



**ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ,
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ και ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ**

**M802 Fundamentals of Satellite
Systems & Subsystems**

Διάλεξη 5

Υποσύστημα προσδιορισμού και ελέγχου
προσανατολισμού Δορυφόρων
(Attitude Determination and Control
Subsystem)

8.11.22

Καθ. Β. Λάππας

Email: valappas@aerospace.uoa.gr



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ**
UNIVERSITY OF PATRAS



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —



Πρόγραμμα

- Εβδομάδα 1: Ιστορία και περιεχόμενο: Ιστορικά στοιχεία της ανάπτυξης του χώρου του διαστήματος, των οργανισμών, της πολιτικής, της οικονομίας του διαστήματος, της χρηματοδότησης, των μελλοντικών αποστολών - μελέτες.
- Εβδομάδα 2: Εισαγωγή στη μεθοδολογία σχεδιασμού ενός διαστημικού συστήματος: απαιτήσεις, προδιαγραφές σχεδιασμού, προϋπολογισμοί συστημάτων. Εισαγωγή στην αρχιτεκτονική διαστημικού συστήματος. Διαστημικοί φορείς.
- Εβδομάδα 3: Διάστημα και διαστημικό περιβάλλον : Ακτινοβολία, κενό, θραύσματα, φόρτιση διαστημικών σκαφών, συμπεριφορά υλικών και απαέρωση.
- Εβδομάδα 4: Διαστημικοί Φορείς, Εξίσωση Tsiolkovsky
- **Εβδομάδα 5/6: Προσδιορισμός και έλεγχος προσανατολισμού I & II**
- Εβδομάδες 7/8: Μηχανική τροχιών: ουράνια μηχανική, τροχιές, σχεδιασμός τροχιάς και χειρισμοί διαστημικών σκαφών
- Εβδομάδες 9-11: Δομή και διαμόρφωση. Ισχύς, προϋπολογισμός ισχύος, ηλιακή συστοιχία και μέγεθος μπαταριών. Επικοινωνίες και προϋπολογισμός σύνδεσης, θερμικός έλεγχος.

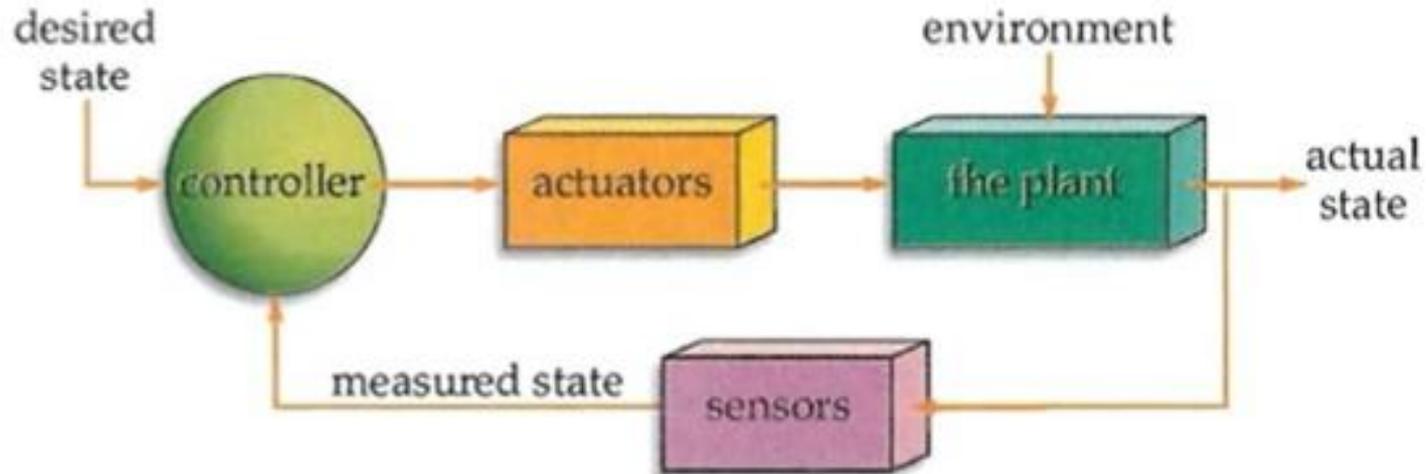
Υποσύστημα προσδιορισμού και ελέγχου προσανατολισμού Δορυφόρων -ΥΠΕΠ (Attitude Determination and Control Subsystem – ADCS)

- Σημαντικό υποσύστημα δορυφόρων, πυραύλων, ρομποτικών οχημάτων
- Απαραίτητο για την ευστάθεια (stability) και κατεύθυνση (pointing)
- Σκεφτείτε την περίπτωση που βγάζετε φωτογραφία με κάμερα (αν δεν είστε σταθεροί η φωτογραφία θα βγει κουνημένη)
- Τα συστήματα ADCS είναι περίπλοκα
 - Σύνθεση software/hardware
 - Χρειάζονται ηλεκτρονικά, μηχανική, αυτόματος έλεγχος, ρομποτική...
- Σύντομη παρουσίαση στοιχείων ADCS
 - Ευστάθεια/συστήματα σταθεροποίησης δορυφόρων
 - Αισθητήρες για προσδιορισμό προσανατολισμού/στάσης δορυφόρου
 - Ενεργοποιητές/ επενεργητής
- ΚΕΦ 12 Understanding Space

Εισαγωγή

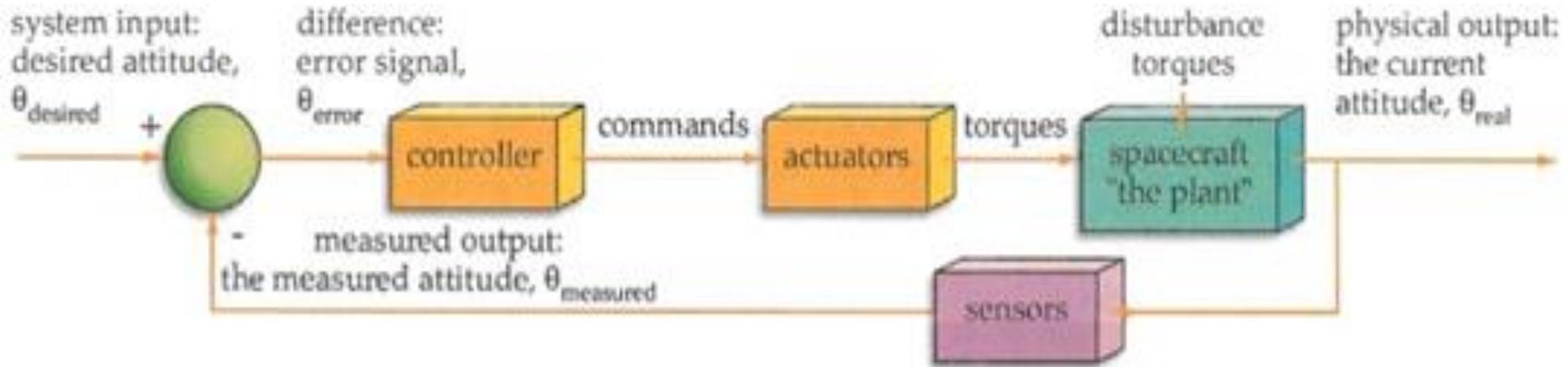
- **Υποσύστημα προσδιορισμού και ελέγχου προσανατολισμού (ΥΠΕΠ/ADCS):** Προσανατολισμός ενός δορυφόρου προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση (pointing), με ταυτόχρονο προσδιορισμό στάσης (γωνίας) κατά την διάρκεια μιας αποστολής και υπό την επιρροή εξωτερικών διαταραχών
- Πρέπει να προσδιορίζουμε την στάση (attitude) ενός δορυφόρου (determination) και μετά να τον κατευθύνουμε (pointing) χρησιμοποιώντας ενεργοποιητές (actuators) προς κάποιον στόχο με ελεγχόμενο τρόπο (control)
- Ταυτόχρονα πρέπει να διατηρήσουμε την ευστάθεια (stability) του δορυφόρου στις όποιες διαταραχές ασκούνται από εξωτερικούς παράγοντες
- Ερωτήματα:
 - Πως σταθεροποιούμε ένα κινούμενο σώμα (πχ αεροσκάφος);
 - Τι ενεργοποιητές χρησιμοποιούμε σε αεροσκάφη και δορυφόρους
 - Πως ελέγχουμε τους ενεργοποιητές, αισθητήρες, κίνηση δορυφόρου;

Σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου



Σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου, κύρια στοιχεία: *Feedback* - ανάδραση, ελεγκτής ή κατευθυντής (*controller*), επενεργητής ή ενεργοποιητής (*actuator*), *plant* = σύστημα, διαταραχή (*disturbance*), μέτρηση (*measured state*), επιθυμητή κατάσταση ή μεταβλητή (*desired state*), σφάλμα (*error*), ελεγχόμενη μεταβλητή/έξοδος (*actual state*)

