

# Globális helymeghatározó rendszerek

Plósz Sándor<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Távközlési és Médiainformatikai Tanszék

2016

# Navigációs rendszerek

- ▶ Rádiós navigációs rendszerek:
  - ▶ Műholdas - Global Navigation Satellite Systems (GNSS), pl. GPS, GLONASS, Galileo
  - ▶ Földi - Terrestrial Radio Navigation Systems (TRNS), pl. LORAN, léginavigáció: NDB, VOR/DME, ILS
- ▶ Inerciális navigációs rendszer (INS): Dead („Deduced,”) Reckoning
- ▶ Képi alapú navigáció: jellemző felismerés, visual pose estimation, SLAM

# Bevezetés

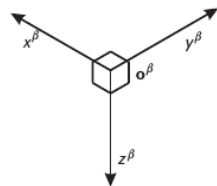
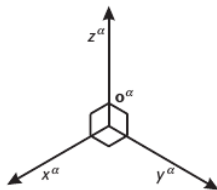
## GNSS

- ▶ GNSS = Global Navigation Satellite System (Globális műholdas helymeghatározó rendszer)
- ▶ Egy általános megjelölés, nem csak a GPS (csak egy megvalósítás)
- ▶ Koordináta rendszerek
- ▶ Műholdak pályája, pozíció leírása
- ▶ Pozíció meghatározása
- ▶ GNSS rendszerek

# Koordináta rendszerek

## Alapok

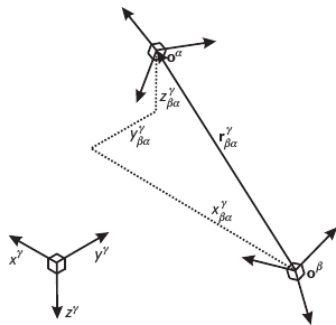
- ▶ Egy objektum helye és helyzete egy referencia koordináta rendszer segítségével írható le
- ▶ Minden navigációs probléma leírásához szükséges legalább 2 koordináta rendszer (lásd köv. dia)
- ▶ Egy ortogonális koordináta rendszernek 6 szabadsági foka van:
  - ▶ Rögzített pont (referencia)
  - ▶ Tengelyek
- ▶ A (relatív) hely, sebesség, gyorsulás (vektor) nem írható le 2 koordináta rendszer segítségével egyértelműen.



# Koordináta rendszerek

## Értelmezés

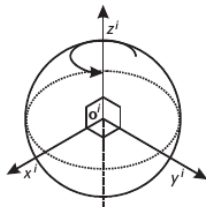
- ▶ Aminek a mozgását leírjuk: objektum koordináta rendszer ( $\alpha$ )
- ▶ Amihez képest ezt a mozgást értelmezzük: referencia koordináta rendszer ( $\beta$ )
- ▶ Amiben a mozgást kifejezzük ( $\gamma$ )
- ▶  $\alpha$  és  $\beta$  különböző, különben nincs mozgás
- ▶  $\gamma$  lehet  $\alpha$ ,  $\beta$  vagy egy tetszőleges koordináta rendszer
- ▶ Fizikai mennyiség helyes jelölése:  $x_{\beta\alpha}^{\gamma}$



# Koordináta rendszerek

## Földközpontú Inerciális (Earth-Centered Inertial, ECI)

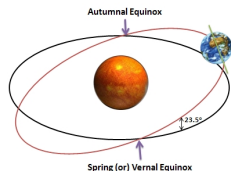
- ▶ Inerciális: forgás és gyorsulásmentes az univerzumhoz képest (közelítőleg)
- ▶ Földközpontú inerciális: középpontja fixálva a föld tömegközéppontjához
- ▶ Középpontja a föld geometriai középpontja
- ▶ Nem valódi inerciális koordináta rendszert (föld gyorsulása, forgástengelyének változása miatt)
- ▶ A z tengely a valódi északi sark (VÉS) felé mutat
- ▶ Az x és y tengelyek az egyenlítői síkon helyezkednek el, de nem forognak a földdel!
- ▶ Az y tengely forgás szerint az x tengelytől  $90^\circ$ -al előre mutat



# Koordináta rendszerek

## Földközpontú Inerciális (Earth-Centered Inertial, ECI)

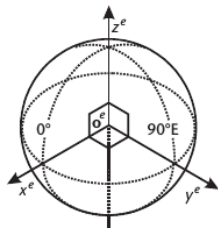
- ▶ ECI nem egyértelmű koordináta rendszer → meg kell határozni az időpontot amikor egybeesik az ECEF koordináta rendszerrel
  - ▶ A navigációs probléma megoldása előtt a két rendszer illesztése
  - ▶ Az  $x$  tengely definiálása mint a földet a nappal összekötő tengely a tavaszi napéjegyenlőség idején (É.félteke)
- ▶ Az eltelt idő és forgási sebességből számolható a szögmozdulás
- ▶ Probléma, hogy a VÉS mozog, ezért egy referencia irányt használnak
- ▶ Az ECI a hagyományos inerciális referencia rendszer (conventional inertial reference system, CIRS) alapját képezi



# Koordináta rendszerek

## Földközpontú földhöz rögzített (Earth-centered Earth-fixed, ECEF)

- ▶ Közepontja a föld geometriai közepontja
- ▶ A z tengely a VÉS felé mutat
- ▶ Az x tengely a közepontból az egyenlítő és a referencia meridián metszéspontja felé mutat (0. hosszúsági fok, Greenwich)
- ▶ Az y tengely az egyenlítő és a keleti 90°-os hosszúsági kör metszéspontja felé mutat
- ▶ A hagyományos földi referencia rendszer (conventional terrestrial reference system, CTRS) alapját képezi

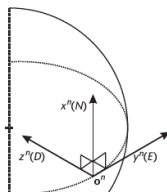




# Koordináta rendszerek

## Lokális

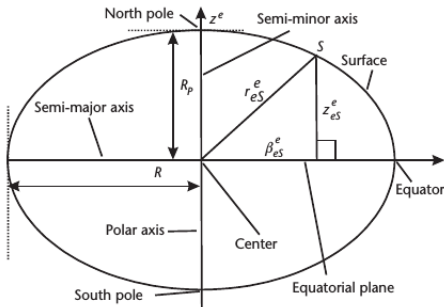
- ▶ A föld felületén egy pont helyzetét (helymeghatározás megoldását) ebben a koordináta rendszerben fejezzük ki
- ▶ A  $z$  tengely a földet modellező ellipszoid felület normálvektora (a föld középpontja felé mutat) - *magasság*
- ▶ Az  $x$  tengely a felületre merőlegesen az északi sark felé mutat (É-i tengely) - *szélesség*
- ▶ Az  $y$  tengely a felületre merőlegesen kelet felé mutat (K-i tengely) - *hosszúság*
- ▶ Hátránya, hogy a sarkpontokon az  $x$  és  $y$  tengelyek nem értelmezhetők
- ▶ Az orientáció függ a pont helyétől - görbe vonalú koordináta rendszer



# Koordináta rendszerek

## A föld közelítő modellje

- ▶ A helymeghatározási feladatban a földet egy lapult forgási ellipszoidként modellezzük:



- ▶ Egyenlítői sugár  $R_0 = 6378.1\text{ km}$

- ▶ Sarki sugár  $R_p = 6356.8\text{ km}$

- ▶ Excentricitás:

$$e = \sqrt{1 - \frac{R_p^2}{R_0^2}} = 0.0818$$

- ▶ S pont, geocentrikus sugár:

$$r_s = \sqrt{(x_s)^2 + (y_s)^2 + (z_s)^2}$$

# Koordináta rendszerek

## Szélesség értelmezése

- ▶ Azonos szélesség alatti pontok egy kört írnak le, neve: szélességi kör (vagy párhuzamos), sugara:  $\beta$ .  $\beta_S = \sqrt{(x_S)^2 + (y_S)^2}$ , az ellipszis egyenlet szerint:  $\left(\frac{\beta_S}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{z_S}{R_P}\right)^2 = 1$
- ▶ Azonos hosszúsági pontok ellipszist írnak le: hosszúsági kör (meridián)

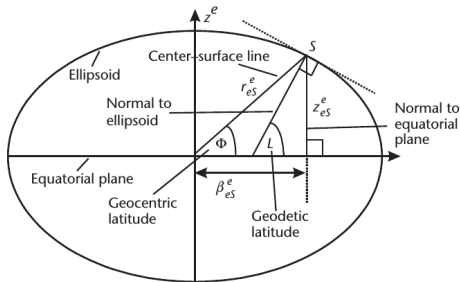
- ▶ Geocentrikus szélesség ( $\Phi$ )

$$\tan \Phi_S = \frac{z_S}{\beta_S}$$

- ▶ Geodéziai szélesség ( $L$ ): a felület gradiense

$$\tan L_S = -\frac{\partial \beta_S}{\partial z_S} = \dots = \frac{z_S}{(1-e^2)\beta_S}$$

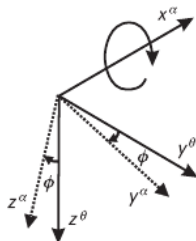
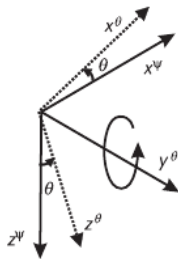
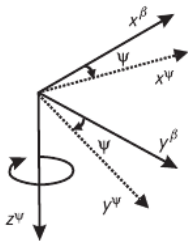
$$\tan \Phi_S = (1 - e^2) \tan L_S$$



