

Δορυφορικές Επικοινωνίες

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

Ενότητα 2^η
Δορυφορικές Τροχιές

Επίκουρος Καθηγητής
Νικόλαος Χ. Σαγιάς

Webpage: <http://eclass.uop.gr/courses/TST207>

e-mail: nsagias@uop.gr

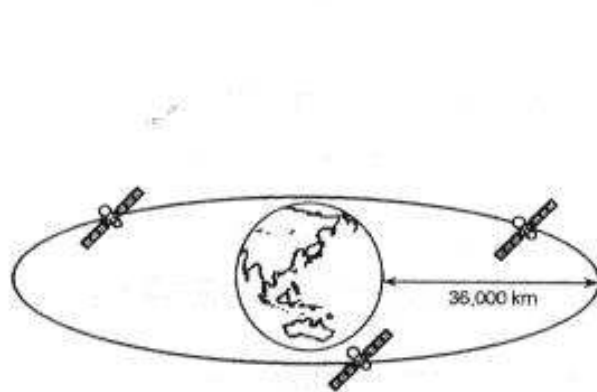
Περιεχόμενα

- Εισαγωγικά
- **Τροχιές**
- Ανάλυση ραδιοζεύξεων
- Τεχνικές εκπομπής/λήψης
- Πολλαπλή πρόσβαση
- Δορυφορικά δίκτυα
- Ειδικά θέματα

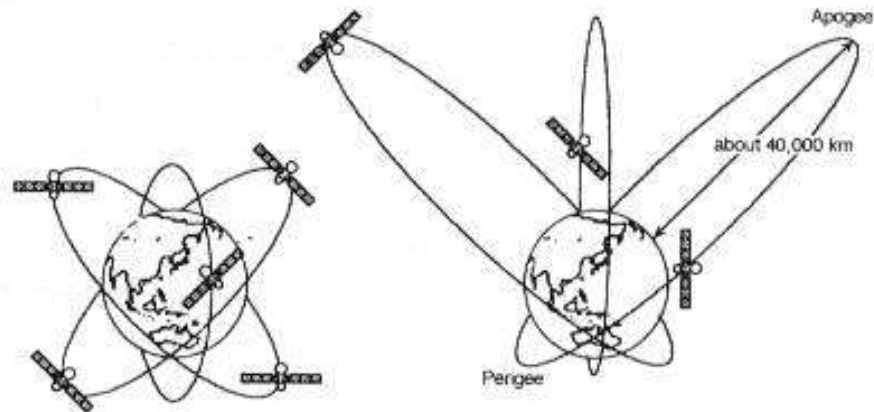
Δορυφορικές Τροχιές

Τροχιές:

- Γεωστατική (*Geostationary Earth Orbit (GEO)*)
- Έντονα ελλειπτική (*Highly inclined Earth Orbit (HEO)*)
- Μέσου ύψους (*Medium Earth Orbit (MEO)*)
- Χαμηλού ύψους (*Low Earth Orbit (LEO)*)



GEO



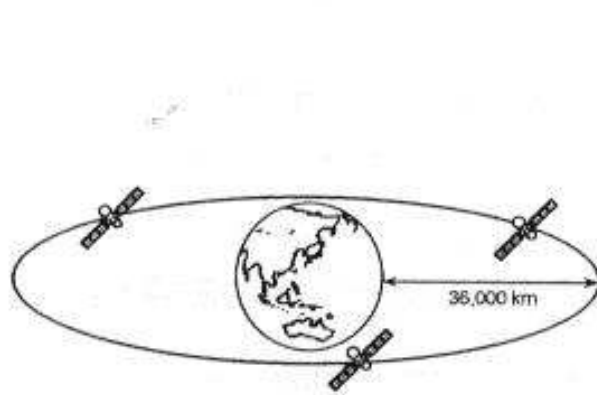
LEO/MEO

HEO

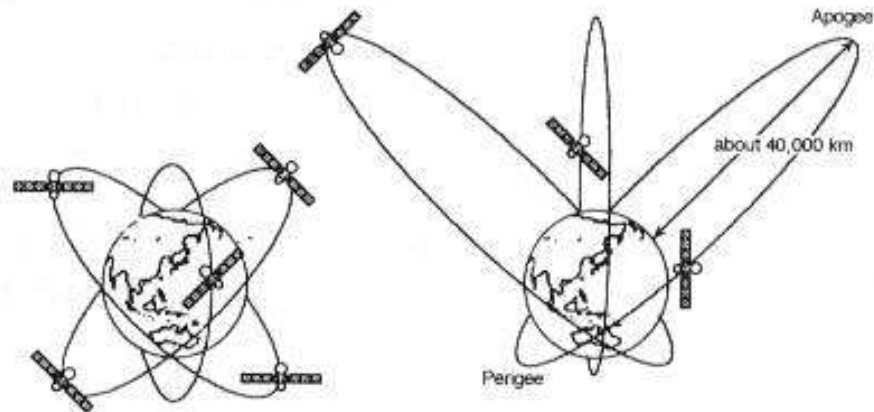
Δορυφορικές Τροχιές

Παράγοντες επιλογής τροχιάς:

- Γεωγραφικό πλάτος προς κάλυψη
- Γεωγραφική έκταση προς κάλυψη
- Διάρκεια και καθυστέρηση διάδοσης
- Χρόνος ορατότητας
- Γωνία ανύψωσης



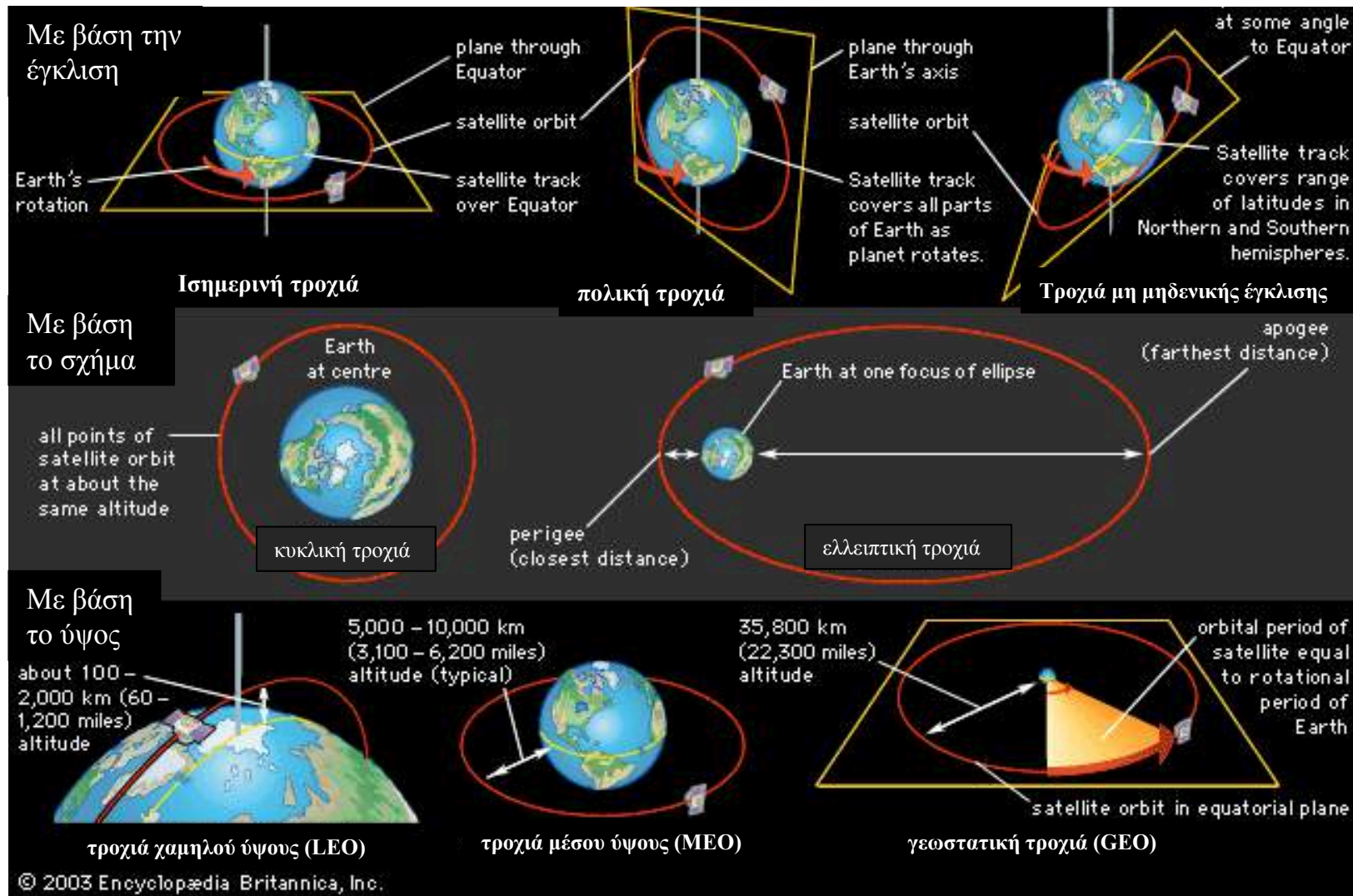
GEO



LEO/MEO

HEO

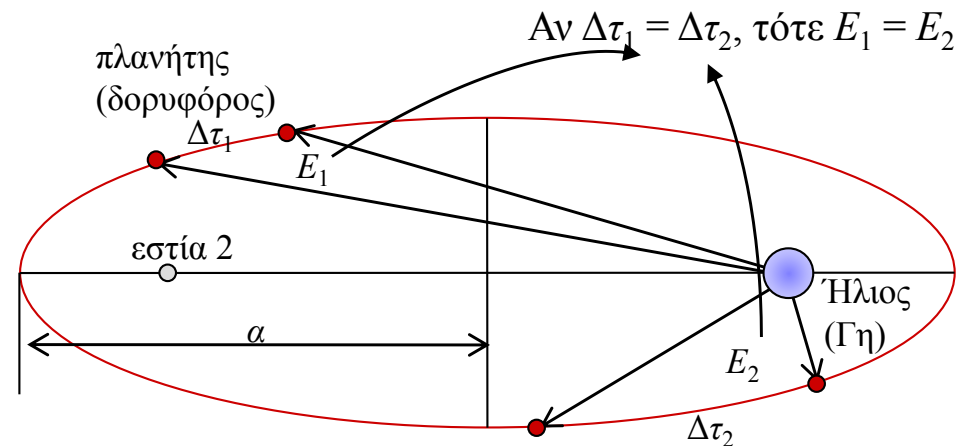
Δορυφορικές Τροχιές



Δορυφορικές Τροχιές

Νόμοι Kepler

1. Οι πλανήτες (δορυφόροι) κινούνται σε ένα επίπεδο. Οι τροχιές τους είναι ελλείψεις των οποίων στη μία εστία βρίσκεται ο Ήλιος (η Γη).
2. Το διάνυσμα που περιγράφει την απόσταση μεταξύ πλανήτη (δορυφόρου) και Ήλιου (Γης) καλύπτει ίσες επιφάνειες σε ίσους χρόνους (Νόμος ίσων εμβαδών $E_1 = E_2$).
3. Ο λόγος του τετραγώνου της περιόδου T της περιστροφής ενός πλανήτη (δορυφόρου) γύρω από τον Ήλιο (τη Γη) προς τον κύβο του μεγάλου ημιάξονα a της έλλειψης είναι ίδιος για όλους τους πλανήτες (δορυφόρους) (T ανάλογο του $a^{3/2}$).



Δορυφορικές Τροχιές

Νόμοι Newton

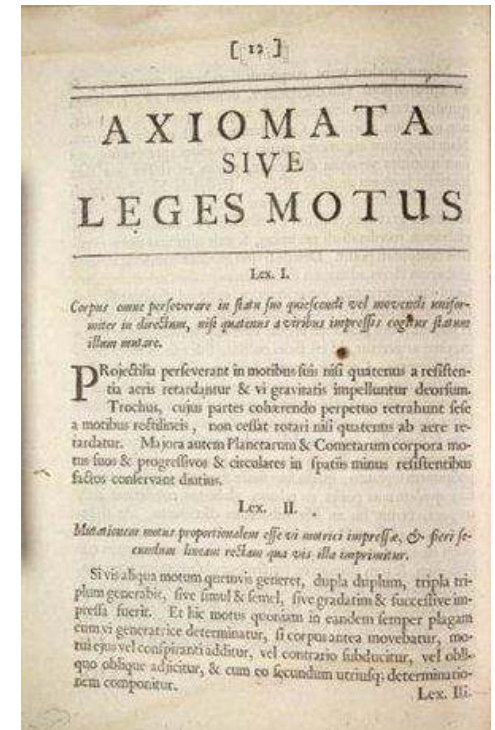
1. Ένα σώμα συνεχίζει να παραμένει ακίνητο ή να κινείται με σταθερή ταχύτητα εφόσον η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό είναι μηδέν

$$\sum_i \vec{F}_i = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{u} = \text{σταθερή}$$

2. Αν το διανυσματικό άθροισμα των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα είναι διάφορο του μηδενός, τότε το διανυσματικό άθροισμα των δυνάμεων ισούται με το γινόμενο της μάζας (m) του σώματος αυτού επί την επιτάχυνση της κίνησης που αναγκάζεται να εκτελέσει

$$\sum_i \vec{F}_i = m \vec{a}$$

3. Αν ένα σώμα A ασκεί μία δράση σε ένα σώμα B, τότε και το σώμα B θα ασκήσει μία αντίδραση στο A ίση κατά μέτρο και αντίθετη



Philosophiæ
Naturalis Principia
Mathematica, 1687

Δορυφορικές Τροχιές

Νόμος παγκόσμιας έλξης

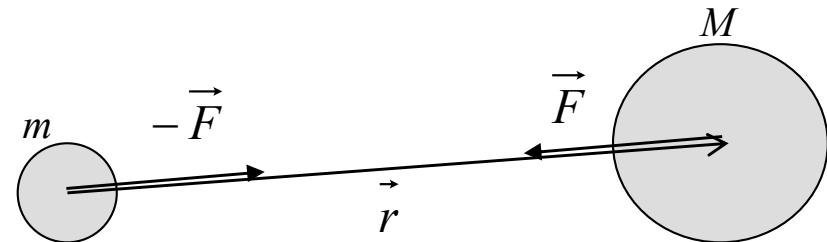
Η δύναμη F που αναπτύσσεται μεταξύ δύο σωμάτων με μάζες m και M που βρίσκονται σε μεταξύ τους απόσταση r είναι:

- Ελκτική
- Ανάλογη των μαζών m και M
- Αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης r

$$\vec{F} = -G \frac{m M}{r^2} \vec{r}$$

Υποθέσεις:

- Κεντρικές δυνάμεις
- Σημειακές μάζες



G : η σταθερά παγκόσμιας έλξης, $G = 6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

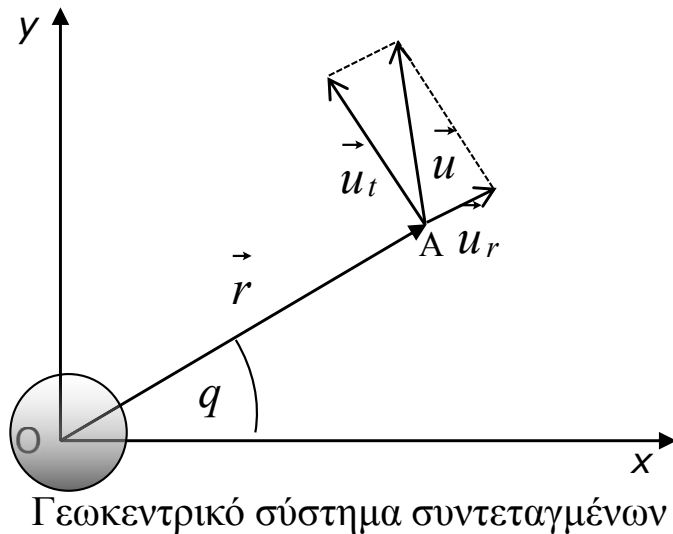
Εξίσωση Τροχιάς

Καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της κίνησης:

- ✓ Αρχή διατήρησης της ενέργειας
- ✓ Αρχή διατήρησης της ορμής
- ✓ Αρχή διατήρησης της στροφορμής

Υποθέσεις:

- ✓ Μάζες Γης (M) και δορυφόρου (m), σφαιρικές, ομογενείς και $M \gg m$
- ✓ Κλειστό σύστημα δύο σωμάτων



Κλειστό σύστημα 2 σωμάτων

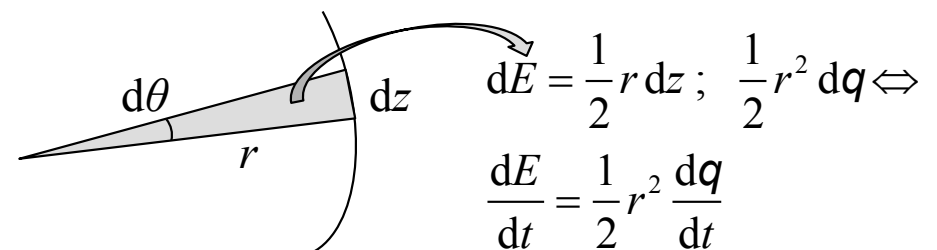
$$\text{Ροπή: } \vec{M} = \frac{d\vec{H}}{dt} = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{r} \times \vec{u} = \vec{0}$$

Επαλήθευση του 1^{ου} νόμου του Kepler

Στροφορμή

$$\left. \begin{aligned} \vec{H} &= \vec{r} \times m \vec{u} \\ \vec{u} &= \vec{u}_t + \vec{u}_r \end{aligned} \right\} \frac{H}{m} = r^2 \frac{dq}{dt} = \text{σταθερό}$$