Υποσύστημα προσδιορισμού και ελέγχου προσανατολισμού Δορυφόρων



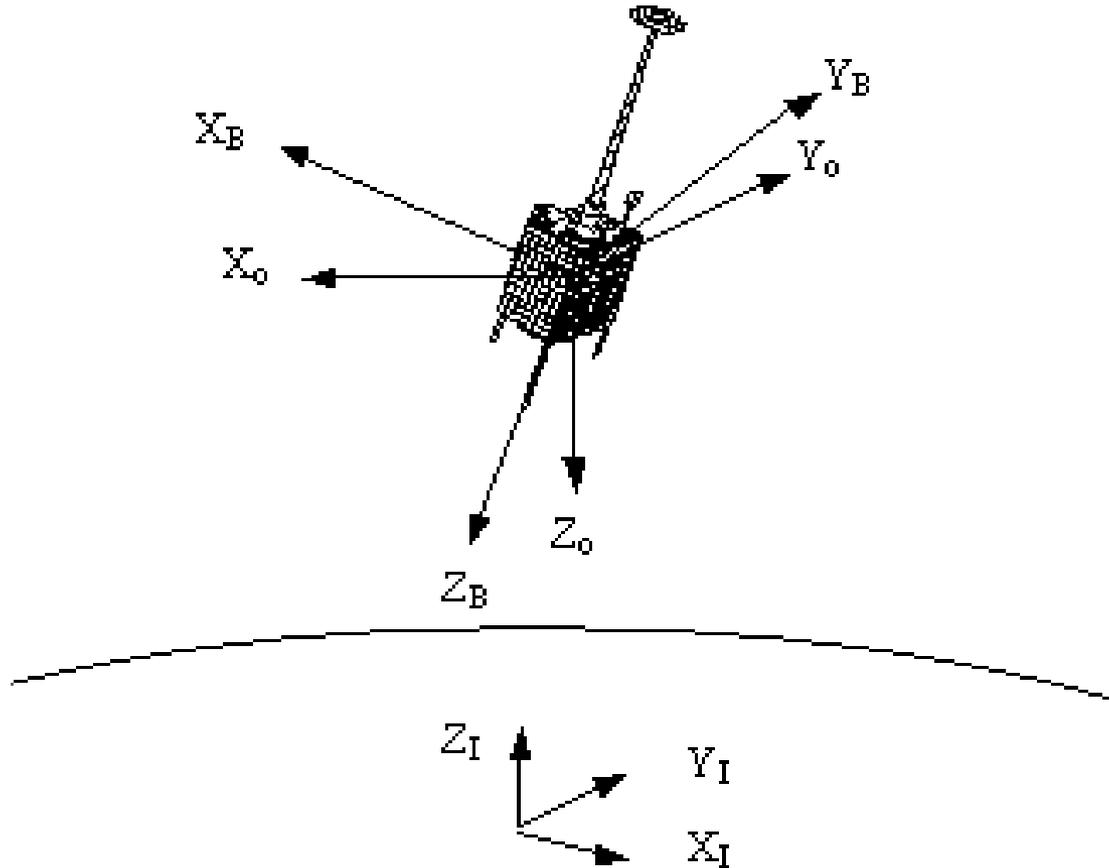
Το Υποσύστημα προσδιορισμού και ελέγχου προσανατολισμού Δορυφόρων - ΥΠΕΠ (Attitude Determination and Control Subsystem – ADCS) περιλαμβάνει ως σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου τα εξής κύρια στοιχεία: ελεγκτής ή κατευθυντής (controller), επενεργητής ή ενεργοποιητής (actuator), Δορυφόρο (plant/σύστημα), αισθητήρες (sensors) που λειτουργούν ως ένα **αυτόματο σύστημα ελέγχου** που διατηρεί ή μεταβάλλει τον προσανατολισμό (attitude) του δορυφόρου ανάλογα με τις προδιαγραφές/ανάγκες της αποστολής

Πλαίσια Αναφοράς/Συστήματα Συντεταγμένων

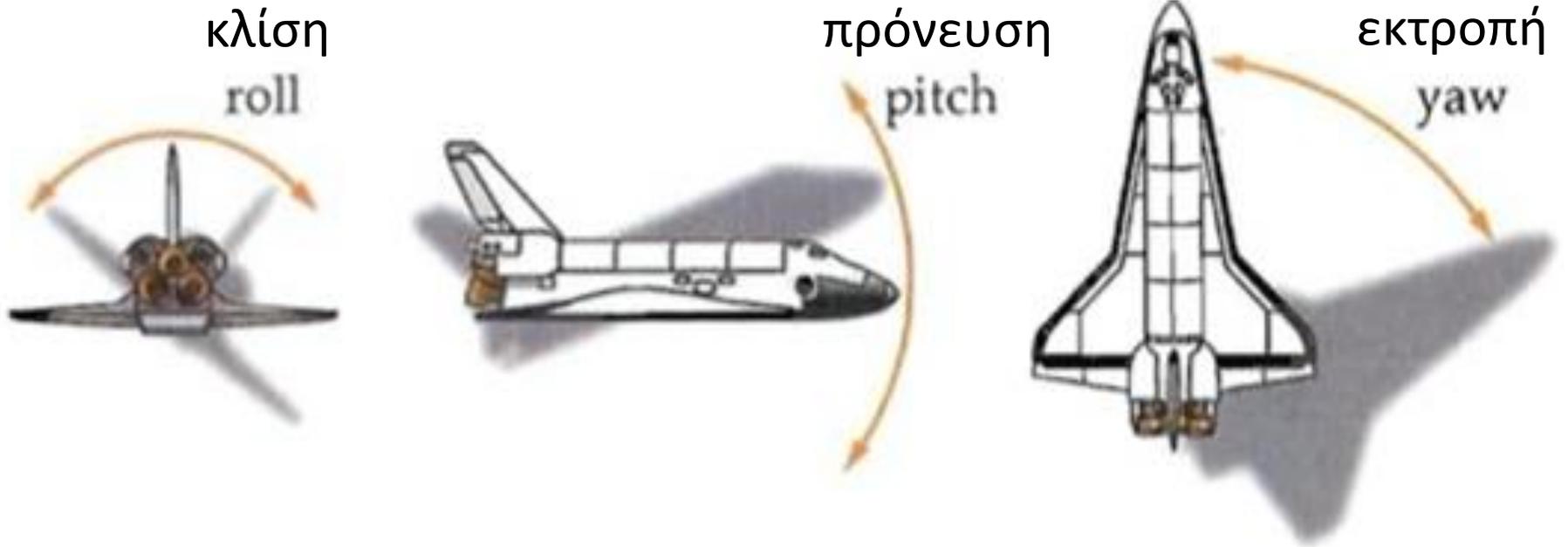
Reference Frames

- i. Αδρανειακό Πλαίσιο αναφοράς (inertial reference frame): η αρχή του πλαισίου X_1, Y_1, Z_1 είναι το κέντρο της Γης. Το Z_1 είναι στην ίδια διεύθυνση με τον Βόρειο Πόλο, ο άξονας X_1 έχει την διεύθυνση προς την εαρινή ισημερία (vernal equinox) και ο Y_1 είναι κάθετος στους δύο προαναφερθέντες άξονες. Το χρησιμοποιούμε για να βρίσκουμε το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του δορυφόρου σε τροχιά
- ii. Πλαίσιο Σώματος ή σωματόδετο πλαίσιο (body frame): Η αρχή του πλαισίου είναι το κέντρο μάζας του δορυφόρου. Το πλαίσιο είναι σταθερό πάνω στο σώμα του δορυφόρου και το χρησιμοποιούμε για να βρίσκουμε τον προσανατολισμό του σε σχέση με άλλα πλαίσια (π.χ. τροχιακό)

Πλαίσια Αναφοράς/Συστήματα Συντεταγμένων Reference Frames



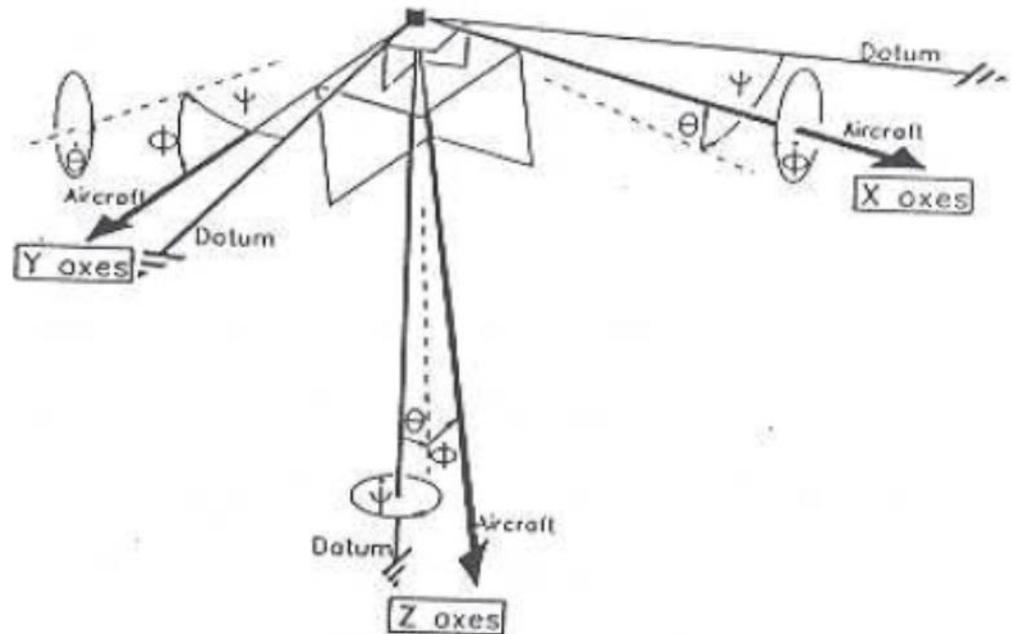
Γωνίες Προσανατολισμού/Euler



- Γωνίες Euler ή περιστροφής ενός διαστημικού σκάφους, που περιγράφουν την κατεύθυνση/κατάσταση του σκάφους roll (κλίση), pitch (πρόνευση) και yaw (εκτροπή)

Γωνίες Προσανατολισμού/Euler - Ορολογίες

- So far we have use a body-fixed frame of reference and an inertial frame of reference. But there is another system in common use: *roll*, *pitch* and *yaw* where:
 - *roll axis* is in the orbit plane along the direction of motion;
 - *pitch axis* is perpendicular to the orbit plane (RH set);
 - *yaw axis* is the local vertical.
- The *Euler angles* (ϕ , θ , ψ) are measured about the *roll*, *pitch* and *yaw* axes, which are labeled (X, Y, Z) or (1, 2, 3).



