

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

**ΤΜΗΜΑ Πολιτικών Μηχανικών ΤΕ και Μηχανικών Τοπογραφίας &
Γεωπληροφορικής ΤΕ**

Δορυφορική Γεωδαισία (GPS)

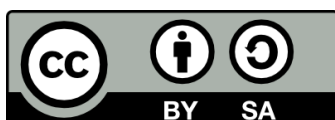
**Δρ. Κατσουγιαννόπουλος
Καθηγητής**

ΣΕΡΡΕΣ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2015



Άδειες Χρήσης

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons. Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Το έργο αυτό αδειοδοτείται από την Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Παρόμοια Διανομή 4.0 Διεθνές Άδεια. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής, επισκεφτείτε <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.el>.

Χρηματοδότηση

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.

Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.

Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



ΤΕΙ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΤΕ και Μηχανικών Τοπογραφίας &
Γεωπληροφορικής ΤΕ

κατεύθυνση Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής ΤΕ

***Εφαρμογές Παγκοσμίου Δορυφορικού Συστήματος Εντοπισμού
Θέσης (GPS)***

Κωδικός Μαθήματος 501

Σημειώσεις Θεωρίας

Ε' Εξάμηνο

Ακαδημαϊκό έτος 2014 – 2015

○ Στοιχεία θεωρίας

1. Γενικά περί GNSS & αρχή λειτουργίας. Απόλυτος προσδιορισμός θέσης.
2. Απόλυτος και σχετικός προσδιορισμός.
3. Μετρήσεις φάσης και κώδικα.
4. Μεθοδολογία επίλυσης, έννοια συνόρθωσης, ελάχιστα τετράγωνα με και χωρίς σφάλματα,
5. Γεωμετρικά μέτρα ακρίβειας

- Στοιχεία θεωρίας
 6. Εξισώσεις παρατηρήσεων για διάφορα σενάρια παρατηρήσεων δεκτών, δορυφόρων, εποχών
 7. Θεωρία γεωδαισίας – Συστήματα αναφοράς
 8. Εφαρμογές GPS συμβατικές και μη
 9. Υψομετρία, κατακόρυφα συστήματα αναφοράς, στοιχεία από φυσική γεωδαισία και πεδίο βαρύτητας
 10. Δίκτυα μόνιμων σταθμών αναφοράς, δικτυακές τεχνικές
 11. Εφαρμογές – Προβλήματα προς επίλυση – Θεωρητικές ασκήσεις και λύση

- **Τελικός βαθμός**

- **Εξετάσεις (100%)**

Τελικές γραπτές εξετάσεις στο μάθημα

○ Τελικός βαθμός

- Εξετάσεις (100%)

Τελικές γραπτές εξετάσεις στο μάθημα

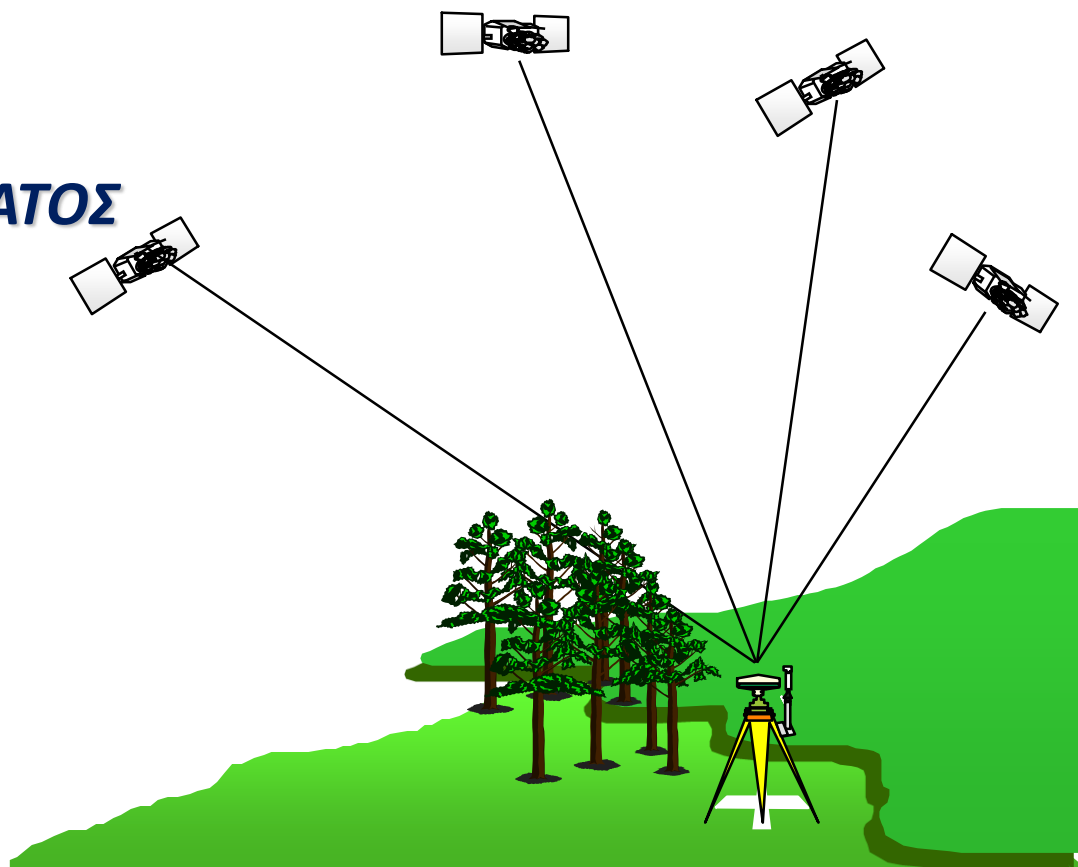
- Bonus ερωτήσεις κατά τη διάρκεια του εξαμήνου +(10%)
Αν απαντηθούν όλες σωστά και στην ώρα τους....παράδοση μόνο ηλεκτρονική

- **Παράδοση ασκήσεων & θεμάτων**
 - Σε μορφή τεχνικής έκθεσης (δηλαδή? → επόμενη διαφάνεια)
 - Βιβλιοδετημένο τεύχος,
 - Γραμμένο σε επεξεργαστή κειμένου (H/Y) (κατά προτίμηση),
 - Δυνατότητα παράδοσης και με e-mail, αλλά...
 - Υποχρεωτικά με επιβεβαίωση παραλαβής από τον διδάσκοντα

ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ

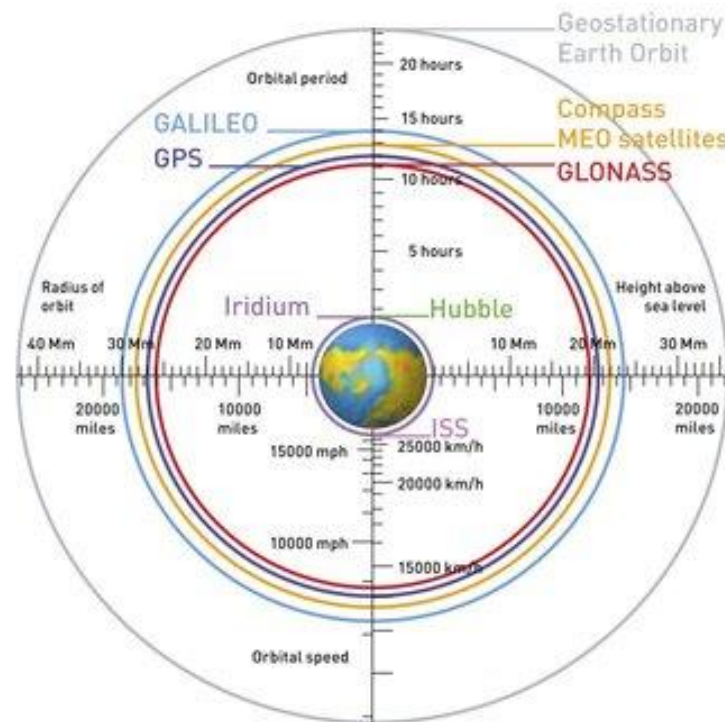
GLOBAL POSITIONING SYSTEM GPS

ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

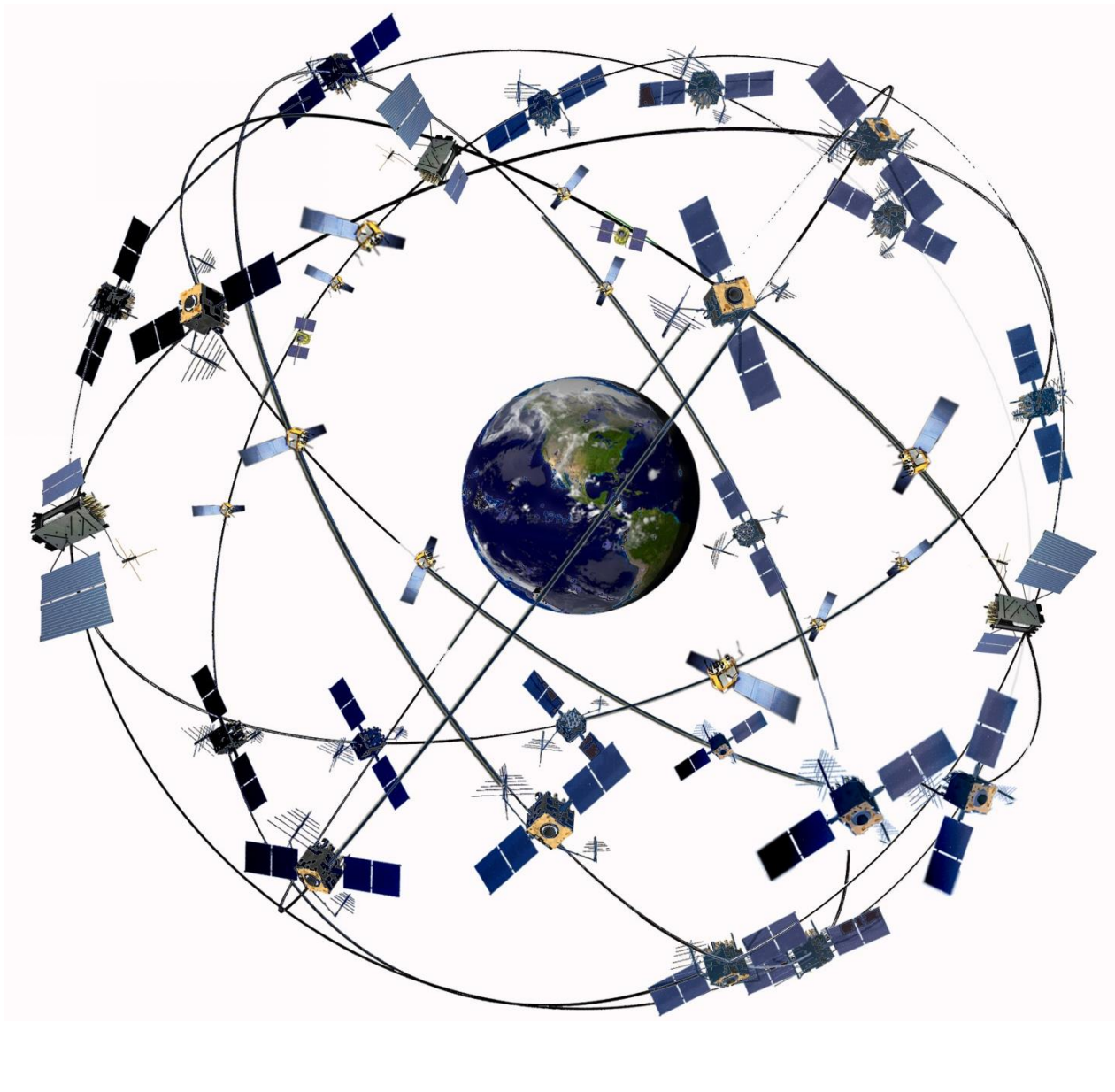


GPS & GNSS

- GNSS (Global Navigation Satellite system) δορυφορικά συστήματα πλοήγησης, GPS το κυριότερο και ευρύτερα διαδεδομένο.
- Περισσότερα του ενός συστήματα προσδιορισμού θέσης είναι σήμερα σε άμεση χρήση.



- GPS



GPS & GNSS



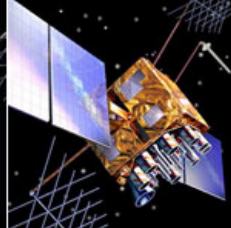
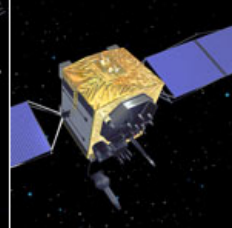
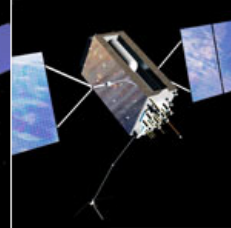
- GPS
- 31 SVs
- 5 BLOCK IIA
- 12 BLOCK IIR
- 7 BLOCK IIR(M)
- 7 BLOCK IIF

GPS CONSTELLATION STATUS FOR 10/06/2014

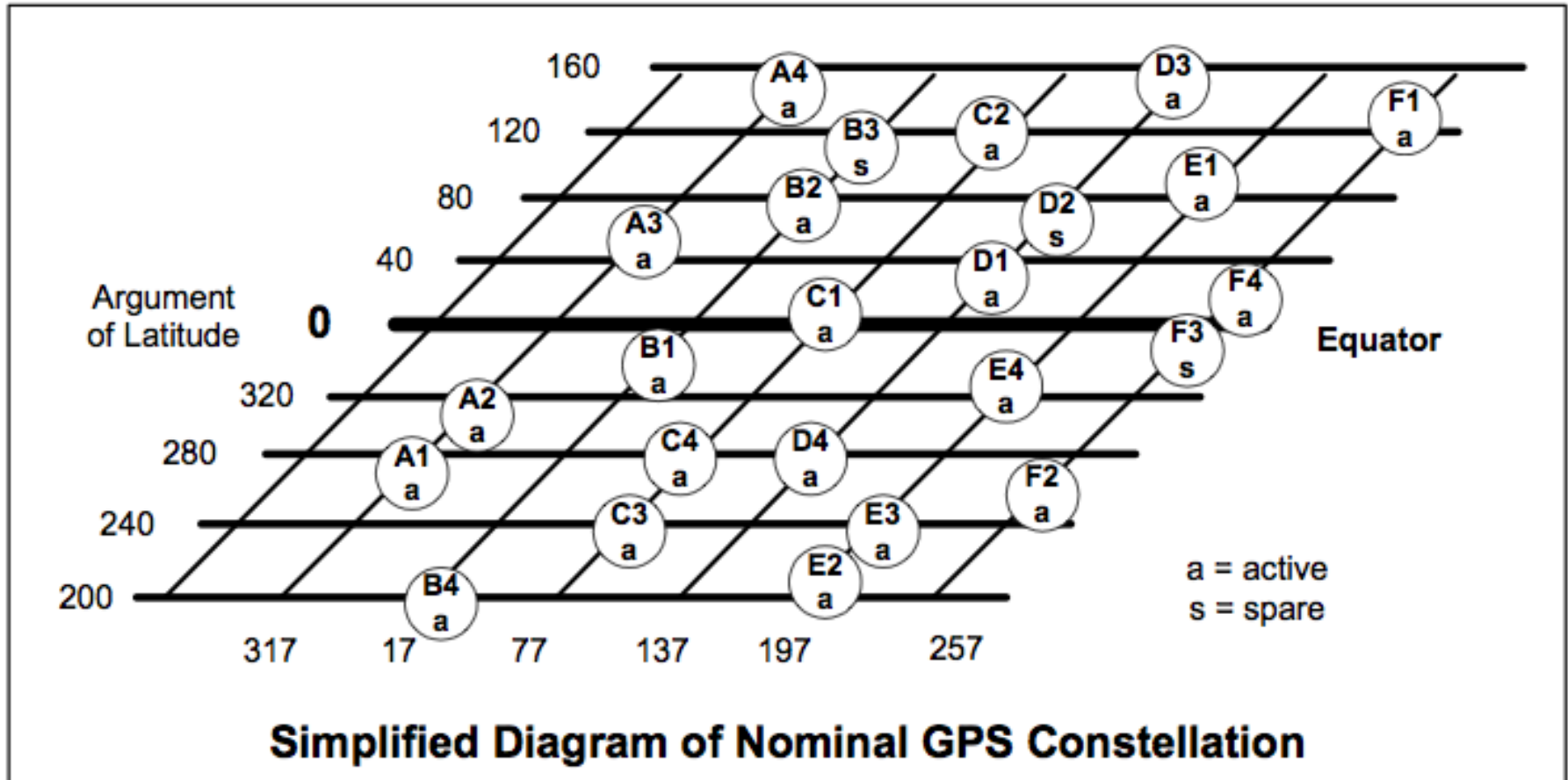
Plane	Slot	SVN	PRN	Block-Type	Clock	Outage Date	Nanu-Type	Nanu-Subject
A	1	65	24	IIF	CS			
A	2	52	31	IIR-M	RB			
A	3	38	8	IIA	CS			
A	4	48	7	IIR-M	RB			
A	6	64	30	IIF	RB			
B	1	56	16	IIR	RB			
B	2	62	25	IIF	RB	02 OCT 2014	FCSTSUMM	2014074 - SVN62 (PRN25) FORECAST OUTAGE SUMMARY JDAY 275/1600 - JDAY 275/2143
B	3	44	28	IIR	RB			
B	4	58	12	IIR-M	RB			
C	1	57	29	IIR-M	RB			
C	2	66	27	IIF	RB			
C	3	59	19	IIR	RB			
C	4	53	17	IIR-M	RB			
C	5	33	3	IIA	CS			
D	1	61	2	IIR	RB			
D	2	63	1	IIF	RB			
D	3	45	21	IIR	RB			
D	4	34	4	IIA	RB			
D	5	46	11	IIR	RB			
D	6	67	6	IIF	RB			
E	1	51	20	IIR	RB			
E	2	47	22	IIR	RB			
E	3	50	5	IIR-M	RB			
E	4	54	18	IIR	RB			
E	5	23	32	IIA	RB			
E	6	40	10	IIA	CS			
F	1	41	14	IIR	RB			
F	2	55	15	IIR-M	RB			
F	3	43	13	IIR	RB			
F	4	60	23	IIR	RB			
F	5	26	26	IIA	RB			
F	6	68	9	IIF	RB			

GPS & GNSS

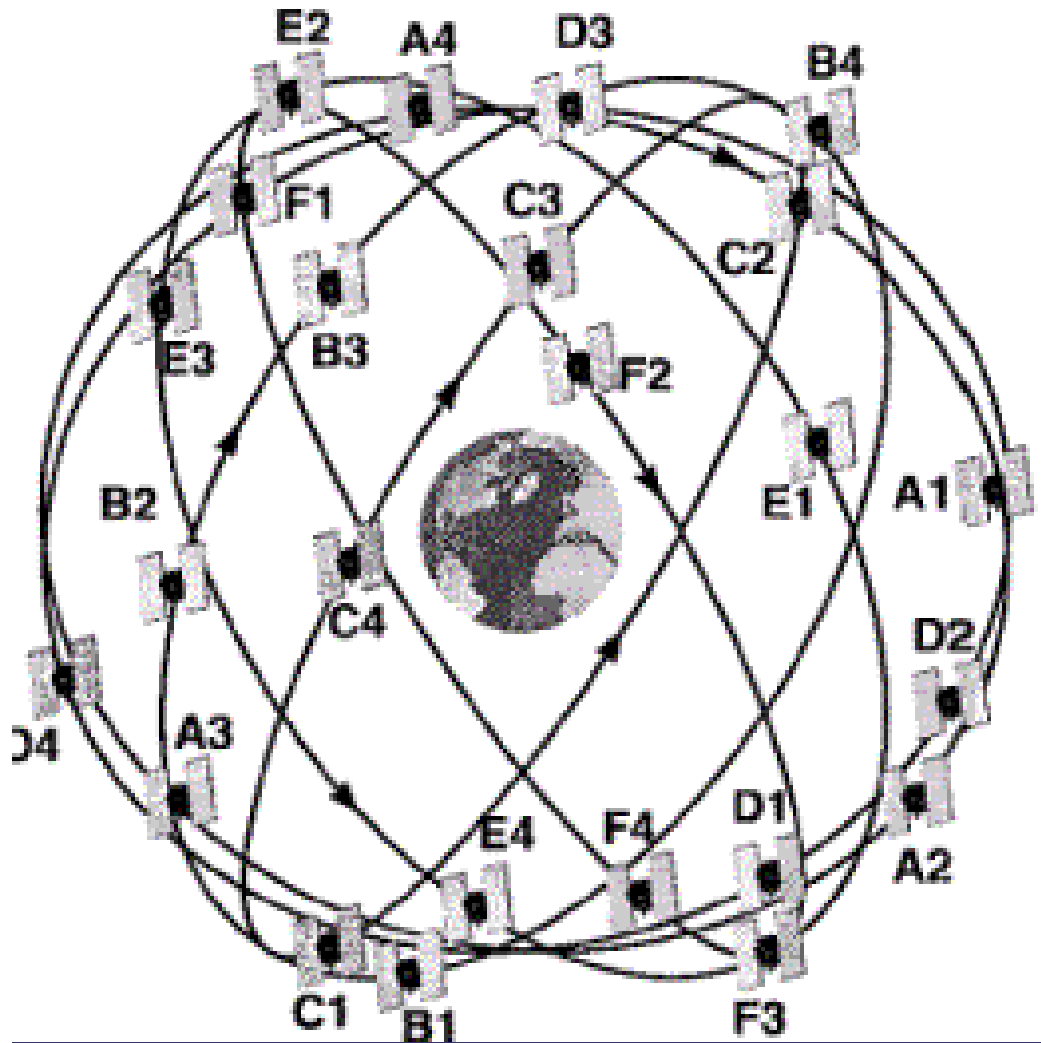
- GPS
- 31 SVs
- 5 BLOCK IIA
- 12 BLOCK IIR
- 7 BLOCK IIR(M)
- 7 BLOCK IIF