Επαλήθευση 2^{ου} νόμου του Kepler



Εξίσωση Τροχιάς

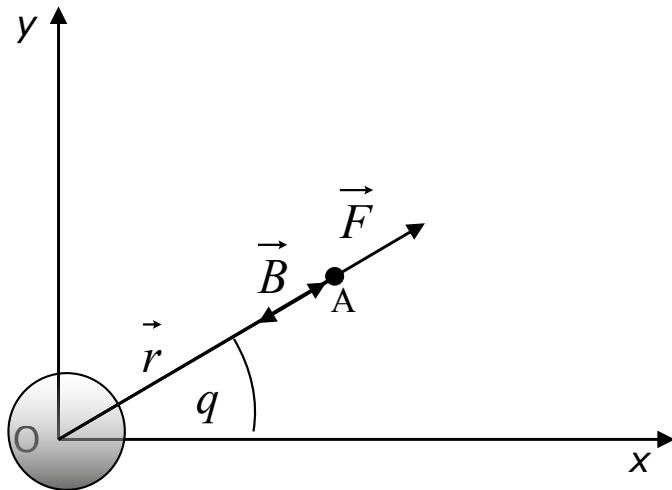
2^{ος} Νόμος Newton: $\vec{F} + \vec{B} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$

$$\vec{F} = m \omega^2 \vec{r}$$

$$\vec{B} = -G \frac{mM}{r^3} \vec{r}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 r}{dt^2} - \frac{H^2}{m^2 r^3} &= -\frac{GM}{r^2} \\ \frac{dr}{dt} &= \frac{dr}{dq} \frac{dq}{dt} \text{ και } y = \frac{1}{r} \end{aligned} \right\} \frac{d^2 y}{dq^2} + y = \frac{GMm}{H^2}$$

Επίλυση κανονικής
διαφορικής εξίσωσης
2^{ου} βαθμού



Γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων

Εξίσωση τροχιάς σε πολικό διάγραμμα αξόνων

$$r(\theta) = \frac{p}{1 + e \cos(\theta - \theta_0)}$$

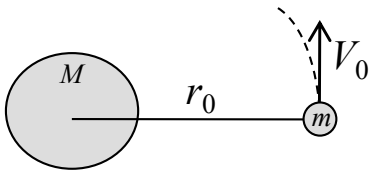
p : σταθερά της κίνησης $p = H^2 / (GMm^2)$

e : η εκκεντρότητα $e = pr_0$

ρ_0 και θ_0 : καθορίζονται από τις αρχικές συνθήκες

Εξίσωση Τροχιάς

$$\boxed{r(\theta) = \frac{p}{1 + e \cos(\theta - \theta_0)}} \implies \theta = \theta_0 \implies r(\theta_0) = r_0 = \frac{p}{1 + e} \implies e = \frac{r_0 V_0^2}{GM} - 1$$



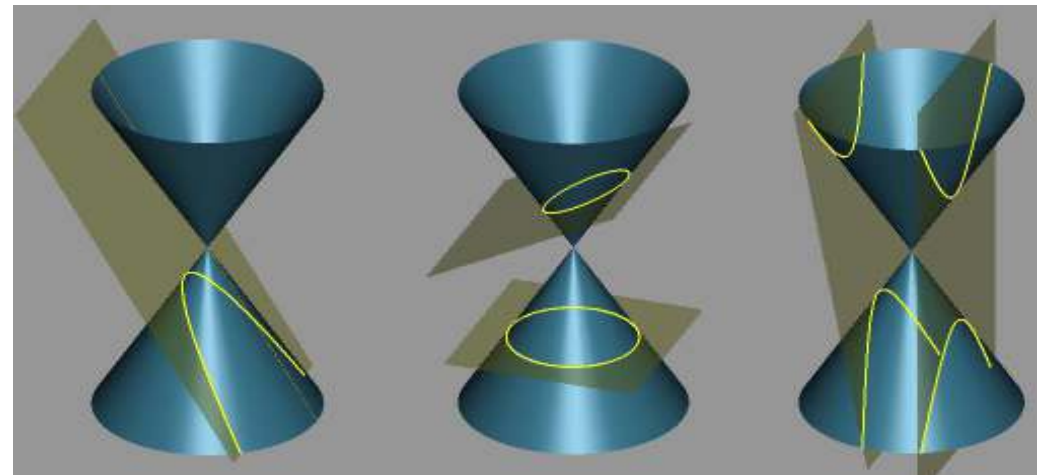
r_0 : η ελάχιστη απόσταση μεταξύ σώματος και Γης
 V_0 : η αρχική ταχύτητα του σώματος σε απόσταση r_0

Αν $e = 1$, τότε $V_0 = \sqrt{\frac{2GM}{r_0}}$, τροχιά: παραβολή

Αν $e > 1$, τότε $V_0 > \sqrt{\frac{2GM}{r_0}}$, τροχιά: υπερβολή

Αν $e = 0$, τότε $V_0 = \sqrt{\frac{GM}{r_0}}$, τροχιά: κύκλος

Αν $e < 1$, τότε $V_0 < \sqrt{\frac{2GM}{r_0}}$, τροχιά: έλλειψη



Παραβολή

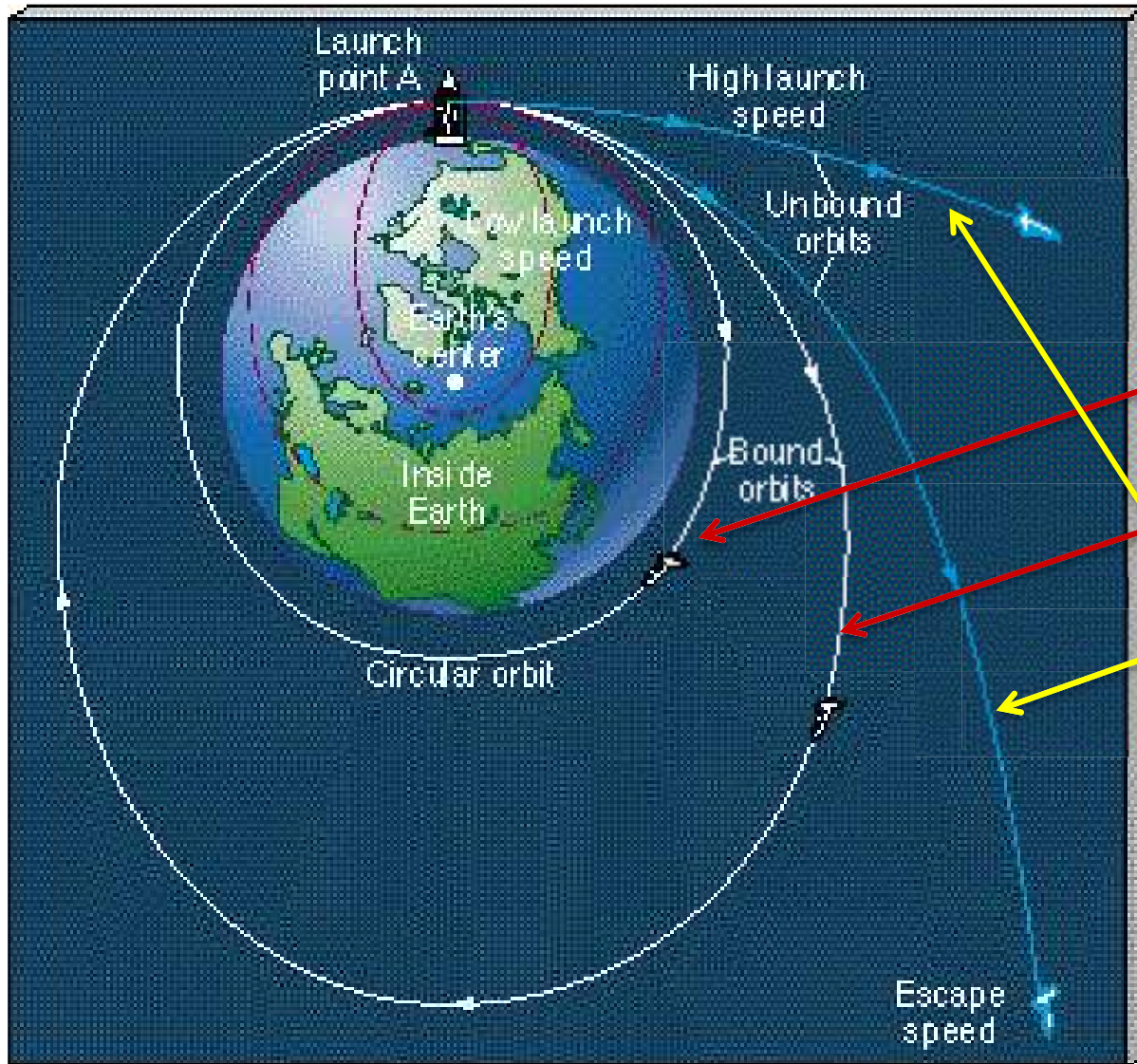
Έλλειψη

Υπερβολή

Κωνικές τομές

Ευσταθείς δορυφορικές τροχιές ($0 \leq e < 1$)

Εξίσωση Τροχιάς



$$V_0 = \sqrt{\frac{GM}{r_0}}, \quad \text{τροχιά: κύκλος}$$

$$V_0 < \sqrt{\frac{2GM}{r_0}}, \quad \text{τροχιά: έλλειψη}$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{2GM}{r_0}}, \quad \text{τροχιά: παραβολή}$$

$$V_0 > \sqrt{\frac{2GM}{r_0}}, \quad \text{τροχιά: υπερβολή}$$

Εξίσωση Τροχιάς

Απόσταση δορυφόρου-κέντρο Γης:

$$r(\nu) = \frac{\alpha(1 - e^2)}{1 + e \cos(\nu)}$$

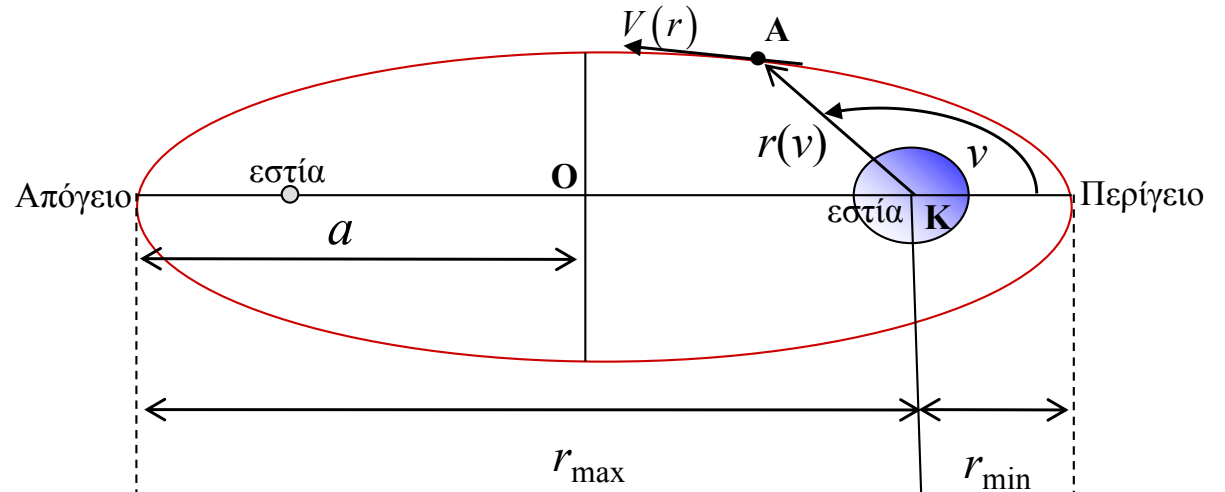
ν : αληθής ανωμαλία

$$r(\nu) = \begin{cases} r_0 = r_{\min} = \alpha(1 - e), & \text{αν } \nu = 0^\circ \\ r_{\max} = \alpha(1 + e), & \text{αν } \nu = 180^\circ \end{cases}$$

$$e = \frac{r_{\max} - r_{\min}}{r_{\max} + r_{\min}} = \begin{cases} \text{έλλειψη, αν } r_{\max} > r_{\min} \\ \text{κύκλος, αν } r_{\max} = r_{\min} \end{cases}$$

Περίοδος τροχιάς: $T = 2\pi \sqrt{\frac{\alpha^3}{\mu}}$

Η περίοδος της τροχιάς εξαρτάται μόνο από το α
(Επαλήθευση του 3^{ου} νόμου του Kepler)



Γραμμική ταχύτητα: $V(r) = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{\alpha} \right)}$

α : το μήκος του μεγάλου ημιάξονα

e : η εκκεντρότητα της έλλειψης

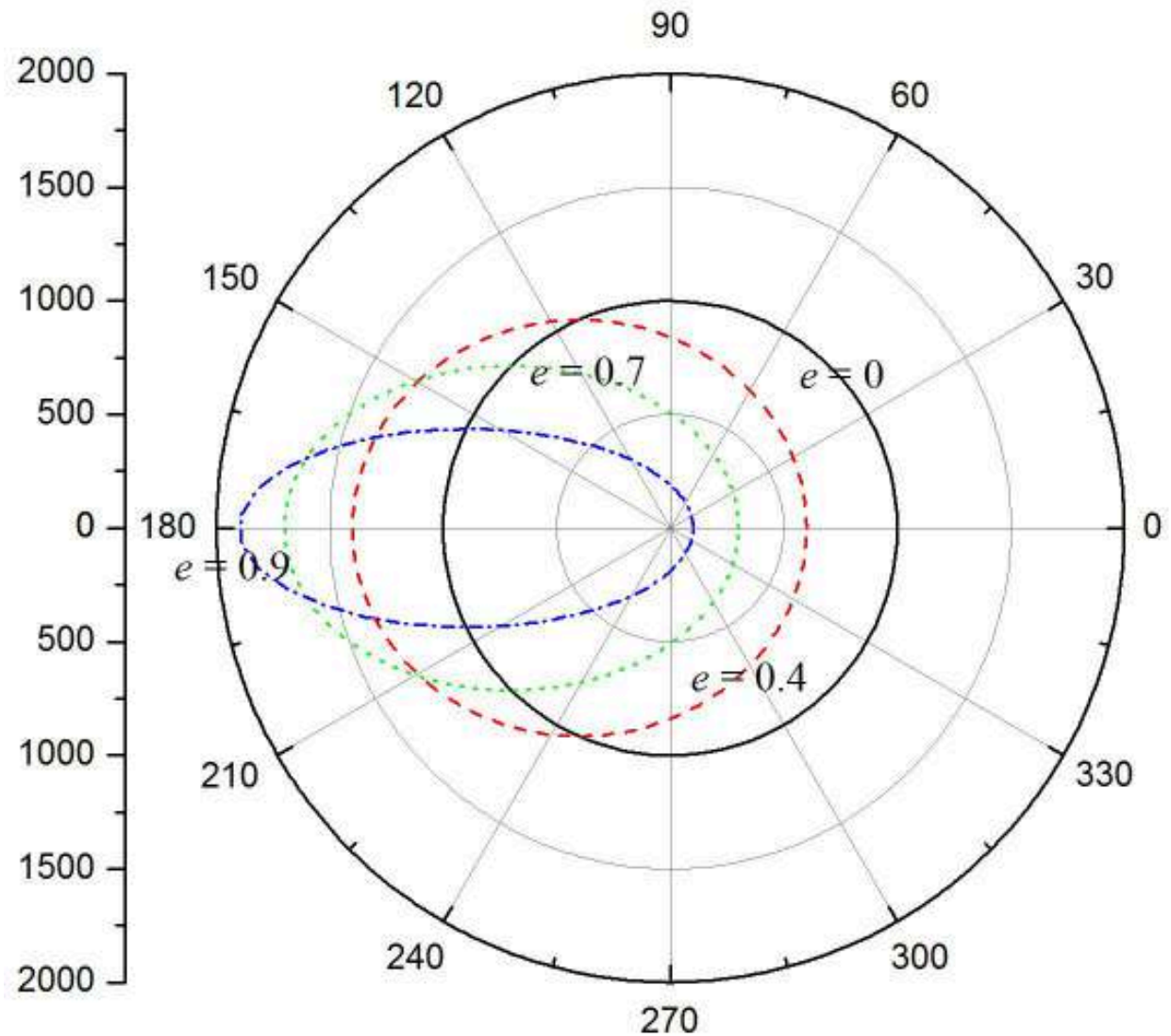
$$\mu = G M = 3,984 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$$

Εξίσωση Τροχιάς

$$r(\nu) = \frac{\alpha(1 - e^2)}{1 + e \cos(\nu)}$$

Παράμετροι

- $a = 1000$
- $e = 0, 0.4, 0.7, 0.9$



Εξίσωση Τροχιάς

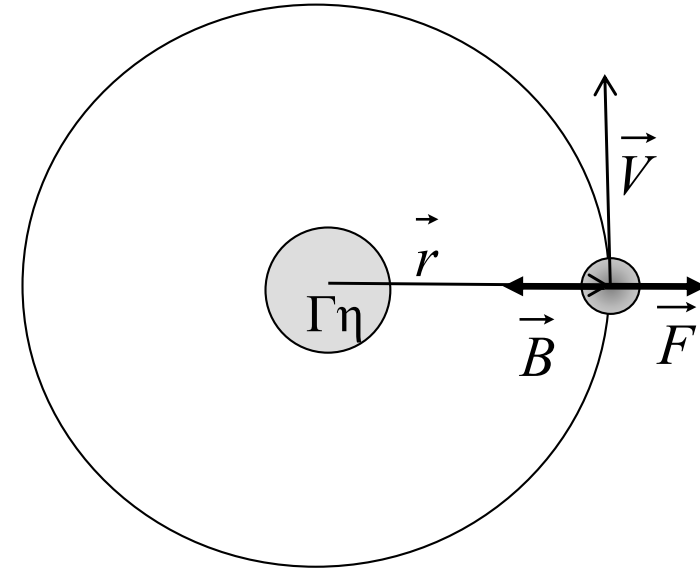
Κυκλική τροχιά

$$\text{Φυγόκεντρος δύναμη: } \vec{F} = m \omega^2 \vec{r}$$

$$\text{Βάρος δορυφόρου: } \vec{B} = -g m \frac{R_e}{r^3} \vec{r}$$

$$\text{Συνθήκη ισορροπίας: } \vec{F} + \vec{B} = \vec{0}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \Leftrightarrow h_{geo} = \sqrt[3]{g \frac{T^2 R_e^2}{4\pi^2}} - R_e \approx 35786.1 \text{ km}$$