Τύποι Σταθεροποίησης Δορυφόρων (Stabilization/Attitude Control Types)

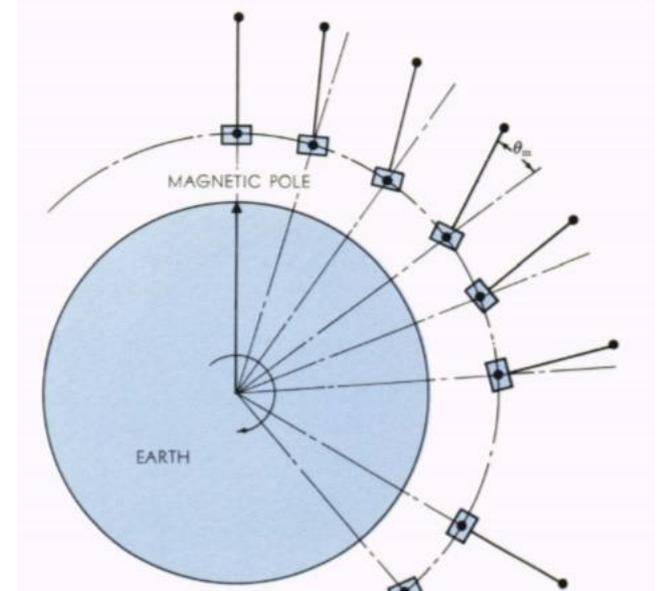
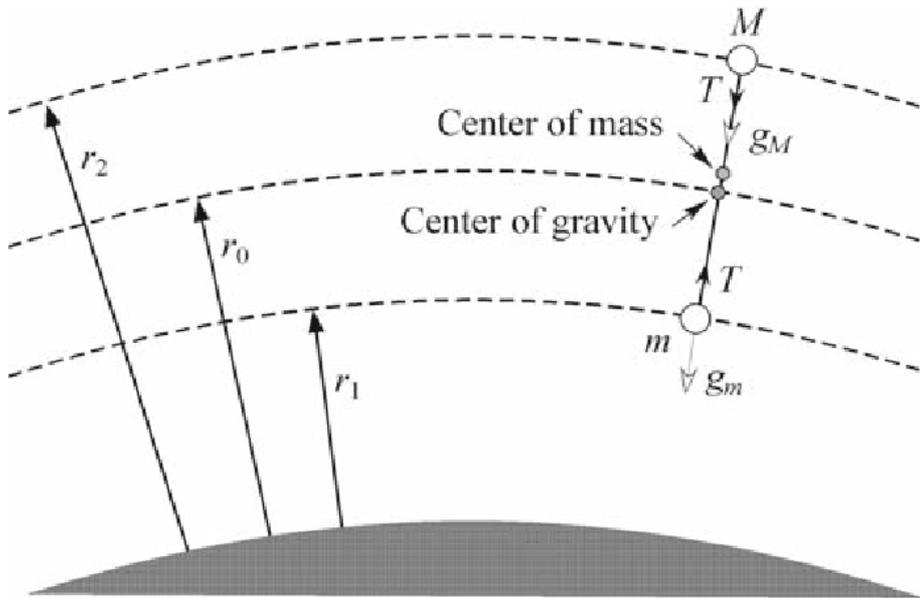
- Τα παθητικά συστήματα βασίζονται στη διατήρηση της ευστάθειας της αρχικής κατάστασης του δορυφόρου. Για τη σταθεροποίηση του δορυφόρου εφαρμόζονται τεχνικές που στηρίζονται στην ευθυγράμμιση ως προς κάποιο πεδίο και οι κυριότερες εξ αυτών είναι:
 - η σταθεροποίηση μέσω της βαθμίδας βαρύτητας (gravity gradient stabilization)
 - η σταθεροποίηση μέσω του μαγνητικού πεδίου (magnetic field stabilization)
- Καθώς επίσης και τεχνικές που εκμεταλλεύονται την «ακαμψία» που εμφανίζει ένα στρεφόμενο σώμα-γυροσκοπική ευστάθεια. Πρόκειται για μεθόδους:
 - σταθεροποίησης μέσω ιδιοπεριστροφής (spin stabilization)
 - σταθεροποίησης μέσω διπλής ιδιοπεριστροφής (dual spin stabilization)
- Σε ένα ενεργητικά σταθεροποιούμενο σκάφος ο προσανατολισμός ελέγχεται και στους τρεις άξονες (3-axis stabilization) μέσω κλειστού βρόχου.

Διαταραχές/παρεμβολές

- Στην απαίτηση για διατήρηση της συμπεριφοράς του δορυφόρου αντιστρατεύονται τόσο οι ίδιες οι εσωτερικές διαταραχές που εισάγονται από τις επιταχύνσεις επιμέρους τμημάτων, όσο και οι παρεμβολές που δέχεται από το περιβάλλον όπως είναι η **βαρύτητα της Γης, η αεροδυναμική αντίσταση, τα μαγνητικά πεδία, ο ηλιακός άνεμος κ.α.**
- Καθίσταται λοιπόν αναγκαίο, μέσω κάποιας παθητικής η ενεργητικής μεθόδου να επιτυγχάνεται η διαρκής σταθεροποίηση του δορυφόρου.
- Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε (ποσοτικοποιήσουμε) τι διαταραχές/παρεμβολές ασκούνται στον δορυφόρο
- Πόσο σημαντικές είναι οι εξωτερικές διαταραχές (διαστημικό περιβάλλον;)

Βαθμίδα βαρύτητας (Gravity Gradient)

- Η σταθεροποίηση μέσω της βαθμίδας βαρύτητας συντελείτε όταν έχουμε ένα ζεύγος μαζών που ενώνονται με ένα λεπτό νήμα ή δοκό και αντιδρά με το βαρυτικό πεδίο της Γης ώστε να συμπεριφέρεται ως εκκρεμές.
- Η ροπή που δημιουργείται από την απόσταση των δύο μαζών - εξαιτίας των διαφορετικών δυνάμεων που ασκούνται - προκαλεί διαταραχή γύρω από το κέντρο της μάζας του δορυφόρου



$$N_{GG} = \frac{3\mu}{2R_e^3} \left[I_{zz} - \frac{I_{xx} + I_{yy}}{2} \right] (\mathbf{z}_0 \cdot \mathbf{z})(\mathbf{z}_0 \times \mathbf{z})$$

Βαθμίδα βαρύτητας (Gravity Gradient)

$$\mathbf{N}_{\text{GG}} = \frac{3\mu}{2R_e^3} \left[I_{zz} - \frac{I_{xx} + I_{yy}}{2} \right] (\mathbf{z}_0 \cdot \mathbf{z})(\mathbf{z}_0 \times \mathbf{z})$$

μ is Earth's gravitational constant ($3.986 \times 10^{14} \text{ m}^3\text{s}^{-2}$)

I_{xx} is the spacecraft's moment of Inertia about the x-axis

I_{yy} is the spacecraft's moment of Inertia about the y-axis

I_{zz} is the spacecraft's moment of Inertia about the z-axis

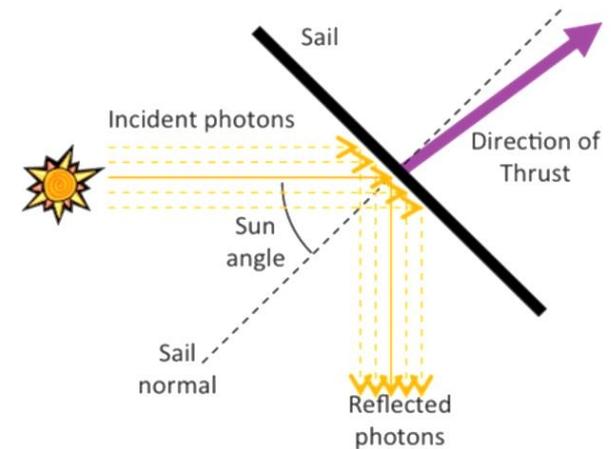
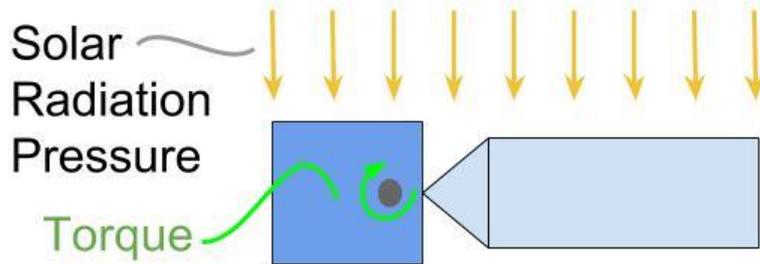
R_e is the spacecraft orbit radius (700km)

$\mathbf{z}_0 = [A_{13} \ A_{23} \ A_{33}]^T$ is the nadir unit vector in body coordinates

\mathbf{z} is the principal body Z-axis unit vector

Ηλιακή πίεση ακτινοβολίας Solar Radiation Pressure

- Η ροπή που δημιουργείται από την διαφορά θέσης στον δορυφόρο του κέντρου πίεσης και κέντρου μάζας.
- Η Ηλιακή ακτινοβολία αντανακλάται από επιφάνειες του δορυφόρου και προκαλεί ροπές γύρω από το κέντρο μάζας του δορυφόρου.



- Ορίζεται ως:

$$N_{sp} = F(C_{ps} - C_g)$$

Όπου,

$$F = \frac{F_s}{c} A_s (1 + q) \cos(i)$$

Ηλιακή πίεση ακτινοβολίας Solar Radiation Pressure

F_s is the average solar constant (1358 Wm^{-2})

c is the speed of light ($3.0 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$)

C_{ps} is the centre of solar pressure vector

C_g is the centre of gravity

A_s is the spacecraft's surface area projected towards Sun

i is the sun incidence angle

q is the reflectivity/transparency factor

For the C_{ps} - C_g term, an estimated value of 0.1 m is used and for reflectivity q a value of 0.6 is typical of small spacecraft. The cross sectional area of the SSTL Microsatellite bus is 0.129 m^2 .