LEGACY SATELLITES		MODERNIZED SATELLITES		
				
BLOCK IIA	BLOCK IIR	BLOCK IIR(M)	BLOCK IIF	GPS III
5 operational	12 operational	7 operational	7 operational	Now in production
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coarse Acquisition (C/A) code on L1 frequency for civil users ▪ Precise P(Y) code on L1 & L2 frequencies for military users ▪ 7.5-year design lifespan ▪ Launched in 1990-1997 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ C/A code on L1 ▪ P(Y) code on L1 & L2 ▪ On-board clock monitoring ▪ 7.5-year design lifespan ▪ Launched in 1997-2004 <p>VIEW AIR FORCE FACT SHEET →</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ All legacy signals ▪ 2nd civil signal on L2 (L2C) LEARN MORE → ▪ New military M code signals for enhanced jam resistance ▪ Flexible power levels for military signals ▪ 7.5-year design lifespan ▪ Launched in 2005-2009 <p>VIEW AIR FORCE FACT SHEET →</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ All Block IIR(M) signals ▪ 3rd civil signal on L5 frequency (L5) LEARN MORE → ▪ Advanced atomic clocks ▪ Improved accuracy, signal strength, and quality ▪ 12-year design lifespan ▪ Launched since 2010 <p>VIEW AIR FORCE FACT SHEET →</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ All Block IIF signals ▪ 4th civil signal on L1 (L1C) LEARN MORE → ▪ Enhanced signal reliability, accuracy, and integrity ▪ No Selective Availability LEARN MORE → ▪ Satellites 9+: laser reflectors; search & rescue payload ▪ 15-year design lifespan ▪ Begins launching in 2016 <p>VIEW AIR FORCE FACT SHEET →</p>

- GPS

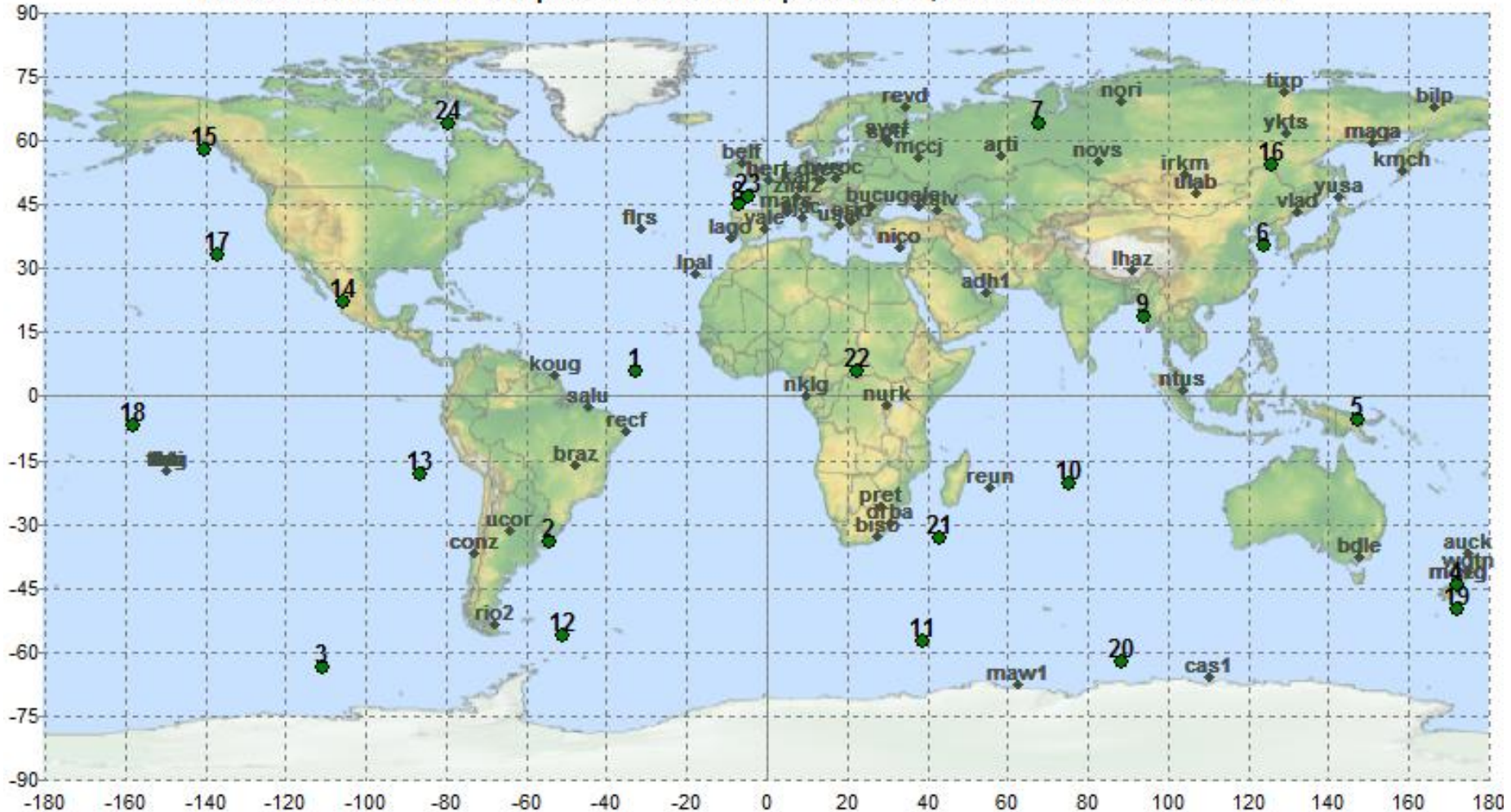


- GPS



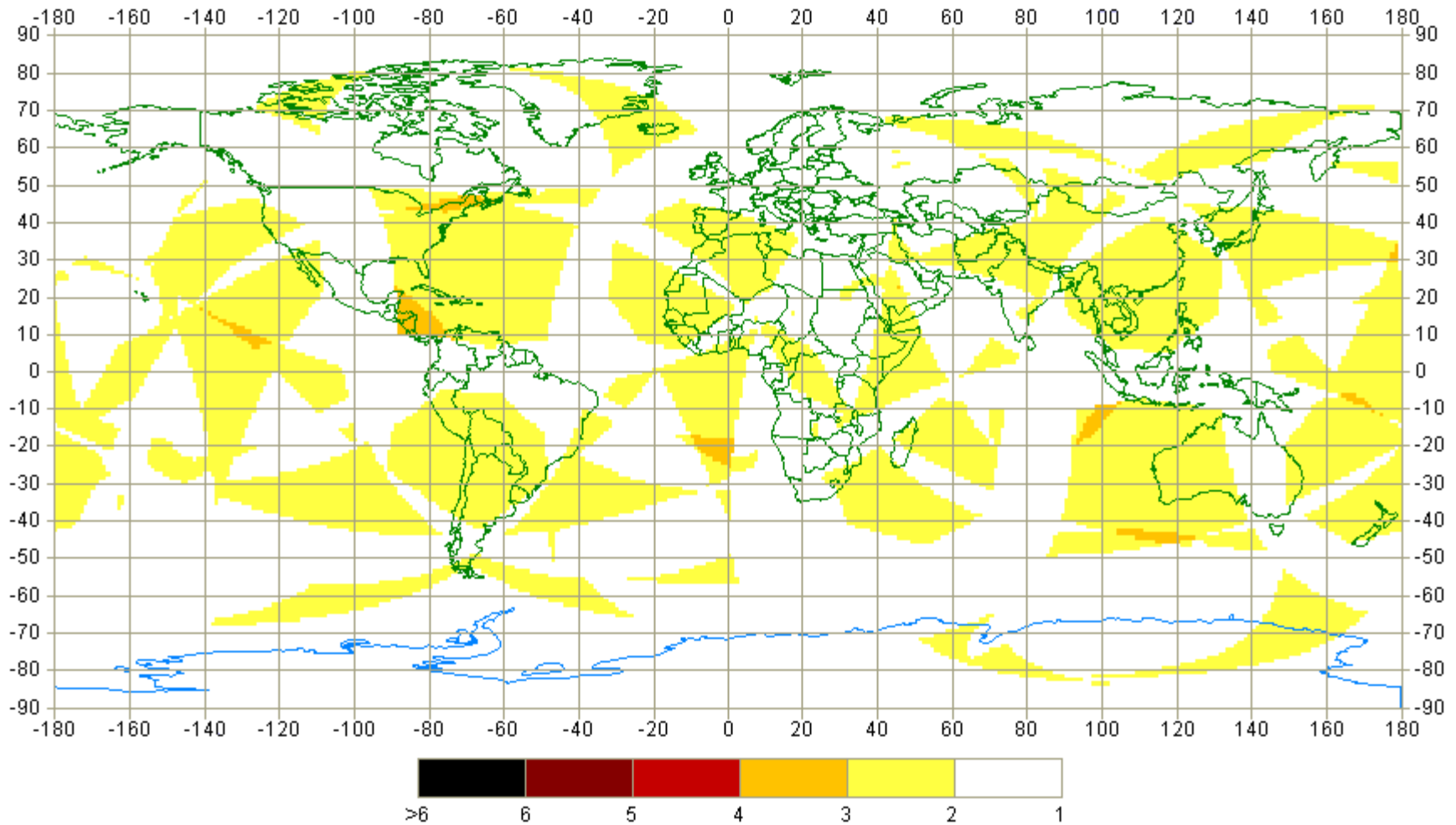
- **GLONASS**

Положение КА ГЛОНАСС и расчетная зона покрытия станций на 19:51:00 06.10.14 UTC+4



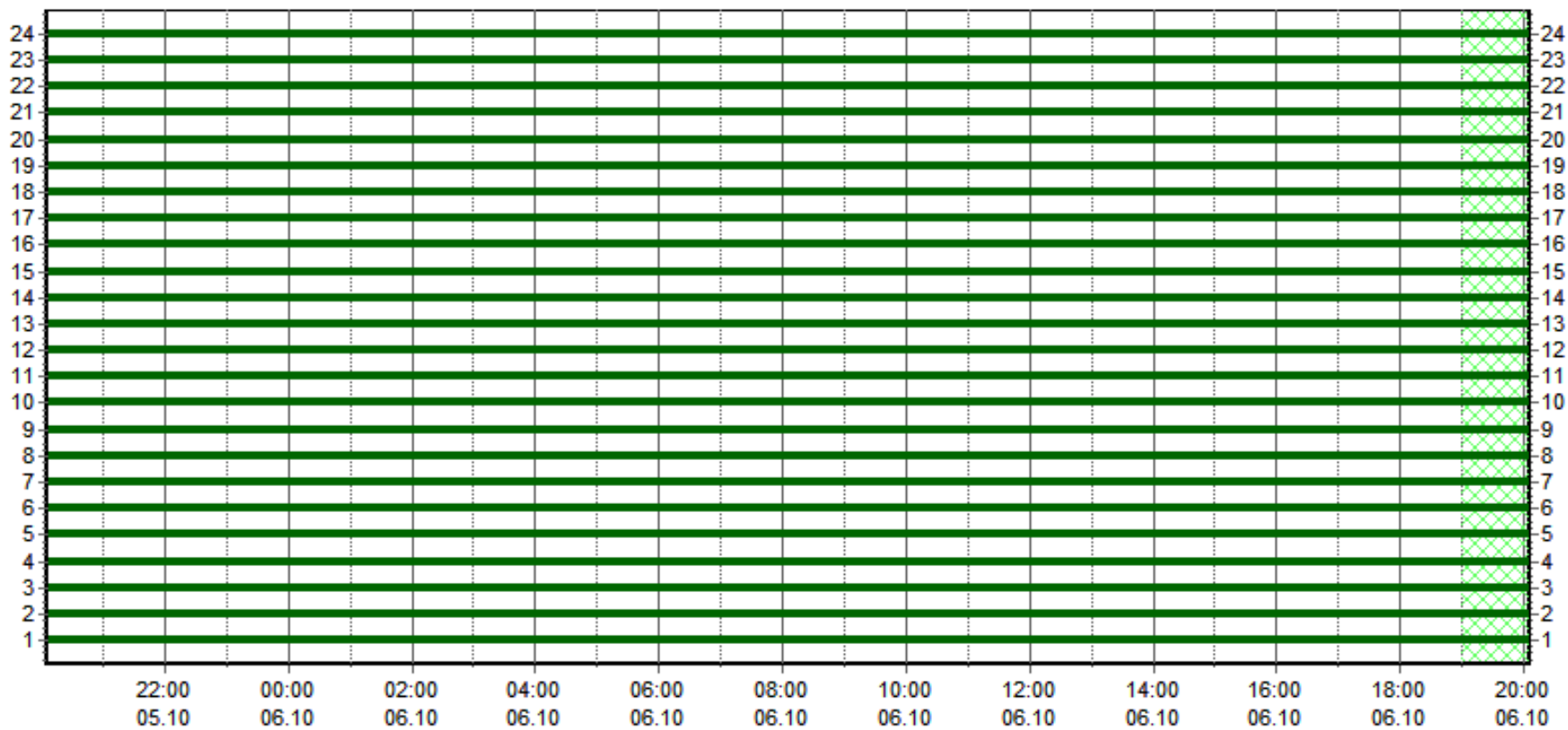
- **GLONASS**

Moscow Time (UTC+3 hours): 19:09:58 06.10.2014

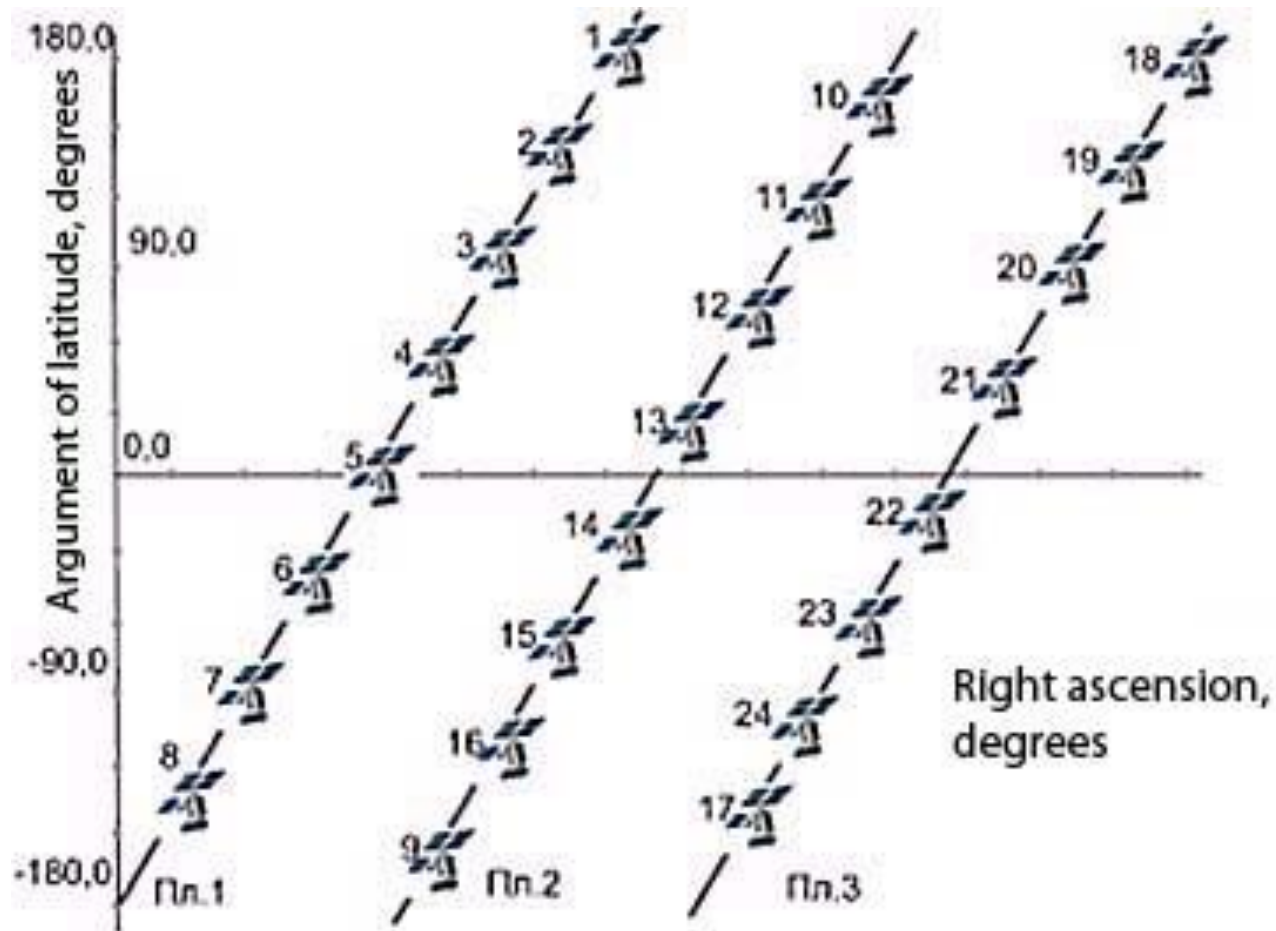


- GLONASS
- 24 SVs

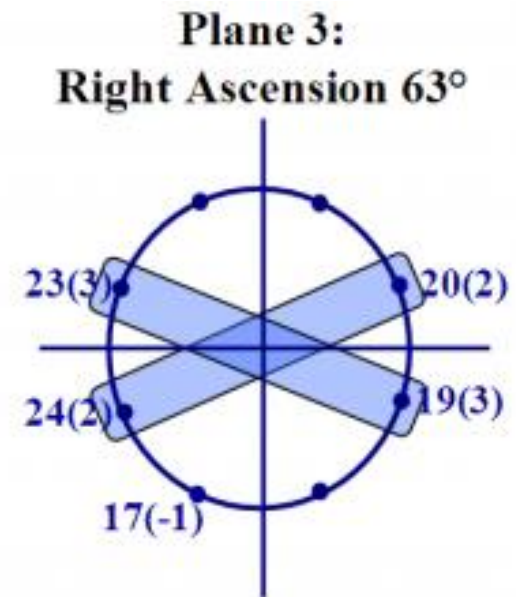
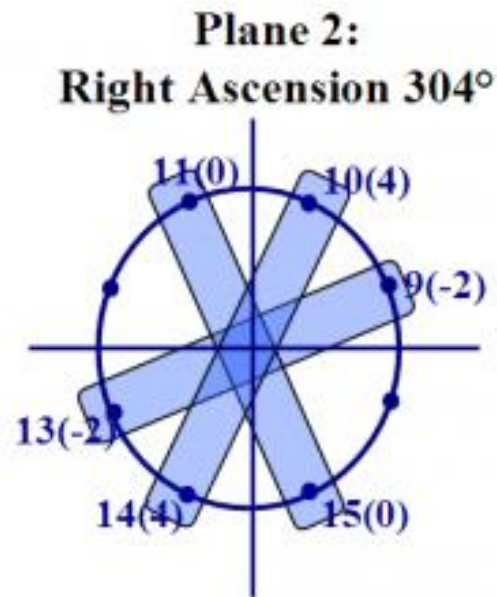
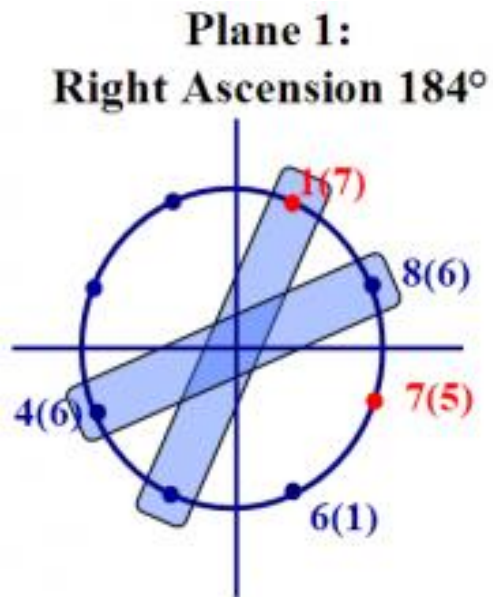
Состояние КА ГЛОНАСС с 20:05:30 05.10.14 по 20:05:30 06.10.14 UTC+4



