

Strokovno usposabljanje: PROGRAM vseživljenjskega učenja z MIKRODOKAZILI

Pozicioniranje, navigacija in prenos časa v digitalni družbi

prof. dr. Boštjan Batagelj



<https://lso.fe.uni-lj.si/GNSS/content.php>

9. junij 2025, 8:15 – 10:00



Kdo sem?

- 25 let zaposlen na Fakulteti za elektrotehniko (*izredni profesor, prodekan za znanstveno-raziskovalno delo*)
- raziskovalno delo opravljam v Laboratoriju za sevanje in optiko, kjer se ukvarjam s fizičnim nivojem prenosnih in dostopovnih telekomunikacijskih omrežij, zasnovanih na radijski in optični tehnologiji
- sem (so)avtor več kot 400 znanstvenih in strokovnih člankov https://www.researchgate.net/profile/Bostjan_Batagelj
- izumitelj pri dvanajstih patentnih
- soustanovitelj dveh zagonskih podjetij s področja mikrovalovnih in optičnih tehnologij



- organizator strokovnih seminarjev Optične komunikacije in Radijske komunikacije



- član (*senior member*) mednarodnih društev OPTICA ter IEEE Photonics in IEEE ComSoc



- član tehničnih odborov na SIST za Storitve in protokole v omrežjih in Mobilne komunikacije
- podpredsednik Slovenskega društva za elektronske komunikacije

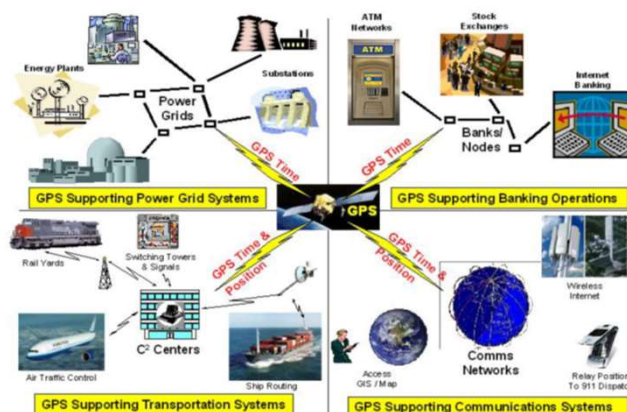


Vsebina

- Zgodovina radio-navigacije in radio lokacije
- Kotna radio-navigacija – triangulacija
- Radionavigacija ρ - ρ in ρ - θ
 - Zemeljska radionavigacija: pomorska (LORAN), zrakoplovna (VOR, DME), določanje položaja preko sistemov mobilne telefonije.
- Hiperbolična radio-navigacija
 - Satelitska radionavigacija
 - Dopplerjevi sistemi Transit in Cikada
 - Globalni 3-D sistemi GPS, GLONASS in GALILEO
- Lociranje satelita na tirnici iz Zemlje
- Motnje tirnic umetnih satelitov
- Izvori napak pri GNSS
- Izboljšave satelitskega hiperboličnega radio-navigacijskega sistema
- Bodočnost navigacijskega sistema

Pomen satelitskih in navigacijskih sistemov za digitalno družbo

- V primeru naravnih katastrof in nesreč človeškega vzroka so satelitske komunikacije in navigacijske storitve ključne za civilno zaščito in reševanje.
- Satelitske komunikacije so:
 - zmožne izvesti nujne komunikacije,
 - zelo robustne,
 - fizično vzdržljive,
 - najboljše za redundanco.



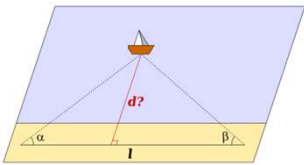
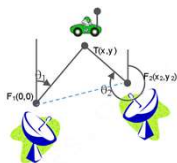


Triangulacija in trilateracija

- **Triangulacija** je način določanja lege triangulacijske točke s pomočjo trikotniških pravil in dveh točk z znanima koordinatama.

theta-theta

$$y = \frac{y_2 \cdot \tan(\theta_2) - x_2}{\tan(\theta_2) - \tan(\theta_1)}$$
$$x = y \cdot \tan(\theta_1)$$

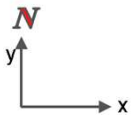
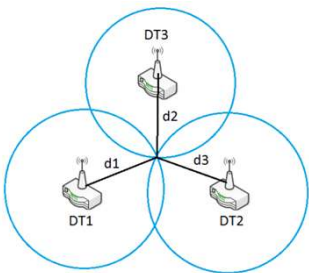
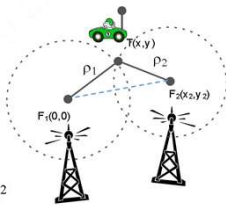


Primer:
Izračun oddaljenosti ladje od obale.

- **Trilateracija** je način določanja lege trilateracijske točke s pomočjo presečišč navideznih krožnic, ki jih okoli svetilnikov tvorijo izračunane vrednosti razdalj.

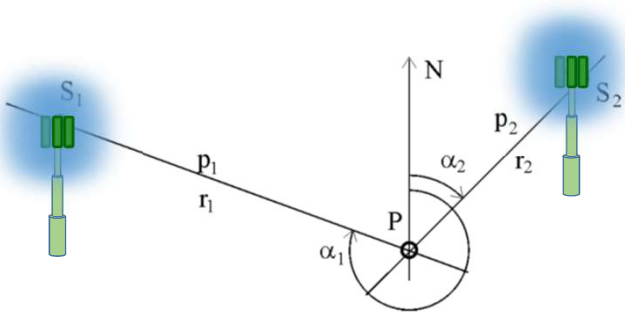
rho-rho

$$\rho_1^2 = x^2 + y^2$$
$$\rho_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2$$



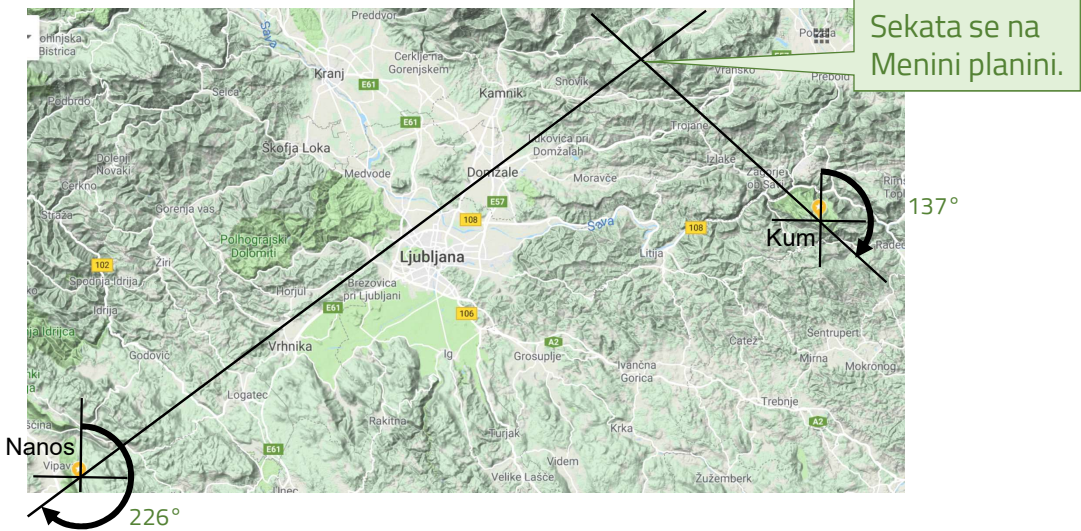
Postopki za določanje trenutnega položaja s pomočjo dveh azimutov (sistemi theta-theta)

- S_1 in S_2 sta znana svetilnika
- izmerimo azimuta



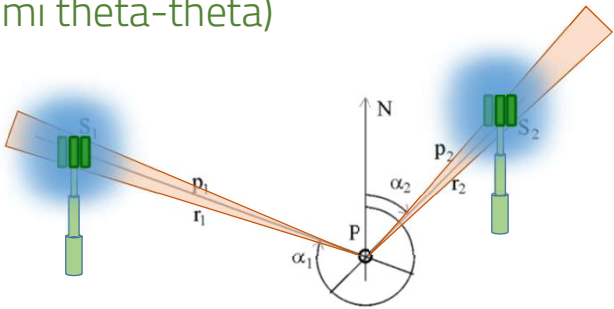
Primer kotne radionavigacije

- Na izletu vidimo antenska stolpa na Nanosu in Kumu.
- S pomočjo kompasa določimo njuna azimuta 226° in 137° .



Postopki za določanje trenutnega položaja s pomočjo dveh azimutov (sistemi theta-theta)

- S_1 in S_2 sta znana svetilnika
- izmerimo azimuta



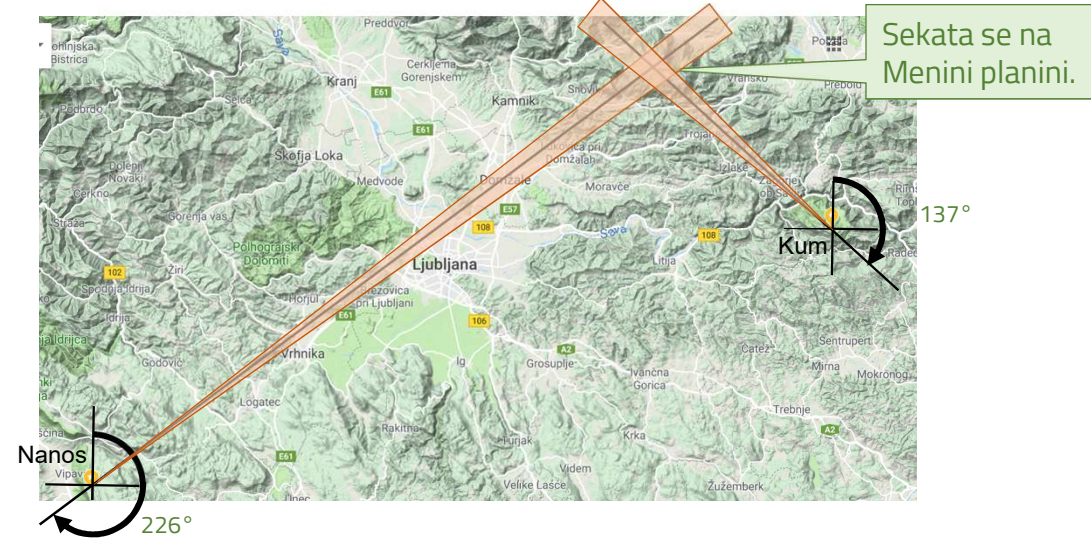
Primer: Določite pogrešek položaja pri sistemu, kjer se azimut določi s pogreškom $\pm 1^\circ$. Svetilnika vidimo pod pravim kotom in sta od nas oddaljena 50 km.

$$\Delta P = r \cdot \sin(\Delta\alpha) \cong r \cdot \Delta\alpha = 50\,000\,\text{m} \cdot (\pm 1^\circ) \cdot \frac{\pi}{180^\circ} = \pm 873\,\text{m}$$

- Pogrešek razdalje je sorazmeren oddaljenosti.
- Taki sistemi pri določanju položaja niso prav natančni.
- Če sta premici p_1 in p_2 pravokotni je pogreškovna elipsa najmanjša.

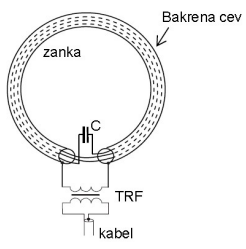
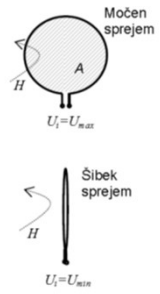
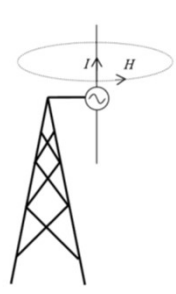
Primer kotne radionavigacije

- Na izletu vidimo antenska stolpa na Nanosu in Kumu.
- S pomočjo kompasa določimo njuna azimuta 226° in 137° .



Ugotavljanje položaja z majhno krožno zanko

- Za neusmerjene svetilnike uporabimo srednjevalovne oddajnike.
- Za sprejemnik uporabimo majhno krožno zanko.



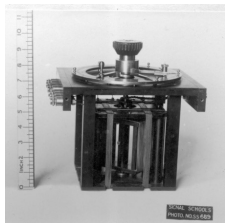
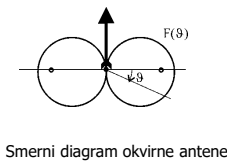
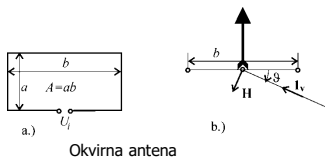
- Zanka najmočnejše sprejema, ko je njena os pravokotna na smer proti srednjevalovnem oddajniku se izmeri azimut.

- Ker so lokacije oddajnikov poznane, na zemljevidu določimo svoj položaj.
- Iz pogreška na kotomeru ocenimo pogrešek pri položaju.



Začetki radionavigacije

- Določanje smeri (azimuta) na sprejemni strani, bodisi svetilnika (iz letala) bodisi letala (z zemlje)
- Določanja azimuta letal (oddajnik na letalu)
- SV 1915, KV 1930, UKV 1940
- Okvirna antena (~1910)
- Križna antena z goniometrom, radijski kompas (~1920)
- Neusmerjeni svetilnik (nondirectional radio beacon, NDB), 1939
- ZDA 200 – 1750 kHz, Evropa 255 – 415 kHz
- (Radialni let, Pearl Harbour)
- Označevalnik (marker beacon), 1939, 75 MHz



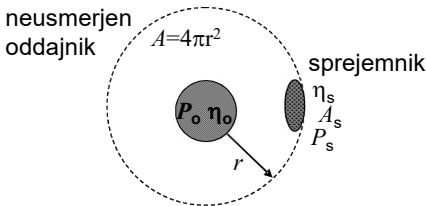
Goniometer



Prikazovalnik radijskega kompasa

Radijska zveza v praznem prostoru

- radijska zveza – elektromagnetno valovanje
- neionizirajoče sevanje je posledica pospešenega gibanja električnih nabojev



gostota pretoka moči

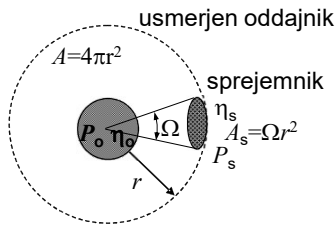
$$\vec{S} = \vec{I}_r \frac{P_o \cdot \eta_o}{4\pi r^2}$$

sprejeta moč

$$P_s = S \cdot A_s \eta_s = \frac{P_o \eta_o \cdot A_s \eta_s}{4\pi r^2}$$

Moč sprejetega signala je mogoče povečati:

- s povečanjem moči oddajnika
- z usmerjenostjo oddajnika



gostota pretoka moči

$$\vec{S} = \vec{I}_r \frac{P_o \cdot \eta_o}{A_s} = \vec{I}_r \frac{P_o \cdot \eta_o}{\Omega \cdot r^2}$$

sprejeta moč

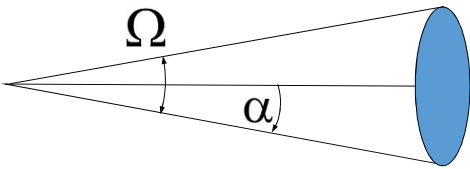
$$P_s = S \cdot A_s \eta_s = \frac{P_o \eta_o \cdot A_s \eta_s}{\Omega \cdot r^2}$$

Smernost (angl. directivity) oddajnika D je faktor povečanja gostote pretoka moči S v želeni smeri ob nespremenjeni moči oddajnika P_o .
Smernost pove koliko je primer z usmerjenim oddajnikom boljši od primera z izotropnim neusmerjenim oddajnikom

$$D = \frac{4\pi}{\Omega} \geq 1$$

$$D[\text{dBi}] = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\Omega} \right) \geq 0 \text{ dBi}$$

Prostorski kot

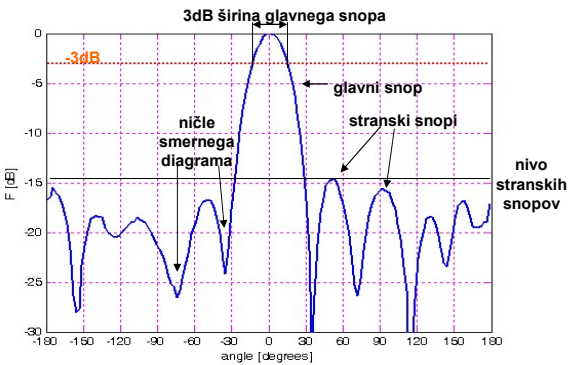


$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha)$$

polni ravninski kot $\alpha = 0 \dots \pi$ [radian=rd]

polni prostorski kot $\Omega = 0 \dots 4\pi$ [steradian=srd]

Značilni parametri smernega diagrama



$$D = \frac{4\pi |F(\theta_{\max}, \phi_{\max})|^2}{\int_{4\pi} |F(\theta, \phi)|^2 d\Omega}$$

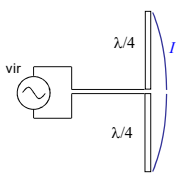
LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

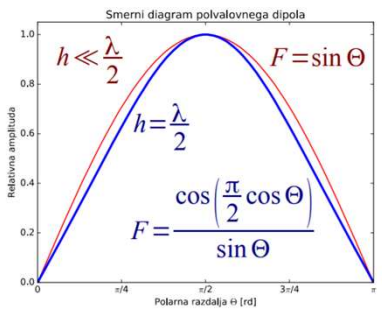
17 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Smernost $\lambda/2$ dipola

- Primer: Izračunajte smernost antene v obliki $\lambda/2$ dolge žice, ki največ seva bočno.


$$F(\theta, \varphi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta}$$

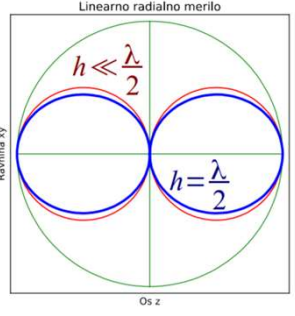
$$F(\Theta_{MAX} = \pi/2) = 1$$
$$D = \frac{4\pi}{\int_0^\pi \int_0^{2\pi} \left[\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \Theta\right)}{\sin \Theta} \right]^2 \sin \Theta d\Theta d\Phi}$$



Smerni diagram polvalovnega dipola

$h \ll \frac{\lambda}{2}$ $F = \sin \Theta$

$h = \frac{\lambda}{2}$ $F = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \Theta\right)}{\sin \Theta}$



Linearno radialno merilo

$h \ll \frac{\lambda}{2}$ $h = \frac{\lambda}{2}$

$$D = \frac{4\pi}{2\pi I_{\lambda/2}} = \frac{2}{1.218827} = 1.640922$$
$$D_{\text{dBi}} = 10 \log_{10} 1.640922 = 2.150879 \text{ dBi}$$

$D = 1,64 = 2,15 \text{ dBi}$

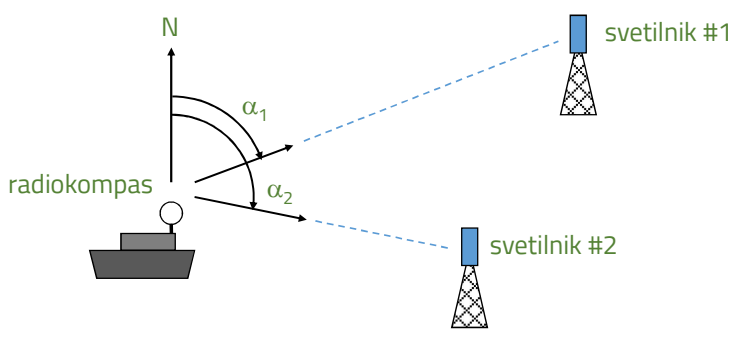
LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

18 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Neusmerjen svetilnik

- Non-directional (radio) beacon (NDB), leta 1939
- ZDA 200 – 1750 kHz, Evropa 255 – 415 kHz
- Za določitev azimuta neusmerjenega svetilnika potrebujemo na sprejemni strani (uporabnik) vrtljivo usmerjeno anteno.



N

radiokompas

α_1

α_2

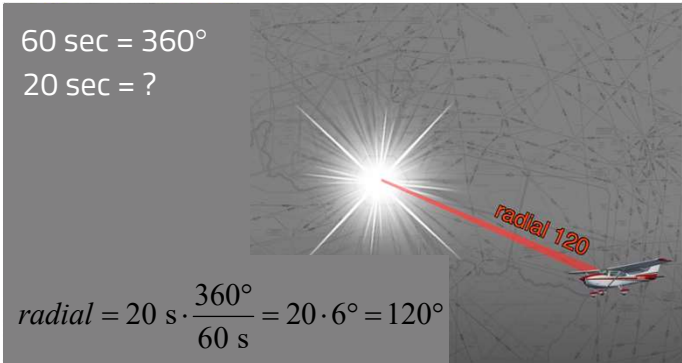
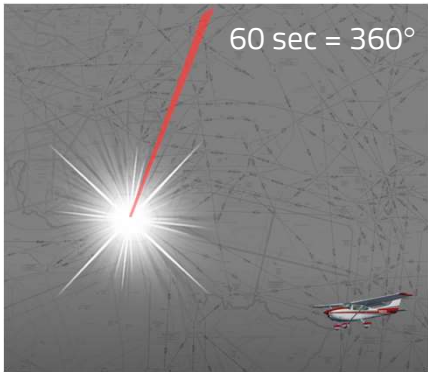
svetilnik #1

svetilnik #2

- Ali je mogoče narediti sistem, pri katerem uporabnik določa azimut z neusmerjeno anteno, ki je ne bi bilo treba vrteti?

Vrteči svetilnik

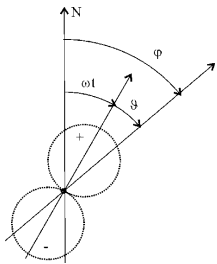
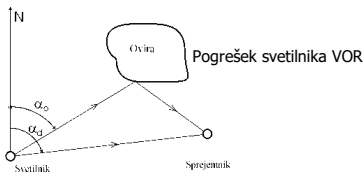
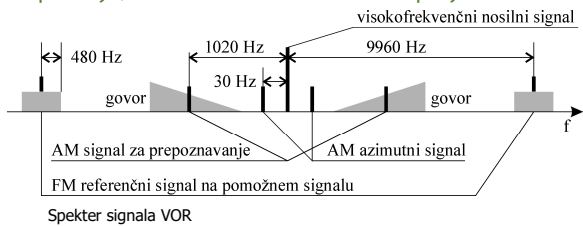
- Ali je mogoče narediti sistem, pri katerem uporabnik določa azimut z neusmerjeno anteno, ki je ne bi bilo treba vrteti?
- Pri takšnem sistemu bi očitno moral svetilnik oddajati v različne smeri različen signal, saj bi le tako sprejemnik lahko določil, iz katere smeri prihaja signal.
- To lahko storimo na različne načine.
- Poglejmo si za uvod, kako bi tako deloval svetlobni svetilnik.



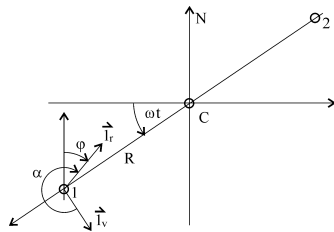
Vrtilni svetilnik

(angl. very high frequency omnidirectional radio range – VOR)

- S sprejemom radijskih signalov, ki jih oddajajo zemeljske postaje, lahko letalo z ustreznim sprejemnikom določi svoj položaj in ostane na svoji poti.
- Smer na oddajni strani
- Na sprejemu vsesmerna antena
- Oddaja v pasu od 108 MHz do 118 MHz
- Začetki v 30 letih 20. stol.
- VOR 1946
- Dopplerjev vrtilni svetilnik (DVOR) 1960



Vrteča se antena oddajnika VOR s 1800 vrtljaji v minuti, kar pomeni amplitudno modulaciji 30 Hz na mestu uporabnika.