Αεροδυναμική Τριβή - Διαταραχή

Aerodynamic Disturbance

- Σε χαμηλές γήινες τροχιές (LEO < 2000 km) υπάρχουν ακόμα μέρη της ατμόσφαιρας (υπόλειμμα).
- Η αεροδυναμική διαταραχή N_A είναι ανάλογη της εγκάρσιας επιφάνειας διατομής και της ατμοσφαιρικής πυκνότητας ρ

$$N_A = \frac{1}{2}(\rho C_D A_p V^2)(C_{pa} - C_g)$$

Όπου,

ρ is the atmospheric density (kgm^{-3})

C_D is the drag coefficient

A_p is the spacecraft projected area (m^2)

V is the spacecraft velocity (ms^{-1})

C_{pa} is the centre of aerodynamic pressure of the spacecraft

C_g is the centre of gravity

Παράδειγμα - Αεροδυναμική Τριβή - Διαταραχή Aerodynamic Disturbance

- Υπολογίζουμε την διαταραχή αεροδυναμικής τριβής για έναν μικρο-δορυφόρο σε τροχιά 700 km με εμβαδό διατομής 0.129 τετ. μέτρα

$$V = \left(\frac{\mu}{r}\right)^{\frac{1}{2}} = 7452 \text{ms}^{-1}$$

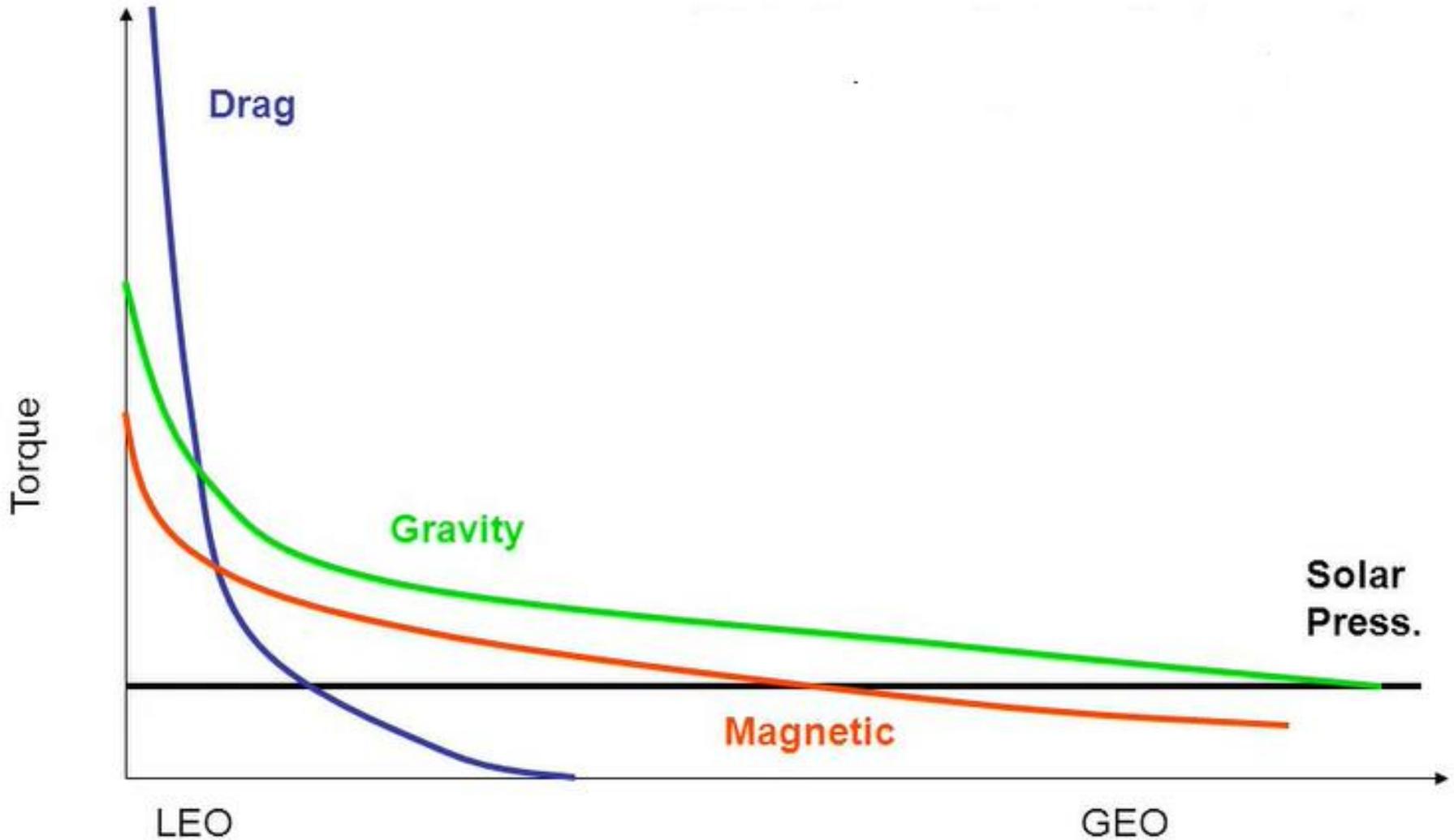
Όπου,

μ είναι η βαρυτική παράμετρος της Γης

r είναι η ακτίνα τροχιάς

Από την τροχιά των 700 km βρίσκουμε τον μέσω όρο της ατμοσφαιρικής πυκνότητας $\rho_{\text{ave}} = 10^{-14} \text{kgm}^{-3}$. Ο συντελεστής οπισθέλκουσας (αντίστασης) είναι $C_D = 2.0$ και η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής είναι 0.129m^2 . Η ροπή διαταραχής που δημιουργείται είναι της τάξης 10^{-7}Nm .

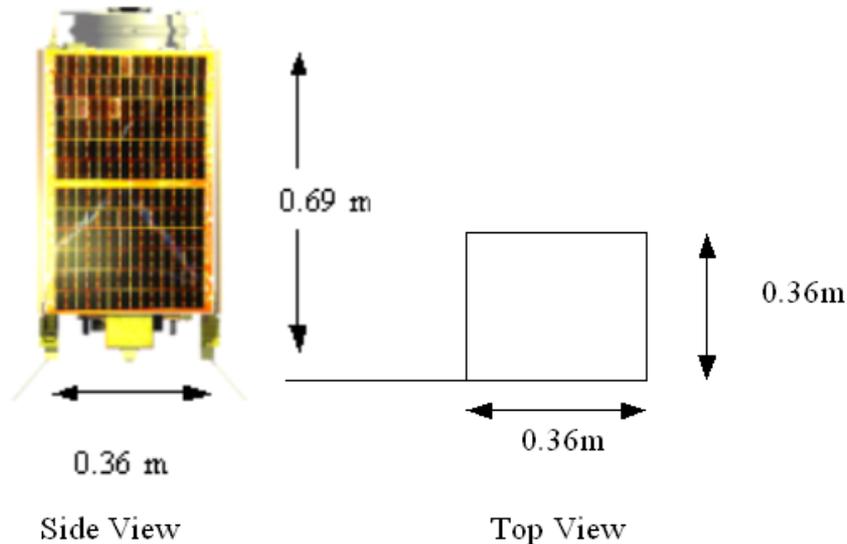
Διαταραχές – Τροχιακό Ύψος





Άσκηση

- Για τον παρακάτω μικρο-δορυφόρο, υπολογίστε τις εξωτερικές διαταραχές. Τι τάξη μεγέθους ροπή πρέπει να έχει ο ενεργοποιητής του δορυφόρου για να αντισταθμίσει τις εξωτερικές διαταραχές;



μ	$3.9 \times 10^{14} \text{ m}^3\text{s}^{-2}$
r	700 km
C_D	2
ρ_{ave}	10^{-14} gm^{-3}
$C_{pa}-C_g$	0.1 m

Table 1

Προσδιορισμός Προσανατολισμού (στάσης ή θέσης) Attitude Determination

- Πρέπει να γνωρίζουμε που είμαστε (στάση/θέση) ως προς το κέντρο μάζας του δορυφόρου αλλά και πόσο γρήγορα περιστρέφεται ο δορυφόρος
- Είναι απαραίτητο να ελέγξουμε/κινήσουμε (control/actuate) τον δορυφόρο προς μια κατεύθυνση/φορά
- Χρειαζόμαστε αισθητήρες ανάλογα με την ακρίβεια κατεύθυνσης (pointing - deg) και ευστάθεια (stability - deg/s) που απαιτεί μία διαστημική αποστολή
- Η ακρίβεια κατεύθυνσης (pointing - deg) και ευστάθεια (stability - deg/s) εξαρτάται από τα διαστημικά όργανα του δορυφόρου (π.χ. αισθητήρας υψηλής ευκρίνειας)
- Η επιλογή αισθητήρων είναι εξαρτώμενη με το κόστος και την μάζα διαθέσιμη στον δορυφόρο/διαστημική αποστολή.



Αισθητήρες

Προσδιορισμός Προσανατολισμού/ Attitude Determination

- Τα σήματα εισαγωγής στο σύστημα ελέγχου του δορυφόρου προέρχονται από μετρήσεις προσανατολισμού και εκτελούνται από τους διάφορους αισθητήρες.
- Πρόκειται για πακέτα πληροφοριών -συνήθως τρεις Euler γωνιές- που συσχετίζουν τους άξονες του δορυφόρου με κάποια στάθμη αναφοράς και εκτελούν συγκρίσεις ή δίνουν απόλυτες τιμές σε αλληλοσυμπληρούμενη βάση.
- Οι αισθητήρες από τους οποίους λαμβάνονται οι απόλυτες τιμές προσανατολισμού συνήθως λειτουργούν αναγνωρίζοντας τη διεύθυνση κάποιου διανύσματος και οι κυριότεροι εξ αυτών είναι:
 - Αισθητήρες ανίχνευσης διεύθυνσης του Ήλιου (Sun sensors)
 - Αισθητήρες ανίχνευσης διεύθυνσης της Γής (Earth sensors)
 - Αισθητήρες ανίχνευσης διεύθυνσης Άστρων (Star sensors)
 - Μαγνητόμετρα (magnetometers)
 - Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα (GPS)



Αισθητήρες - Γυροσκόπια

Προσδιορισμός Προσανατολισμού/ Attitude Determination

- Ενώ οι αισθητήρες που δίδουν τις σχετικές μετρήσεις προσανατολισμού, στηρίζονται στην μεταβολή κάποιου μεγέθους και για την λειτουργία τους (συνεχής) απαιτείται τακτική βαθμονόμηση (calibration) μέσω των απόλυτων αισθητήρων.
- Την καρδιά των διαφορικών αισθητήρων αποτελούν τα γυροσκόπια τα οποία στην κλασσική τους έκδοση φέρουν στρεφόμενη μάζα και λειτουργούν με βάση την Αρχή Διατήρησης της Στροφορμής.
- Τα γυροσκόπια μαζί με τα σχετικά ηλεκτρονικά και το λογισμικό ανάλυσης ενσωματώνονται σε ολοκληρωμένα συστήματα μέτρησης για τρεις άξονες τα γνωστά IMUs (Inertial Measurement Unit/ Αδρανειακή μονάδα μέτρησης).