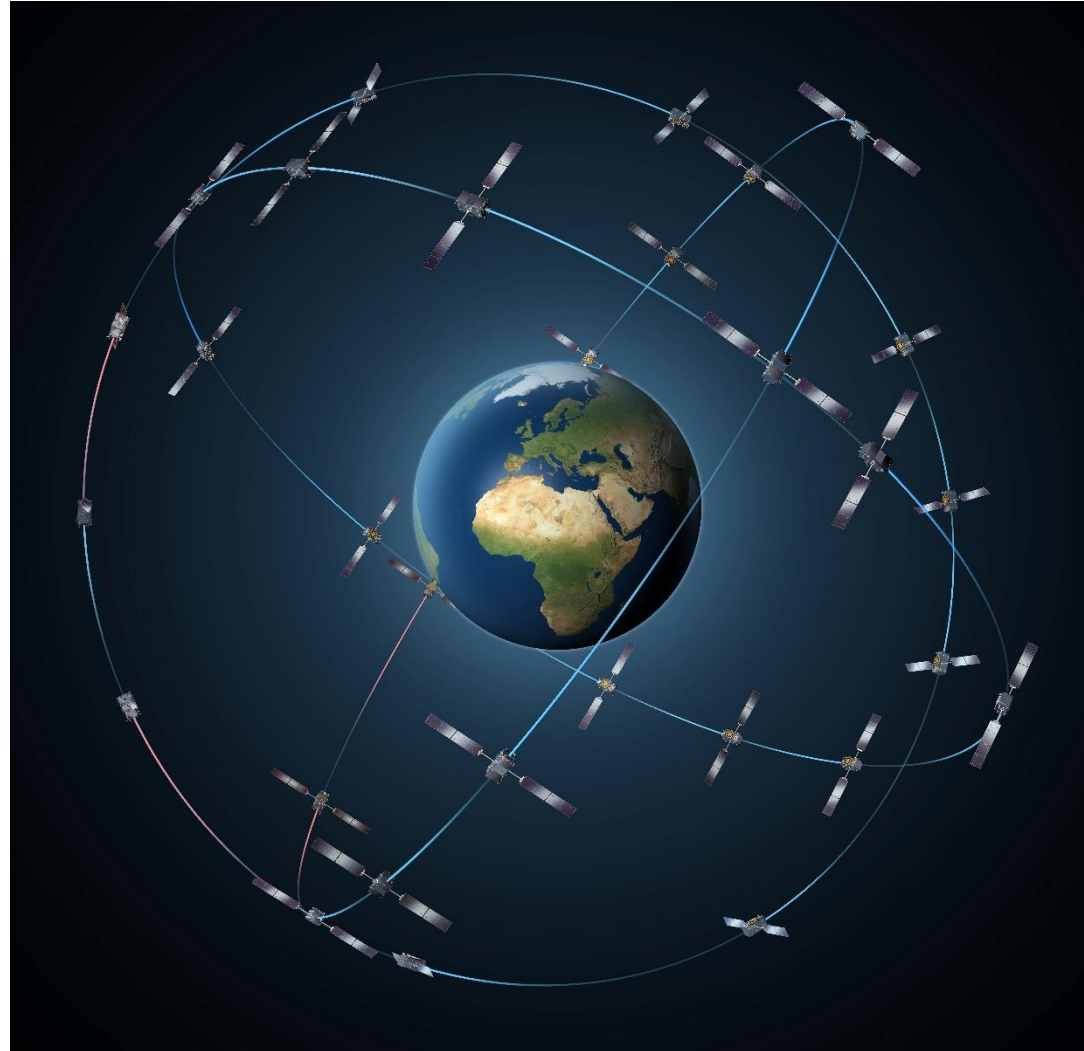
- GLONASS
- 24 SVs



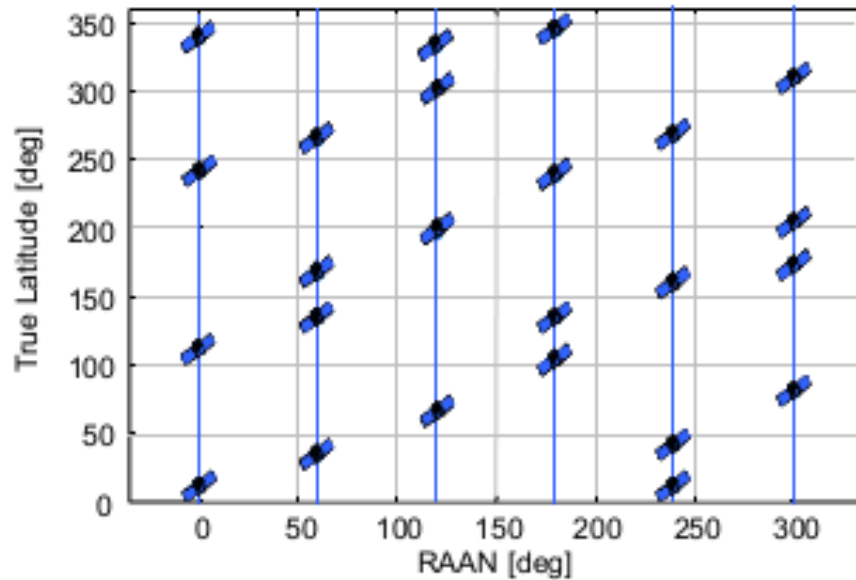
- GLONASS
- 24 SVs



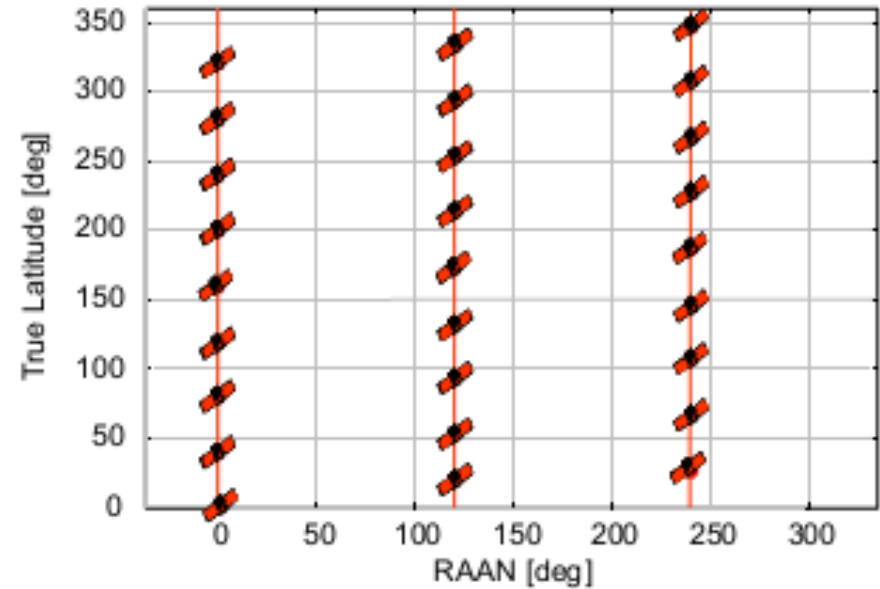
- GALILEO
- 30 SVs
- 3 τροχιακά επίπεδα



- GALILEO
- 30 SVs
- 3 τροχιακά επίπεδα

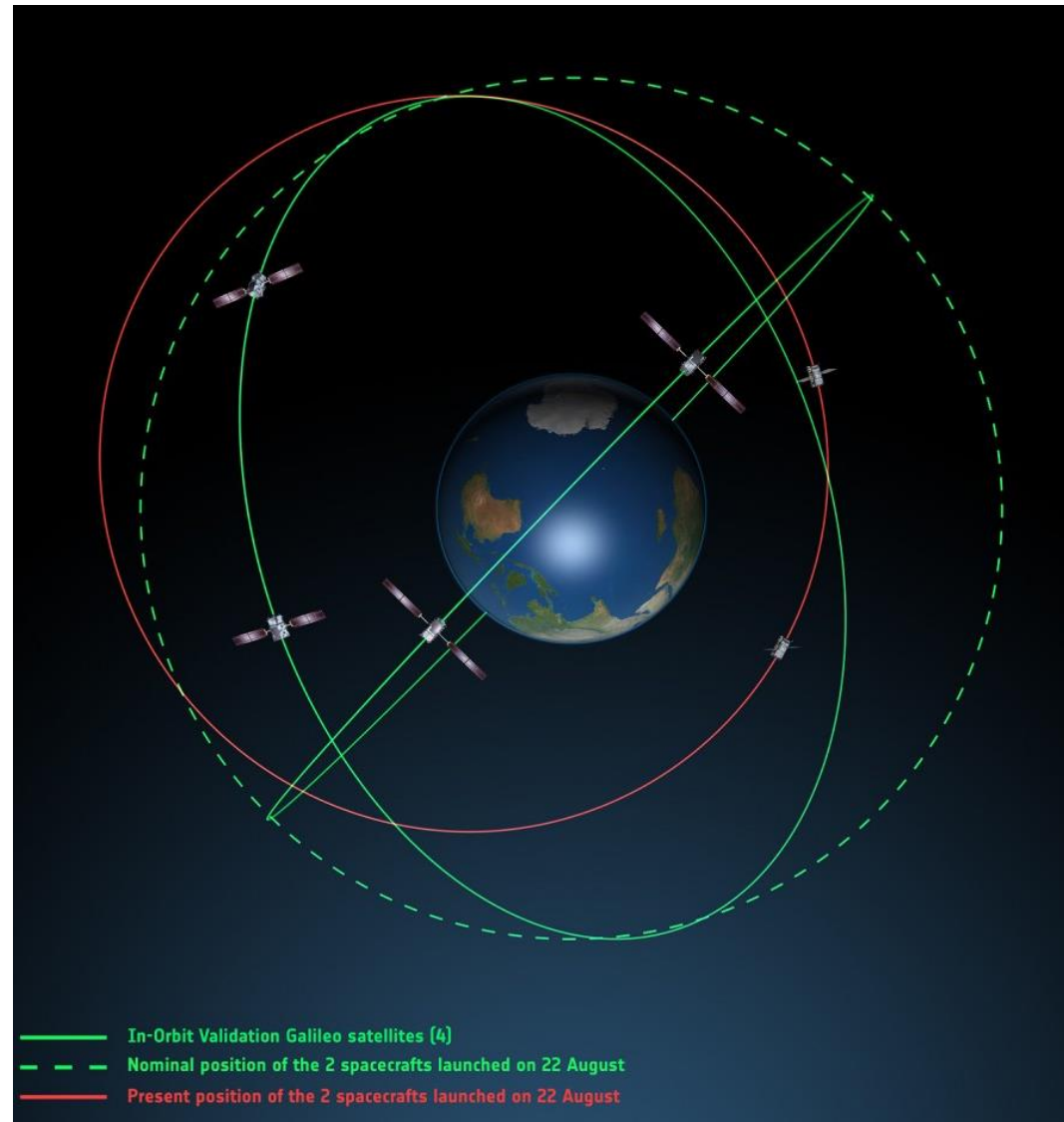


GPS



GALILEO

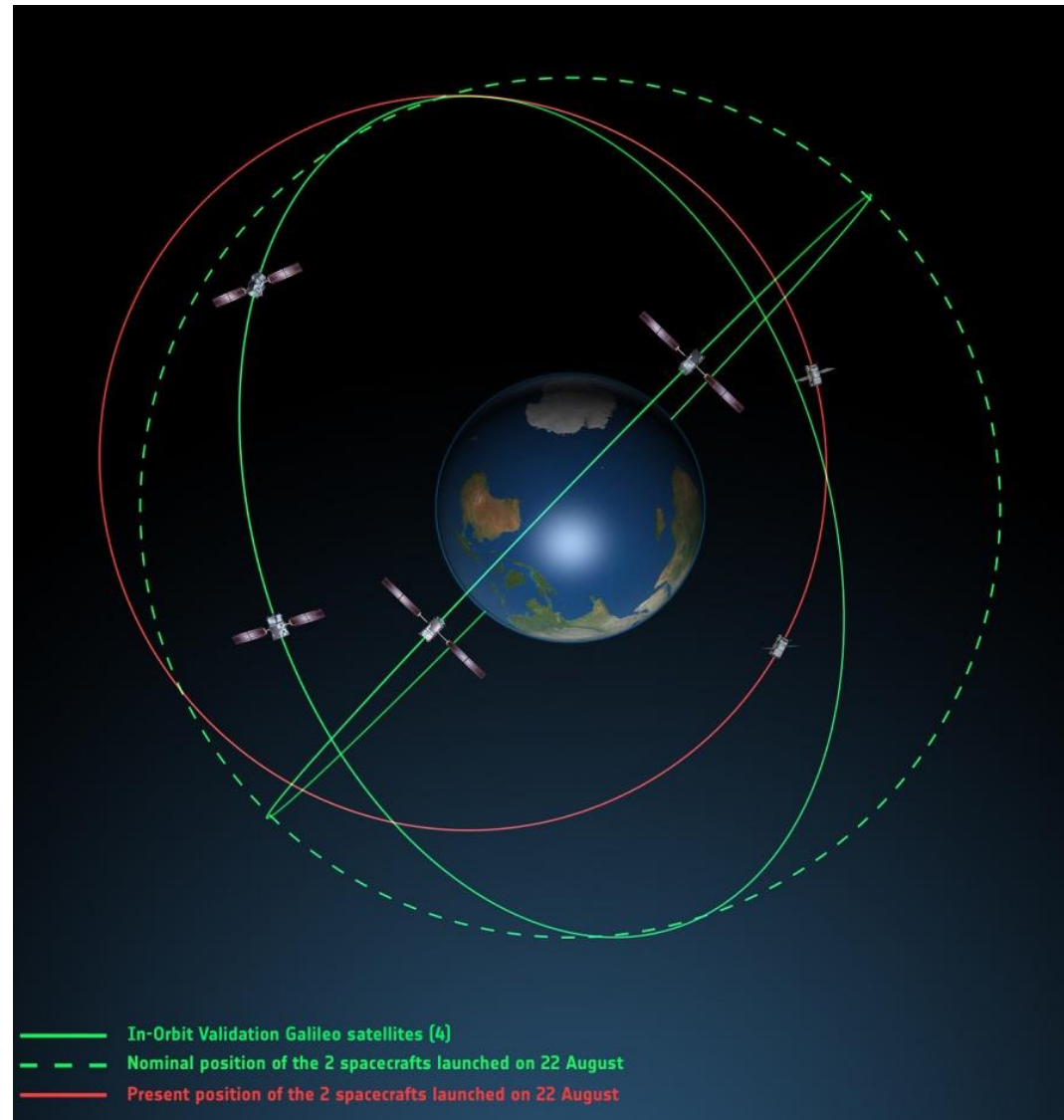
- GALILEO
- 30 SVs
- 3 τροχιακά επίπεδα
- $e=0.0001$
- $i=56^\circ$
- $a=29,900.00$ m
- $\omega=0^\circ$
- $\Omega=113.6^\circ$ και 233.6°



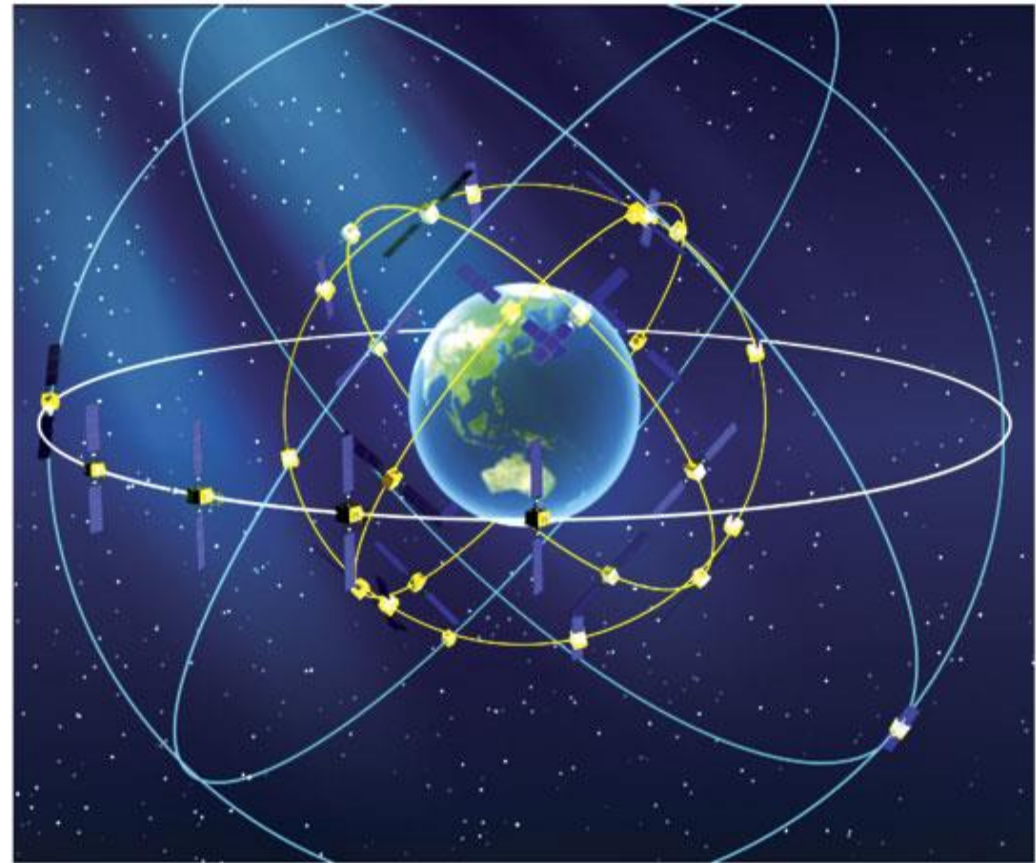
- $e=0.0001$
- $i=56^\circ$
- $a=29,900.00$ m
- $\omega=0^\circ$
- $\Omega=113.6^\circ$ και 233.6°

22/08/2014

- $e=0.23$
- $i=49.8^\circ$
- $\alpha=26,200.00$ m



- BeiDou ή COMPASS
- 35 SVs
- 3 GEO (γεωστατικοί)
- 27 MEO (μέσης γήινης τροχιάς)
- 3 κεκλιμένης γεωσύγχρονης τροχιάς

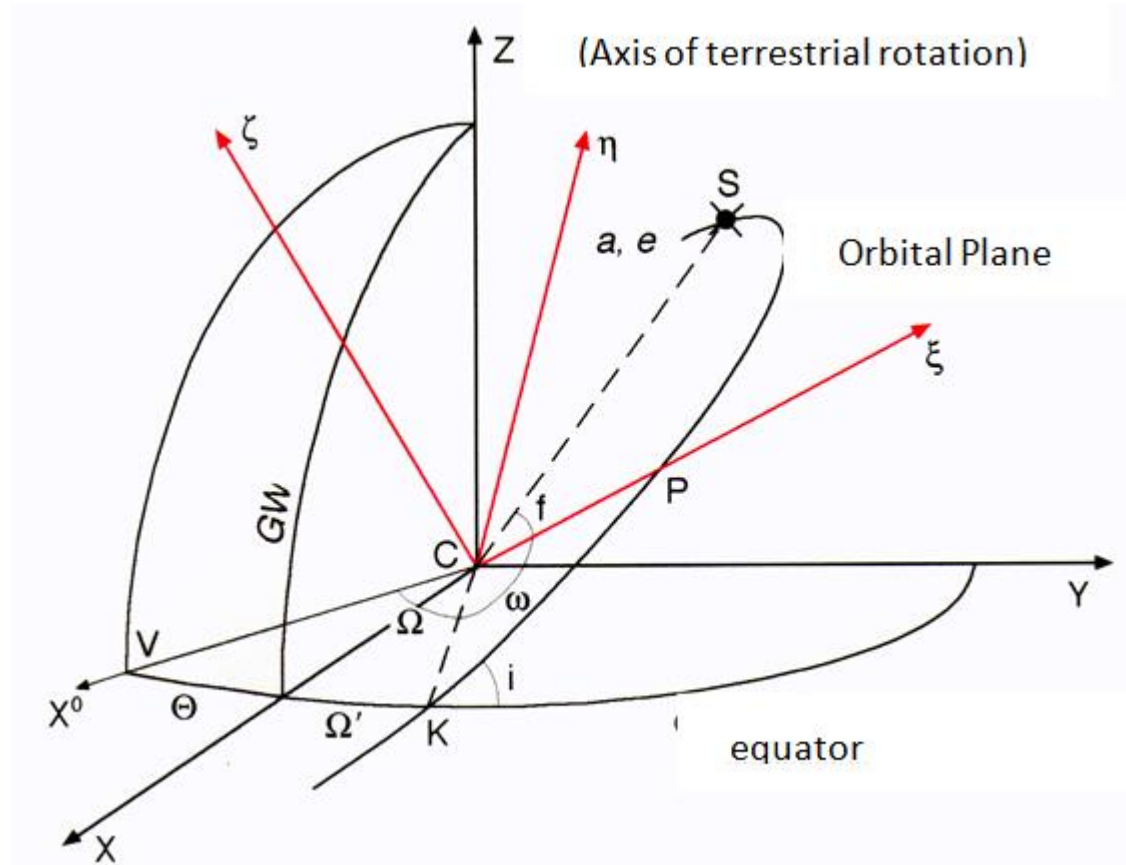


- BeiDou ή COMPASS
- 35 SVs
- 3 GEO (γεωστατικοί)
- 27 MEO (μέσης γήινης τροχιάς)
- 3 κεκλιμένης γεωσύγχρονης τροχιάς

Orbit parmts.	GEO	IGSO	MEO
Semi-Major Axis (Km)	42164	42164	27878
Eccentricity	0	0	0
Inclination (deg)	0	55	55
RAAN (deg)	158.75E, 180E, 210.5E, 240E,260E	218E,98E,338E	
Argument Perigee	0	0	--
Mean anomaly (deg)	0	218E:0,98E:120,338E:240	
# Sats	5	3	27
# Planes	1	3	3

- BeiDou ή COMPASS
- 35 SVs
- 3 GEO (γεωστατικοί) *για πλοήγηση πάνω από την Κίνα*
- 27 MEO (μέσης γήινης τροχιάς *για πλοήγηση σε παγκόσμια κλίμακα*)
- 3 κεκλιμένης γεωσύγχρονης τροχιάς *για πλοήγηση ακόμη και με «κλειστό» ουρανό – τουλάχιστον ένας θα είναι ορατός πάνω από την Κίνα συνεχώς*