Dve krožeči anteni oddajnika DVOR za oba bočna pasova FM azimutnega signala

Angle of arrival / departure (AoA / AoD)

preprost oddajnik z eno anteno

sprejemnik z več antenami

θ_A

oddajnik

sprejemnik z več antenami

θ_A

LSO Laboratorij za sevanje in optiko 21 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

sprejemnik

oddajnik z več antenami

θ_D

sprejemnik

oddajnik z več antenami

θ_D

Izračun kota sprejema

antena #1

antena #2

fazni detektor

$$\varphi = \frac{a}{\lambda} \cdot 2\pi = \frac{d}{\lambda} \cdot 2\pi \cdot \sin\theta_A$$

LSO Laboratorij za sevanje in optiko 22 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

$\theta_A = \arcsin \frac{\varphi \lambda}{2\pi d}$

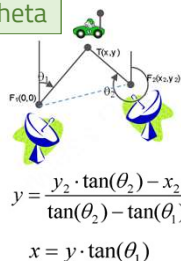
kot sprejema θ_A

fazna razlika φ

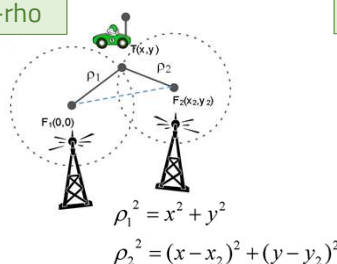
Postopki za določanje trenutnega položaja

- Sodobni postopki določanja položaja se poslužujejo elektronskih naprav, ki so zgled kompleksne **visokofrekvenčne tehnike**.
- Elektronski postopki določanja položaja so v bistvu sistemi **visokofrekvenčnih elektromagnetnih svetilnikov**.
- Sprejemna naprava lahko s **procesiranjem signalov** iz teh svetilnikov in ob poznavanju njihovega položaja bolj ali manj natančno določi svoj položaj.
- Pri tem se za določanje položaja poslužuje enega od naslednjih geometrijskih postopkov:
 - s pomočjo dveh **azimutov** (sistemi theta-theta)
 - s pomočjo dveh **oddaljenosti** (sistemi rho-rho)
 - s pomočjo **oddaljenosti in azimuta** (sistemi rho-theta)
 - s pomočjo **razlik oddaljenosti** do treh svetilnikov (hiperbolični sistemi)

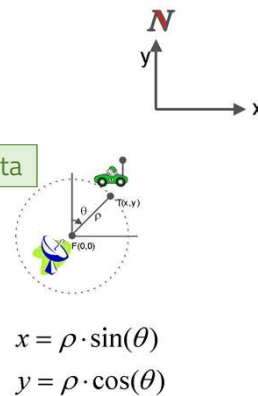
theta-theta



rho-rho



rho-theta



Postopki za ugotavljanje trenutnega položaja s pomočjo dveh oddaljenosti (sistemi rho-rho)

Postopek:

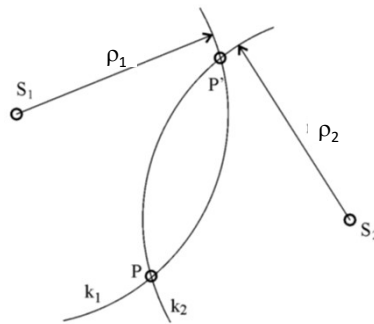
- S_1 in S_2 sta znana svetilnika
- izmerimo razdalji do svetilnikov
- narišemo krožnici
- presečišče krožnic je naš položaj

Težava:

- krožnici se sekata v dveh točkah (P in P')

Rešitev dvoumnosti:

- izmerimo še oddaljenost od tretjega svetilnika
- naredimo več zaporednih meritev
- pomagamo si z našim izhodiščnim položajem, ki je najverjetneje blizu trenutnega položaja

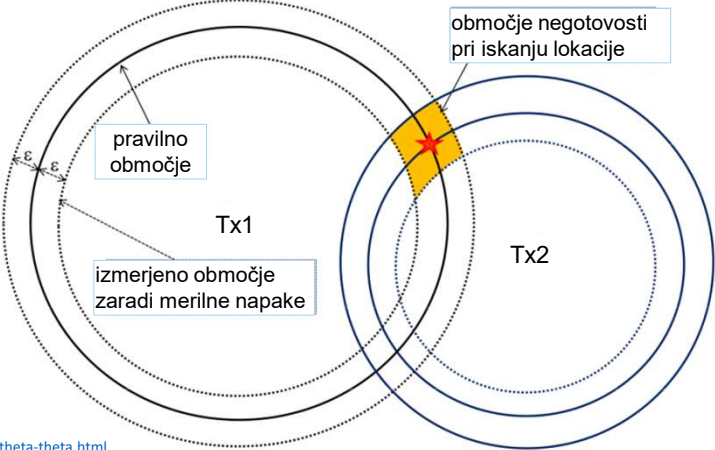


LSO Laboratorij za
sevanje in optiko

25 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Napake pri določanje trenutnega položaja s pomočjo dveh oddaljenosti (sistemi rho-rho)

- Položaj je določen kot stičišče dveh krogov, ki imata v središču svetilnika.
- Če meritve niso točne nastopi napaka pri merjenju, ki vodi v območje negotovosti.
- Geometrija svetilnikov (kako jih uporabnik vidi) vpliva na napake lociranja.
- Velikost in oblika področja negotovosti je odvisna od relativnega položaja svetilnikov.



redčenje natančnosti
(angl. Dilution of Precision - DOP)

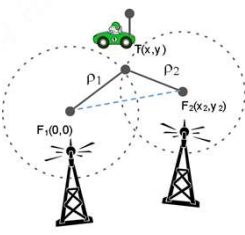
Vir: <http://petersengineering.blogspot.com/2019/10/position-fix-rho-rho-theta-theta.html>

LSO Laboratorij za
sevanje in optiko

26 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Postopki za določanje oddaljenosti od svetilnikov

- Pri sistemu rho-rho se oddaljenost od svetilnikov lahko določi z:
 - merjenje moči sprejetega signala (angl. Received Signal Strength – RSS)
 - merjenje časa (angl. Time of Arrival – TOA)
 - merjenje faze pri uporabi več frekvenc



Določanje oddaljenosti z merjenjem sprejete moči

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

27 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

▪ (angl. Received Signal Strength – RSS)

▪ deluje v neposredni bližini

▪ potrebno je poznati izgube signala na radijski poti (koliko signala je oslavljenega)

▪ primerjava z vnaprej narejeno bazo podatkov

Problem ugotavljanja oddaljenosti iz izmerjene sprejete moči

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

28 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

moč sprejetega radijskega signala [dBm]

slabljenje v praznem prostoru

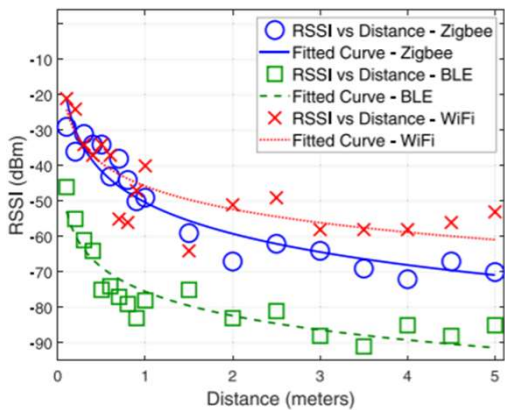
presih signala in slabljenje v praznem prostoru

razdalja [m]

vir: Chen, C.-M.; Huang, Y.-F.; Jheng, Y.-T. An Efficient Indoor Positioning Method with the External Distance Variation for Wireless Networks. *Electronics* **2021**, *10*, 1949. <https://doi.org/10.3390/electronics10161949>

vir: Matevž Šelj, Ugotavljanje lokacije uporabnika v notranjih prostorih, diplomsko delo visokošolski strokovni študijski program prve stopnje Aplikativna elektrotehnika, mentor: Boštjan Batagelj, Ljubljana, 2022

Popravljanje z učno množico



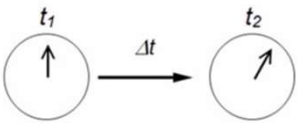
vir: Blaz Bertalanic, Grega Morano, Gregor Cerar, "Lokalizacija na prostem s pomočjo radiofrekvenčnih odtisov tehnologije BLE v testnem omrežjem LOG-a-TEC," ERK 2022

vir: S. Sadowski, P. Spachos and K. N. Plataniotis, "Memoryless Techniques and Wireless Technologies for Indoor Localization With the Internet of Things," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 11, pp. 10996-11005, Nov. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2992651.

Določanje oddaljenosti z merjenjem časa
(angl. Time of Arrival – TOA)

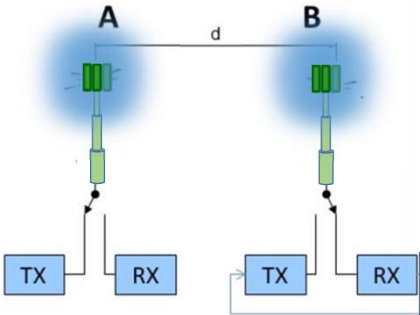
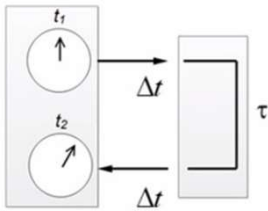
- s sinhroniziranimi urami

$$\Delta t = t_2 - t_1$$



- z dvosmerno meritvijo (ni potrebna sinhronizacija)

$$\Delta t = \frac{1}{2} [(t_2 - t_1) - \tau]$$



Merjenje časa z dvosmerno meritvijo

- Oddaljenost med uporabnikom in bazno postajo 5G določamo z dvosmerno meritvijo časa. Uporabnik odda signalni impulz proti bazni postaji ob času 50 μs in ga dobi nazaj ob času 55,5 μs. Bazna postaja sprejme signali impulz ob svojem lokalnem času 25 μs in ga odda nazaj ob času 26,5 μs. Izračunajte razdaljo med uporabnikom in bazno postajo. (c₀=300.000 km/s)

t_1

↑

t_2

↗

Δt

→

Δt

←

$t_1 = 50 \mu s$

$t_2 = 55,5 \mu s$

$\tau = 26,5 \mu s - 25 \mu s = 1,5 \mu s$

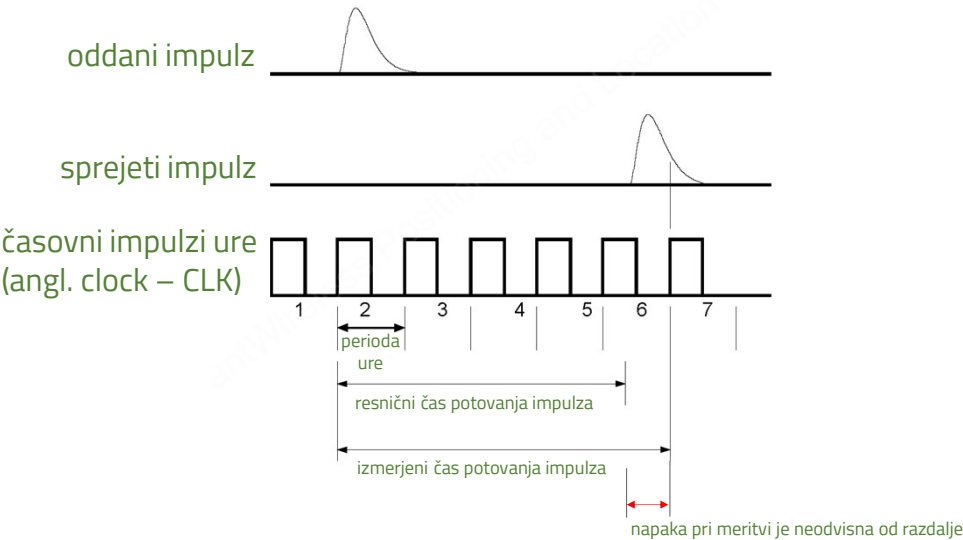
$t_2 - t_1 = 55,5 \mu s - 50 \mu s = 5,5 \mu s$

$(t_2 - t_1) = 2\Delta t + \tau$
 $(t_2 - t_1) - \tau = 2\Delta t$

$$\Delta t = \frac{(t_2 - t_1) - \tau}{2} = \frac{5,5 \mu s - 1,5 \mu s}{2} = \frac{4 \mu s}{2} = 2 \mu s$$

$$l = \Delta t \cdot c_0 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 6 \cdot 10^2 \text{ m} = \underline{\underline{600 \text{ m}}}$$

Časovna resolucija



From A. Bensky, *Wireless Positioning Technologies and Applications*, 2nd Ed.

Diagram illustrating the principle of laser ranging. A laser beam is emitted from a source (Laser) and reflects off a target (Target). The detector (Detector) receives the reflected beam. The phase difference $\Delta\phi$ is measured between the emitted and received waves, which is directly proportional to the distance D .

$$S_{\text{emit}} = A \sin(\omega t + \phi_{\text{initial}})$$

$$S_{\text{receive}} = A \sin(\omega t + \phi_{\text{initial}} + \Delta\phi)$$

$$D = \frac{ct}{2} = \frac{c}{2} \times \frac{\Delta\phi}{2\pi f} = \frac{c\Delta\phi}{4\pi f}$$

Propagation Delay (t)

vir: Deepak Vasisht, Swaran Kumar, Dina Katabi, "Decimeter-Level Localization with a Single WiFi Access Point", Proceedings of the 13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI '16), March 16–18, 2016 • Santa Clara, CA, USA, <https://www.usenix.org/conference/nsdi16/technical-sessions/presentation/vasisht>

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

35 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Merjenje faze pri uporabi več frekvenc

$$l = \frac{c_0}{\Delta f}$$

vir: <https://spectrum.ieee.org/mit-turns-wifi-into-indoor-gps>
vir: Deepak Vasisht, Swarn Kumar, Dina Katabi, "Decimeter-Level Localization with a Single WiFi Access Point", Proceedings of the 13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI '16), March 16–18, 2016 • Santa Clara, CA, USA, <https://www.usenix.org/conference/nsdi16/technical-sessions/presentation/vasisht>

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

36 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Merjenje razdalje iz fазne razlike

- Razdaljo med napravama WiFi merimo s pomočjo meritve fазne razlike med najvišjim in najnižjim WiFi kanalom ($f_1=2412$ MHz, $f_2=2477$ MHz). Izračunajte njuno medsebojno razdaljo, če sprejemnik izmeri fazno razliko med skrajnima kanaloma ravno 720° ($2 \times 360^\circ$).

$$\Delta f = f_2 - f_1 = 2,477 \text{ GHz} - 2,412 \text{ GHz} = 65 \text{ MHz}$$

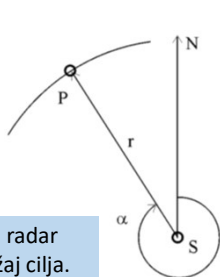
$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{c_0}{\lambda_2} - \frac{c_0}{\lambda_1} = c_0 \left(\frac{N+2}{l} - \frac{N}{l} \right) = \frac{c_0}{l} (N+2 - N) = 2 \frac{c_0}{l}$$
$$\Rightarrow l = 2 \frac{c_0}{\Delta f} = 2 \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{65 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 9,23 \text{ m}$$

Postopki za določanje trenutnega položaja s pomočjo oddaljenosti in azimuta (sistemi rho-theta)

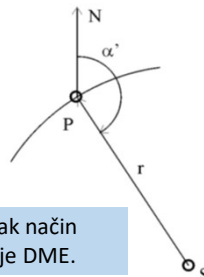
LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

37 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si



Na tak način radar določa položaj cilja.



Na tak način deluje DME.

Primer: Določite tangencialni in radialni pogrešek položaja pri sistemu, kjer se azimut določi s pogreškom $\pm 1^\circ$, pogrešek oddaljenosti pa znaša 400 m. Svetilnik je od nas oddaljen 50 km.

Tangencialni pogrešek znaša $\Delta P = r \cdot \Delta\alpha = 50\,000 \text{ m} \cdot (\pm 1^\circ) \cdot \frac{\pi}{180^\circ} = \pm 873 \text{ m}$.

Radialni pogrešek znaša 400 m.

Primer: Določite tangencialni in radialni pogrešek položaja pri sistemu iz zgornjega primera, če je svetilnik od nas oddaljen 10 km.

Tangencialni pogrešek znaša $\Delta P = r \cdot \Delta\alpha = 10\,000 \text{ m} \cdot (\pm 1^\circ) \cdot \frac{\pi}{180^\circ} = \pm 175 \text{ m}$.

Radialni pogrešek je seveda tudi v tem primeru 400 m.

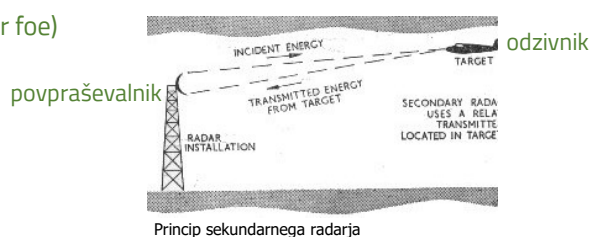
Merjenje oddaljenosti

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

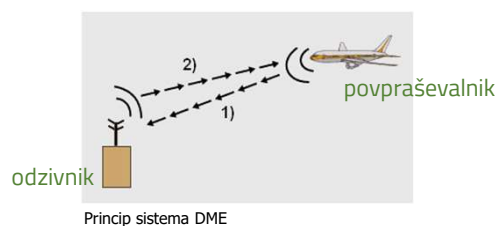
38 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- 2. svet. vojna sistem IFF (angl. identification friend or foe)
- Povpraševalnik na tleh, odzivnik v letalu
- Iz tega se je razvil sekundarni radar
- Določa azimut in oddaljenost cilja (letala)
- En povpraševalnik, mnogo odzivnikov
- Frekvenca 1 GHz

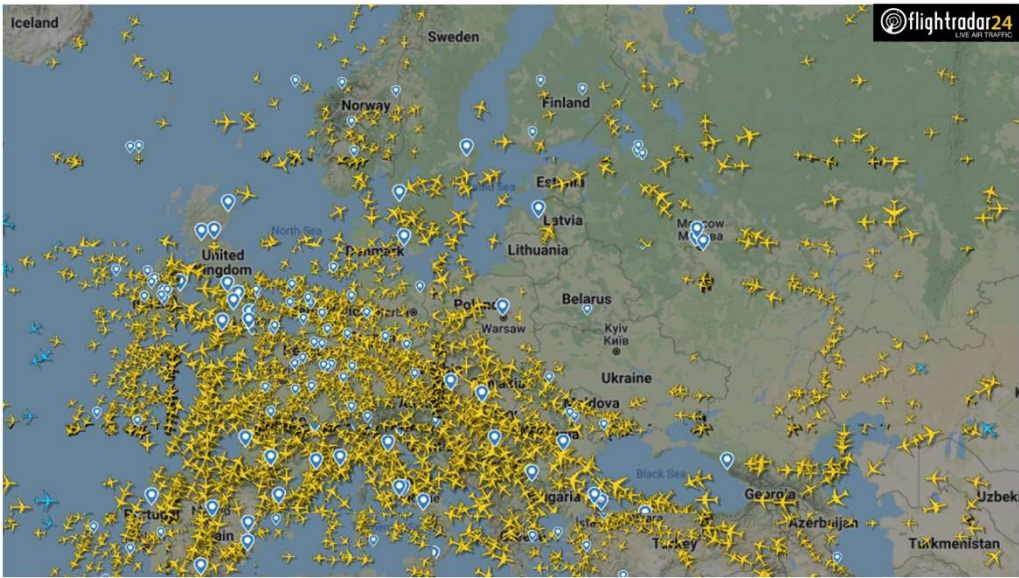


$$R = \frac{(\Delta t - t_z) c}{2}$$

- in kasneje (~1950, Avstralija)
- sistem DME (angl. distance measurement equipment) (standardiziran 1959)
- Povpraševalnik v letalu, odzivnik na tleh
- Določa oddaljenost od odzivnika
- Mnogo povpraševalnikov, en odzivnik
- Frekvenca 1 GHz



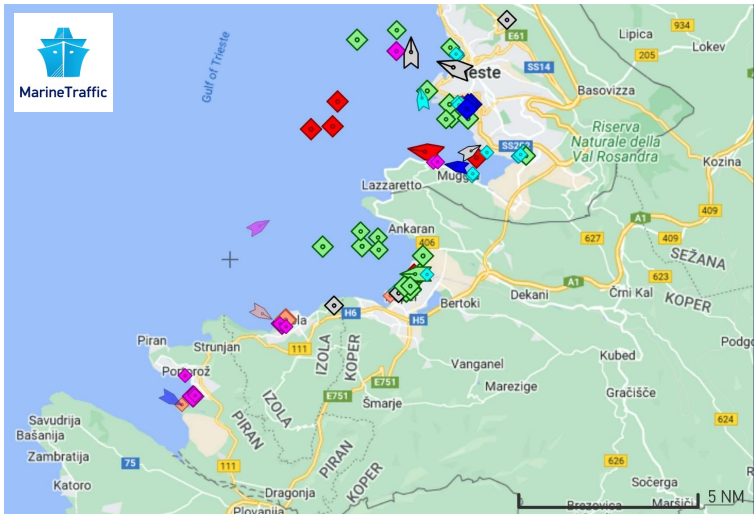
Javni protokol TCAS (sekundarni radar) je omogočil razvoj aplikacij za sledenje letalom



Podoben sistem obstaja za pomorstvo

- avtomatski identifikacijski sistem (angl. automatic identification system - AIS)

https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_identification_system



Postopki za določanje trenutnega položaja

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

41 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Za določanje položaja poslučuje enega od naslednjih geometrijskih postopkov:

s pomočjo dveh **azimutov** (sistemi theta-theta)

s pomočjo dveh **oddaljenosti** (sistemi rho-rho)

s pomočjo **oddaljenosti in azimuta** (sistemi rho-theta)

s pomočjo **razlik oddaljenosti** do treh svetilnikov (hiperbolični sistemi)

theta-theta

$$y = \frac{y_2 \cdot \tan(\theta_2) - x_2}{\tan(\theta_2) - \tan(\theta_1)}$$
$$x = y \cdot \tan(\theta_1)$$

rho-rho

$$\rho_1^2 = x^2 + y^2$$
$$\rho_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2$$

rho-theta

$$x = \rho \cdot \sin(\theta)$$
$$y = \rho \cdot \cos(\theta)$$

Hiperbolični sistemi

pomorski sistemi (LORAN, Čajka)

uvod v satelitske sisteme (sistema Transit in Cikada)

sistemi NAVSTAR-GPS, GLONASS, GALILEO, ostali

kodno multipleksiranje

sprejemniki in pogreški

mobilniki kot sprejemniki navigacijskega signala

Osnove hiperbolične navigacije

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

42 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Iz navigacijskega signala uporabnik izmeri razlike v časih med posameznimi svetilniki.

Sprejemnik sprejme zgolj relativne čase posameznih svetilnikov in izračuna svojo lokacijo.

izmeri se

(t1-t2)=Δt12

(t2-t3)=Δt23

izračuna se

d1 - d2 in d2 - d3

Hiperbola d1-d2=kons.

Hiperbola d2-d3=kons.

