# IRZ0050 INFOHANKE SÜSTEEMID

**4 EAP, eksam**
**nädalatunnid: 2.5 = : 2-0-0.5**

INFORMATION DETECTION SYSTEMS
SYSTEMEN FÜR INFORMATIONAUFFINDUNG





# IRZ0050 Infohankesüsteemid

Õppejõud:
teadur Julia Berdnikova julia.berdnikova@ttu.ee
www.lr.ttu.ee/~juliad

- Harjutus toimub kord kuus :

Esimene 30.09.2015.a

- Eksamieelduseks on
  - **Individuaalne ülesanne** (selle saamiseks palun saata mulle email aadressil: julia.berdnikova@ttu.ee „IRZ0050 kodutöö“). Kodutöö jagatakse septembri lõpus.





# IRZ0050 INFOHANKESÜSTEEMID

- Infohankesüsteemide üldiseloomustus ja kasutusalad
- Teoreetilised alused.
- Põhialgoritmid ja -valemid.
- Radartehnika meetodid ja radarite tüübid.
- Radarite struktuurskeemid ja kvaliteet.
- Raadionavigatsiooni vahendid ja meetodid.
- Raadionavigatsioonisüsteemid.
- Radarsüsteemid.
- Sonari süsteemid.





# Õppeaine eesmärgid:

• Anda infohankesüsteemide teoreetilised alused, tüübid ja struktuurskeemid.

• Õpetada aru saama infohankesüsteemide toime põhialgoritmidest ja nende parameetrite kindlustamisest.

• Anda arusaamine radaritest, raadionavigatsiooni ja peilijate struktuuri ja nende osade tööst.

• Õpetada asukoha määramise eskiisarvutusi põhivalemite abil.

## Individuaalne ülesanne:

Igale üliõpilasele antakse individuaalne ülesanne, mis koosneb omavahel seostatud ülesandest

Kodutöö esitamise tähtaeg teatatakse loengutes ja veebis.

Õigeaegselt esitatud kodutöö saab olema arvestatud, kui:

- kõik 5 ülesannet on lahendatud;
- ükski lahendusest ei sisalda vigu
- vormistus on korrektne ja vastab nõuetele.

*Algselt mittearvestatud kodutöö võib saada arvestatuks pärast selle vigade parandust.*





## Kirjandus

1. M. I. Skolnik **Radar Applications**, IEEE Press 1987,

(TTÜ kohaviit VH – 65964)

2. G. W. Stimson **Introduction to Airborne radar**, Hughes Aircraft Company, 1983 (RSTI)

3. R. E. Blahut **Radar and Sonar**, Springer –Verlag,1991,

(TTÜ R kohaviit VB-54939)

4. T. Sullakatko **Satelliitnavigatsioonisüsteem** GPS, Tallinn TTÜ 1995





## Kirjandus

5. J. D. Taylor **Introduction to Ultra-Wideband Radar Systems**, CRC Press,1995 (RSTI)

6. I Arro **Sonartehnika** TTÜ 1998

7. Veebileheküljed: Otsingu sõna applet + radar, sonar, data acquisition system jne

*8. M. A. Richards, J. A. Scheer, W. A. Holm "Principles of Modern Radar Scitech Publishing inc. 2010*

*9. В.С. Яценков Основы спутниковой навигации Горячая линия -Телеком 2005*

*...*





## IRZ0050 Loengute kava

1. Sissejuhatus. Infohankesüsteemide kasutusalad.
2. Raadiotehniliste infohankesüsteemide (RTIHS) liigid.
3. RTIHS füüsikalised alused.
4. RTIHS signaaliteoreetilised alused.
5. Radarid ja nende liigid.
6. Seireradarid.
7. Sekundaarradarid.
8. Radarsüsteemid.

# IRZ0050 Loengute kava

9. Doppleri radarid.
10. Raadionavigatsioonimeetodid.
11. Raadionavigatsioonisüsteemid.
12. Globaalsed raadionavigatsioonisüsteemid.
13. Globaalsed raadionavigatsioonisüsteemid.
14. Raadiopeilimine ja monitooring.
15. Raadioluure.
16. Sonarid ja sonarsüsteemid.





# Eksam:

- Eksam on kirjalik, igale üliõpilasele antakse individuaalne eksamiküsimuste komplekt 20 küsimusest.





# Eksam:

Pärast esmaste eksamihinnete teatamist ÕIS-is on üliõpilasel õigus taotleda eksami jätkamist suulises eksamivormis, et selgitada ja kaitsta oma lahendusi ja vastuseid, kuid samas vastata ka kõigile õppejõu lisaküsimustele. Suulise eksami lõplik tulemus võib esialgsest kirjaliku eksami tulemusest erineda nii kasvamise kui ka kahanemise suunas.

# 1. Sissejuhatus. Infohankesüsteemide kasutusalad.

Sissejuhatus

Infosüsteemid

Toimingud infoga

Sh ka elektri vahendusel (näiteks elekterside)

Raadiotehnilised (info)süsteemid RTS

Kasutatakse raadiokanalit:

Sh elektromagnetiliste lainete vahendusel

Kanal: Saatja (kiirgusallikas) ja vastuvõtja (antenni(de)ga)





# Infohankesüsteem

*Data acquisition system*

1 ) Aktiivne (info kogumine signaali genereerimisega, kiirgamisega ja vastuvõtuga)

Näiteks: parkimisandurid, sonarid, radarid, biomeditsiinilised seadmed, roboti liikumine jne.

2) Passiivne (signaali genereerimine ja saatmine toimub teises kohas)

Näiteks: keskkonna monitooring, automaatne juhtimissüsteem jne.





# Infohankesüsteem

Kommunikatsioonisüsteem

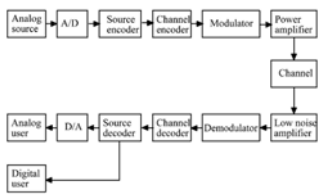
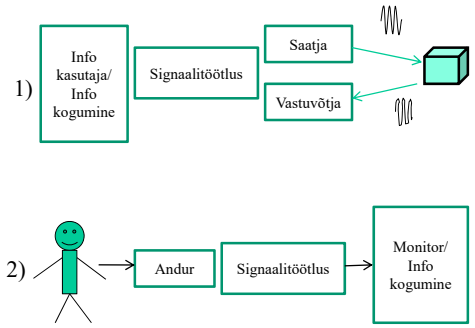



Figure 1.1 Block diagram of a typical digital communication system.

Infohankesüsteem

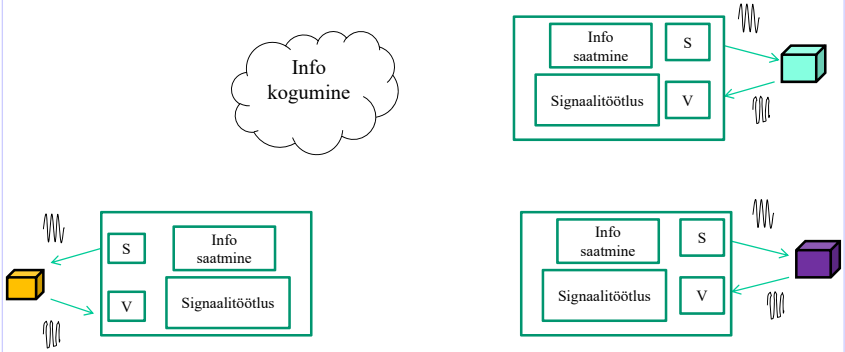







# Infohankesüsteem

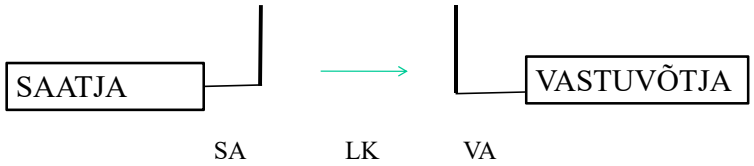
Hajutatud infohankesüsteemid



# Raadiosüsteemid:

on tehnilised süsteemid info edastamiseks, hankimiseks, juhtimiseks või hävitamiseks EML (*elektromagnetiliste lainete*) abil

Oluliseks on raadio kanali(te) olemasolu








# Raadiokanalil on

Sagedusala, mis määrab ära raadiokanali (süsteemi ) võimalused, kuna erinevate kandesagedustega signaalide tekitatud EML levivad erinevalt:

$$f_1 \div f_2 \rightarrow \Delta f = f_2 - f_1; f_0$$

***Radio frequency (RF)*** *3 kHz kuni 300 GHz*





# Sagedusala on

a) Kokkuleppeline (rahvusvaheliselt ja riiklikult) ja seega fikseeritud
http://en.wikipedia.org/wiki/ITU-R

b) Vahetatav ja muutuv, kuid otsitav ja kindlaks tehtav

Raadiosüsteem muutub selle tulemina kognitiivseks vahel nn
programmeeritavaks või “targaks”





# Saatja *(transmitter)*

Väljakiiratav signaal keskmise võimsusega $P_s$

a) Pidev (moduleeritud või ei)

$$P_s = \frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} s^2(t)\,dt$$

$$P_s = \frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} U_m^2 \sin^2 \omega_0 t dt = \frac{U_m^2}{2}$$

$$T_0 = \frac{1}{f_0}; \quad \omega_0 = 2\pi f_0$$

**Saatja:**

Väljakiiratav signaal

b) impulss-signaal keskmise võimsusega

$$P_s = \frac{1}{T}\int_0^{\tau_i} s^2(t)\,dt$$

$$P_s = \frac{1}{T}\int_0^{\tau_i} U_m^2 \sin^2 \omega_0 t dt = \frac{U_m^2}{2}\frac{\tau_i}{T} = \frac{U_m^2}{2}\tau_i F_T$$

tavaliselt $\frac{\tau_i}{T} < 0{,}001$





**Saatja:**

Antenn suunatud (*directional )*

Võimendusteguriga (*gain*) $G_s = G_{s\max}(\alpha,\beta)$

a) kiirgusdiagrammiga (*radiation pattern* )

$G_s(\alpha,\beta)$

$\alpha;\beta$

b) polarisatsiooniga (*polarization)*





# Suunatud antenn

Võimendusteguriga $G_s = G_{s\max}(\alpha,\beta)$

ja antenni kiirgusdiagrammiga

$$G_s(\alpha,\beta) = \frac{kiirgus\ suunas\ \alpha,\beta}{keskmiselt}$$

$\alpha;\beta$

Kiirgus mingis suunas on selles suunas ruuminurga ühikusse kiiratav võimsus





# Vastuvõtjal on *(receiver)* :

Antenn suunatud

1.Võimendusteguriga $G_v = G_{v\max}(\alpha,\beta)$

a) kiirgusdiagrammiga

$G_v(\alpha,\beta)$

$\alpha;\beta$

b) Polarisatsiooniga

## Vastuvõtja

tundlikkus mis on määratud mürateguriga ja müratemperatuuriga.
Antenni müravõimsus on

$$P_{v\ \min} = kT_A \Delta f_n, \quad [\mathrm{W}],$$

$k$ - Boltzmanni konstant,
$T_A$ - antenni temperatuur (antenni kiirgustakistuse efektiivne müratemperatuur) *[°K]. S*tandartne $T_A = 290\ ^\circ K \approx 17\ ^\circ C \rightarrow kT_A \approx 4 \cdot 10^{-21}\ w/Hz$

Δf -sagedusriba laius [Hz].

