφορετικά GNSS βασίζονται πάνω στις ίδιες αρχές λειτουργίας, οι διαφορές μεταξύ τους στον σχεδιασμό είναι σημαντικές (Πίνακας 2). Συγκρίνοντας την ακρίβεια προσδιορισμού θέσης τα νεότερα Galileo και BeiDou παρουσιάζουν καλύτερες επιδόσεις κοντά στο 1 μέτρο ενώ τα GLONASS και GPS είναι στα 2,8 και 4,9 μέτρα αντίστοιχα. Αυτές οι επιδόσεις βελτιώνονται με την διόρθωση από τους επίγειους σταθμούς και τους εφεδρικούς δορυφόρους των συστημάτων. Εκτός του συστήματος BeiDou της Κίνας που είναι το μόνο από τα τέσσερα συστήματα το οποίο χρησιμοποιεί υβριδικές τροχιές στον δορυφορικό αστερισμό του, τα άλλα τρία έχουν τοποθετήσει τους δορυφορικούς αστερισμούς τους σε μεσαίες γήινες τροχιές. Ως προς τον αριθμό των δορυφόρων που αποτελούν τον κάθε αστερισμό, το BeiDou υπερέρχει με 45 δορυφόρους σε λειτουργία ενώ ακολουθεί το GPS με 31 ενώ GLONASS και Galileo έπονται με 26 και 25 δορυφόρους αντίστοιχα. Συνεπώς και η τιμή για τον μέσο όρο ορατών δορυφόρων κάθε συστήματος ακολουθεί την ίδια σειρά με το BeiDou να έχει 16, 18 δορυφόρους ορατούς κατά μέσο όρο, το GPS 10,86, το GLONASS 8,34 και το Galileo 8,75. Οι τιμές αυτές λαμβάνουν υπόψιν τους ως γωνία ύψωσης τις  $5^\circ$ . Επιπλέον, ο μέσος όρος του δείκτη αλλοίωσης της ακρίβειας θέσης (Position Dilution of Precision) που περιγράφει το σφάλμα που προκαλείται από την σχετική θέση των δορυφόρων, δείχνει ότι το BeiDou βρίσκεται στην πρώτη θέση με την χαμηλότερη τιμή στο 1,41μ, ακολουθεί το GPS με 1,55μ, ενώ οι τιμές για τα Galileo και GLONASS είναι κοντά στα 2μ (Πίνακας 2, Εικόνα 12). Οι τιμές αυτές παρουσιάζουν διακυμάνσεις ανάλογα με την γεωγραφική περιοχή με κάθε ένα από τα συστήματα να έχει καλύτερες επιδόσεις σε συγκεκριμένες περιοχές, όπως για παράδειγμα το BeiDou στην περιοχή της Ασίας και του Ειρηνικού Ωκεανού (Εικόνα 13). Αντίστοιχα το GPS παρουσιάζει μικρότερο σφάλμα στον Ατλαντικό Ωκεανό και την Αμερικανική Ήπειρο ενώ συγκριτικά με τα άλλα 2 συστήματα υπερτερεί και στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη.



Πίνακας 2: Συνοπτικός πίνακας βασικών χαρακτηριστικών των τεσσάρων GNSS.

Χαρακτηριστικά GNSS	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
Χώρα	Η.Π.Α.	Ρωσία	Ευρωπαϊκή Ένωση	Κίνα
Τύπος τροχιάς	MEO	MEO	MEO	Υβριδική
Υψόμετρο (km)	20.200	19.100	23.222	21.528 και 35.786
Περίοδος (h)	11,97	11,26	14,08	12,63
Αριθμός δορυφόρων σε λειτουργία	31	26	25	45
Τροχιακά επίπεδα	6	3	3	3
Θέσεις ανά τροχιακό επίπεδο	4	8	8	8
Μέσος όρος ορατών δορυφόρων	10,84	8,34	8,75	16,18
Μέσος όρος αλλοίωσης της ακρίβειας	1,55	1,94	2,03	1,41
Ακρίβεια προσδιορισμού θέσης (m)*	4,9	2,8	1	1