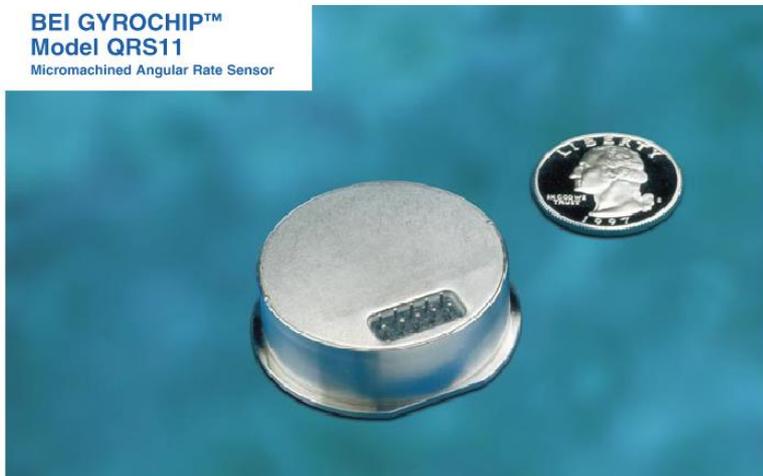
Άσκηση

- Να μελετήσετε το φυσικό φαινόμενο, λειτουργία και τις εφαρμογές των γυροσκοπίων και να εξηγήσετε:
 - Πως λειτουργεί το γυροσκόπιο και τι μετρήσεις δίνει και πώς; Ποιες εξισώσεις περιγράφουν την λειτουργία του αισθητήρα
 - Τι τύποι γυροσκοπίων υπάρχουν;
 - Ποια είναι τα βασικότερα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα του γυροσκοπίου
 - Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε γυροσκόπια ως τον μοναδικό αισθητήρα σε ένα ρομποτικό ή διαστημικό όχημα;

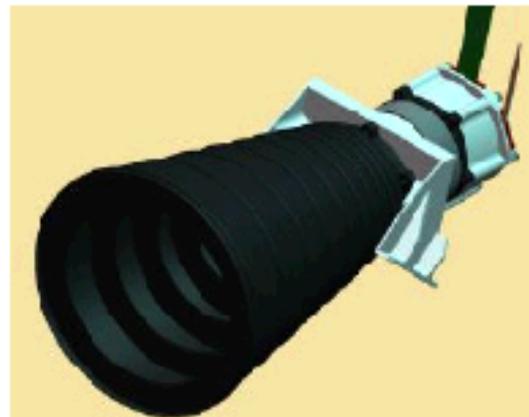
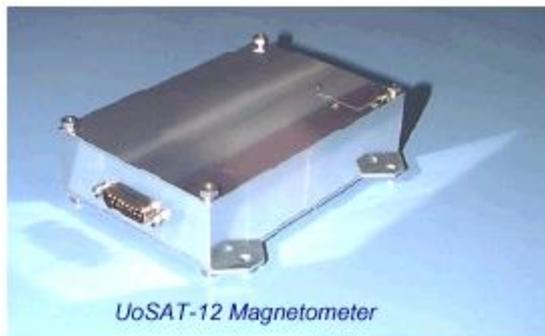
Αισθητήρες

Προσδιορισμός Προσανατολισμού/ Attitude Determination

BEI GYROCHIP™
Model QRS11
Micromachined Angular Rate Sensor

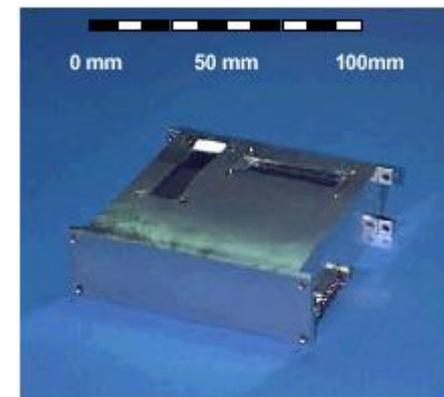


Gyros

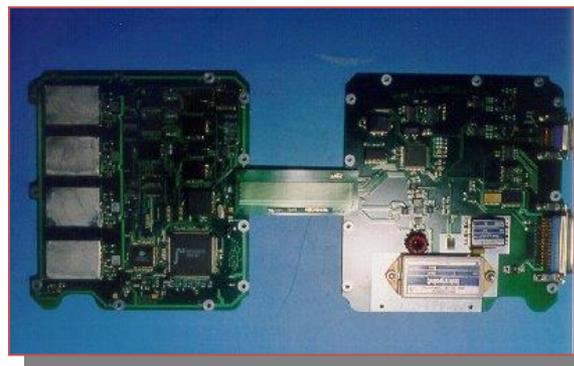


Star Camera

GPS



Sun Sensor



Αισθητήρες

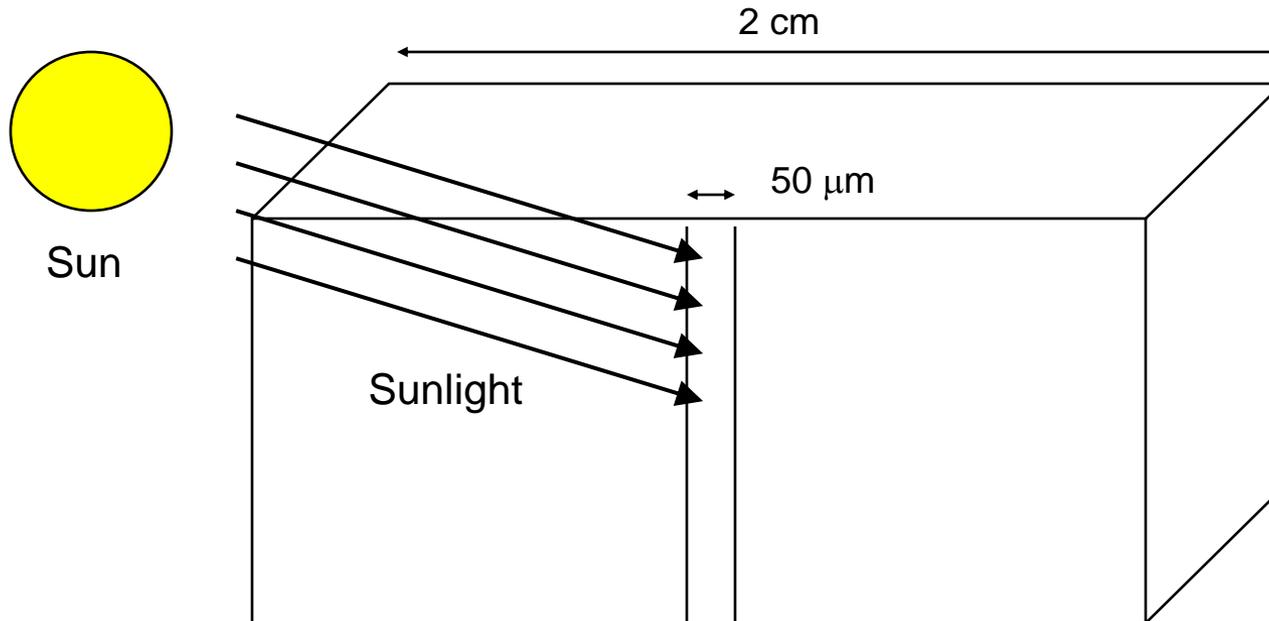
Προσδιορισμός Προσανατολισμού/ Attitude Determination

Attitude Sensor	Performance	Mass (kg)	Power (W)
Inertial Measurement Unit	Gyro drift rate: 0.003° /hr to 1° /hr	3-25	10-200
Sun Sensor	Accuracy: 0.001° to 3°	0.5-2	0-3
Star Sensor	Accuracy: 0.0003° to 0.1°	0.5-7	4-20
Horizon Sensor	Accuracy: 0.05° to 1°	2-5	0.3-10
Magnetometer	Accuracy: 0.5° to 3°	0.15-1.2	≤ 1

From Wetz & Larson : Space Mission Analysis and Design

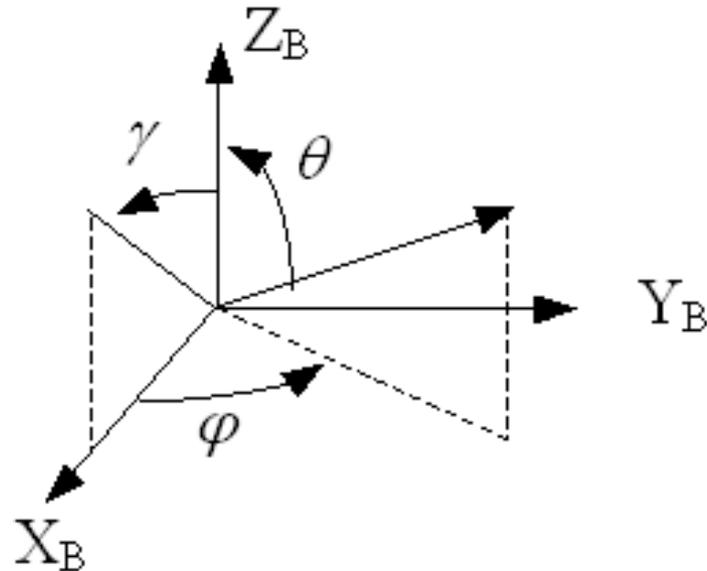
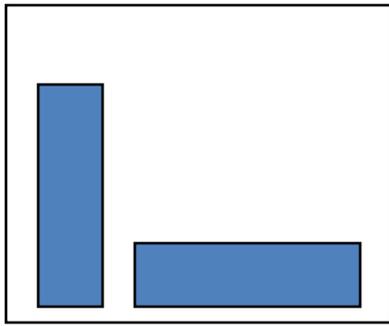
Αισθητήρας Ήλιου/Sun Sensor (1)

- Όταν ο δορυφόρος δεν είναι σε έκλειψη, μπορούμε να προσδιορίσουμε την διεύθυνση του Ήλιου που ανακλάται στον δορυφόρο.