Mürategur [dB]

$$NF_{dB} = 10 \log_{10} n_f$$

Lisainfo: Antennid ja RF elektroonika
http://www.lr.ttu.ee/irm/antennid/





## Raadiosüsteemide jaoks valitakse need parameetrid nii, et oleks kindlustatud

erinevate raadiosüsteemide eraldatavus (et ei toimuks üksteise segamist)

Täpsemalt on see valdkond elektromagnetile ühildatavuse ala (EMC)

http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_compatibility





## Eraldada saab

a) Sageduslikult (erinevad sagedusalad) või (FDM - frequency division multiplexing)
b) Ajaliselt (erinevad ajapilud) (*TDM - time-division multiplexing)*
c) Ruumiliselt (sõltuvalt sagedusalast toimub sirgjooneline levi (üle 30MHz) teatud kaugusele

$$D_{km}^{on} = 3{,}57\left(\sqrt{H_s}_m + \sqrt{H_{vv}}\right) \quad \text{otse}$$

$$D_{km}^{on} = 4{,}15\left(\sqrt{H_s}_m + \sqrt{H_{vv}}\right) \quad \text{refraktsiooniga}$$

või raadiolained kaarduvad Maa kumeruse taha (alla 30MHz)

Lisainfo: Signaalide transmissioon http://www.lr.ttu.ee/irm/transmissioon/





## Eraldada saab:

b) Erinevate polarisatsioonidega antennid ei tunne üksteist

b) Koodiliselt , st, et aadresskoodid on erinevatel süsteemidel erinevad, kuid osa süsteemist on ühised.

## Raadio(kanalit)liini iseloomustavad

1. Sagedusala ja ribalaius $f_2 - f_1$
2. Saatja võimsus $P_s$
3. Saateantenni võimendustegur $G_{s\,max}$
4. Vastuantenni võimendustegur $G_{v\,max}$
5. Vastuvõtja tundlikkus $P_{v\,min}$
6. Tegevuskaugus $D_{max}$





Eraldamise juures peab teadma
Raadioliini tegevuskaugust ("sinna"):

Väikseim võimsus VV sisendis

$$P_{v\min} = \frac{P_s G_s A_v}{4\pi D_{\max}^2}$$

VV antenni efektiivne pindala GHz alal

$$A_v = \frac{\lambda_0^2 G_v}{4\pi}$$

Tegevuskaugus

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_s G_s G_v \lambda_0^2}{(4\pi)^3 P_{\min}}}$$





## Raadiotehnilised infosüsteemid

1. Raadiotehnilised infoedastuse süsteemid
   - Mobiilside
   - Satelliitside
   - Raadioside erinevatele ametkondadele
   - Raadiolevi (raadioringhääling ja TV)
   - Raadiotelemeetria
2. Raadiotehnilised infohanke süsteemid (RTIHS)
3. Raadiojuhtimise süsteemid
4. Raadiotehnilised infohävituse ja infohõive süsteemid
   - Raadio- ehk elektroniline sõda



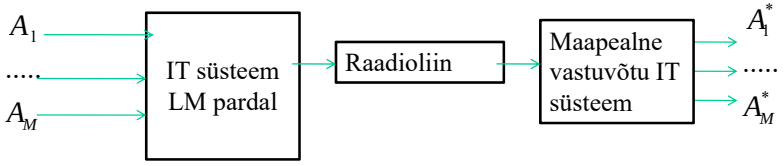


## 1. Raadiotehnilised infoedastuse süsteemid

- Mobiilside
http://en.wikipedia.org/wiki/GSM
- Raadioside (erinevatele ametkondadele)
http://en.wikipedia.org/wiki/Radio
- Raadiolevi (raadioringhääling ja DTV)
http://en.wikipedia.org/wiki/Broadcasting
- Satelliitside
http://en.wikipedia.org/wiki/Communications_satellite
- Raadiotelemeetria

## Raadiotelemeetria

**http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Radio+telemetry**




$$A_i^* \approx A_i$$





## Raadiotelemeetria

Saatepool asub lennumasinal (LM):
Andurite väljundite digitaliseerimine (kokku ~15 kuni 20tk)
Ajaline kanalite tihendamine arvestades, et andurite väljundsignaalid on väga erinevad (ala- ja ülekommutatsioon koos AIM või IKM)
Saatja üldmoduleerimine ja edastamine raadiokanalis

$A_1$
.....
$A_M$

Vastuvõtupool asub maal
Üldine vastuvõtmine ja kanalite eraldamine

$A_i^*$
.....
$A_M^*$

$$A_i^* \approx A_i$$





## 2. Raadiotehnilised infohanke süsteemid (RTIHS)

A. Radarid ja radarsüsteemid
- a) õhuseireks
- b) lennuliikluse juhtimiseks
- c ) tulejuhtimiseks
- d).....

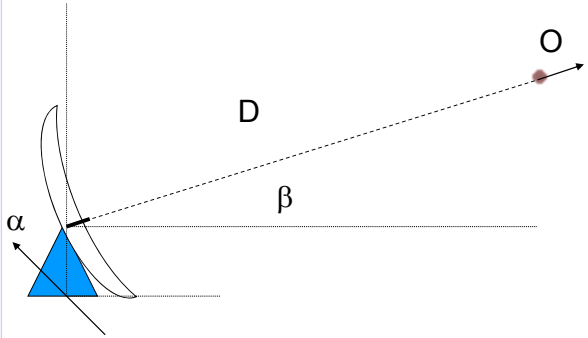
B. Raadionavigatsiooni süsteemid
- a) Kaugnavigatsiooniks (~1500km)
- b) Lähinavigatsioonik(~300km)
- c) Maandumiseks
- d) Kokkupõrgete vältimiseks
- e).....





## Raadiotehnilised infohankesüsteemid

1. Radarsüsteemid (monostaatiline vs bi- või multistaatiline) (*monostatic, bistatic*)




D - radiaalkaugus

β- kohanurk

α- asimuut

v - radiaalkiirus

# Objekti asukohta ja liikumist iseloomustavad

- Radari asukoha suhtes 4 väärtust

  D - radiaalkaugus

  β- kohanurk

  α- asimuut

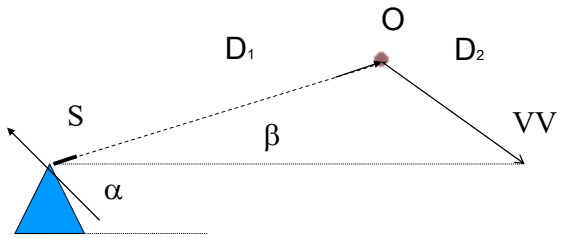
  v - liikumise kiiruse radiaalne komponent





# 2. Raadiotehnilised infohanke süsteemid

2. Bistaatiline radar




D= $D_1$ +$D_2$ radiaalkaugus

β- kohanurk

α- asimuut

v - radiaalkiirus





# Radarite tüübid

- 2D radar – mõõdab

  D - radiaalkauguse

  α- asimuudi

- näiteks: sekundaarradar





# Radarite tüübid

- 3-D radar mõõdab

  D - radiaalkaugus

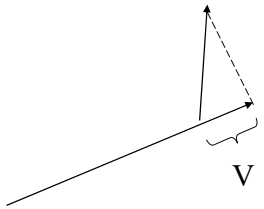
  β- kohanurk

  α- asimuut

- Näiteks seireradar

# Radarite tüübid

- Doppleri radarid (või doppleri kanal) mõõdavad




v - liikumiskiiruse radiaalset komponenti





# Raadionavigatsioonisüsteemid

- Maapealsete asukoha koordinaadid on määratud kahe joone lõikumispunktina
- Joone saame kahe pinna lõikumisel
- Järelikult tuleb raadiotehniliste vahenditega tekitada mingeil tingimustel pinnad, jooned ja nende lõikumispunktis asub see objekt, mis soovib määrata oma asukoha koordinaate.
- Raadionavigatsioon eeldab maapealseid kiirgusallikaid ja kogu asukoha määramine toimub nende seadmete asukohtade suhtes.

Geograafilised koordinaate saadakse arvutades need ümber sõltuvalt navigatsioonimeetodist.





# Raadionavigatsioonisüsteemid

On seadmete komplekt asukoha määramiseks

- Geograafiline asukoht maal on paigas, kui on teada
  - Laiuskraadid ja
  - Pikkuskraadid

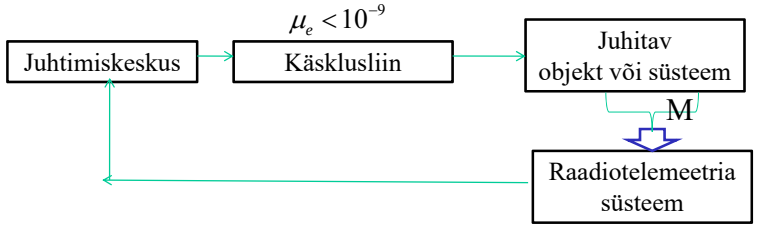
Need on asukoha geograafilised koordinaadid

Maapinnal ja tihti ka õhus on oma asukohta kindlaks tegev objekt muudetud punktiks, kui see objekt on ruumiline, siis asukoha koordinaadid tavaliselt määratakse objekti raskuskeskme suhtes





# 3. Raadiojuhtimise struktuur




1. Käsklus ehk komandoliin väga kõrge häirekindlusega
2. Raadiotelemeetria liin umbes 20 kuni 10 kanali tihendamisega, andurite näitude edastamiseks 11 kahendsümbolit

Näited: Nimbus Satellite, Voyager System

## 4. Raadiotehnilised infohõive ja infohävituse süsteemid

on raadiosüsteemid (radar) objekti hõiveks ja tulejuhtimiseks sellele objektile.