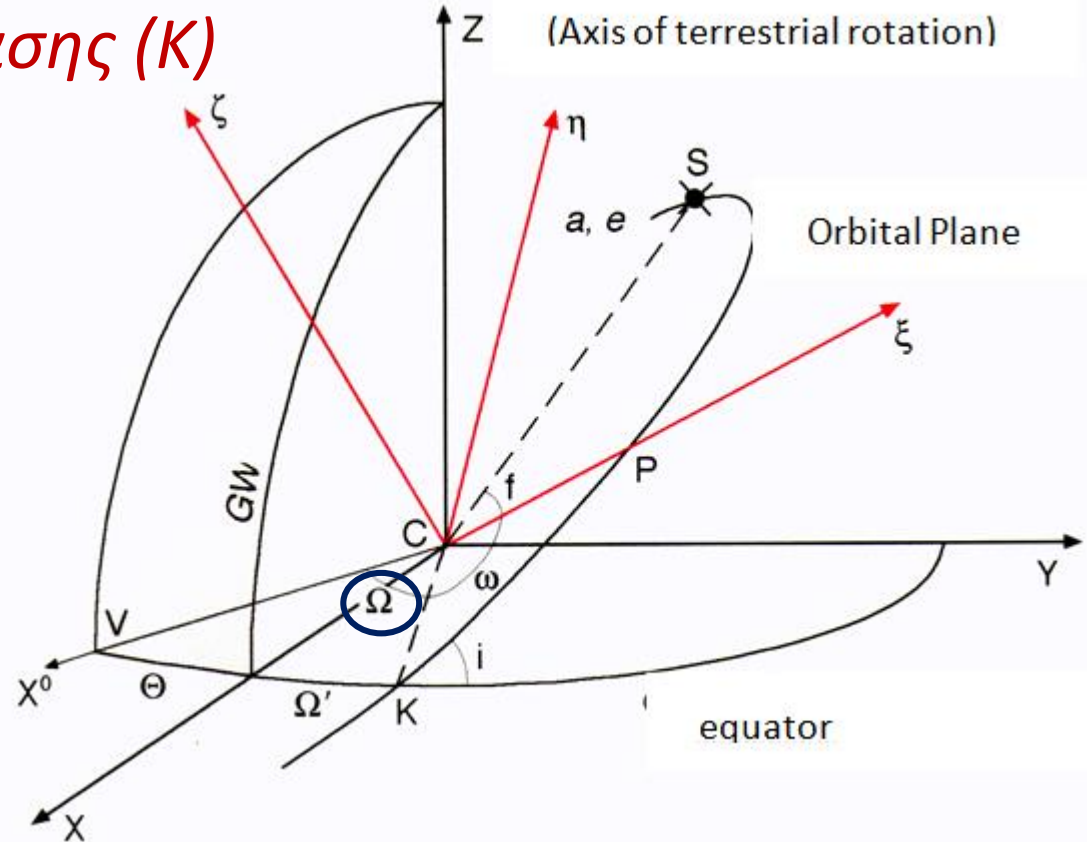
- Η δορυφορική τροχιά – 6 Κεπλέρια στοιχεία



- Η δορυφορική τροχιά– 6 Κεπλέρια στοιχεία

- Ω – ορθή αναφορά

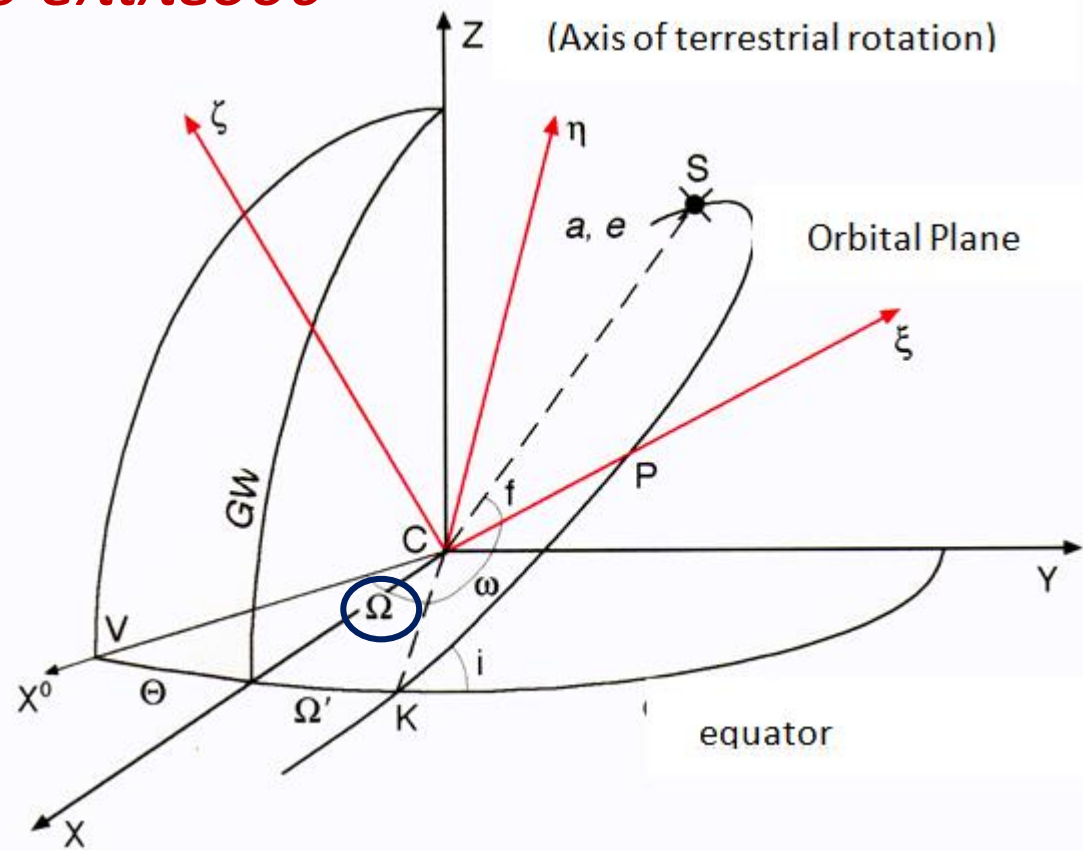
*γωνία μεταξύ του εαρινού
ισημερινού σημείου (V) και του
συνδέσμου ανάβασης (K)*



- Η δορυφορική τροχιά– 6 Κεπλέρια στοιχεία

- i – κλίση

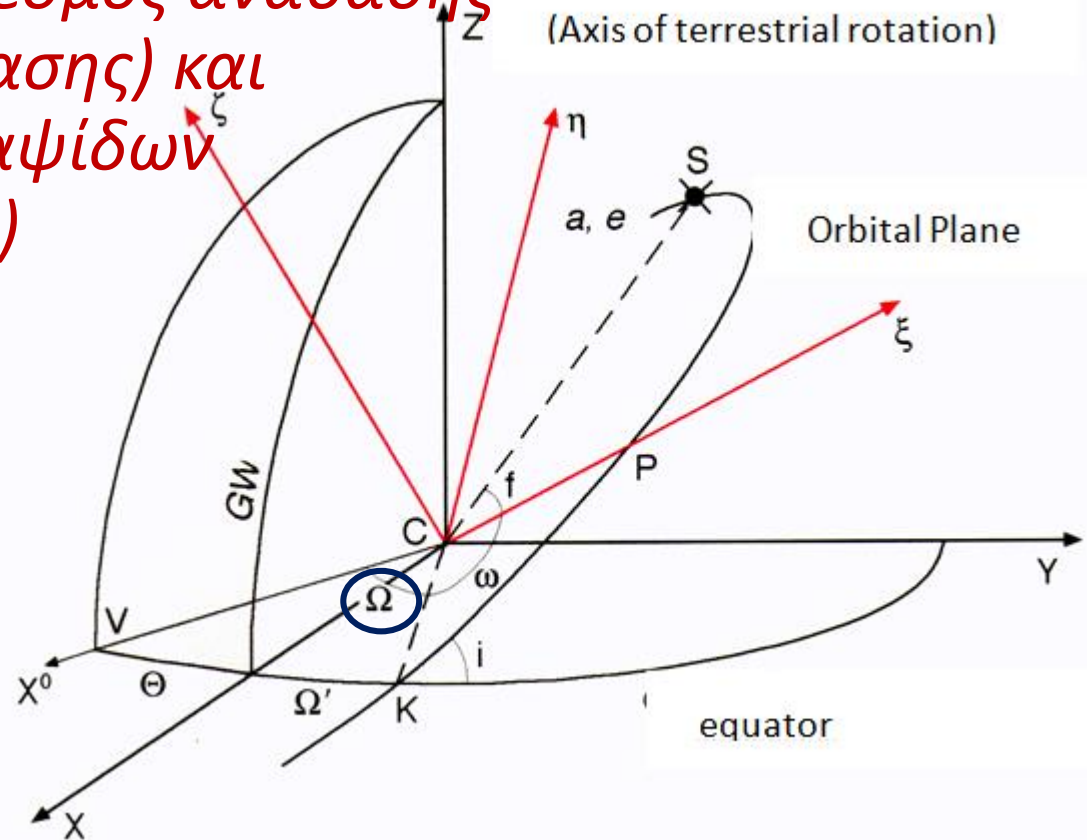
δίεδρη μεταξύ του τροχιακού και του ισημερινού επιπέδου



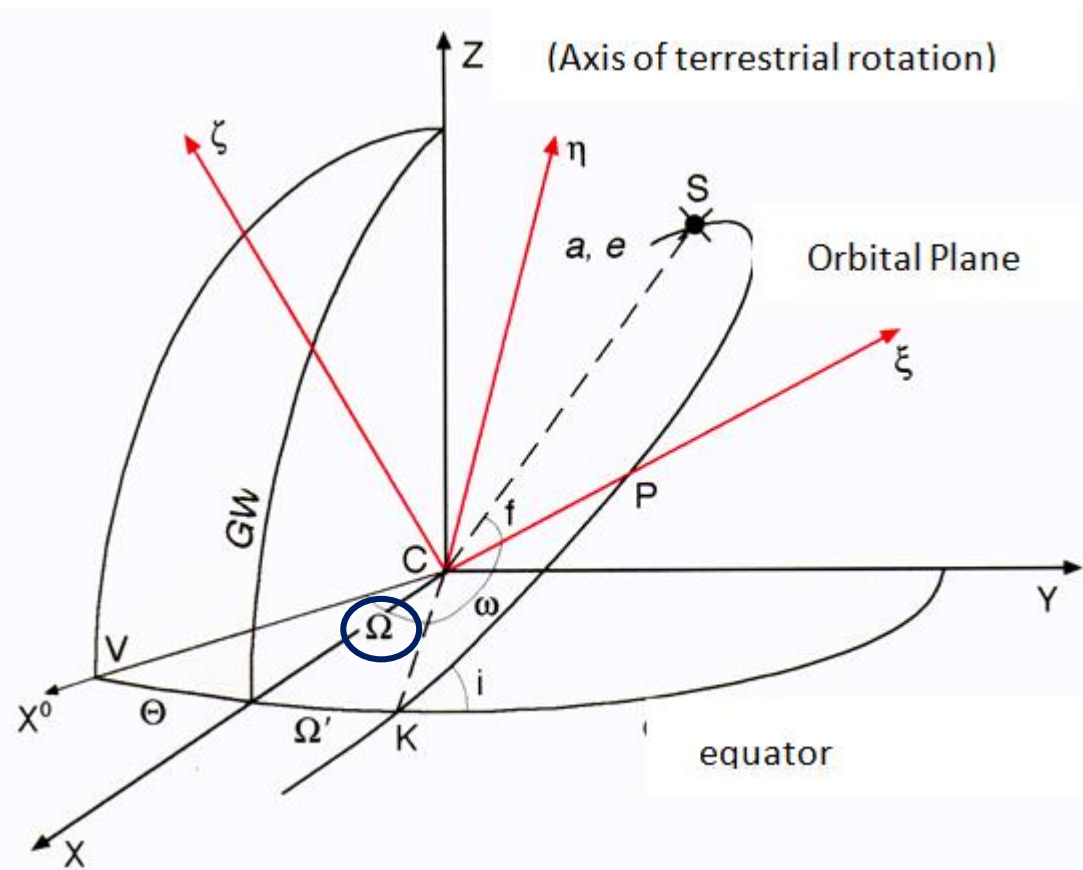
- Η δορυφορική τροχιά– 6 Κεπλέρια στοιχεία

- ω – όρισμα του περιγείου

γωνία μεταξύ της γραμμής των συνδέσμων (σύνδεσμος ανάβασης – σύνδεσμος κατάβασης) και της γραμμής των αψίδων (περίγειο-απόγειο)



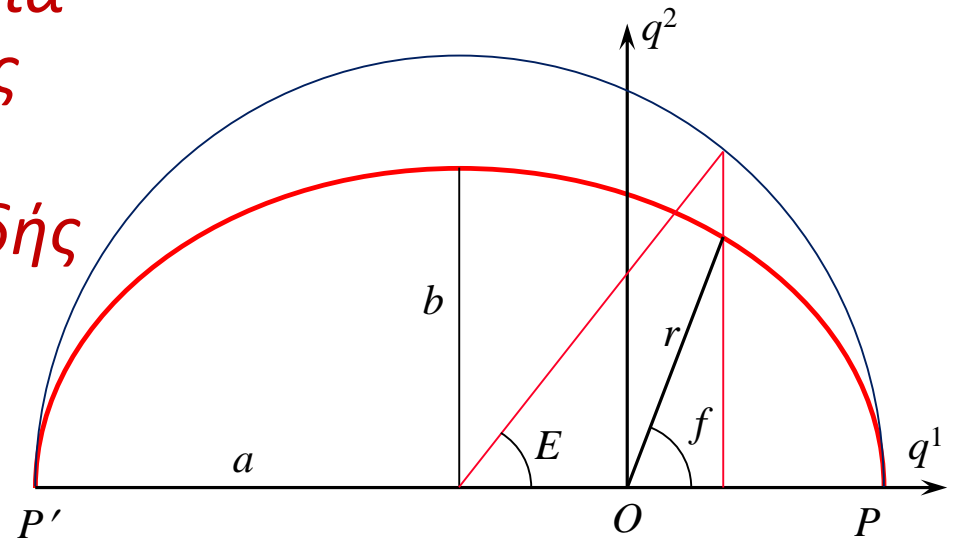
- Η δορυφορική τροχιά– 6 Κεπλέρια στοιχεία
 - Ω & i – προσανατολισμός του τροχιακού επιπέδου
 - ω – ορισμός της έλλειψης



- Η δορυφορική τροχιά– 6 Κεπλέρια στοιχεία
 - a – μεγάλος ημιάξονας της ελλειπτικής τροχιάς
 - e – εκκεντρότητα της ελλειπτικής τροχιάς

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$$

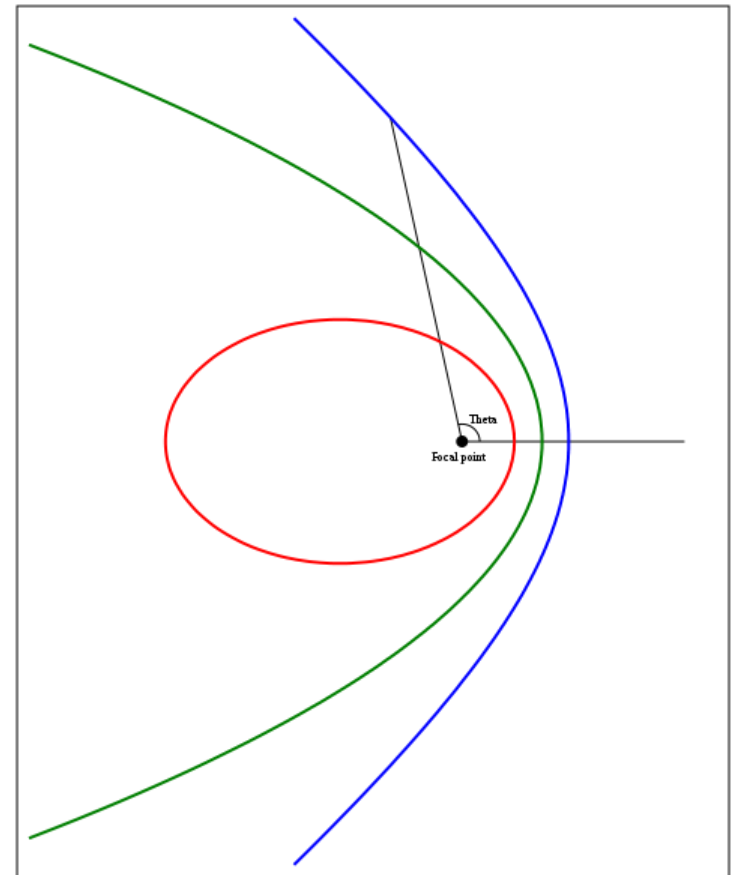
- $e=0$ – κυκλική τροχιά
 $0 < e < 1$ – ελλειψοειδής
 $e=1$ – παραβολική
 $e > 1$ – υπερβολοειδής



- Η δορυφορική τροχιά– 6 Κεπλέρια στοιχεία
 - a – μεγάλος ημιάξονας της ελλειπτικής τροχιάς
 - e – εκκεντρότητα της ελλειπτικής τροχιάς

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$$

- $e=0$ – κυκλική τροχιά
 $0 < e < 1$ – ελλειψοειδής
 $e=1$ – παραβολική
 $e > 1$ – υπερβολοειδής



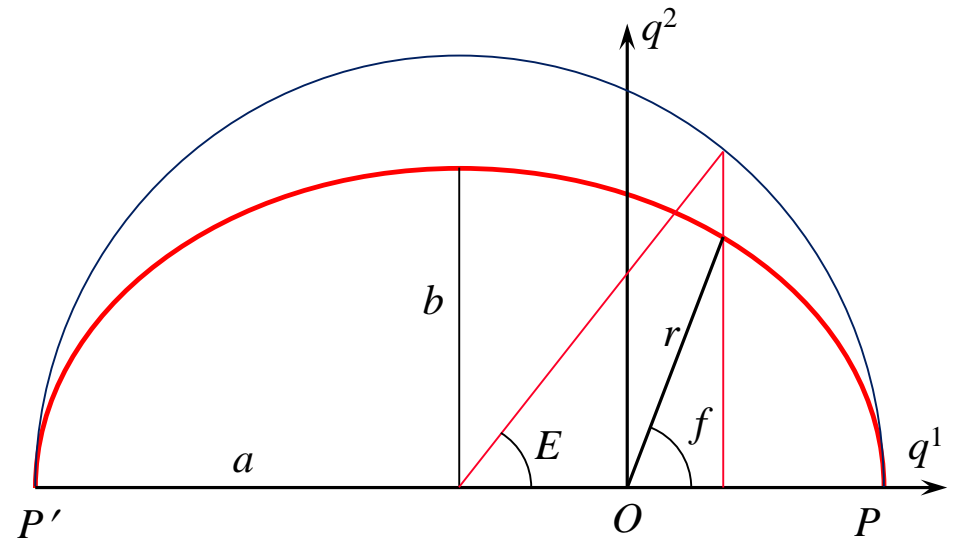
- Η δορυφορική τροχιά– 6 Κεπλέρια στοιχεία
 - a – μεγάλος ημιάξονας της ελλειπτικής τροχιάς
 - e – εκκεντρότητα της ελλειπτικής τροχιάς

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$$

και

- f , E ή M

αληθής, έκκεντρη ή μέση ανωμαλία που ορίζουν τη θέση του δορυφόρου κάποια χρονική στιγμή πάνω στην τροχιά



- Η δορυφορική τροχιά– 6 Κεπλέρια στοιχεία
 - a – μεγάλος ημιάξονας της ελλειπτικής τροχιάς
 - e – εκκεντρότητα της ελλειπτικής τροχιάς

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$$

και

- f , E ή M

αληθής, έκκεντρη ή μέση ανωμαλία που ορίζουν τη θέση του δορυφόρου κάποια χρονική στιγμή πάνω στην τροχιά

$$M = \frac{2\pi}{T}(t - t_p) = n(t - t_p)$$

$$E = \arctan \frac{\sqrt{1 - e^2} \sin f}{e + \cos f}$$

$$f = \arctan \frac{\sqrt{1 - e^2} \sin E}{\cos E - e}$$

- **GNSS (Global Navigation Satellite system) δορυφορικά συστήματα πλοήγησης, GPS το κυριότερο και ευρύτερα διαδεδομένο.**
 - **Περισσότερα του ενός συστήματα προσδιορισμού θέσης είναι σήμερα σε άμεση χρήση.**
-
- **GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)**
 - **GLONASS**
 - **GALILEO (σε στάδιο δοκιμών)**
 - **COMPASS (υπό κατασκευή)**

- Το GPS παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα έναντι των κλασικών επίγειων συστημάτων εντοπισμού θέσης
- Τα κλασικά επίγεια όργανα εντοπισμού θέσης απαιτούν αμοιβαία ορατότητα ανάμεσα στο χρησιμοποιούμενο όργανο και τον σκοπευόμενο στόχο
- Τα κλασικά επίγεια όργανα περιορίζονται στη μέτρηση αποστάσεων μέχρι 5 Km

- Οι εργασίες με τα κλασικά επίγεια όργανα επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες (π.χ. υγρασία, ομίχλη,....)

- Αλλά στις κλασσικές τοπογραφικές αποτυπώσεις....