Ευσταθές ύψος
γεωστατικών δορυφόρων

ω : γωνιακή ταχύτητα του δορυφόρου

T : η περίοδος περιστροφής, $T = (23 \text{ h} \times 60 \text{ min} + 56 \text{ min}) \times 60 \text{ sec} + 4.1 \text{ sec}$

m : μάζα του δορυφόρου

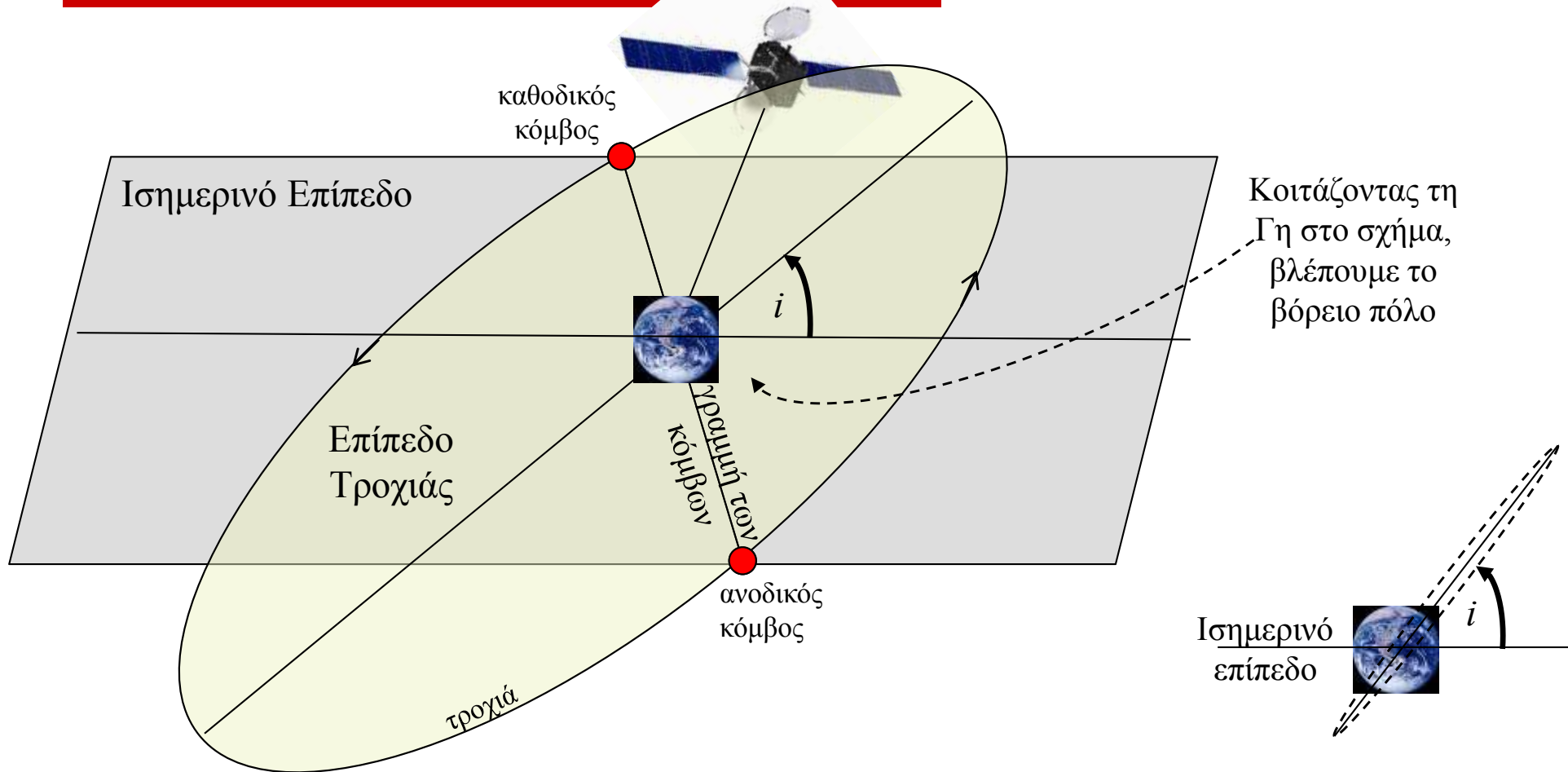
r : απόσταση μεταξύ του κέντρου της Γης και του δορυφόρου

R_e : ακτίνα της γης, $R_e = 6378.39 \text{ km}$

h_{geo} : Ύψος της γεωστατικής τροχιάς του δορυφόρου, $h_{geo} = r - R_e$

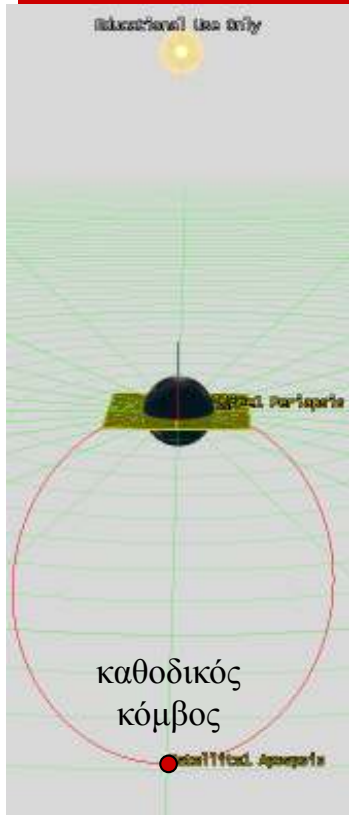
g : επιτάχυνση της βαρύτητας στην επιφάνεια της γης, $g = 9.8087 \text{ m/s}^2$

Χαρακτηριστικές Παράμετροι Τροχιών



- **Έγκλιση, i , (inclination)** είναι η γωνία μεταξύ των επιπέδων της τροχιάς του δορυφόρου και του ισημερινού
- **Κόμβοι (nodes)** τα σημεία τομής του ισημερινού επιπέδου με την τροχιά
 - Ανοδικός κόμβος: Το σημείο από το οποίο περνάει ο δορυφόρος από N \rightarrow B ημισφαίριο
 - Καθοδικός κόμβος: Το σημείο από το οποίο περνάει ο δορυφόρος από B \rightarrow N ημισφαίριο

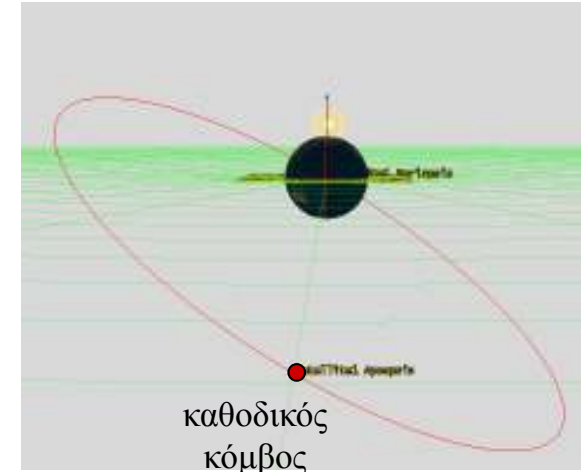
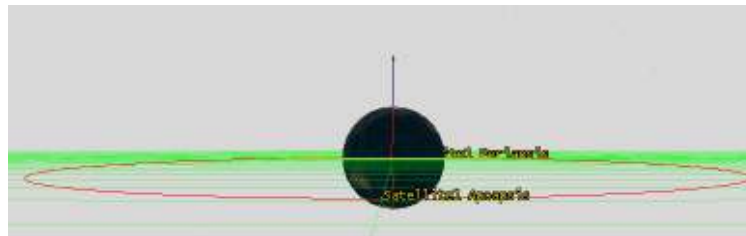
Χαρακτηριστικές Παράμετροι Τροχιών



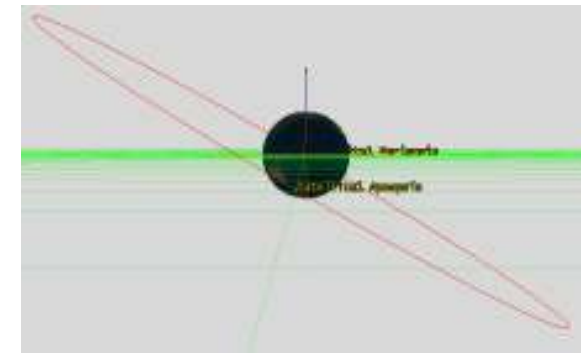
Μηδενική έγκλιση



Μηδενική έγκλιση



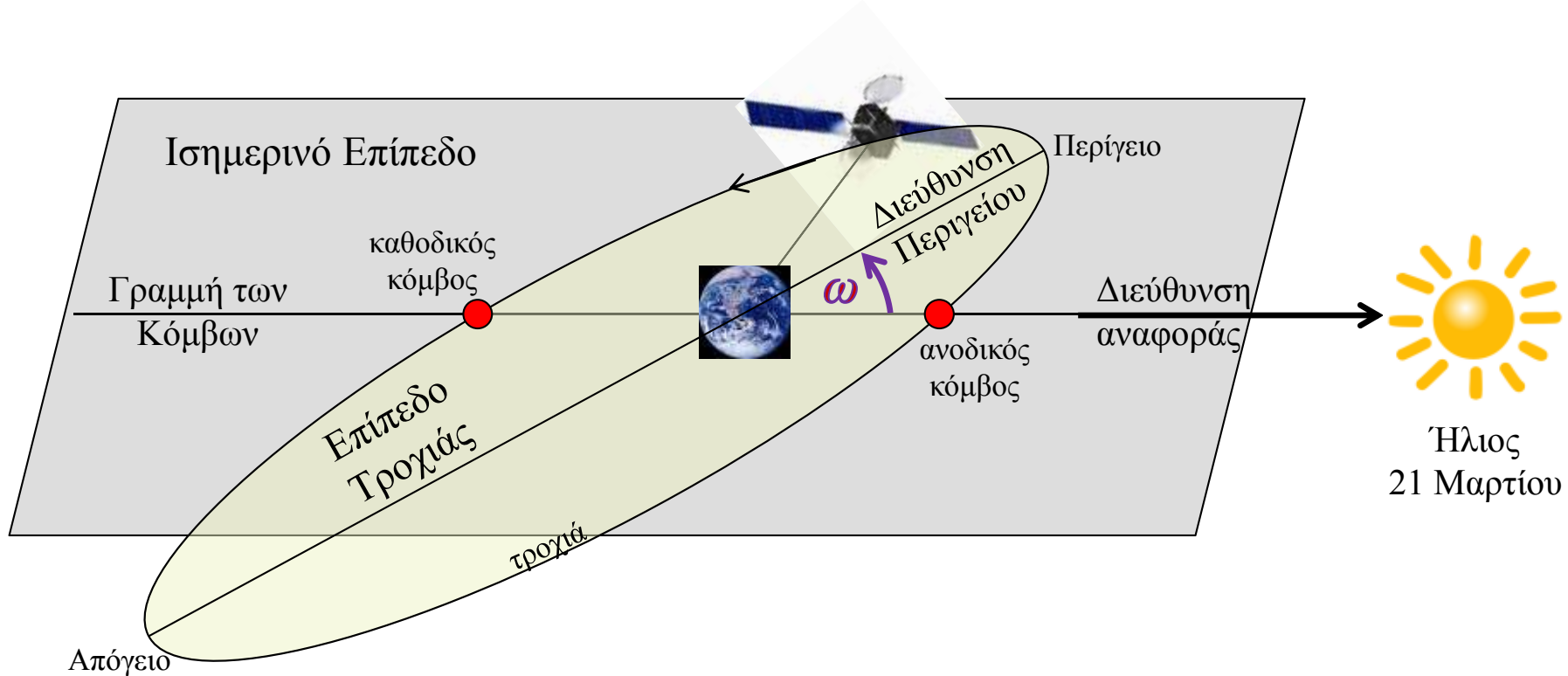
Μη μηδενική έγκλιση



Έγκλιση, i , (inclination) είναι η γωνία μεταξύ των επιπέδων της τροχιάς του δορυφόρου και του ισημερινού

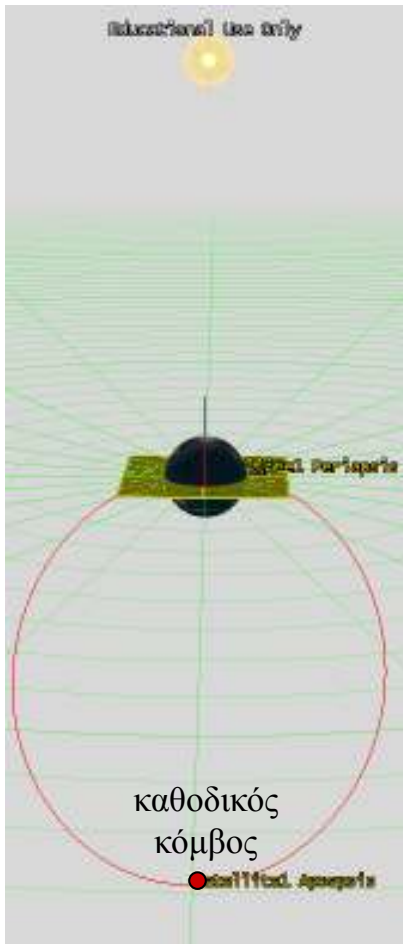
- Για έγκλιση $< 90^\circ$, ο δορυφόρος περιστρέφεται δεξιόστροφα σε σχέση με τη Γη
- Για έγκλιση $> 90^\circ$, ο δορυφόρος περιστρέφεται αριστερόστροφα σε σχέση με τη Γη

Χαρακτηριστικές Παράμετροι Τροχιών

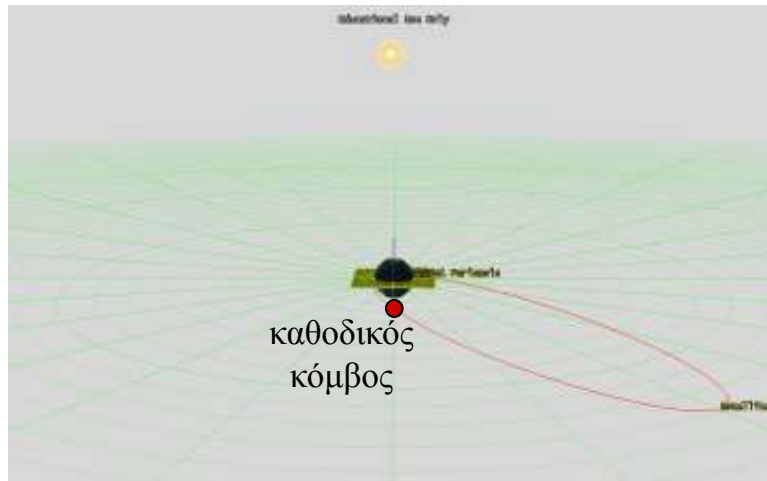


- **Διεύθυνση αναφοράς**, είναι η διεύθυνση στην οποία βρίσκεται ο Ήλιος κατά την εαρινή ισημερία (21 Μαρτίου)
- **Όρισμα του περιγείου**, ω , (*argument of perigee*) είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του περιγείου και της γραμμής των κόμβων