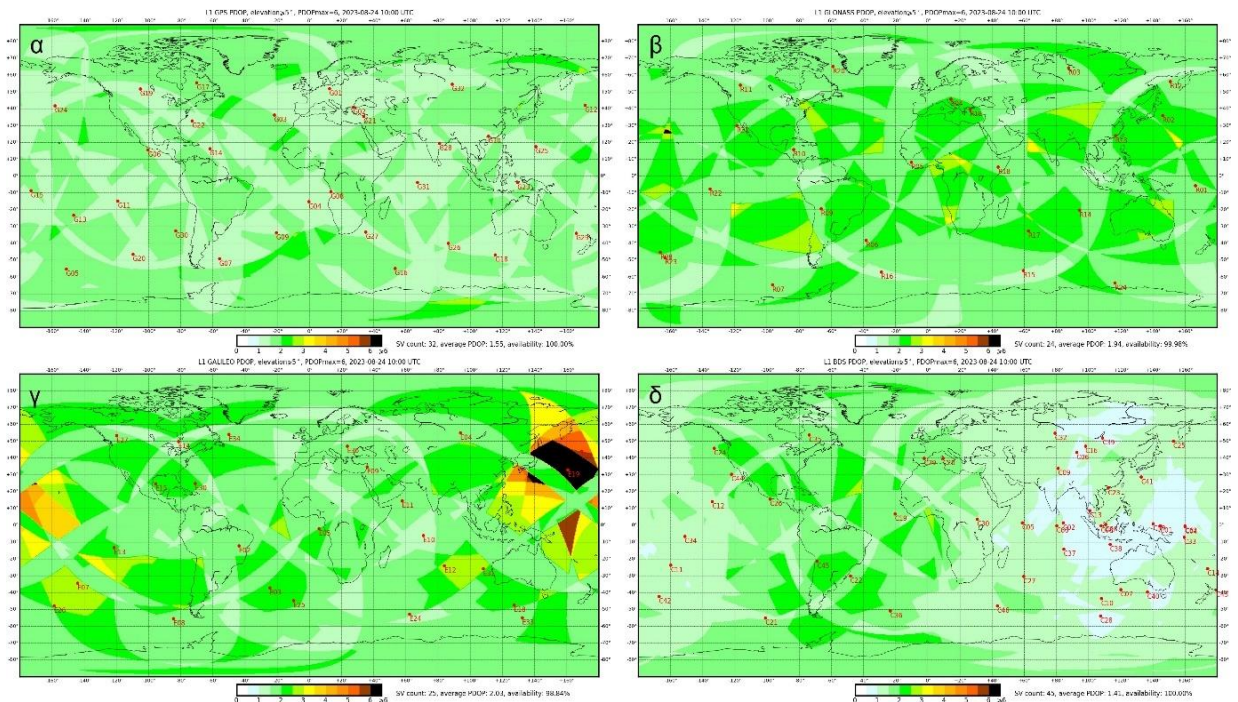
\*Η ακρίβεια προσδιορισμού θέσης αναφέρεται στα μη-κρυπτογραφημένα σήματα που προορίζονται για εμπορική χρήση και όχι για στρατιωτικούς σκοπούς.



Εικόνα 12: Συγκριτικό γράφημα βασικών παραμέτρων GNSS



Κωνσταντίνος Κατσαρός,  
GNSS: Μελέτη του διαστημικού τμήματος



Εικόνα 13: Δείκτης PDOP, αριθμός δορυφόρων σε ενέργεια και γεωγραφική κάλυψη GNSS

Το GPS (α) με 32 δορυφόρους και μέσο όρο αλλοίωσης της ακρίβειας το 1,55μ, το GLONASS (β) με 24 δορυφόρους και μέσο όρο 1,94μ, το GALILEO (γ) με 25 δορυφόρους και μέσο όρο 2,03μ και το BEIDOU (δ) με 45 δορυφόρους και 1,41μ μέσο όρο αλλοίωσης της ακρίβειας (τροποποιημένο από Russian Interstate Aviation Committee).