# Koordináta rendszerek

## Transzformáció

- ▶ Helymeghatározás megoldása során többféle koordináta rendszerben dolgozunk
- ▶ Ezek közt létezik átjárás (transzformáció)
- ▶ Legegyszerűbb: Euler-transzformáció (3 tengely körüli szekvenciális forgatás)



# Koordináta rendszerek

## Transzformáció 2.

- ▶ Tengely körüli forgatás leírható mátrixal való szorzásként
- ▶ Euler-transzformáció: 3 mátrix szorzata

$$C_{\beta}^{\alpha} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_{\beta\alpha} & -\sin \phi_{\beta\alpha} \\ 0 & \sin \phi_{\beta\alpha} & \cos \phi_{\beta\alpha} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos \theta_{\beta\alpha} & 0 & \sin \theta_{\beta\alpha} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{\beta\alpha} & 0 & \cos \theta_{\beta\alpha} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos \psi_{\beta\alpha} & -\sin \psi_{\beta\alpha} & 0 \\ \sin \psi_{\beta\alpha} & \cos \psi_{\beta\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

# Koordináta rendszerek

## Transzformáció 3.

- ▶ ECI-ECEF pozíció átváltás: szorzás  $C_i^e$  mátrixsal
- ▶ ECEF-ECI pozíció átváltás: szorzás  $C_e^i$  mátrixsal
- ▶ Tegyük fel, hogy a két koordináta rendszer x és y tengelyei  $t_0$  időpontban egybeestek (z mindig egybeesik)

$$C_i^e(t) = \begin{pmatrix} \cos \omega(t - t_0) & \sin \omega(t - t_0) & 0 \\ -\sin \omega(t - t_0) & \cos \omega(t - t_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
$$C_e^i(t) = \begin{pmatrix} \cos \omega(t - t_0) & -\sin \omega(t - t_0) & 0 \\ \sin \omega(t - t_0) & \cos \omega(t - t_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

# Műholdas helymeghatározás

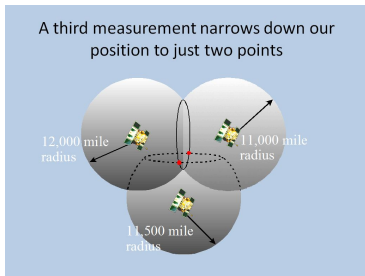
## Alapok

- ▶ Beérkezési idő (TOA - Time-of-Arrival) elv - passzív távolságszámítás (passive ranging)
- ▶ A műholdak periodikusan ismétlődő üzenetet küldenek
- ▶ Az üzenet tartalmazza a műhold pályájának paramétereit
- ▶ Küldési idő ( $t_{st,j}$ )
- ▶ Vételi idő ( $t_{sa,j}$ ): a vevő órája alapján
- ▶ Az adatokból meghatározható a műhold távolsága:  
 $\rho_j = (t_{sa,j} - t_{st,j})c$ , ahol  
 $c$ : fénysebesség (jelterjedési sebesség)
- ▶ Feltéve, hogy az adó és vevő órái szinkronizálva vannak

# Műholdas helymeghatározás

## Trianguláció

- ▶ Az előbbi egyenlet egy gömb felületet definiál, mint lehetséges pozíciók
- ▶ 2 vett jel  $\rightarrow$  2 gömb felületének közös pontjai egy körön vannak
- ▶ 3 vett jel  $\rightarrow$  2 lehetséges pont, ezek közül az egyik általában a föld belsejében van
- ▶ Mivel az órák nincsenek szinkronban ezért a gyakorlatban legalább 4 műhold szükséges





# Műholdas helymeghatározás

## Egyenletrendszer

- ▶ A "pszeudó" távolság egyenletrendszere:

$$\tilde{\rho}_j = \sqrt{\left(\mathbf{r}_{s,j}^i(t_{st,j}) - \mathbf{r}_u^i(t_{sa,j})\right)^T \left(\mathbf{r}_{s,j}^i(t_{st,j}) - \mathbf{r}_u^i(t_{sa,j})\right) + \delta\rho_u(t_{sa,j})}$$
$$j = 1 \dots 4$$

- ▶  $\mathbf{r}_{s,j}^i$ : j. műhold pozíciója,  $\mathbf{r}_u^i$  vevő pozíciója,  $\delta\rho_u(t_{sa,j})$  vevő órajel eltérése
- ▶ A műholdak nem tartják nyilván a pozíciójukat földi koordináta rendszerben
- ▶ Az égitestek pozícióját egy adott pillanatban az efemerisz (csillagászati napló) paraméterek írják le  $\rightarrow \mathbf{r}_{s,j}^i$  számítás

# Műholdas helymeghatározás

## Helymeghatározás menete

- ▶ Keresés, szinkronizáció mód
  1. Csatorna monitorozás, DSSS korrelátor, fázis meghatározás
  2. Almanac (évkönyv - info a többi műholdról) kiolvasása
  3. További műholdak keresése, szinkronizáció
- ▶ Helymeghatározás mód
  1. Küldési és vételi idő (differencia) → Pseudó távolság meghatározása
  2. Efemerisz paraméterek kiolvasása, várakozás több műholdra
  3. Efemerisz paraméterek aktualizálása
  4. A műhold pályán belüli pozíciójának meghatározása az efemerisz paraméterekből
  5. Pozíció transzformáció ECEF koordináta rendszerbe
  6. Órajel hiba meghatározása, korrekció
  7. Pozíció meghatározása

# Műhold szinkronizáció

## Moduláció

- ▶ A legtöbb GNSS jel BPSK modulált, egyenlete:

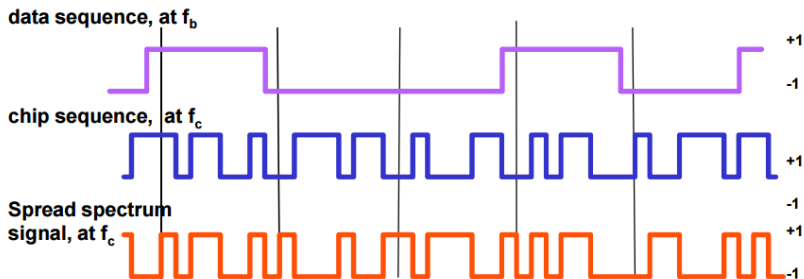
$$s(t) = \sqrt{2P}C(t)D(t) \cos(2\pi f_{ca}t + \phi_{ca})$$

- ▶  $P$ : jel amplitúdója,  $C(t)$ : szórókód,  $D(t)$ : adat
- ▶  $f_{ca}$ : vivőfrekvencia,  $\phi_{ca}$ : fázistolás
- ▶ A szórókód egy a vevő számára ismert ál-véletlen zaj
- ▶ Célja:
  - ▶ Kódosztás megvalósítása (CDMA)
  - ▶ A jel sáv szélességének növelése
  - ▶ Fázisdetektálás elősegítése (korrelátor segítségével)

# Műhold szinkronizáció

## Szórókód

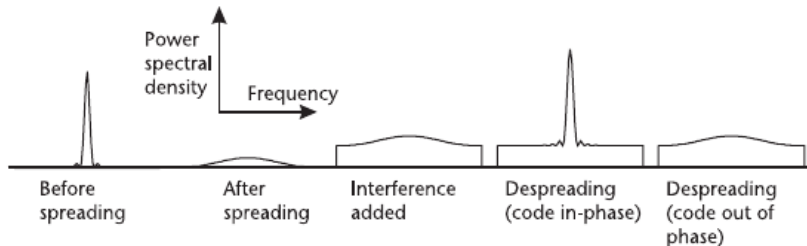
- ▶ Hivatalos neve PRN (Pseudo Random Noise) kód
- ▶ Az adatjelet egy nagyobb frekvenciájú jellel összeszorozzuk
- ▶ Minden műholdnak saját PRN kódja van



# Műhold szinkronizáció

## Vétel

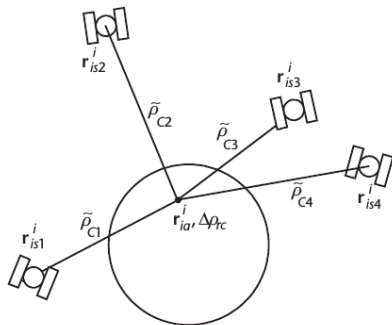
- ▶ a vétel első lépése a **szinkronizáció** → fázis meghatározása → beérkezési idő ( $\tilde{t}_{sa,j}$ ) meghatározása
- ▶ szórókód illesztése → korreláció szinte csak a fázisban van



- ▶ ha megvan a szinkron akkor a vevő **követés** módba vált

# Műhold helyének meghatározása

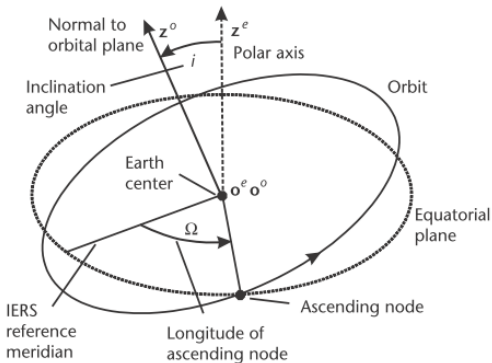
## Műholdak pályája



- ▶ Több különböző pályájú műhold → lefedettség biztosítása
- ▶ Meg kell határoznunk a műholdak pozícióját

