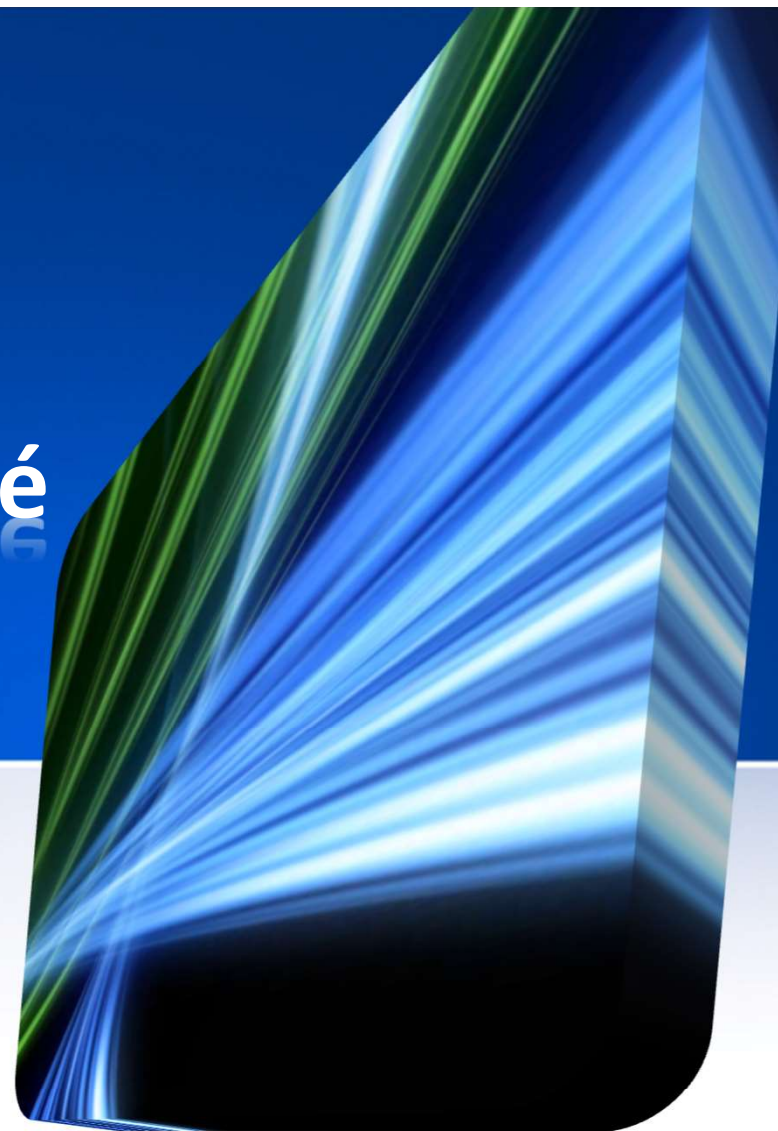
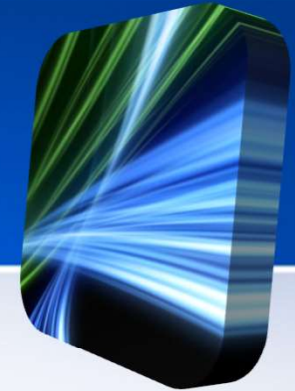


Základní principy rádiové navigace a lokace

Doc. Dr. Ing. Pavel Kovář



Program předmětu RNV



1. Základní principy fungování radionavigačních a radiolokačních systémů, měření vzdálenosti, úhlu, času příchodu signálu. Triangulace, multilaterace, dálkoměrná metoda, radiokomunikační a radarová rovnice.
2. Popis polohy bodu v prostoru, souřadnicové systémy (ECEF, Geodetické, kartézské, lokální, ECI), vzájemné přepočty.
3. Výpočet polohy navigační družice, rovnice dráhy družice a její řešení, keplerovské parametry dráhy družice.
4. Výpočet polohy uživatele, časová základna, relativistické jevy, jednorázové metody výpočtu polohy, chyby polohy, Kalmanova filtrace.
5. Družicové navigační signály, požadavky na signál, modulace BPSK, BOC, dálkoměrné posloupnosti, spektrum a korelační funkce.
6. Šíření navigačních signálů, ionosférická refrakce a její modelování, dvou frekvenční měření, zpoždění v troposféře, mnohocestné šíření a jeho modelování.
7. Zpracování navigačních signálů I. část: Odhad parametrů, sledování signálu, korelátor, diskriminátory fáze, frekvence a zpoždění, filtr smyčky. Chyby měření způsobené šumem, mnohocestným šířením, demodulace navigační zprávy.
8. Zpracování navigačních signálů II. část: Počáteční synchronizace, sériové metody, Tongův algoritmus, M z N, paralelní metody ve frekvenci a ve zpoždění, 2D metody. Implementace algoritmů vyhledávání.
9. Přehled družicových navigačních systémů, GPS, GLONASS, Galileo, Compass, podpůrné systémy WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN.
10. Pokročilé algoritmy zpracování signálu a výpočtu polohy, vysoká citlivost, vektorové sledování signálu, měření na fázi, RTK.
11. Přehled terestriálních navigačních systémů, hyperbolické navigační systémy, navigační systémy používané v letectví (DME, ILS).
12. Typy radarů (primární, sekundární pasivní), zpracování signálu v radaru, dopplerovská filtrace.
13. Sekundární radar, módy A, C a S, squitter, extended squitter, ADS-B, TCAS.
14. Pasivní radiolokace, směrové zaměřovače, TDOA systémy. Úvodní přednáška

Program cvičení



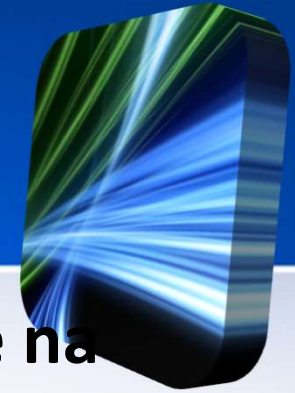
1. Seznámení se s laboratoří, bezpečnost práce
2. Radiokomunikační a radarová rovnice, příklady
3. Úloha v Matlabu na transformaci souřadnic
4. Úloha v Matlabu na výpočet polohy navigačních družic
5. Úloha v Matlabu na výpočet polohy uživatele
6. GNSS simulátory
7. Měření spektra družicových navigačních signálů
8. Měření rychlosti startu, citlivosti a chyby polohy družicového navigačního přijímače
9. Měření dynamického chování družicového navigačního přijímače
10. Generování VOR a ILS signálů v GNU radiu
11. Zpracování VOR a ILS signálů v GNU radiu
12. Zpracování odpovědí sekundárního radaru v GNU radiu
13. Doplnkové měření
14. Rezerva