Oddajnik TX1

Oddajnik TX2

Oddajnik TX3

Sprejemnik RX

d1

d2

d3

Sistem omogoča neomejeno število (pasivnih) uporabnikov.

hiperbolična radionavigacija (angl. hyperbolic radionavigation)

je radionavigacijski sistem, ki temelji na merjenju razlik zakasnitve za radijske signale, ki jih odda več parov povezanih (**sinhroniziranih**) oddajnikov; za vsak par oddajnikov se izohrone krivulje zdijo skoraj hiperbolične, lokacija mobilne postaje pa se lahko ugotovi iz družin krivulj, povezanih z dvema ali več pari oddajnikov (vir: IEV 713)

bostjan.batagelj@fe.unii-lj.si

21

Primer računanja hiperbole

- Prvi radionavigacijski svetilnik se nahaja v točki $x_1=3$ km in $y_1=3$ km, drugi radionavigacijski svetilnik pa v točki $x_2=10$ km in $y_2=10$ km. Uporabnik izmeri razliko razdalj $d=3$ km in ugotovi, da je bližje drugemu oddajniku. Določite enačbo dvodimenzijske krivulje (hiperbole) na kateri se nahaja uporabnik!

$$d_1 = \sqrt{(x-3)^2 + (y-3)^2}$$
$$d_2 = \sqrt{(x-10)^2 + (y-10)^2}$$
$$d_1 - d_2 = d = 3$$

$$d_1 = d_2 + 3$$

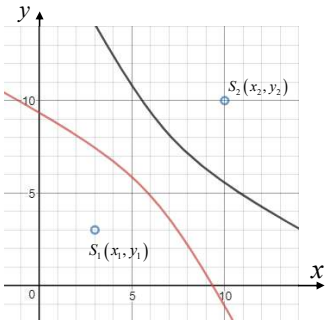
$$\sqrt{(x-3)^2 + (y-3)^2} = \sqrt{(x-10)^2 + (y-10)^2} + 3 \quad |^2$$

$$x^2 - 6x + 9 + y^2 - 6y + 9 = x^2 - 20x + 100 + y^2 - 20y + 100 + 9 + 2 \cdot 3 \cdot \sqrt{(x-10)^2 + (y-10)^2}$$

$$14x + 14y - 191 = 6 \cdot \sqrt{(x-10)^2 + (y-10)^2} \quad |^2$$

$$196x^2 + 196y^2 + 36481 + 392xy - 5348x - 5348y = 36x^2 - 720x + 3600 + 36y^2 - 720y + 3600$$

$$\underline{\underline{160x^2 - 4628x + 160y^2 - 4628y + 392xy + 29281 = 0}}$$



Zgodovina hiperbolične navigacije

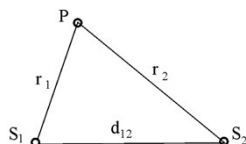
sistem	leto delovanja	lastnik	frekvenčni pas	Točnost
Loran-A	1943 – 1980 (1985)	ZDA	1,9 – 7,5 MHz	≈ 1,6 km
Decca	1940 – 2000	UK	70 – 129 kHz	≈ 200 m
Loran-C	1960 – 2014	ZDA	90 – 110 kHz	≈ 200 m
Čajka (galeb)	1969 - danes	Rusija	90 – 110 kHz	≈ 200 m
eLoran (Enhanced Loran)	2007 - danes	globalni	90 – 110 kHz	

sistem	leto delovanja	lastnik	frekvenčni pas	Točnost
Omega	1968 – 2011	ZDA	9 – 14 kHz	≈ 2,2 km
Alpha	1968 – 2017	Rusija	9 – 14 kHz	2,5 km – 7 km

Pomorski hiperbolični sistemi Loran

Loran A (angl. LOng RANGE Navigation; slov. Navigacija dolgega dosega)

- začetki ~ 1940, uveden 1943
- veriga glavni – podrejeni (angl. master – slave)
- več svetilnikov z eno uro
- merjenje časa
- 2 MHz
- ob koncu 2. svet, vojne že 72 verig ob Pacifiku



$$t_1 = \frac{r_1}{c}$$

$$t_2 = \frac{d_{12}}{c} + t_z + \frac{r_2}{c}$$



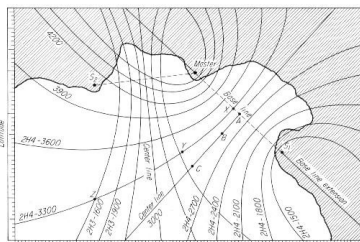
oddajnik sistema Loran

Problem merjenja časovne zakasnitve

Kvarčna ura s stabilnostjo 10^{-8}
pogreši v enem dnevu za 10^{-3} sek
Pogrešek 300 km

Ali usklajene ure ali ena ura!

- veriga svetilnikov je ranljiv sistem.



$$r_2 - r_1 = (t_2 - t_1 - t_z) c - d_{12}$$

zemljevid sistema Loran

Loran C

- začetki 1945, uveden 1960
- veriga master – slave
- merjenje časa in faze
- 100 kHz

Napaka lokacije pri LORAN

- Pri pomorskem hiperboličnem sistemu Loran pomorščak določi lokacijo ladje s pomočjo svetilnikov, pri čemer ima vsak od svetilnikov svojo kvarčno uro s stabilnostjo 10^{-8} . Veriga svetilnikov se enkrat na dan sinhronizira po sistemu da glavni (angl. Master) svetilnik pošlje uro ostalim podrejenim (angl. Slave) svetilnikom. Določite največjo napako, ki jo bo pri določitvi lokacije imel pomorščak.

- Stabilnost ure je podana v odstopanju (v sekundah) na en dan. $\frac{\Delta t [s]}{1 \text{ dan}} = \text{stabilnost}$

$$\Delta t = 24 \text{ h} \cdot 60 \text{ min} \cdot 60 \text{ s} \cdot 10^{-8} = 86400 \text{ s} \cdot 10^{-8} = 864 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$\Delta L = c_0 \cdot \Delta t = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 864 \cdot 10^{-6} \text{ s} = \underline{\underline{259,2 \text{ km}}}$$

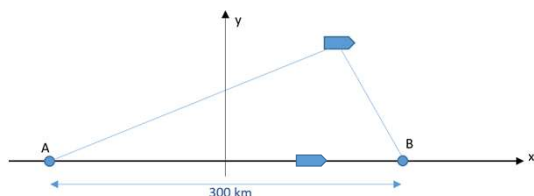
Enačba hiperbole za sistem LORAN

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

47 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- Sistem LORAN ima dve zemeljski radijski postaji (A in B), ki sta oddaljeni 300 km. Pri svetlobni hitrosti 300 km/s sta natanko 1 ms narazen. Ladja je prejela signal s postaje B 0,5 ms preden je sprejela signal s postaje A. Zapišite enačbo hiperbole, na kateri leži ladja.



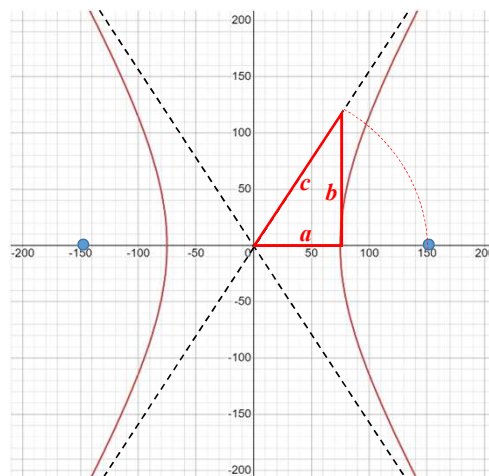
$$\Delta t = t_A - t_B = 0,5 \text{ ms} \Rightarrow a = 75 \text{ km}$$

- Enačba hiperbole $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \Rightarrow \frac{x^2}{(75 \text{ km})^2} - \frac{y^2}{(129,9 \text{ km})^2} = 1$

$$\frac{x^2}{5625 \text{ km}^2} - \frac{y^2}{16875 \text{ km}^2} = 1$$

$$c = 150 \text{ km}$$

$$b^2 = c^2 - a^2 = (150 \text{ km})^2 - (75 \text{ km})^2 = 22500 \text{ km}^2 - 5625 \text{ km}^2 = 16875 \text{ km}^2 \Rightarrow b = 129,9 \text{ km}$$



Izračun položaja ladje pri LORAN

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

48 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- Pomorski navigacijski sistem LORAN meri razliko časov, ki jih potrebuje radijski signal, da prepotuje od parov radijskih svetilnikov do ladje. Iz izmerjenih razlik časov nato sistem določi dve enačbi hiperbole, ki potekajo skozi položaj ladje. Izračunajte položaj ladje v prvem kvadrantu koordinatnega sistema, če je sistem LORAN podal hiperboli $9x^2 - 4y^2 = 32$ in $16y^2 - x^2 = 12$.

$$9x^2 - 4y^2 = 32 \quad | \cdot 4$$

$$36x^2 - 16y^2 = 128$$

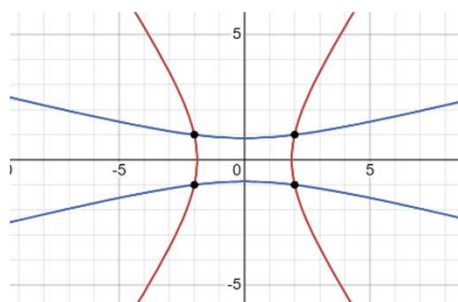
$$36x^2 - 16y^2 = 128$$

$$16y^2 - x^2 = 12$$

$$35x^2 = 140$$

$$x = 2 \quad y = 1$$

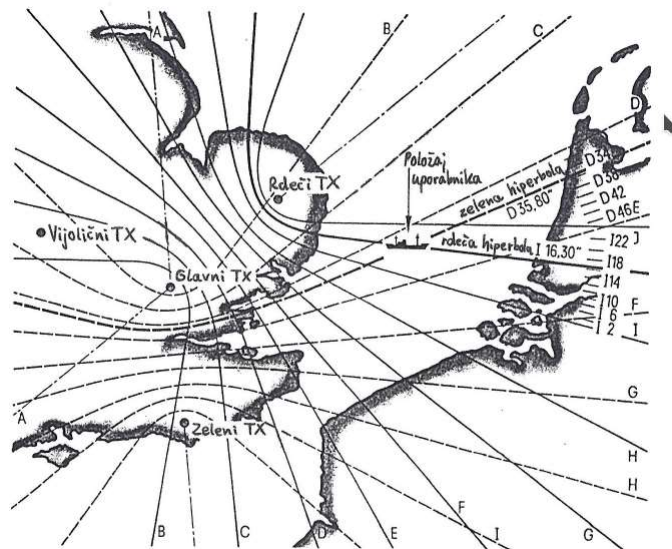
Prvi kvadrant: $x > 0; y > 0$



ISO Laboratorij za
sevanje in optiko

49 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- Uporaba: dokumentiranje minskih polj za izkrcanje v Normandiji 1944



ISO Laboratorij za sevanje in optiko 50 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- | stabilnost
s/dan | Konstrukcija |
|---------------------|--|
| 10 ps | hidrogenski maser |
| 100 ps | cezijeva ura |
| 1 ns | rubidijeva ura |
| 10 ns | prva atomska ura |
| 1 μs | kvarčna (kremenova) ura |
| -- | -- |
| 1 ms | najbolj stabilna nihalna ura
(Short 1921) |
| 1-2 ms | spremembe rotacije Zemlje |
| 0,01 s | ura z nihalom (S. Reifler, 1889) |
| -- | -- |
| 0,2 s | kronometer (J.Harrison 1761) |
| 1 s | G. Graham 1721 |
| 100 s | C. Hyugens (prva nihalna ura,
1657) |

DAB kot podpora za navigacijo

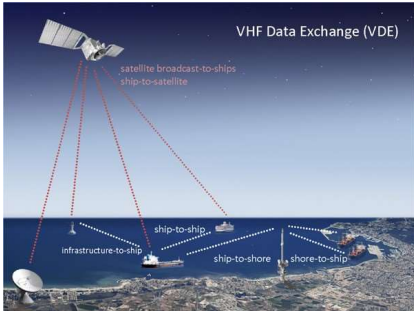
- Motenje GPS v Severni Koreji moti lete in ladje v Južni Koreji
<https://www.gpsworld.com/alleged-north-korea-gps-jamming-disrupts-flights-and-ships-in-south-korea-for-second-day/>
- Južno Korejska vlada je pripravila novo strategijo za uporabo informacij pozicioniranja, navigacije in prenosa časa (angl. positioning, navigation and timing – PNT) v pomorstvu, ki vključuje:
 - GNSS (Global Navigation Satellite Systems)
 - DGNSS (s popravki, ki omogočajo natančnost do 10 cm)
 - radiodifuzijo (televizijskih in radijskih programov) enofrekvenčno omrežje
 - eLORAN (Enhanced Loran) – (LONg RANge Navigation)





위성항법시스템
GNSS (DGNSS)
VDES
eLoran
독자 지상파항법시스템 R-Mode

Lázaro, F., Raulefs, R., Wang, W. et al. VHF Data Exchange System (VDES): an enabling technology for maritime communications. *CEAS Space J* 11, 55–63 (2019).
<https://doi.org/10.1007/s12567-018-0214-8>

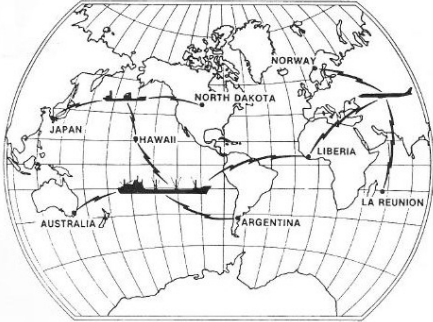


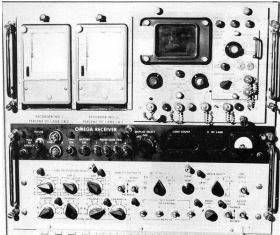
<https://www.gpsworld.com/south-korea-partners-with-broadcaster-on-eloran-and-10-cm-gps>

Omega – prvi globalni hiperbolični sistem (1968)

- 8 svetilnikov
- sinhronizirane cezijeve ure
- Nizke frekvence (~10 kHz) so omogočale ugotavljanje položaja 15 m pod morsko gladino.
- merjenje faz
- večličnost faz so obvladali s tremi frekvencami
- natančnost 2200 m







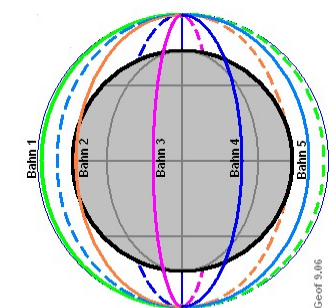
svetilniki sistema Omega

antena svetilnika na Norveškem

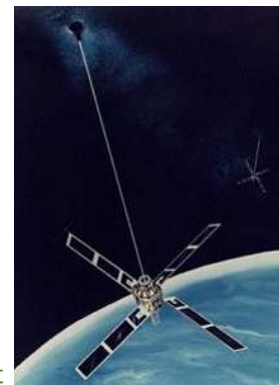
sprejemnik sistema Omega

Prvi navigacijski satelitski sistemi

- Začetki Transit (1964) in Cikada (1969)
- Satelitski svetilniki omogočajo 3D določanje položaja
- Znana lega (trajektorija) satelita
- Položaj se izračuna iz merjenja Dopplerjeve frekvence na radijskem signalu
- Čakati na ugodno lego satelita do dve uri
- Meritev nekaj minut, da je bilo izmerjenih dovolj podatkov za določitev položaja.
- Za globalno pokrivanje je bilo 5 satelitov v polarni tirnici



sateliti Transit v polarni tirnici



satelit Transit

Dopplerjev premik pri sistemu Transit

- Uporabnik skuša določiti svoj položaj z meritvijo Dopplerjevega pojava na nosilcu z nazivno frekvenco $f=400$ MHz, ki ga oddaja satelit sistema TRANSIT v krožnici na višini $h=1000$ km nad zemeljsko površino s hitrostjo $v=7350$ m/s. Določite največji Dopplerjev pomik $\Delta f=?$ (razlika med frekvenco na začetku in ob koncu sprejema) za najugodnejši prelet (nad glavo uporabnika), če vrtenje Zemlje zanemarimo! ($R_Z=6378$ km)

$$\Delta f = f_{\text{približevanje}} - f_{\text{oddaljevanje}} = \frac{f_0}{1 - \frac{v}{c}} - \frac{f_0}{1 + \frac{v}{c}} = f_0 \frac{1 + \frac{v}{c} - \left(1 - \frac{v}{c}\right)}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)\left(1 + \frac{v}{c}\right)} = f_0 \frac{2 \frac{v}{c}}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

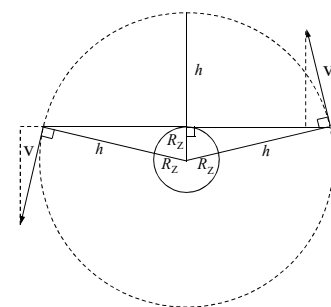
podobni trikotniki

$$v' = v \cdot \frac{R_Z}{R_Z + h} = 7350 \text{ m/s} \cdot \frac{6378 \text{ km}}{6378 \text{ km} + 1000 \text{ km}} = \underline{6353,8 \text{ m/s}}$$

ali kotne funkcije

$$v' = v \cdot \cos \alpha = v \cdot \frac{R_Z}{R_Z + h}$$

$$\text{Dopplerjev pomik frekvence} \quad \Delta f = f \cdot \frac{2v'}{c_0} = 400 \cdot 10^6 \text{ Hz} \cdot \frac{2 \cdot 6353,8 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = \underline{16,94 \text{ kHz}}$$



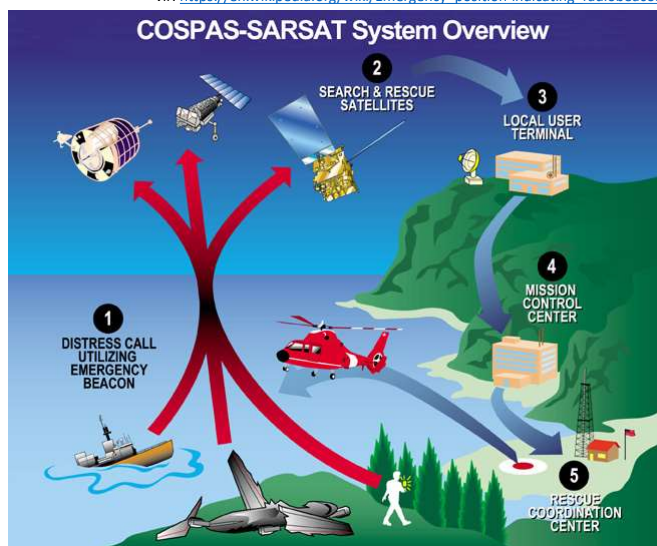
Radijska postaja za prikaz položaja v sili

- EPIRB (angl. emergency position-indicating radio beacon)
- Deluje ravno obratno kot satelitski navigacijski sistem Transit
- Boja z oddajnikom je svetilnik
- Sateliti iz svoje lege in Dopplerjevega pomika frekvence izračunajo položaj boje
- Sistem Cospas-Sarsat je v od leta 1985 rešil več kot 26.000 življenj.



<https://www.cospas-sarsat.int/en/system-overview/cospas-sarsat-system>

vir: https://en.wikipedia.org/wiki/Emergency_position-indicating_radiobeacon



Rešilna ura

- Ura je opremljena z dvofrekvenčnim oddajnikom:
 - $\geq 3,2 \text{ W @ } 406,040 \text{ MHz}$ oddaja 0,44 s vsake 50 s
 - $\geq 30 \text{ mW @ } 121,5 \text{ MHz}$ oddaja 0,75 s vsake 2,25 s
- Antena je skrita v notranjosti ure. Ko lastnik odvije gumb se antena pojavi in se antena izboči in začne samodejno oddajati alarmni signal.



<https://www.breitling.com/us-en/emergency/operation/>



Galileo za iskanje in reševanje

(angl. Search and Rescue – SAR)

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

57 / 77

bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

<https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/galileo/services/search-and-rescue-sar-galileo-service>

The diagram illustrates the Galileo Search and Rescue (SAR) system. It shows three types of satellites: GEO (Geostationary Earth Orbit), MEO (Medium Earth Orbit), and LEO (Low Earth Orbit). The MEO satellites are labeled as GPS, Glonass, and Galileo. The LEO satellites are labeled as LEOSAR. The system includes a Local User Terminal (3) that receives signals from the satellites. A distress signal from emergency beacons (1) is sent to the Mission Control Centre (4). The Mission Control Centre then sends a SAR Response (6) to the Rescue Coordination Centre (5). The diagram also shows a Return link signal from the Mission Control Centre to the Local User Terminal. A legend indicates the frequency bands for GPS (L5, L2), GLONASS (G3, G2), and Galileo (E5a, E5b, E6, E1, E1, G1).

<https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-SAR-SDD.pdf>

Apple iPhone 14 ain iPhone 14 Pro

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

58 / 77

bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

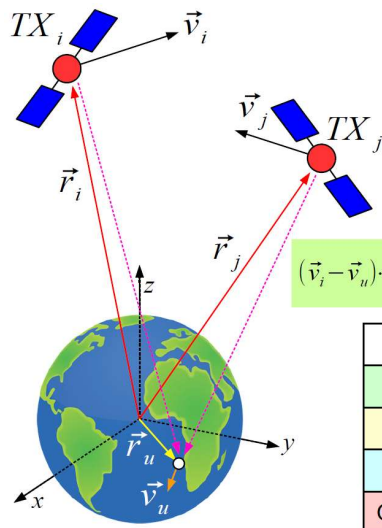
- “Emergency SOS by satellite”
- Za storitev je Apple investiral 450 milijonov USD v infrastrukturo
- Apple sodeluje z Globalstarjem, ki ima v vesolju konstelacijo 48 satelitov v nizki tirnici.
- Čeprav Globalstar pokriva večino svetovnega prebivalstva, je storitev zaenkrat omogočena samo v ZDA in Kanadi.
- Storitev ne deluje v zaprtih prostorih.

The diagram shows the flow of the Emergency SOS by satellite service. It starts with an iPhone (labeled SOS) sending a signal to a Satellite. The Satellite then sends a signal to a Ground station, which sends a signal to a Relay center, which finally sends a signal to Emergency services.

The screenshot shows the iPhone Emergency SOS by satellite service interface. It displays the time 9:41 and a red 'End' button. The interface includes a satellite icon and the text 'Emergency SOS via Satellite'. Below this, there are three bullet points: 'Be outside to get a connection.', 'Messages will take longer to send.', and 'Answer questions to help get a faster response.' At the bottom, there is a green button labeled 'Report Emergency' and a note: 'Your location and Medical ID may be shared.'

Vir: Martin Vošnjak, “Satelitske mobilne storitve z neposredno povezljivostjo” diplomsko delo, 2023. <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=151241>

Satelitska radionavigacija
(atomske ure na satelitih)



Zakasnitev modulacije:
 $|\vec{r}_i - \vec{r}_u| - |\vec{r}_j - \vec{r}_u| = c_0 \Delta t_{ij}$
Neznanke: $\vec{r}_u, \vec{v}_u, t_u, f_u$
Potreben nabor enačb?