# Műhold helyének meghatározása

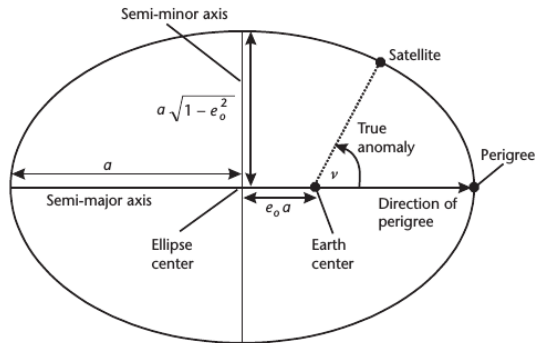
## Műhold pályája



- ▶ Ekliptika: föld keringési síkja
- ▶ Inklináció ( $i$ ): a pálya síkja és az ekliptika síkjának normáljai által bezárt szög
- ▶ Felszálló csomó (ascending node): síkok metszete a pálya D-É irányába
- ▶ Felszálló csomó hossza ( $\Omega$ ): a FCS és a ref. meridián által bezárt szög

# Műhold helyének meghatározása

## Műhold pályája

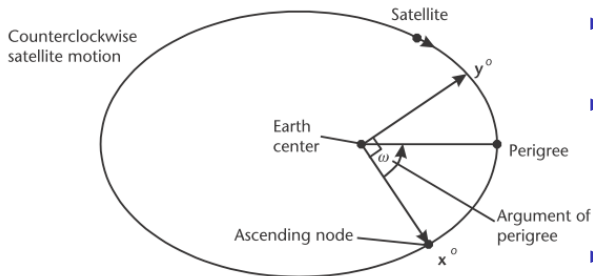


- ▶ Ellipszis pálya
  - ▶  $a$ : fél nagytengely
  - ▶  $e_0$ : excentricitás
- ▶ Föld az egyik fókuszpontban
- ▶ Perigeum (perigee): földhöz legközelebbi pont
- ▶ Apogeeum (apogee): legtávolabbi pont
- ▶ Valódi anomália (true anomaly,  $\nu$ ): pozíció szöge a perigeumhoz képest a fókuszpontból



# Műhold helyének meghatározása

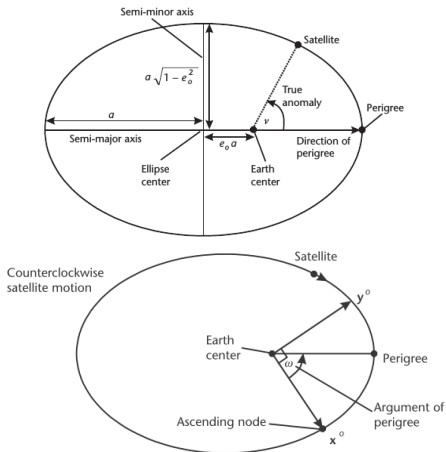
## Műhold pálya koordináta rendszer



- ▶ Az x tengely a felszálló csomó felé mutat
- ▶ A z tengely a pálya síkjának normálvektora
- ▶ Az y tengely jobbkézszabály szerint  $90^\circ$ -al elforgatva a z körül
- ▶ A perigeum szöge ( $\omega$ ) a felszálló csomó és a perigeum által bezárt szög

# Műhold helyének meghatározása

## Helymeghatározás menete



- ▶ Valódi anomália ( $\nu$ ) meghatározása
- ▶ Szélességi szög meghatározása:  
 $\Phi = \omega + \nu$
- ▶ Pálya koordináták ( $x_s, y_s$ ) meghatározása
- ▶ Koordináta rendszer forgatási transzformációk

# Műhold helyének meghatározása

## Efemerisz paraméterek

- ▶  $t_{ts}$ : GPS idő az adat küldésekor
- ▶  $M_0$ : közepes anomália  $t_{ts}$  időpillanatban
- ▶  $e_0$ : a pálya excentricitása
- ▶  $\sqrt{a}$ : fél nagytengely hosszának gyöke
- ▶  $\Omega_0$ : a felszálló csomó hossza  $t_{ts}$  időpillanatban
- ▶  $i_0$ : inklináció  $t_{ts}$  időpillanatban
- ▶  $\omega$ : a perigeum szöge
- ▶  $\dot{\Omega}_d$ : felszálló csomó hosszának változása (föld forgása miatt)
- ▶  $\dot{i}_d$ : inklináció változása
- ▶ Gravitációs korrekciós paraméterek

# Műhold helyének meghatározása

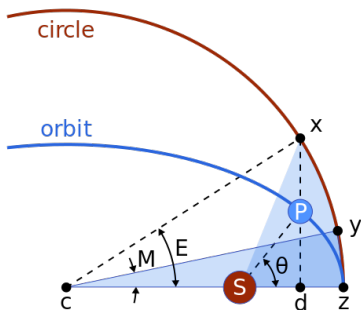
## Efemerisz paraméterek

- ▶ Nekünk a valódi anomáliára ( $\nu$ ) lenne szükségünk, mert ez jellemzi a műhold pozícióját
- ▶ Probléma: Kepler 2. törvénye értelmében a műhold területi sebessége állandó, de mivel a vezérsugár változik, így a kerületi és szögsebesség is.  $\implies \nu$ -vel nehéz számolni
- ▶ Helyette az átlagos anomáliát ( $\mathbf{M}_0$ ) adják meg, mely lineárisan változik.

# Műholdas helymeghatározás

## Közepes anomália

- ▶ Vegyünk egy olyan képzeletbeli kör alakú pályán mozgó objektumot, mely keringési ideje megegyezik a vizsgált műholdéval
- ▶ A két pálya az apogeum és perigeum pontokban metszi egymást

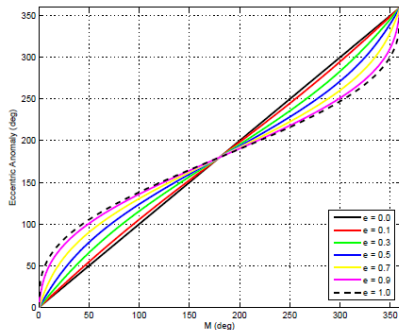


- ▶ A közepes anomália ( $M$ ): a középpontból ez az objektum a perigeumhoz képest milyen szögben látszik
- ▶ Excentrikus anomália ( $E$ ): a műhold vetülete a körpályára milyen szög alatt látszik
- ▶ Valódi anomália (az ábrán  $\Theta$ ):  
 $\nu \Leftrightarrow E \Leftrightarrow M$

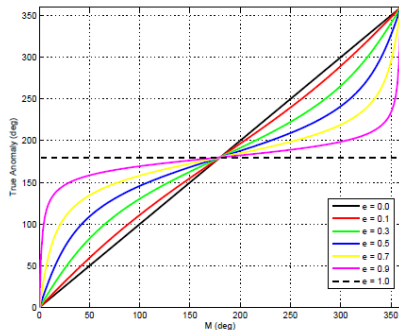
# Műholdas helymeghatározás

## Anomáliák

### ► Anomáliák közti összefüggések



(a) Eccentric Anomaly vs. Mean Anomaly



(b) True Anomaly vs. Mean Anomaly

# Műholdas helymeghatározás

## Excentrikus anomália

- ▶  $M = M_0 + \bar{\omega}_m \Delta t$ , átlagos anomália a vétel pillanatában
- ▶  $\Delta t = t_{ts} - t_{sa}$
- ▶  $\bar{\omega}_m = \frac{2\pi}{T}$  keringési szögsebesség,  $T$ : periódusidő
- ▶  $T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}}$ , ahol  $\mu$ : gravitációs állandó  $\rightarrow \bar{\omega}_m = \frac{\mu}{a^3}$
- ▶ Kepler egyenlet:
  - ▶  $M = E - e_0 \sin E$
  - ▶  $E$  nem fejezhető ki zárt alakban, iteratív megoldás:
  - ▶  $E_0 = M + \frac{e_0 \sin M}{1 - \sin(M+e_0) + \sin M}$
  - ▶  $E_i = M + e_0 \sin E_{i-1}$ ,  $i = 1 \dots n$
  - ▶  $E = E_n$
  - ▶  $n = 20$  iteráció  $\rightarrow$  a hiba cm-es nagyságrendű ( $n = 22 \rightarrow mm$ )

# Műholdas helymeghatározás

## Valódi anomália

- ▶ A valódi anomália ( $\nu$ )  $E$  ismeretében már könnyen meghatározható:

$$\sin(\nu) = \frac{\sqrt{1 - e_0^2} \sin E}{1 - e_0 \cos E}$$

$$\cos(\nu) = \frac{\cos E - e_0}{1 - e_0 \cos E}$$

$$\tan \nu = \frac{\sin \nu}{\cos \nu} = \frac{\sqrt{1 - e_0^2} \sin E}{\cos E - e_0}$$



# Műholdas helymeghatározás

## Műhold pozíció

- ▶ A műhold pozíciója a pálya síkján polár koordinátákban felírható a pályasugár ( $r_s$ ) és a hosszúsági szög ( $\Phi$  segítségével)