Úvod do rádiové navigace



- Základní principy rádiové navigace
- Úvod do družicových navigačních systémů
- Úvod do rádiové lokace

Základy rádiové navigace



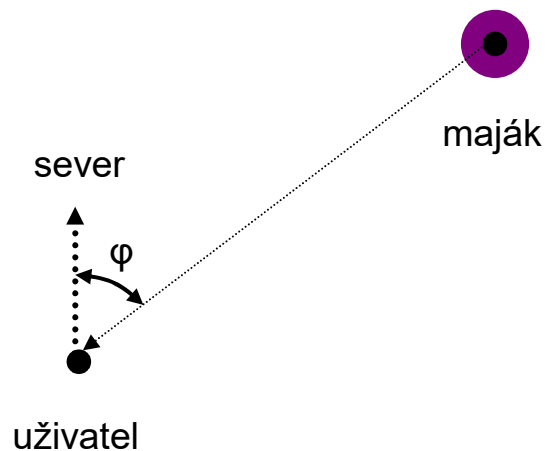
- **Poloha resp. odchylka od trasy se vyhodnocuje na základě zpracování rádiových signálů**

- | | | |
|--------|----------------------------|---------------------------------------|
| — AoA | Angle of Arrival | - směr příchodu signálu |
| — SS | Signal Strength | - síla signálu |
| — ToA | Time of Arrival | - čas příchodu signálu |
| — TDoA | Time Difference of Arrival | - rozdíl časů příchodu signálů |
| — DS | Doppler shift | - Dopplerův posuv kmitočtu nosné vlny |
- Elektronické vyznačení trasy
 - Elektronické vyznačení bodu

AoA – směr příchodu signálu



Aplikace



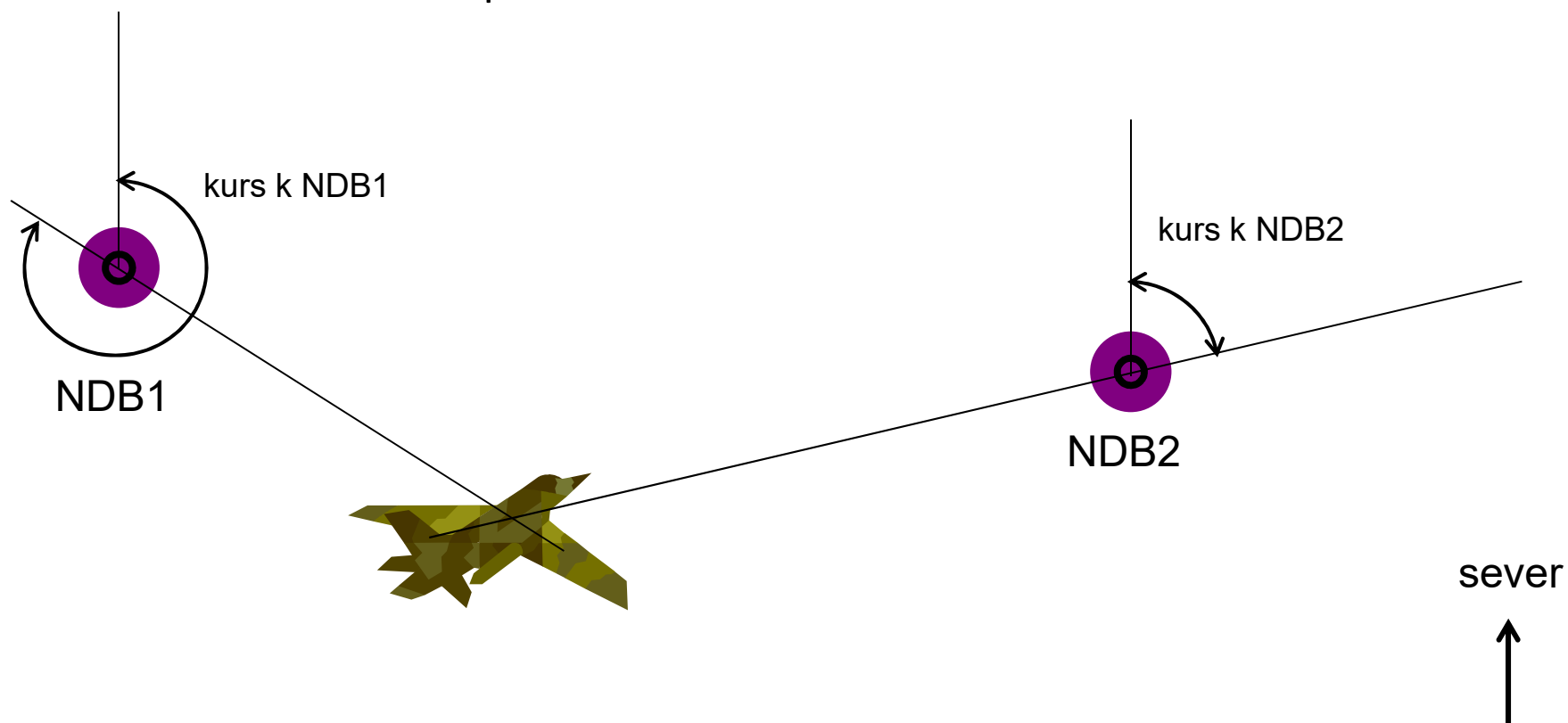
- **Směrové antény**
 - Radiokompas DF
 - Automatický radiokompas ADF
 - Radar
- **Dopplerovský směrový zaměřovač**
 - VHF Direction Finder (VKV směrový zaměřovač letadel)
 - Zaměřování ukradených vozidel