- **Ανεξάρτητο από καιρικές συνθήκες**
- **Δεν απαιτείται ορατότητα μεταξύ των δεκτών**
- **Προσφέρει μεγάλη ακρίβεια**
- **Χρησιμοποιείται ημέρα και νύχτα σε οποιονδήποτε τόπο**
- **Γρήγορο και εύκολο στην χρήση**
- **Οικονομικά πλεονεκτήματα**
- **Συντεταγμένες σε κοινό σύστημα – WGS84/ITRF**
- **Μεγάλο εύρος εφαρμογών**
- **Το κόστος συνεχώς μειώνεται**
- **GPS&GIS, GPS & Υδρολογία, GPS & πλοήγηση, GPS & μεταφορές, GPS & διασκέδαση**

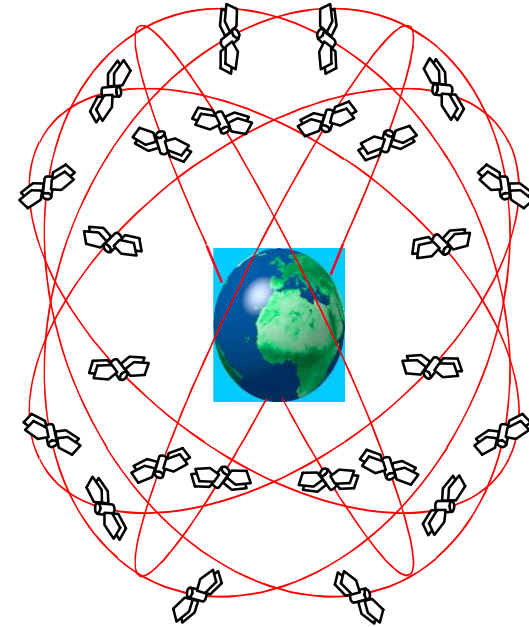
- Δεν είναι το ίδιο ακριβές και αποδοτικό μέσα πυκνοδομημένες αστικές περιοχές
- Γενικά δεν υπάρχουν προβλήματα αλλά δεν έχουμε εγγυημένη την απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος:

*Σκόπιμη μείωση της ακρίβειας τους (πχ. *Selective availability*)*

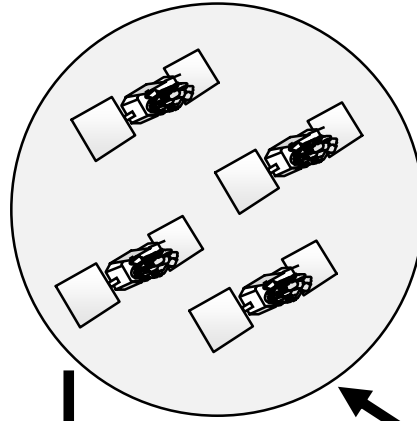
Πιθανότητα σφαλμάτων παρεμβολών

Γενικά χαρακτηριστικά GPS

- Αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ (US Department of Defense – DOD)
- Προσφέρει
 - Ακρίβεια θέσης σε πραγματικό χρόνο
 - 10 - 20 m
 - Παγκόσμια κάλυψη
 - 24 ωρες δυνατότητα χρήσης
 - Κοινό σύστημα συντεταγμένων
- Σχεδιασμένο να αντικαταστήσει τα διάφορα επίγεια συστήματα πλοήγησης (ραδιοσυστήματα κ.λπ.)
- Πολιτικές και στρατιωτικές εφαρμογές



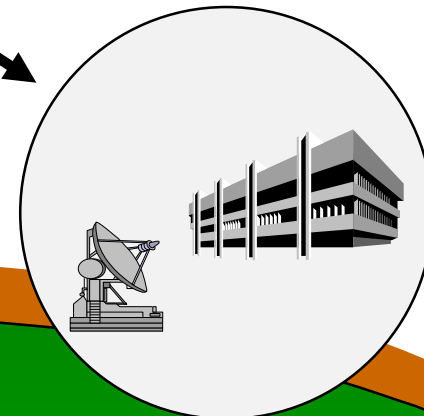
Τμήματα GPS



Δορυφορικό Τμήμα
NAVSTAR : NAVigation
Χρόνος και απόσταση
30+ Δορυφόροι
20200 Km



Τμήμα Χρηστών
Δέκτης δορυφορικού
σήματος



Τμήμα ελέγχου
1 Κύριος Σταθμός
5 Δευτερεύοντες Σταθμοί

- Αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Εθνικής Άμυνας των ΗΠΑ (U.S. Department of Defense – DoD) και συγκεκριμένα την Υπηρεσία Ψηφιακής Χαρτογραφίας (Digital Mapping Agency – DMA)
- Το WGS84 δημιουργήθηκε για να υποστηρίξει χαρτογραφικές, γεωδαιτικές, τοπογραφικές και βαρυτημετρικές εφαρμογές καθώς και ψηφιακά προϊόντα του DoD
- Ένα παγκόσμιο GRS ήταν σημαντικό λόγω της:
 - Ευκολίας χρήσης ενός ΓΣΑ παρά πολλών
 - Ομοιογενούς ακρίβειας
 - Ανάγκη υποστήριξης με το ίδιο ΓΣΑ τόσο παγκόσμιων όσο και τοπικών εφαρμογών
 - Ανάγκη συσχέτισης μιας εργασίας με μία άλλη (π.χ. Τοπογραφία με χαρτογραφία)
 - Ομαλή και εύκολη μεταφορά πληροφορίας από το ένα μέρος της Γης στο άλλο

○ Το WGS84 παρέχει:

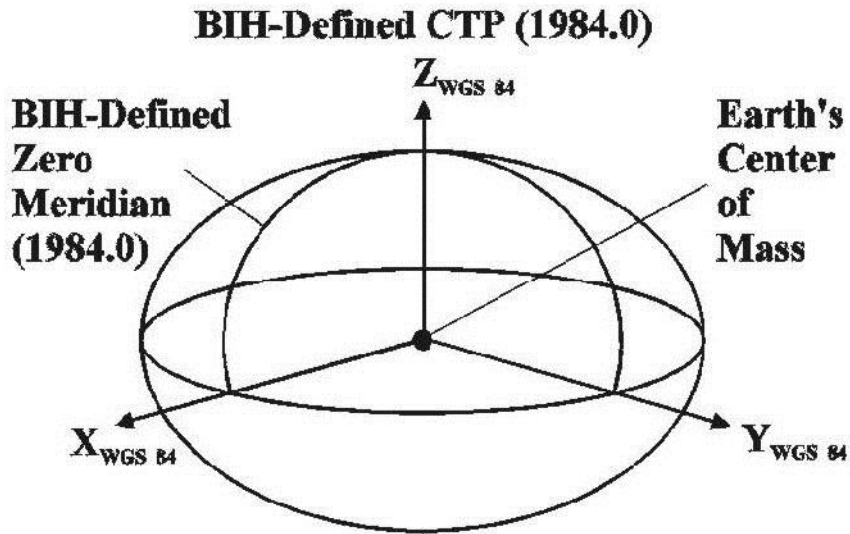
- Βασικό πλαίσιο αναφοράς και γεωμετρική μορφή της Γης
- Μοντέλο για το πεδίο βαρύτητας της Γης
- Σύνδεση με άλλα ΓΣΑ

○ Ορισμός WGS84

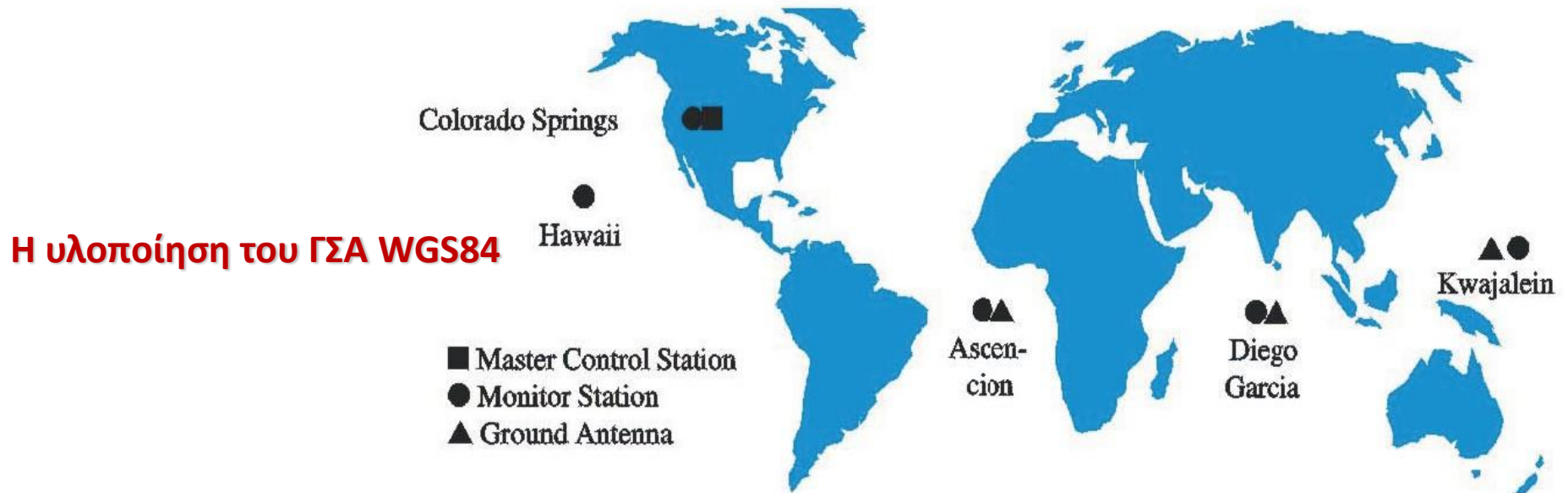
- κέντρο το γεώκεντρο
- άξονας Z ο CTP όπως ορίστηκε από το ΒΙΗ την εποχή 1984.0
- άξονας X η τομή του μεσημβρινού αναφοράς με τον ισημερινό του CTP
- άξονας Y ορθογωνικός με τους X και Z και σχηματίζει δεξιόστροφο σύστημα συντεταγμένων

- Η υλοποίηση του πραγματοποιήθηκε μέσω συντεταγμένων πέντε σταθμών παρακολούθησης που μετρήθηκαν με παρατηρήσεις Doppler προς το δορυφορικό σύστημα TRANSIT

ΓΣΑ WGS84 & GPS



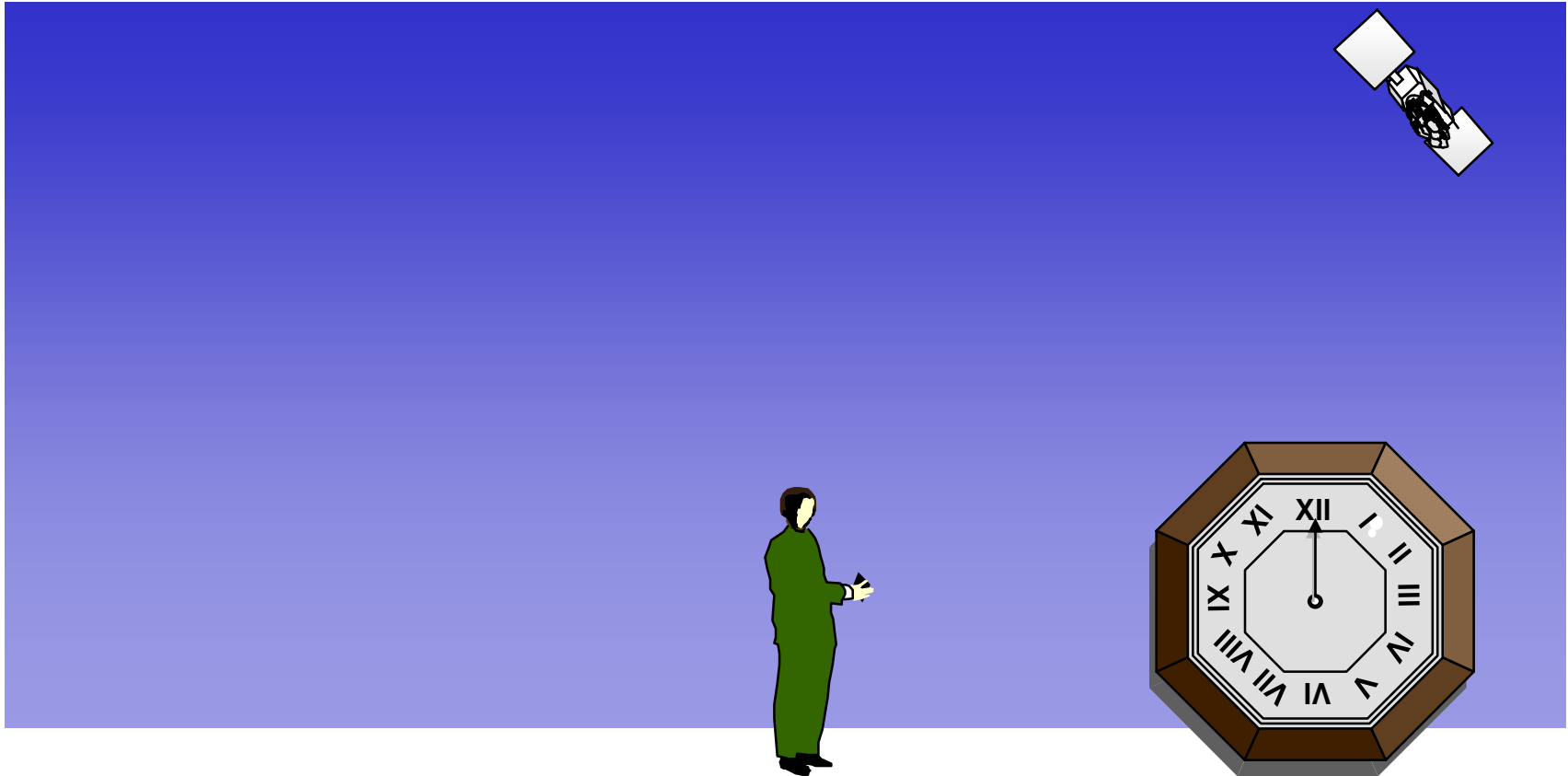
Ο ορισμός του ΓΣΑ WGS84



- Τα εκπεμπόμενα σήματα από τους δορυφόρους είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός – c
- Ο προσδιορισμός της θέσης γίνεται με την μέτρηση αποστάσεων από τους αντίστοιχους δορυφόρους.
- Ο υπολογισμός των αποστάσεων γίνεται με την χρήση κωδικών και την μέτρηση του χρόνου διάδοσης.