- ▶  $r_s = a(1 - e_0 \cos E)$

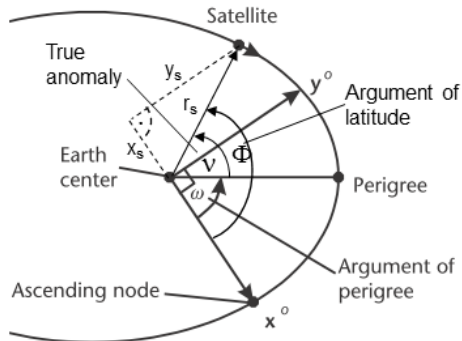
- ▶  $\Phi = \omega + \nu$

- ▶ A pozíció Descartes koordináta rendszerben

- ▶  $x_s = r_s \cos \Phi$

- ▶  $y_s = r_s \sin \Phi$

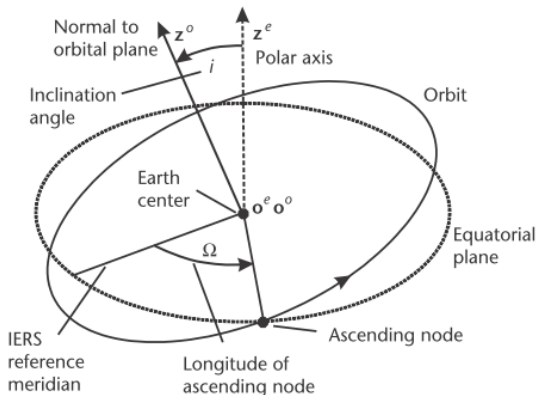
- ▶  $z_s = 0$



# Műholdas helymeghatározás

## Műhold pozíció transzformáció

- ▶ A műhold pozíciójára nekünk ECEF koordinátákban van szükségünk
- ▶ Ehhez a pálya koordináta rendszerét el kell forgatnunk  $z^o$  mentén  $\Omega$ -val, majd  $x^o$  mentén  $i$ -vel



# Műholdas helymeghatározás

## Műhold pozíció transzformáció

- ▶ Figyelembe kell vennünk a föld forgási sebességét

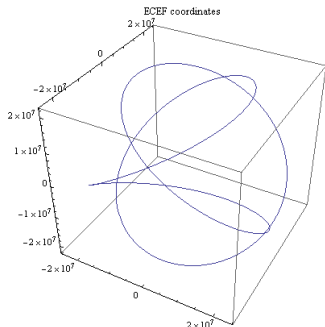
- ▶  $\omega_{ie} = 7.292115 * 10^{-5} \text{rad/s}$

- ▶  $\Omega = \Omega_0 - \omega_{ie}(\Delta t + t_{oe}) + \dot{\Omega}_d \Delta t$

- ▶  $i = i_0 + \dot{i}_d \Delta t$

- ▶ Alkalmazva az Euler-transzformációt

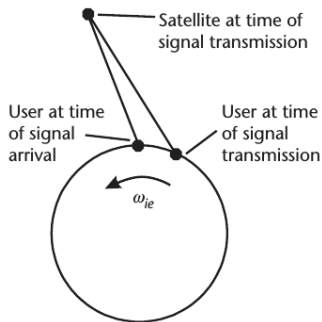
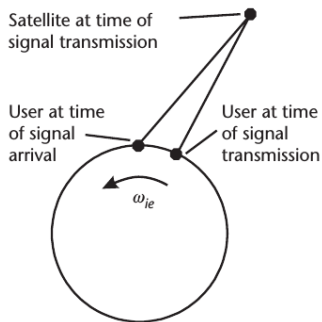
$$C_o^e = \begin{pmatrix} \cos \Omega & -\cos i \sin \Omega & \sin i \sin \Omega \\ \sin \Omega & \cos i \cos \Omega & -\sin i \cos \Omega \\ 0 & \sin i & \cos i \end{pmatrix}$$



# Műholdas helymeghatározás

## Korrekció

- ▶ Valódi távolsághoz figyelembe kell venni a föld forgásának hatását a jelterjedésre
- ▶ A jelterjedési sebesség csak inerciális rendszerben állandó  $\rightarrow$  ECI-ben lehet vele számolni:  $\rho_{T,j} = |r_j^i(t_{st,j}) - r_u^i(t_{sa})|$
- ▶ Mivel ECEF-ben kényelmesebb számolni, ezért a forgás kompenzálására (Sagnac) korrekciót alkalmaznak



# Helymeghatározó rendszerek

- ▶ GPS (Global Positioning System)
  - ▶ USA, 1993-
  - ▶ 24 műhold, 26.600 km
- ▶ GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema)
  - ▶ USSR-Oroszország, (1996-)2011-
  - ▶ 24 műhold, 25.600 km
- ▶ Galileo
  - ▶ ESA (European Space Agency), 2019-
  - ▶ 27 műhold, 23.222 km

# Helymeghatározó rendszerek

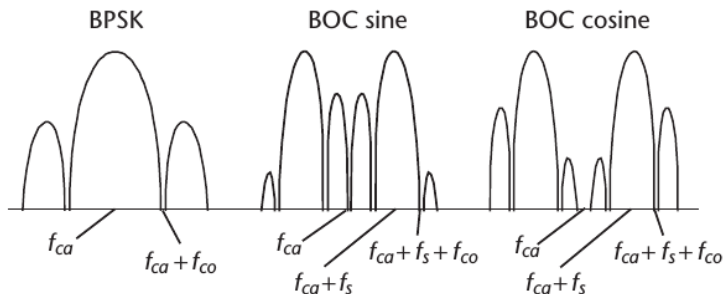
## Jelek

- ▶ Hagyományos (legacy) jelek (C/A): BPSK moduláció
  - ▶  $s(t) = \sqrt{2P}C(t)D(t) \cos(2\pi f_{ca}t + \phi_{ca})$
  - ▶  $f_d$  (data rate): 50-500 symbol/sec
  - ▶  $f_{co}$  (spreading code rate): 0.511-10.23 MChip/sec
  - ▶ Egyszerű szinkronizáció, de nagyobb a hamis korreláció esélye
- ▶ Új generációs jelek: BOC moduláció, többretegű kód
  - ▶  $s(t) = \sqrt{2P}S(t)C(t)D(t) \cos(2\pi f_{ca}t + \phi_{ca})$
  - ▶  $S(t)$ :  $f_s$  frekvenciájú alvivő
  - ▶ jel kétoldali szórása  $f_{ca} \pm f_s$  frekvenciára ( $f_s > f_{co}$ )
  - ▶ Nem inteferál a BPSK jelekkel
  - ▶ Hosszabb chip-sorozat, jobb szinkronizáció
  - ▶ Jobb interferencia tűrés
- ▶  $\text{BOC}(f_s, f_{co})$  [ $\times 1.023 * 10^6$  Hz]
- ▶  $\text{BOC}(1,1) \equiv \text{BOC}(1.023 \text{ MHz}, 1.023 \text{ MHz})$

# Helymeghatározó rendszerek

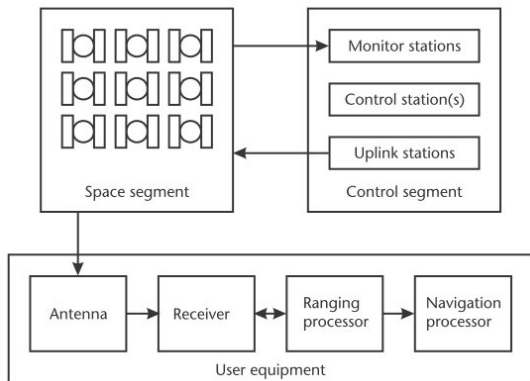
## Jelek spektruma

- ▶  $BOC_s(f_s, f_{co})$ : szinusz fázisú
- ▶  $BOC_c(f_s, f_{co})$ : koszinusz fázisú



# Helymeghatározó rendszerek

## Architektúra



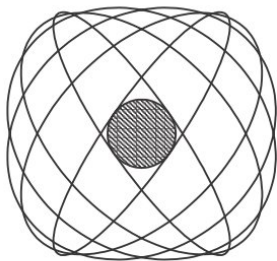
- ▶ Monitor st.
  - ▶ Hálózat
  - ▶ Szinkron órák
  - ▶ Adatgyűjtés, kalibráció → control st.
- ▶ Control st.
  - ▶ Néhány db.
  - ▶ Nav. üzenet, poz. megh. → műholdak
- ▶ Uplink st.
  - ▶ Üzenetek továbbítása



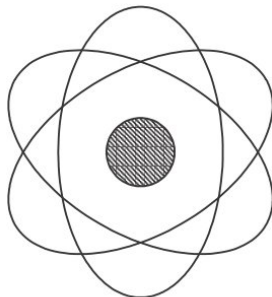
# Helymeghatározó rendszerek

## GPS

- ▶ 24 (max 36) műhold
- ▶ 3 fő generáció (Block I-II-III)
- ▶ 6 különböző pálya,  $60^\circ$  hosszúságú köökkel
- ▶ Inklináció  $55^\circ$
- ▶ Mindegyik pályán min. 4 műhold van
- ▶ A föld minden pontján min. 5 műhold látható



Viewed from equatorial plane



Viewed from pole

- ▶ GPS kommunikáció 3 frekvencián történik
  - ▶ Link 1 (L1): 1575.42 MHz
  - ▶ Link 2 (L2): 1227.60 MHz
  - ▶ Link 3 (L3): 1176.45 MHz
  - ▶ Kétoldali sávszélesség: 30.69 MHz
- ▶ Két szolgáltatás
  - ▶ Publikus (Standard Positioning Service, SPS)
  - ▶ Privát (Precise Positioning Service, PPS)
- ▶ 10 jel, a két alapvető:
  - ▶ C/A (Coarse/Acquisition), elérhető pontosság kb. 3.8m(h) - 6.2 (v)
  - ▶ P(Y) (Precise/Encrypted Precise), elérhető pontosság kb. 1.2m(h) - 1.9m(v)

# Helymeghatározó rendszerek

## GPS

**Table 6.1** Past, Present, and Future Generations of GPS Satellites

<i>GPS Satellite Block</i>	<i>Launch Dates</i>	<i>Number of Satellites</i>
Block I	1978–1985	10 (Note 1)
Block II	1989–1990	9
Block IIA	1990–1997	19
Block IIR	1997–2004	12 (Note 1)
Block IIR-M	2005–2008	8
Block IIF	From 2008	12–16
Block III	From 2011–2013	24 (planned)

Note 1: Excludes failed launches.