Αισθητήρας Ήλιου/Sun Sensor (6)

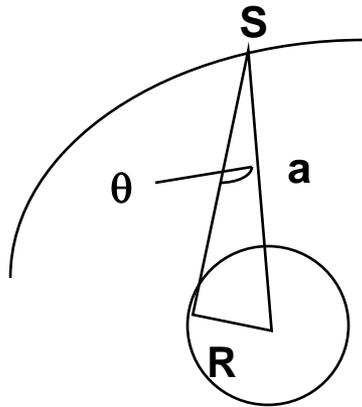
- Χρησιμοποιούμε 2 σχισμές σε ορθή γωνία για να μετρήσουμε τις γωνίες αζιμούθιου και ανύψωσης (elevation & azimuth angles) του Ήλιου (σημείο στο άπειρο)



- Ένας ανιχνευτής ανιχνεύει το ϕ , αλλά ο άλλος ανιχνευτής βρίσκει την γωνία γ που είναι η προβολή της διεύθυνσης του Ήλιου στο επίπεδο Y_B
- X_B επίπεδο: $F \sin \theta \cos \phi = F \sin \gamma$, $\sin \gamma = \sin \theta \cos \phi$, άρα το γ διαμορφώνεται από το ϕ

Αισθητήρας Ορίζοντα Γης (1)

- Ένας δορυφόρος σε τροχιά LEO, μπορεί να ανιχνεύσει την καμπυλότητα (άκρο) της Γης
- Η Γη είναι πιο φωτεινή (θερμή) από την ατμόσφαιρα/διάστημα
- Μπορούμε να προσδιορίσουμε 2 γωνίες (roll, pitch), αλλά επειδή η Γη είναι σφαιρική δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε την τρίτη γωνία (yaw)

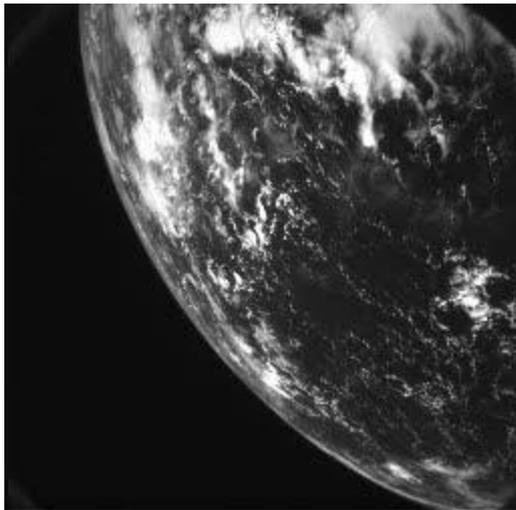


Για έναν δορυφόρο (S) σε τροχιακό ύψος a , η γωνία θ που σχηματίζεται με τον ορίζοντα είναι:

$$\sin\theta = R/a$$

Αισθητήρας Ορίζοντα Γης (2)

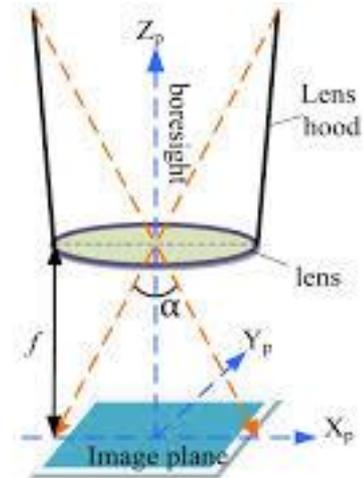
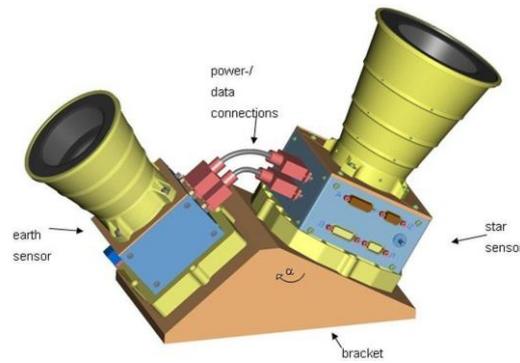
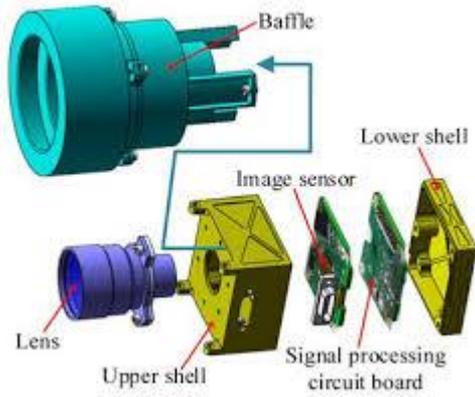
- Χρησιμοποιούμε μία συστοιχία pixel (single pixel array) υπό γωνία ώστε όταν ο δορυφόρος κοιτά προς το ναδίρ ο ορίζοντας της Γης να είναι στο κέντρο της συστοιχίας
- Γνωρίζοντας το οπτικό πεδίο και τον αριθμό pixel, μπορούμε να υπολογίσουμε την γωνιακή ανάλυση (resolution) ανά pixel
- Η διαδικασία αυτή μετατρέπει τον αριθμό pixel σε γωνία πρόνευσης
- Άλλος ένας ίδιος αισθητήρας κάθετα τοποθετημένος στον πρώτο, μας δίνει την γωνία εκτροπής





Αισθητήρες Ανίχνευσης Άστρων Star Sensor

- Ο αισθητήρας άστρων είναι ένα τηλεσκόπιο το οποίο βρίσκει σχηματισμούς (αστερισμούς) φωτεινών άστρων
- Όταν έχει ανιχνευθεί ένας πιθανός αστερισμός, αυτός συγκρίνεται με μία βιβλιοθήκη από φωτεινά άστρα αποθηκευμένη στον Η/Υ του υποσυστήματος
- Προηγμένοι αλγόριθμοι βρίσκουν τις αντιστοιχίες σε ελάχιστο χρόνο
- Βρίσκοντας τους αστερισμούς σε αντιστοιχία με τις εικόνες από τον δορυφόρο μπορούμε να προσδιορίσουμε τον προσανατολισμό του δορυφόρου στον αδρανειακό χώρο (αδρανειακές διευθύνσεις)
- Μας δίνουν πληροφορίες για την κινηματική (kinematics) αλλά και την δυναμική (dynamics) συμπεριφορά του δορυφόρου
- Θεωρείται ο αισθητήρας που δίνει την πιο ακριβή μέτρηση προσανατολισμού/κίνησης δορυφόρου



Μαγνητόμετρο - Magnetometers

- Οι δορυφόροι σε τροχιά LEO περνούν μέσα από το μαγνητικό πεδίο της Γης με ένταση B
- Υπάρχουν λεπτομερή μαθηματικά μοντέλα της μαγνητόσφαιρας/μαγνητικού πεδίου της Γης
- Γνωρίζοντας την τροχιακή θέση του δορυφόρου, ξέρουμε την διεύθυνση του διανύσματος του τοπικού μαγνητικού πεδίου
- Μετρώντας το μαγνητικό πεδίο B με μαγνητόμετρο μπορούμε να κάνουμε εκτιμήσεις για τις αλλαγές προσανατολισμού του δορυφόρου σε τροχιά
- Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιούμε για το μαγνητικό πεδίο της Γης με ένταση B είναι το IGRF (International Geomagnetic Reference Frame)

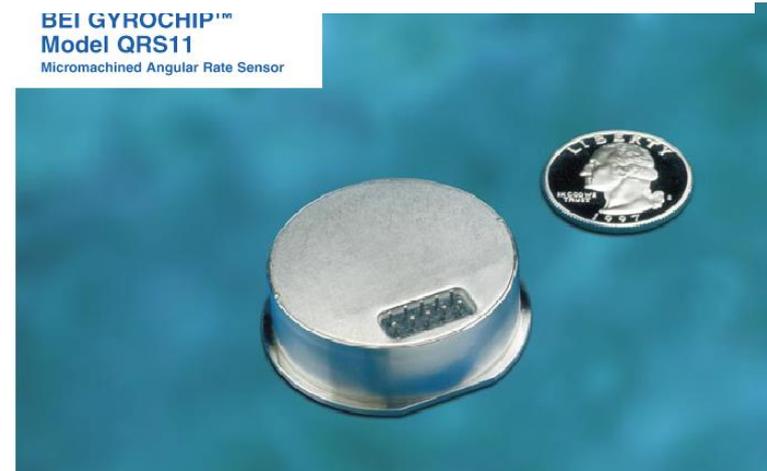


Γυροσκόπιο ρυθμού - Rate Gyroscope

- Το **γυροσκόπιο** είναι μια συσκευή η οποία μπορεί να διατηρεί σταθερό τον προσανατολισμό της μέσω της περιστροφής των μερών της και της αρχής της διατήρησης της στροφορμής.
- Πρόκειται για μια διάταξη όπου μια μεταλλική στεφάνη μπορεί να περιστρέφεται δεξιά ή αριστερά.
- Αυτή η στεφάνη φέρει δεύτερη εσωτερική που στηρίζεται με συνδέσμους σε οριζόντια διάταξη, ως προς την εξωτερική, δυνάμενη έτσι να περιστρέφεται ελεύθερα με φορά πάνω ή κάτω.
- Στην εσωτερική αυτή στεφάνη συγκρατείται εσωτερικά σε κάθετη διάταξη σε σχέση με τη προηγούμενη ο "σφόνδυλος" που αποτελεί μια μικρή σφαίρα που περιστρέφεται υπό μορφή βούρας.
- Τα σημεία έδρασης της κάθε στεφάνης καθώς και του σφονδύλου εξασφαλίζουν την ελεύθερη περιστροφή όλων των τμημάτων της διάταξης, δηλαδή του γυροσκοπίου σαν σύνολο