Triangulace

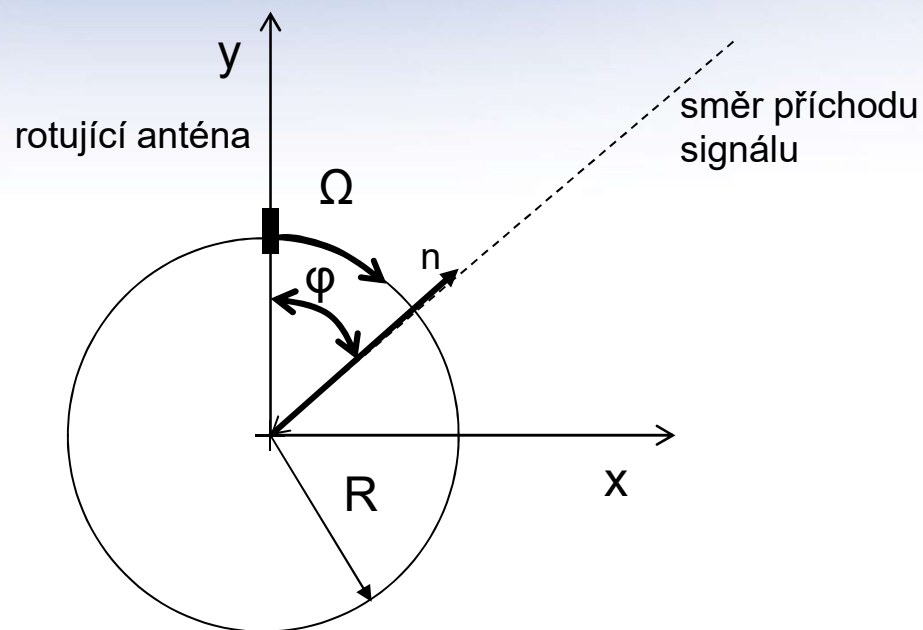


Určování polohy

- Určí se kurs ke dvěma všesměrovým majákům NDB
- Poloha se určí jako průsečík příslušných radiál v navigační mapě
- Přesnost závisí na přesnosti měření



Dopplerovský směrový zaměřovač



Rotační pohyb antény způsobí, že v důsledku Dopplerova jevu bude přijímaný signál kmitočtově modulovaný harmonickým signálem s periodou otáčení antén. Fáze modulačního signálu závisí na směru φ příchodu signálu.

Souřadnice rotující antény

$$x(t) = R \sin(\Omega t)$$

$$y(t) = R \cos(\Omega t)$$

rychlost

$$v_x(t) = \frac{dx(t)}{dt} = R\Omega \cos(\Omega t)$$

$$v_y(t) = \frac{dy(t)}{dt} = -R\Omega \sin(\Omega t)$$

Dopplerův posuv kmitočtu způsobuje vzájemná rychlost antén

$$\begin{aligned} v_n(t) &= v_y(t) \cos \varphi + v_x(t) \sin \varphi = \\ &= -R\Omega \sin(\Omega t) \cos \varphi + R\Omega \cos(\Omega t) \sin \varphi = \\ &= -R\Omega \sin(\Omega t - \varphi) \end{aligned}$$

Kmitočet přijímaného signálu

$$f_{rx} = f_c \frac{c + v_n}{c} = f_c - \frac{f_c}{c} R\Omega \sin(\Omega t - \varphi)$$

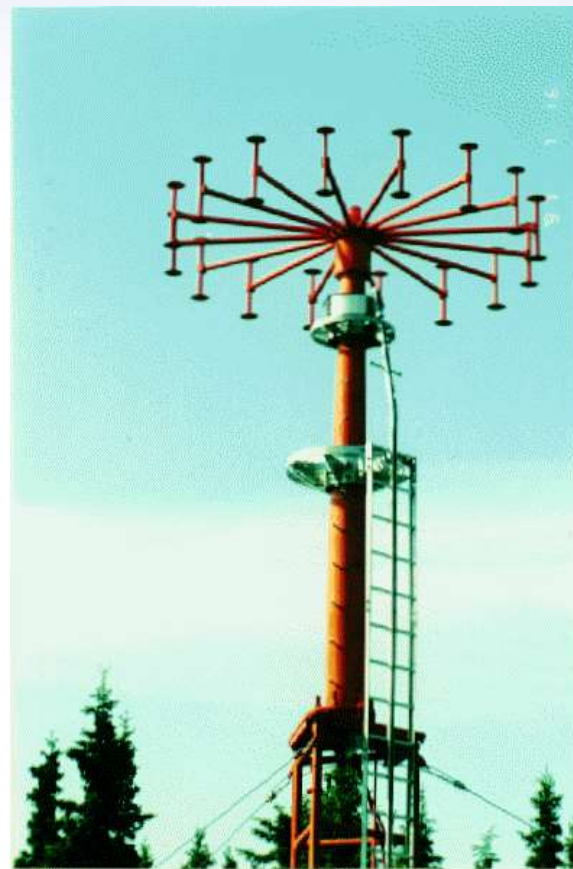
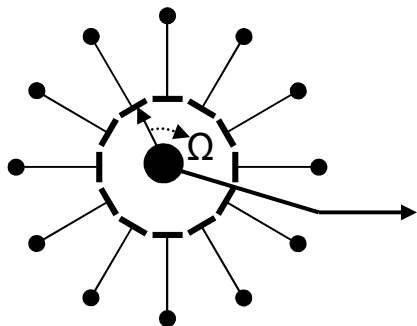
kmitočtová
modulace

fáze závisí na
směru příchodu
signálu

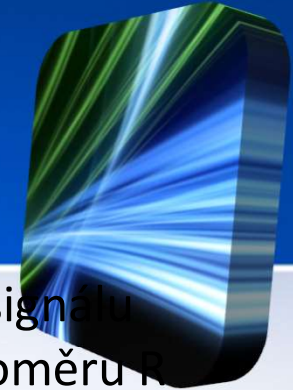
Dopplerovský směrový zaměřovač



Rotující anténu lze nahradit
přepínáním antén
rozmístěných po kružnici



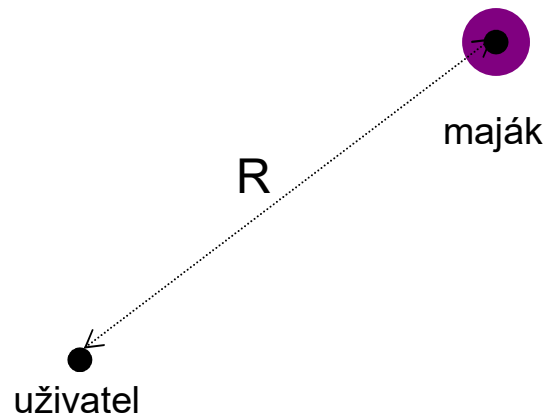
SS – síla signálu



- Měří vzdálenost od majáku na základě úrovně přijímaného signálu
- Uživatel se nachází na kružnici resp. na povrchu koule o poloměru R
- Při použití více majáků lze určit polohu jako průsečík příslušných kruhů resp. koulí