Raadiotehnilised hõivesüsteemid võimaldavad objekti selekteerida ja anda komandod juhitavale raketile
RS hõivesüsteemid on

a) Mitteautonoomsed
b) autonoomsed





## a) Mitteautonoomne on süsteem, milles

Maapealne kaugseire radar koos sekundaarradari või tema infoga ja tavaliselt maapealse raadiojuhtimiskeskusega, mis suunab hävitaja(d) vajalikku alasse, kus liigub valitud (radar) objekt. Kaugseireradar võib asuda ka patrulllennukil või ka näiteks õhulaeval. Andmed valitud radarobjekti kohta antakse raadioliini pidi raadiojuhtimiskeskusesse, milles asub kindlasti radar, info hävitajale antakse edasi raadiokomandoliiniga. Kui hävitaja on suunatud vastavase alasse, käivitub raadiotehniline hõive- ja tulejuhtimise pardasüsteem.





## b) autonoomses süsteemis on

Lennukil järgiv pardaradar, tulevahend (lennuki mürsk, rakett), valitud radarobjekt. Rakett võib olla poolpassiivne (raketil on ainult vastuvõtja ja arvuti). Maapealset juhtimiskeskust kas ei ole või ta on oma töö lõpetanud.

Kogu raadiosüsteemi põhimõtteline ülesehitus on:
1. Mittekoherentne (kasutatakse siis, kui hävitaja on suurtel või keskmistel kõrgustel või radarobjekt on hävitajast kõrgemal).
2. Koherentne (radarobjekt lendab madalatel kõrgustel allpool hävitajat)

Kui hõive on toimunud käivitub tulejoone juhtimine





## Raadio- ehk elektrooniline sõda

1. Raadioluure on sagedusalade monitooring ja vastase tundmatu sagedusega raadiosignaali avastamine koos sagedusala kindlaks määramisega
2. Raadiokiirguse allika asukoha määramine ehk peilimine. Peilimine võib toimuda nurk või doppler meetoditega.
3. Aktiivne raadiohäirete tekitamine
4. Maskeerivate raadiohäirete tekitamine
5. Imiteerivate raadiohäirete tekitamine.
6. Passiivne raadiohäirete tekitamine (diipolite lennutamine, nurkpeegeldid merepoidel jne)
7. Raadiosüsteemide maskeerimine
8. Raadiotehniline kaitse: Selekteerimine.

## Raadiosüsteemid või nende osad võivad paigutuda

- Maal
- Merel (laevadel või merepoidel)
- Lennumasinal (lennukil, raketil, tiivikul, õhupallil,.....
- Satelliidil ..)





## Lennukile paigaldatud seadmete eesmärk on

1. Kaugete (300 kuni 650km) radarobjektide avastamine, nende koordinaatide määramine ja liikumisparameetrite mõõtmine
2. Kaugete paljude (250 kuni 600) radarobjektide üheaegne järgimine
3. Hävitajate tugi ja kaitse õhulahingu tingimustes
4. Maa ja merepinnaseire koos samaaegse liikuvate objektide selekteerimisega
5. Tegevuse koordineerimine, side kindlustamine, info vastuvõtmine ja edastamine.

### Lennukile paigaldatud süsteem koosneb

1. Pinnaseire radaritest
2. Tuvastamise raadiosüsteemist
3. Raadiotehnilisest hõivesüsteemist ja tulejoone juhtimissüsteemist
4. Raadionavigatsiooni- ja juhtimissüsteemist
5. Raadioside süsteemid





## Infohankesüsteemide kasutusalad lennunduses

Jaotuvad

- Maapealsed seadmed
- Pardaseadmed
- Ühe ja sama süsteemi osad on nii maal kui ka lennuki pardal
- Satelliitsüsteemid seadmetega satelliidil, maal ja lennuki pardal





## Maapealsed seadmed

- Radarid
  - Sekundaarradarid seadmetega maal
  - Seireradarid (praegu Tallinna lennuväljal ei kasutata)
- Navigatsiooniseadmed maandumiseks lennuväljal
- Raadiomajakad
- Jne.....

# Pardaseadmed

- Sekundaarradari seadmed lennuki pardal
- Kõrgusemõõtjad lennuki pardal
- Raadiokompassid lennuki pardal
- Ilmaradar lennuki pardal
- Maapinna vaatlusradarid
- Maandumisseadmed





# Õhusõidukitel paiknevad raadiosüsteemid

1. Raadioside seadmed
2. Lennujuhtimise raadiosüsteem
3. Andmete töötlemise seadmed
4. Pardaarvuti operaatori töökoht
5. Üldmonitor
6. Raadiovastuvõtja ja pardaarvuti
7. Pardaradari faasitud antennivõre
8. Avastava RS ja raadioside antennid
9. RS avastamiseks, navigeerimiseks ja juhtimiseks
10. Raadiosaatja
11. LL side antenn

# 2. Raadiotehniliste infohankesüsteemide (RTIHS) liigid.

- Radarite liigitused
  - raadiotehnilise signaali tekke järgi
    - Aktiivsed
    - Poolaktiivsed
    - Passiivsed
  - Laineala järgi

$\lambda$ Lainepikkus

$f_0$ Kandesagedus

$\lambda = \frac{c}{f_0}$ $c = 300\,000 \frac{km}{\text{sec}}$ Levikiirus



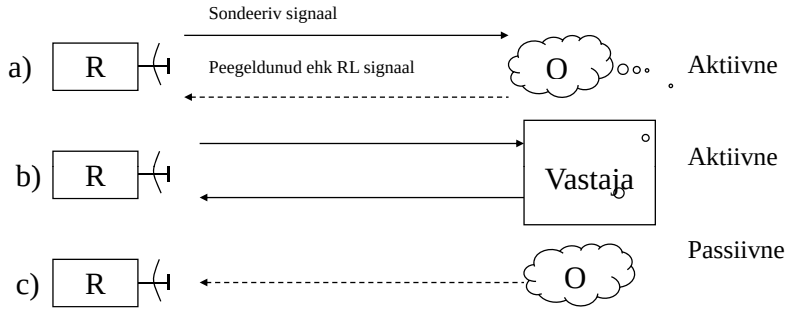


# Radarite liigitused

b) Aktiivsed

a) Poolaktiivsed

c) Passiivsed








# Radarite liigitused

Poolaktiivsed

M. I. Skolnik Radar Applications

Lk 205 – 214

A. Ivanov Semi- Active Radar Guidance

G. W. Stimson Introduction to Airborne radar, Hughes Aircraft Company, 1998 (RSTI)





# (RTIHS) liigid

- Radarite liigitused
  - Laineala järgi
    - Dekameeter
    - Meeter (horisont)
    - Detsimeeter
    - Sentimeeter
    - Millimeeter

Table of ITU Radio Bands

| Band Number | Symbols | Frequency Range | Wavelength Range† |
|---|---|---|---|
| 4 | VLF | 3 to 30 kHz | 10 to 100 km |
| 5 | LF | 30 to 300 kHz | 1 to 10 km |
| 6 | MF | 300 to 3000 kHz | 100 to 1000 m |
| 7 | HF | 3 to 30 MHz | 10 to 100 m |
| 8 | VHF | 30 to 300 MHz | 1 to 10 m |
| 9 | UHF | 300 to 3000 MHz | 10 to 100 cm |
| 10 | SHF | 3 to 30 GHz | 1 to 10 cm |
| 11 | EHF | 30 to 300 GHz | 1 to 10 mm |
| 12 | THF | 300 to 3000 GHz | 0.1 to 1 mm |

http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum

# (RTIHS) liigid

Table of IEEE bands[1]

| Band | Frequency range | Origin of name [citation needed] |
|---|---|---|
| HF band | 3 to 30 MHz | High Frequency |
| VHF band | 30 to 300 MHz | Very High Frequency |
| UHF band | 300 to 1000 MHz | Ultra High Frequency |
| L band | 1 to 2 GHz | Long wave |
| S band | 2 to 4 GHz | Short wave |
| C band | 4 to 8 GHz | Compromise between S and X |
| X band | 8 to 12 GHz | Used in WW II for fire control, X for cross (as in crosshair) |
| $K_u$ band | 12 to 18 GHz | Kurz-under |
| K band | 18 to 27 GHz | German Kurz (short) |
| $K_a$ band | 27 to 40 GHz | Kurz-above |
| V band | 40 to 75 GHz | |
| W band | 75 to 110 GHz | W follows V in the alphabet |
| mm band | 110 to 300 GHz | |

EU, NATO, US ECM frequency designations

| Band | Frequency range |
|---|---|
| A band | 0 to 0.25 GHz |
| B band | 0.25 to 0.5 GHz |
| C band | 0.5 to 1.0 GHz |
| D band | 1 to 2 GHz |
| E band | 2 to 3 GHz |
| F band | 3 to 4 GHz |
| G band | 4 to 6 GHz |
| H band | 6 to 8 GHz |
| I band | 8 to 10 GHz |
| J band | 10 to 20 GHz |
| K band | 20 to 40 GHz |
| L band | 40 to 60 GHz |
| M band | 60 to 100 GHz |

http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum





# (RTIHS) liigid

- Radarite liigitused
  - Sondeerivate signaalide (SS) tüübi järgi
    - Pidevad SS modulatsioonita või sagedusmodulatsiooniga *(continuous wave – CW, frequency-modulated continuous wave – FMCW)*
    - Impulss-signaalidega (mittekoherentsed, koherentsed, impulsside sisese modulatsiooniga jne..) (*pulse signal, pulse burst waveform*)
    - Keeruliste signaalidega (M. W.Woodward 1953. a., olulised arvutusmetoodika täiendused 1984a. L.Sibul) (*pulse compression, pseudorandom signals, costas codes*)





# (RTIHS) liigid

- Radarite liigitused
  - Signaali kanalite arvu järgi
    - Ühe kanaliga
    - Mitme kanaliga
      - Mingi kanalite eraldamise meetodiga: näiteks ruumiline eraldamine, sageduslik jne....
  - Mõõdetavate koordinaatide arvu järgi
    - 1D
    - 2D
    - 3D





# (RTIHS) liigid

- Radarite liigitused
  - Mõõtmismeetodite, peegelduste ja objekti koordinaatide näitude esituse järgi
  - Paigaldamiskoha järgi
    - Maapealsed
    - Lennukile paigaldatavad
    - Laevadele paigaldatavad
    - Satelliitidele paigaldatavad

## (RTIHS) liigid

- Radarite liigitused
  - Otstarbe järgi
    - Väikesed mobiilsed autode liikumiskiiruste määramiseks
    - Maapealsed õhutõrje radarid
    - Rannaradarid
    - Ilmaradarid
    - Jne....