Doppler nosilca:

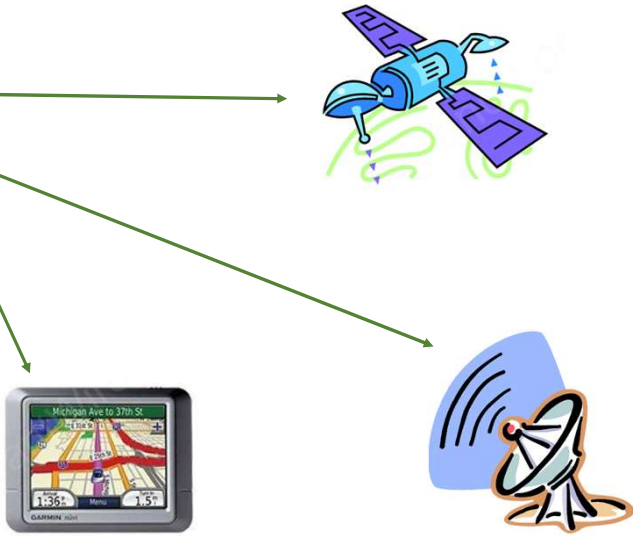
$$(\vec{v}_i - \vec{v}_u) \cdot \frac{(\vec{r}_i - \vec{r}_u)}{|\vec{r}_i - \vec{r}_u|} - (\vec{v}_j - \vec{v}_u) \cdot \frac{(\vec{r}_j - \vec{r}_u)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_u|} = \frac{c_0}{f_0} \Delta f_{ij}$$

Sistem	Tirnica	Frekvence
Transit	1100km/90°	399.968MHz 149.988MHz
Cikada	970km/83°	~400MHz ~150MHz
GPS	20200km/55°	1575.42MHz 1227.6MHz
GLONASS	19100km/65°	~1600MHz ~1250MHz
BeiDou	21500km/55°	1561.098MHz 1207.140MHz

Tsikada

Elementi satelitskega navigacijskega sistema

- vesoljski segment
- kontrolni segment
- uporabniški segment



Uporaba atomske ure na satelitu

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

61 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- Ameriški znanstveniki so z atomsko uro leteli okrog Zemlje in izmerili odstopanje od ure, ki je ostala na tleh.



vir: „Hitrejši od svetlobe“, Science illustrated, št. 51, februar 2014

- GPS ne bi deloval, če ne bi upoštevali relativnostne teorije, ki jo je predlagal Einstein.
- Ure na satelitu so nekoliko počasnejše kot ure na Zemlji, ker potujejo z večjo hitrostjo.
- Na satelite pa manj vpliva tudi težnostno polje Zemlje, zato čas teče hitreje.
- Skupni učinek povzroča, da ura na satelitu GPS vsak dan prehiteva za 38 ms.
- Sistem GPS kompenzira drobne razlike v času s čimer je njegovo delovanje bolj natančno.

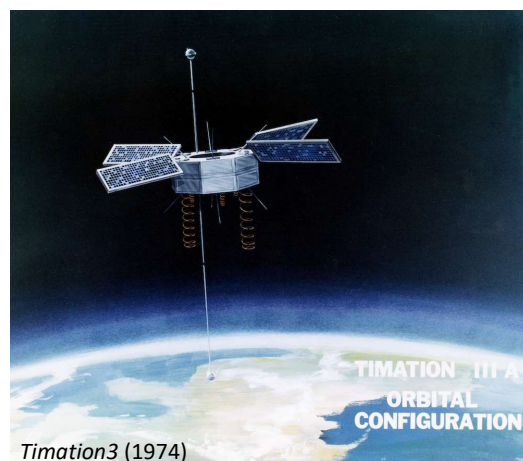
Satelit Timation3 predhodnik GPS

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

62 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- Frekvence: 335 MHz, 1580 MHz
- dve Rb atomski uri omogočata časovno navigacijo
- visoka krožnica $h \approx 13800$ km
- nagib $i \approx 125^\circ$ (retrogradna tirnica)
- Nizka relativna hitrost do uporabnika !
- Dopplerjev pomik neuporaben za določitev položaja.
- Zahteva ozvezdje 4 ali več satelitov.
- Dopplerjev pomik uporaben za hitrost.



GPS sateliti block I 1977–1989

Frekvence:

- L2=1227,6 MHz
- L1=1575,42 MHz

- Rb ali Cs atomske uri omogočata časovno navigacijo

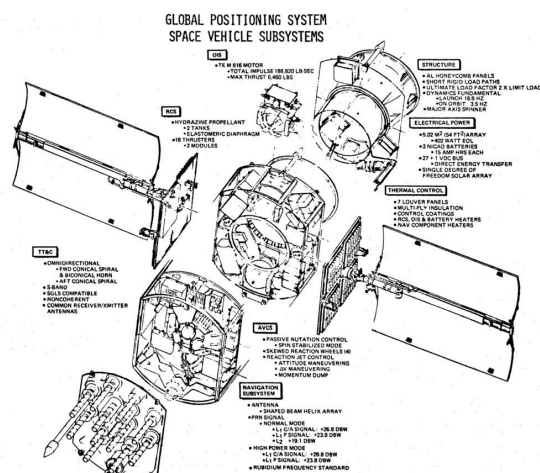
- visoka krožnica $h \approx 20200$ km
- nagib $i \approx 63^\circ$

- načrtovane 3 ravnine po 8 satelitov
- nesrečno izbrana perioda 11h58'
- v resonanci z vrtenjem Zemlje, kar ima za posledico gorivo za vzdrževanje ozvezdja ali sporočanje popravkov

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

63 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si



GPS sateliti block II in nasledniki 1989–

Frekvence:

- L2=1227,6 MHz
- L1=1575,42 MHz

- Rb ali Cs atomske uri omogočata časovno navigacijo.
- visoka krožnica $h \approx 20400$ km
- nagib $i \approx 55^\circ$
- načrtovanih 6 ravnin po 4 satelite
- perioda 12h v izogib resonancam z vrtenjem Zemlje.



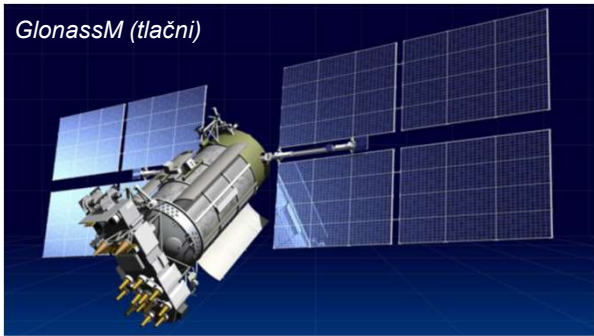
LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

64 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Sateliti Glonass 1982– in nasledniki 2003–

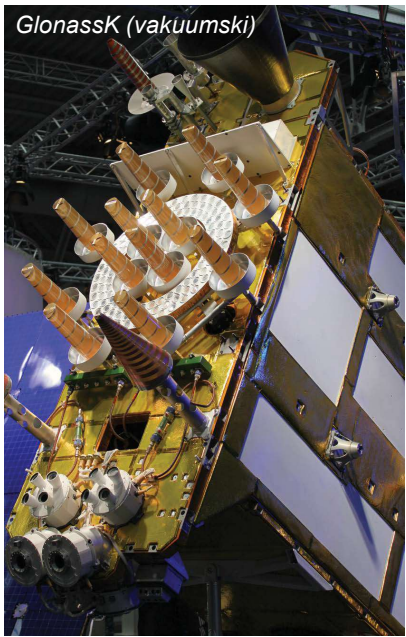
GlonassM (tlačni)



Frekvence:

- $L2 = 1246 \text{ MHz} + n \cdot 0,4375 \text{ MHz}$
- $L1 = 1602 \text{ MHz} + n \cdot 0,5625 \text{ MHz}$
- $n = -7 \dots +24 \equiv \text{kanali FDMA}$
- +nove storitve CDMA
- visoka krožnica $h \approx 19100 \text{ km}$
- nagib $i \approx 64,8^\circ$
- načrtovane 3 ravnine po 8 satelitov
- perioda 8/17 vrtenja Zemlje 23h56'
- resonance ohranjajo ozvezdje

GlonassK (vakuumski)

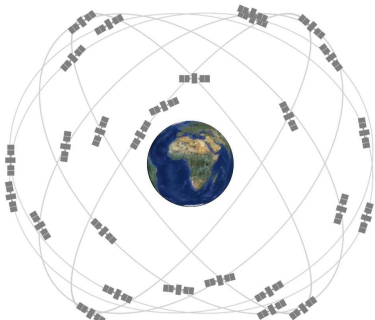


Satelitski sistemi

- NAVSTAR-GPS (Navigation System with Time and Ranging, Global Positioning System)
- Hiperbolični sistem (4 svetilniki, presečišče treh rotacijskih elipsoidov)

Običajno se razlaga malo drugače:

- Iz nesinhronizirane sprejemnikove ure izračunamo psevdorazdalje do štirih satelitov
- krogle se ne sekajo v isti točki
- zato korigiramo našo uro, dokler se vse krogle ne sekajo v isti točki
- dobili smo pravi položaj in še natančno sinhronizirano uro (trije sateliti za položaj, četrti za uro)



Tirnice satelitov GPS

GPS uveden 1983

- 24 satelitov, 12 ur obhodna doba,
- 6 ravnin
- Sinhronizirane cezijeve ure
- Zemeljski nadzorni sistem



Satelit sistema GPS

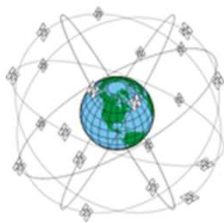
GLONASS uveden 1986

- 24 satelitov, ≈ 12 ur obhodna doba,
- 3 ravnine
- Sinhronizirane cezijeve ure
- Zemeljske postaje

Vesoljski segment GNSS

Global Navigation Satellite Systems (GNSS)

- Druge države, zaradi prevelike odvisnosti od uporabe ameriškega GPS in nezaupanja ameriški vojski, da signala ne bo izklopila ali na neki lokaciji motila, začnejo razvijati svoje navigacijske sisteme.



GPS

- 6 Orbital planes
- 24 Satellites + Spare
- 55° Inclination Angle
- Altitude 20,200km



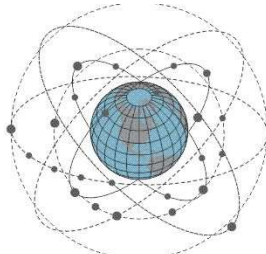
Galileo

- 3 Orbital planes
- 27 Satellites + 3 Spares
- 56° Inclination Angle
- Altitude 23,616km



GLONASS

- 3 Orbital planes
- 21 Satellites + 3 Spares
- 64.8° Inclination Angle
- Altitude 19,100km



BeiDou

- 6 Orbital planes
- 5 GEO + 27 MEO + 3 IGSO
- 55° Inclination Angle
- Altitude 38,300 km, 21,500 km

- V osnovni so sistemi podobni, razlikujejo se v številu satelitov, višinah oziroma obhodnih časih, frekvenci signalov in modulaciji.

Vir: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1871>

Globalni navigacijski satelitski sistemi:

- **GPS** – ZDA
<https://www.gps.gov/technical/icwg/>
- **GLONASS** – Rusija
<http://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/glonass/interfesyntykontrolnyy-dokument/>
- **Galileo** – Evropska unija
<https://www.gsc-europa.eu/electronic-library/programme-reference-documents>
- **BeiDou** (Compass) – Kitajska
<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/>

Regionalni navigacijski satelitski sistemi:

- **Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)** – Japonska
<http://qzss.go.jp/en/technical/ps-is-qzss/ps-is-qzss.html>
- **Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS) (NavIC)** – Indija
<https://www.isro.gov.in/irnss-programme>

	GPS	Galileo	GLONASS	Beidou	NavIC	QZSS
država	ZDA	EU	Rusija	Kitajska	Indija	Japonska
pokritost	globalna	globalna	globalna	globalna	regionalna (Jugovzhodna Azija)	regionalna (Japonska)
stanje	Deluje od leta 1993.	Deluje od leta 2018.	Deluje od 2011.	Deluje od 2018.	Deluje od 2016.	Deluje od 2018.
satelitov v orbiti	31+9	22+2	22+6	43+5	7	4
natančnost	5 m	1 m	5-7 m	10 m	1 m	1 m
perioda (siderskih dni)	1/2	10/17	8/17	9/17	1	1
višina satelitov	20.180 km	23.222 km	19.130 km	21.150 km	36.000 km	36.000 km

Vir: <https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub74/figpub74.pdf>

Število GNSS satelitov

	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou	NavIC	QZSS	Total
skupno število vseh satelitov v tirnicah	32	25	28	49	8	4	146
skupno število delujočih satelitov	31	24	23	44	7	4	133

Vir: <https://safran-navigation-timing.com/gnss-spectrum-status>

Prve uporabniške naprave za GPS



GPS sprejemnik iz letalonosilki USS Midway, ki je leta 1991 sodelovala v napadu na Irak (Sadam Husein) in osvoboditvi Kuvajta v operaciji "Puščavski vihar".

The R-2363/SRN-25 (V) Receiver, Radio Navigation was manufactured for Naval Sea Systems Command by contractor Magnavox in Torrance, California under contract N00024-87-C-4261.

GNSS v telefonih



- Leta 1999, ko je bila ukinitve motenja signala napovedana, je Benetton izdal telefon Esci!, ki velja za prvi telefon z vgrajenim sprejemnikom GPS.
- Leta 2004 je bilo le dobrih deset modelov z vgrajenim sprejemnikom GPS.
- Leta 2004 podjetje Qualcomm razvije "assisted GPS".
- Leta 2006 Nokia predstavi svoj prvi telefon z GPS (Nokia N95).



- Leta 2007 Samsung predstavi svoj prvi telefon z GPS (Samsung i550).
- Leta 2008 Apple uvede GPS v svoje iPhone 3G.
- Leta 2011 iPhone 4S je poleg GPS podpiral tudi GLONASS.

- Danes večina pametnih telefonov podpira več GNSS.
- Danes nekateri pametni telefoni podpirajo tudi vse GNSS.

Vir: <https://www.monitor.si/clanek/gps-in-njegovi-mlajsi-bratje/198629/>

Galilejo v mobilnih napravah

- Po predlogu Evropske komisije morajo vsi mobilni telefoni, ki bodo vsebovali GNSS, biti od marca 2022 opremljeni tudi s sistemom Galilejo.

<https://ec.europa.eu/docsroom/documents/40141?locale=sl>

- Preveri katere sisteme podpira tvoj telefon.

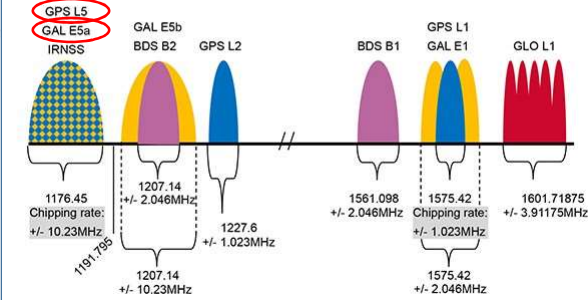
In Delegated Regulation (EU) 2019/320, the Commission has specified that the essential requirements set out in Article 3(3)(g) of Directive 2014/53/EU (RED) are to apply to **hand-held mobile telephones with features similar to those of a computer in terms of capability to treat and store data ('smartphones')**. It is also specified that compliance with those requirements is to be ensured through technical solutions for the reception and processing of Wi-Fi data, data from Global Navigation Satellite Systems compatible and interoperable with at least the Galileo system referred to in Regulation (EU) No 1285/2013 of the European Parliament and of the Council, and for the making available of that data for transmission in emergency communications. Delegated Regulation (EU) 2019/320 is to apply from 17 March 2022.

Vaja: GNSS v telefonih

- Na pameten telefon naložimo aplikacijo GPSTest (ali podobno) in preverimo:
 - katere satelitske navigacijske sisteme podpira telefon,
 - na katerih frekvenčnih področjih deluje sprejemnik v telefonu.

Status						
Alt (MSL): 310.7 m # Sats: 23/27/33 Speed: 0.0 m/s Bearing: S. Acc: 0.1 m/s B. Acc: PDOP: 0.9 H/V DOP: 0.6/0.6						
ID	GNSS	CF	C/N0	Flags	Elev	Azim
5	L1	36.1	A U	56°	233°	
7	L1	33.6	A U	34°	60°	
8	L1	23.0	A U	9°	50°	
8	L5	19.4	A	9°	50°	
9	L1	34.0	A U	7°	112°	
9	L5	38.1	A	7°	112°	
13	L1	28.4	A U	50°	299°	
15	L1	25.6	A U	16°	298°	
18	L1	18.4	A U	7°	320°	
18	L5	18.1	A	7°	320°	
27	L1	A	1°	18°		
28	L1	28.5	AEU	47°	147°	
30	L1	33.7	AEU	63°	56°	
30	L5	38.9	AE	63°	56°	
1	L1	21.1	A U	42°	320°	
7	L1	33.7	A U	35°	137°	
8	L1	28.2	AEU	88°	56°	
9	L1	26.0	A U	34°	37°	
10	L1	33.5	AEU	89°	52°	
11	L1	25.6	AEU	28°	216°	
17	L1	18.8	A	5°	334°	
18	L1	A	5°	19°		
1	E1	24.5	A	38°	50°	
1	E5a	31.7	A U	38°	50°	

Status						
Alt: 356.4 m E H/V Acc: 12.0/9.2 Alt (MSL): 312.3 m # Sats: 19/30/1 Speed: 0.0 m/s Bearing: S. Acc: 0.4 m/s B. Acc: PDOP: 1.4 H/V DOP: 0.9/1.1						
ID	GNSS	CF	C/N0	Flags	Elev	
1	E1	23.0	AE	39°		
4	E1	28.9	AEU	40°		
5	L1	27.9	AEU	57°		
5	E1	28.2	AEU	29°		
5	B1C	26.9	AEU	20°		
7	L1	21.3	AEU	35°		
8	L1	19.3	AE	10°		
9	E1	24.0	AE	83°		
9	L1	26.4	AEU	8°		
10	B1C	16.2	AE	36°		
13	L1	31.5	AEU	50°		
15	L1	28.7	AEU	17°		
18	L1	20.3	AEU	8°		
18	E1	19.6	E	5°		
23	B1C	17.6	AE	81°	195°	
24	E1	25.6	AEU	26°	200°	
25	B1C	18.3	AE	42°	55°	
28	L1	30.8	AEU	47°	150°	
30	L1	26.5	AEU	65°	57°	
31	E1	27.1	AEU	68°	148°	
32	B1C	26.3	AEU	73°	257°	



- V kolikor imaš možnost izvedi vajo in preveri prisotnost GNSS na več različnih napravah.
- Komentiraj v čem je prednost večfrekvenčnih sprejemnikov.

Signals Broadcast (with their center frequency)		Services Provided	
GPS		Civilian	Military
At $f_c = 1575.42$ MHz, GPS L1 C/A, L1 P and L1C At $f_c = 1227.6$ MHz, GPS L2 C and L2 P At $f_c = 1176.45$ MHz, GPS L5		Standard Positioning Service (SPS)	Precise Positioning Service (PPS)
		High Precision Service (HP)	
GLONASS		Standard Precision Service (SP)	Military Signal Access to India
L1 C/A from 1598.0625 to 1609.3125 MHz L2 C from 1242.9375 to 1251.6875 MHz L2 P from 1242.9375 to 1251.6875 MHz L3 OC $f_c = 1202.025$ MHz			
		• Open Service (OS) • Public Regulated Service (PRS) • High Accuracy Service (HAS) • Commercial Authentication Service (CAS) • Search and Rescue Service (SAR)	
Galileo			
E1 at $f_c = 1575.42$ MHz E5a at $f_c = 1176.45$ MHz E5b at $f_c = 1207.14$ MHz E5 AltBOC at $f_c = 1191.795$ MHz E6 at $f_c = 1278.75$ MHz			
		Global Service: Open Service	Global Service: Authorized Service
BeiDou		Regional Services: • Wide area differential services • Short message service	
B1I at $f_c = 1561.098$ MHz B2I at $f_c = 1207.14$ MHz B3I at $f_c = 1268.52$ MHz B1C at $f_c = 1575.42$ MHz B2a at $f_c = 1176.45$ MHz B2b at $f_c = 1207.14$ MHz			
		• Special Positioning Service (SPS) • Precision Service (PS)	
NavIC			
L5 at $f_c = 1176.45$ MHz			
		• PNT (Positioning, Navigation and Timing) service • SLAS (Sub-meter Level Augmentation) service • CLAS (Centimeter Level Augmentation) service	
QZSS			
At $f_c = 1575.42$ MHz, L1 C/A, L1 C and L1S At $f_c = 1227.6$ MHz, L2C At $f_c = 1176.45$ MHz, L5 At $f_c = 1278.75$ MHz, L6			

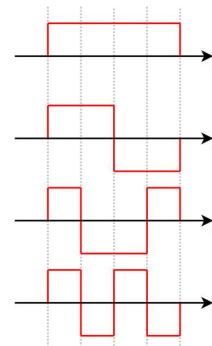
<https://safran-navigation-timing.com/gnss-spectrum-status/>

Kodni multipleks

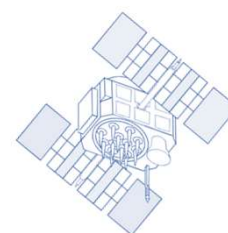
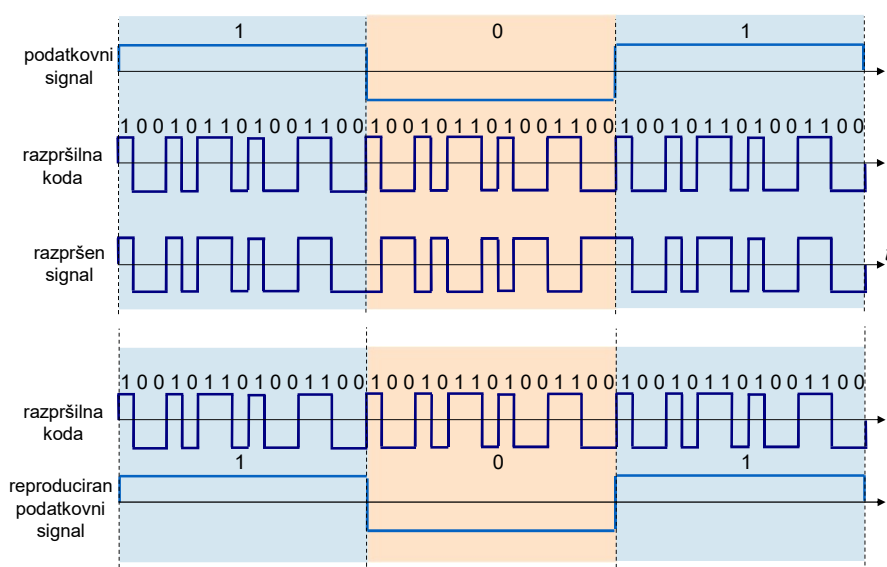
Code division multiplexing (CDM)

V primeru kodnega multipleksa:

- več oddajnikov lahko pošilja informacije istočasno preko istega komunikacijskega kanala
 - več uporabnikov si istočasno deli isti frekvenčni spekter
 - med uporabniki ne prihaja do motenj ali interference
 - vsakemu uporabniku je dodeljena lastna razpršilna koda.
- Razširjen spekter (angl. spread spectrum)
 - Kode morajo biti med sabo čimbolj ortogonalne.
 - Če razpršilne kode niso popolnoma ortogonalne, se motnje obnašajo kot šum in jih sprejemnik ne more nikoli popolnoma izločiti.
 - Sistem z razširjenim spektrom ima dobro razmerje S/N, ker ima na izhodu ozko sito.
 - Sistem z razširjenim spektrom je odporen na presih polja zaradi večpotja. Če v sistemu z razširjenim spektrom izberemo dovolj veliko pasovno širino razpršilnega zaporedja, lahko sprejemnik med sabo loči posamezne radijske poti neposrednega in odbitih valov.



Primer množenja z razpršilno kodo



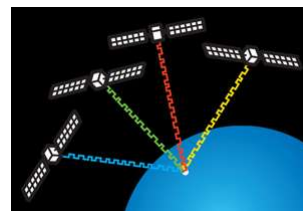
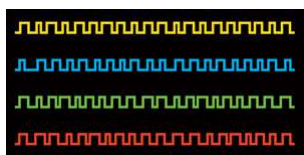
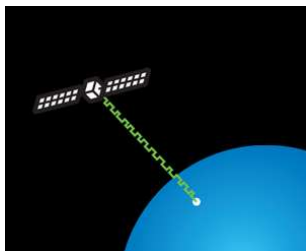
Preverjanje pristnosti (avtentikacija)

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

77 / 77
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- Za namene avtentikacije je vsakemu satelitu dodeljena lastna razpršilna koda.