## Κεφάλαιο 4: Νέες τεχνολογίες και προοπτικές για τα GNSS

Τα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης παρέχουν δεδομένα σε ένα μεγάλο αριθμό συσκευών που αυξάνεται συνεχώς καθώς η τεχνολογία αυτή βρίσκει ολοένα και περισσότερες νέες χρήσεις (π.χ. αυτόνομη οδήγηση, πλοήγηση μη-επανδρωμένων οχημάτων κλπ.). Η ύπαρξη περισσότερων από ενός συστήματος αυξάνει τον ανταγωνισμό ενώ η ζήτηση της αγοράς για αυξημένη ακρίβεια στον προσδιορισμό θέσης είναι πρωταρχικοί παράγοντες για την βελτίωση και εξέλιξη των GNSS. Συνεπώς η καινοτομία στον σχεδιασμό και στην τεχνολογία των GNSS είναι απαραίτητη τόσο για την βελτιστοποίηση των υπηρεσιών που την χρησιμοποιούν όσο και για την μέγιστη εκμετάλλευση όλων των διαθέσιμων συστημάτων ώστε να επιτευχθεί ακόμα καλύτερη κάλυψη, ισχύς σήματος και ακρίβεια του προσδιορισμού θέσης.

Παρότι τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη είναι ραγδαία, οι ερευνητές έχουν νέες προκλήσεις να αντιμετωπίσουν σε διάφορους τομείς όπως για παράδειγμα την μοντελοποίηση των παρατηρήσεων από διαφορετικά συστήματα, την διαχείριση των σφαλμάτων μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων και των συχνοτήτων τους, καθώς και την ανάπτυξη αποτελεσματικών μοντέλων για την ενσωμάτωση των μετρήσεων από πολλαπλά συστήματα (Paziewski 2020).

Τεχνολογικά, τόσο οι δορυφόροι όσο και οι επίγειοι σταθμοί εξελίσσονται ραγδαία με νέες τεχνολογίες στις κεραίες, τους πομπούς, τις συχνότητες εκπομπής και τα ατομικά ρολόγια που φέρουν, καθώς και στους αλγόριθμους επεξεργασίας και διόρθωσης σήματος και υπολογισμού της ιονοσφαιρικής καθυστέρησης.

Στο διαστημικό κομμάτι οι υβριδικές τροχιές των δορυφορικών αστερισμών ανοίγουν νέους δρόμους για μεγαλύτερη γεωγραφική κάλυψη σε δύσκολα περιβάλλοντα όπως το αστικό και με αυξημένες δυνατότητες. Για παράδειγμα τρεις διαφορετικές εταιρείες (Satelles, Locata, NextNav) αναπτύσσουν μεθοδολογίες που θα συνδυάζουν σήματα από τα GNSS με δορυφόρους σε LEO για την κάλυψη δύσκολων περιβαλλόντων και μέχρι στιγμής στις δοκιμές τους παρουσιάζουν ακρίβεια που κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέτρα μέχρι μερικά εκατοστά αναλόγως περιοχής.



*Κωνσταντίνος Κατσαρός,  
GNSS: Μελέτη του διαστημικού τμήματος*

Παρόλα αυτά, η μεγαλύτερη πρόκληση στον κλάδο είναι η ενσωμάτωση των μετρήσεων από πολλαπλά GNSS, που αναμένεται να φέρει σημαντική αλλαγή στον τομέα της δορυφορικής πλοήγησης, καθώς με τον συνδυασμό σημάτων από διαφορετικά συστήματα ο χρήστης θα καλύπτεται από τουλάχιστον 3 φορές περισσότερους δορυφόρους ανά θέση και θα μπορεί να φτάσει μέχρι και τους 15 διαθέσιμους δορυφόρους στο οπτικό του πεδίο αν συνδυαστούν και τα τέσσερα GNSS, σε αντίθεση με τους 6 κατά μέσο όρο δορυφόρους ανά θέση (για τα δύσκολα περιβάλλοντα με χαμηλό ύψος θέασης) από ένα μόνο σύστημα. Με περισσότερους διαθέσιμους δορυφόρους, ο χρήστης θα έχει μεγαλύτερη προσβασιμότητα και καλύτερη απόδοση ειδικά σε περιβάλλοντα όπως το αστικό, θα αποφεύγει προβλήματα από ενδεχόμενες δυσλειτουργίες ενός από τα συστήματα, θα είναι ανεξάρτητος από διακοπές στην λειτουργία ενός από τα συστήματα είτε λόγω βλάβης είτε λόγω εσκεμμένου περιορισμού στην πρόσβαση, ενώ ταυτόχρονα ο χρήστης θα έχει ταχύτερο και μεγαλύτερης ακρίβειας προσδιορισμό θέσης. Επιπρόσθετα, με πολλαπλά συστήματα που συνεργάζονται, τα GNSS θα μπορέσουν να έχουν καλύτερη διόρθωση στα σφάλματα από την ιονόσφαιρα και κατ' επέκταση μεγαλύτερη ακρίβεια (Elmunim 2023).