Radiokomunikační rovnice

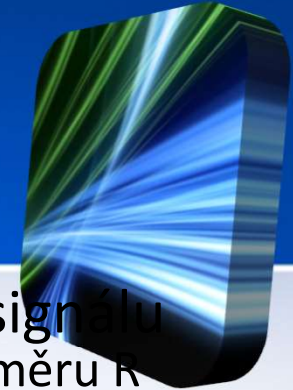
$$P_{dp} = P_v G_v G_p \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$$



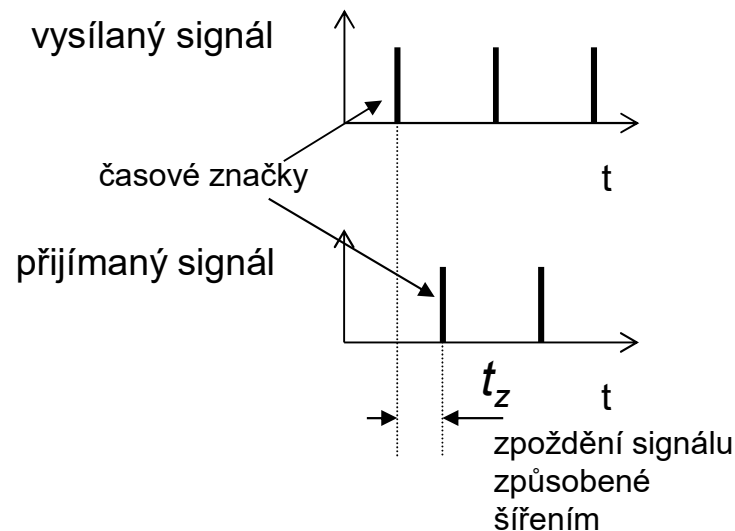
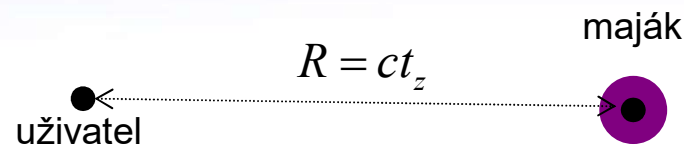
Aplikace

- měření vzdálenosti k prahu vzletové a přistávací dráhy u systému ILS (nepoužívá se)
- pokusy s navigací uvnitř budov

ToA – čas příchodu signálu



- Měří vzdálenost od majáku na základě doby šíření signálu
- Uživatel se nachází na kružnici resp. na povrchu koule o poloměru R
- Při použití více majáků lze určit polohu jako průsečík příslušných kruhů resp. koulí



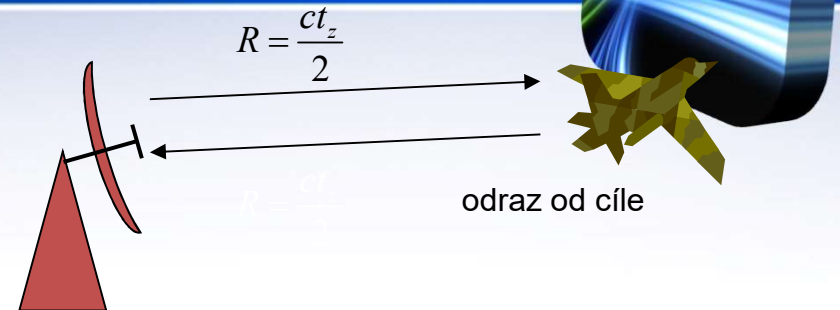
ToA – čas příchodu signálu

- **Rádiově aktivní systémy** (*uživatel vysílá rádiové signály*)

- Pasivní odraz
 - primární radar
 - rádiový výškoměr
- Dotazovač odpovídač
 - dálkoměr DME
 - sekundární radar

- **Rádiově pasivní systémy** (*uživatel pouze přijímá signály majáků*)

- Družicové navigační systémy



Signál radaru je vysílán směrovou anténou, což dovoluje určit směr cíle (kombinace AoA a ToA)

Pasivní odraz od cíle

$$S = \frac{P_v G_a}{4\pi R^2} \quad \text{plošná hustota výkonu}$$

Schopnost cíle odrážet rádiové vlny se popisuje pomocí efektivní odrazné plochy A_{ef} .

Cíl se chová jako izotropní zářič.

$$P_O = S A_{ef} \quad \text{odražený výkon od cíle}$$

Radarová rovnice

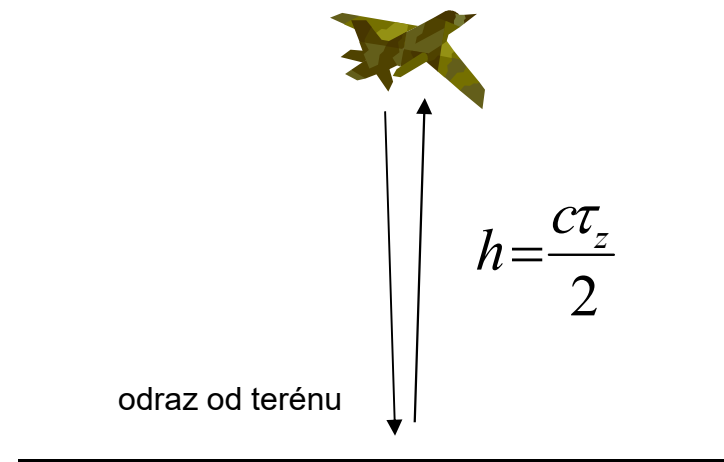
$$P_{pd} = P_O G_a \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = P_v A_{ef} G_a^2 \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}$$

Výkon přijímaného signálu klesá se čtvrtou mocninou vzdálenosti cíle !!!