- V primeru prevare, ko nepravilno uporablja izmišljeno kodo, njegovega signala sodobni sprejemniki ne upoštevajo pri izračunu položaja.

Vir: Mark L. Psiaki in Todd E. Humphreys, „Protecting GPS From Spoofers Is Critical to the Future of Navigation“, IEEE Spectrum, julij 2016,
<https://spectrum.ieee.org/telecom/security/protecting-gps-from-spoofers-is-critical-to-the-future-of-navigation>

vir: Wesson, K., M. Rothlisberger, and T. E. Humphreys, “Practical cryptographic civil GPS signal authentication,” NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation, Vol 59, Num 3, 2012, pp 177-193



FE

UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za elektrotehniko

KIKT

Katedra za informacijske in
komunikacijske tehnologije

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

Strokovno usposabljanje: PROGRAM vseživljenjskega učenja z MIKRODOKAZILI

Pozicioniranje, navigacija in prenos časa v digitalni družbi

prof. dr. Boštjan Batagelj



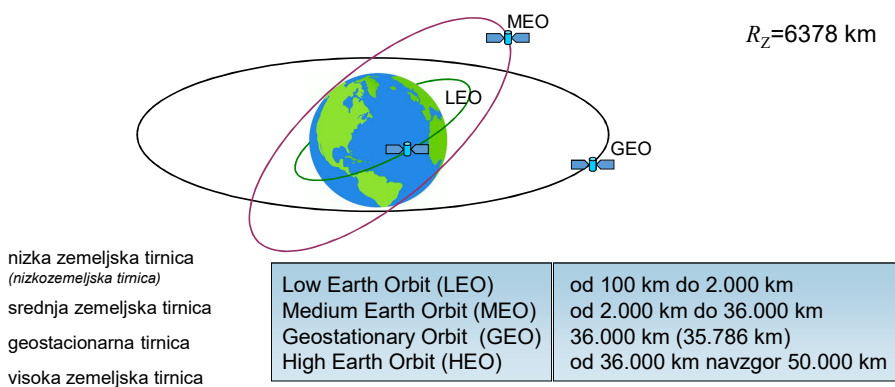
<https://lso.fe.uni-lj.si/GNSS/content.php>

10. junij 2025, 8:15 – 10:00

Vsebina

- Zgodovina radio-navigacije in radio lokacije
- Kotna radio-navigacija – triangulacija
- Radionavigacija ρ - ρ in ρ - θ
 - Zemeljska radionavigacija: pomorska (LORAN), zrakoplovna (VOR, DME), določanje položaja preko sistemov mobilne telefonije.
- Hiperbolična radio-navigacija
 - Satelitska radionavigacija
 - Dopplerjevi sistemi Transit in Cikada
 - 3-D sistemi GPS, GLONASS in GALILEO
- Lociranje satelita na tirnici iz Zemlje
- Motnje tirnic umetnih satelitov
- Izvori napak pri GNSS
- Izboljšave satelitskega hiperboličnega radio-navigacijskega sistema
- Bodočnost navigacijskega sistema
 - GNSS v nizki zemeljski tirnici
 - Navigacija v vesolju
 - Kooperativni navigacijski sistemi
 - inercialna navigacija

Višina tirnice



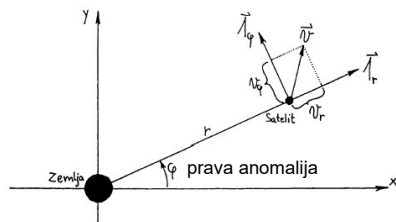
- Nad 50.000 km:
- vpliv težnosti drugih nebesnih teles ni več zanemarljiv (Luna, Sonce)
 - zakasnitve signala so velike

Zemlja in umetni satelit

LSO Laboratorij za sevanje in optiko bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si 3 / 70

Fizikalna izhodišča:

- Vektor vrtilne količine se ohranja
- Energija se ohranja



- Os z je postavljena v smeri vrtilne količine.
- Os x je postavljena tako, da dobimo samo $\cos \varphi$ komponente.

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{v} \cdot m = \text{konst.}$$

$$W = W_{\text{kin.}} + W_{\text{pot.}} = \frac{1}{2} |\vec{v}|^2 m + \left(-\frac{\mu}{|\vec{r}|} m \right) = \text{konst.}$$

- Potencialna energija ima vedno negativni predznak in v neskončnosti znaša nič. Negativna potencialna energija nam opisuje primanjkljaj energije, ki manjka satelitu, da ubeži težnostnemu polju Zemlje.

Enačba gibanja satelita

LSO Laboratorij za sevanje in optiko bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si 4 / 70

- Rešitev za gibanje satelita je prvi zapisal Johannes Kepler pred več kot 400 leti.
- Pot do rešitve pa je prvi prikazal Isaac Newton pred več kot 300 leti.

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \quad \vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2} = \frac{\mu \cdot m}{r^2}$$

- Diferencialna enačba 2. reda v 3D $\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -\vec{1}_r \cdot \frac{\mu}{|\vec{r}|^2}$
- Zapišemo jo v polarnih koordinatah. $\vec{1}_r \cdot \left(\frac{d^2r}{dt^2} - r \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \right) + \vec{1}_\varphi \cdot \left(r \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2 \cdot \frac{dr}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \right) = -\vec{1}_r \cdot \frac{\mu}{r^2}$
- Rešitev poiščemo z reševanjem dveh 2D diferencialnih enačb.

$$\vec{1}_r \text{ komponenta} \quad \frac{d^2r}{dt^2} - r \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = -\frac{\mu}{r^2}$$

$$\vec{1}_\varphi \text{ komponenta} \quad r \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2 \cdot \frac{dr}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = 0$$

2. Keplerjev zakon

LSO Laboratorij za sevanje in optiko bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si 5 / 70

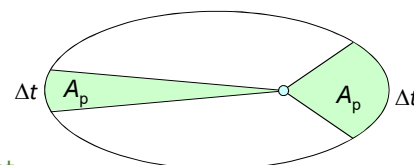
- Poiščimo rešitev enačbe za φ komponento. $r \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2 \cdot \frac{dr}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = 0$
- Enačbo lahko enostavno prevedemo na popolni odvod preprostejše funkcije. $\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dt} \left(r^2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} \right) = 0$
- Ker je odvod enak nič, mora biti funkcija pod odvodom konstanta. $r^2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} = konst.$
- Iskana konstanta je kar velikost vektorja vrtilne količine na enoto mase satelita.

$$r^2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} = r \cdot r \cdot \frac{d\varphi}{dt} = r \cdot \mathbf{v}_\varphi = \left| \vec{r} \times \vec{v} \right| = \frac{|\vec{\ell}|}{m}$$

Drugi Keplerjev zakon $r \cdot \mathbf{v}_\varphi = \frac{l}{m}$

- Zveznica med satelitom in Zemljo v enakem času oriše enako površino.

$$A_p = \int_0^{\Delta t} \frac{1}{2} \cdot r \cdot \mathbf{v}_\varphi dt = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\ell}{m} \right) \cdot \Delta t$$



- Satelit se hitreje giblje bliže Zemlji in v istem času Δt opiše daljšo pot.

Enačba stožnice kot rešitev tirnice satelita

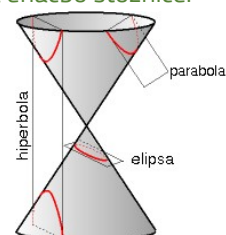
LSO Laboratorij za sevanje in optiko bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si 6 / 70

- Obliko tirnice poiščemo z reševanjem diferencialne enačbe za $\bar{l}_r$ komponento $\frac{d^2r}{dt^2} - r \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = -\frac{\mu}{r^2}$
- Ko v diferencialni enačbi izločimo vse časovne odvode, dobimo rešitev za tirnico satelita enačbo stožnice.

$$r = \frac{1}{A \cdot \cos \varphi + \frac{\mu \cdot m^2}{\ell^2}} = \frac{p}{1 + e \cdot \cos \varphi}$$

$$p = \frac{\ell^2}{\mu \cdot m^2}$$

$$e = \frac{\ell^2}{\mu \cdot m^2} \cdot A$$



Stožnice

$$r = \frac{p}{1 + e \cdot \cos \varphi} \quad p = \frac{\ell^2}{\mu \cdot m^2} \quad e = \sqrt{1 + \frac{2 \cdot W \cdot \ell^2}{\mu^2 \cdot m^3}}$$

LSO Laboratorij za
sevanje in optiko
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

7 / 70

- Primeri stožnic, ko je energija satelita večja ali enaka nič.

hiperbola

$W > 0$
 $e > 1$
 $\bar{\ell} \neq 0$

parabola

$W = 0$
 $e = 1$
 $\bar{\ell} \neq 0$

poltrak

$W \geq 0$
 $e = 1$
 $\bar{\ell} = 0$
- Primeri stožnic, ko je energija satelita manjša od nič.

elipsa

$W < 0$
 $0 < e < 1$
 $\bar{\ell} \neq 0$

krožnica

$W < 0$
 $e = 0$
 $\bar{\ell} = \sqrt{-\frac{\mu^2 \cdot m^3}{2 \cdot W}}$

daljica

$W < 0$
 $e = 1$
 $\bar{\ell} = 0$

Lastnosti eliptične tirnice

φ – prava anomalija
 a – velika polos elipse

$$a = \frac{r_a + r_p}{2} = \frac{p}{1 - e^2} = -\frac{\mu \cdot m}{2 \cdot W}$$
 f – goriščna razdalja $f = a - r_p = ae$
 b – mala polos elipse $b = \sqrt{a^2 - f^2} = a\sqrt{1 - e^2}$
 T – perioda tirnice $T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{a^3}{\mu}}$
 E – ekscentrična anomalija v Keplerjevi enačbi $E - e \sin E = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \cdot (t - t_p)$

LSO Laboratorij za
sevanje in optiko
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

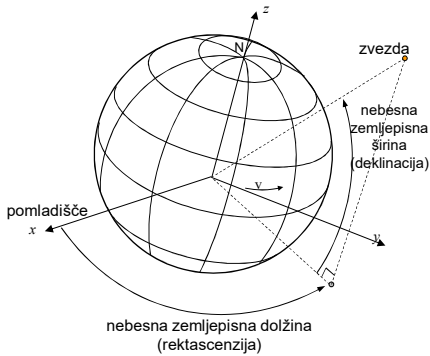
8 / 70

$$r = \frac{p}{1 + e \cdot \cos \varphi} \quad p = \frac{\ell^2}{\mu \cdot m^2}$$

$$r_p = \frac{p}{1 + e} \quad e = \sqrt{1 + \frac{2 \cdot W \cdot \ell^2}{\mu^2 \cdot m^3}}$$

$$r_a = \frac{p}{1 - e}$$

Vrteči koordinatni sistem ($T_Z=23$ ur 56 min)



V točki imenovani **pomladnišče** se nahaja Sonce ob spomladanskem enakonočju (21. marec).

Umetni satelit se hitro premika po nebu, zato opis z rektascenzijo in deklinacijo ni primeren!

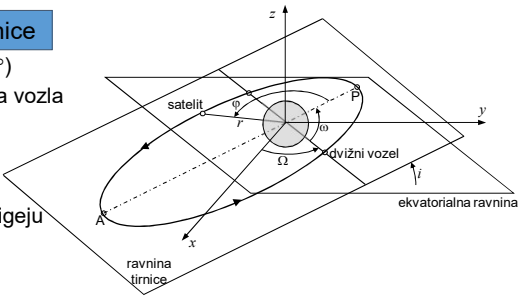
ekliptični koordinatni sistem

Two-Line Element dataset (TLE)

- Najpogostejši zapis tirnice satelita dobimo v formatu TLE, ki je tudi redno osvežen in v bazi podatkov vsebuje največ živčih satelitov. www.celestrak.com/NORAD/elements/
- Namesto velike polosi elipse se zapisuje obhodni čas satelita (mean motion) [obhod/dan].
- Za podaljšanje življenjske dobe TLE zapisa se v zapis doda nekaj parametrov (to sta prvi in drugi odvod frekvence tirnice)

Keplerjevi elementi tirnice

- i - naklon tirnice ($0^\circ - 180^\circ$)
- Ω - rektascenzija dvižnega vozla
- ω - argument perigeja
- a – velika polos
- e – ekscentričnost
- t_0 – čas, ko je satelit v perigeju (M – srednja anomalija)



ime
satelita

leto
izstrelitve

leto in dan, ko je
bil satelit zadnjič v
perigeju

GIOVE-A

1 28922U 05051A 13301.25493895 .00000074 00000-0 00000+0 0 1630

2 28922 56.4082 115.2582 0004736 29.8387 291.8091 1.69419578 48575

naklon
tirnice

rektascenzija
dvižnega
vozla

ekscentričnost

argument
perigeja

srednja
anomalija

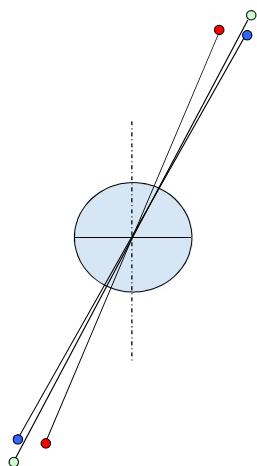
število tirnic v
enem dnevu

Satelitska navigacija – vesoljski segment

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

11 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si



GLONASS

Število satelitov = 24
Število tirničnih ravnin = 3
H=19100 km
i=65°
T=11 h 16 min

GPS

Število satelitov = 24
Število tirničnih ravnin = 6
H=20400 km
i=55°
T=12 h

GALILEO

Število satelitov = 30
Število tirničnih ravnin = 3
H=23222 km
i=56°
T=14 h 4 min

GLONASS je dobil prvi satelit leta 1982 in konstelacijo popolnil do 1995. Od leta 2011 sistem 24 satelitov pokriva ves svet.

http://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/glonass/interfeys_nyykontrolnyy-dokument/

V vsaki ravnini so 4 sateliti.
Ravnine so zamaknjene za 60°.

Interface Control Documents

<http://www.gps.gov/technical/icwg/>

Galileo je civilni sistem, ki ga financirajo države EU. Projekt se je začel leta 2002 in šele leta 2016 začel delovati.

Galileo Open Service Signal-in-Space Interface Control

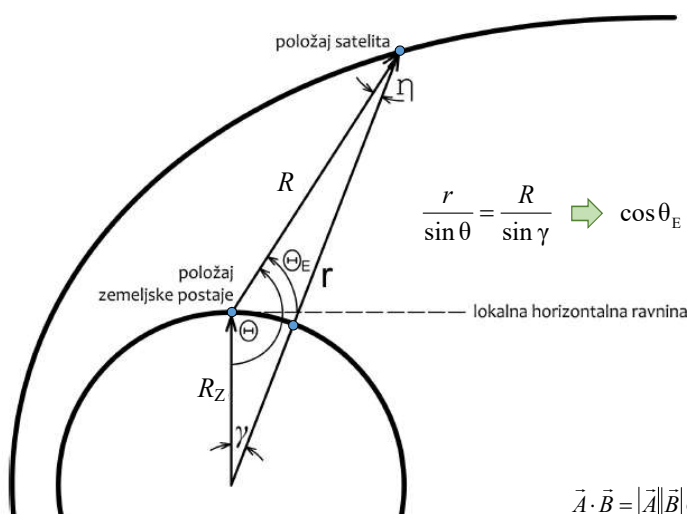
http://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo/os-sis-icd/index_en.htm

Geometrija za izračun elevacijskega kota

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

12 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si



$$R = \sqrt{R_Z^2 + r^2 - 2rR_Z \cos \gamma}$$

$$R = r \sqrt{\left(\frac{R_Z}{r}\right)^2 + 1 - 2\left(\frac{R_Z}{r}\right) \cos \gamma}$$

$$\frac{r}{\sin \theta} = \frac{R}{\sin \gamma} \Rightarrow \cos \theta_E = r \cdot \frac{\sin \gamma}{R} = \frac{\sin \gamma}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_Z}{r}\right)^2 - 2\left(\frac{R_Z}{r}\right) \cos \gamma}}$$

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = |\vec{A}| |\vec{B}| \cos \gamma$$

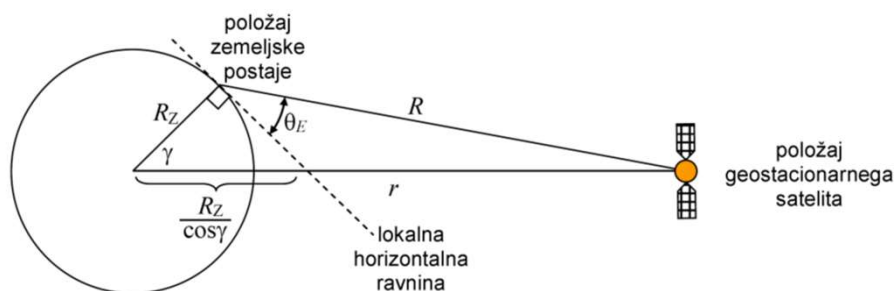
$$\cos \gamma = \cos \varphi_Z \cos \varphi_S \cos(\lambda_S - \lambda_Z) + \sin \varphi_Z \sin \varphi_S$$

Geometrija za izračun vidljivosti satelita

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

13 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si



$$\cos \gamma = \cos \varphi_Z \cos \varphi_S \cos(\lambda_S - \lambda_Z) + \sin \varphi_Z \sin \varphi_S$$

$$\varphi_S = 0 \quad \Rightarrow \quad \cos \gamma = \cos \varphi_Z \cos(\lambda_S - \lambda_Z)$$

$$r \geq \frac{R_Z}{\cos \gamma} \quad \Rightarrow \quad \gamma \leq \arccos\left(\frac{R_Z}{r}\right)$$

Primer: Vidljivost geostacionarnega satelita

- Izračunajte do katere zemljepisne širine γ so vidni geostacionarni sateliti, ki se nahajajo na razdalji $r=42164,17$ km. ($R_Z=6378$ km)

$$\gamma \leq \arccos\left(\frac{R_Z}{r}\right) = 81,3^\circ$$

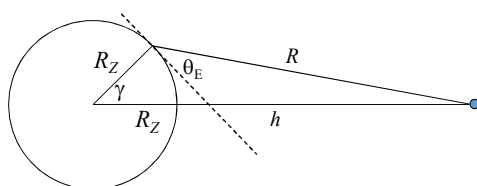
Elevacija iz Portoroža

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

14 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- Izračunaj kot elevacije na katerega moramo nastaviti anteno zemeljske postaje v Portorožu (zemljepisna širina Portoroža je 45°), da bomo sprejemali signal iz geostacionarnega satelita na višini $h=35786$ km, ki leži na isti zemljepisni dolžini kot Portorož. ($R_Z=6378$ km)



$$\frac{\sin \gamma}{R} = \frac{\sin(90^\circ + \theta_E)}{h + R_Z} = \frac{\cos \theta_E}{h + R_Z}$$

$$R = \sqrt{R_Z^2 + (h + R_Z)^2 - 2(h + R_Z)R_Z \cos \gamma}$$

$$R = \sqrt{(6378 \text{ km})^2 + (35786 \text{ km} + 6378 \text{ km})^2 - 2(35786 \text{ km} + 6378 \text{ km})6378 \text{ km} \cdot \cos 45^\circ} = 37.923 \text{ km}$$

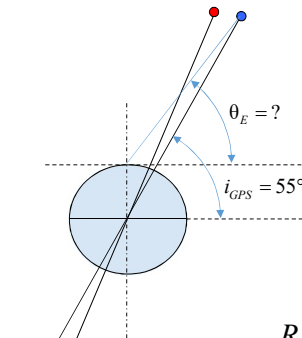
$$\cos \theta_E = \frac{(h + R_Z) \cdot \sin \gamma}{\sqrt{R_Z^2 + (h + R_Z)^2 - 2(h + R_Z)R_Z \cos \gamma}} = \frac{(35786 \text{ km} + 6378 \text{ km}) \cdot \sin 45^\circ}{37923 \text{ km}} = 0,786$$

$$\theta_E = 38^\circ$$

Elevacija satelita GPS in GLONASS na severnem polu

- Satelit GPS se nahaja na tirnici z naklonom $i=55^\circ$ in višino $h=20.200$ km nad Zemljinim površjem. Izračunajte do katere elevacije maksimalno vidi satelit opazovalec na severnem polu. ($R_Z=6378$ km)

LSO Laboratorij za
sevanje in optiko 15 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si



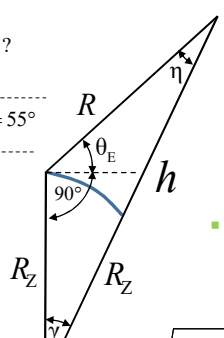
$$R = \sqrt{R_Z^2 + (R_Z + h)^2 - 2(R_Z + h)R_Z \cos \gamma}$$

$$R = \sqrt{(6378 \text{ km})^2 + (26578 \text{ km})^2 - 2(26578 \text{ km})6378 \text{ km} \cdot \cos 35^\circ} = 21.665 \text{ km}$$

$$\frac{R}{\sin \gamma} = \frac{R_Z + h}{\sin(90^\circ + \theta_E)} = \frac{R_Z + h}{\cos \theta_E}$$

$$\theta_E = \arccos\left(\frac{R_Z + h}{R} \cdot \sin \gamma\right) = \arccos\left(\frac{26578 \text{ km}}{21665 \text{ km}} \cdot \sin 35^\circ\right) = 45^\circ$$

- Izračunajte do katere elevacije maksimalno vidi isti opazovalec satelit GLONASS, ki je v tirnici z višino $h=19.100$ km nad Zemljinim površjem in naklonom $i=65^\circ$.



$$R = \sqrt{(6378 \text{ km})^2 + (25478 \text{ km})^2 - 2(25478 \text{ km})6378 \text{ km} \cdot \cos 25^\circ} = 19.186 \text{ km}$$

$$\theta_E = \arccos\left(\frac{R_Z + h}{R} \cdot \sin \gamma\right) = \arccos\left(\frac{25478 \text{ km}}{19186 \text{ km}} \cdot \sin 25^\circ\right) = 55,8^\circ$$

Perioda tirnice umetnega satelita

- 3. Keplerjev zakon
- težnostna konstanta Zemlje $\mu=3,986005 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$

LSO Laboratorij za
sevanje in optiko 16 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

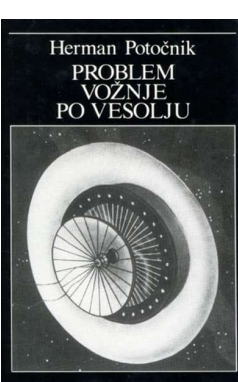
$$\frac{T^2}{a^3} = \text{konst} = \frac{4\pi^2}{\mu}$$

- Koliko znaša perioda tirnice umetnega satelita, ki potuje na povprečni oddaljenosti od središča Zemlje $a=42163$ km.

$a=R_Z+h=6378 \text{ km} + 36000 \text{ km}$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} = 2\pi \sqrt{\frac{(42163000 \text{ m})^3}{3,986 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2}} = 86161 \text{ s} = 23 \text{ h } 56 \text{ min} \approx 1 \text{ dan}$$

- Prvi izračuna Herman Potočnik v knjig Problem vožnje po vesolju.



Geostacionarna tirnica

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

17 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- Umetni satelit je vedno na isti točki neba.
- Vrtenje satelita je natančno sinhronizirano z vrtenjem Zemlje.
- Tirnica je krožnica $e=0$ v ekvatorialni ravnini $i=0$.
- Perioda je enaka periodi vrtenja Zemlje $T=23$ h in 56 min.
- Sploščenost Zemlje nima vpliva.