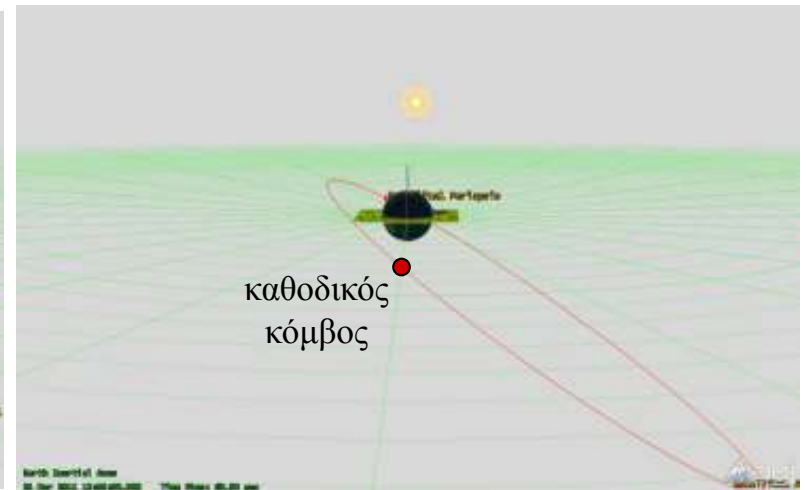
Χαρακτηριστικές Παράμετροι Τροχιών



Μηδενική γωνία Περιγείου

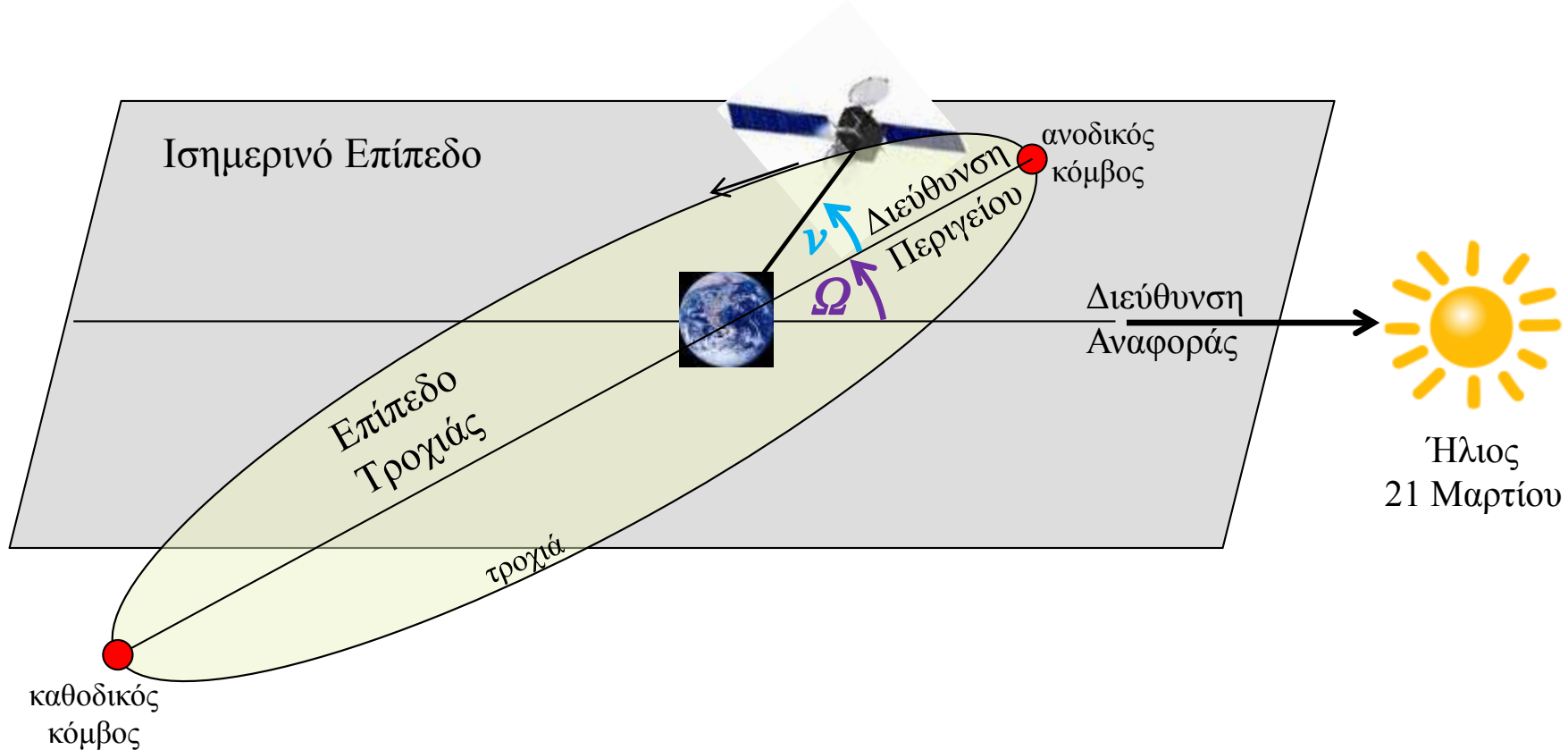


Μη μηδενική γωνία Περιγείου
Μηδενική έγκλιση



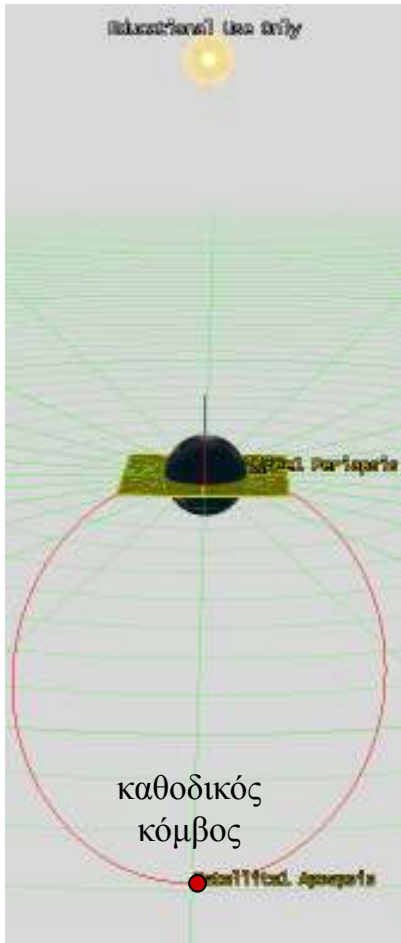
Μη μηδενική γωνία Περιγείου
Μη μηδενική έγκλιση

Χαρακτηριστικές Παράμετροι Τροχιών



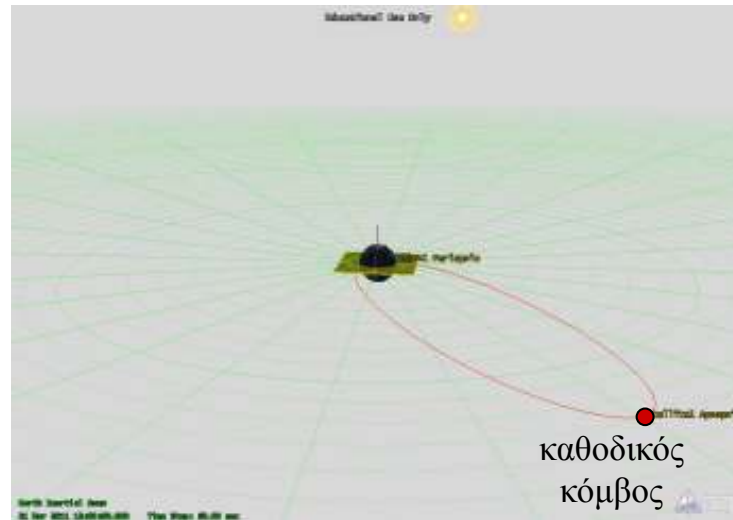
- **Ορθή άνοδος του ανοδικού κόμβου, Ω** , (*right ascension of the ascending node – RAAN*) είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης αναφοράς και της διεύθυνσης του ανοδικού κόμβου
- **Αληθής ανωμαλία, ν** , (*true anomaly*) είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του περιγείου και της ευθείας που περνάει από το κέντρο της Γης και το δορυφόρο

Χαρακτηριστικές Παράμετροι Τροχιών



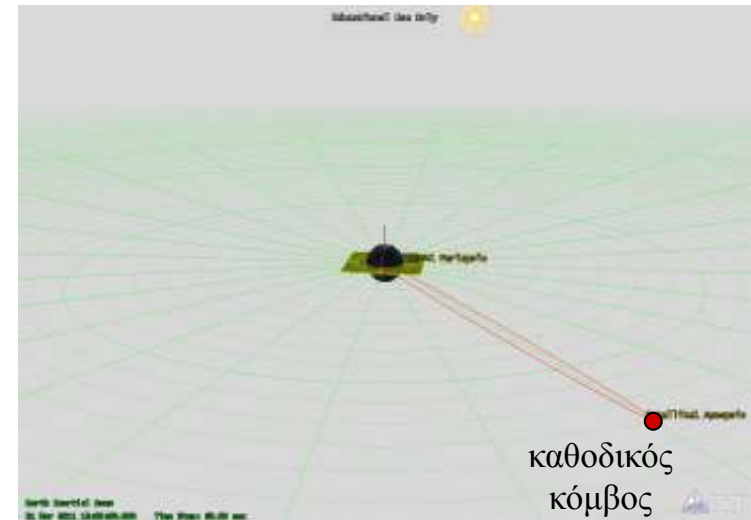
$$\Omega = 0$$

Μηδενική έγκλιση



$$\Omega \neq 0$$

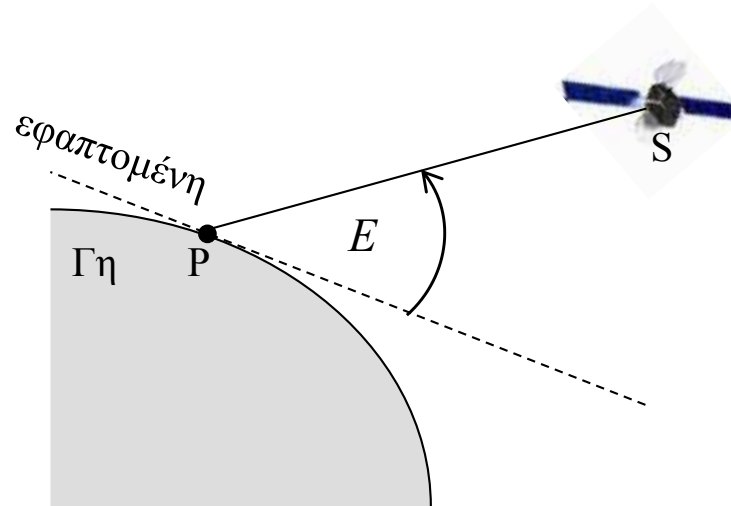
Μηδενική έγκλιση



$$\Omega \neq 0$$

Μη μηδενική έγκλιση

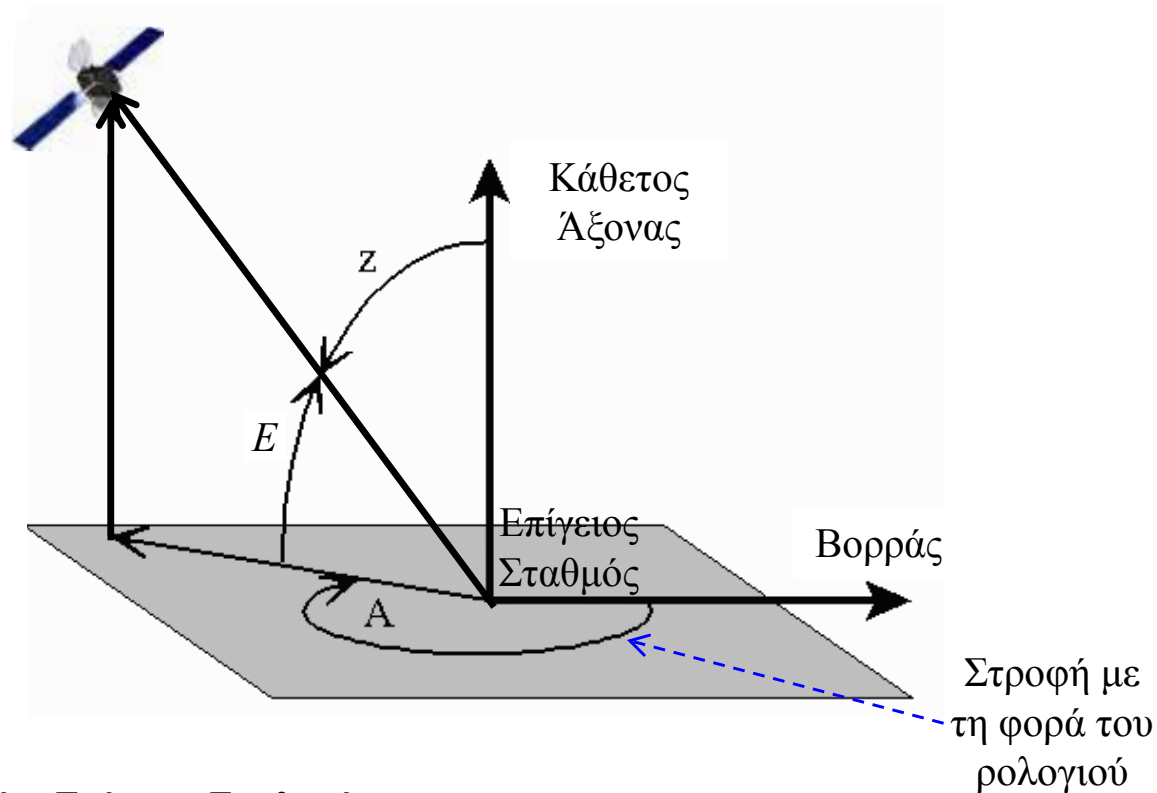
Χαρακτηριστικές Παράμετροι Τροχιών



Γωνίες Σκόπευσης Κεραίας Επίγειου Σταθμού

- **Γωνία ανύψωσης, E , (*elevation angle*)** είναι η γωνία μεταξύ του ορίζοντα στο υπό θεώρηση σημείο και του δορυφόρου
- **Γωνία αζιμούθιου, A , (*azimuth angle*)** είναι η γωνία που διαγράφεται με τη φορά του ρολογιού ξεκινώντας από το βορρά μέχρι να συναντήσουμε την προβολή του δορυφόρου στο επίπεδο που βρισκόμαστε

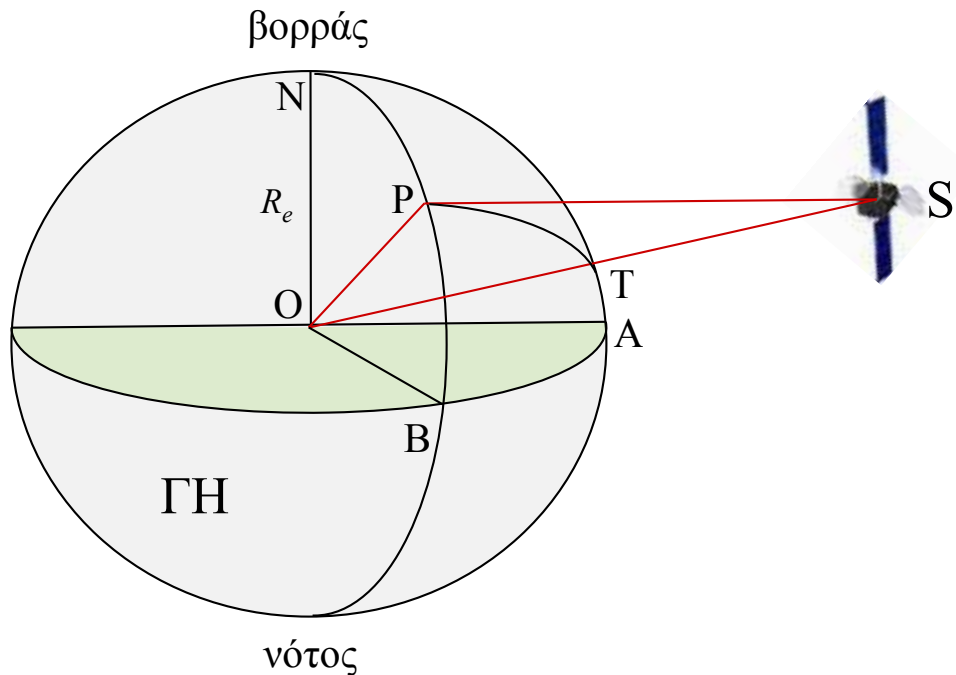
Χαρακτηριστικές Παράμετροι Τροχιών



Γωνίες Σκόπευσης Κεραίας Επίγειου Σταθμού

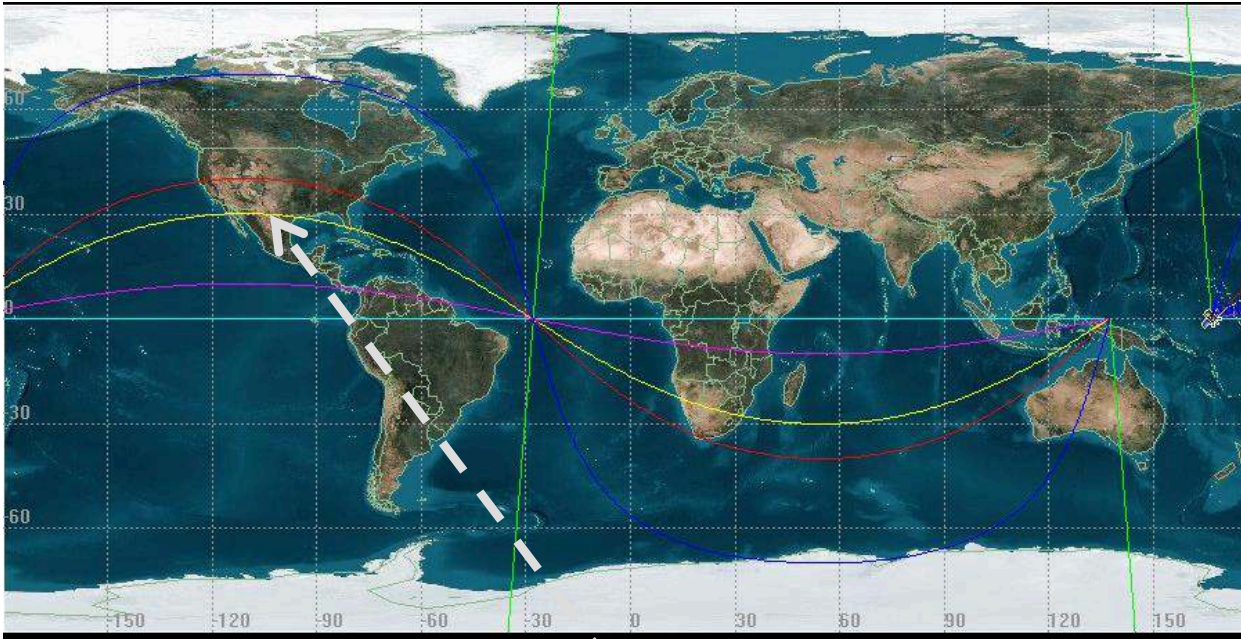
- **Γωνία ανύψωσης, E , (elevation angle)** είναι η γωνία μεταξύ του ορίζοντα στο υπό θεώρηση σημείο και του δορυφόρου
- **Γωνία αζιμούθιου, A , (azimuth angle)** είναι η γωνία που διαγράφεται με τη φορά του ρολογιού ξεκινώντας από το βορρά μέχρι να συναντήσουμε την προβολή του δορυφόρου στο επίπεδο που βρισκόμαστε