- ▶ Block IIA - momentum management
- ▶ Block IIR ("replenishment") - navigációs adatok frissítése saját mérések alapján
- ▶ Block IIR-M (modernized replenishment) - M-kód
- ▶ Block IIF (follow-on): új L5 SPS jelek, 2010-2016-ig 12 műhold
- ▶ Block III: Új L1 SPS BOC jelek, 2017-

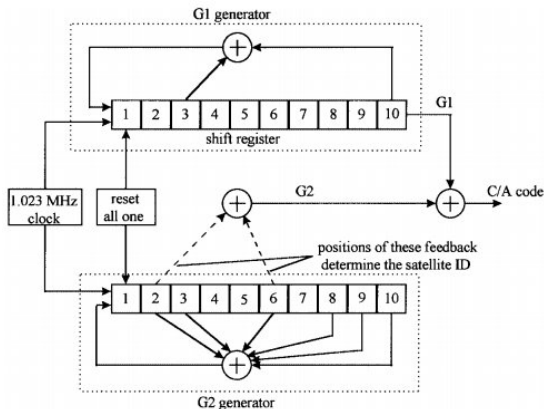
<i>Signal</i>	<i>Band and Carrier Frequency (MHz)</i>	<i>Service</i>	<i>Modulation and Chipping Rate (<math>\times 1.023 \text{ Mchip s}^{-1}</math>)</i>	<i>Navigation Message Rate (<math>\text{symbol s}^{-1}</math>)</i>	<i>Minimum Received Signal Power (dBW)</i>	<i>Satellite Blocks</i>
C/A	L1, 1575.42	SPS/PPS	BPSK 1	50	-158.5	All
P(Y)	L1, 1575.42	PPS	BPSK 10	50	-161.5	All
M code	L1, 1575.42	PPS	BOC <sub>s</sub> (10,5)	Note 2	Note 2	From IIR-M
L1C-d	L1, 1575.42	PPS	BOC <sub>s</sub> (1,1) Note 1	100	-163	From III
L1C-p	L1, 1575.42	PPS	BOC <sub>s</sub> (1,1) Note 1	None	-158.3	From III
L2C	L2, 1227.60	SPS	BPSK 1	50	-160	From IIR-M
P(Y)	L2, 1227.60	PPS	BPSK 10	50	-164.5	All
M code	L2, 1227.60	PPS	BOC <sub>s</sub> (10,5)	Note 2	Note 2	From IIR-M
L5I	L5, 1176.45	SPS	BPSK 10	100	-158	From IIF
L5Q	L5, 1176.45	SPS	BPSK 10	None	-158	From IIF

- ▶ Az újabb jelek BOC (Binary Offset Carrier) modulációt használnak
- ▶ Többutas terjedésre kevésbé érzékeny

# GPS

## Gold-kód

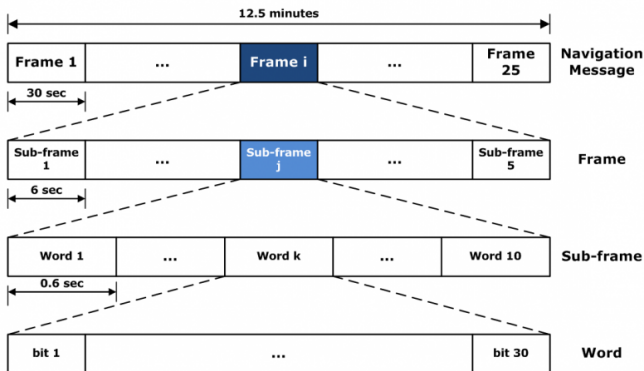
- ▶ Shift regiszterekkel állítható elő ( $n$  bit,  $10^n - 1$  periódus)
- ▶ C/A jel: 1023 minta hosszú Gold-kód, 1ms-ként ismétlődik
- ▶ P jel:  $6.19 \times 10^{12}$  hosszú kód(!), 10,23 Mhz-en ( $T=1$  hét)



# GPS

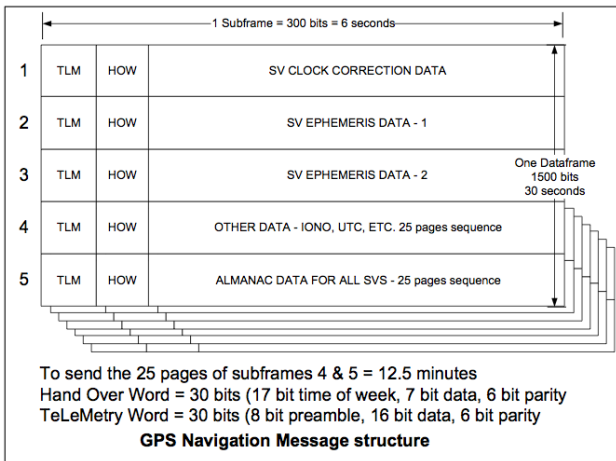
## Adatcsomag

- ▶ Az alap navigációs csomag mind a C/A, mind a P(Y) jelben
- ▶ 50 bit/s adatsebesség



# GPS

## Adatcsomag

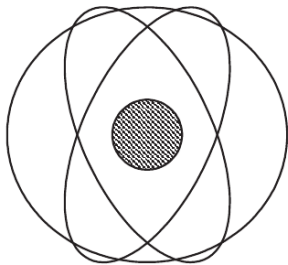


- ▶ TLM: preambulum
- ▶ HOW: 17 bit TOW (Time-of-Week) - eltelt 1.5s-ok száma a GPS hét kezdete óta

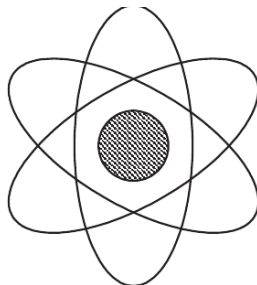
# Helymeghatározó rendszerek

## GLONASS

- ▶ 1995-2000, modernizáció, 2010-
- ▶ 24 (+3 tartalék) műhold
- ▶ 3 különböző pálya, 120° hosszúságú közőkkel
- ▶ Inklináció 64.8°



Viewed from equatorial plane



Viewed from pole



# GLONASS

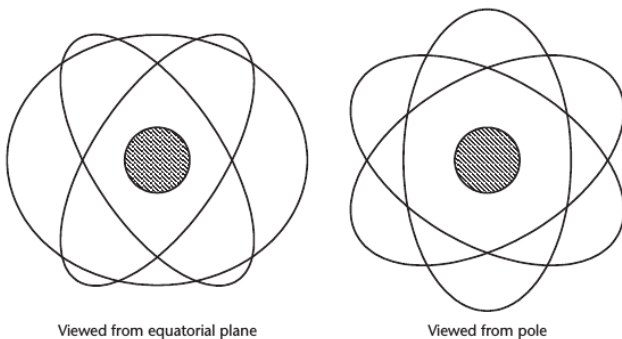
## Jelek

- ▶ L1 1592.95–1613.86 MHz
- ▶ L2 1237.83–1256.36 MHz
- ▶ C/A jel 511 hosszú, 1 kHz
- ▶ P jel 5.11 MHz
- ▶ FDMA elosztás
  - ▶ Minden műholdhoz tartozik csatorna szám ( $k = 1 \dots 12$ )
  - ▶ L1 frekvencia:  $1602 + 0.5625k \text{ MHz}$
  - ▶ L2 frekvencia:  $1246 + 0.4375k \text{ MHz}$
  - ▶ Azonos pályán levő műholdakhoz megegyező  $k$
- ▶ C/A, 50bit/s, 100bites sorok, 2.5perc periódus
- ▶ P, 50 bit/s, 12perc periódus
- ▶ Efemerisz paraméterek ECEF koordinátákban

# Helymeghatározó rendszerek

## Galileo

- ▶ E.U. finanszírozza, csak civil felhasználásra
- ▶ 27 műhold
- ▶ 3 különböző pálya,  $120^\circ$  hosszúságú közőkkel
- ▶ Minden pályán 9 műhold egyenletesen elosztva
- ▶ Inklináció  $56^\circ$



# Helymeghatározó rendszerek

Galileo

- ▶ In-Orbit Validation (IOV) fázis: 2011-2012, 2-2 műhold
- ▶ Full Operational Capability (FOC) fázis
  - ▶ Sat5-6, 2014.08.
  - ▶ Sat7-12, 2015 (3 indítás)
  - ▶ Sat13-14, 2016.05.
  - ▶ Sat15-18, 2016.11.14 - az első alkalom, hogy 4 műholdat juttattak fel egyszerre! → Ariane 5 rakéta
  - ▶ Sat19-22, 2017
  - ▶ Sat 23-, 2018