Primer:

Izračunajte višino geostacionarne tirnice h nad površino Zemlje in hitrost satelita v . ($e=0$, $T=1436$ min, $R_Z=6378$ km, $\mu=3,986 \cdot 10^{14}$ m³/s²).

$$a = \sqrt[3]{\mu \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2} = \sqrt[3]{3,986 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2 \cdot \left(\frac{1436 \cdot 60 \text{ s}}{2\pi} \right)^2} = 42163 \text{ km}$$

$$h = a - R_Z = 35785 \text{ km}$$

$$v = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)} = \sqrt{\frac{\mu}{a}} = \sqrt{\frac{3,986 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2}{42163 \cdot 10^3 \text{ m}}} = 3075 \text{ m/s}$$

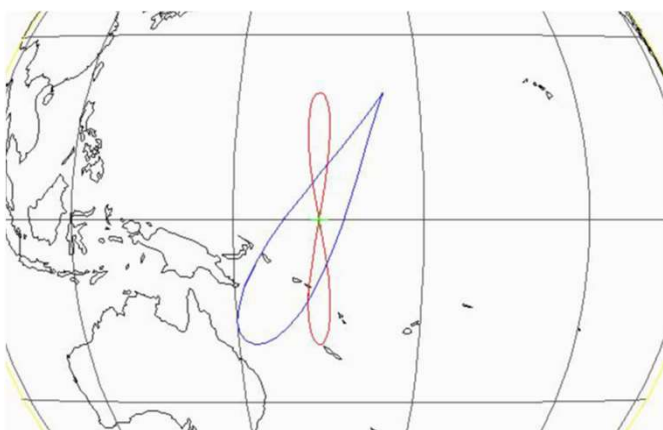
- Seznam televizijskih kanalov na geostacionarnih satelitih <http://en.kingofsat.net/>
- Seznam radijskih postaj in z dometi <http://fmscan.org/>

Položaj geostacionarnega satelita glede na površje

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

18 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si



- zeleni križec predstavlja položaj geostacionarnega satelita
- rdečo osmico opiše geosinhron satelit s krožno tirnico z določeno inklinacijo
- če taki tirnici dodamo še nekaj sploščenosti (za primer $e = 0,1$), satelit opiše modro krivuljo v obliki solze
- (Celestrak: <http://celestrak.com>)

Nagnjena geostacionarna tirnica za navigacijske satelitske sisteme

vrtenje Zemlje

nagnjena tirnica

tirnica satelita

4 sateliti so na isti tirnici

IRNSS

32.5 DEG

55 DEG

83 DEG

111.75 DEG

131.5 DEG

IRNSS

KZN2

CHN0

SIG1

GMSD

CUA1

UNX3

MELB

<http://qzss.go.jp/en/technical/satellites/index.html>

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/irnss>

Vir: Steigenberger, P., Hugentobler, U., Hauschild, A. et al. Orbit and clock analysis of Compass GEO and IGSO satellites. *J Geod* **87**, 515–525 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0625-4>

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

19 / 70

bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Geostacionarna tirnica

Sploščenost Zemlje nima vpliva.

Ostale nepravilnosti v težnostnem polju Zemlje zaradi vrtenja satelita skupaj z Zemljo pripeljejo do stabilnih in labilnih točk.

zemljepisna dolžina

stabilni točki: 76.8°E; 108.1°W

labilni točki: 161.8°E; 12.2°W

nad Indijo

nad Evropo

$T_s = T_e = 23h 56'$

$i = 0^\circ$; $e = 0$; $a \approx 42000 \text{ km}$

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

20 / 70

bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

bostjan.batagelj@fe.unii-lj.si

49

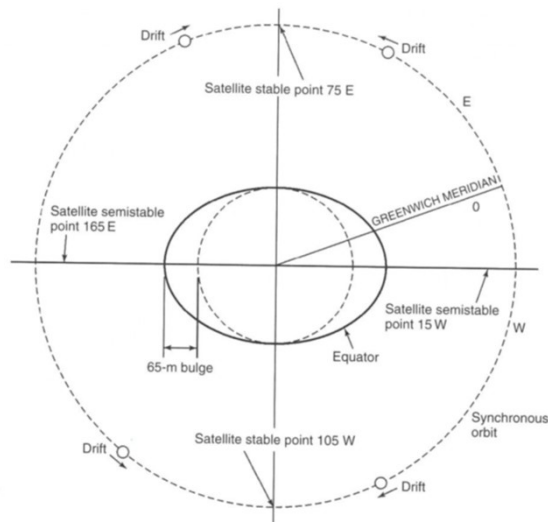
Stabilne točke

LSO

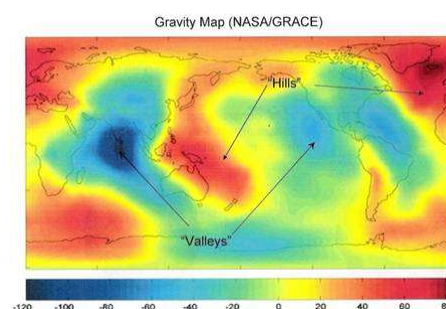
Laboratorij za
sevanje in optiko

21 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

vir: Satellite Communications, 2nd Edition
[Timothy Pratt](#), [Charles W. Bostian](#), [Jeremy E. Allnutt](#)



http://ccar.colorado.edu/asen5050/projects/projects_2009/rupp/



Perioda tirnice satelita Galileo in GPS

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

22 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- Globalni navigacijski satelitski sistem Galileo ima satelite na višini $h=23.222$ km nad Zemljinim površjem. Izračunajte periodo tirnice. ($R_Z=6378$ km, $\mu=3,986 \cdot 10^{14}$ m³/s²)

- velika polos elipse znaša $a = h + R_Z = 23.222$ km + 6.378 km = 29.600 km

- perioda tirnice $T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} = 2\pi \sqrt{\frac{(29.600 \text{ km})^3}{3,986 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2}} = 50.681 \text{ s} = 14 \text{ h } 5 \text{ min}$

- Globalni navigacijski satelitski sistem GPS ima satelite na višini $h=20.200$ km nad Zemljinim površjem. Izračunajte periodo tirnice. ($R_Z=6378$ km, $\mu=3,986 \cdot 10^{14}$ m³/s²)

- velika polos elipse znaša $a = h + R_Z = 20.200$ km + 6.378 km = 26.578 km

- perioda tirnice $T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} = 2\pi \sqrt{\frac{(26.578 \text{ km})^3}{3,986 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2}} = 43.121 \text{ s} = 11 \text{ h } 58 \text{ min}$

Resonančne motnje tirnice GPS

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

23 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- GNSS sateliti so naši „svetilniki“ za katere moramo natančno poznati položaj (tirnico).
- Že majhna odstopanja v tirnici (položaju) satelitov povzroči velike napake pri določanju položaja uporabnikov.
- Glavna motnja, ki deluje na tirnice satelitov GPS izvira iz periode kroženja, ki je 11 h 58 min.
- Motnje v tirnici satelita GPS izvirajo iz resonančnih pojavov s tirnico Zemlje.
- Zaradi resonančnega pojava se seštevajo vplivi:
 - neenakomerne porazdelitve Zemljine mase,
 - gravitacije Lune in Sonca,
 - potiska sončne svetlobe.
- Zaradi resonančnih pojavov nastane sprememba v položaju 17 m/dan (17 km / 1000 dni)
- Zemeljske nadzorne postaje GPS stalno nadzirajo satelitske tirnice.
- Ko se tirnica satelita spremeni, zemeljska nadzorna postaja pošlje satelitu popravek, ki se zabeleži v efemeride satelita.
- Tudi s pomočjo popravkov so še vedno odstopanja, ki vodijo v $\pm 2,5$ m odstopanje položaja uporabnika.
- Sateliti Galileo imajo obkrožijo Zemljo 17-krat v 10 dneh, kar je dovolj stran od razmerja 2:1, da ne pride do resonančnega pojava.

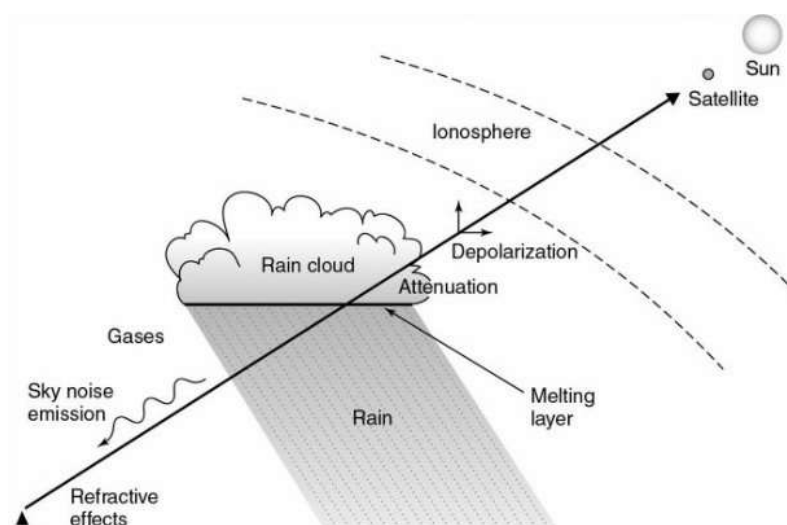
Vir: Klokočnik, J., Gooding, R.H., Wagner, C.A. et al. The Use of Resonant Orbits in Satellite Geodesy: A Review. *Surv Geophys* **34**, 43–72 (2013).
<https://doi.org/10.1007/s10712-012-9200-4>

Depolarizacija v atmosferi

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

24 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si



ISO Laboratorij za sevanje in optiko bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si 25 / 70

Valovanje

- Val je motnja, ki potuje skozi snov ali prostor, in prenaša energijo.
- Poznamo **transverzalno** in **longitudinalno** valovanje.

prečno

EM valovanje, val na vodi, struna,...

vzdolžno

zvok, mehanske vibracije, vzmet,...

Valovanje opisujejo štiri parametri:

- valovna dolžina λ ,
- frekvenca f ,
- hitrost v ,
- energija W ,
- (polarizacija).

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

$[m] = \frac{[m/s]}{[s^{-1}]}$

$\lambda_0 = \frac{c_0}{f}$

$W = f \cdot h$
 $h = 6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$

Planckova konstanta

ISO Laboratorij za sevanje in optiko bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si 26 / 70

Polarizacija prečnega valovanja

- Prečno (transverzalno) valovanje je opisano z jakostjo, frekvenco, fazo in polarizacijo.
- Polarizacija je definirana samo pri transverzalnem (prečnem) valovanju (ko valovanje niha prečno na smer valovanja), kakršno je elektromagnetno valovanje.

- Polarizacija podaja ravnino, v kateri prečno nihajo delci.
- Polarizacija je podana kot nihajna ravnina, v kateri ležita:
 - vektor smeri valovanja S in
 - valovni vektor električne poljske jakosti E .

- Primer linearno (horizontalno) polariziranega valovanja.

LSO Laboratorij za sevanje in optiko
 bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

27 / 70

TEM val

- Električno in magnetno polje vala TEM sta po smeri pravokotna.
- Električno in magnetno polje vala TEM sta pravokotna na smer širjenja valovanja.
- V vakuumu je $Z_0 = 120\pi \Omega = 377 \Omega$

$\vec{E} \perp \vec{H}$
 $\vec{E} \perp \vec{S}$
 $\vec{H} \perp \vec{S}$

$\vec{E} \text{ [V/m]}$
 $\vec{H} \text{ [A/m]}$
 $\vec{S} \text{ [W/m}^2\text{]}$

Prazen prostor μ_0, ϵ_0
 brez izgub!

Sevanje: $\frac{E}{H} = Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \Omega$

Vršne vrednosti polja

$\vec{S} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H}^*$

$S = \frac{|\vec{E}|^2}{2Z_0}$ $E = \sqrt{2Z_0 S}$

Efektivne vrednosti polja

$\vec{S} = \vec{E}_{eff} \times \vec{H}_{eff}^*$

$S = \frac{|\vec{E}_{eff}|^2}{Z_0}$ $E_{eff} = \sqrt{Z_0 S}$

- E in H v fazi
- E in H ortogonalna med seboj
- E in H ortogonalna na smer širjenja
- E/H = Z0

LSO Laboratorij za sevanje in optiko
 bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

28 / 70

Krajevno-časovna vrednost polja

- Elektromagnetni val krožne frekvence ω , ki se širi v smeri r v praznem prostoru.
- Trenutne vrednosti polja ob času t so:

$\vec{E}(r, t) = \hat{\vec{I}}_E E_0 \cos(\omega t - kr + \Phi_E) \text{ [V/m]}$

$\vec{H}(r, t) = \hat{\vec{I}}_H H_0 \cos(\omega t - kr + \Phi_H) \text{ [A/m]}$

$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ [1/m]}$

$\frac{E_0}{H_0} = Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = 120 \pi \Omega = 377 \Omega$

- Splošni zapis trenutne vrednosti poljubno polariziranega ravninskega vala

$$\vec{E}(r, t) = \text{Re} \left[\hat{\vec{I}}_E E_0 e^{j(\omega t - kr + \Phi_E)} \right] \text{ spreminjanje smeri električnega polja s časom in po prostoru}$$

$\hat{\vec{I}}_E(r, t)$ v splošnem enotski kompleksen vektor polarizacije

- Polarizacija električnega polja (linearna, krožna, eliptična)
- Pri polarizaciji elektromagnetnega valovanja vedno navajamo le smer vektorja električnega polja.
- V področju daljnega polja antene je z vektorjem električnega polja točno določena tudi smer in velikost vektorja pripadajočega magnetnega polja.

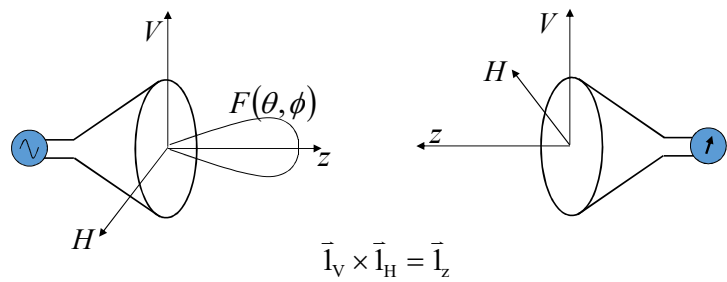
Dogovor glede smeri in izbire koordinatnega sistema

- Polarizacija je vezana na vektor $\vec{E}$ oziroma smer $\vec{l}_E$
- Polarizacija je vezana na anteno.

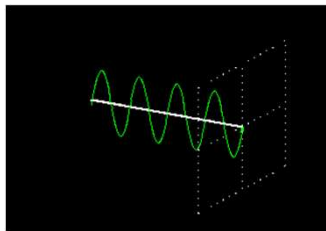
Pri antenah si pri določanju polarizacijskih lastnosti definiramo koordinatni sistem glede na anteno:

- Smer razširjanja valovanja $\vec{l}_z$ kaže v smeri kakor antena največ seva.
- Smerni vektor vertikalne komponente $\vec{l}_V$ kaže navzgor.
- Smerni vektor horizontalne komponente $\vec{l}_H$ pa je tako obrnjen, da kaže njen vektorski produkt $\vec{l}_V \times \vec{l}_H$ v smeri razširjanja valovanja $\vec{l}_z$ v oddajnem režimu, to je proč od antene.

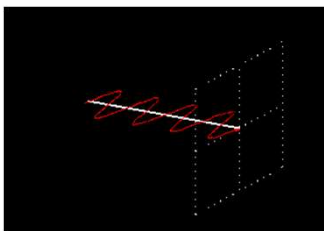
Na ta način je koordinatni sistem enako definiran ne glede na to, če dela antena v sprejemnem ali v oddajnem režimu.



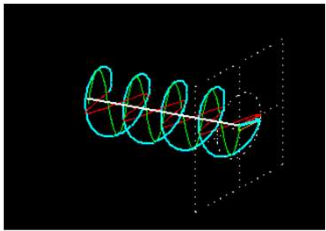
Vrste polarizacije



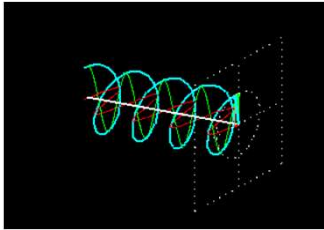
linearna (vertikalna) polarizacija
angl. Vertical Polarization



linearna (horizontalna) polarizacija
angl. Horizontal Polarization

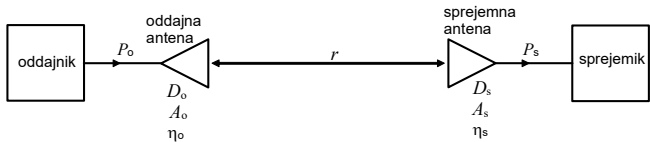


krožna (levosučna) polarizacija
angl. Left Hand Circular Polarization (LHCP)



krožna (desnosučna) polarizacija
angl. Right Hand Circular Polarization (RHCP)

Radijska zveza v praznem prostoru z upoštevanjem polarizacijske skladnosti



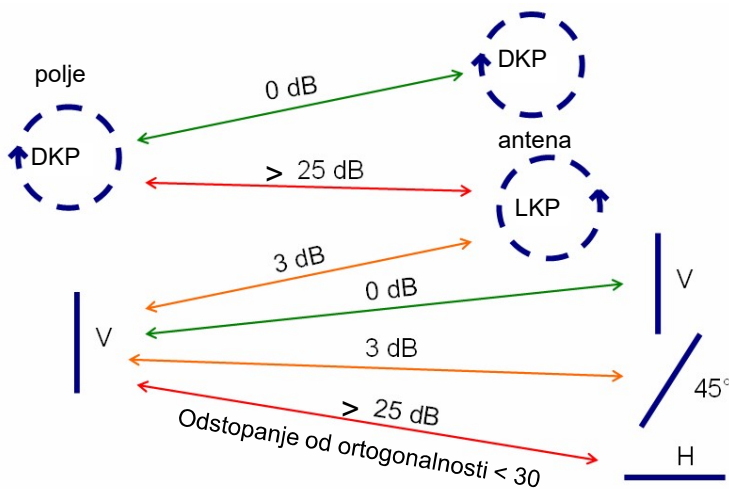
Frissova enačba za domet koherentne zveze

$$\frac{P_s}{P_o} = G_o G_s \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \cdot \eta_p$$

faktor skladnosti polarizacije

$$0 \leq \eta_p \leq 1$$

Preprosti primeri polarizacijske skladnosti in neskladnosti



sprejemniška antena

	↑	→	↻	↻
↑	0 dB	∞	3 dB	3 dB
→	∞	0 dB	3 dB	3 dB
↻	3 dB	3 dB	0 dB	∞
↻	3 dB	3 dB	∞	0 dB

oddajniška antena

Slabljenje zaradi polarizacijske neskladnosti

- Slabljenje zaradi polarizacijske neskladnosti je recipročno.

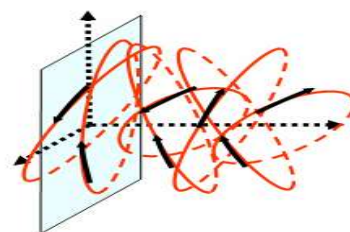
Depolarizacija pri razširjanju elektromagnetnega valovanja

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

33 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- Depolarizacija – naključno sprevrženje polarizacije, ki nastane zaradi naključnih pogojev razširjanja elektromagnetnega valovanja
- Sklop med ortogonalnima polarizacijama HV, VH.
- Fizikalni pogoji razširjanja v mediju so različni za dve ortogonalni polarizaciji.
- Primeri:
 - odboj od tal in odboj od objektov pri HP in VP,
 - odboj od kapljic vode in iglic ledu.
- Odboj v urbanem okolju na fiksnih in mobilnih objektih.
- Propagacijski pogoji brez direktne vidljivosti (angl. Non-Line of Sight – NLOS).



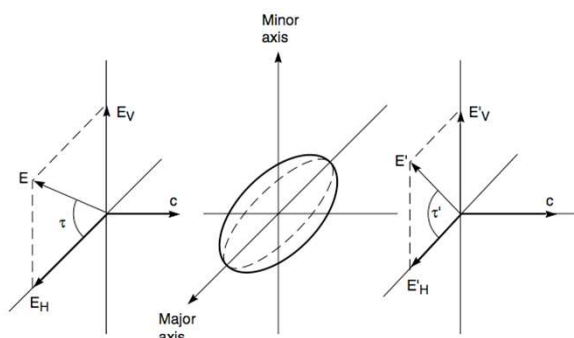
Depolarizacija zaradi dežja

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

34 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- Dežne kaplje niso popolnoma okrogle, temveč bolj eliptične.
- Polarizirano valovanje ob potovanju skozi dežno kapljo:
 - ena komponenta naleteti na manj vode kot druga
 - prihaja do **različnega slabljenja** med eno in drugo komponento električnega polja
 - prihaja do **različnega faznega zasuca** med eno in drugo komponento
 - vse to ima za posledico depolarizacijo elektromagnetnega valovanja

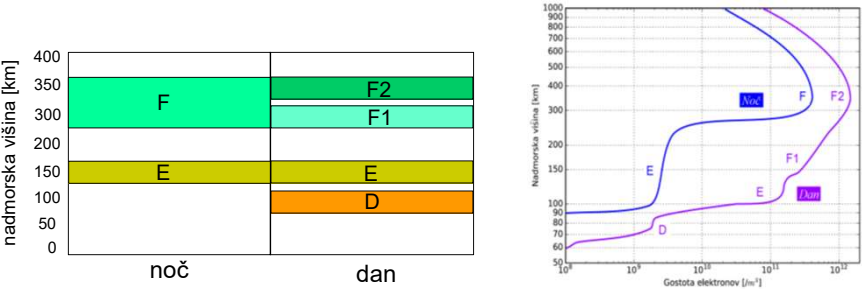


- ITU-T teoretični izračuni in praktične meritve so pokazale, da depolarizacija zaradi dežja ne doprinese več kot 3 dB.
- Depolarizaciji zaradi dežja se izognemo z uporabo linearne polarizacije.

Polarisation vector relative to the major and minor axes of a raindrop, vir: Satellite Communications, Dennis Roddy, McGraw-Hill

Ionosfera

- Ionosfera je plast v zemeljskem ozračju, ki vsebuje nabite delce (elektrone in ione), zaradi sončnega sevanja.
- Prosti elektroni so prosto razporejeni in ujeti v Zemljino magnetno polje.
- Njihova gostota je odvisna od aktivnosti sonca in v povprečju znaša 10^{18} el/m³



- Maksimumu koncentracije nabitih delcev je na nadmorski višini 350 km.
- Mednarodna vesoljska postaja (ISS) se nahaja na višini 360 km.
- Plazma naelektrenih delcev je sicer izredno redka, ampak tudi izredno korozivna.
- Vesoljska plovila za dolgotrajno uporabo, kot je to ISS, morajo biti izdelana iz snovi, ki so odporne na korozijo!

Elektromagnetno valovanje v ionosferi

■ Frekvenca plazme $f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{N_e Q_e^2}{\epsilon_0 m_e}} = \sqrt{80,6 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2} N_e} = \begin{cases} 11 \text{ MHz} & \text{dan} \\ 5 \text{ MHz} & \text{noč} \end{cases}$

- $f < f_p \rightarrow$ prevodnik
- $f > f_p \rightarrow$ dielektrik
- Ko je frekvenca valovanja nižja od frekvence plazme, se ionosfera obnaša kot prevodnik, kjer se valovanje ne more širiti.
 - Ko je frekvenca valovanja višja od frekvence plazme, se ionosfera obnaša kot dielektrik, kjer se valovanje lomi.
 - Lomni količnik se izračuna s pomočjo frekvence plazme

$$n = \sqrt{\epsilon_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{f_p}{f}\right)^2} < 1$$

- Primer:
- Kolikšen je lomni količnik ionosferske plasti pri frekvenci 12 MHz? Ionosfersko plast opisuje frekvenca plazme 6 MHz. Izgube zaradi trkov elektronov zaradi trkov elektronov z drugimi ioni in nevtralnimi molekulami ozračja so zanemarljivo majhne.

$$n = \sqrt{\epsilon_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{f_p}{f}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{6 \text{ MHz}}{12 \text{ MHz}}\right)^2} = \sqrt{1 - (0,5)^2} = \sqrt{1 - 0,25} = \sqrt{0,75} = \underline{\underline{0,866}}$$

Ionosfera in navigacijski signal

LSO Laboratorij za
sevanje in optiko 37 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- Signali, ki prihajajo od satelitov k sprejemniku se v ionosferi lomijo.
- Signali opravijo različno dolgo pot skozi ionosfero.
- Ionosfera deluje kot razpršilna leča.
- Žarki se zberejo višje.
- Napaka v višini znaša približno 50 m podnevi.
- Ponoči ni napake, ker je koncentracija ionov takrat majhna.