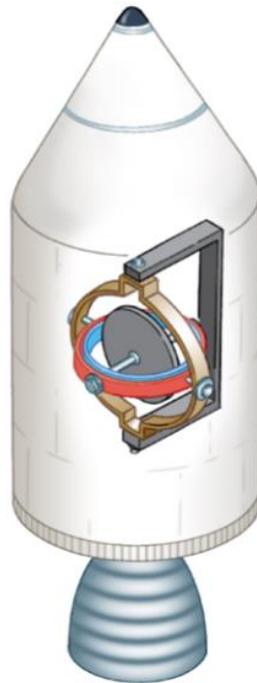


BEI GYROCHIP™
Model QRS11
Micromachined Angular Rate Sensor

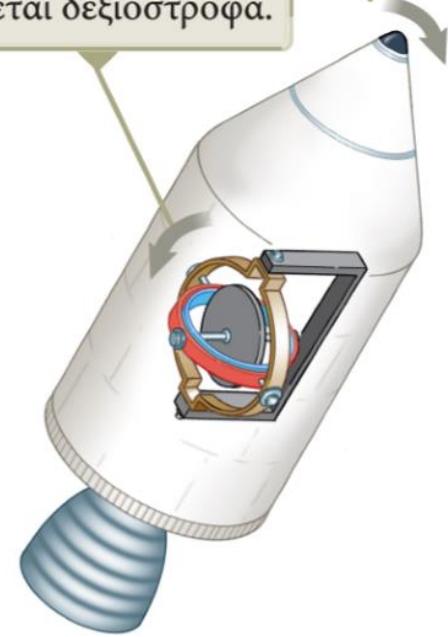


Γυροσκόπιο ρυθμού - Rate Gyroscope

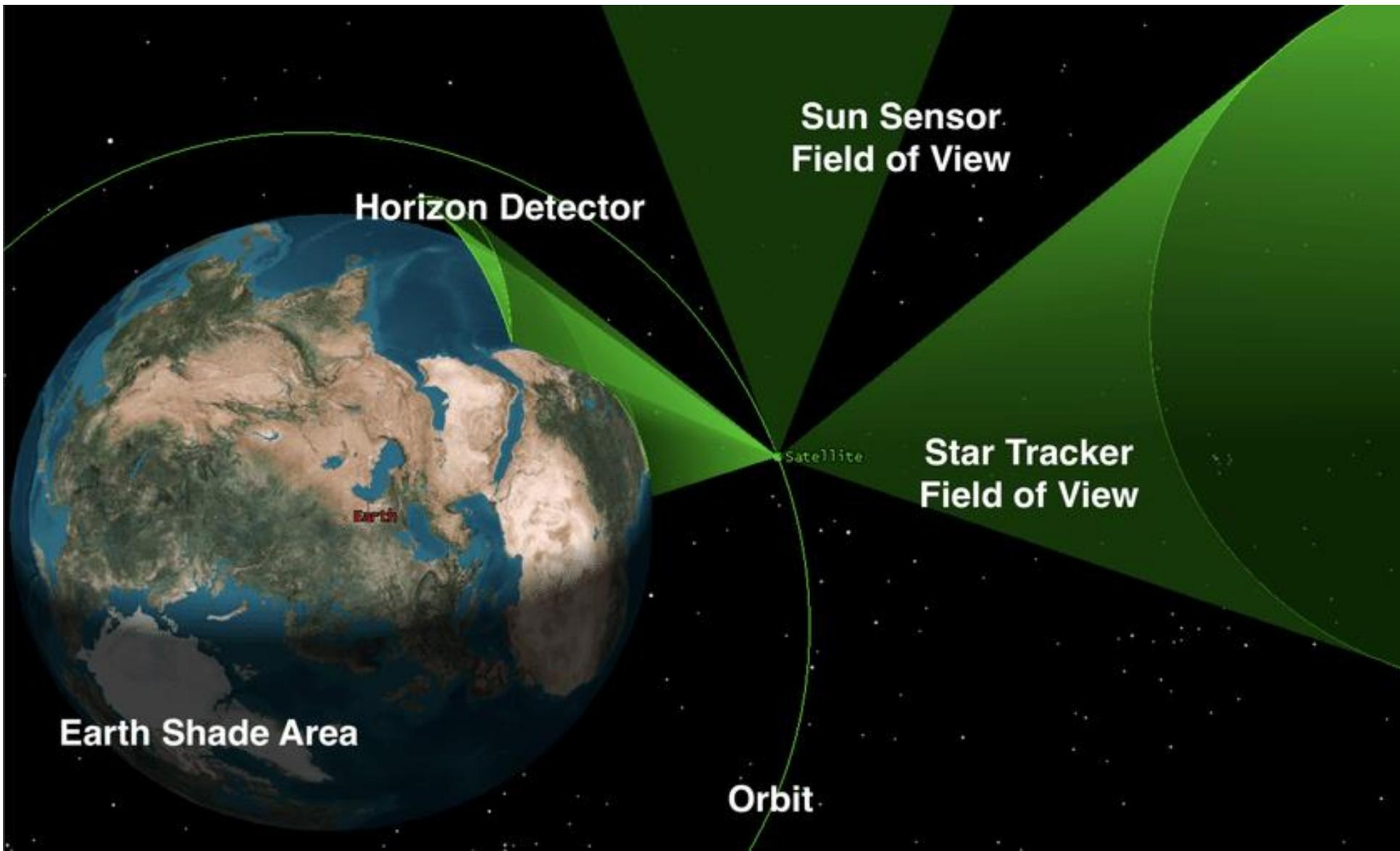
- Η στροφορμή του διαστημοπλοίου ως προς το κέντρο μάζας του είναι μηδενική.
- Το γυροσκόπιο περιστρέφεται, με αποτέλεσμα η στροφορμή του διαστημοπλοίου να μην είναι πλέον μηδενική.
- Το διαστημόπλοιο περιστρέφεται με κατεύθυνση αντίθετη από αυτή του γυροσκοπίου. Έτσι, η συνολική στροφορμή του συστήματος παραμένει μηδενική



Όταν το γυροσκόπιο περιστρέφεται αριστερόστροφα, το διαστημόπλοιο περιστρέφεται δεξιόστροφα.



Οπτικό Πεδίο Αισθητήρων



Επενεργητές/Actuators

- Οι επενεργητές μπορούν να χωριστούν σε αδρανειακούς και μη αδρανειακούς. Αδρανειακοί είναι οι επενεργητές που δημιουργούν ροπές με την μεταβολή της στροφορμής.
- Λέγονται και συστήματα ανταλλαγής στροφορμής. Υλοποιούνται με σφόνδυλο του οποίου η στροφορμή μεταβάλλεται με τη βοήθεια ηλεκτροκινητήρα. Τέτοια συστήματα είναι:
 - οι τροχοί/σφόνδυλοι αδράνειας (momentum wheel): παρέχουν σταθερή στροφορμή για γυροσκοπική ευστάθεια. Ο έλεγχος προσανατολισμού (ροπή) γίνεται με την μικρή μεταβολή της σταθερής ταχύτητας περιστροφής του τροχού
 - οι τροχοί αντίδρασης (reaction wheel): Δημιουργούν ροπή με την αντίδραση σε μία μεταβολή, με την αύξηση/μείωση της ταχύτητας του τροχού που βρίσκεται σε κατάσταση ακινησίας
 - οι γυροσκοπικοί επενεργητές ελέγχου (Control Moment Gyro - CMG) που μπορούν να παρέχουν ροπή σε κάθε διεύθυνση: τροχός αδράνειας ο οποίος είναι τοποθετημένος πάνω σε ένα η δύο μηχανισμούς αντιζύγου (gimbal) επιτρέποντας την αλλαγή κατεύθυνσης του άξονα περιστροφής του τροχού (άρα και της στροφορμής)



ΑΣΚΗΣΗ

- Μελετήστε και περιγράψτε πως λειτουργούν οι οι γυροσκοπικοί επενεργητές ελέγχου (Control Moment Gyro - CMG).
 1. Πως παράγουν ροπές και στροφορμή? Βρείτε τις εξισώσεις.
 2. Βρείτε σε ποιους δορυφόρους λειτουργούν και πια είναι τα πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα που έχουν σε σχέση με άλλους αδρανειακούς επενεργητές (συγκριτικό πίνακα).
 3. Γιατί χρειαζόμαστε 4 CMGs για τον έλεγχο ενός δορυφόρου και όχι 3.
 4. Τι είναι το Double Gimbal CMG και πως λειτουργεί?

•

Μη Αδρανειακοί Επενεργητές

Non-Inertial Actuators

- Μη αδρανειακούς επενεργητές:
 - Μαγνητικοί επενεργητές. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος από πηνία και τη συνεπακόλουθη δημιουργία τοπικού μαγνητικού πεδίου που η αλληλεπίδραση του με το μαγνητικό πεδίο του πλανήτη γύρω από τον οποίο εκτελείται η τροχιά προκαλεί μια ροπή που αξιοποιείται ανάλογα με τις ανάγκες ελέγχου του δορυφόρου
 - Συστήματα προώθησης. Λειτουργούν μέσω εκκένωσης κάποιου προωθητικού (propellant) και αποτελούν την σταθερότερη τεχνολογική λύση μιας και η χρήση τους μπορεί να συνδυαστεί με άλλες μεθόδους



Περιστροφική Κίνηση

- Τα συστήματα ADCS απαιτούν γνώση της περιστροφικής κίνησης η οποία διαφέρει από αυτήν της μεταφορικής κίνησης. Πρέπει να θυμηθούμε τα μεγέθη, εξισώσεις της ροπής, στροφορμής και των αντίστοιχων μεγεθών τους στην μεταφορική κίνηση
- Για να γίνει κατανοητή η περιστροφική κίνηση των δορυφόρων στο διάστημα, θα πρέπει γνωρίζουμε το φαινόμενο της μετάπτωσης (precession) άκαμπτων σωμάτων.