## Radarid

- Maapealsed
  - Õhuruumi vaatluseks
  - Akvatooriumi vaatluseks
  - Ilmvaatluseks
  - Rakettide ja satelliitide avastamiseks
  - Jne
  - Lennuliikluse juhtimiseks
  - Jne....





## Radarid

- Laevadel *(naval, marine radars)*
  - Laevaliikluse juhtimiseks
  - Veepealsete ja madalalt lendavate objektide avastamine ja nende asukoha määramine
  - Suurel kõrgusel lendavate objektide avastamine
  - Satelliitide ja rakettide avastamine jne....
  - Tulevahetuse juhtimine



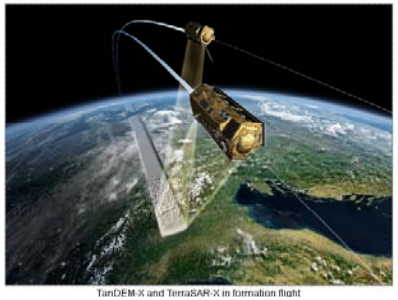


## Radarid

- Lennukil (*airborne radar*)
  - Kaugusemõõtjad
  - Kõrguse mõõtjad
  - Liikumiskiiruse ja triivinurga mõõtmine
  - Lennukite avastamine ja kokkupõrgete vältimine
  - Maapinna vaatluse panoraamradarid
  - Külgvaatlusradarid
  - Tulevahetuseks
  - Rakettide juhtimiseks
  - Ilmaradar lennuki pardal

# Radarid

Kosmoses
- Maapinna seireks
- Õhuruumi seireks
- .....


TanDEM-X and TerraSAR-X in formation flight

*http://www.dlr.de/hr/desktopdefault.aspx/tabid-2317/3669_read-5488/*





# Raadionavigatsioonivahendite liigitused

- Asukoha määramise meetodite järgi
  - Kauguse mõõtmise abil
  - Kauguste vahede mõõtmiste abil
  - Kauguste summade mõõtmiste abil
  - Pseudokauguste mõõtmiste abil (*pseudorange*)
  - Nurkade mõõtmise abil
  - Kombineeritud meetodid





# Raadionavigatsioonivahendite liigitused

- Signaali mõõdetava parameetri järgi
  - Amplituud
  - Ajaintervallid
  - Faas
  - Sagedus
- Sagedusdiapasooni järgi
  - Dekakilomeeter
  - ...
  - optilised





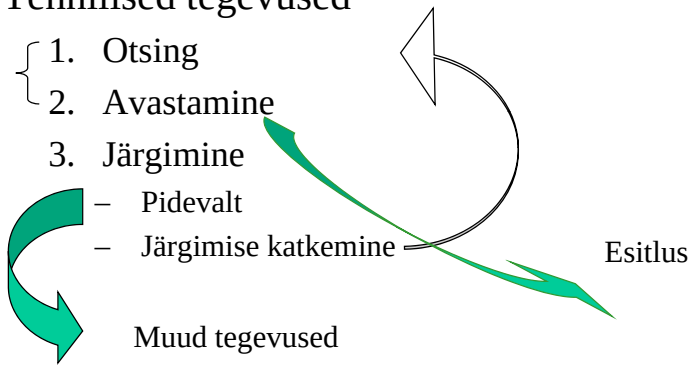
# Raadionavigatsioonivahendite liigitused

- Tegevuskauguse järgi
  - Kosmilised
  - Globaalsed
  - Kaugnavigatsiooniks
  - Lähinavigatsiooniks
- Tugijaamade asukoha järgi
  - Maapealsed
  - Kosmilised

# RTIHS taktikalised ja tehnilised karakteristikud

Tehnilised tegevused

1. Otsing
2. Avastamine
3. Järgimine
   - Pidevalt
   - Järgimise katkemine

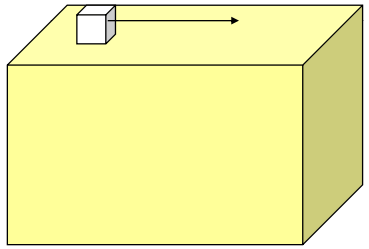







# Otsing

- Ruumilises piirkonnas toimub otsing skaneerimisega



Spiraalskaneerimine,

Sektorskaneerimine jne.....





# RTIHS taktikalised karakteristikud

1. Tegevusala (ala, mille piirides toimub otsing)
2. Otsingu aeg
3. Määratavad koordinaadid ja täpsused
4. Eraldusvõime
5. Läbilaskevõime
6. Häirekindlus
7. Töökindlus





# RTIHS tegevusala

- RL avastajate jaoks on see ruumiala, milles teatud omadustega objektid on avastatavad ette antud tõenäosusega
- RL ja RN mõõturite jaoks on tegevusala antud objekti asukoha määramise täpsusega ette antud mürataseme korral

## RTIHS tegevusala ja otsingu aeg

- Tavaliselt on see antud nn
  - Tegevusraadiusega

$D_{\min}$ $D_{\max}$

- Otsingu aeg on üheks ülevaatluseks vajalik aeg

$T_v$





## RTIHS täpsus

- Objekti liikumise ja koordinaatide mõõtmise täpsus
  - Sõltub kasutatud meetodist ja aparatuuri realisatsioonist,
  - Välistingimustest ja välistest häiretest

  Täpsuse nõue peab olema realistlik, liiga kõrge täpsus teeb kogu süsteemi väga keeruliseks, ebamajanduslikuks ja võib oluliselt vähendada töökindlust.

  Tihti on süsteemile nn robustsuse nõue, et süsteem töötaks halbades tingimustes kasvõi halvema täpsusega jne....





## RTIHS eraldusvõime

- On süsteemi võime mõõta eraldi kahe ruumis ligistikku asuva objekti koordinaate ja liikumise parameetreid.
  - Kauguse eraldusvõime $\Delta D_{\min}$
  - Nurkade eraldusvõime $\Delta\alpha, \Delta\beta$
- Märkus: RN süsteemide puhul eraldusvõimet käsitletakse kui võimet eristada kasulikke tugisignaale parasiitsignaalidest, mis on signaaliga sarnased.





## RTIHS läbilaskevõime

- On määratud süsteemi poolt samaaegselt teenindatavate objektide arvuga
  - Mõned RN süsteemid on lõpmata kõrge läbilaskevõimega
  - Mõne RL läbilaskevõime on 1.

# RTIHS häirekindlus

- On süsteemi võime normaalselt funktsioneerida häirete ja mürade tingimustes
- Häirekaitstus
  1. Häirekindlus
  2. Varjatus

Mõõtetäpsus mitte halvem, kui.....





# RTIHS tehnilised karakteristikud

- Määravad taktikalised karakteristikud
  1. Otsingu ja mõõtmiste meetodid
  2. Töösagedus, stabiilsus, võimsused, modulatsioonimeetodid, spektri laiused (seotud sondeerivate signaalidega)
  3. Antennide parameetrid
  4. Vastuvõtja tundlikkus ja ribalaius
  5. Konstruktsioon ja kaal

# 3. RTIHS füüsikalised alused.

- Füüsikalised alused:

  1. Raadiolainete levi
  2. Raadiolainete peegeldumine objektilt





# 1. Raadiolainete levi ruumis

1) Levivad sirgjooneliselt konstantse kiirusega 300 000 km/sec.
Täpselt 299 792 458 m/sec (vaakumis), tavaliselt $c$=300 000 km/sec.
See on valguse levi kiirus. (*speed of light in vacuum*)

- Oma olemuselt on raadiolained elektromagnetilised lained. Levivad erinevates keskkondades sh ka vaakumis.
- Kehv on levi vees. Vees raadiolaineid ei kasutata.

Ka valguse kohta on nn elektromagnetiline teooria olemas.
Levi kiirus võib erinevas materjalides olla erinev, kuid mitte suurem valguse kiirusest.

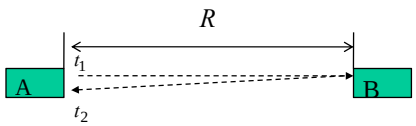


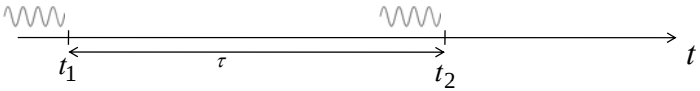


# 1. Raadiolainete levi ruumis

Kauguse mõõtmine (*distance, range*)

$$R = c \cdot t_{AB} = \frac{c \cdot \tau}{2}$$



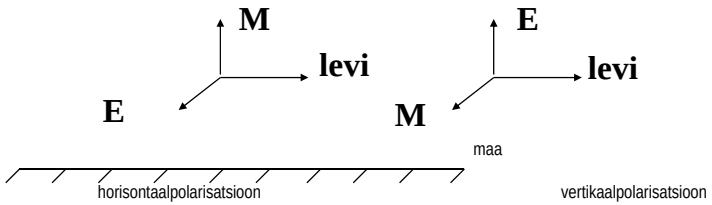







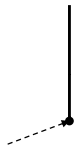

# 1. Raadiolainete levi ruumis

2) On mingil moel polariseeritud elektrivälja vektor



# 1.Raadiolainete levi ruumis

- diipol - antenni joon langeb kokku **E** vektoriga



ergutus

- Võimalik on ka mingi muu polarisatsioon, näiteks ringpolarisatsioon.