Χαρακτηριστικές Παράμετροι Τροχιών

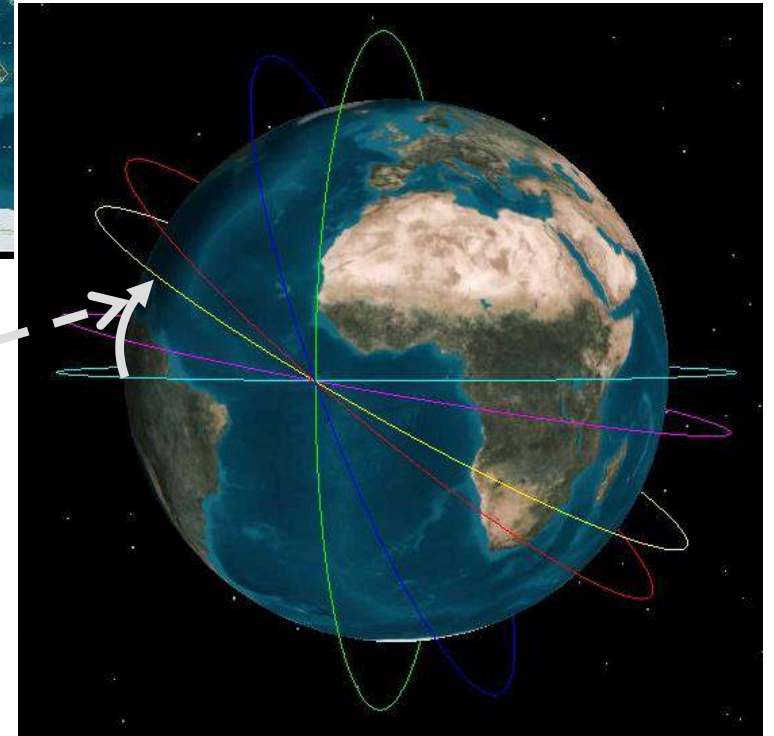


- **Ύψος** του δορυφόρου είναι η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας της Γης και του δορυφόρου (TS) στην ευθεία που σχηματίζεται μεταξύ του κέντρου της Γης και του δορυφόρου
- **Υποδορυφορικό σημείο** (*subsattelite point*) είναι το σημείο στην επιφάνεια της Γης από το οποίο διέρχεται η ευθεία μεταξύ του κέντρου Γης και του δορυφόρου (σημείο T)
- **Τχνος** (*ground trace*) είναι το αποτύπωμα του υποδορυφορικού σημείου στην επιφάνεια της Γης κατά τη σχετική κίνηση Γης και δορυφόρου

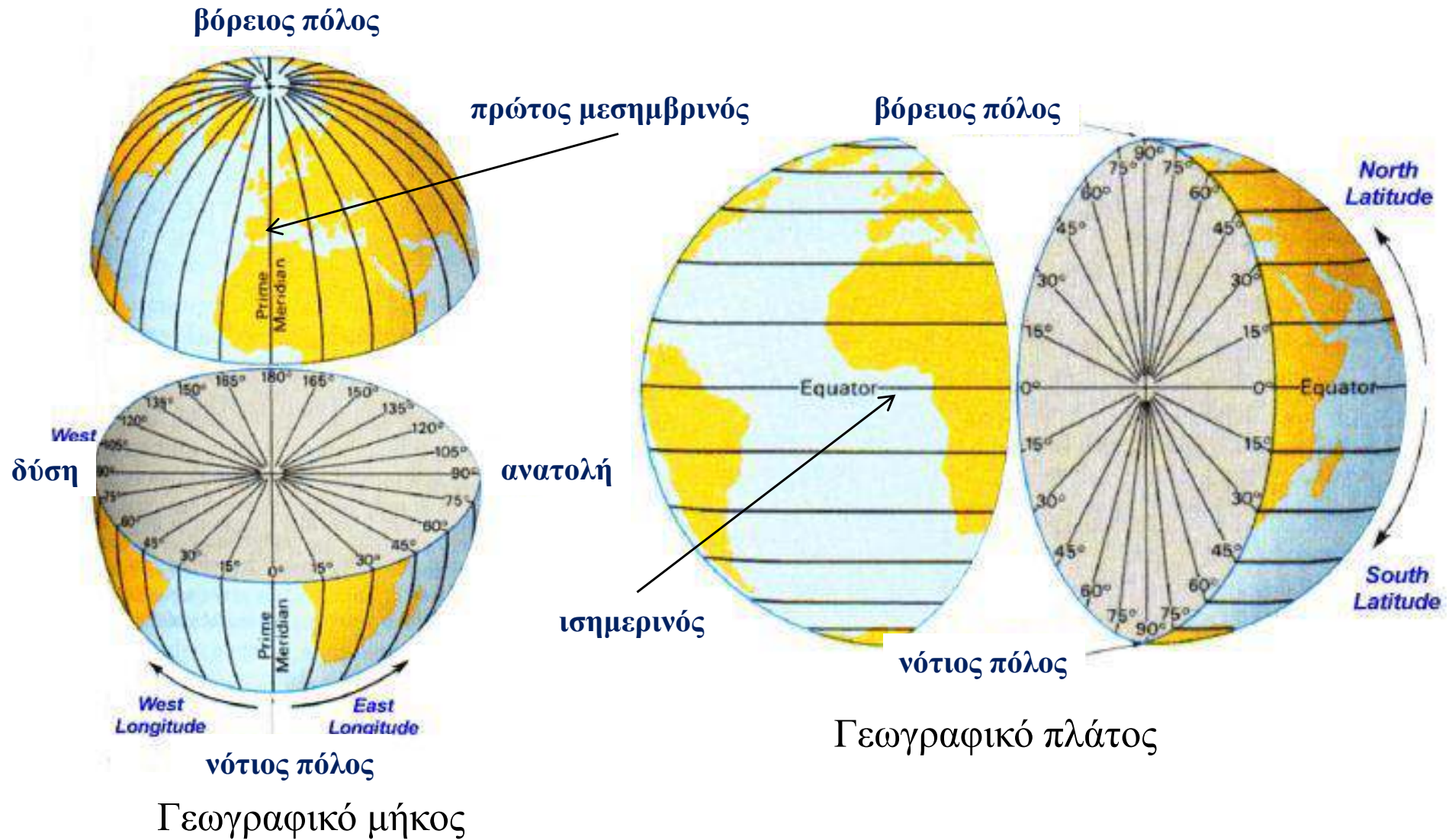
Χαρακτηριστικές Παράμετροι Τροχιών



Το μέγιστο γεωγραφικό πλάτος του
ίχνους ισούται με τη γωνία ανύψωσης



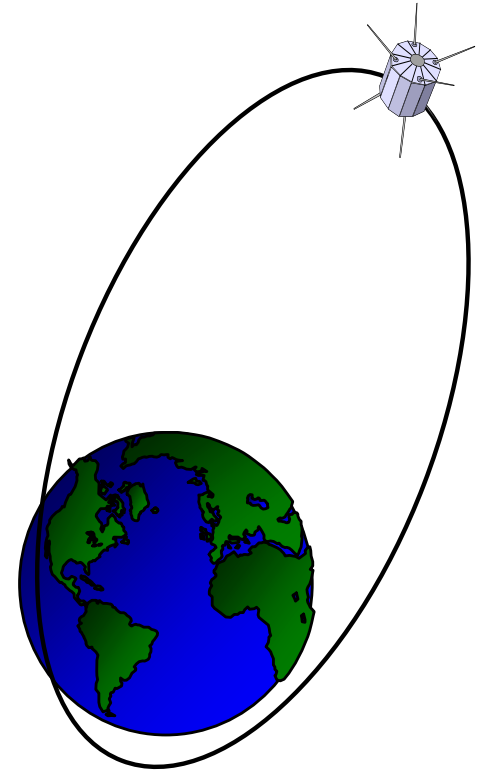
Χαρακτηριστικές Παράμετροι Τροχιών



Ελλειπτικές Τροχιές (HEO)

Πλεονεκτήματα

- Μεγάλη γωνία ανύψωσης
- Μεγάλος χρόνος ορατότητας
- Κάλυψη περιοχών μεγάλου γεωγραφικού πλάτους
- Περιορισμός φαινομένων πολυδιόδευσης
- Ελαχιστοποίηση θορύβου και παρεμβολών
- Μικρή πολυπλοκότητα – κόστος επίγειου σταθμού
- Σπάνια εμφάνιση εκλείψεων και συζυγίας ηλίου δορυφόρου



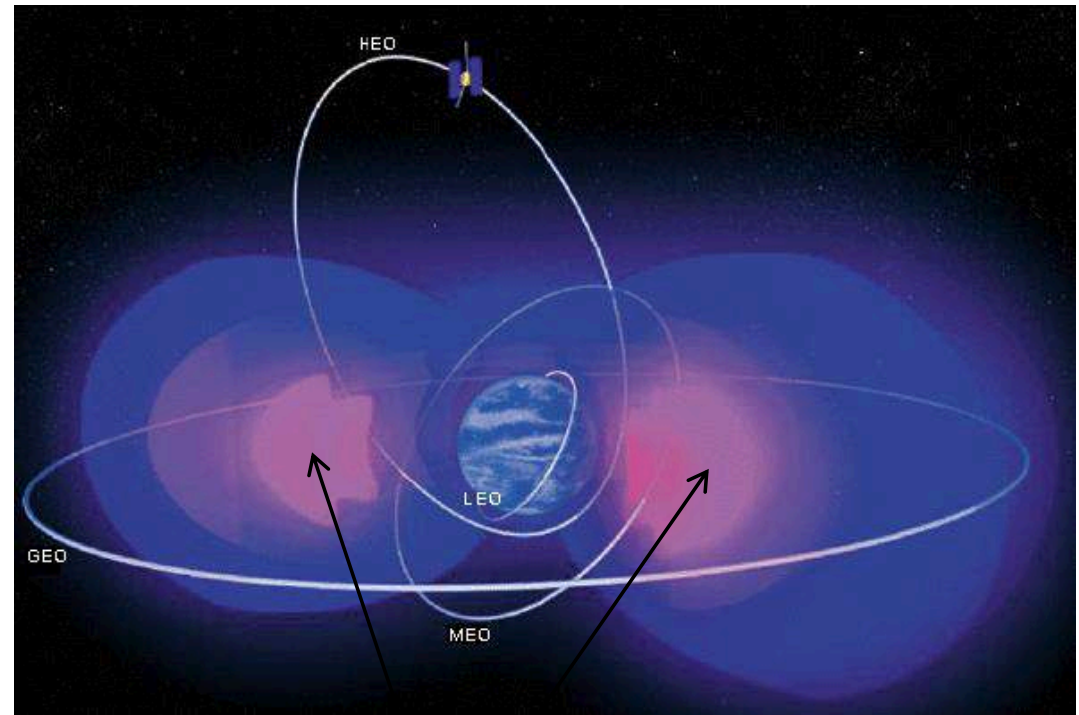
Ελλειπτικές Τροχιές (HEO)

Μειονεκτήματα

- Ισχυρό φαινόμενο Doppler
- Μεταβαλλόμενος χρόνος διάδοσης
- Μεταβαλλόμενα επίπεδα ισχύος λήψης
- Μειωμένο χρόνο ζωής των δορυφόρων
- Απαιτούνται κεραιές μεγάλης ενεργούς επιφάνειας
- Απαιτούνται περισσότεροι από έναν δορυφόροι για συνεχή κάλυψη
- Διαταράξεις της τροχιάς λόγω ασύμμετρου βαρυτικού πεδίου

Χαρακτηριστικές τροχιές

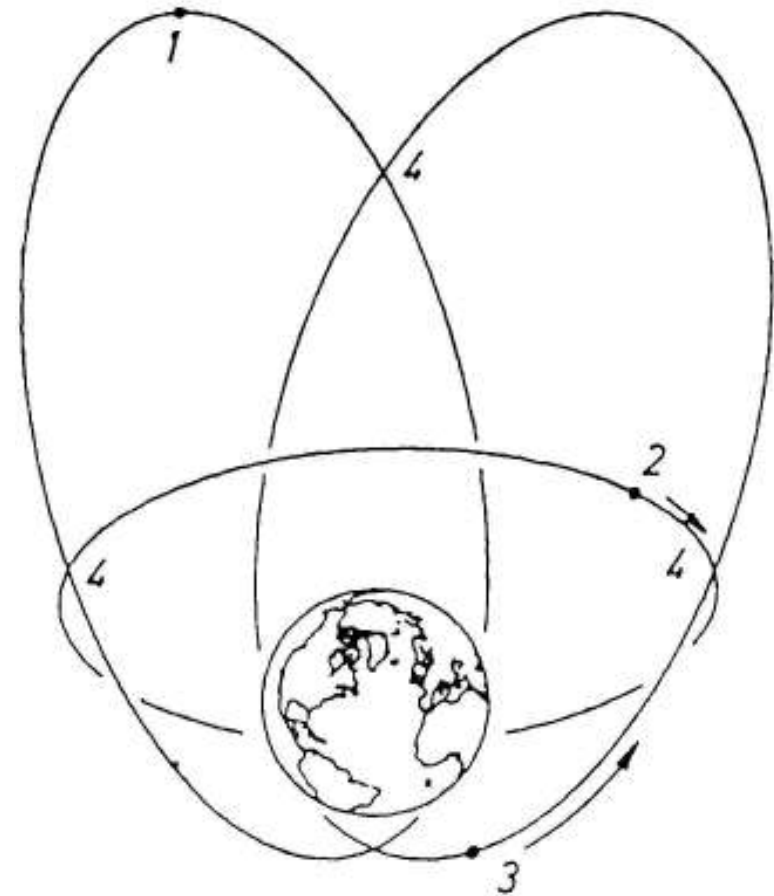
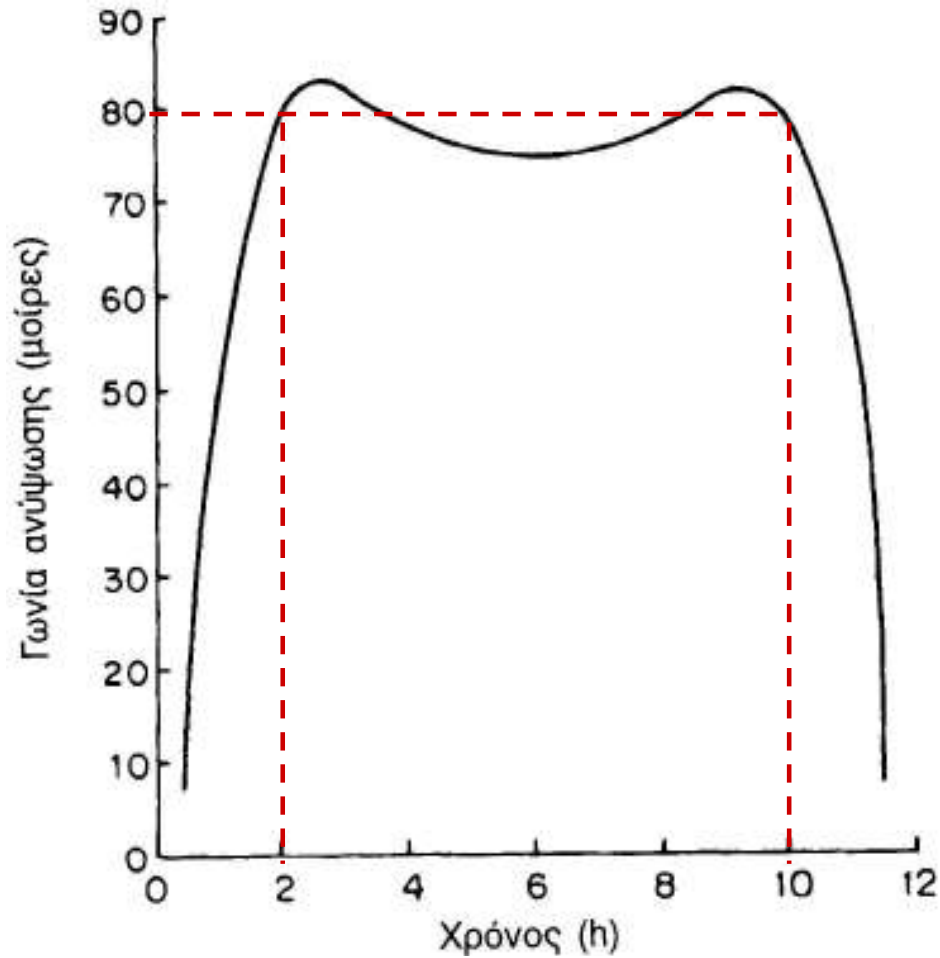
- MOLNIYA
- TUNDRA



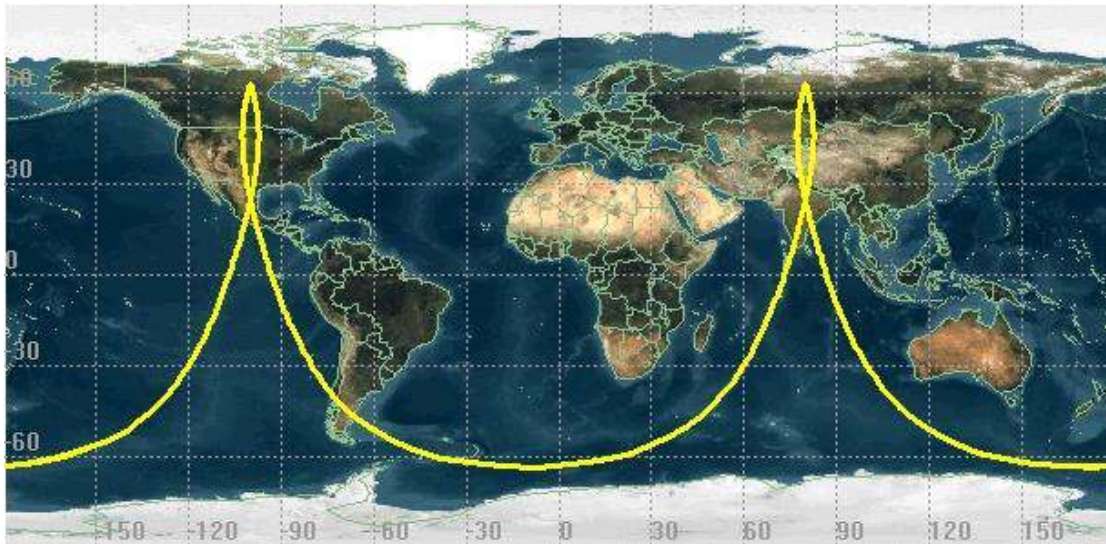
Ζώνες Van Allen

Ελλειπτικές Τροχιές (ΗΕΟ)