# Helymeghatározó rendszerek - Galileo

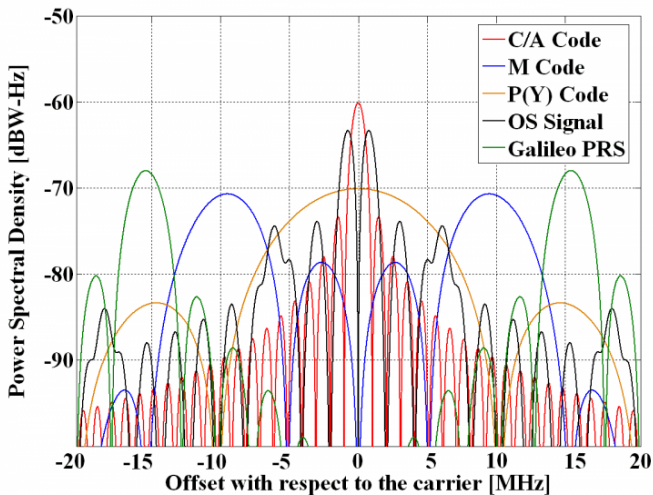
## Jelek

- ▶ E1 sáv (open service): MBOC (Multiplexed binary offset carrier) moduláció
- ▶ Ennek egy implementációja a CBOC (Composite Binary Offset Carrier)

$$\Phi_{MBOC(6,1)}(f) = \frac{10}{11}\Phi_{BOC_s(1,1)}(f) + \frac{1}{11}\Phi_{BOC_s(6,1)}(f)$$

# Helymeghatározó rendszerek - Galileo

Jelek

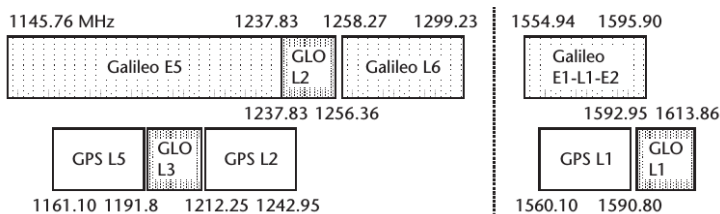


- ▶ Szolgáltatások:
  - ▶ Open Service (OS)
  - ▶ Safety-of-life (SOL) service
  - ▶ Commercial Services (CS)
  - ▶ Public regulated service (PRS)
  - ▶ Search-and-rescue (SAR) service
- ▶ 3 frekvencián 10 jel
- ▶ Adatcsomag GPS-hez hasonló formátumú, nagyobb felbontású
  - ▶ FNAV (Free), 25 bit/s
  - ▶ INAV (Integrity), 125 bit/s
  - ▶ CNAV (Commercial), 500 bit/s

# Helymeghatározó rendszerek

## Kompatibilitás

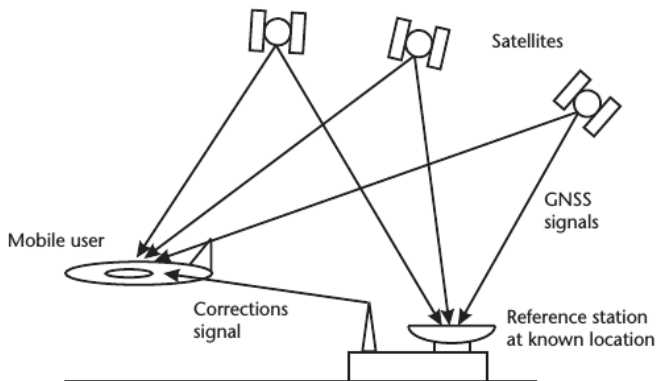
- ▶ GPS-GLONASS teljesen különálló frekvenciák
- ▶ GPS-Galileo átfedés L1-ben, probléma
- ▶ GLONASS L3 - Galileo L5b: nagy kódhosszak miatt nem probléma



# Helymeghatározó rendszerek

## Kiterjesztés

- ▶ Differenciális GNSS (DGNSS)
- ▶ Földi referencia adó
- ▶ Kalibráció, pontosság növelése





# Földi navigációs rendszerek

- ▶ LORAN (Long Range Navigation)
- ▶ Iránytű, fajtái
- ▶ Repülőgépes navigáció alapok
- ▶ Repülőgépes navigációs rendszerek
  - ▶ NDB (Non Directional Beacon)
  - ▶ VOR (VHC Omnidirectional Range)
  - ▶ DME (Distance Measuring Equipment)
  - ▶ ILS (Instrumental Landing System)

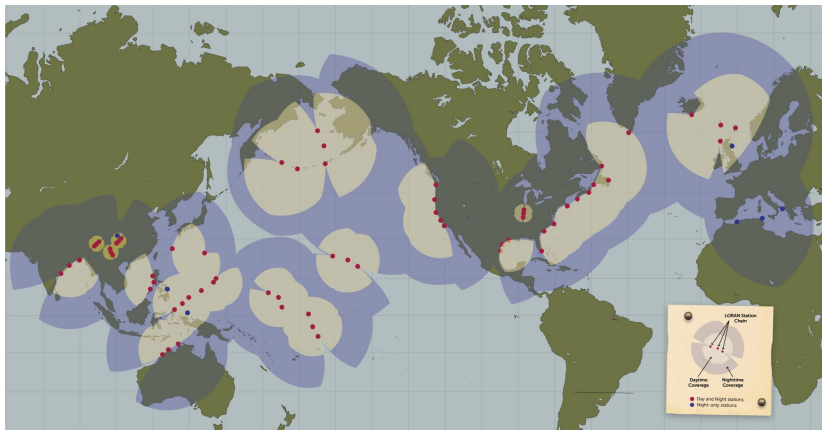
# Földi navigációs rendszerek

## Long Range Navigation (LORAN)

- ▶ Amerikai parti őrség fejlesztette ki
- ▶ 1957- katonai felhasználás, civil hozzáférés 1970- (elsősorban hajókon)
- ▶ Utolsó generáció LORAN-C 1980-
- ▶ TDOA elven működik (hiperbolikus), legalább 3 mérés
- ▶ Nagy hatótávolság ( $> 1000$  km)
- ▶ 100kHz vivőfrekvencia
- ▶ 1990- a GPS elterjedésével egyre kevésbé használták, de nem szűnt meg
- ▶ 2015-ben végleg le lett állítva

# Földi navigációs rendszerek - LORAN-C

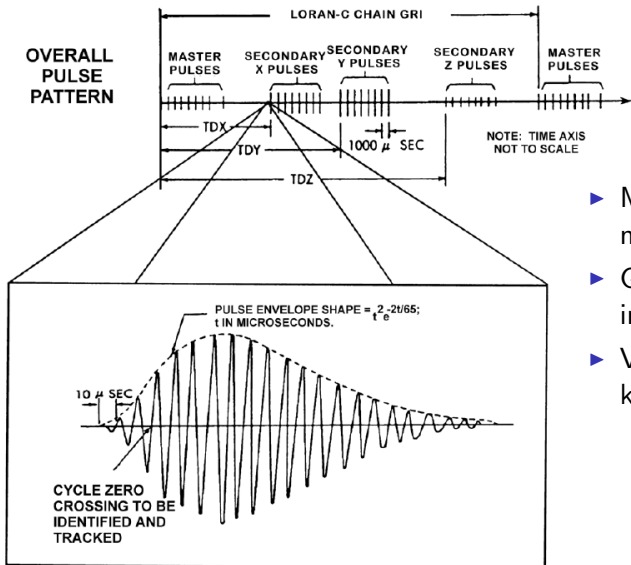
## Lefedettség



- ▶ 28 adólánc
- ▶ Jó lefedettség a partok közelében

# Földi navigációs rendszerek - LORAN-C

## Jelek

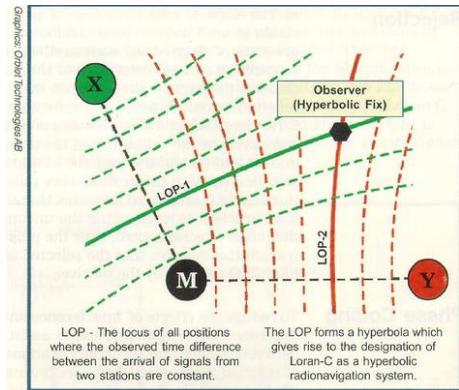


- ▶ Mester 9 impulzus, másodlagos 8 impulzus
- ▶ GRI: group repetition interval - a lánc ID-je
- ▶ Vételi idő: 3. nulla keresztezés

# Földi navigációs rendszerek - LORAN-C

## Trilateráció

- ▶ Független adó láncok: 1 mester (M) + min. 2 másodlagos állomás (X,Y)
- ▶ M, X, Y közvetlen összeköttetésben vannak → időszinkron
- ▶ A vevő 3 jelet vesz  $t_M$ ,  $t_X$ ,  $t_Y$  időpillanatokban
- ▶  $\mathbf{r}_{MO} - \mathbf{r}_{XO} = c(t_M - t_X)$  hiperbola egyenlet



# Földi navigációs rendszerek - LORAN-C

## Tulajdonságok

- ▶ A legtovább működő navigációs rendszer
- ▶ Elérhető pontosság: 20-90m (távolságfüggő)
- ▶ SNR függ atmoszferikus tényezőktől, időjárástól
- ▶ Legnagyobb pontosság a tengeren