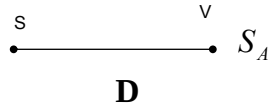


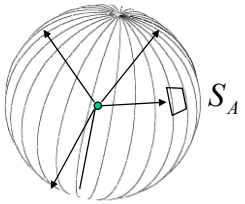


# 1. Raadiolainete levi ruumis

3) Hajuvad igas suunas, isotroopne

kiiratav võimsus jaotub sfääri pinnal




isotroopse antenni efektiivne pindala $S_A \approx \frac{\lambda^2}{4\pi}$





# 1. Raadiolainete levi ruumis

Radari põhivalem (*Radar Range Equation*):

Kui paigutada sfääri tasapinda vastuvõtuantenn, siis ülekandetegur ehk ringsuunaline võimsustihedus (*nondirectional power density*) on

$$P_A = \frac{P_S}{4\pi D^2} \quad \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right]$$

$P_S$ – saadetud võimsus [W]
$D$ – kaugus antennist [m]

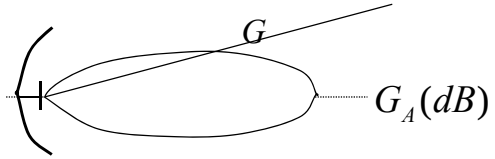
*http://www.radartutorial.eu*





# 1. Raadiolainete levi ruumis

4) Võimaldavad koondamist kimpu (suunatud kiirgus) (*antenna gain*)



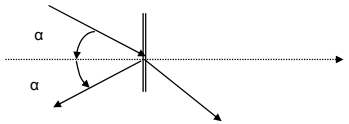

$$P_g = P_A \cdot G$$

$P_g$ – suunatud võimsustihedus (*directional power density*)
$P_A$ – ringsuunaline võimsustihedus (*nondirectional power density*)
G – antenni võimendus (*antenna gain*)

Suunatud kiirgust saab ruumis liigutada. See on antenni skaneerimine

# 1.Raadiolainete levi

5) Peegelduvad ja neelduvad kahe aine piiril
(ained erinevad elektrilise ja/või magnetilise läbitavuse poolest)








# 1. Raadiolainete levi ruumis

Peegeldunud signaali võimsus (*reflected power*):

$$P_r = \frac{P_s G_A \sigma}{4\pi D^2} \quad [\mathrm{W}]$$

$\sigma$ – objekti efektiivne peegelduspindala (*radar cross section*) [m$^2$]

siis võimsustihedus $P_{Ar} = \frac{P_r}{4\pi D^2} \quad \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right]$





# 1. Raadiolainete levi ruumis

Asendates signaali võimsuse $P_r$ :

$$P_{Ar} = \frac{P_s \cdot G_A \cdot \sigma \cdot A_v}{(4\pi)^2 D^4}$$

$A_v$ – antenni efektiivne pindala $A_v = \frac{\lambda_0^2 G_v}{4\pi}$

võimsus:

$$P_{Ar} = \frac{P_s \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^3 D^4} \quad [\mathrm{W}]$$





# 1. Raadiolainete levi ruumis

Klassikaline radari võrrand objekti kauguse leidmiseks

$$D = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda_0^2}{P_{Ar}(4\pi)^3}}$$

Praktikas lisatakse kaod $L$

$$D = \sqrt[4]{\frac{P_s \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda_0^2}{P_{Ar} \cdot (4\pi)^3 \cdot L}}$$

# 2. Raadiolainete peegeldumine objektilt

Toimub vastavalt geomeetrilise optika seadustele

Mõiste: objekti efektiivne peegelduspindala *σ (radar cross section – RCS)*

- objekti suurus
- objekti materjal
- objekti kuju
- objekti paigutus
- sagedus





# 2. Raadiolainete peegeldumine objektilt

efektiivne peegelduspindala

$$\sigma = 4\pi D^2 \frac{\Phi_b}{\Phi_t}$$

$\Phi_t$ – võimsustihedus objektil

$\Phi_b$ – tagasipeegeldunud võimsustihedus





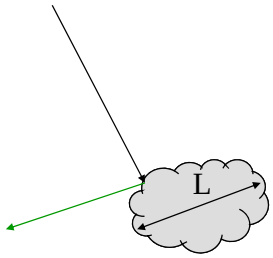
# RL objektid

a) Peegeldumine

Nagu peeglilt

pinnakonarused $\approx < \frac{\lambda_0}{16}$

$L > \lambda_0$




$g$
$\varepsilon$
$\mu$



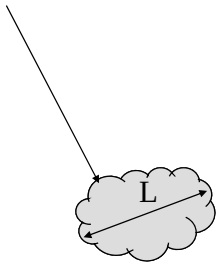


# RL objektid

b) Difuusne hajumine objektilt

pinnakonarused $\approx \lambda$

$L > \lambda_0$



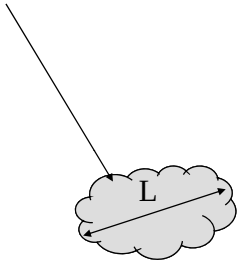

$g$
$\varepsilon$
$\mu$

# RL objektid

c) Teisene resonants- hajumine objektilt

pinnakonarused $= m\frac{\lambda_0}{2}$

$L > \lambda_0$




$g$

$\varepsilon$

$\mu$





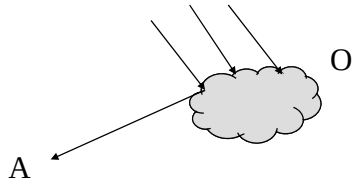
# RL objekti

- Peegelduspindala

$$\sigma_e(a,\beta) = 4\pi D^2 \left|\frac{E_b}{E_t}\right|^2$$

$$\sigma_e(\alpha,\beta) = 4\pi D^2 \frac{\Phi_b}{\Phi_t}$$

$$\Phi\left[\frac{w}{m^2}\right]$$




$\sigma_e(\alpha)$
$\sigma_e(\beta)$ Praktikas





# Radari objektid on

- Väikesegabariidilised objektid
  Olulistel kaugustel võib lugeda punktikujulisteks
- Suured objektid (hajutatud)





# Kas objekt on väike?

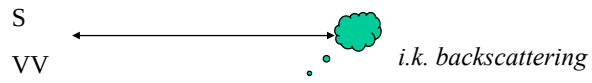
Kui kiiritatakse objekti, siis

$$\Delta D_{\min} \rightarrow \Delta D_{\min}$$
$$\Delta\alpha_{\min} \rightarrow \Delta D_{\alpha\min} = D\Delta\alpha_{\min}$$
$$\Delta\beta_{\min} \rightarrow \Delta D_{\beta\min} = D\Delta\beta_{\min}$$

Kui kiiritatakse maapinda, siis on kasutatakse mõistet: eristatav pind

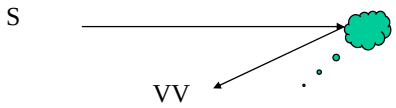
# Peegeldusliigid

- Otsene tagasipeegeldus:
  - Samasse suunda, millisest oli langev kiirgus:




*i.k. backscattering*

- Teise suunda, millisest oli langev kiirgus:

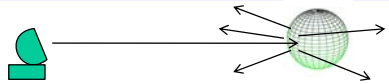




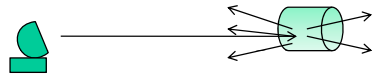



# Peegeldusliigid

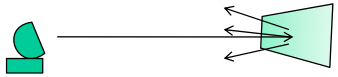
1) sfäär $\sigma = \pi R^2$



2) silinder $\sigma = \frac{2\pi r h^2}{\lambda}$



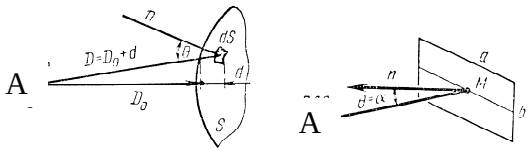
3) leht, tasapind $\sigma = \frac{2\pi \cdot a^2 \cdot b^2}{\lambda^2}$







# Näited: üldine valem




$$\sigma_e = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2}$$

$$S = a \times b$$

EFEKTIIVPINDALA LEIDMINE

$$E_A = \frac{1}{\lambda}\int_S \frac{E}{D}\exp\left[-i\frac{4\pi}{\lambda}D\right]\cos\Theta dS$$

Θ Kiirguse ja normaali vaheline nurk

Kiirguse allikas ja vv on A
n on pinnanormaal
d on käiguvahe





# Näide: pööratud metalli leht

– Olgu EML suunatud piki horisontaaltelge, metallileht on asetatud vertikaalselt ja pööratud ümber vertikaaltelje nii, et pöördenurk on α horisontaaltasandis:

$$\sigma_e = 4\pi\frac{S^2}{\lambda^2}\cos^2\alpha\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2,$$

$$x = \frac{2\pi a \sin\alpha}{\lambda}$$

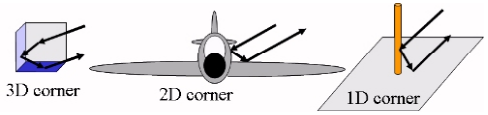
# Üldine valem

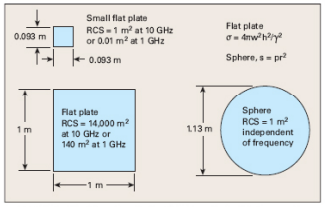
Erinevad peegeldavad objektid

$$\sigma_A = A\frac{S^2}{\lambda^2}$$

$$A_{metallleht} = 2\pi$$

$$A_{nurkpeegeldi} = \frac{4\pi}{3}$$




8. The RCS calibration standard, which is spherical in form and independent of frequency, represents a reflecting area that is a function of frequency.

*http://www.microwaves101.com/encyclopedia/absorbingradar2.cfm* *http://www.rfdesign.com/military_defense_electronics/measure-rcs-fig8.jpg*



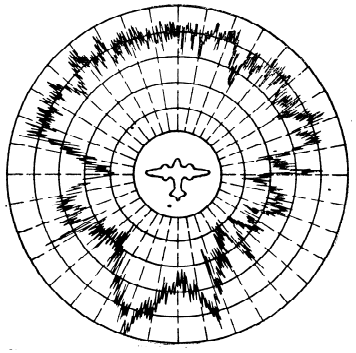


# Näide: lennuk

$\lambda = 10cm \quad f \approx 3GHz$

Kahe mootoriga

lennuki hajumisdiagramm horisontaaltasandil (B-26)



*http://www.rankopedia.com/Best-WW-II-Bomber-Aircraft/CandidateData/3692/.htm*





# Näide:

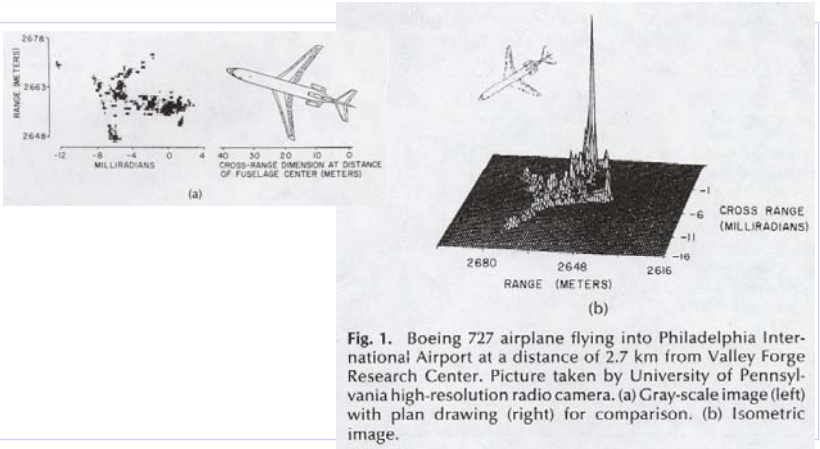
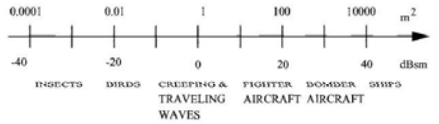



**Fig. 1.** Boeing 727 airplane flying into Philadelphia International Airport at a distance of 2.7 km from Valley Forge Research Center. Picture taken by University of Pennsylvania high-resolution radio camera. (a) Gray-scale image (left) with plan drawing (right) for comparison. (b) Isometric image.