MOLNIYA

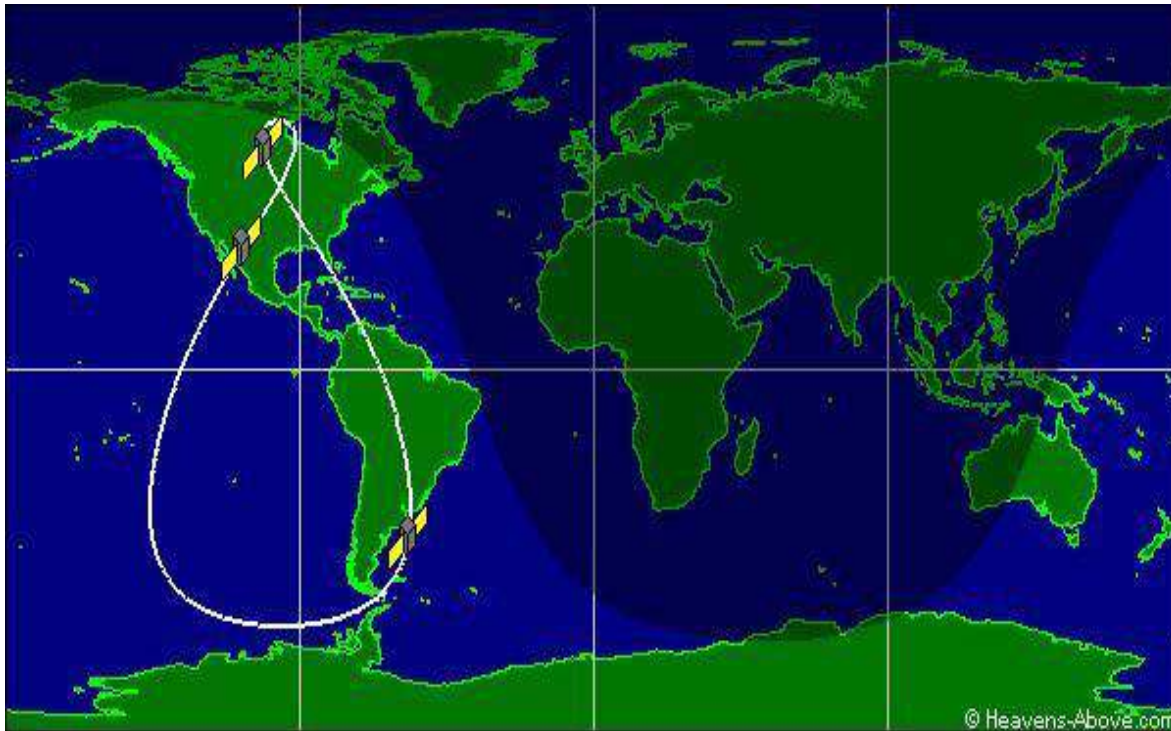


Ελλειπτικές Τροχιές (HEO)



Τροχιές τύπου MOLNIYA	
Περίοδος	12 h
Απαιτούμενοι δορυφόροι	3
Μεγάλος ημιάξονας	26556 km
Έγκλιση	63.4°
Εκκεντρότητα	0.6 έως 0.75
Γωνία Περιγείου	-90°
Ύψος περιγείου ($e = 0.71$)	1250 km
Ύψος απογείου ($e = 0.71$)	39105 km

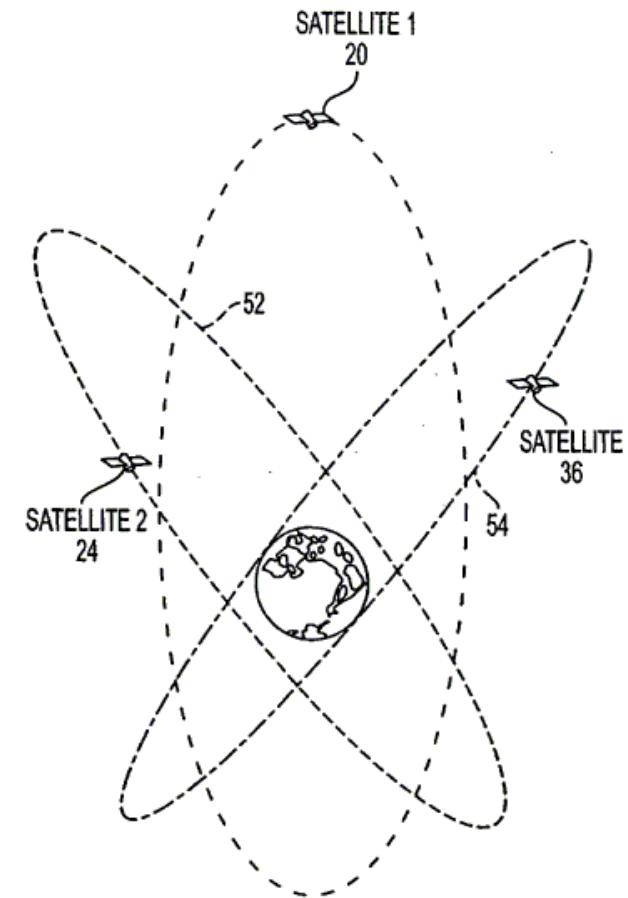
Ελλειπτικές Τροχιές (HEO)



Ίχνος δορυφόρων του δορυφορικού ραδιοφώνου Sirius

Τροχιές τύπου TUNDRA	
Περίοδος	24 h
Απαιτούμενοι δορυφόροι	2
Μεγάλος ημιάξονας	42164 km
Έγκλιση	63.4°
Εκκεντρότητα	0.25 έως 0.4
Ύψος περιγείου ($e = 0.71$)	25231 km
Ύψος απογείου ($e = 0.71$)	46340 km

Ελλειπτικές Τροχιές (HEO)



Τίχνος δορυφόρων του [δορυφορικού ραδιοφώνου Sirius](#)

Ελλειπτικές Τροχιές (ΗΕΟ)

Δορυφόρος στη Θέση S

- ❖ φ : γεωγραφικό πλάτος, $\varphi = T\hat{O}A$
- ❖ λ : γεωγραφικό μήκος (σε σχέση με μεσημβρινό αναφοράς)

$$\lambda = \arcsin[\sin(i)\sin(\omega + \nu)]$$

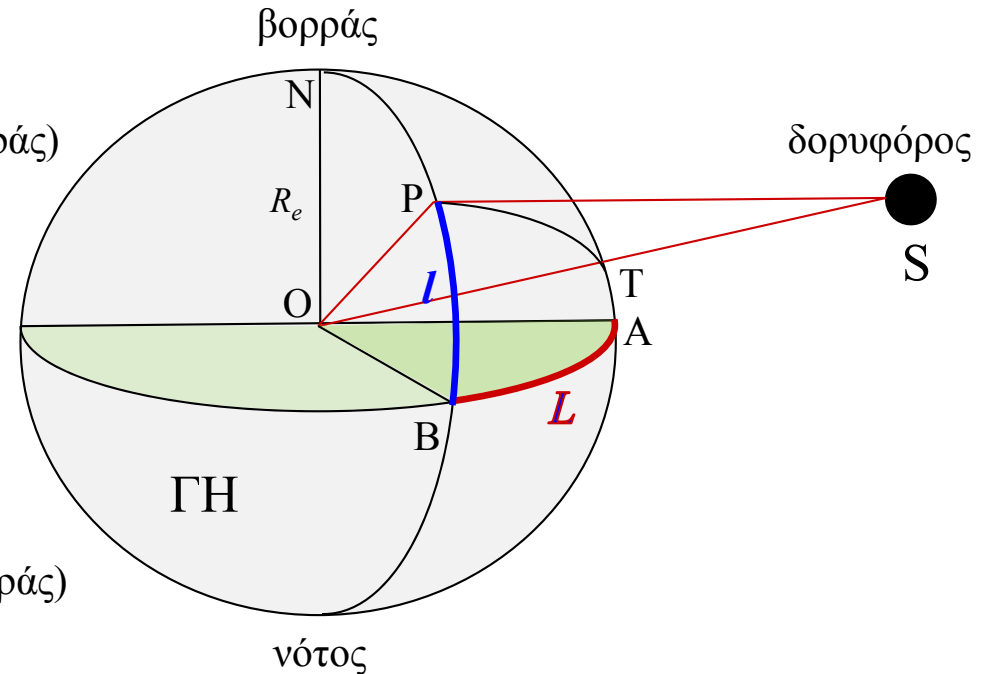
i : έγκλιση

ω : όρισμα περιγείου

ν : αληθής ανωμαλία

Επίγειος Σταθμός στη Θέση P

- ❖ l : γεωγραφικό πλάτος,
- ❖ ψ : γεωγραφικό μήκος (σε σχέση με μεσημβρινό αναφοράς)



νόμος συνημίτονων
στο τρίγωνο (POS)

Απόσταση δορυφόρου από επίγειο σταθμό

$$(PS) = \sqrt{R_e^2 + (OS)^2 - 2(OS)R_e \cos(P\hat{O}T)}$$

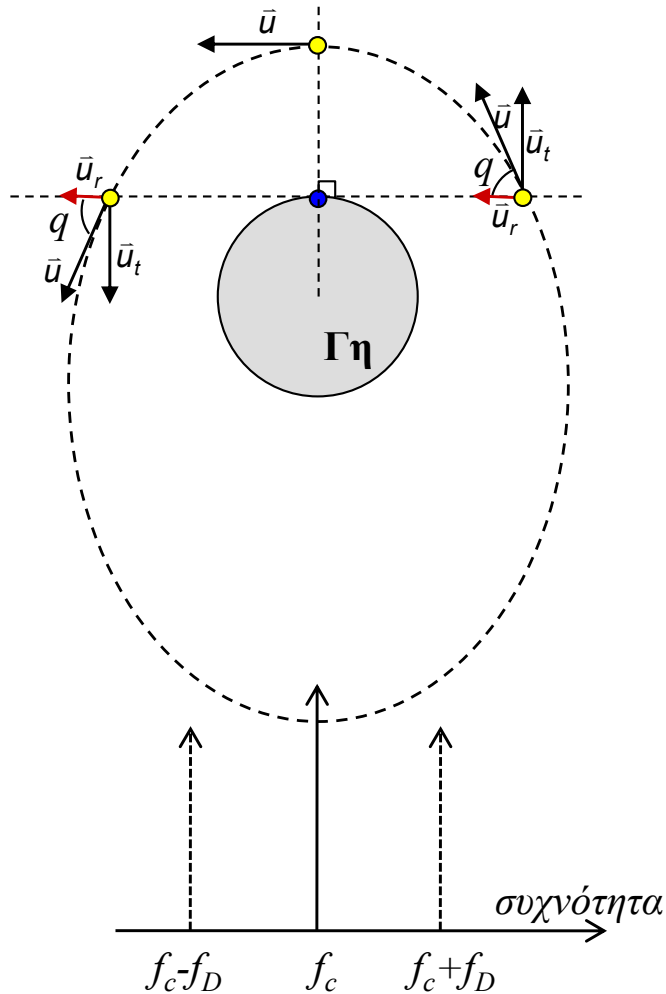
$$\cos(P\hat{O}T) = \cos(\gamma) = \cos(\varphi)\cos(L)\cos(i) + \sin(\varphi)\sin(i)$$

L : σχετικό γεωγραφικό μήκος, $L = \psi - \lambda$

Γωνία Αζιμούθιου
(στο σημείο P)

$$\cos(E) = \frac{(OS)}{(PS)} \sin(\gamma)$$

Ελλειπτικές Τροχιές (ΗΕΟ)



Ολίσθηση συχνότητας: $f_D = f_c \frac{u_r}{c} = f_c \frac{u}{c} \cos(q)$

f_c : η φέρουσα συχνότητα

c : η ταχύτητα του φωτός στο κενό

Ταχύτητα μεταβολής της συχνότητας:

$$\frac{df_D}{dt} = \frac{du_x}{dt} \frac{f_c}{c}$$

$$u_x = \frac{dr}{dt} = \frac{dr}{dq} \frac{dq}{dt} = e \sqrt{\frac{GM}{a(1-e^2)}} \sin(\nu)$$

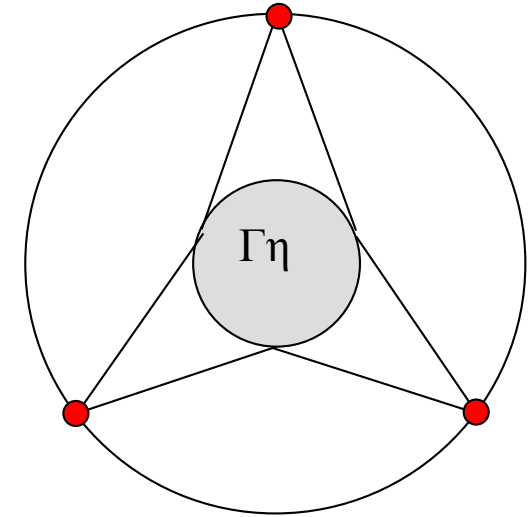
- Για $\nu = 0^\circ$ και 180° , $u_x = 0$
- Για $\nu = 90^\circ$ και 270° , η u_x μεγιστοποιείται
- Αν $e = 0$ (κυκλική τροχιά), $u_r = 0$

Δορυφόρος εκπέμπει σε συχνότητα f_c και επίγειος σταθμός λαμβάνει σε συχνότητα $f_c \pm f_D$, ανάλογα με το αν πλησιάζει ή απομακρύνεται ως προς αυτόν

Γεωστατική Τροχιά (GEO)

Χαρακτηριστικά

- Κυκλική τροχιά ($e = 0$)
- Ίδια περίοδο περιστροφής Γης και δορυφόρου
- Σταθερή γραμμική ταχύτητα και σταθερό ύψος
- Κίνηση δορυφόρου στο επίπεδο του ισημερινού
- Ο δορυφόρος παραμένει μόνιμα πάνω από συγκεκριμένο τόπο



Χαρακτηριστικά γεωστατικής τροχιάς (GEO)	
Μεγάλος ημιάξονας	42164 km
Ταχύτητα δορυφόρου	3075 m/s
Ύψος δορυφόρου	35768 km
Απαιτούμενοι δορυφόροι	3 ($1/120^\circ$)
Κάλυψη	24 h



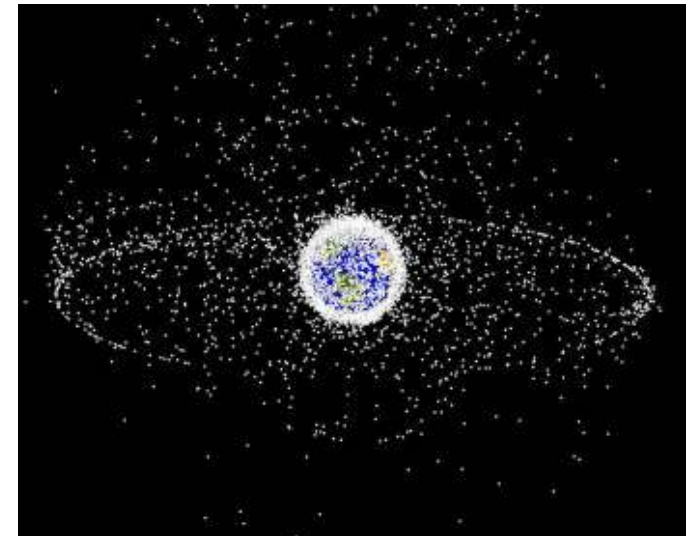
Γεωστατική Τροχιά (GEO)

Πλεονεκτήματα

- Κάλυψη μεγάλης γεωγραφικής έκτασης
- Απλός τρόπος παρακολούθησης του δορυφόρου
- Συνεχής κάλυψη
- Καλής ποιότητας επικοινωνίες

Μειονεκτήματα

- Μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης
- Μεγάλη εξασθένιση
- Αδυναμία κάλυψης μεγάλων γεωγραφικών πλατών
- Υψηλό κόστος εκτόξευσης
- Συνωστισμός στην γεωστατική τροχιά



Γεωστατική Τροχιά (GEO)

Μέγιστη συχνότητα Doppler για κυκλική ισημερινή τροχιά:

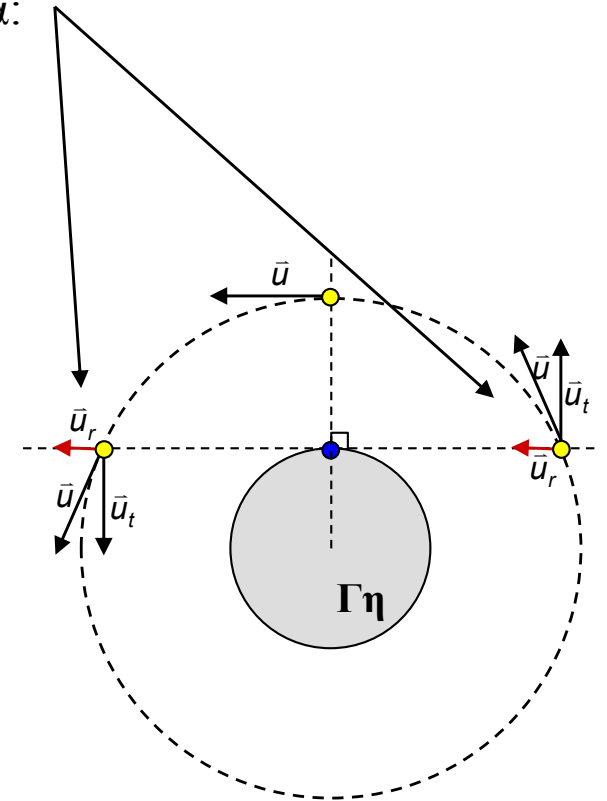
$$f_D = \pm 1.54 \times 10^{-6} m f_c \quad [\text{Hz}]$$

m : αριθμός περιστροφών του δορυφόρου σε σχέση με σταθερό σημείο στη γη ανά 24ωρο