ToA – čas příchodu signálu



- **Rádiově aktivní systémy** (*uživatel vysílá rádiové signály*)
 - Pasivní odraz
 - primární radar
 - rádiový výškoměr
 - Dotazovač odpovídač
 - dálkoměr DME
 - sekundární radar
- **Rádiově pasivní systémy** (*uživatel pouze přijímá signály majáků*)
 - Družicové navigační systémy

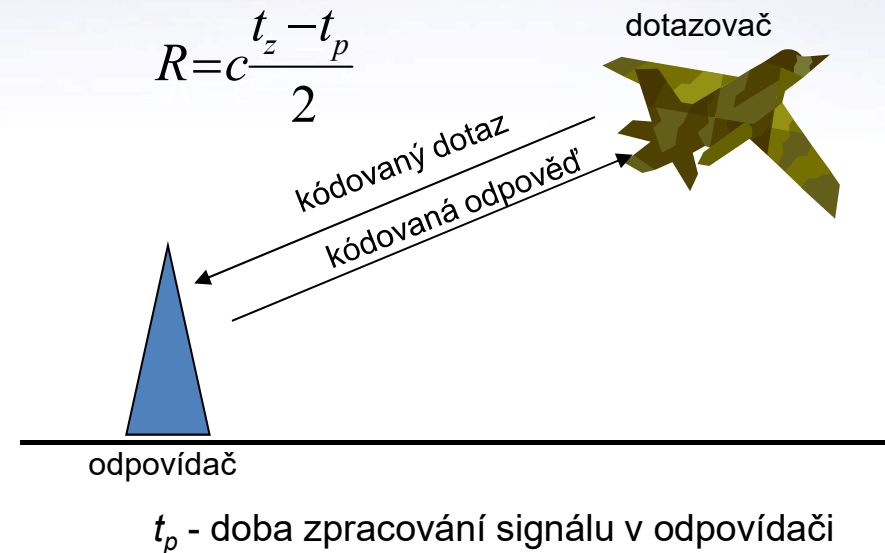


ToA – čas příchodu signálu



- **Rádiově aktivní systémy** (*uživatel vysílá rádiové signály*)

- Pasivní odraz
 - primární radar
 - rádiový výškoměr
- Dotazovač odpovídač
 - dálkoměr DME
 - sekundární radar



- **Rádiově pasivní systémy** (*uživatel pouze přijímá signály majáků*)

- Družicové navigační systémy

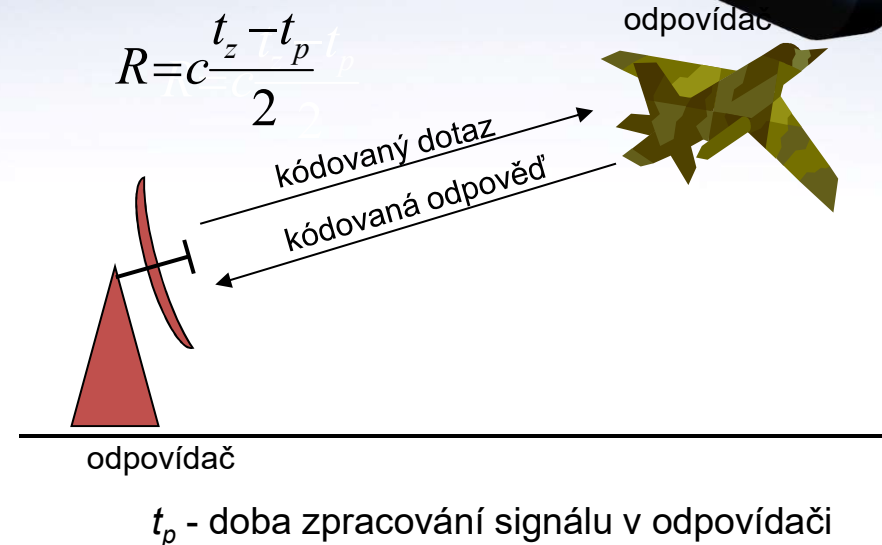
ToA – čas příchodu signálu

- **Rádiově aktivní systémy** (*uživatel vysílá rádiové signály*)

- Pasivní odraz
 - primární radar
 - rádiový výškoměr
- Dotazovač odpovídač
 - dálkoměr DME
 - sekundární radar

- **Rádiově pasivní systémy** (*uživatel pouze přijímá signály majáků*)

- Družicové navigační systémy

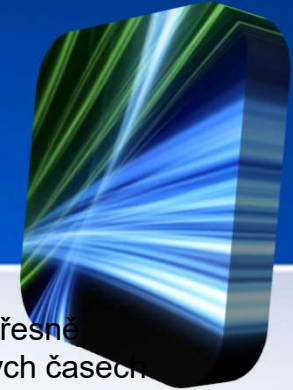


Signál radaru je vysílán směrovou anténou, což dovoluje určit směr cíle (kombinace AoA a ToA)

Sekundární radar řeší nevýhodnou energetickou bilanci primárního radaru.

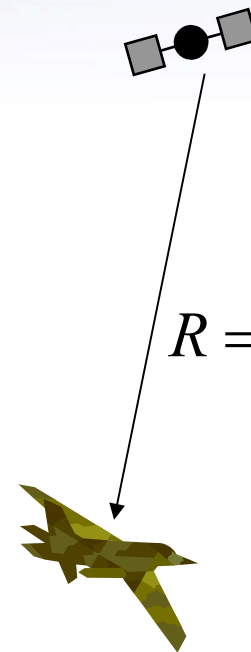
Cíl musí být vybaven rádiově aktivním odpovídačem sekundárního radaru.