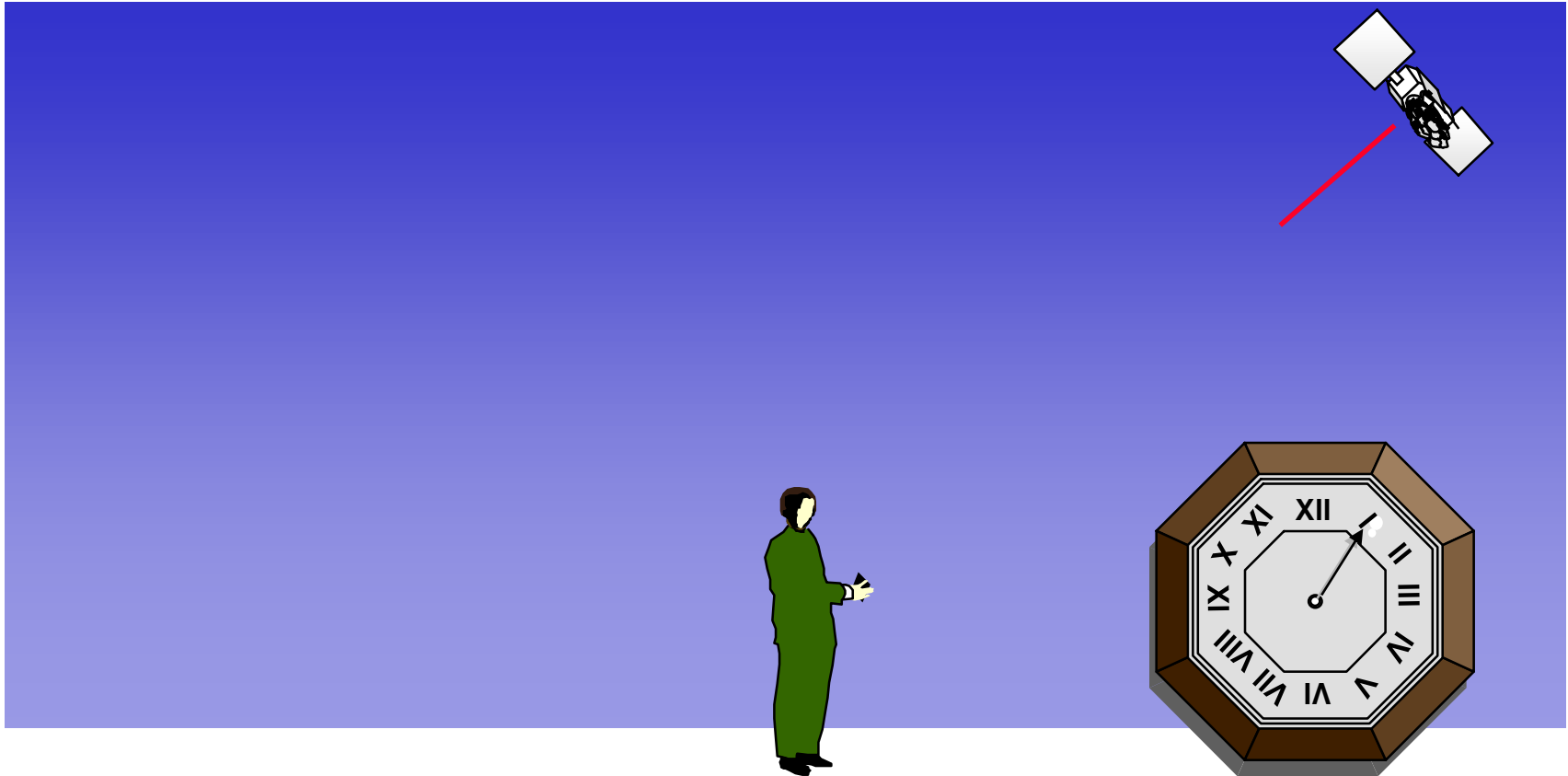
Βασική αρχή του(των) συστημάτων GNSS

Βασική αρχή του συστήματος : Μέτρηση απόστασης ανάμεσα σε δορυφόρο και δέκτη



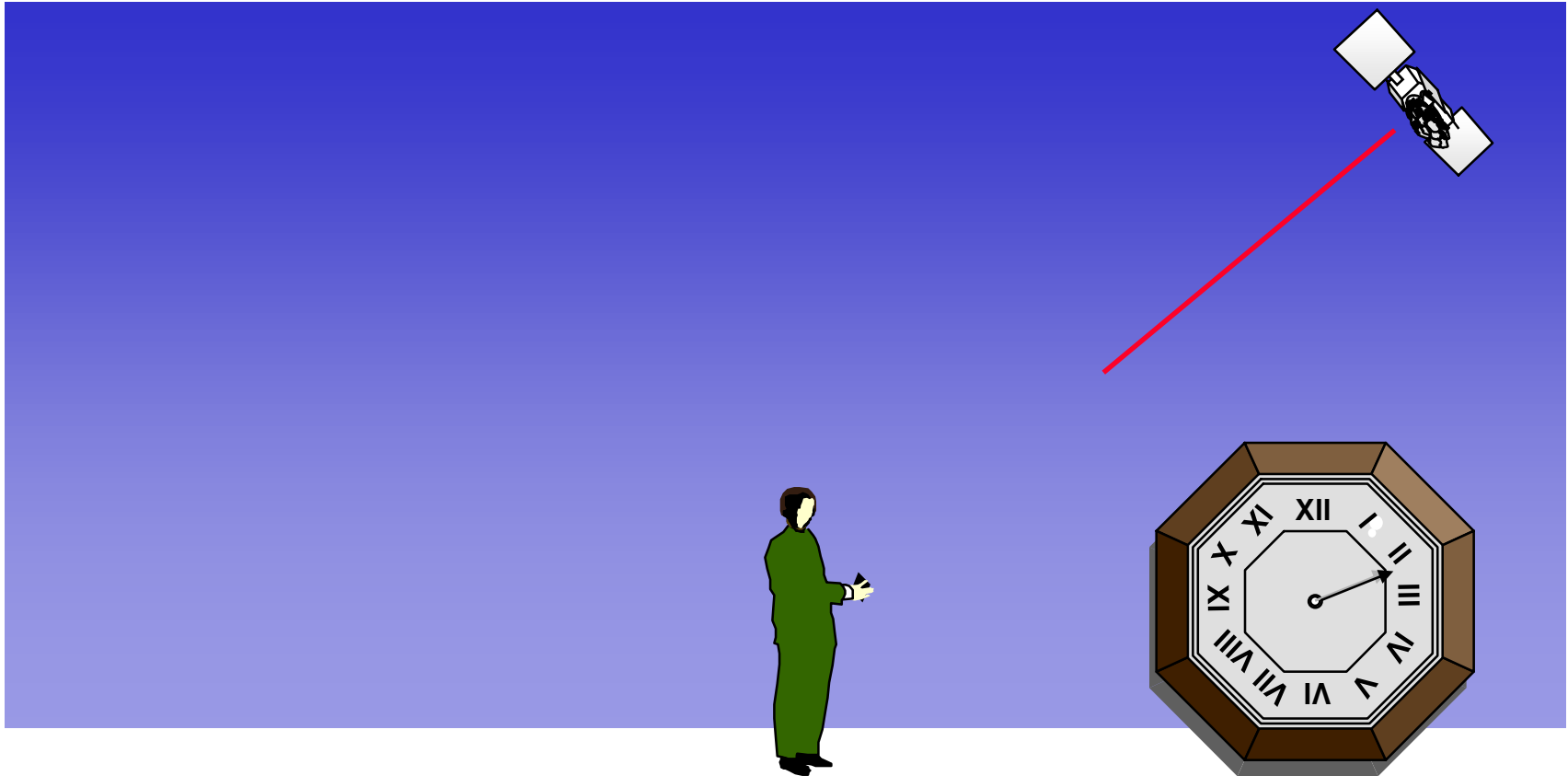
Βασική αρχή του(των) συστημάτων GNSS

Βασική αρχή του συστήματος : Μέτρηση απόστασης ανάμεσα σε δορυφόρο και δέκτη



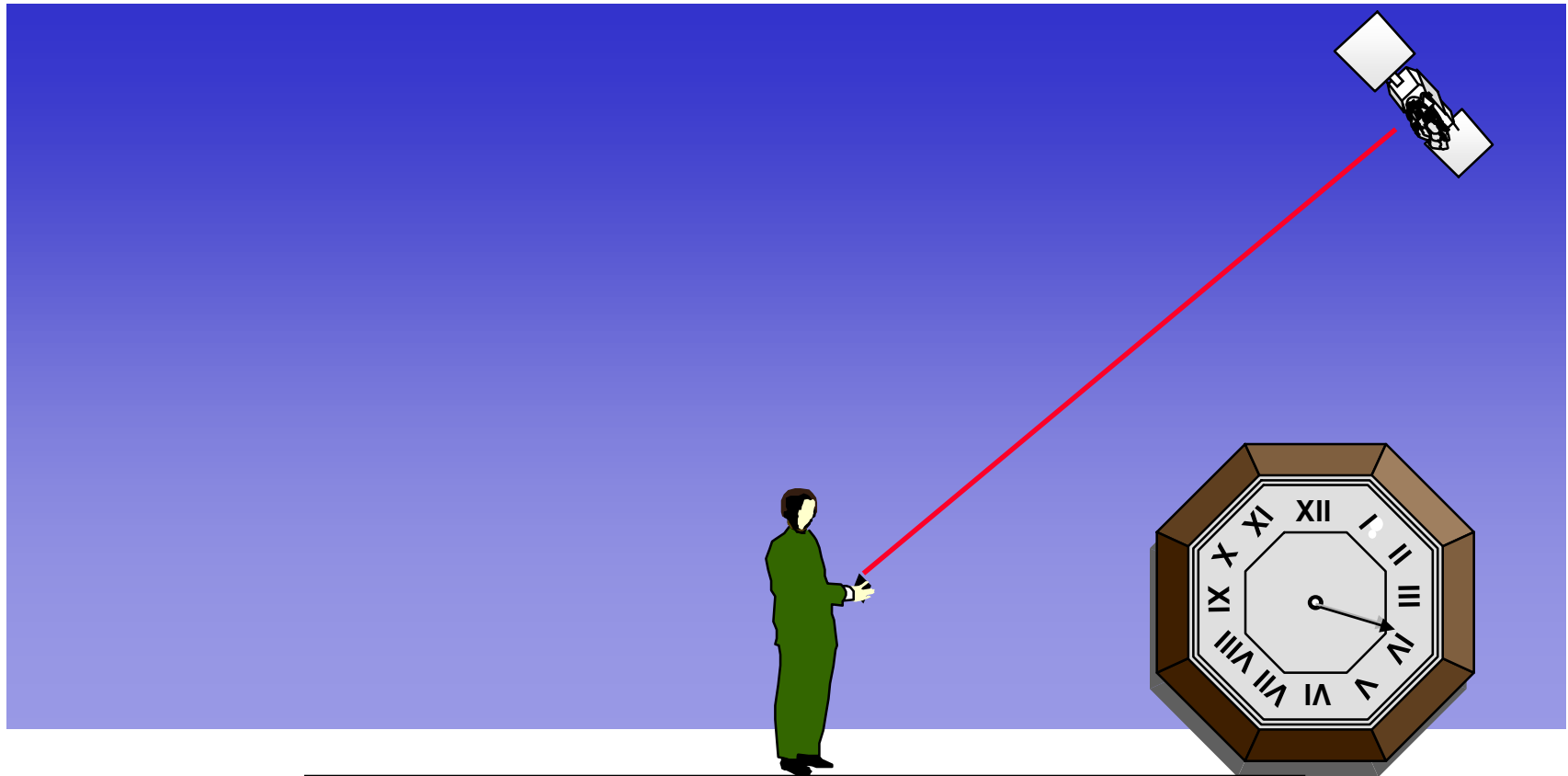
Βασική αρχή του(των) συστημάτων GNSS

Βασική αρχή του συστήματος : Μέτρηση απόστασης ανάμεσα σε δορυφόρο και δέκτη



Βασική αρχή του(των) συστημάτων GNSS

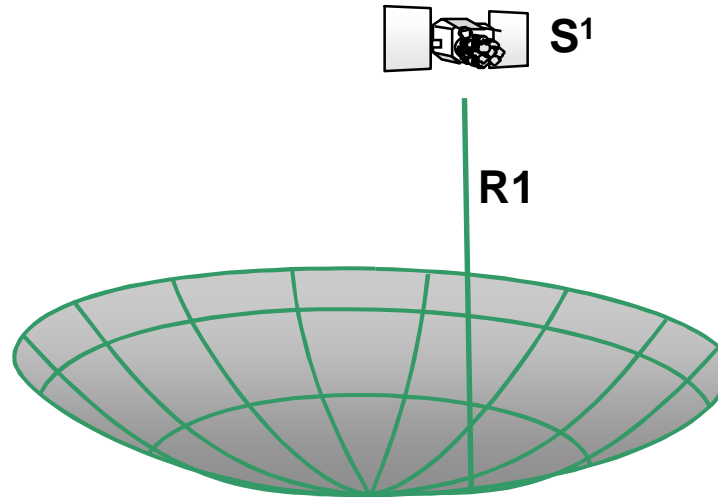
Βασική αρχή του συστήματος : Μέτρηση απόστασης ανάμεσα σε δορυφόρο και δέκτη



Απόσταση = Χρόνος x Ταχύτητα του φωτός

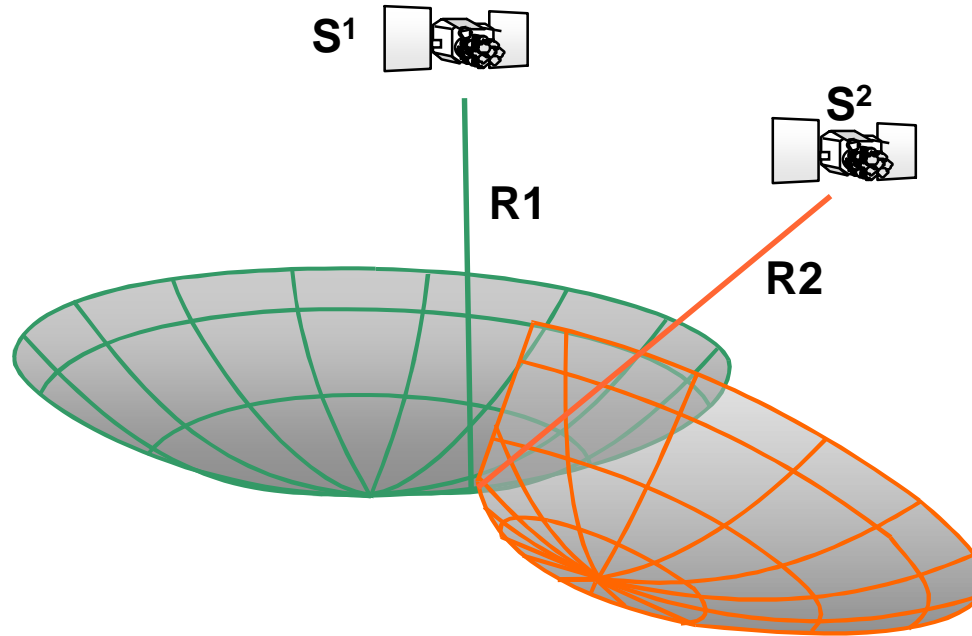
$$S = t * c$$

- Μέτρηση της απόστασης από ένα δορυφόρο



Μπορώ να συμπεράνω ότι βρίσκομαι πάνω στην επιφάνεια μια σφαίρας με ακτίνα $R1$ και με κέντρο τον δορυφόρο S^1

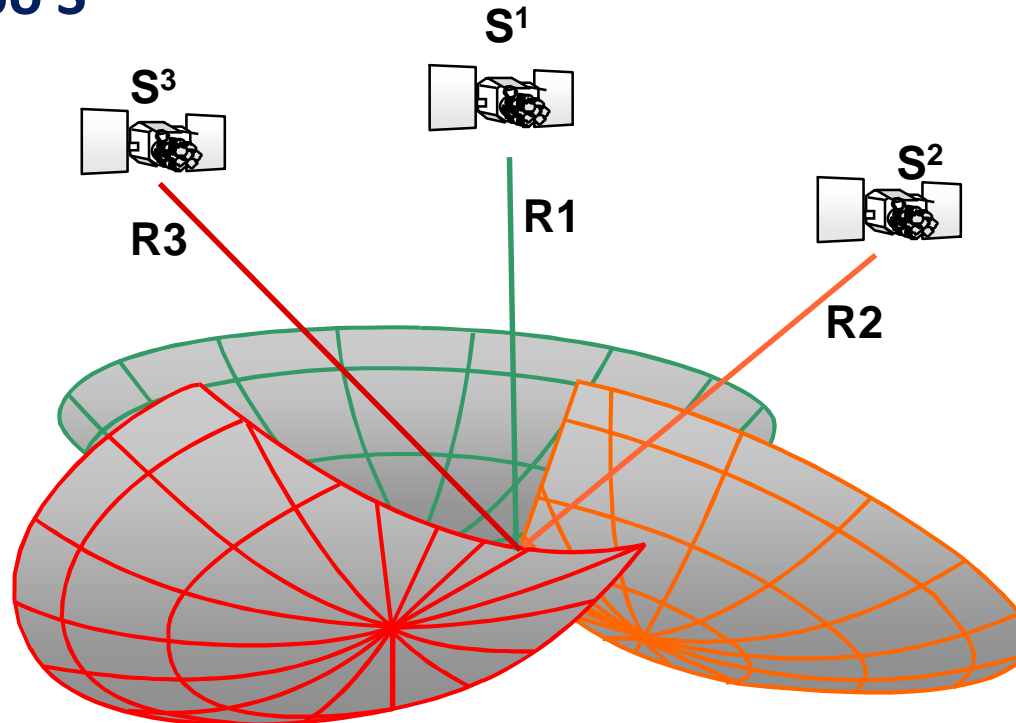
- Μέτρηση και δεύτερης απόστασης $R2$ από τον δορυφόρο S^2



Είμαστε όμως και σε μια δεύτερη σφαίρα ακτίνας $R2$ με κέντρο τον δορυφόρο S^2

Οι δύο σφαίρες τέμνονται σε κύκλο στον οποίο ανήκει και το σημείο που βρίσκεται ο δέκτης

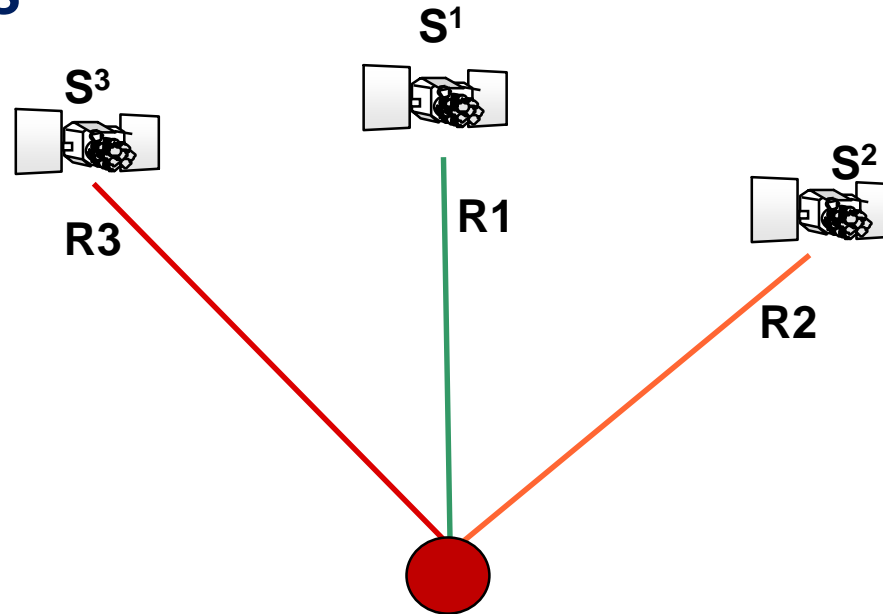
- Μέτρηση και δεύτερης απόστασης R3 από τον δορυφόρο S³



Είμαστε και σε μια τρίτη σφαίρα ακτίνας R3 με κέντρο τον δορυφόρο S³

Οι τρεις σφαίρες τέμνονται σε ένα σημείο (κανονικά 2) και μου δίνουν τη θέση (τοπολογία) και τις συντεταγμένες του δέκτη

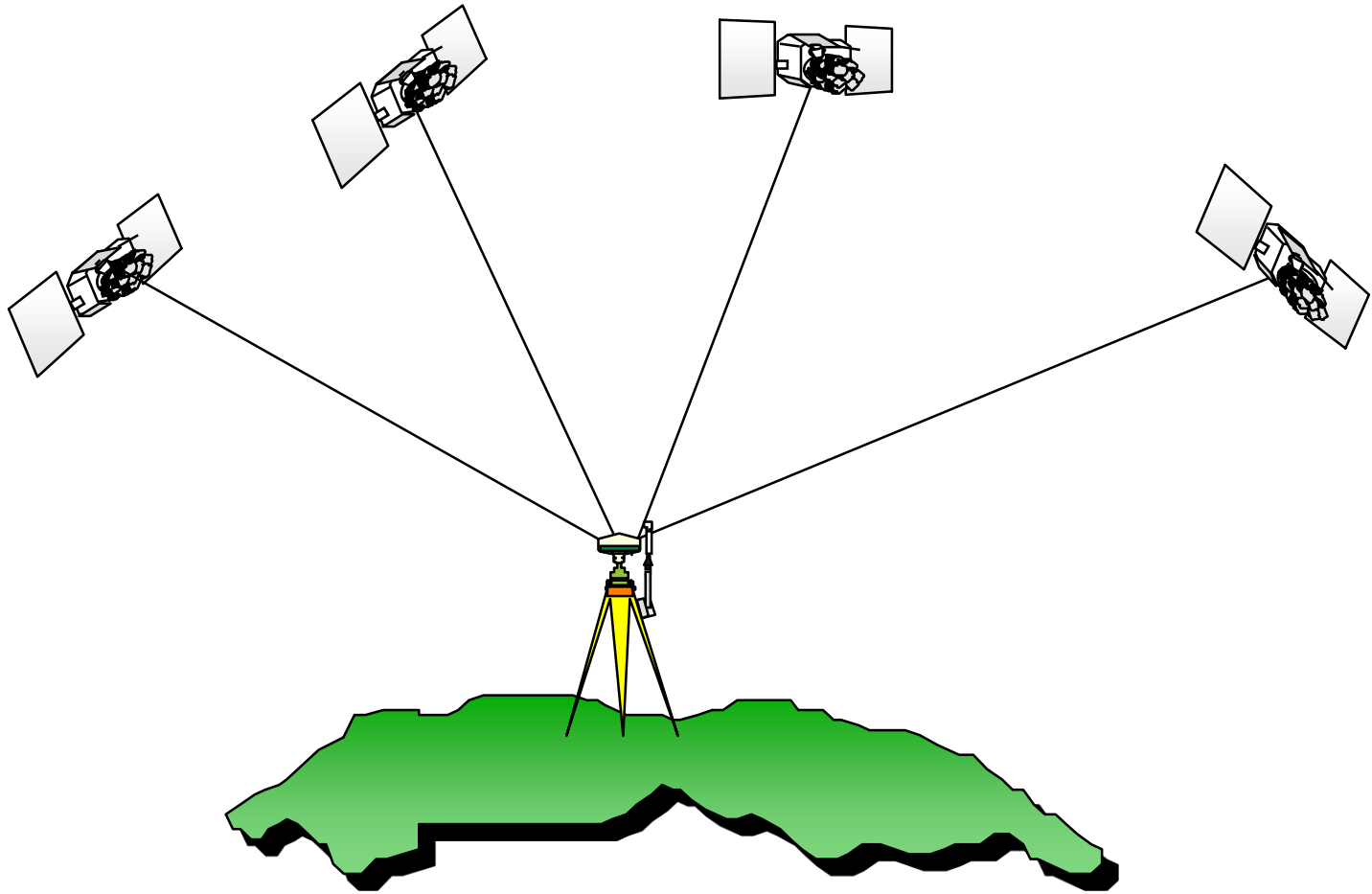
- Μέτρηση και δεύτερης απόστασης R3 από τον δορυφόρο S³



Είμαστε και σε μια τρίτη σφαίρα ακτίνας R3 με κέντρο τον δορυφόρο S³

Οι τρεις σφαίρες τέμνονται σε ένα σημείο και μου δίνουν τη θέση (τοπολογία) και τις συντεταγμένες του δέκτη

Προσδιορισμός θέσης με GNSS



**4 αποστάσεις για τον υπολογισμό γεωγραφικού πλάτους,
μήκους, υψομέτρου και χρόνου**

Αρχή του προβλήματος της οπισθοτομίας

- Οι δορυφόροι είναι **“Σταθμοί με ελεγχόμενες τροχιές”**
- Ο προσδιορισμός θέσης ανάγεται σε πολλαπλή οπισθοτομία στο χώρο
- Μετρούμε αποστάσεις προς σταθερά σημεία, δηλαδή τους δορυφόρους
- Οι αποστάσεις μετρώνται προς κάθε δορυφόρο με κώδικες που εξαρτώνται από τον χρόνο

Προσδιορισμός θέσης με GNSS

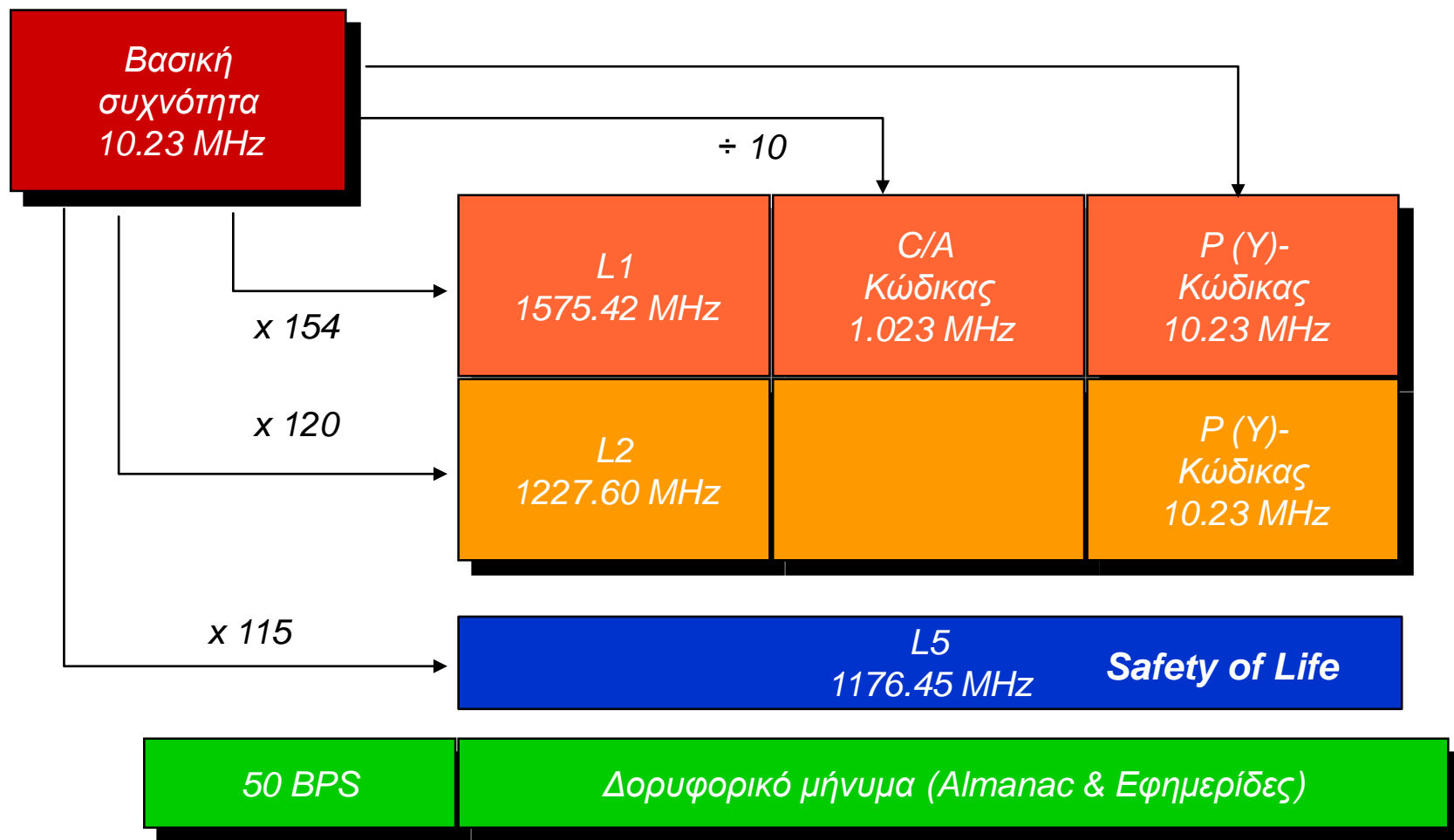
- Η μέτρηση του χρόνου στους δορυφόρους γίνεται με ατομικά χρονόμετρα πολύ υψηλής ακρίβειας **μερικά ns ($10^{-9}s$)**
- Οι δορυφορικοί δέκτες χρησιμοποιούν χρονόμετρα μικρότερης ακρίβειας από αυτά των δορυφόρων **μερικά μs ($10^{-6}s$)**
- Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα μεταδίδεται με την ταχύτητα του φωτός
 - (Απόσταση = Ταχύτητα x Χρόνος)
Θεωρώντας ένα σφάλμα στο χρονόμετρο του δέκτη
1/10 του δευτερολέπτου σφάλμα = 30,000 Km σφάλμα στην απόσταση
1/1,000,000 του δευτερολέπτου σφάλμα = 300 m σφάλμα στην απόσταση