Περίοδος περιστροφής

$$T = \frac{24}{m+1} \quad [\text{h}]$$

π.χ.: για $m = 3$ και $f_c = 6 \text{ GHz}$, $f_D = 18 \text{ kHz}$



Γεωστατική Τροχιά (GEO)

Έλεγχος Ορατότητας

- Η απόσταση του δορυφόρου από το κέντρο της Γης πρέπει να είναι

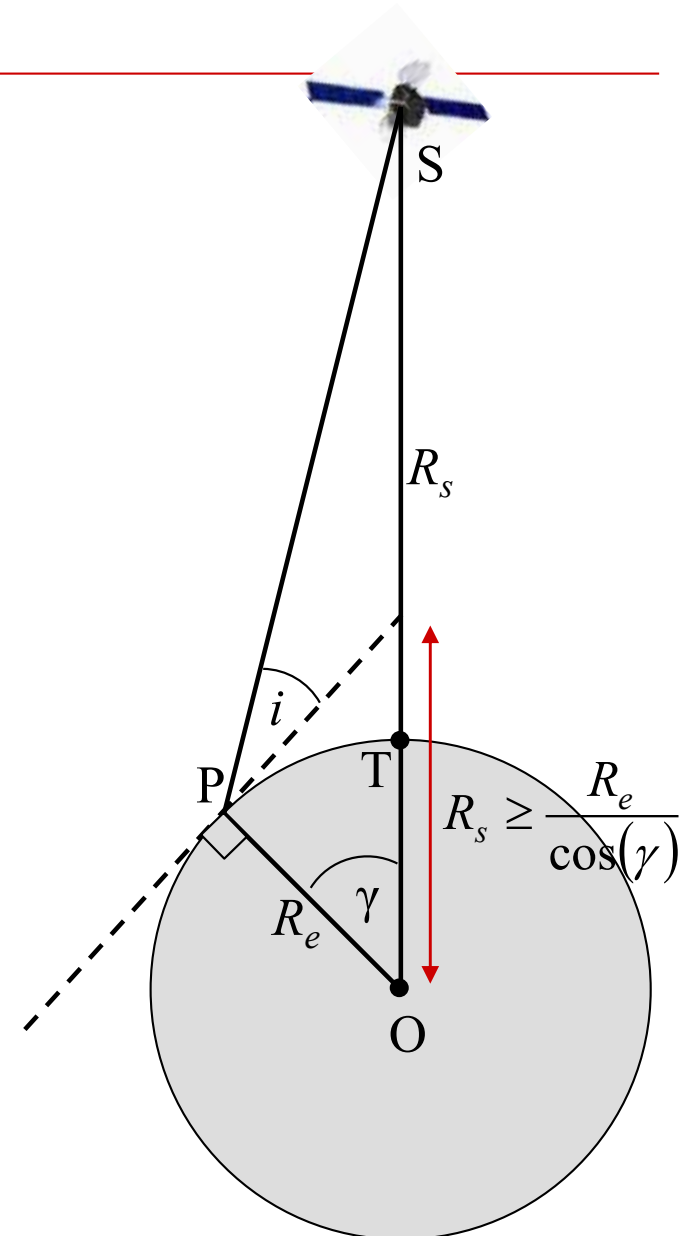
$$R_s \geq \frac{R_e}{\cos(\gamma)}$$

- Το τόξο μεταξύ του υποδορυφορικού σημείου και του επίγειου σταθμού θα πρέπει να είναι

$$\gamma \leq \arccos\left(\frac{R_e}{R_s}\right)$$

- Για δορυφόρους GEO, όπου $R_s = R_e + h_{geo} \approx 42.2$ km, η μέγιστη γωνία είναι $\gamma_{\max} = 81.3^\circ$

$$h_{geo} = 35786 \text{ km}, R_e = 6378 \text{ km}$$



Γεωστατική Τροχιά (GEO)

Γεωστατικός δορυφόρος στη θέση S

- ❖ φ : γεωγραφικό πλάτος, $\varphi = 0^\circ$
- ❖ λ : γεωγραφικό μήκος (σε σχέση με μεσημβρινό αναφοράς)

Επίγειος σταθμός στη θέση P

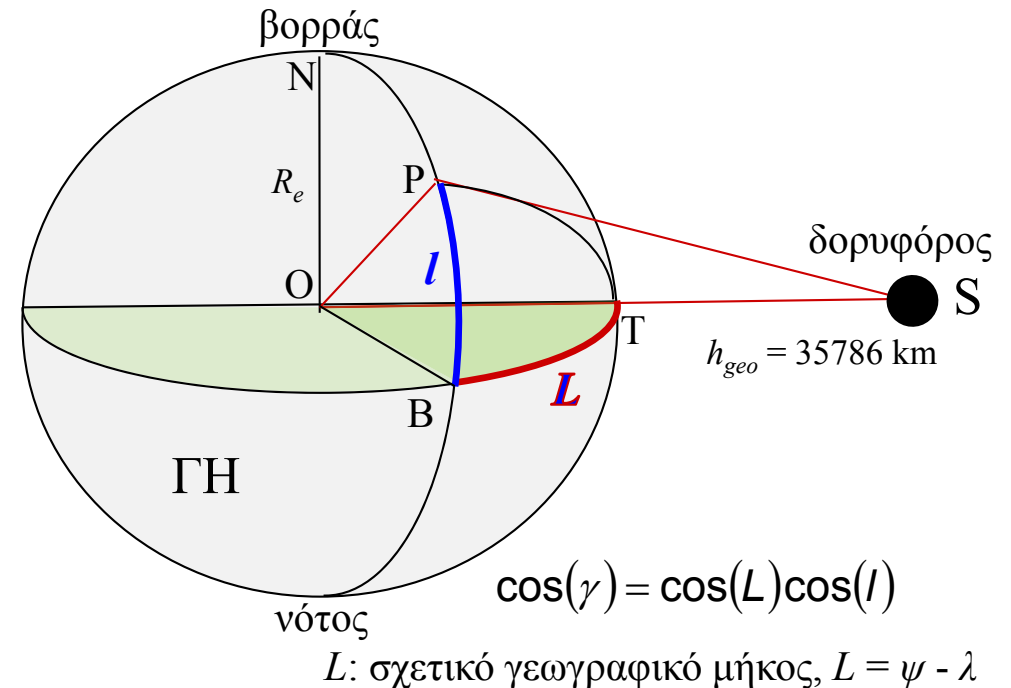
- ❖ l : γεωγραφικό πλάτος
- ❖ ψ : γεωγραφικό μήκος (σε σχέση με μεσημβρινό αναφοράς)

Γωνία ανύψωσης, E :

$$E = \arctan \left\{ \left[\cos(\gamma) - \frac{R_e}{R_e + h_{geo}} \right] \frac{1}{\sqrt{1 - \cos^2(\gamma)}} \right\}$$

Αζιμούθιο, A :

$$\alpha = \arcsin \left\{ \frac{\sin(|L|)}{\sqrt{1 - \cos^2(\gamma)}} \right\} \dashrightarrow$$



Ημισφαίριο του σταθμού	Θέση δορυφόρου σε σχέση με σταθμό	Αζιμούθιο
Βόρειο	Ανατολικά	$A = 180^\circ - \alpha$
Βόρειο	Δυτικά	$A = 180^\circ + \alpha$
Νότιο	Ανατολικά	$A = \alpha$
Νότιο	Δυτικά	$A = 360^\circ - \alpha$

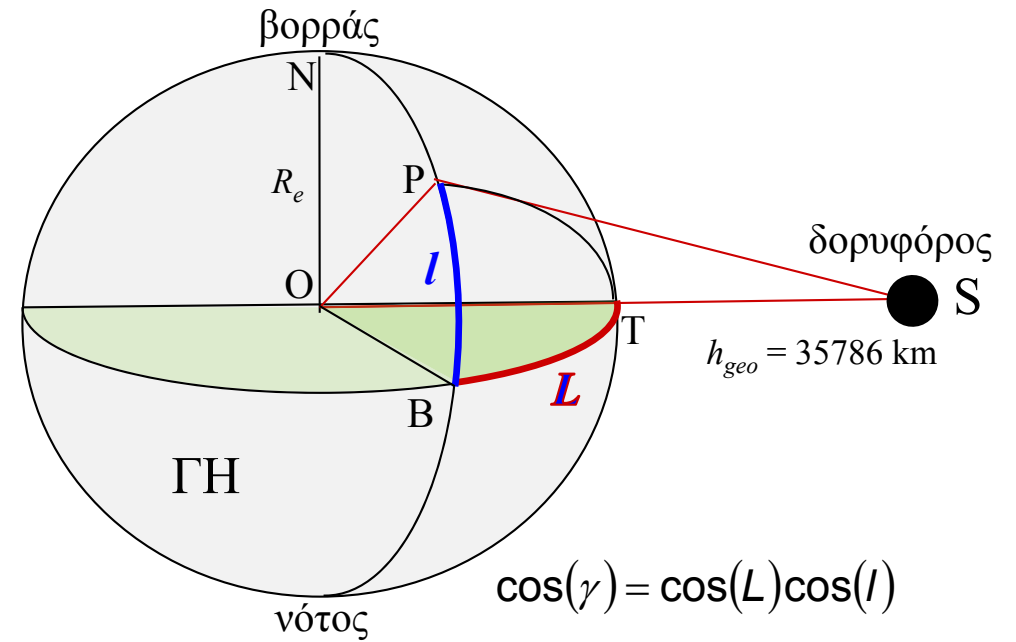
Γεωστατική Τροχιά (GEO)

Γεωστατικός δορυφόρος στη θέση S

- ❖ φ : γεωγραφικό πλάτος, $\varphi = 0^\circ$
- ❖ λ : γεωγραφικό μήκος (σε σχέση με μεσημβρινό αναφοράς)

Επίγειος σταθμός στη θέση P

- ❖ l : γεωγραφικό πλάτος
- ❖ ψ : γεωγραφικό μήκος (σε σχέση με μεσημβρινό αναφοράς)

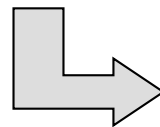


Απόσταση δορυφόρου από επίγειο παρατηρητή (στο σημείο P):

L : σχετικό γεωγραφικό μήκος, $L = \psi - \lambda$

$$(PS) = \sqrt{R_e^2 + h_{geo}^2 - 2R_e h_{geo} \cos(\gamma)}$$

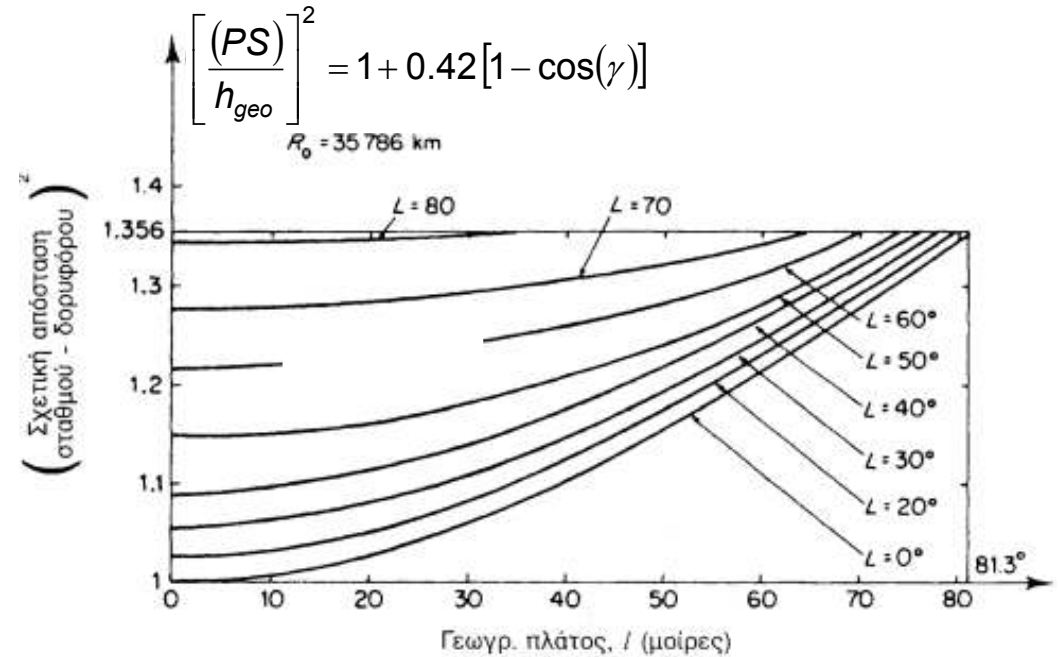
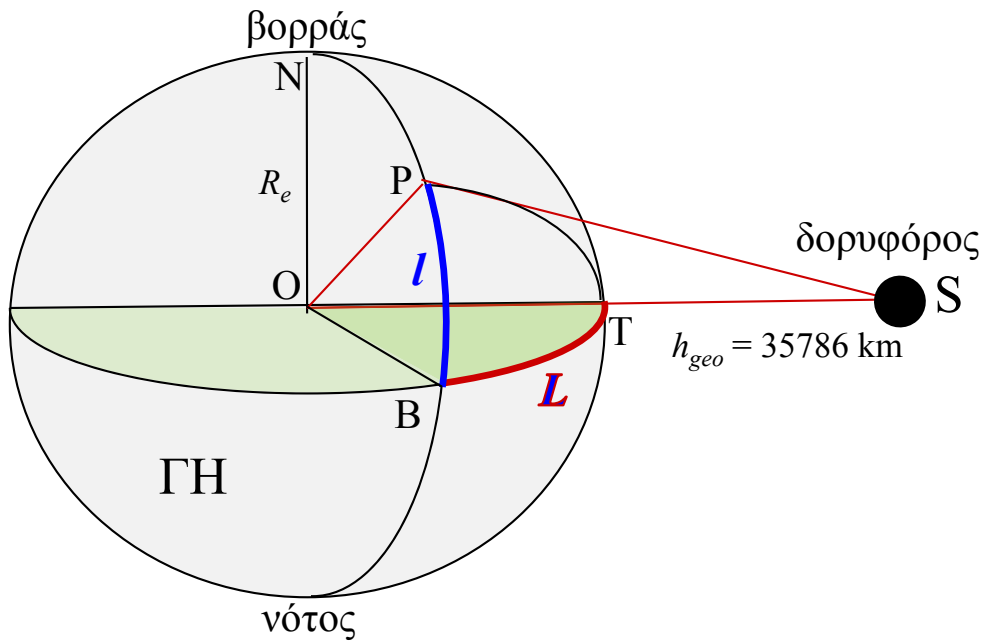
νόμος συνημίτωνων
στο τρίγωνο (POS)



$$\frac{(PS)}{h_{geo}} = \sqrt{1 + 0.42 [1 - \cos(\gamma)]}$$

$$h_{geo} = 35786 \text{ km}, R_e = 6378 \text{ km}$$

Γεωστατική Τροχιά (GEO)



Χρόνος διάδοσης μεταξύ δορυφόρου S και επίγειου σταθμού P: $t = (PS)/c$

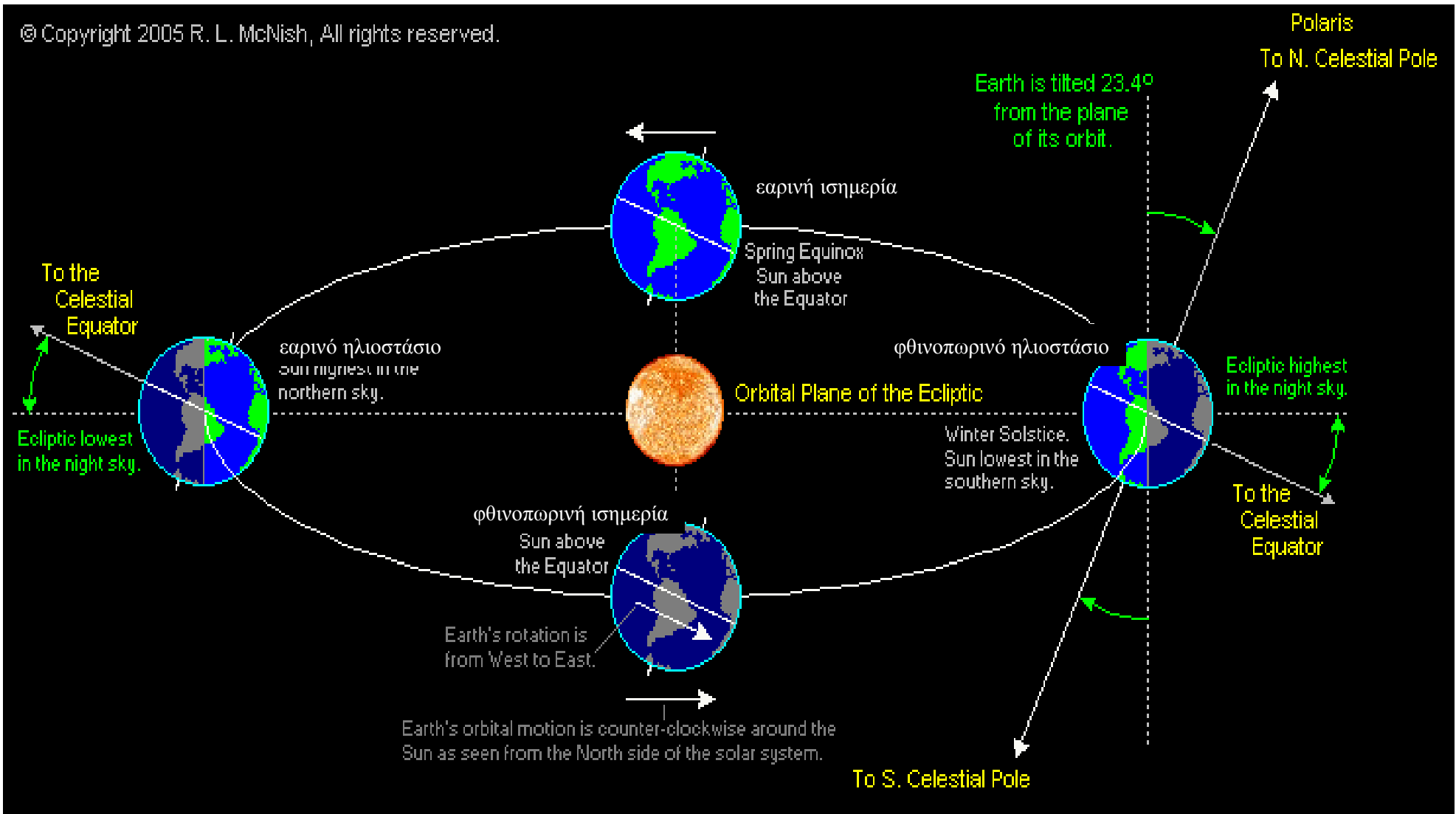
$$t_{\max} = \frac{1}{c} (PS)_{\max} = \frac{1}{c} (PS)_{l=81.3^\circ}^{L=0^\circ} \approx 278 \text{ ms}$$

$$t_{\min} = \frac{1}{c} (PS)_{\min} = \frac{h_{\text{geo}}}{c} \approx 238 \text{ ms}$$