ToA – čas příchodu signálu



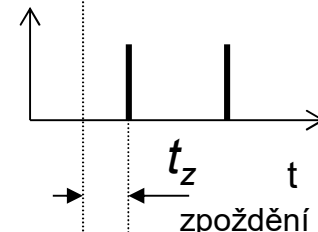
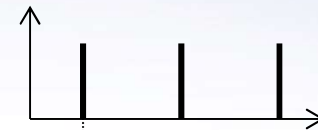
- **Rádiově aktivní systémy** (*uživatel vysílá rádiové signály*)

- Pasivní odraz
 - primární radar
 - rádiový výškoměr
- Dotazovač odpovídač
 - dálkoměr DME
 - sekundární radar



$$R = ct_z$$

značky v přesně
definovaných časech



zpoždění signálu
způsobené
šířením

- **Rádiově pasivní systémy** (*uživatel pouze přijímá signály majáků*)

- Družicové navigační systémy

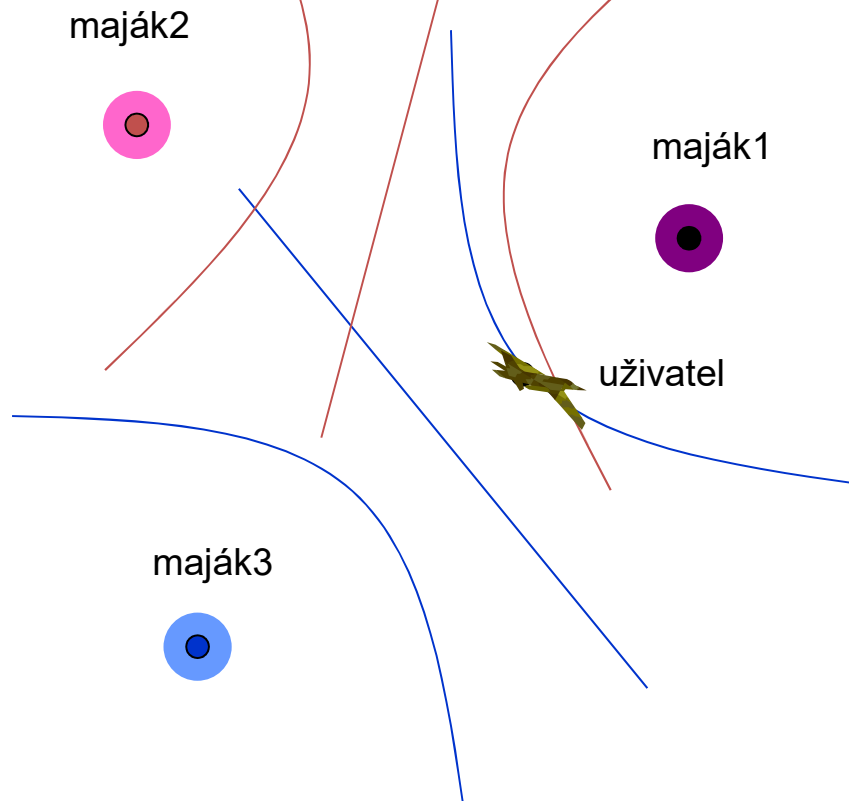
Problém

Maják a uživatel musí mít synchronizovanou časovou základnu. Chyba 1 μ s představuje chybu ve vzdálenosti 300m.

TDoA – rozdíl časů příchodu signálů



- Řeší problém přesnosti časové základny uživatele u systémů ToA
- Signál vysílán dvěma nebo více synchronizovanými majáky
- Uživatel vyhodnocuje rozdíl časů příchodu signálu od majáků

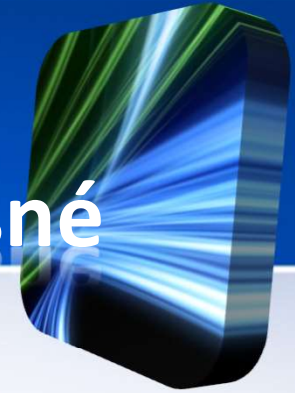


Aplikace

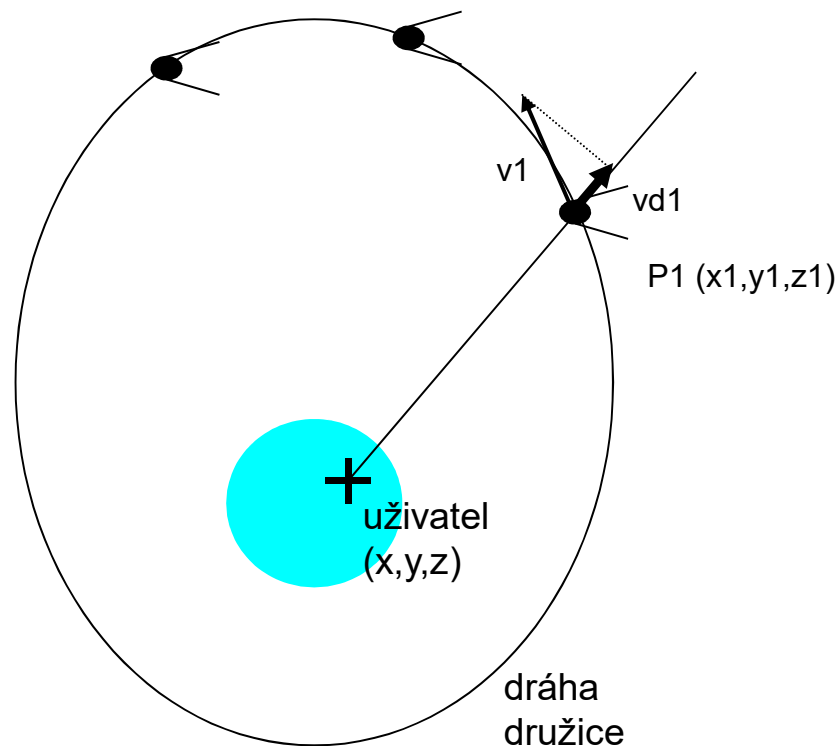
- Loran C
- Omega
- Deca
- ...
- Tamara a její nástupci