# Légi navigáció

- ▶ A légi navigációs eljárásokat az ICAO (International Civil Aviation Organization) szabályozza - az ENSZ szervezete, a világ minden részén elismerik
- ▶ ICAO kódok: repterek, légitársaságok, fónia, térkép
- ▶ Légi navigáció két típusa:
  - ▶ Látvarepülési szabályok (Visual Flight Rules - VFR) - nappal, megfelelő időjárás esetén, bizonyos légterekben
  - ▶ Műszerrepülési szabályok (Instrumental Flight Rules - IFR)
- ▶ Tradicionális navigációs rendszerek: NDB, VOR, DME, ILS
- ▶ Ezeket napjainkban is alkalmazzák IFR navigációra
- ▶ GNSS rendszerek: többnyire ellenőrzésre

# Légi navigáció

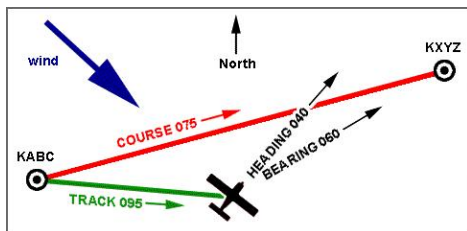
## Légiforgalmi térkép





# Légi navigáció

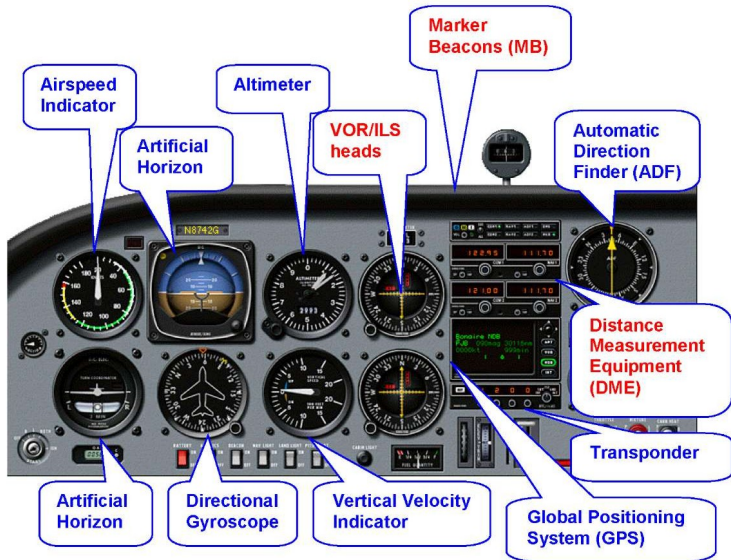
## Írányzőgek



- ▶ Géptengely irányszög (heading, HDG): gép hossz tengelye - É által bezárt szög
- ▶ Célibírányző (bearing): célpont látási szöge a géptől É-hoz képest
- ▶ Térképbírányző (course): kurzus irányszöge É-hoz képest
- ▶ Tényleges repülési irányszög (track) - gép nyomvonala - É által bezárt szög

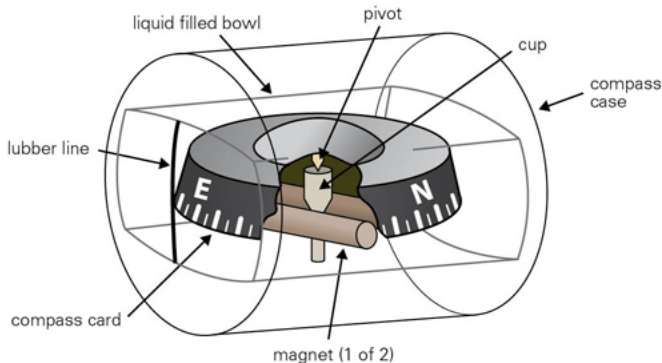
# Légi navigáció

## Navigációs műszerek



# Légi navigáció

## Hagyományos Mágneses iránytű



- ▶ Előny: csak mechanikus alkatrészek
- ▶ Hátrány: csak vízszintes repülésnél használható, hibaforrások

# Légi navigáció

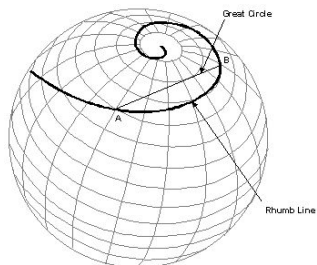
## Mágneses iránytű hibái

- ▶ A mágnesen iránytű a legegyszerűbb navigációs eszköz, de sok a hibaforrás
- ▶ Fém alkatrészek megzavarják - iránytű **deviáció**
- ▶ A föld mágneses erőtere nem homogén, a mágneses sarkok nem esnek egybe a földrajzi sarkokkal - mágneses **deklináció** (lásd köv. dia) → helyhez kötött kompenzáció kell
- ▶ A sarkokhoz közeledve az iránytű lehajlik - mágneses **inklináció** - ellensúlyal kompenzálják → helyfüggőség
- ▶ Forduló, gyorsulás, hosszdőlés közben pontatlan

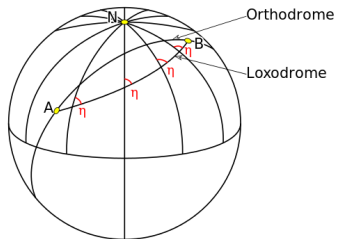
# Légi navigáció

## Íránytű alapú navigáció

- ▶ Állandó irányszögű navigáció által leírt kurzus a loxodróma
- ▶ Loxodroma: minden hosszúsági kört azonos szögben metsző vonal
- ▶ Két pont közt nem ez a legrövidebb út
- ▶ Csak kis távolságokra használható
- ▶ Ortodroma: két pont közti legrövidebb távolság a két pontra illeszkedő főkör mentén



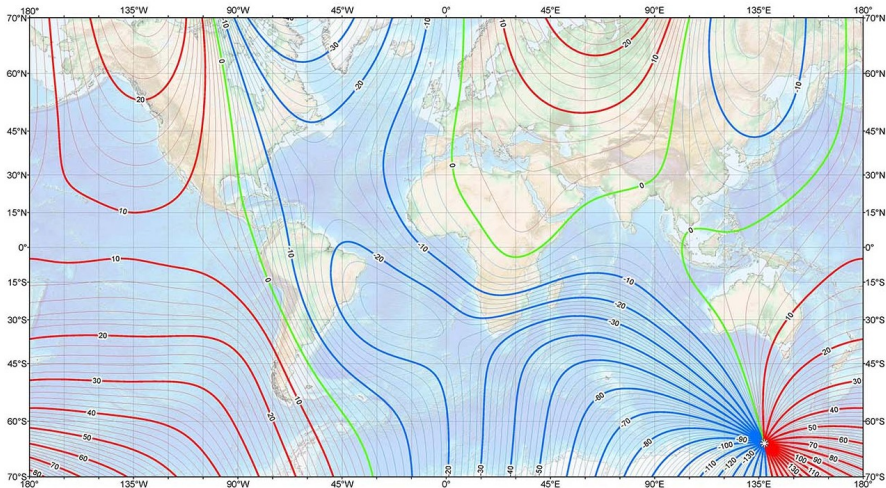
The great circle is a straight line and the Rhumb line is a spiral curve



# Légi navigáció

## Mágneses Deklináció

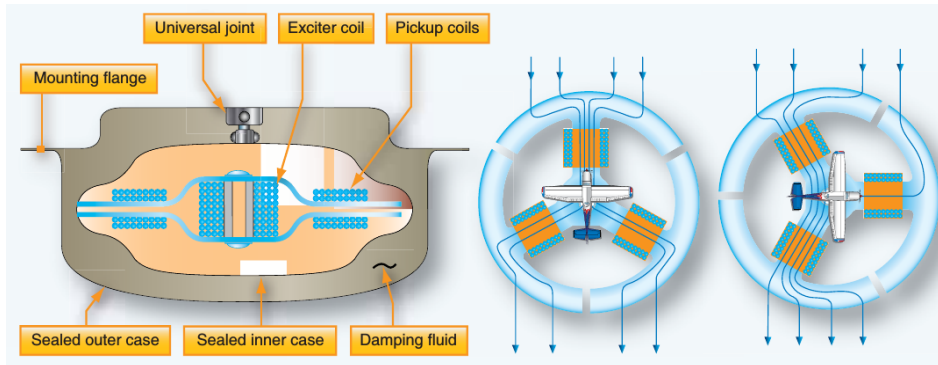
US/UK World Magnetic Model -- Epoch 2010.0  
Main Field Declination (D)



# Légi navigáció

## Modern iránytűk

- ▶ Giroszkópos elfordulásjelző - relatív elfordulás érzékelése, idővel integrális hiba
- ▶ Mágnesen fluxus méréssel kompenzált iránytű: giroszkópos iránytű fluxus mérő áramkörrel kompenzálva



# Légi navigáció

## Elfordulásjelző és elektromos iránytű



- ▶ Giroszkópos elfordulásjelző
- ▶ 2 tekerő: irány kompenzáció, és referencia irány



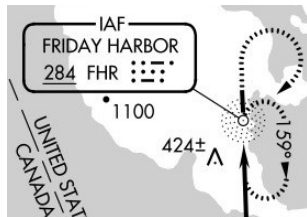
- ▶ Elektromos iránytű
- ▶ Mágneses kompenzációs csavarok



# Légi navigáció

## Non-Directional Beacon (NDB)

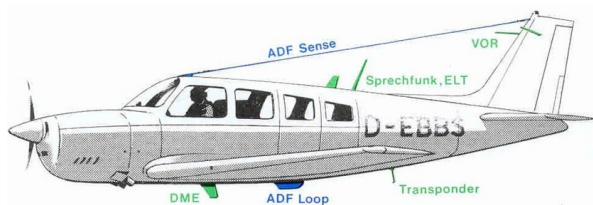
- ▶ Nem irányított jeladó (körsugárzó)
- ▶ 3 betűs kód és morse-kód
- ▶ Légi és vízi navigáció
- ▶ 190-1800 kHz
- ▶ Nagy hatótávolság (alacsonyan is)
- ▶ Olcsó, megbízható
- ▶ Önmagában már ritkán található meg (útvonalpontok)