Όλες αυτές οι προοπτικές για τα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης μπορούν στο μέλλον να δημιουργήσουν νέες αγορές και υπηρεσίες που δεν έχουμε ακόμα οραματιστεί.





## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Υπάρχουν 4 παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GNSS) σε λειτουργία τα οποία προσφέρουν υπηρεσίες προσδιορισμού θέσης και χρόνου τόσο για εμπορική όσο και για στρατιωτική χρήση της εκάστοτε χώρας στην οποία ανήκει το σύστημα και των συμμάχων της.
- Το παλαιότερο από τα GNSS, είναι το GPS των ΗΠΑ ενώ ακολούθησαν χρονικά το GLONASS της Ρωσικής Ομοσπονδίας (τότε Σοβιετική Ένωση), το BeiDou της Λαϊκής Δημοκρατίας της Κίνας και τέλος το Galileo της Ευρωπαϊκής Ένωσης.
- Το Galileo είναι το πρώτο σύστημα που δεν έχει κατασκευαστεί αμιγώς για στρατιωτικούς σκοπούς και έτσι η μη-κρυπτογραφημένη συχνότητα του δίνει στους χρήστες καλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό θέσης αν και ακόμα δεν έχει ολοκληρωθεί.
- Οι τροχιές των δορυφόρων χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες. Τις Χαμηλές Γήινες Τροχιές (Low Earth Orbits), τις Μεσαίες Γήινες Τροχιές (Medium Earth Orbits) και τις Γεωσύγχρονες τροχιές (Geostationary Orbits).
- Οι δορυφορικοί αστερισμοί των GNSS πλην του BeiDou βρίσκονται σε Μεσαίες Γήινες Τροχιές, ενώ το BeiDou χρησιμοποιεί υβριδικές τροχιές με δορυφόρους σε MEO αλλά και σε γεωσύγχρονες τροχιές και επικλινής γεωσύγχρονες τροχιές.
- Οι δορυφορικοί αστερισμοί εντός της MEO είναι τοποθετημένοι σε 3 τροχιακά επίπεδα για όλα τα συστήματα εκτός του GPS που χρησιμοποιεί 6 τροχιακά επίπεδα.
- Ο δορυφορικός αστερισμός με τους περισσότερους δορυφόρους είναι του BeiDou ενώ ακολουθούν το GPS, το Galileo και το GLONASS.
- Ως προς την ακρίβεια προσδιορισμού θέσης το BeiDou και το Galileo έχουν την καλύτερη απόδοση στα μη-κρυπτογραφημένα σήματα τους με τιμή ίση με το 1 μέτρο ενώ GLONASS και GPS έπονται με 2,8 και 4,9 μέτρα αντίστοιχα.
- Η ενσωμάτωση των σημάτων από πολλαπλά συστήματα και η ταυτόχρονη επεξεργασία τους αποτελούν την νέα πρόκληση στον τομέα των GNSS.
- Με την ταυτόχρονη λήψη σημάτων από διαφορετικά συστήματα, η ακρίβεια θέσης, η ταχύτητα και η απόδοση σε δύσκολα περιβάλλοντα αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά.
- Επιπλέον για την βελτίωση της απόδοσης γίνονται προσπάθειες συνδυασμού δορυφόρων του GNSS με δορυφόρους σε χαμηλές γήινες τροχιές, δημιουργώντας έτσι υβριδικά συστήματα.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bonnor, Norman. 2012. "A Brief History of Global Navigation Satellite Systems." *Journal of Navigation* 65 (1): 1–14. <https://doi.org/10.1017/S0373463311000506>.
- Bousquet, Michel. 2017. "Satellite Communications and Space Telecommunication Frequencies BT - Handbook of Satellite Applications." In , edited by Joseph N Pelton, Scott Madry, and Sergio Camacho-Lara, 325–57. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-23386-4\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23386-4_13).
- Danchik, R J. 1984. "The Navy Navigation Satellite System (TRANSIT)." *Johns Hopkins APL Technical Digest* 5 (December): 323–29. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1984JHATD...5..323D>.