Napake zaradi ionosfere

LSO Laboratorij za
sevanje in optiko 38 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Primer:

- Pogrešek izračuna položaja uporabnika zaradi ionosfere znaša $\Delta r = 30$ m na frekvenci $L1 = 1575,42$ MHz navigacijskih satelitov GPS. Kolikšen je pogrešek $\Delta r = ?$ na frekvenci $L2 = 1227,6$ MHz ob istem naboru satelitov (nespremenjen GDOP)?

$$\Delta r \propto f^{-2} \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta r_2}{\Delta r_1} = \left(\frac{f_{L1}}{f_{L2}} \right)^2 \quad \Rightarrow \quad \Delta r_2 = \Delta r_1 \left(\frac{f_{L1}}{f_{L2}} \right)^2 = 30 \text{ m} \left(\frac{1575,42 \text{ MHz}}{1227,6 \text{ MHz}} \right)^2 = \underline{\underline{49,4 \text{ m}}}$$

- Z meritvijo na dveh frekvencah je mogoče popolnoma izločiti pogrešek ionosfere.

geometric dilution of precision (GDOP) – geometrično redčenje natančnosti

Napake zaradi ionosfere

Primer:

- Pri sprejemu signala s satelita GPS na obeh frekvencah $L_1=1575,42$ MHz in $L_2=1227,6$ MHz izmerimo zakasnitev modulacije na frekvenci L_2 glede na L_1 $\Delta t=15$ ns. Koliko znaša doprinos k pogrešku določanja položaja uporabnika $\Delta r=?$, če uporabljamo rezultate meritve na frekvenci L_1 .

$$\Delta t_1 = \frac{\alpha}{f_{L1}^2} \quad \Delta t_2 = \frac{\alpha}{f_{L2}^2}$$
$$\Delta t = \Delta t_2 - \Delta t_1 = \alpha \left(\frac{1}{f_{L2}^2} - \frac{1}{f_{L1}^2} \right) \Rightarrow \alpha = \frac{\Delta t}{\left(\frac{1}{f_{L2}^2} - \frac{1}{f_{L1}^2} \right)} = \frac{\Delta t}{f_{L2}^{-2} - f_{L1}^{-2}}$$
$$\Delta t_1 = \frac{\alpha}{f_{L1}^2} = \frac{\Delta t}{f_{L1}^2 \left(\frac{1}{f_{L2}^2} - \frac{1}{f_{L1}^2} \right)} = \frac{\Delta t}{\frac{f_{L1}^2}{f_{L2}^2} - 1} = \frac{15 \text{ ns}}{\left(\frac{1575,42 \text{ MHz}}{1227,6 \text{ MHz}} \right)^2 - 1} = 23,2 \text{ ns}$$

- ovrednotimo ta časovni pogrešek v položaj

$$\Delta r = c_0 \Delta t_1 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 23,2 \cdot 10^{-9} \text{ s} = \underline{\underline{6,96 \text{ m}}}$$

Napake zaradi ionosfere pri štirih satelitih

Primer:

- Položaj navigacijskega sprejemnika izračunamo iz meritev na signalih štirih GPS satelitov, od katerih se eden nahaja v zenitu, ostali trije pa tik nad obzorjem in so enako razporejeni po azimutu (po 120°). Ionosfersko zakasnitev merimo kot zakasnitev modulacije Δt na nosilcu $L_2=1227,6$ MHz glede na $L_1=1575,42$ MHz in izmerimo 10 ns za satelit v zenitu in 50 ns za vse tri satelite tik nad obzorjem. Izračunajte pogreške v izmerjenih razdaljah do satelitov, če opravljamo meritve le na frekvenci L_1 ! Koliko in v kateri smeri odstopa izračun položaja sprejemnika iz meritev na L_1 brez popravka ionosfere?

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta t}{f_{L1}^2 \left(\frac{1}{f_{L2}^2} - \frac{1}{f_{L1}^2} \right)} = \Delta t \frac{\frac{1}{f_{L1}^2}}{\frac{1}{f_{L2}^2} - \frac{1}{f_{L1}^2}} = \Delta t \frac{f_{L1}^{-2}}{f_{L2}^{-2} - f_{L1}^{-2}} = \Delta t \frac{(1575,42 \text{ MHz})^{-2}}{(1227,6 \text{ MHz})^{-2} - (1575,42 \text{ MHz})^{-2}} = \Delta t \cdot 1,546$$

Δt_{L2}	Δt_1	Δl_1
10ns	15,5ns	<u>4,6m</u>
50ns	77,3ns	<u>23,2m</u>

- Napake vseh treh satelitov na obzorju so enake in se odštejejo.
- Spremeni se le izračunana višina.

$$\Delta h = \Delta l_1' - \Delta l_1'' = \underline{\underline{18,5 \text{ m}}}$$

Zakasnitev zaradi troposfere je neodvisna od frekvence.

Zakasnitev skozi ionosfero pa je odvisna od frekvence.

Primer:

- Pri sprejemu radionavigacijskih signalov s satelita GPS doprinaša razširjanje radijskih valov skozi celotno zemeljsko ozračje dodatno skupno zakasnitev $t_1=40$ ns na frekvenci $L_1=1575,42$ MHz, na nosilcu $L_2=1227,6$ MHz pa znaša dodatna zakasnitev $t_2=53$ ns. Izračunajte kolikšno zakasnitev doprinaša troposfera. Pri izračunu upoštevajte dejstvo, da je zakasnitev zaradi troposfere neodvisna od frekvence, medtem, ko je zakasnitev skozi ionosfero odvisna od kvadrata frekvence.

Skupna zakasnitev na L_1 $t_1 = t_0 + \frac{\alpha}{f_{L1}^2} \Rightarrow \alpha = t_1 f_{L1}^2 - t_0 f_{L1}^2$

Skupna zakasnitev na L_2 $t_2 = t_0 + \frac{\alpha}{f_{L2}^2} \Rightarrow \alpha = t_2 f_{L2}^2 - t_0 f_{L2}^2$

$$\begin{aligned} t_1 f_{L1}^2 - t_0 f_{L1}^2 &= t_2 f_{L2}^2 - t_0 f_{L2}^2 \\ t_1 f_{L1}^2 - t_2 f_{L2}^2 &= t_0 (f_{L1}^2 - f_{L2}^2) \Rightarrow t_0 = \frac{t_1 f_{L1}^2 - t_2 f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} = \\ &= \frac{40 \text{ ns} \cdot (1575,41 \text{ MHz})^2 - 52 \text{ ns} \cdot (1227,6 \text{ MHz})^2}{(1575,41 \text{ MHz})^2 - (1227,6 \text{ MHz})^2} = \underline{\underline{19,9 \text{ ns}}} \end{aligned}$$

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

41 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Depolarizacija v ionosferi

- Elektromagnetni signal, ki potuje skozi oblak elektronov je deležen Faradayevega sukanja.

$$\varepsilon_r = 1 - \left(\frac{f_p}{f} \right)^2 \cdot \frac{1}{1 \pm f_a/f} \quad \begin{array}{l} \pm \text{ LEVA / DESNA KROŽNA POLARIZACIJA} \\ (\text{FARADAY - EV POJAV}) \end{array}$$

Žiromagnetna resonanca $f_g = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 Q_e}{m_e}} H_0 \approx 1,4 \text{ MHz}$

Zemeljsko magnetno polje $H_0 \approx 40 \text{ A/m}$

- Faradayeve rotacija ne povzroča problemov pri frekvencah višjih od 10 GHz.

V ionosferi prihaja do sukanja polarizacije zaradi Faradayevega pojava. Ta pojav nas bi motil, če bi GPS sateliti uporabljali linearno polariziran signal namesto desno krožne polarizacije. Koliko bi znašal zasuk polarizacije pri sprejemu linearno polariziranega signala L_1 s frekvenco 1575,42 MHz, če smo pri sprejemu linearno polariziranega signala L_2 , iz istega satelita, s frekvenco 1227,6 MHz zapazili 108° zasuk polarizacije.

$$\theta \propto f^{-2} \quad \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{f_2^2}{f_1^2} \quad \theta_2 = \theta_1 \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 = 108^\circ \left(\frac{1227,6}{1575,42} \right)^2 = \underline{\underline{65,6^\circ}}$$

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

42 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Krožna polarizacija - odboj

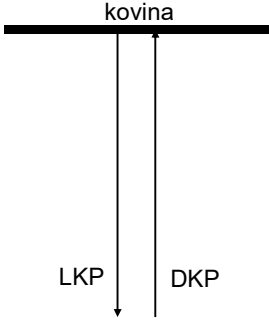
LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

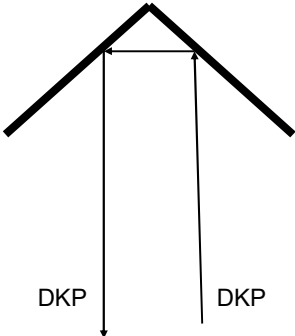
43 / 70

Odboj od ravnega reflektorja



DKP vpadnega vala se odbije kot LKP. Polarizacija se sprevrže v nasprotno polarizacijo. Antena odboja ne zaznava.

Odboj od kotnega reflektorja



DKP vpadnega vala se po dveh odbojih odbije kot DKP. Antena odboj zaznava.

Odboj od oblega simetričnega objekta



DKP vpadnega vala se odbije kot LKP. Antena odboja ne zaznava. Velja tudi za vodne kapljice.

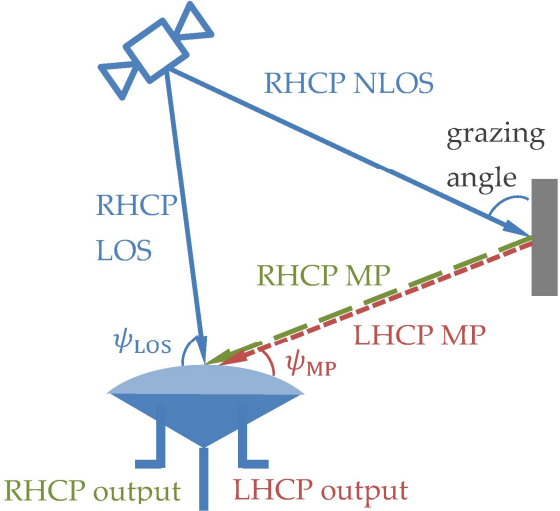
Menjava polarizacije po odboju

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

44 / 70



<https://www.mdpi.com/1424-8220/17/2/359/htm>

bostjan.batagelj@fe.unii-lj.si

61

GNSS sprejemnik

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

45 / 70

antena

ozkopasovno
sito

RF
ojačevalnik

frekvenčno
sito

A/D
pretvornik

digitalni
sledilni signal

digitalni
sledilni signal

izračun
položaja,
hitrosti,
časa

izhod

Antena je edino mesto, kjer je mogoče izvesti selektivnost glede na smer prihoda signala (angl. angle of arrival - AoA).

Antena je prvo mesto, kjer se lahko borimo s signali, ki so izven našega frekvenčnega področja.

Kompromis med selektivnostjo in izgubami

Vpliv na šum sprejemnika

sintetizator
frekvence

lokalni
oscilator

Možnost izkoriščanja predvidljivih lastnosti motenj z namenom, da se jih izključi

V pametnih telefonih za izračun poskrbi procesor na telefonu, kar poceni sprejemnik.

Pri optimizaciji je pomemben parameter G/T (G je lastnost antene, T je večinoma lastnost ojačevalnika)

GPS sprejemnik in 50 m oddaljena antena

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

46 / 70

Antena za frekvenco $L_1=1575,42$ MHz je povezana s koaksialnim kablom dolžine $l=50$ m do GPS sprejemnika na krovu letala. Kolikšno je pričakovano odstopanje izračunanega položaja letala Δr ? Pri $GDOP=2$? Kabel vsebuje dielektrik z $\epsilon_r=2,6$, kar dodatno upočasnjuje valovanje v kablju. Izgube kabla nadomešča ojačevalnik pri anteni.

Zakasnitev koaksialnega kabla

$$\Delta t = \frac{l}{v} = \frac{l}{\frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}}} = \frac{l \cdot \sqrt{\epsilon_r}}{c_0} = \frac{50 \text{ m} \cdot \sqrt{2,6}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 269 \text{ ns}$$

Enačba hiperbole $\left| \vec{r}_i - \vec{r}_u \right| - \left| \vec{r}_j - \vec{r}_u \right| = c_0 \left[(t_i - \Delta t) - (t_j - \Delta t) \right] = c_0 \left[t_i - t_j \right] \Rightarrow \underline{\underline{\Delta r = 0}}$

Ker se zakasnitev kabla v navigacijskih enačbah natančno odšteje, je za vse signale pogrešek enak.

Posledično je odstopanje izračunanega položaja $\Delta r=0$.

GPS sprejemnik vedno izračuna položaj antene!

desno krožno polarizirana antena



bostjan.batagelj@fe.unii-lj.si

62

DOP

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

47 / 70

Kakovost položaja satelitov se podaja z vrednostjo redčenja natančnosti (angl. dilutin of precision)

- GDOP (angl. Geometric Dilution Of Precision) – geometrično redčenje natančnosti, celotna točnost; 3D koordinate in čas
- PDOP (angl. Positional Dilution Of Precision) – položajno redčenje natančnosti, položajna točnost; 3D koordinate
- TDOP (angl. Time Dilution Of Precision) – časovno redčenje natančnosti, časovna točnost; čas
- HDOP (angl. Horizontal Dilution Of Precision) – horizontalno redčenje natančnosti, horizontalna točnost; 2D koordinate
- VDOP (angl. Vertical Dilution Of Precision) – višinsko redčenje natančnosti, višinska točnost; višina

GDOP (geometrično)

↓

PDOP (položajno)

↓

HDOP (horizontalno)

↓

NDOP (angl. North)

↓

TDOP (časovno)

↓

VDOP (višinsko)

↓

EDOP (angl. East)

Vir: Janja Konečnik, „Integracija sistemov GPS in GLONASS v geodetski izmeri“, 2008 <https://core.ac.uk/download/pdf/12088558.pdf>

Vir: [https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_\(satellite_navigation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_(satellite_navigation))

GDOP

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

48 / 70

vrednost GDOP	ocena	
1	idealno	(angl. ideal)
2-4	odlično	(angl. excellent)
4-6	dobro	(angl. good)
6-8	srednje	(angl. moderate)
8-20	zadovoljivo	(angl. fair)
20-50	slabo	(angl. poor)

vir: M. Tahsin, S. Sultana, T. Reza and M. Hossam-E-Haider, "Analysis of DOP and its preciseness in GNSS position estimation," *2015 International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)*, Savar, Bangladesh, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEEICT.2015.7307445.

vir: Langley and R.B., "Dilution of Precision," *GPS World*, pp. 52–59, 1999.

- Določite odstopanje $\Delta r = ?$ izračunanega položaja GPS uporabniškega sprejemnika, ko odboji v neposredni okolici sprejemne antene doprinesejo časovno napako $\Delta t = 33 \text{ ns}$. Faktor GDOP znaša $GDOP = 2,71$, pogrešek troposfere, ionosfere in satelitske oddaje so za nekaj velikostnih razredov manjši in jih zanemarimo.

$$\Delta r = GDOP \cdot c_0 \cdot \Delta t = 2,71 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 33 \cdot 10^{-9} \text{ s} = \underline{\underline{26,8 \text{ m}}}$$

Napake zaradi ionosfere



Laboratorij za
sevanje in optiko

49 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Primer:

- Pogrešek izračuna položaja uporabnika zaradi ionosfere znaša $\Delta r = 30$ m na frekvenci $L1 = 1575,42$ MHz navigacijskih satelitov GPS. Kolikšen je pogrešek $\Delta r = ?$ na frekvenci $L2 = 1227,6$ MHz ob istem naboru satelitov (nespremenjen GDOP)?

$$\Delta r \propto f^{-2} \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta r_2}{\Delta r_1} = \left(\frac{f_{L1}}{f_{L2}} \right)^2 \quad \Rightarrow \quad \Delta r_2 = \Delta r_1 \left(\frac{f_{L1}}{f_{L2}} \right)^2 = 30 \text{ m} \left(\frac{1575,42 \text{ MHz}}{1227,6 \text{ MHz}} \right)^2 = \underline{\underline{49,4 \text{ m}}}$$

- Z meritvijo na dveh frekvencah je mogoče popolnoma izločiti pogrešek ionosfere.

geometric dilution of precision (GDOP) – geometrično redčenje natančnosti

Napake zaradi ionosfere



Laboratorij za
sevanje in optiko

50 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Primer:

- Pri sprejemu signala s satelita GPS na obeh frekvencah $L1 = 1575,42$ MHz in $L2 = 1227,6$ MHz izmerimo zakasnitev modulacije na frekvenci $L2$ glede na $L1$ $\Delta t = 15$ ns. Koliko znaša doprinos k pogrešku določanja položaja uporabnika $\Delta r = ?$, če uporabljamo rezultate meritve na frekvenci $L1$.
ter ionosferskega pogreška za dani satelit ne popravimo pri faktorju $\text{GDOP} = 3,5$?

$$\Delta t_1 = \frac{\alpha}{f_{L1}^2} \quad \Delta t_2 = \frac{\alpha}{f_{L2}^2}$$

$$\Delta t = \Delta t_2 - \Delta t_1 = \alpha \left(\frac{1}{f_{L2}^2} - \frac{1}{f_{L1}^2} \right) \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{\Delta t}{\left(\frac{1}{f_{L2}^2} - \frac{1}{f_{L1}^2} \right)} = \frac{\Delta t}{f_{L2}^{-2} - f_{L1}^{-2}}$$

$$\Delta t_1 = \frac{\alpha}{f_{L1}^2} = \frac{\Delta t}{f_{L1}^2 \left(\frac{1}{f_{L2}^2} - \frac{1}{f_{L1}^2} \right)} = \frac{\Delta t}{f_{L1}^2 - 1} = \frac{15 \text{ ns}}{\left(\frac{1575,42 \text{ MHz}}{1227,6 \text{ MHz}} \right)^2 - 1} = 23,2 \text{ ns}$$

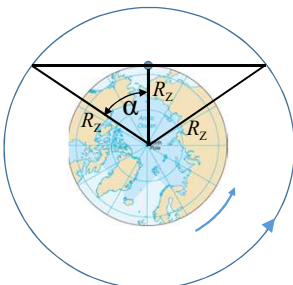
$$\Delta r = c_0 \cdot \Delta t_1 \cdot \text{GDOP} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 23,2 \cdot 10^{-9} \text{ s} \cdot 3,5 = 6,96 \text{ m} \cdot 3,5 = \underline{\underline{23,4 \text{ m}}}$$

Čas trajanja radijske zveze

- Satelit Galilei se nahaja v krožni (e=0) tirnici z nagibom i=56° na višini h=23.222 km nad površino Zemlje. Izračunajte čas trajanja radijske zveze s sprejemno postajo na ekvatorju za celoten prelet satelita od obzorja do obzorja, ki gre nad glavo opazovalca! Lom radijskih valov v ozračju zanemarimo.

$$a = h + R_z = 800 \text{ km} + 6378 \text{ km} = 7178 \text{ km}$$
$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} = 2\pi \sqrt{\frac{(7178 \text{ km})^3}{3,986 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2}} = 6052 \text{ s} = 100,9 \text{ min}$$
$$\alpha = \arccos \frac{R_z}{h + R_z} = \arccos \frac{6378 \text{ km}}{800 \text{ km} + 6378 \text{ km}} = 27,3^\circ = 0,477 \text{ rd}$$

$$R_z = 6378 \text{ km},$$
$$\mu = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$$
$$T_z = 1436 \text{ min}$$

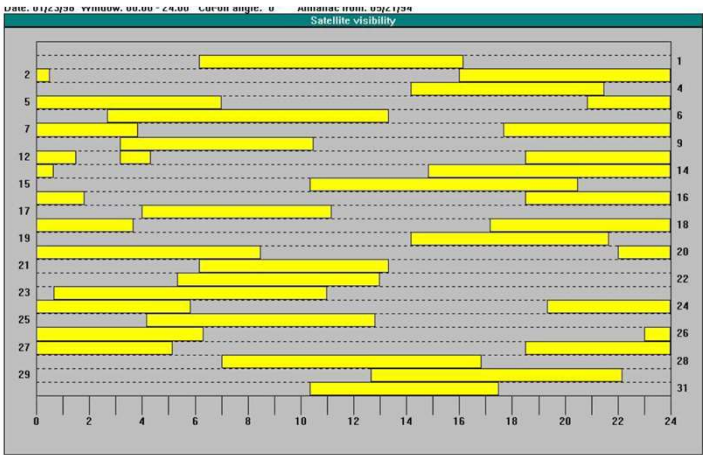


- Brez upoštevanja vrtenja Zemlje
$$\frac{360^\circ}{T_s} = \frac{2\alpha}{t} \Rightarrow t = 2\alpha \frac{T_s}{360^\circ} = 2\alpha \frac{T_s}{2\pi} = \frac{2\alpha}{\frac{2\pi}{T_s}} = \frac{2 \cdot 0,477 \text{ rd}}{\frac{2\pi}{6052 \text{ s}}} = 918 \text{ s}$$
- Z upoštevanjem vrtenja Zemlje
$$t = \frac{2\alpha}{\frac{2\pi}{T_s} - \frac{2\pi}{T_z}} = \frac{2 \cdot 0,477 \text{ rd}}{\frac{2\pi}{6052 \text{ s}} - \frac{2\pi}{1436 \text{ min} \cdot 60 \text{ s}}} = 988 \text{ s} = \underline{16 \text{ min } 28 \text{ s}}$$

■ Naklon 0° pomeni ekvatorialno tirnico, kjer gre vrtenje satelita v isti smeri kot vrtenje Zemlje.

Satellite Overhead Schedule

- Nam prikaže, kdaj je razpoložljiv kakšen satelit.