Hyperbola – křivka s konstantním rozdílem vzdálenosti (zpoždění) mezi ohnisky

DS – Dopplerův posuv kmitočtu nosné vlny



- Měří vzájemnou rychlost uživatele a majáku



Aplikace

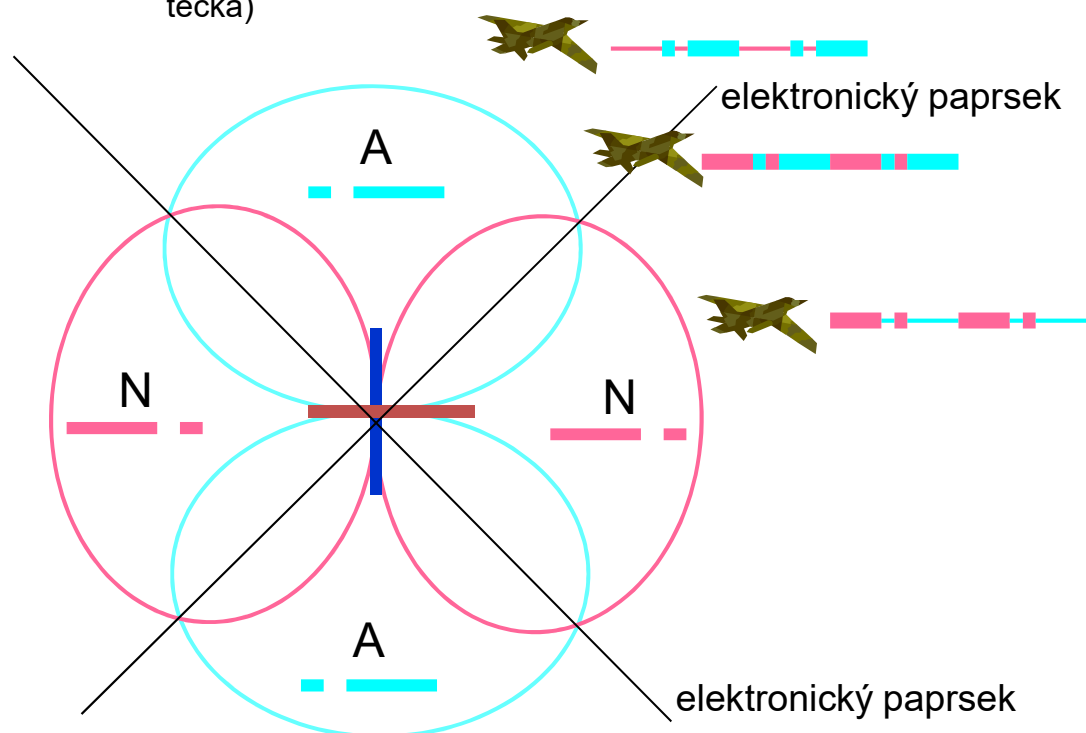
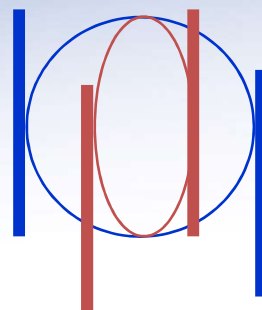
- Transit
- GNSS – stanovení vektoru rychlosti

Elektronické vyznačení trasy



A-N range

- vznikl v 20 letech, sloužil do 50 let
- pracuje na 190 – 565 kHz
- výkon vysílače 1500 W
- 2 vertikální rámové antény
 - 1 anténa vysílá morse A (tečka čárka)
 - 2 anténa vysílá morse N (čárka tečka)