# Näide:

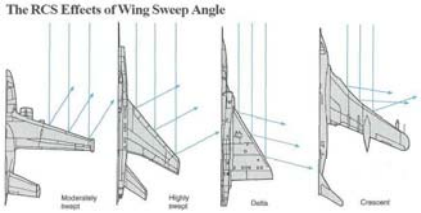


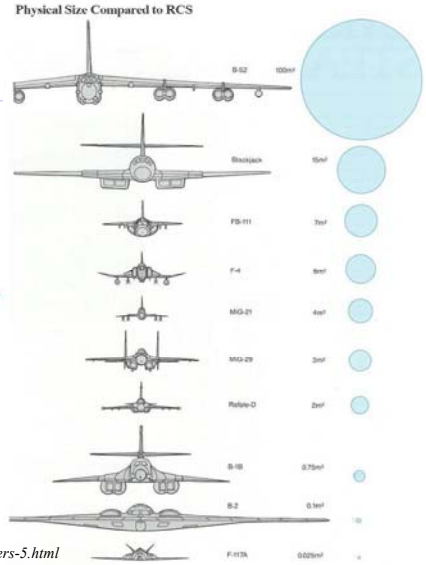

*dBsm – Decibels to Square Meters*

| Target | RCS ($m^2$) | RCS (dBsm) | Relative range |
|---|---|---|---|
| Aircraft carrier | 100,000 | 50 | 1778 |
| Cruiser | 10,000 | 40 | 1000 |
| Large airliner or automobile | 100 | 20 | 316 |
| Medium airliner or bomber | 40 | 16.0 | 251 |
| Large fighter | 6 | 7.8 | 157 |
| Small fighter | 2 | 3.0 | 119 |
| Man | 1 | 0 | 100 |
| Conventional cruise missile | 0.5 | -3.0 | 84 |
| Large bird | 0.05 | -13.0 | 47 |
| Large insect | 0.001 | -30 | 18 |
| Small bird | 0.00001 | -50 | 6 |
| Small insect | 0.000001 | -60 | 3 |

*http://zhiescreamous.files.wordpress.com/2012/05/rcs_examples.jpg*
*http://www.defence.pk/forums/air-warfare/73549-fundamentals-stealth-design-concepts-rcs-reduction-2.html*

# Näide:




*http://www.defence.pk/forums/air-warfare/20908-rcs-different-fighters-5.html*

# 4. RTIHS signaaliteoreetilised alused

- Kiiratav(ad) signaal(id) vastuvõetavad signaalid
- Sondeerivad signaalid peegeldunud signaalid
  - Saatepoolel vastuvõtu poolel
- "Analüütiline" ehk komplekssignaal
  - Harmoonilise signaali mudel on liialt lihtne ja kunas erinevad seosed mähiskõvera ja üldistatud faasi vahel annavad ikka sama signaali kuju, on otstarbekas signaal esitada "analüütilisel" kujul.





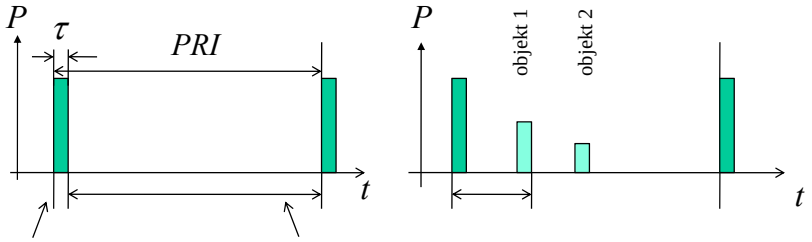
# 4. RTIHS signaaliteoreetilised alused

- Kandesagedus (*frequency*)
- Lainepikkus (*wavelength*)
- Algfaas (*initial phase*)
- Amplituud (*amplitude, magnitude*)
- Võimsus (*power*)
- Impulsi pikkus, kestus ( *pulse width, duration*)
- Impulsi intervall (*pulse repetition interval – PRI*)
- Impulsi kordussagedus (*pulse repetition frequency – PRF, rate*)





# 4. RTIHS signaaliteoreetilised alused




Töötsükkel (*duty cycle*) $d_t = \frac{\tau}{PRI} = \tau \cdot PRF$ $P_{kesk} = P_{\max} \cdot d_t = P_t \cdot \tau \cdot PRF$

Maksimaalne viiteaeg ja kaugus $D_t = \frac{c \cdot PRI}{2} = \frac{c}{2 \cdot PRF}$





# 4. RTIHS signaaliteoreetilised alused

Objekt:
- statsionaarne
- liikuv

Signaali ja müra suhe (*SNR*)

Vastuvõtt:
- koherentne
- mittekoherentne
- monostaatiline
- multistaatiline

$$\frac{signaal}{müra} = dB$$

# 4. RTIHS signaaliteoreetilised alused

Doppleri efekt (*Doppler effect, shift*)
Liikuv objekt, saatja või vastuvõtja

$$f_d = f - f_{vv}$$

$$f_d \approx +/- \frac{2 \cdot v_r}{\lambda}$$

$$f_d = f \cdot \frac{v}{c} \cos\varphi$$

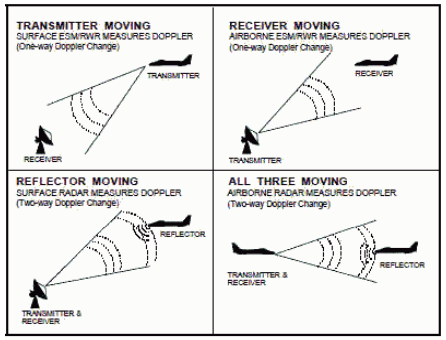


Figure 2. Methods of Doppler Creation

*http://www.rfcafe.com/references/electrical/ew-radar-handbook/doppler-shift.htm*





- "Analüütiline" ehk vahel ka komplekssignaaliks nimetatud signaal

$$s_a(t) = s(t) + i s_H(t)$$

$i = \sqrt{-1}$

koosneb

reaalosast $s(t)$

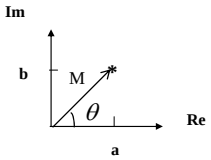
ja imaginaarosast $s_H(t)$





# Geomeetriline signaali mudel

- kompleksarv $Z=a + ib$ on punkt komplekstasapinnal




kaaskompleks $Z^* = a - ib$

Polaarkoordinaadid (*polar coordinates*) $M = \sqrt{(\mathrm{Re}\,Z)^2 + (\mathrm{Im}\,Z)^2}$ $\theta = \arctan\left[\frac{\mathrm{Im}\,Z}{\mathrm{Re}\,Z}\right]$

Ristkoordinaadid (*Cartesian coordinates)*

$\mathrm{Re}\,Z = M\cos(\theta)$

$\mathrm{Im}\,Z = M\sin(\theta)$

$a + ib = M(\cos\theta + i\sin\theta)$





# Näide: signaal $M\cos(\omega t + \varphi) \Leftrightarrow Me^{j\theta}$ $M = M$ $\theta = -\varphi$

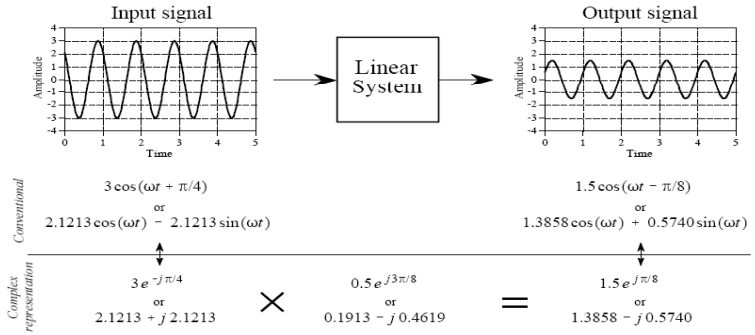



FIGURE 30-4
Sinusoids represented by complex numbers. Complex numbers are popular in DSP and electronics because they are a convenient way to represent and manipulate *sinusoids*. As shown in this example, sinusoidal input and output signals can be represented as complex numbers, expressed in either polar or rectangular form. In addition, the *change* that a linear system makes to a sinusoid can also be expressed as a complex number.

*Steven W. Smith The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing http://www.dspguide.com/*

## Signaali Hilberti teisendus (*Hilbert transform*):

$$H\langle s(t)\rangle = s_H(t) = -\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)\frac{1}{\tau - t}d\tau$$

On erakorraliselt tähtis mõiste raadiotehnikas

(annab võimalusi teha uusi algoritme detektoreile, modulaatoritele jne.).