- Elmunim, Nouf Abd. 2023. "Improving the Accuracy of the Global Navigation Satellite System." In , edited by Dr. Yann-Henri H Chemin, Ch. 4. Rijeka: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1001054>.
- Equal Ocean. 2020 Is China's BeiDou a Better Version of GPS and GLONASS?, Retrieved 12 August 2023, < <https://equalocean.com/analysis/2020082614631>>
- Galileo is the European global satellite-based navigation system, EUSPA 2019, accessed 1 August 2023, < <https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo>>.
- Hybrid Space Architecture and the Pathway to a New Space Ecosystem. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2022. Leveraging Commercial Space for Earth and Ocean Remote Sensing. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/26380.
- LEO parameters. [www.spaceacademy.net.au](http://www.spaceacademy.net.au). Archived from the original on 11 February 2016. Retrieved 12 August 2023.
- Paziewski, Jacek. 2020. "Recent Advances and Perspectives for Positioning and Applications with Smartphone GNSS Observations." *Measurement Science and Technology* 31 (9). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab8a7d>.
- Ristic, Aleksandar, Miro Govedarica, and D Petrovacki. 2010. "GNSS: Status and Perspective" 14 (January): 6–10.
- Russian Interstate Aviation Committee, The GLONASS and GNSS user performance, accessed on August 1 2023, < [https://glonass-iac.ru/en/user\\_performance/](https://glonass-iac.ru/en/user_performance/)>.
- Saeed, Nasir, Ahmed Elzanaty, Heba Almorad, Hayssam Dahrouj, Tareq Al-Naffouri, and Mohamed-Slim Alouini. 2020. *CubeSat Communications: Recent Advances and Future Challenges*. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.12179397.v1>.
- Sampaio, J C, E Wnuk, R Vilhena de Moraes, and S S Fernandes. 2014. "Resonant Orbital Dynamics in LEO Region: Space Debris in Focus." Edited by Antonio F Bertachini A Prado. *Mathematical Problems in Engineering* 2014: 929810. <https://doi.org/10.1155/2014/929810>.
- Sputnik and the Dawn of the Space Age. NASA History, accessed on July 28 2023, < <https://history.nasa.gov/sputnik.html>>
- Transit Satellite: Space-based Navigation, Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), accessed on July 27 2023, <<https://www.darpa.mil/about-us/timeline/transit-satellite>>
- US Government. "GPS.gov". [gps.gov](http://gps.gov). U.S. Government.2023
- Zelenyi, Lev, and Olga Zakutnyaya. 2017. "The 'Simplest Satellite' That Opened up the Universe: Sputnik 1 Was Launched 60 Years Ago to Win a Political Space Race, but





Κωνσταντίνος Κατσαρός,  
GNSS: Μελέτη του διαστημικού τμήματος

Its Legacy Is Collaborative Explorations Far beyond Earth.” *American Scientist* 105 (August): 282+.

<https://link.gale.com/apps/doc/A504340281/AONE?u=anon~85a6d776&sid=googleScholar&xid=a1aff5e5>.

- Zhang, Wei, Tao Wu, Hong Ma, and Guixin Li. 2019. “A Global Seamless Hybrid Constellation Design Approach with Restricted Ground Supporting for Space Information Network,” *Journal of Systems Science and Information*, 7 (3): 257–69. <https://doi.org/doi:10.21078/JSSI-2019-257-13>.
- Παλληκάρης, Αθανάσιος, Γεώργιος Κατσούλης, and Δημήτριος Δαλακλής. 2016. *Ναυτικά Ηλεκτρονικά Όργανα Και Συστήματα Ηλεκτρονικού Χάρτη ECDIS. Ίδρυμα Ευγενίδου*.