# Légi navigáció

## Non-Directional Beacon (NDB)

- ▶ Egyszerű AM jel
- ▶ Két antenna: érzékelő(sense) és hurok(loop)
- ▶ Loop: irány érzékelés (180°-ra)
- ▶ Sense: irány (térfél) ellenőrzés
- ▶ Kezdetben forgó loop antenna
- ▶ Manapság antenna tömbök
- ▶ Jel maximum helyett minimum keresés



# Légi navigáció

## Non-Directional Beacon (NDB)

### ▶ Hátrányok:

- ▶ Távolság és irány nem ismert (kursus követés nem lehet)
- ▶ LOS érzékenység: hegyek, viharfelhők
- ▶ Éjszaka effektus: visszaverődések csökkentik a hatótávolságot
- ▶ Az adóhoz közeledve nő az érzékenység (túlmanőverezés)



# Légi navigáció

## Automatic Direction Finder

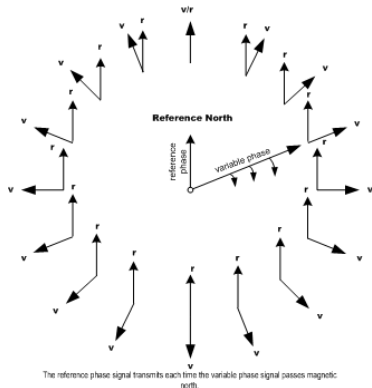


- ▶ NDB navigációs műszer
- ▶ Radio Direction Finder (RDF) + iránytű együttese
- ▶ Forgó tárcsa és mutató

# Légi navigáció

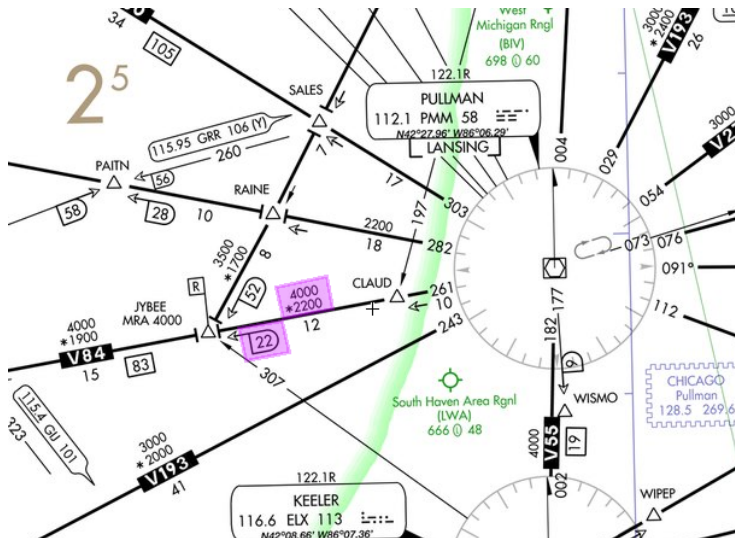
## VOR

- ▶ VOR = VHF Omnidirectional Range
- ▶ 108-117.95 MHz (repülősávós frekvenciatartomány)
- ▶ NDB-nél kisebb hatótávolság, de nagyobb pontosság
- ▶ 2 jel sugárzás: irányítatlan referencia jel, irányított másodlagos jel
- ▶ Irányított forgó antenna (30/sec)
- ▶ Irányított jel fáziseltolás = forgó antenna szöge
- ▶ Két jel fáziseltolódása → az adó iránya → irányszög tartás



# Légi navigáció

## VOR navigáció



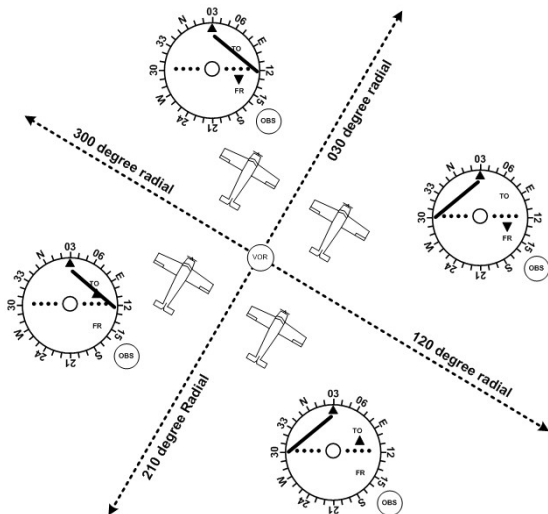
# Légi navigáció

## VOR CDI



# Légi navigáció

## VOR kurzus

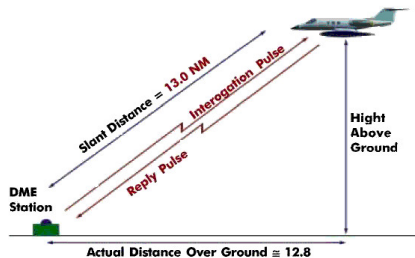




# Légi navigáció

## DME

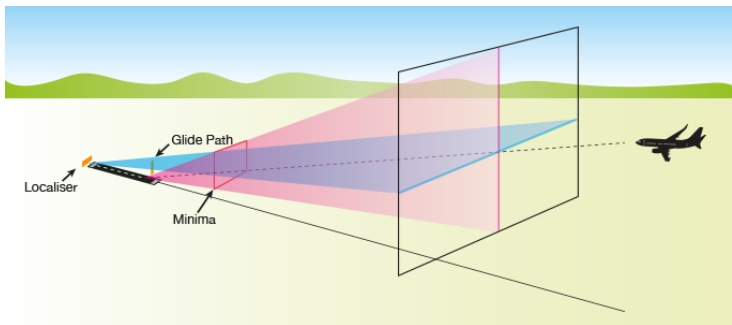
- ▶ DME = Distance Measuring Equipment
- ▶ UHF adóvevő (978-1213 Mhz)
- ▶ Többnyire VOR adók része (kapcsolódó frekvenciák)
- ▶ A repülőgép meghatározott mintázatú pulzus-sorozatot küld ki
- ▶ A DME állomás 50 $\mu$ s késlettel visszaküldi a jelet
- ▶ A repülőgép vevője meghatározza a jelterjedési időből a távolságot
- ▶ Probléma: nem légvonalbeli távolság!



# Légi navigáció

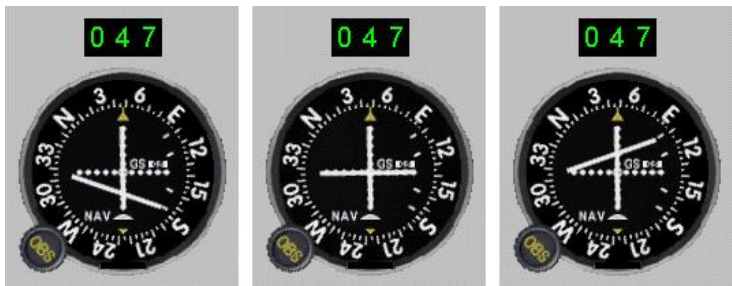
## ILS

- ▶ ILS - Instrumental Landing System - Műszeres leszállító rendszer
- ▶ Két rendszer ötvözetete:
  - ▶ Pálya irányadó (Localizer - LOC)
  - ▶ Siklopálya jeladó (Glide Slope Indicator - G/S) - 3°



# Légi navigáció

## ILS műszer



- ▶ 2 külön CDI a függőleges és vízszintes eltérésre

## Források 1.

- ▶ Paul D. Groves: Principles of GNSS, Inertial and Multisensor Integrated Navigation Systems
- ▶ Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegarty: Understanding GPS, Principles and Applications, Second Edition
- ▶ Global Positioning System, Standard Positioning Service, Signal Specification, Second Edition, online: <http://www.gps.gov/technical/ps/1995-SPS-signal-specification.pdf>
- ▶ Global Positioning System (GPS) Time Dissemination for Real-Time Applications, online: [http://www.pdana.com/phdwww\\_files/rtgps.pdf](http://www.pdana.com/phdwww_files/rtgps.pdf)
- ▶ James Bao, Yen Tsui: Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach
- ▶ Navipedia: <http://www.navipedia.net/>

## Források 2.

- ▶ European GNSS (Galileo), Open Service, Interface Control Document, <https://www.gsc-europa.eu/gnss-markets/segments-applications/os-sis-icd>
- ▶ E. Lohan et al: Complex Double-Binary-Offset-Carrier modulation for a unitary characterization of Galileo and GPS signals
- ▶ Jose-Angel Avila-Rodriguez et al: The MBOC Modulation: The Final Touch to the Galileo Frequency and Signal Plan
- ▶ Maritime Safety Information, publications, LORAN navigation: [http://msi.nga.mil/MSISiteContent/StaticFiles/NAV\\_PUBS/APN/Chapt-12.pdf](http://msi.nga.mil/MSISiteContent/StaticFiles/NAV_PUBS/APN/Chapt-12.pdf)
- ▶ FAA: Chapter 10 - Aircraft Navigation Systems: [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aircraft/amt\\_airframe\\_handbook/media/ama\\_ch10.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/ama_ch10.pdf)