Προσδιορισμός θέσης με GNSS

- Η μέτρηση του χρόνου στους δορυφόρους γίνεται με ατομικά χρονόμετρα πολύ υψηλής ακρίβειας **μερικά ns ($10^{-9}s$)**
- Οι δορυφορικοί δέκτες χρησιμοποιούν χρονόμετρα μικρότερης ακρίβειας από αυτά των δορυφόρων **μερικά μs ($10^{-6}s$)**
- Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα μεταδίδεται με την ταχύτητα του φωτός
- Συνεπώς απαιτείται ένας ακόμη δορυφόρος για τον υπολογισμό του χρονικού σφάλματος

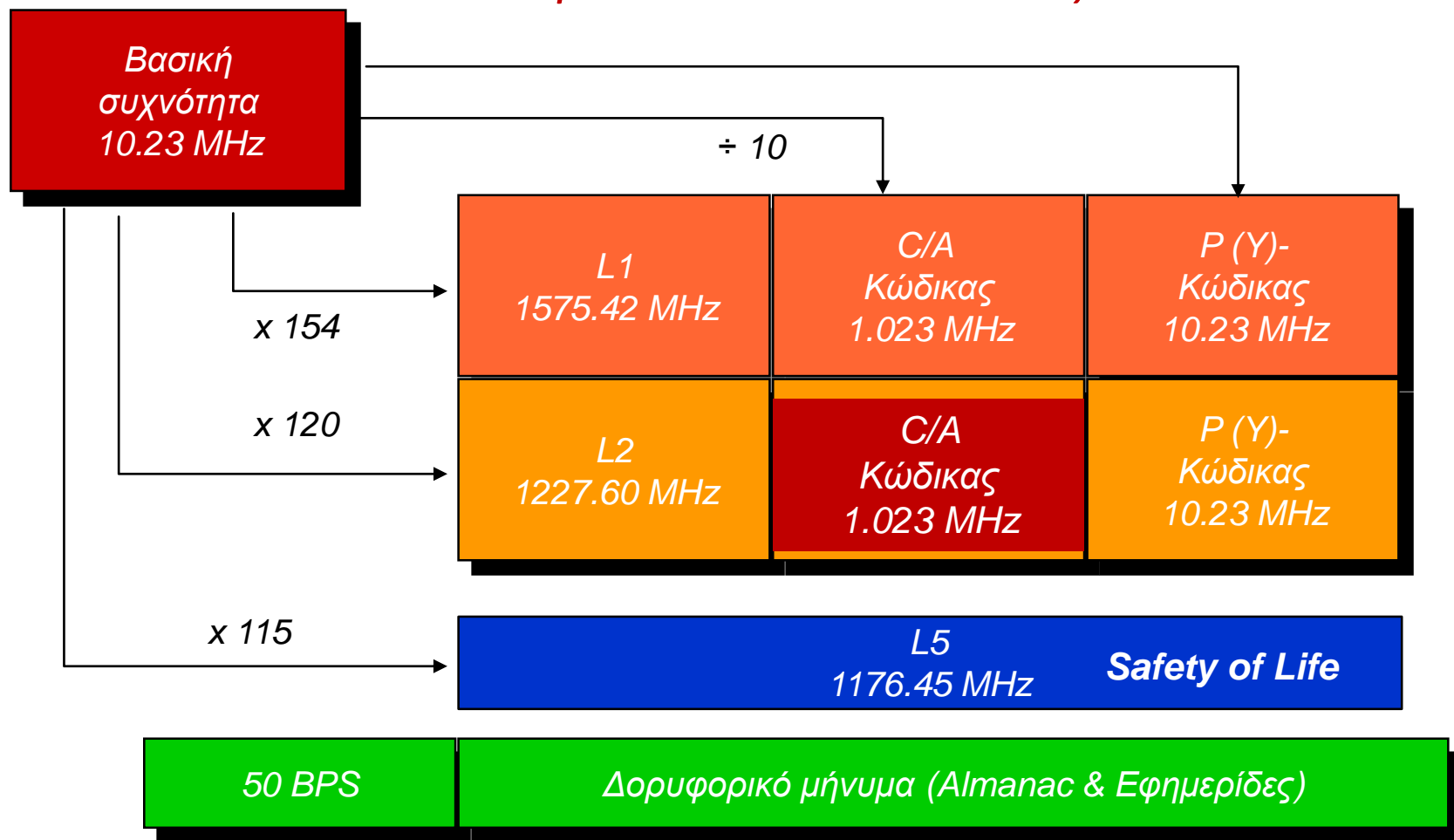
Δομή του σήματος (GPS)

- Κάθε δορυφόρος GPS εκπέμπει έναν αριθμό σημάτων
- Το σήμα περιλαμβάνει δύο φέροντα κύματα (στις συχνότητες L1 και L2) και δύο κώδικες (C/A στην L1 και P ή Y στις L1 και L2) καθώς επίσης και ένα δορυφορικό μήνυμα για την τροχιά



Δομή του σήματος (GPS)

Ο κώδικας C/A εκπέμπεται από τον Ιανουάριο του 2006 και στην L2 από τους νέους μετά του 2003 δορυφόρους, αλλά δεν τον λαμβάνουν όλοι οι δέκτες



$$\lambda = c \times T$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$c \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}, \quad f \text{ σε Hz}, \quad T \text{ σε s}$$

$$\mathbf{L1 = 1575.42 \text{ MHz} \rightarrow \lambda_{L1} = 19.03 \text{ cm}}$$

$$\mathbf{L2 = 1227.60 \text{ MHz} \rightarrow \lambda_{L2} = 24.42 \text{ cm}}$$

$$\mathbf{L5 = 1176.45 \text{ MHz} \rightarrow \lambda_{L5} = 25.50 \text{ cm}}$$

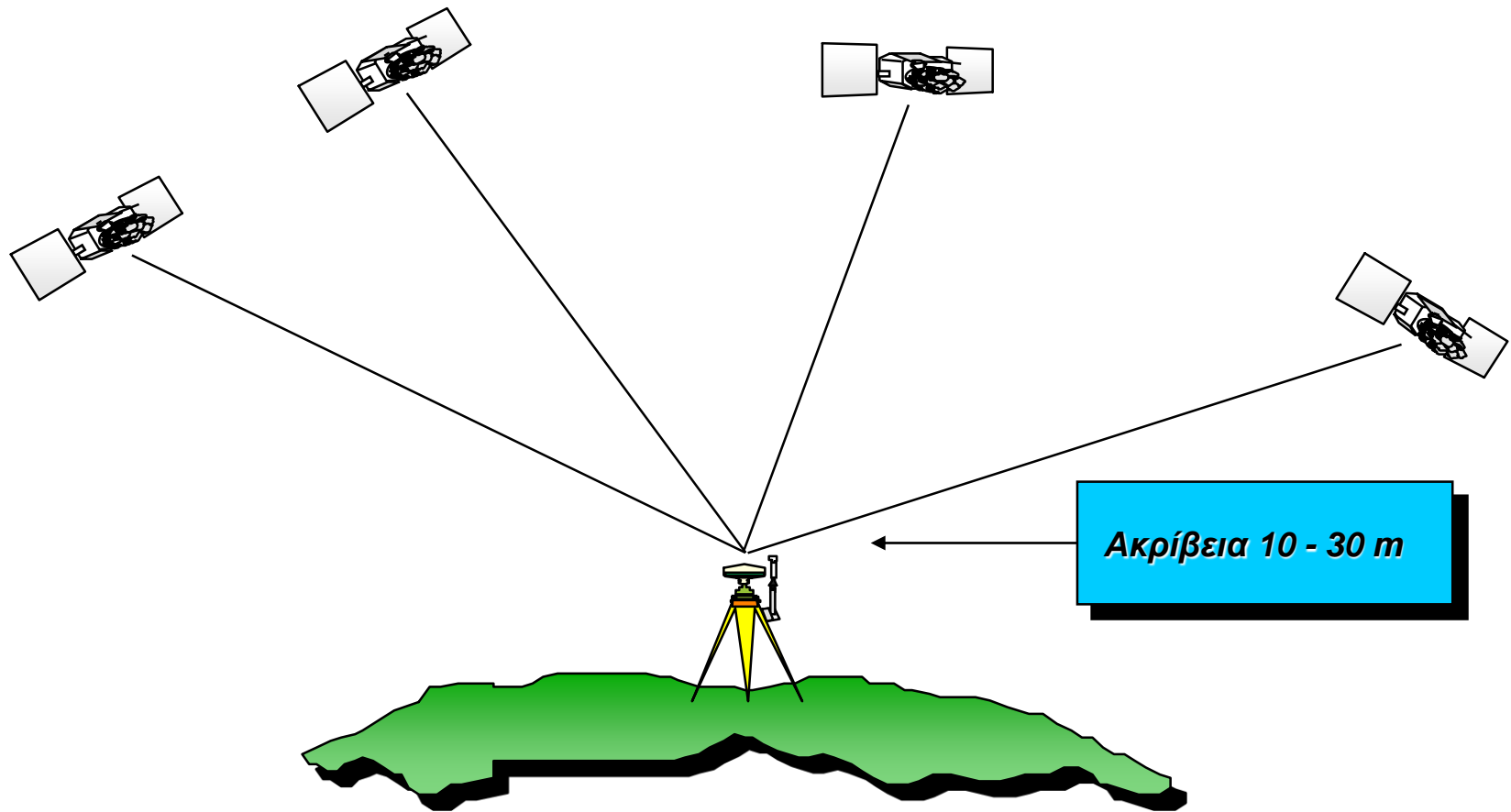
Γιατί επελέχθησαν αυτές οι δύο συχνότητες (L1 & L2);

- ✓ Διαθεσιμότητα συχνοτήτων

- ✓ Γιατί όχι μικρότερες; → Το μήκος κύματος λ μεγαλώνει όταν μικραίνει η συχνότητα → αύξηση του σφάλματος της πολυδιαδρομής (multipath)

- ✓ Γιατί όχι μεγαλύτερες;
 - × Τεχνικές και τεχνολογικές δυσκολίες
 - × Το κομμάτι των συχνοτήτων πάνω από τα 10GHz είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί με την υπάρχουσα τεχνολογία
 - × Το σήμα εξασθενεί δραματικά όταν διέρχεται από την τροπόσφαιρα
 - × Το σήμα αντανακλάται από την ιονόσφαιρα
 - × Το μήκος κύματος λ μικραίνει πολύ και είναι δύσκολο να πετύχουμε συσχέτιση του κώδικα PRN στον δέκτη (Delay Lock Loop - DLL)
π.χ. για L1 = 10 GHz → $\lambda_{L1} = 3$ cm

Προσδιορισμός θέσης με GPS



Ένας δέκτης που λειτουργεί αυτόνομα παρέχει ακρίβεια σε κινηματική ή στατική εφαρμογή της τάξης των 10 έως 30m

Μέθοδος Anti – Spoofing

Η μέθοδος Anti - Spoofing, “αποκρύπτει” τον κώδικα P, πολλαπλασιάζοντάς τον με κάποιον μυστικό κώδικα W.

Αποτέλεσμα του παραπάνω συνδυασμού είναι η εμφάνιση ενός κρυφού κώδικα Y, συνεπώς ο μη εξουσιοδοτημένος χρήστης δεν μπορεί να έχει πρόσβαση στον κώδικα P με αποτέλεσμα εσφαλμένους υπολογισμούς.

Μέθοδος Επιλεκτικής διαθεσιμότητας - Selective Availability (SA)

Η μέθοδος της επιλεκτικής διαθεσιμότητας στηρίζεται σε δύο μεθόδους παραποίησης των πληροφοριών της μεταδιδόμενης εφημερίδας

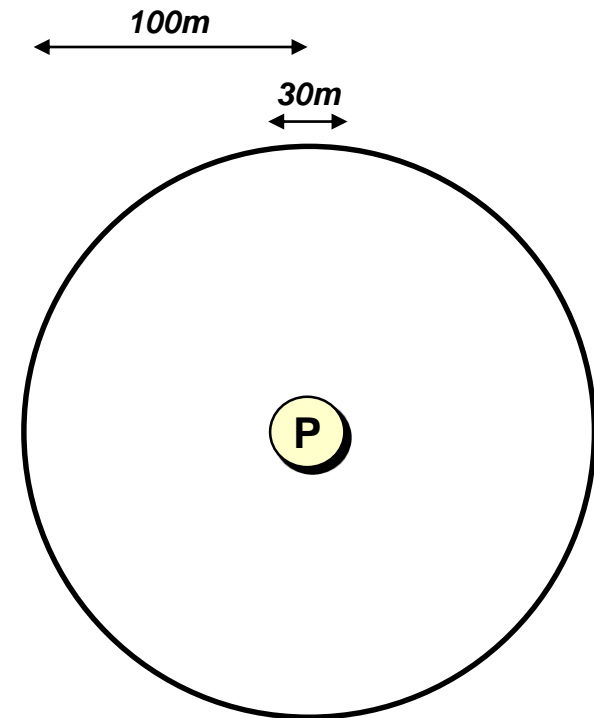
Στη μέθοδο δ που προστίθενται σφάλματα στις παραμέτρους του ρολογιού του δορυφόρου, και

Στη μέθοδο ε που προστίθενται σφάλματα στις παραμέτρους της τροχιάς του δορυφόρου

Με τον τρόπο αυτό, η αρχική ακρίβεια των 10 m περίπου που προκύπτει από ψευδοαποστάσεις μέσω του κώδικα C/A, μειώνεται σε ~100 m (φ,λ) και ~150 m (h).

Επιλεκτική Διαθεσιμότητα - *Selective Availability (SA)*

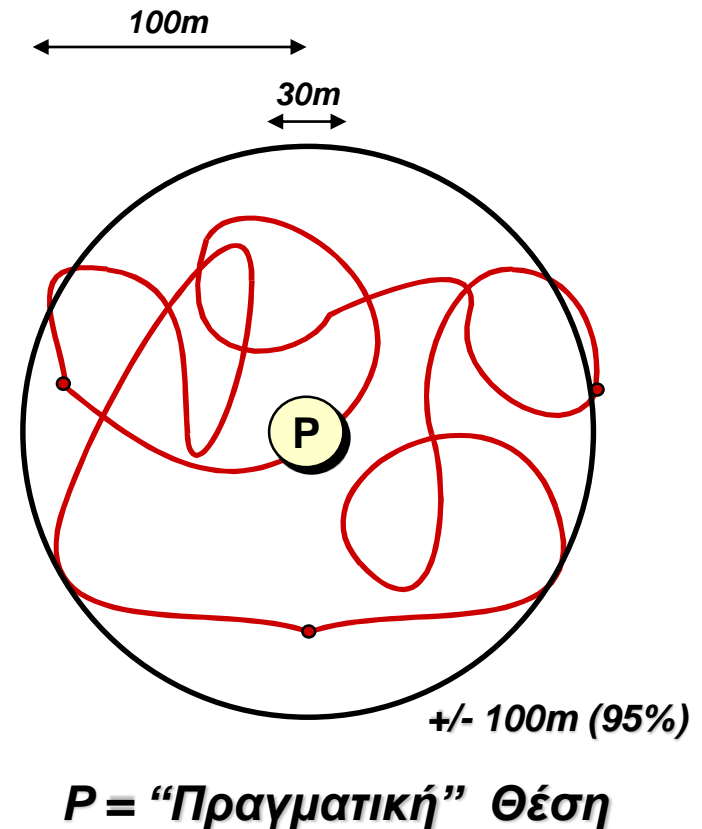
Θεωρητικά ο προσδιορισμός της θέσης ενός σημείου μπορεί να πραγματοποιηθεί με μία ακρίβεια της τάξης των 10 - 30m με μετρήσεις του κώδικα C/A



P = “Πραγματική” Θέση

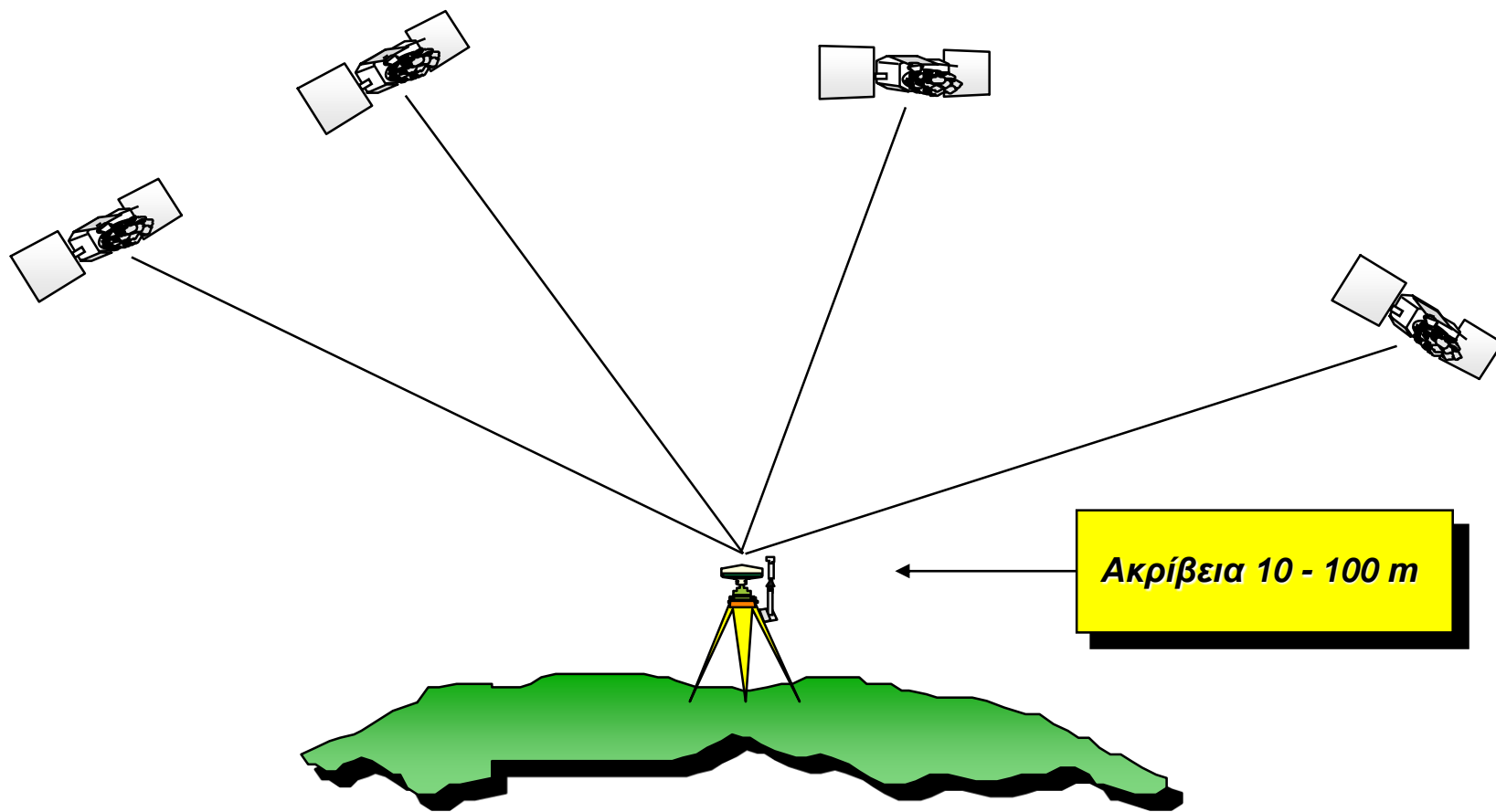
Επιλεκτική Διαθεσιμότητα - *Selective Availability (SA)*

- Το US DoD υποβάθμιζε την ακρίβεια της εκπεμπόμενης πληροφορίας
 - Dither the Satellite Clocks (μέθοδος δ – σφάλματα στα δορυφορικά χρονόμετρα)
 - Satellite Orbital Information (μέθοδος ε – σφάλματα στις τροχιές)