## Raadiotehnilise signaali mähiskõver ja üldistatud faas

- on avaldatavad

$$U(t) = \sqrt{s^2(t) + s_H^2(t)}$$

$$\Psi(t) = \arctan\frac{s_H(t)}{s(t)}$$





## Harmooniliste lihtsignaalide Hilbert`i teisendused

- on

$$H\langle a\cos\omega_0 t\rangle = a\sin\omega_0 t,$$

$$H\langle a\sin\omega_0 t\rangle = -a\cos\omega_0 t,$$





## Polüharmooniliste signaalide Hilbert' i teisendus

- on

$$H\left\langle\sum_{i=1}^{N}\left(a_i\cos i\omega_0 t + b_i\sin i\omega_0 t\right)\right\rangle =$$

$$= \sum_{i=1}^{N}\left(a_i\sin i\omega_0 t - b_i\cos i\omega_0 t\right)$$

## Polüharmoonilise signaali mähiskõvera ja üldistatud faasi funktsioonid

$$U(t)=\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{N} a_i \cos i\omega_0 t + b_i \sin i\omega_0 t\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{N} a_i \cos i\omega_0 t - b_i \sin i\omega_0 t\right)^2}$$

$$\Psi(t)=\arctan\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(a_i \sin i\omega_o t - b_i \cos i\omega_0 t\right)}{\sum_{i=1}^{N}\left(a_i \cos i\omega_o t + b_i \sin i\omega_0 t\right)} = \omega_s t + \Theta(t)$$





## Mähiskõver ja faas on aeglased muutuvad funktsioonid

- kui

$$\frac{dU(t)}{dt} << \omega_0 U(t),$$

$$\frac{d^2U(t)}{dt^2} << \omega_0 \frac{dU(t)}{dt},$$

$$\frac{d\Theta(t)}{dt} << \omega_0$$





## Igasuguse signaali võime arendada

- Fourier' i ritta:

$$s(t)=\sum_{i01}^{N}(a_i \cos i\omega_0 t + b_i \sin i\omega_0 t)$$





## Tähelepanu!

- Praktiliselt kasutatakse signaali arendamiseks *Fourier*' i ritta kiiret diskreetset *Fourier*' i teisendamist.
- Järelikult on võimalus igasuguse signaali jaoks saada mähiskõver ja üldistatud faas

## Analüütilise signaali omadused

1. "Analüütilise" signaali mõningad väärtused annavad mähiskõvera:

$$s_a(t=t_i)=s(t=t_i)=U(t=t_i), \quad kui \quad s_H(t=t_i)=0,$$
$$s(t=t_i)=s_{\max}(t_i), \quad i=[1,...,i,...]$$





## Analüütilise signaali omadused

- 2. Mähiskõvera väärtused on suuremad, kui signaali väärtused:

$$U(t) \geq s(t)$$





## Analüütilise signaali omadused

- 3. Mähiskõvera tuletis langeb teatud tingimustel kokku signaali tuletisega

$$\frac{dU(t)}{dt}=\frac{ds(t)}{dt}, \quad kui \quad s_H(t)=0$$





## Analüütilise signaali omadused

- 4. Mähiskõvera võime saada valemiga:

$$U(t)=\sqrt{s_a(t)\,s_a^*(t)},$$
$$kus \quad s_a^*(t)=s(t)-is_H(t)$$

**on "analüütilise" signaali kaaskomplekssignaal.**

## "Analüütilisest" signaalist kompleksignaal

$$s_a(t) = s(t) + is_H(t)$$

$\Psi(t)$

Leidke üleminek!

$$s(t) = U(t)\exp\left\{i\left[\omega_0 t + \varphi(t) + \Theta_0\right]\right\}$$

Sondeeriv signaal:

$$s_s(t), s(t)$$





## Informatiivne signaal

– Kas peegeldunud või lihtsalt levinud

$$s(t - t_D, f_v) = U(t - t_D)\exp\{i[2\pi(f_0 + f_v) + \varphi(t - t_D) + \Theta + \Theta_0]\}$$

$$f_v = f_0\frac{v}{c} = \frac{v}{\lambda_0},$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$$

$t_D = \frac{2D}{c}$, *levi edasi – tagasi*

$t_D = \frac{D}{c}$, *levi ühes suunas*





## RTIHS signaaliteoreetilised alused

- Sondeerivad radari signaalid
- Määramatuse printsiip

$$s(t) = U(t)\exp\left\{i\left[\omega_0 t + \varphi(t) + \Theta_0\right]\right\} = U(t)e^{i\Psi(t)}$$

$$s_a(t) = s(t) + is_H(t)$$

$$U(t) = \sqrt{s^2(t) + s^2{}_H(t)}$$

$$\Psi(t) = \arctan\frac{s_H(t)}{s(t)}$$





## Sondeerivad radari signaalid

1. Impulss signaal, modulatsioonita (*pulse signal*)

*Pulse compression waveforms:*

2. Lineaarse sagedusmodulatsiooniga signaal (*linear frequency modulated pulse – LFM*)
3. Faasmanipuleeritud signaal (*phase-coded pulse*)

Jne. (Nonlinear –LFM, )

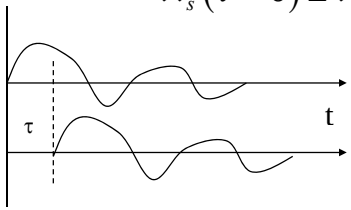
Kõrvalehed, Doppleri tundlikkus

## Määramatuse funktsioon on sarnane

- autokorrelatsioonifunktsiooniga (AKF)

$$\Re_s(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s(t-\tau)\,dt$$

$$\Re_s(\tau = 0) \geq \Re_s(\tau)$$








## Määramatuse funktsioon

- On kahemõõtmeline ja algselt

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} S_a(t)S_a(t-\tau, f-F)\,dtdf$$





## Mõte on pärit informatiivsest signaalist

– Kas peegeldunud või lihtsalt levinud

$$s(t-t_D, f_v) = U(t-t_D)\exp\left\{i\left[2\pi(f_0+f_v)(t-t_D)+\varphi(t-t_D)+\Theta+\Theta_0\right]\right\}$$

$$f_v = f_0\frac{v}{c} = \frac{v}{\lambda_0},$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$$

$t_D = \frac{2D}{c}$, *levi edasi – tagasi*

$t_D = \frac{D}{c}$, *levi ühes suunas*



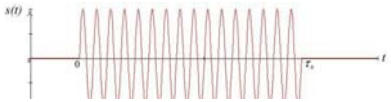


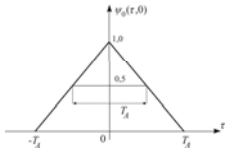
## Määramatuse keha (*ambiguity function*)

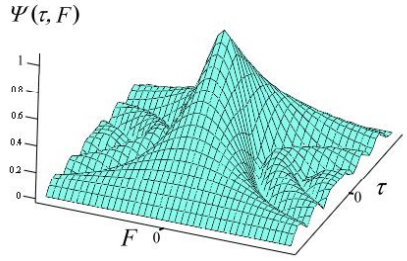
- Arvutatakse sondeeriva signaali jaoks ja tema abil saab kindlaks teha sondeeriva signaali võimed

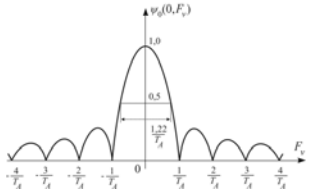
$$\Psi(\tau, F) = \frac{\left|\int_{-\infty}^{\infty} s(t)s(t-\tau)\exp[i2\pi Ft]dt\right|}{\int_{-\infty}^{\infty} s^2(t)dt}$$

# Näide: määramatuse keha






Tallinna Tehnikaülikool Raadio ja sidetehnika instituut Urve Madar, Julia Berdnikova

# Kirjandus

I. Arro Raadiosüsteemid I

Laboratoorsete tööde juhend, TPI Tallinn 1977

Töö nr.1 Sondeerivad raadiolokatsioonisignaalid. Määramatuse printsiip.

# 5. **Kauguse mõõtmistel põhinevad RTIHS**

- Kauguste mõõtmine
- Nurkade mõõtmine
- Kiiruse mõõtmine





# RTIHS

- Radarid – mõõdetakse kaugust, nurkasid, kiirust
  - – määratakse objekti asukohta ja liikumist
- raadionavigatsioon
  - – mõõdetakse kas kaugust, kauguste summasid või vahesid, suunanurkasid – saadakse enda asukoha koordinaadid
- Raadiopeilimine
  - – mõõdetakse kas nurkasid, kauguste vahesid, jne – saadakse kiirgusallika asukoht





# Üldiselt

$$D \Rightarrow t_D \Rightarrow \begin{matrix} \varphi_D \\ F_D \\ t_D \end{matrix}$$

1. Faasiline meetod
2. Sageduslik meetod
3. Impulssmeetod

Tekitab | Mõõdetakse





# Nurgakoordinaatide mõõtmine

- Üldist

1. Asimuut
2. Kohanurk

$$\alpha \Rightarrow \begin{matrix} \varphi \\ U_m \end{matrix}$$

1. Faasiline meetod
2. Amplituudmeetod

$$\beta \Rightarrow U_m$$

1. Amplituudmeetod

On olemas | Mõõdetakse

# Kiiruse mõõtmine

**http://en.wikipedia.org/wiki/Relativistic_Doppler_effect**

$v_r \rightarrow f_D$ S $\longleftarrow$ VV

1. $\lambda = \frac{c}{f_0}$

2. $t = \frac{\lambda}{c - v} = \frac{1}{\left(1 - \frac{v}{c}\right) f_0}$; $f_D = \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} f_0$;

$\sqrt{\frac{1-z}{1+z}} \approx 1 - z$; $\sqrt{\frac{1-0{,}1}{1+0{,}1}} = \sqrt{\frac{0{,}9}{1{,}1}} = 0{,}904534.....$

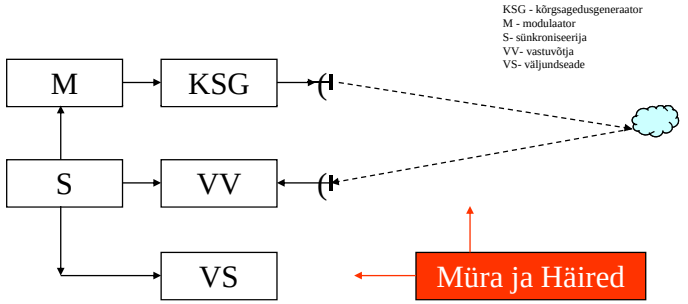
$f_D \cong \left(1 - \frac{v}{c}\right) f_0$; $radar: f_D \cong \left(1 - \frac{2v}{c}\right) f_0$





# Näited.

- Radari struktuurskeem (pidevate sondeerivate signaalidega)

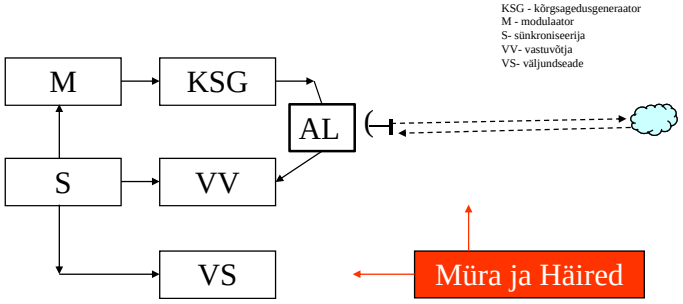







# Näited.

- Radari struktuurskeem (sondeerivate impulss-signaalidega)








# Tähistused

- KSG - kõrgsagedusgeneraator
- M - modulaator
- S - sünkroniseerija (kroniseerija)
- VV - vastuvõtja
- VS - väljundseade
- M ja H - mürad ja häired