Εξισώσεις Περιστροφικής και Γραμμικής Κίνησης

Περιστροφική Κίνηση

$$\omega = \omega_0 + \alpha t$$

$$\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha\theta$$

$$\bar{\omega} = \frac{\omega + \omega_0}{2}$$

Γραμμική Κίνηση

$$v = v_0 + at$$

$$x = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

$$v^2 = v_0^2 + 2ax$$

$$\bar{v} = \frac{v + v_0}{2}$$

Αντιστοιχία Μεγεθών στην Μεταφορική και Περιστροφική Κίνηση

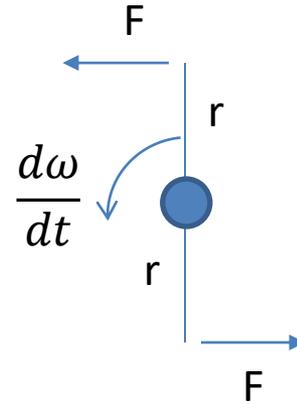
Μεταφορική Κίνηση	Περιστροφική Κίνηση
Μετατόπιση, S	Γωνιακή Μετατόπιση, θ
Ταχύτητα, v	Γωνιακή Ταχύτητα, ω
Επιτάχυνση, a	Γωνιακή επιτάχυνση, α ή $d\omega/dt$
Δύναμη, F	Ροπή δύναμης, T ή N
Μάζα, m	Ροπή αδράνειας, I
Ορμή, P	Στροφορμή, H



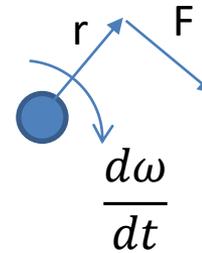
Ροπή (Torque)

- Θεωρούμε ως σημείο αναφοράς το κέντρο μάζας (centre of mass – CoM)
- Ας ορίσουμε μια εξωτερική ροπή η οποία προκαλείται από ένα ζεύγος δυνάμεων (couple) ή από μία δύναμη που δρα μέσω ενός μοχλοβραχίονα
- Μία εξωτερική ροπή θα προκαλέσει τον ρυθμό μεταβολής της στροφορμής που ορίζεται ως:

$$T = \frac{dH}{dt}$$



Ζεύγος δυνάμεων
 $T = 2 r \times F$



Ροπή
 $T = r \times F$

$$T = \frac{d(H)}{dt} = \frac{d(I\omega)}{dt} = I \frac{d\omega}{dt}$$

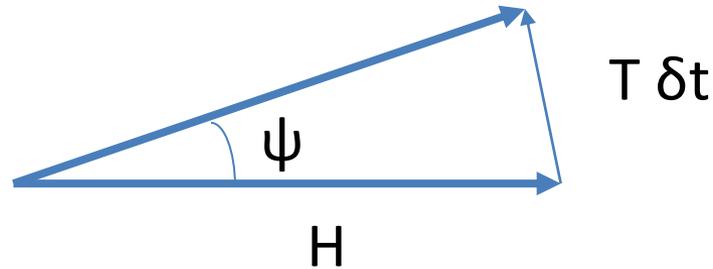
Ροπή (Torque) - II

- Κατανομή ροπών που ασκούνται σε δορυφόρους:
 - Εσωτερικές ροπές, που δρουν μεταξύ σωματιδίων ή σωμάτων και που δεν αλλάζουν την συνολική ορμή: μηχανισμοί, κίνηση καυσίμου
- Αλλά θα υπάρχουν συνεχώς εξωτερικές ροπές που θα ασκούνται στον δορυφόρο:
 - Έχει ως αποτέλεσμα την συσσώρευση στροφορμής, η οποία αν δεν ακυρωθεί/απαλειφθεί σε μεγάλους ρυθμούς περιστροφής του δορυφόρου
 - Άρα χρειαζόμαστε εξωτερικούς επενεργητές για να ελέγξουμε την συσσώρευση στροφορμής
 - Τέτοιοι επενεργητές είναι τα μαγνητικά πηνία (magnetic coils or torque rods), προωθητές (thrusters)

Ροπή (Torque) - III

- Θα αναλύσουμε τις 3 βασικές περιπτώσεις που δρουν εξωτερικές ροπές σε ένα διαστημικό όχημα:
 1. Μηδέν εξωτερική ροπή, T σημαίνει ότι η στροφορμή H θα είναι σταθερή σε μέτρο και διεύθυνση
 2. Εξωτερική ροπή η οποία δρα στην ίδια διεύθυνση με την στροφορμή H , θα μεγαλώσει το μέτρο του H αλλά χωρίς να αλλάξει την διεύθυνση του H
 3. Εξωτερική ροπή η οποία είναι πάντα κάθετη στην στροφορμή H θα αλλάξει την διεύθυνση της στροφορμής H αλλά όχι το μέτρο της;
 - Η περίπτωση αυτή αντιπροσωπεύει το φαινόμενο της μετάπτωσης (precession) του γυροσκοπίου

Γυροσκοπικής ευστάθειας/ακαμψίας Gyroscopic Rigidity

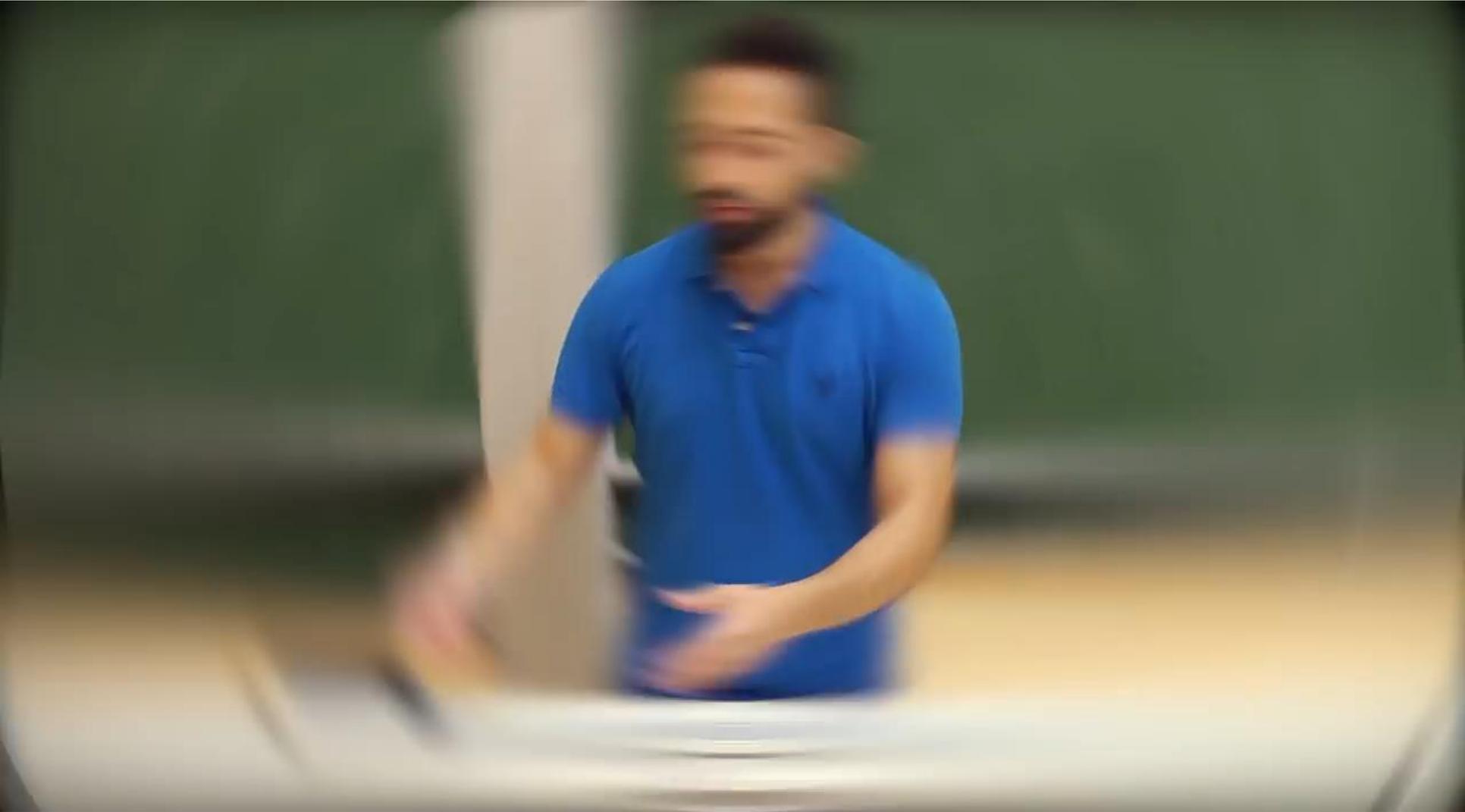


- Αν η στροφορμή \underline{H} είναι μεγάλη, τότε η μεταβολή στην διεύθυνση του \underline{H} , κατά γωνία $\delta\psi$ είναι μικρή για μία ροπή $\underline{I}(\delta t)$

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{T}{H}, \text{ ρυθμός μετάπτωσης}$$

- Άρα αν δώσουμε στον δορυφόρο μια προδιάθεση στροφορμής (momentum bias), δηλαδή μία αρχική σταθερή στροφορμή σε μία συγκεκριμένη διεύθυνση, θα κατορθώσουμε να 'θωρακίσουμε' την διεύθυνση αυτή από εξωτερικές ροπές μέσω της **γυροσκοπικής ευστάθειας/ακαμψίας**

Γυροσκόπιο



- <https://www.youtube.com/watch?v=ty9QSiVC2g0>

Γυροσκοπική Ευστάθεια/Ακαμψία

- <https://www.youtube.com/watch?v=xQb-N486mA4>

Γυροσκοπική Ευστάθεια/Ακαμψία



<https://www.youtube.com/watch?v=FGc5xb23XFQ>

ΑΣΚΗΣΗ

- Περιγράψτε τον τρόπο λειτουργίας των τροχών αντίδρασης (reaction wheel). Πως μπορεί ένας τροχός να περιστρέψει ένα δορυφόρο γύρω από το κέντρο βάρους του;
- Υπολογίστε την ροπή, στροφορμή, γωνιακή ταχύτητα, επιτάχυνση για έναν ελιγμό ως προς έναν άξονα του δορυφόρου ξεκινώντας από ακινησία, γωνία 90 μοιρών η οποία πρέπει να πραγματοποιηθεί σε 180 s. Ο δορυφόρος στο τέλος του ελιγμού πρέπει να είναι ακίνητος. Για τον δορυφόρο οι ροπές αδράνειας είναι $I_{xx}=I_{yy}=I_{zz}=2.5 \text{ kgm}^2$. Να σχεδιάσετε τις γραφικές παραστάσεις των ζητούμενων μεγεθών στο EXCEL σε συνάρτηση με τον χρόνο (t από 0-180s ανά 1 s).