Trimble Total Control Software

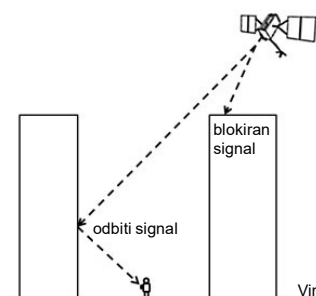
Izvori napak pri GNSS

LSO

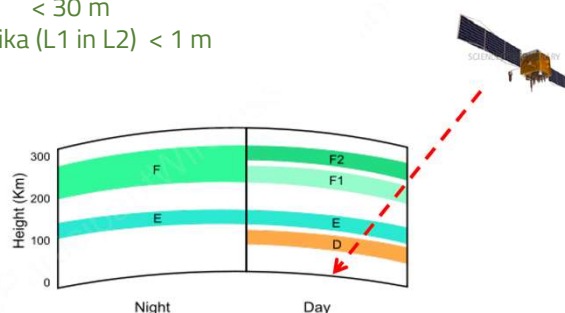
Laboratorij za
sevanje in optiko

53 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- Napaka ure na satelitu (atomska ura) ≈ 1 m
- Napaka v položaju satelita (napaka tirnice) – nenatančnost efemerid [ephemeris] ≈ 1 m (podatki so lahko stari do dve uri)
- Napaka zaradi pojava večpotja (prispevki zaradi odboja signala na ovirah) [multipath] ≈ 1 m (ali več)
- Napaka sprejemnika < 1 m
- Napaka zaradi sprememb v ozračju
 - troposfera (vreme) ≈ 1 m
 - ionosfera (čas dneva)
 - napaka pri uporabi samo ene frekvence (L1) < 30 m
 - napaka pri uporabi dvofrekvenčnega sprejemnika (L1 in L2) < 1 m



Vir: <http://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/#sa>



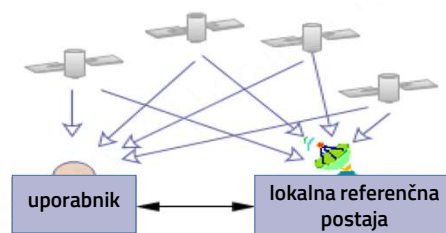
GPS izboljšave

LSO

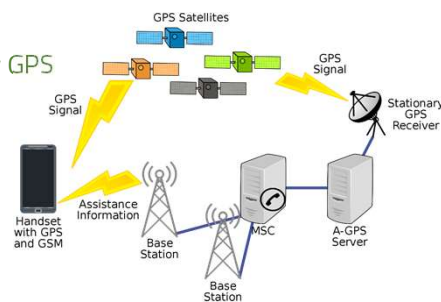
Laboratorij za
sevanje in optiko

54 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- **diferencialni GPS (angl. differential GPS – DGPS)**
 - S pomočjo referenčne postaje uporabnik dobi vektor popravkov.



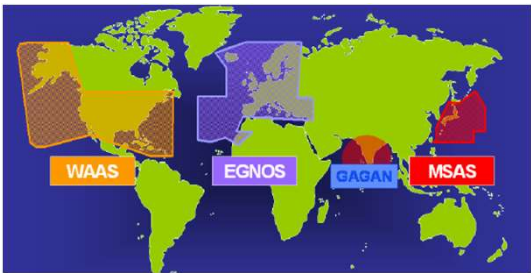
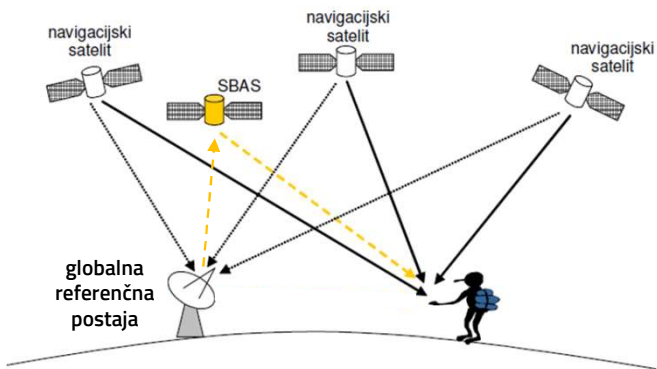
- **assisted GPS**
 - razvije Qualcomm leta 2004
 - omogoča navigacijo s kombinacijo mobilnega signala in satelitov GPS
 - bazne postaje prek mobilnega signala posredujejo določene informacije o tirnicah satelitov (efemeride in almanah)
 - zmanjša se čas do prve sinhronizacije (angl. Time to first fix)



- **Globalni satelitsko izboljševalni sistem (angl. Global Satellite Based Augmentation Systems – SBAS)**

Satelitsko izpopolnitveni sistemi

- Globalni satelitsko izboljševalni sistem (angl. Global Satellite Based Augmnetation Systems – SBAS)
- Omnistar in StaFire
- Regioalni satelitsko izboljševalni sistemi:
 - ZDA – Wide Area Augmentation Sysem (WAAS)
 - Evropa – European Geostacionary Navigation Overlay Service (EGNOS)
 - Japonska – Multi-Fuctional Satellite Augmentation System (MSAS)



Satelitsko izpopolnitveni sistemi

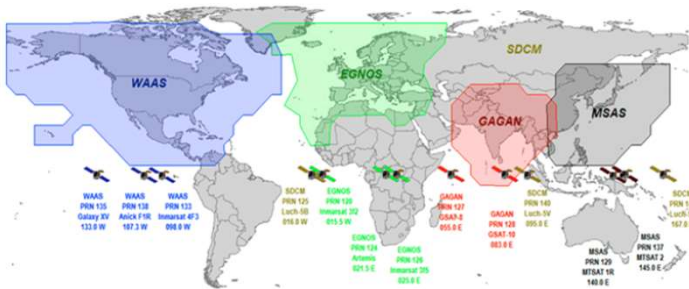
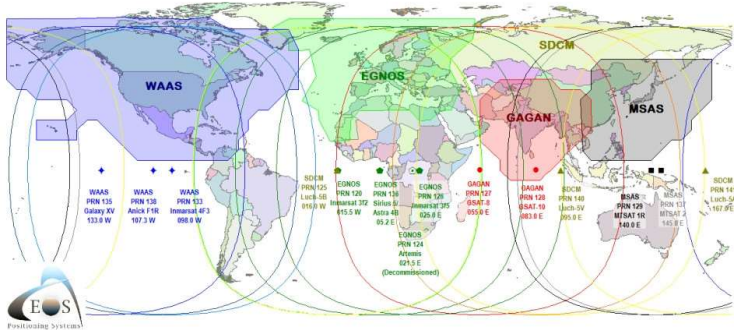


Fig. 1 Existing SBAS Coverage (GENEQ Inc 2015).

Vir: https://www.researchgate.net/publication/308761466_GNSS_satellite-based_augmentation_systems_for_Australia

Satelitsko izpopolnitveni sistemi

vir: How to Get Free GPS Sub-Meter Corrections with SBAS Satellite Systems, <https://eos-gnss.com/can-get-gps-sub-meter-corrections-free>



- WAAS (Wide Area Augmentation System) – Canada, United States, Central America, northern region of South America.
- EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) – Western/Eastern Europe and Northern Africa.
- MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System) – Japan.
- GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation) – India and parts of surrounding countries.
- SDCM ("System for Differential Correction and Monitoring") – Russia (in deployment)

Meritev GPS signala na spektralnem analizatorju

- Oddajo radio-navigacijskega satelita GPS opazujemo na spektralnem analizatorju, ki je priključen na anteno z dobitkom $G_s=20$ dBi. Nizkošumni predojačevalnik omogoča skupno šumno temperaturo antene in sprejemnika $T=200$ K. Efektivna sevana moč satelita ($P_o \cdot G_o$) je $EIRP=+57$ dBm za BPSK oddajo C/A z bitno hitrostjo $R=1,023$ Mbit/s. Kolikšno največje razmerje signal/šum $(S+N)/N=?$ (v dB) odčitamo na spektralnem analizatorju s sitom pasovne širine $B=30$ kHz?
- ($f_{L1}=1,57542$ GHz, $c_0=3 \cdot 10^8$ m/s, $d=20\,000$ km, $k_B=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

$$P_N = Bk_B T = 30 \cdot 10^3 \text{ Hz} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \cdot 200 \text{ K} = 8,28 \cdot 10^{-17} \text{ W}$$

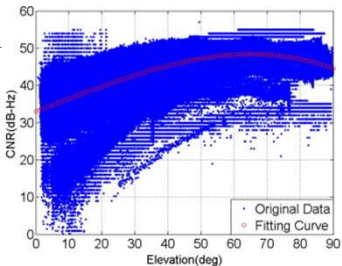
$$\lambda = \frac{c_0}{f_{L1}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,57542 \cdot 10^9 \text{ Hz}} = 19 \text{ cm} \qquad G_s = 20 \text{ dBi} = 100$$

$$P_s = P_o G_o G_s \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = 500 \text{ W} \cdot 100 \cdot \left(\frac{0,19 \text{ m}}{4\pi \cdot 2 \cdot 10^7 \text{ m}} \right)^2 = 2,87 \cdot 10^{-14} \text{ W} = 28,7 \text{ fW} = -105 \text{ dBm}$$

$$P'_s = P_s \frac{B}{R} = 2,87 \cdot 10^{-14} \text{ W} \cdot \frac{3 \cdot 10^4 \text{ Hz}}{1,023 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 8,42 \cdot 10^{-16} \text{ W}$$

$$\frac{S+N}{N} = \frac{P'_s + P_N}{P_N} = \frac{8,42 \cdot 10^{-16} \text{ W} + 8,28 \cdot 10^{-17} \text{ W}}{8,28 \cdot 10^{-17} \text{ W}} = 11,17 = \underline{\underline{10,5 \text{ dB}}}$$

$$P_o G_o = +57 \text{ dBm} = 500 \text{ W}$$



Izračun S/N signala GPS

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

59 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- Signal C/A navigacijskih satelitov GPS se posreduje s pomočjo oddajnika moči $P_0 = 50 \text{ W}$ na frekvenci $f_{L1} = 1.575,42 \text{ MHz}$ in oddajno anteno z oblikovanim snopom stožčaste oblike, da pravilno osvetli celotno vidno zemeljsko površino iz krožnice na višini $h = 20.000 \text{ km}$. Izračunajte razmerje signal/šum $S/N = ?$ v decibelih po pasovnem situ širine $B = 2 \text{ MHz}$ v sprejemniku, ki se nahaja direktno pod satelitom. Sprejemnik je opremljen z anteno, ki pokriva gornjo poloblo ($G_s = 3 \text{ dBi}$) ter skupno šumno temperaturo antene in sprejemnika $T = 200 \text{ K}$. ($c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$)

$$\lambda = \frac{c_0}{f_{L1}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,57542 \cdot 10^9 \text{ Hz}} = 19 \text{ cm}$$

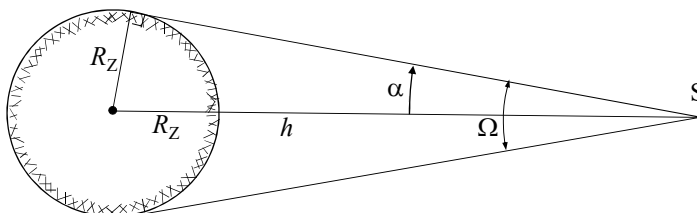
$$\sin \alpha = \frac{R_Z}{h + R_Z} \quad \Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha)$$

$$D = \frac{4\pi}{\Omega} = \frac{2}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{R_Z}{h + R_Z}\right)^2}} = 67,4 = G_0$$

$$P_s = P_0 G_0 G_s \left(\frac{\lambda}{4\pi h} \right)^2 = 50 \text{ W} \cdot 67,4 \cdot 3 \cdot \left(\frac{0,19 \text{ m}}{4\pi \cdot 2 \cdot 10^7 \text{ m}} \right)^2 = 3,84 \cdot 10^{-15} \text{ W}$$

$$P_N = B k_B T = 5,52 \cdot 10^{-15} \text{ W}$$

$$S / N = 10 \log P_s / P_N = -1,54 \text{ dB}$$



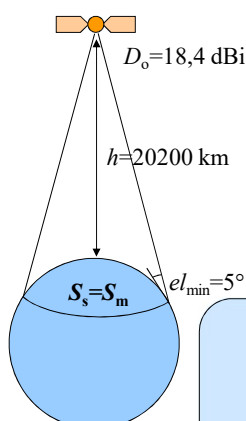
Zahtevana moč motilnika

LSO

Laboratorij za
sevanje in optiko

60 / 70
bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

- Izračunajmo potrebno moč motilnika za signal GPS, ki je od sprejemnika oddaljen 6 m.



Računanje gostote pretoka moči
na enoto ploskve

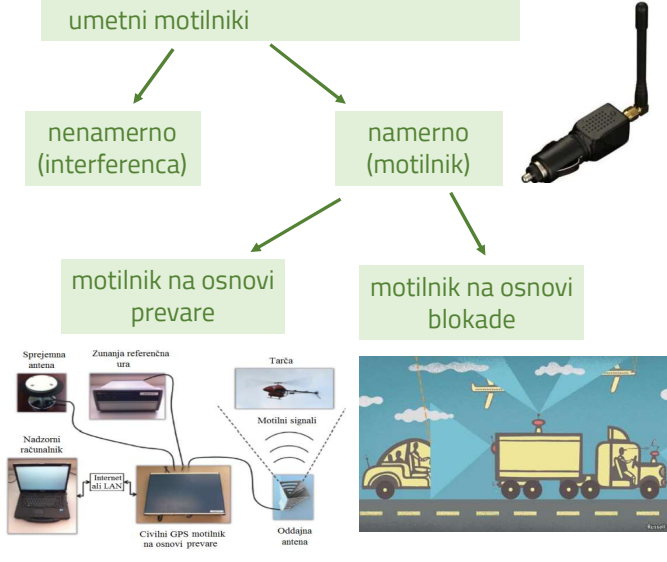
$$S_s = \frac{P_0 \cdot \eta_0 \cdot D_o}{4\pi r^2} = 5,38 \cdot 10^{-13} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Izračun moči motilnika

$$P_m = \frac{4\pi R^2 \cdot S_m}{G_m} = \frac{4\pi (6 \text{ m})^2 \cdot 5,4 \cdot 10^{-13} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{10} = -76 \text{ dBm}$$

Motilniki navigacijskega signala

- naravni motilniki
- vremenske nepravilnosti
 - EM sevanje / sončni izbruhi / ionosfera
 - zastiranje signala / senčenje / večpotni pojavi
 - neugodna lega satelitov



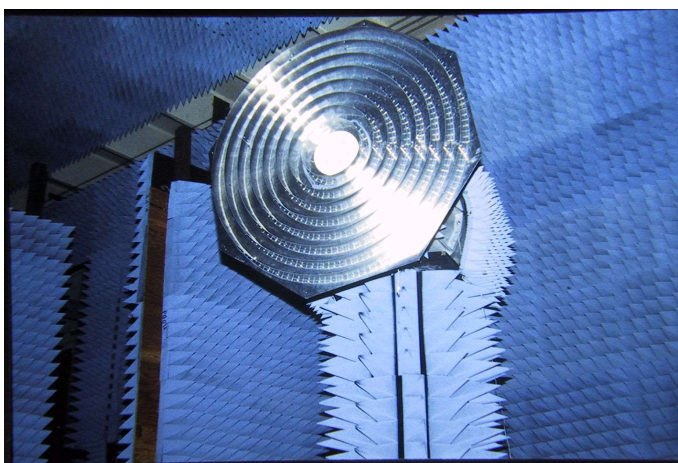
Možnosti za zmanjševanje vpliva motilnika navigacijskega signala

S spremljanjem kakovosti signala (angl. signal quality monitoring – SQM) lahko v sprejemniku GNSS odkrijemo problematične ali lažne/potvorjene satelitske signale, ki drastično vplivajo na zanesljivost določitve položaja in prenosa časa.

Opredelitev kakovosti signala lahko temelji na spremljanju specifičnih parametrov, kot sta **preverjanje navzkrižne korelacije** ter **razmerja med signalom in šumom**, **zaznavanju nenadnih skokov jakosti signala** ter **modeliranju razlik kodnih in faznih opazovanj**.

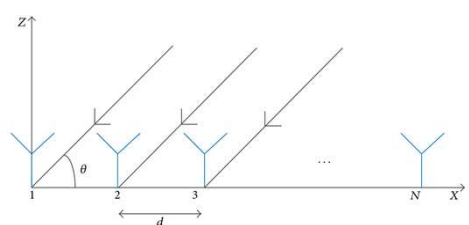
- filtriranje signalov (prostorsko in frekvenčno),
- uporabo redundantnih sistemov
- preverjanje pristnosti signalov

Zmanjševanje vpliva odbojev in motilnikov na nizkih elevacijah

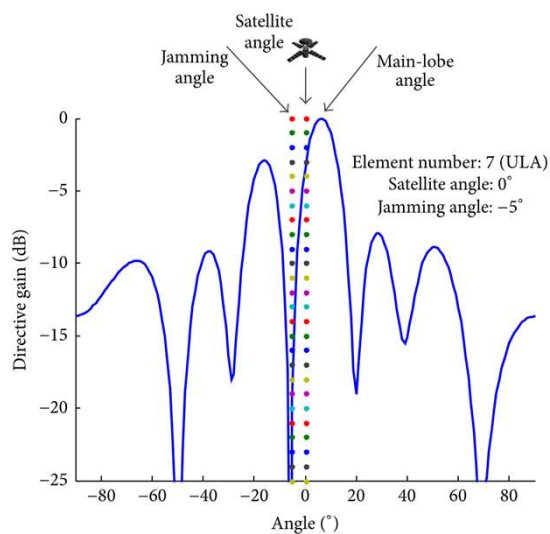


Davis, D., Weiss, H., Vidmar, H., "A Codeless Ionospheric Calibrator for Time Transfer Applications," *Proceedings of the 2nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1989)*, Colorado Spring, CO, September 1989, pp. 451-459.
<https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=11828>

Zmanjševanje vpliva motilnika navigacijskega signala



- antenska skupina z linearno geometrijo



- Prikaz motenja sprejema signala iz satelita

Vir: Yanyun Gong, Ling Wang, Rugui Yao, Zhaolin Zhang, "A Robust Method to Suppress Jamming for GNSS Array Antenna Based on Reconstruction of Sample Covariance Matrix", International Journal of Antennas and Propagation, Hindawi, 2017, <https://doi.org/10.1155/2017/9764283>

GNSS v nizki zemeljski tirnici

Global Navigation Satellite Systems (GNSS)

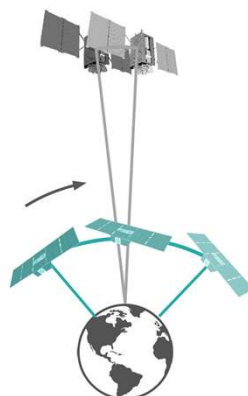
- Xonina konstelacija majhnih satelitov v LEO bo zagotovila alternativo sedanjim GNSS z več kot 10-krat boljšo natančnostjo.
- Zagonsko podjetje Xonina je sistem na nizki tirnici patentirala.



šifriran signal, ki bo vseboval popravke za izboljšanje natančnosti



signal bo imel višjo moč, kot sedanji GNSS signali



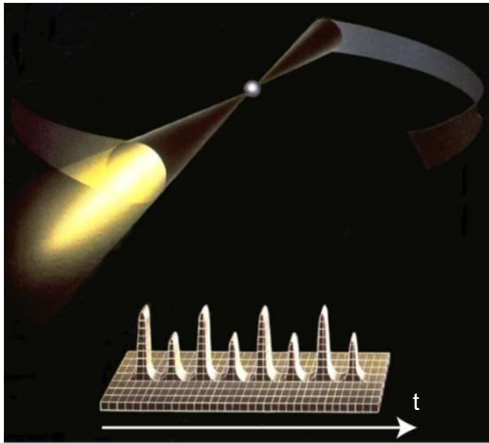
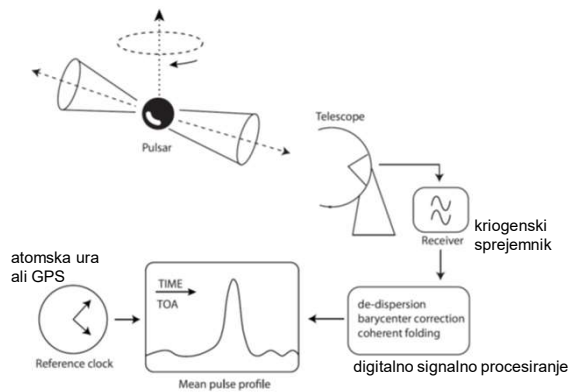
sistem bo omogočal hitrejšo vklenitev, kot sedanji GNSS

Vir: <https://www.xonaspace.com>



Navigacija v vesolju s pomočjo pulzarjev

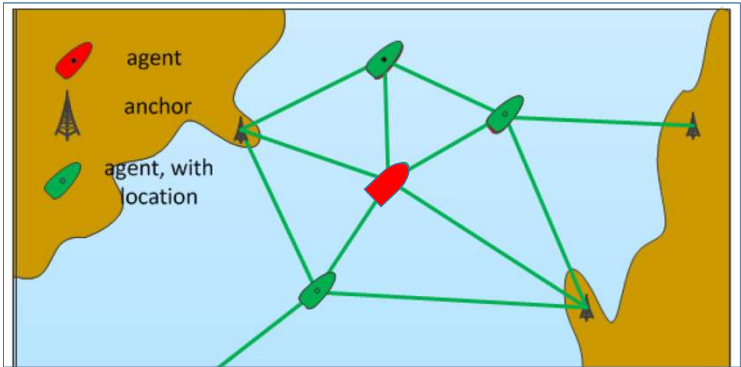
- Pulzarju so masivna vesoljska vztrajnostna kolesa.
- Milisekundni pulzarji oddajajo stabilne ozke impulze.



Werner Becker, Mike G. Bernhardt, Axel Jessner: „Autonomous Spacecraft Navigation With Pulsars“, 2013

Sodelovalni (kooperativni) navigacijski sistemi

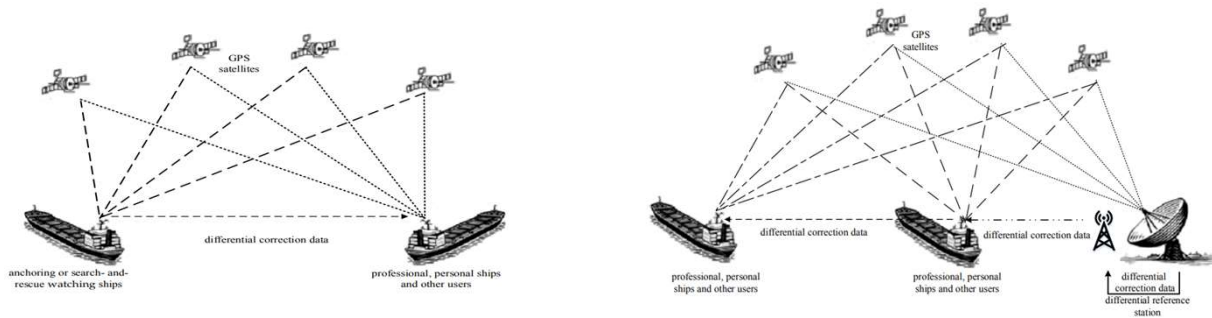
- Pomagamo si z napravami, katerih položaj je znan.
- Agenti oziroma vozlišča, katerih položaj ni znan, morajo za ocenitev svoje lokacije pridobiti dodatne podatke od sosednjih agentov.
- Množica algoritmov je znana pod imenom kooperativni algoritmi za določanje položaja.
- Problem kooperativne navigacije je možno rešiti kot nelinearni problem z uporabo metode minimizacije najmanjših kvadratov ali kot problem sklepanja na grafičnem modelu.



Vir: Tomaž Javornik, Andrej Hrovat, „Kooperativna lokalizacija v brezžičnih senzorskih omrežjih“, SRK 2018

Sodelovalni (kooperativni) navigacijski sistemi

- GNSS izpopolnitveni sistemi s pomočjo AIS



vir: M. Nguyen, S. Huai, S. Zhang and X. Wang, "The Method for Enhancing Positioning Accuracy Based on Automatic Identification System," 2019 International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI), Nanjing, China, 2019, pp. 159-166, doi: 10.1109/EEI48997.2019.00043.

Radiolokacija in radionavigacija

Radiodeterminacija – radijsko določanje položaja, hitrosti, smeri, pospeška

Radiolokacija

je določanje parametrov drugih (pasivnih) objektov

meritev odbitih signalov RADAR (RADio Detection And Ranging)

Radionavigacija

je določanje parametrov (aktivnih) uporabnikov sistema

meritev kotov iz smernih diagramov anten

pogrešek premo sorazmeren oddaljenosti od svetilnika

meritev razdalj iz časa potovanja radijskega signala

pogrešek neodvisen od oddaljenosti od svetilnika

meritev hitrosti iz Dopplerjevega pomika frekvenc

pogrešek neodvisen od oddaljenosti od svetilnika