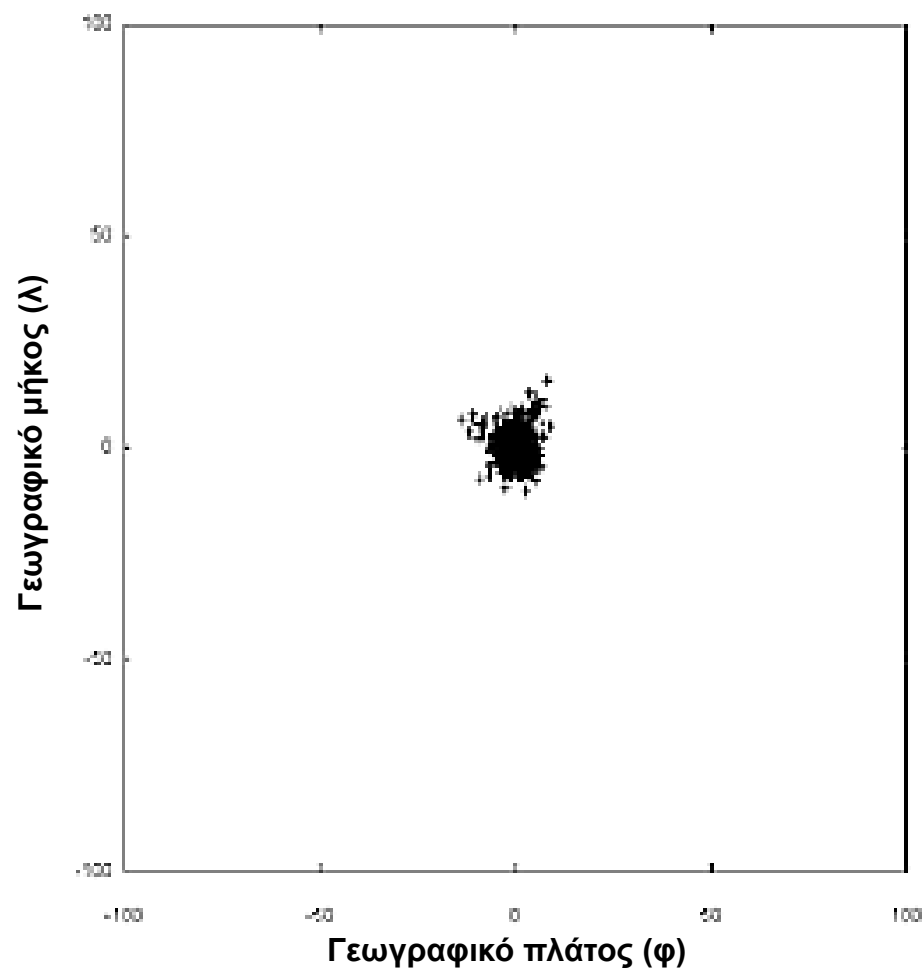
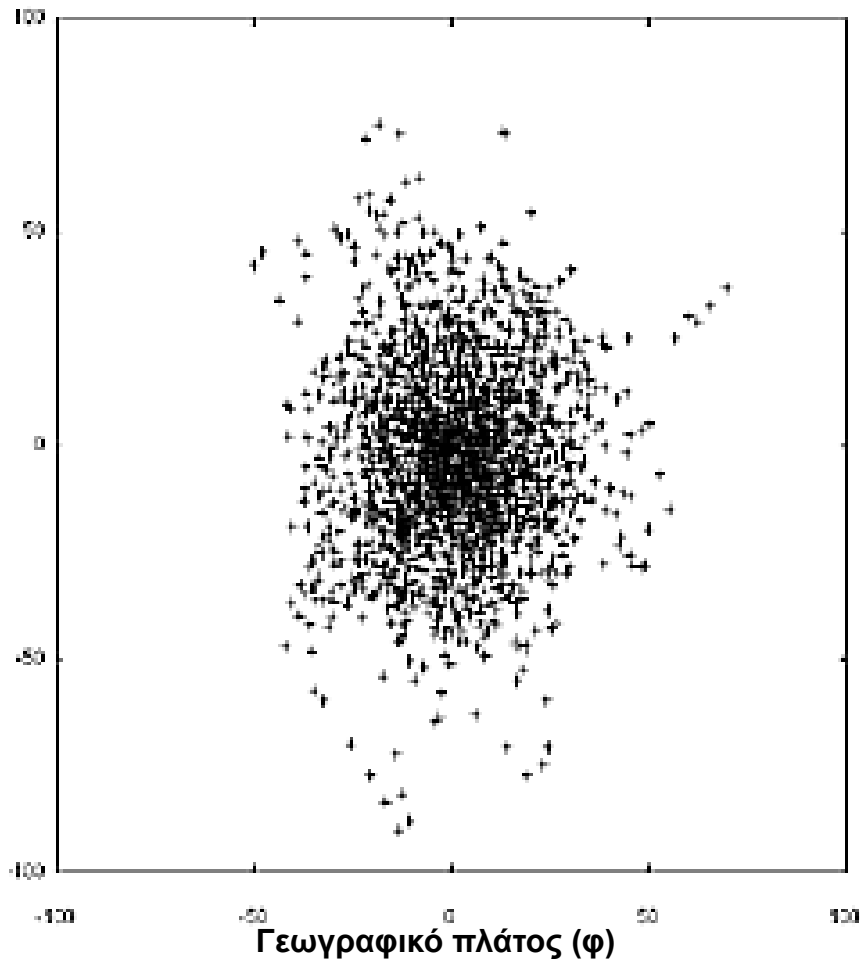
**Ακρίβεια στον προσδιορισμό
θέσης 100m (95%)**

Μέθοδοι παραποίησης του σήματος του GPS



Ένας δέκτης σε αυτόνομη λειτουργία παρέχει ακρίβεια σε κινηματική ή στατική εφαρμογή της τάξης των 10 - 100 m λόγω της Επιλεκτικής Διαθεσιμότητας

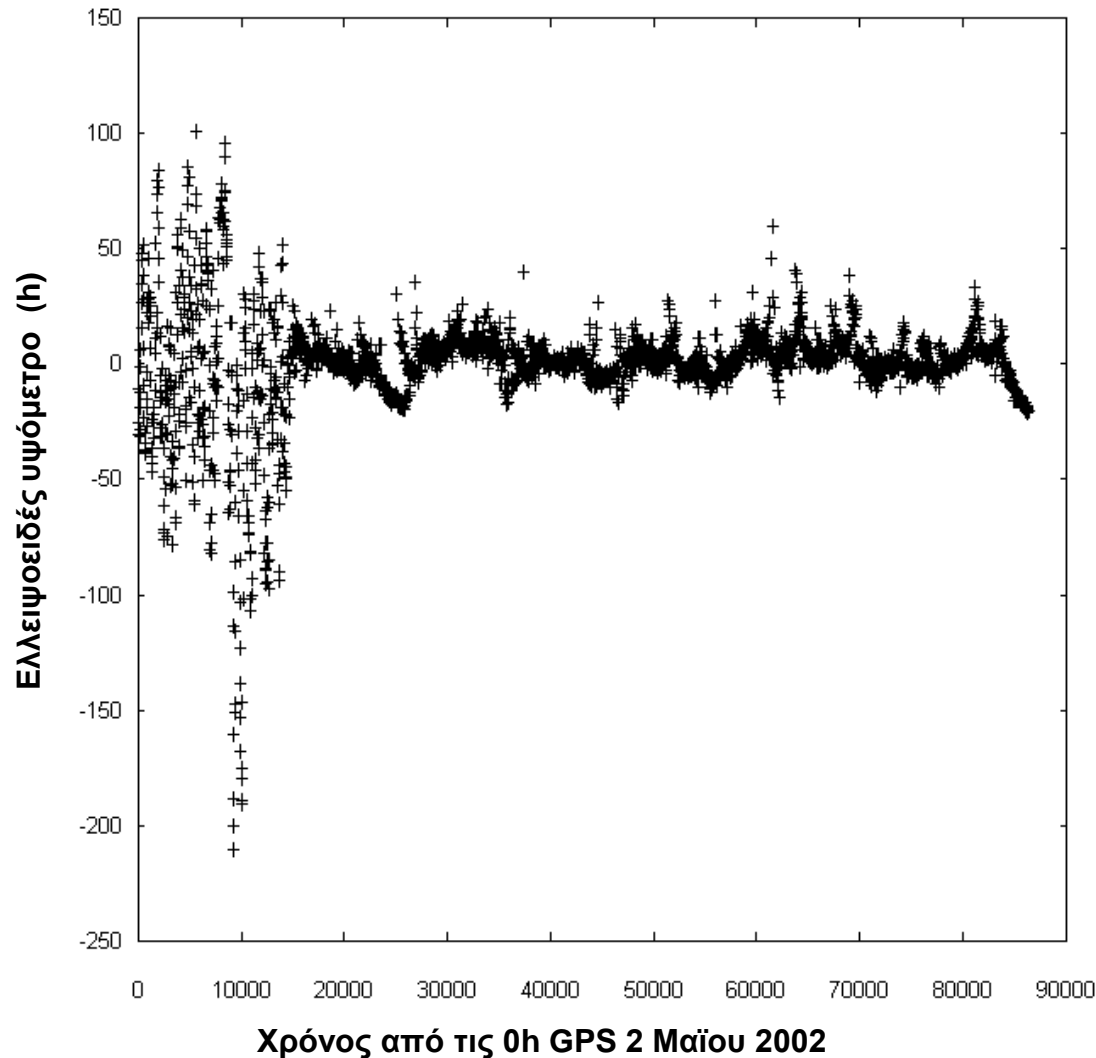
Μέθοδοι παραποίησης του σήματος του GPS



Παράδειγμα προσδιορισμού θέσης σημείου με GPS

Με SA (αριστερά) χωρίς SA (δεξιά) → 1η Μαΐου 2000

Μέθοδοι παραποίησης του σήματος του GPS



Παράδειγμα προσδιορισμού υψομέτρου (h) σημείου με GPS

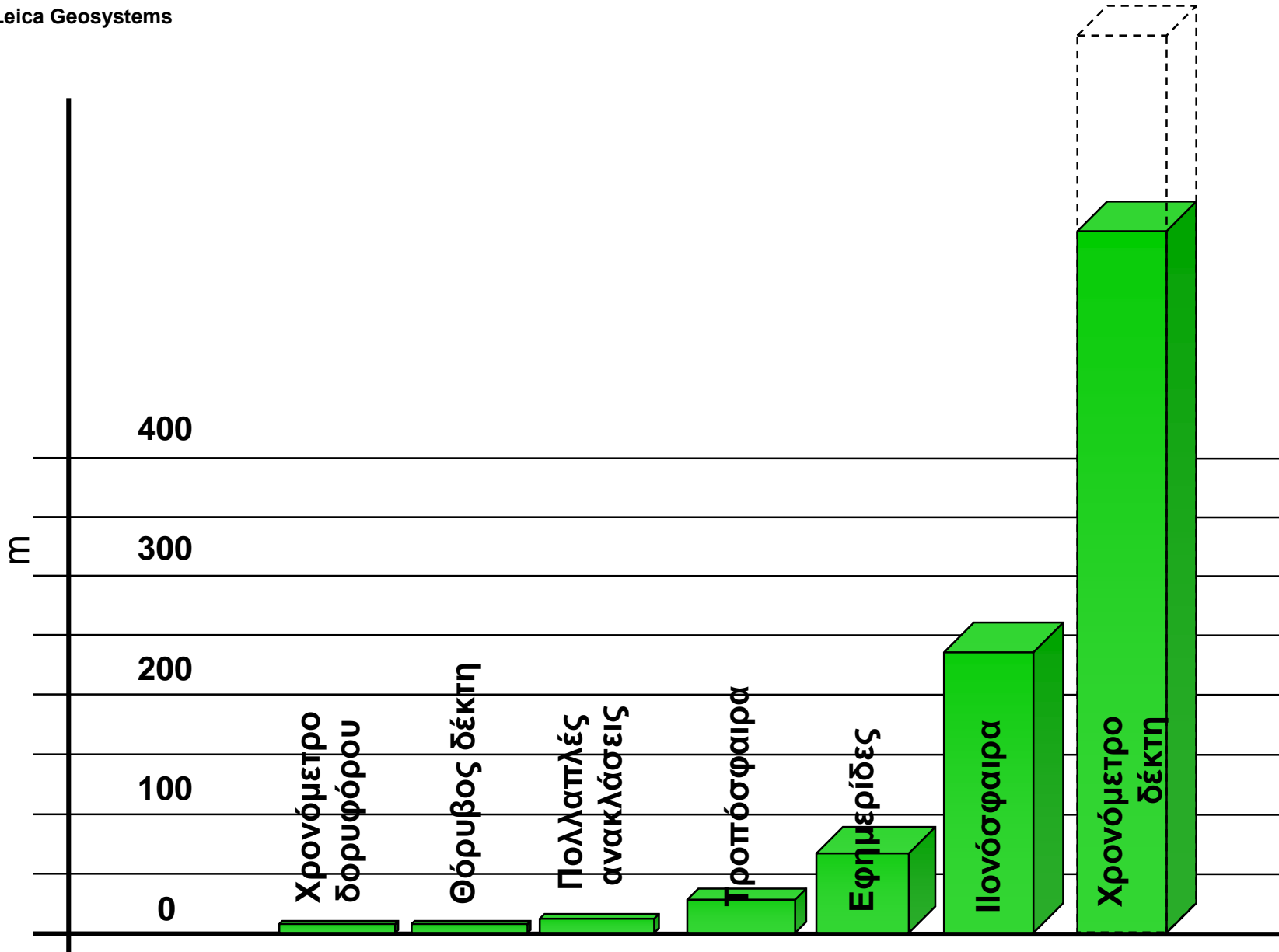
Με SA (αριστερά) χωρίς SA (δεξιά) → 1η Μαΐου 2000

- Οι βασικές μέθοδοι προσδιορισμού θέσης είναι δύο:
 - **Ο απόλυτος προσδιορισμός θέσης**
 - Ένας δέκτης
 - Άμεσος προσδιορισμός της θέσης μας
 - Μικρή ακρίβεια ± 5 m
 - **Ο σχετικός προσδιορισμός θέσης**
 - Δύο δέκτες
 - Προσδιορισμός της θέσης ενός αγνώστου σημείου ως προς ένα γνωστό.
 - Μεγάλη ακρίβεια < 1 cm.

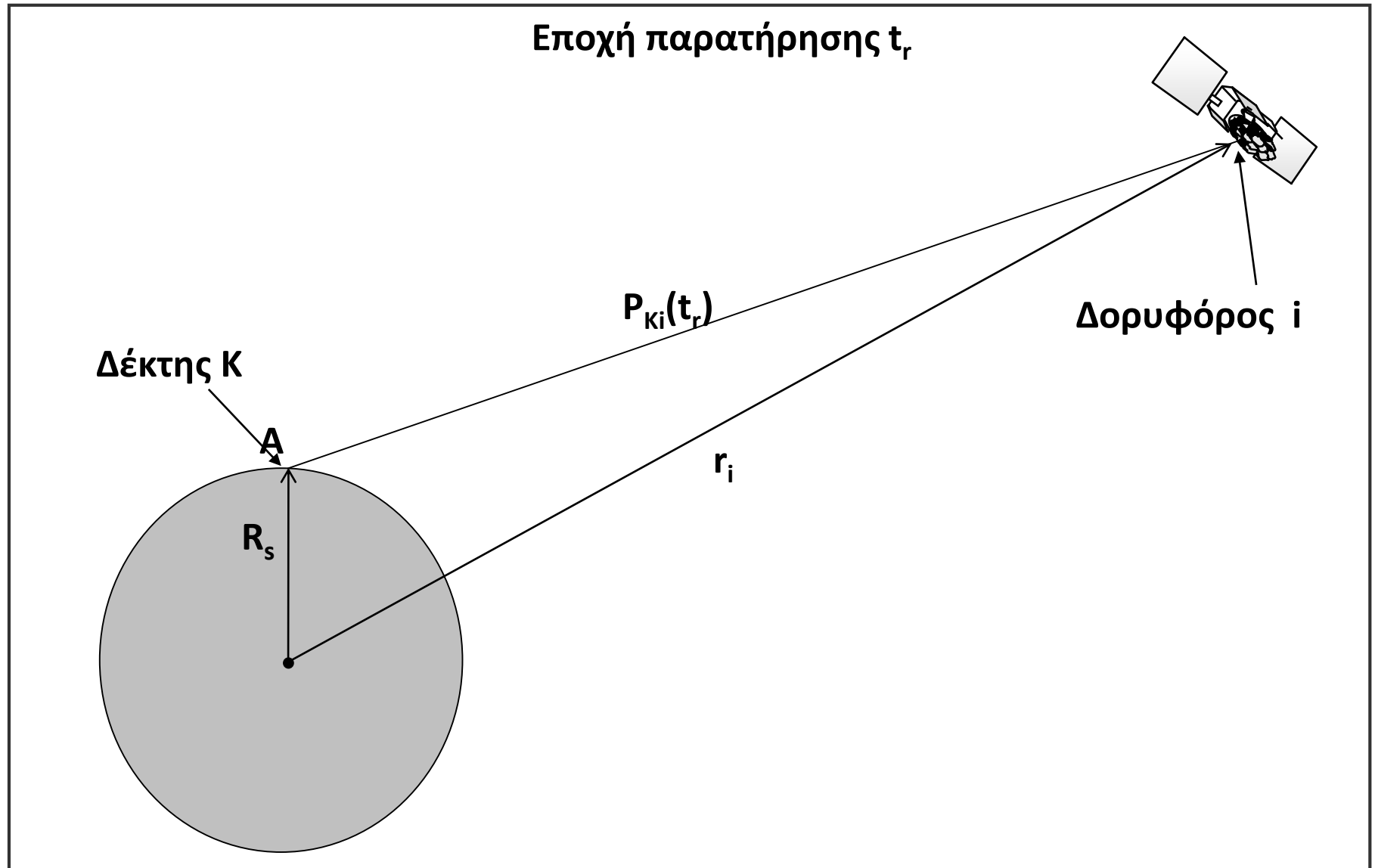
- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Δορυφορικά σφάλματα<ul style="list-style-type: none">– Σφάλματα τροχιάς– Σφάλματα δορυφορικών χρονομέτρων• Σφάλματα δεκτών<ul style="list-style-type: none">– Σφάλματα χρονομέτρων δεκτών– Σφάλματα “θορύβου” στους δέκτες | <ul style="list-style-type: none">• Σφάλματα παρατηρήσεων<ul style="list-style-type: none">– Υστέρηση σήματος στην ιονόσφαιρα– Υστέρηση σήματος στην τροπόσφαιρα• Σφάλματα σταθμού<ul style="list-style-type: none">– Συντεταγμένες σταθμού– Πολλαπλές ανακλάσεις |
|---|--|

Τάξη μεγέθους των διαφορών σφαλμάτων των μετρήσεων GPS

© Leica Geosystems



Απόλυτος προσδιορισμός θέσης



Απόλυτος προσδιορισμός θέσης – Εξισώσεις παρατήρησης

Παρατηρηθήσα απόσταση μεταξύ δορυφόρου και δέκτη

Τροχιακά σφάλματα, κ.λπ.

Επίδραση της ιονόσφαιρας

$$P_K^i = p_K^i + \delta p_K^i + c\delta_K - c\delta^i + I_K^i + T_K^i + \varepsilon_K^i$$

Θόρυβος παρατήρησης

Επίδραση της τροπόσφαιρας

Σφάλμα χρονομέτρου δέκτη

Σφάλμα χρονομέτρου δορυφόρου

Αληθής απόσταση μεταξύ δορυφόρου και δέκτη

Απόλυτος προσδιορισμός θέσης – Εξισώσεις παρατήρησης

$$P_K^i = p_K^i + \delta\rho_{mul} + \delta\rho_{rel} + c\delta_K - c\delta^i + I_K^i + T_K^i + \epsilon_K^i$$

Παρατηρηθήσα απόσταση μεταξύ δορυφόρου και δέκτη

Σφάλμα πολυανάκλασης

Επίδραση της ιονόσφαιρας

Επίδραση της τροπόσφαιρας

Θόρυβος παρατήρησης

Σφάλμα χρονομέτρου δέκτη

Σφάλμα χρονομέτρου δορυφόρου

Αληθής απόσταση μεταξύ δορυφόρου και δέκτη

Σχετικιστική επίδραση

Επιδράσεις εξαιτίας της Γενικής και της Ειδικής θεωρίας της Σχετικότητας $\delta\rho_{rel}$

Οι δορυφόροι βρίσκονται σε ύψος επάνω από την επιφάνεια της Γης και τις έλουσες μάζες αυτής. Στο ύψος αυτό η καμπυλότητα του χωροχρόνου είναι μικρότερη σε σχέση με την επιφάνεια της Γης. Η ΓΘΣ υπαγορεύει ότι τα ρολόγια πλησίον ενός σώματος με μεγάλη μάζα θα είναι πιο αργά σε σχέση με αυτά μακριά από αυτό. Συνεπώς, τα ρολόγια των δορυφόρων θα πρέπει να «χτυπούν» πιο γρήγορα από αυτά των δεκτών στην Γη ($\sim 45 \mu\text{s}/\text{day}$)

Ο παρατηρητής στη Γη βλέπει τους δορυφόρους εν κινήσει σε σχέση με αυτούς. Η ΕΘΣ υπαγορεύει ότι θα πρέπει να βλέπουμε τα ρολόγια των δορυφόρων να «χτυπούν» πιο αργά από αυτά στη Γη ($\sim 7 \mu\text{s}/\text{day}$)

Θεωρώντας ότι τα σφάλματα πολυανάκλασης και τα σχετικιστικά έχουν μοντελοποιηθεί επαρκώς και τα τροχιακά περιλαμβάνονται στα τυχαία, προκύπτει

$$P_K^i = p_K^i + c\delta_K - c\delta^i + I_K^i + T_K^i + \varepsilon_K^i$$

Απόλυτος προσδιορισμός θέσης – Εξισώσεις παρατήρησης

Αληθής δεκαδική διαφορά φάσης μεταξύ δορυφόρου και δέκτη

Ακέραιος αριθμός κύκλων για κάθε ζεύγος δέκτη-δορυφόρου

$$\lambda\Phi = P_K^i = p_K^i + \delta_K - c\delta^i + \lambda n_K^i \ominus l_K^i + T_K^i + \varepsilon_K^i(\Phi)$$

ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΠΡΟΣΗΜΟ στο σφάλμα της Ιονόσφαιρας
(ΓΙΑΤΙ??)

$$\Phi(\text{μονάδες μήκους}) = \lambda\varphi(\text{κύκλοι})$$

Απόλυτος προσδιορισμός θέσης – Εξίσωση παρατήρησης

$$P_K^i = p_K^i + \delta\rho_{mul} + \delta\rho_{rel} + c\delta_K - c\delta^i + I_K^i + T_K^i + \varepsilon_K^i$$

$K \rightarrow$ δέκτης (receiver)

$i \rightarrow$ δορυφόρος (satellite)

διανύσματα θέσης δορυφόρου και δέκτη

$$\mathbf{r}^i = \mathbf{X}^i = \begin{bmatrix} x^i \\ y^i \\ z^i \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_K = \mathbf{X}_K = \begin{bmatrix} x_K \\ y_K \\ z_K \end{bmatrix}$$