Aplikace

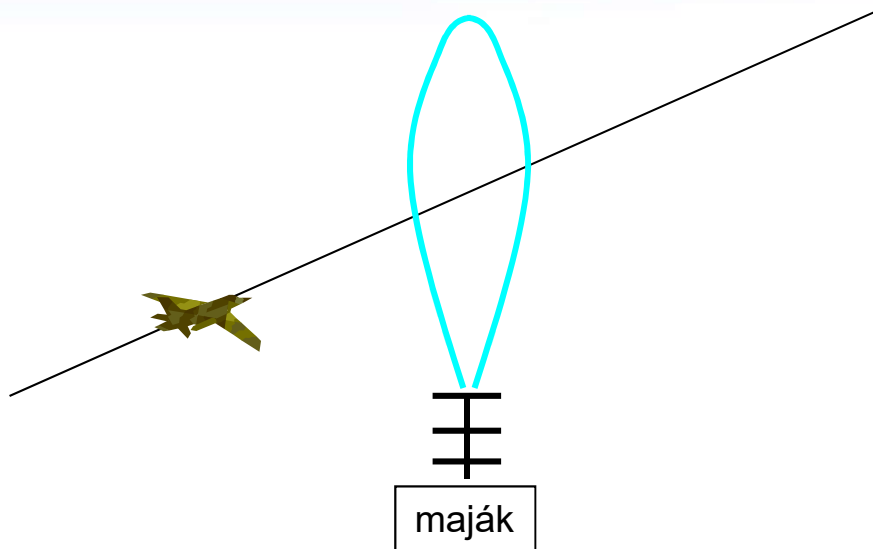
- A-N Range
- VOR
- ILS
- TACAN

Elektronické vyznačení bodu



Aplikace

- Marker



Základy družicové navigace



- Dopplerovská metoda
- **Dálkoměrná metoda**

Družicové navigační systémy



Globální

- GPS
- GLONASS
- Galileo
- Compass

Regionální

- QZSS

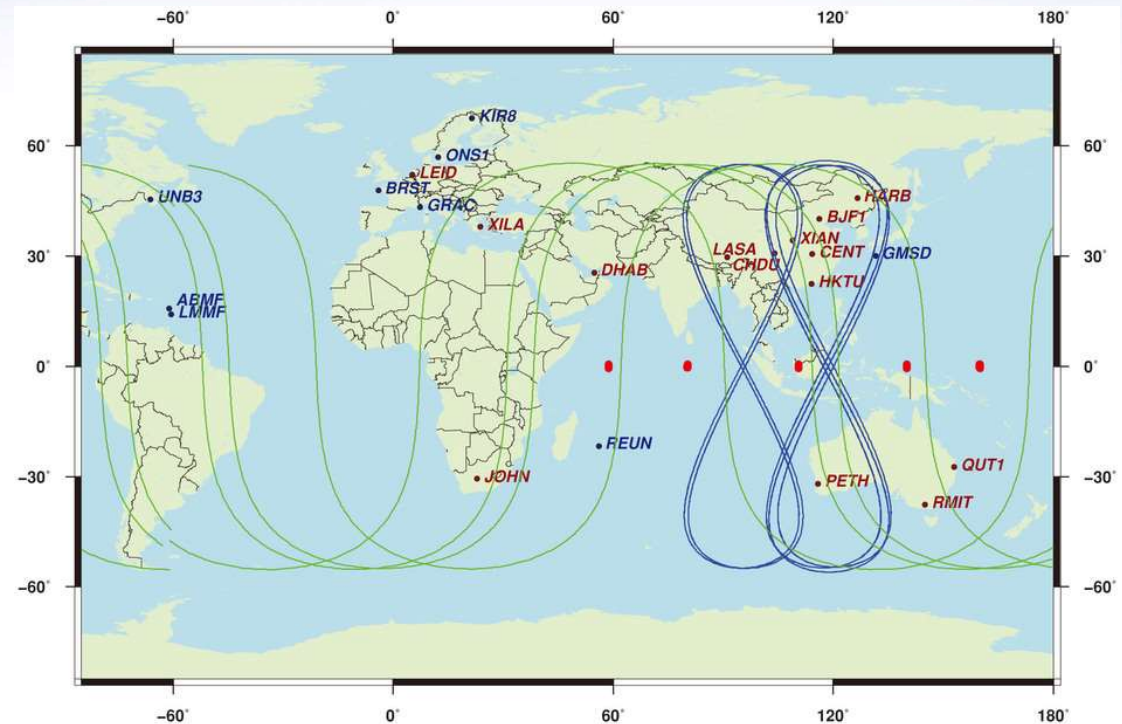
Podpůrné

- EGNOS
- WAAS
- ...

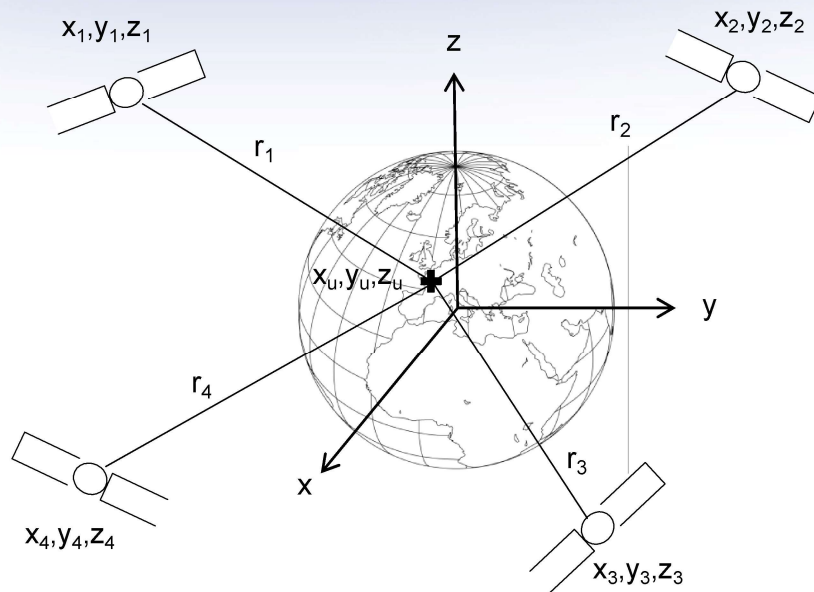
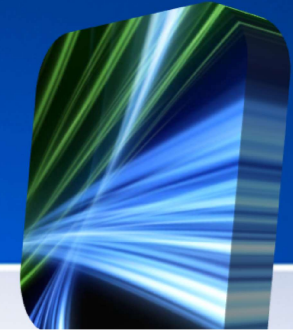
Dráhy družice



- LEO
- MEO
- Geosynchronní
 - GEO
 - IGSO



Dálkoměrná metoda



Neznámá poloha uživatele (x_u, y_u, z_u)

Poloha k-té družice (x_k, y_k, z_k)

Družice vysílá dálkoměrný signál v t_t

Měření

$t_{r,k}$ - okamžik příjmu signálu k-té družice
v časové základně přijímače

Časová základna přijímače a systému
nejsou synchronní, liší se o τ_c

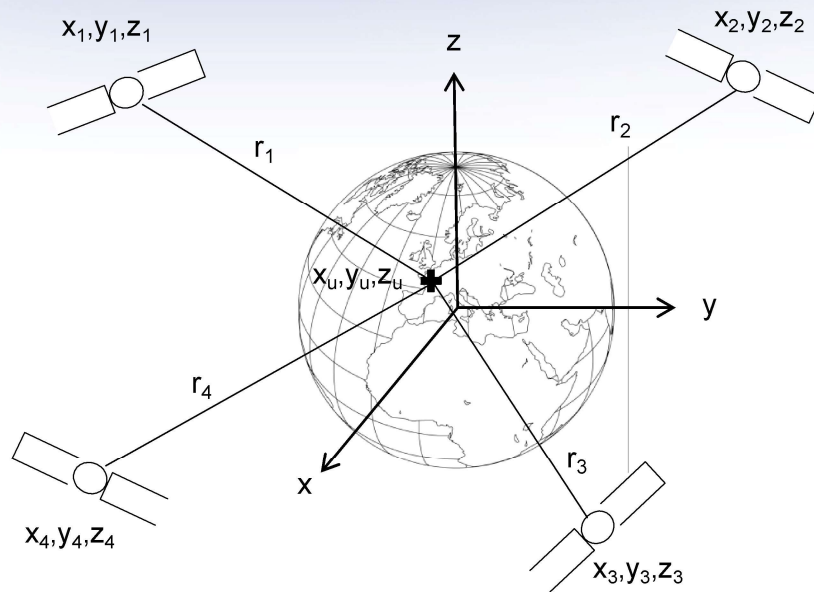
Zdánlivá vzdálenost (vzdálenost zkreslená o τ_c)

$$(t_{r,k} - t_t)c = \rho_k$$

Skutečná vzdálenost

$$(t_{r,k} - t_t + \tau_c)c = r_k$$

Dálkoměrná metoda



Vzdálenost spočítaná z geometrie úlohy

$$r_k = \sqrt{(x_u - x_k)^2 + (y_u - y_k)^2 + (z_u - z_k)^2}$$

Geometrická vzdálenost se musí rovnat změřené na základě šíření signálu

$$(t_{r,k} - t_t + \tau_c)c = \sqrt{(x_u - x_k)^2 + (y_u - y_k)^2 + (z_u - z_k)^2}$$
$$k = 1, 2, \dots$$