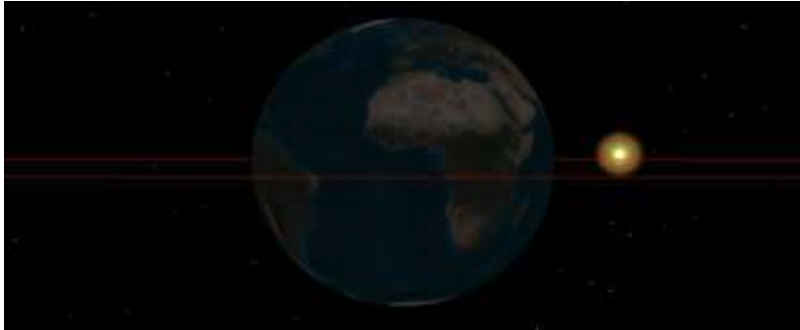
c : η ταχύτητα του φωτός στο κενό, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$

Γεωστατική Τροχιά (GEO)

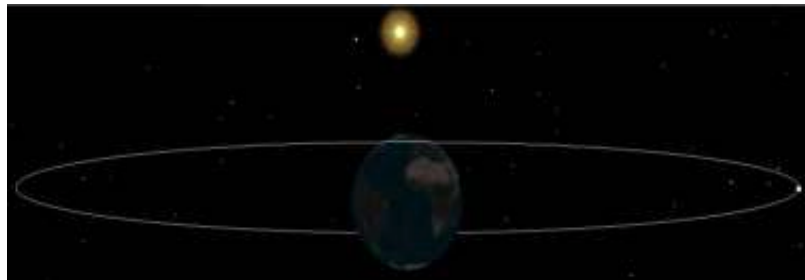
© Copyright 2005 R. L. McNish, All rights reserved.



Γεωστατική Τροχιά (GEO)

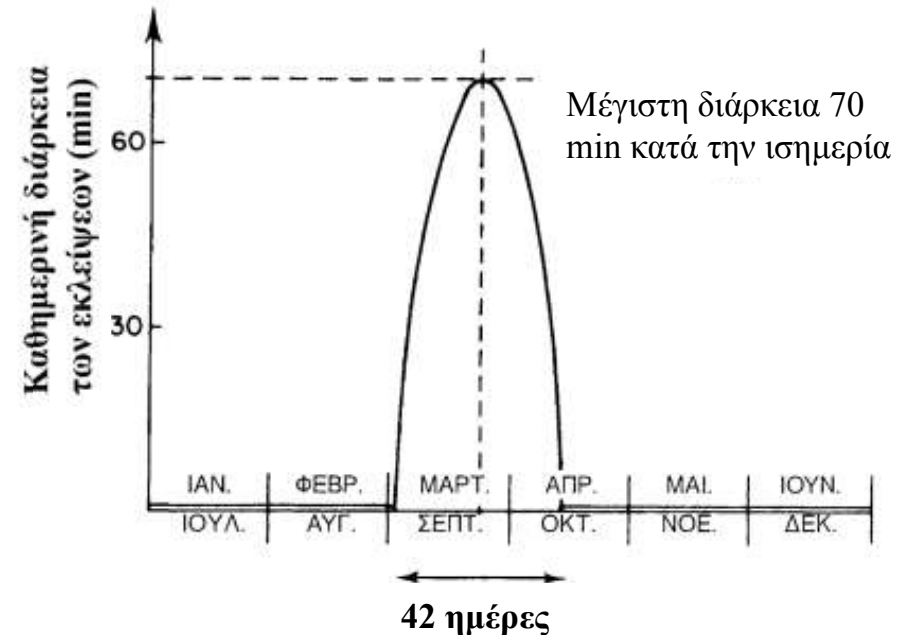
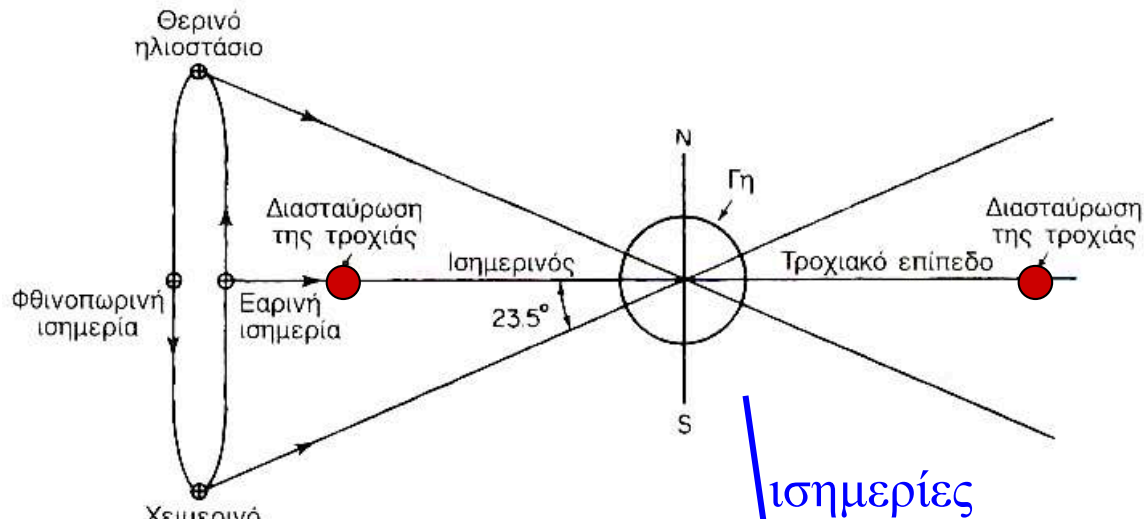


Εαρινή Ισημερία – 21 Μαρτίου

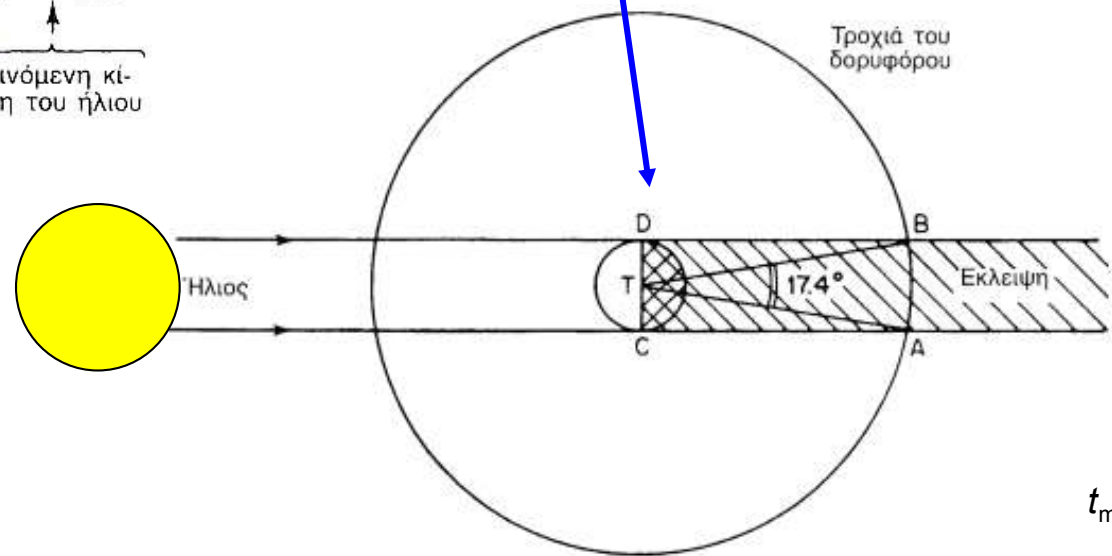


21 Αυγούστου

Γεωστατική Τροχιά (GEO)



ισημερίες



Γωνία σκίασης:

$$2q_{\max} = 2 \arcsin \left(\frac{R_e}{R_e + h_{geo}} \right) = 17.4^\circ$$

$$h_{geo} = 35786 \text{ km}, R_e = 6378 \text{ km}$$

Διάρκεια εκλείψεων:

$$t_{\max} = \frac{17.4^\circ}{360^\circ} \times (23\text{h} \times 60 \text{ min} + 56 \text{ min}) \approx 70 \text{ min}$$

Γεωστατική Τροχιά (GEO)

Προβλήματα προερχόμενες από εκλείψεις Ηλίου και συζυγίες Η-Δ:

- Απαιτούνται φορτισμένες μπαταρίες (Η-Γ-Δ)
- Αύξηση θερμοκρασίας θορύβου στην κεραία (Η-Δ-Γ)
- Θερμικό σοκ στον δορυφόρο (Η-Δ-Γ)

π.χ.: Η-Γ-Δ = Ήλιος-Γη-Δορυφόρος

Τροχιές Χαμηλού Ύψους (LEO)

Πλεονεκτήματα

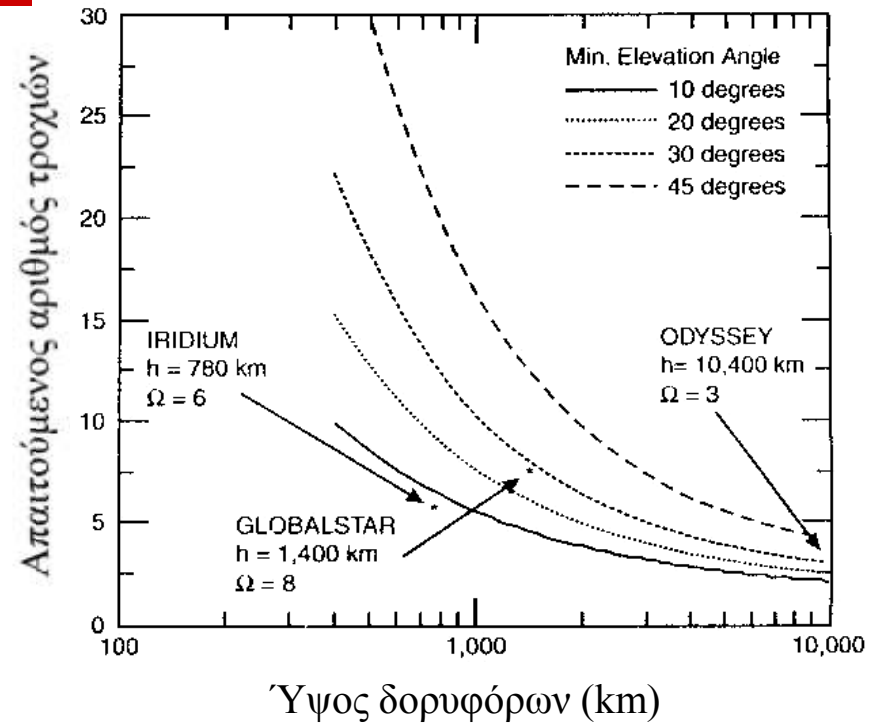
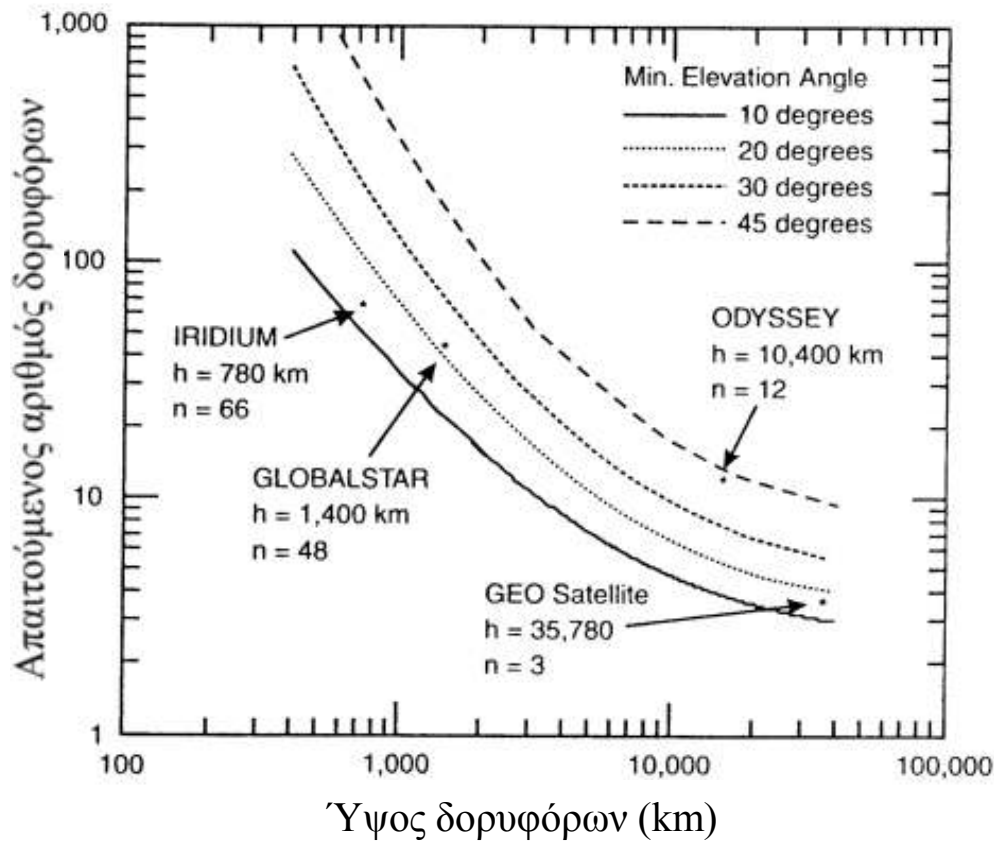
- Μπορούν να παράσχουν κάλυψη σε οποιαδήποτε περιοχή της Γης
- Μικρός χρόνος διάδοσης
- Μικρές απώλειες διάδοσης
- Επίγεια τερματικά με ισχύ εκπομπής 1 watt
- Απλούστερη τεχνολογία σε σχέση με δορυφόρους GEO
- Σχετικά φθηνή λύση για παγκόσμιες τηλεπικοινωνίες



Μειονεκτήματα

- Κυκλώματα εύρεσης της θέσης του δορυφόρου
- Συχνές μεταγωγές
- Υψηλή ολίσθηση συχνότητας λόγω φαινομένου Doppler
- Μικρή περιοχή γεωγραφική κάλυψης ανά δορυφόρο

Τροχιές Χαμηλού Ύψους (LEO)



Τροχιές τύπου LEO	
Τροχιά	Κυκλική
Περίοδος περιστροφής	1.5 h
Ταχύτητα περιστροφής	7.1 km/s
Ύψος	1.5 km
Χρόνος κάλυψης	10 min

Σύγκριση Δορυφόρων Διαφορετικών Τροχιών

	LEO	MEO	GEO	HEO
Κόστος δορυφόρου	Μέγιστο	Ελάχιστο	Μέσο	Μέσο
Χρόνος ζωής δορυφόρου	3-7 y	10-15 y	10-15 y	7 – 10 y
Δυνατότητα τερματικού χειρός	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι
Καθυστέρηση διάδοσης	Μικρή	Μέση	Μεγάλη	Μεγάλη
Εξασθένιση σήματος	Μικρή	Μέση	Μεγάλη	Μεγάλη
Πολυπλοκότητα δικτύου	Υψηλή	Μέση	Μικρή	Μέση
Συχνότητα μεταγωγής	Μεγάλη	Μέση	-	Μικρή

Σύγκριση Δορυφόρων Διαφορετικών Τροχιών

	LEO	MEO	GEO	HEO
Τυπικά συστήματα	Iridium	Odyssey	Immarsat	Molniya
Τροχιά	Κυκλική	Κυκλική	Κυκλική	Ελλειπτική
Αριθμός τροχιών	6	3	1	4
Ύψος	785 km	10.354 km	35786 km	-
Απόγειο	-	-	-	40000 km
Περίγειο	-	-	-	500 km
Περίοδος περιστροφής	1 h 40 min	5 h 59.5 min	24 h	12 h
Βάρος	700 kg	1226 kg	1500 kg	1000 kg
Αριθμός δορυφόρων	66 (11/τροχιά)	12 (4/τροχιά)	3	12 (3/τροχιά)
Ελάχιστη γωνία ανύψωσης	8°	8°	5°	80°
Διάρκεια ορατότητας	10 min	94.5 min	24 h	8 h

Τροχιακές Διαταράξεις

- Ανομοιογενές γήινο βαρυτικό πεδίο
- Βαρυτικό πεδίο Ήλιου και Σελήνης
- Πίεση Ηλιακής ακτινοβολίας
- Αεροδυναμική οπισθέλκουσα
- Ωθηση κινητήρων