# A. Kauguse mõõtemeetodid

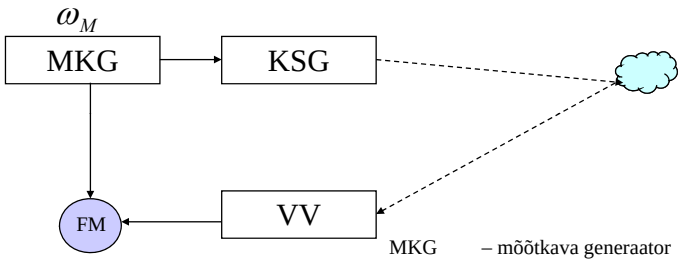
1. Faasiline (kasutame levist tekkinud faasinihet)

$$s(t-t_D, f_v) = U(t-t_D)\exp\{i[2\pi f_0(t-t_D)+\varphi_0+\Delta\varphi_D+\varphi_v]\}$$
$$f_v = 0,$$
$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$$





# 1. Faasilise kaugusemõõtja struktuurskeem




MKG – mõõtkava generaator
KSG - kõrgsagedusgeneraator
VV - vastuvõtja
FM - Faaside vahe mõõtja





# MKG

1. Töösagedus on $\omega_M$
   - on kas ise kõrgsagedusgeneraator
   - või KSG i modulatsiooni generaator

   Vastavalt sellele mõõdetakse faasivahet kas kõrgsagedusel või modulatsioonisagedusel





# FM

- Faasivahe mõõtur mõõdab vahet

$$\Delta\varphi = \{[2\pi f_M(t_D)+\varphi_0+\Delta\varphi_D+\varphi_v]\}$$

| | |
|---|---|
| $2\pi f_M t_D$ | Faasinihe kaugusest |
| $\varphi_0$ | KSG algfaas |
| $\varphi_D$ | Faasivahe kaugusemõõtja seadmetest |
| $\varphi_v$ | Faasivahe peegeldusest või VVst |

# Kauguse valem

$$t_D = \frac{\Delta\varphi - \varphi_0 - \Delta\varphi_D - \varphi_v}{\omega_M} = \frac{2D}{c}$$

$$D = \frac{c(\Delta\varphi - \varphi_0 - \Delta\varphi_D - \varphi_v)}{2\omega_M}$$

$$\Delta\varphi \le 2\pi$$

$$D_{\max} \le \frac{\lambda_M}{2}$$

Praktiliselt on tegevuskaugused mõned kilomeetrid





# Praktiliselt

Võib faaside vahet mõõta tuikesagedustel:

On kaks generaatorit sagedustega $\omega_1; \omega_2$

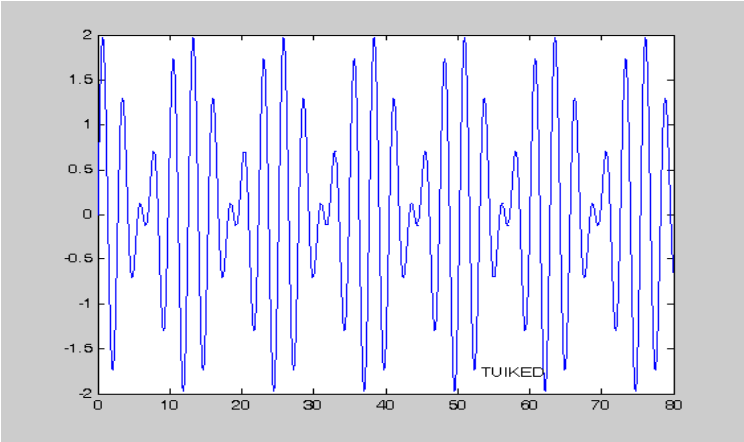
Tuiked moodustatakse vahesagedusel $\omega_1 - \omega_2$

Nii õnnestub EML tekitada kõrgetel sagedustel ja faaside vahet mõõta madalal sagedusel





# Tuiked (kahe erineva sagedusega harmoonilise signaali summa, amplituudid ühesugused)








# Harmooniliste signaalide summa $\omega_1 = \omega_2 = \omega$

amplituudid ühesugused:

| Sum of two sinewaves | Single sinusoid equivalent |
|---|---|
| $A\sin(\omega t + \alpha) + A\sin(\omega t + \beta)$ | $= \sqrt{2A^2[1+\cos(\alpha)\cos(\beta)+\sin(\alpha)\sin(\beta)]}$ $\cdot \sin\left\{\omega t + \tan^{-1}\left[\frac{\sin(\alpha)+\sin(\beta)}{\cos(\alpha)+\cos(\beta)}\right]\right\}$ |

amplituudid erinevad:

| | |
|---|---|
| $A\sin(\omega t) + B\sin(\omega t)$ | $= (A + B)\cdot\sin(\omega t)$ |
| $A\sin(\omega t + \alpha) + B\sin(\omega t + \beta)$ | $= \sqrt{[A\cos(\alpha) + B\cos(\beta)]^2 + [A\sin(\alpha) + B\sin(\beta)]^2}$ $\cdot \sin\left\{\omega t + \tan^{-1}\left[\frac{A\sin(\alpha)+B\sin(\beta)}{A\cos(\alpha)+B\cos(\beta)}\right]\right\}$ |



http://dspguru.com/sites/dspguru/files/Sum_of_Two_Sinusoids.pdf

# Harmooniliste signaalide summa $\omega_1 \neq \omega_2$

$$s_1 = A_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \quad s_2 = A_2 \cdot \sin(\omega_2 t + \varphi_1)$$

$$\sin x + \sin y = 2 \cdot \sin\left(\frac{x+y}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{x-y}{2}\right)$$

$$\cos\left(\frac{x}{2}\right) = \pm\sqrt{(1+\cos x)/2}$$

1)Kui $\varphi_1 = \varphi_2 = 0, \quad A_1 = A_2 = 1$ (amplituudid ühesugused)

$$s_1 + s_2 = \sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t) = 2 \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right) =$$

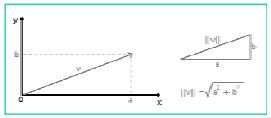
$$= \pm\sqrt{2 + 2 \cdot \cos((\omega_1 - \omega_2) \cdot t)} \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right)$$

AM signaali sagedus: $\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$. Mähiskõver: $\omega = |\omega_1 - \omega_2|$





# Harmooniliste signaalide summa $\omega_1 \neq \omega_2$



1)Kui $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ , $A_1 \neq A_2$ (amplituudid erinevad)

$A_1 < A_2$

$$s_1 + s_2 = A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \sin(\omega_2 t) = \sin(\omega_2 t) \cdot (A_1 \cdot \cos(\omega_1 - \omega_2) \cdot t + A_2)$$

Summa amplituud:

$$|A_1 \cdot \sin(\omega_1 - \omega_2) \cdot t + A_2| = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot \cos(\omega_1 - \omega_2)}$$

Summa faas:

$$\arctan\left(\frac{A_1 \cdot \sin(\omega_1 - \omega_2)}{(A_1 \cdot \cos(\omega_1 - \omega_2) \cdot t + A_2)}\right)$$



http://www.robotgoblin.co.uk/blog/wp-content/uploads/2012/02/length_of_vector.png



# Harmooniliste signaalide summa

Sagedused:

$\omega_1, \omega_2 \Rightarrow$

$$\omega_2 + \frac{A_1(\omega_1 - \omega_2)}{A_2 + A_1} = \frac{A_2\omega_2 + A_1\omega_1}{A_2 + A_1}$$

$$\omega_2 - \frac{A_1(\omega_1 - \omega_2)}{A_2 - A_1} = \frac{A_2\omega_2 - A_1\omega_1}{A_2 - A_1}$$

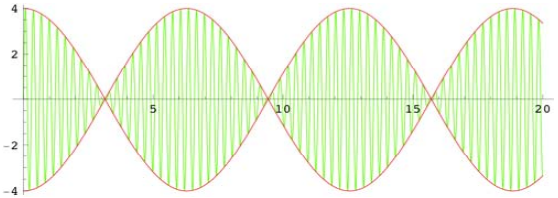
Mähiskõver: $\omega = |\omega_1 - \omega_2|$



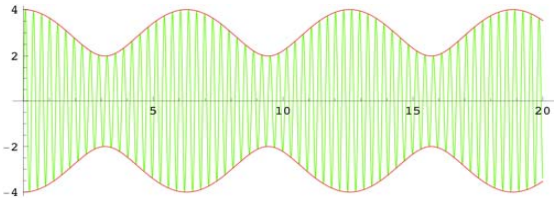


# Harmooniliste signaalide summa

Signaalide summa: (amplituudid ühesugused)




Signaalide summa: (amplituudid erinevad)






http://math.stackexchange.com/questions/164369/how-do-you-calculate-the-frequency-perceived-by-humans-of-two-sinusoidal-waves-a

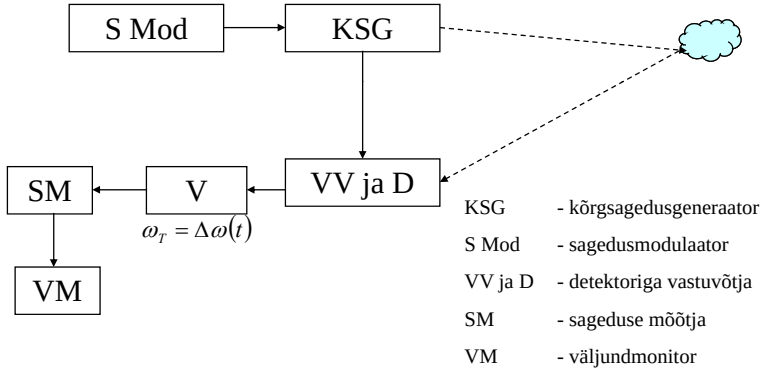
# Faasiliste mõõturite võimalused

1. Lahutusvõime kauguste suhtes puudub
2. Otse ja tagasi signaali eraldamine võimatu, kui objekt ei liigu.
3. Otse ja tagasi signaali eraldamiseks kasutatakse keerulisi signaale.
4. Faasilisi kaugusemõõtmist kasutatakse kaugnavigatsiooni süsteemides.





# 2. Sagedusliku kaugusemõõtja struktuurskeem








# Selgitavad valemid

- Välja kiiratakse signaal sagedusega

$$f_s = f_0 + \gamma t = f_0 + \frac{2W}{T_M} t$$

$f_0$ Keskmine sagedus

$W$ Sagedusdeviatsioon (muutepiirkond)

$T_M$ Sageduse muutumise periood





# Selgitavad valemid

- Vastu võetakse signaal sagedusega

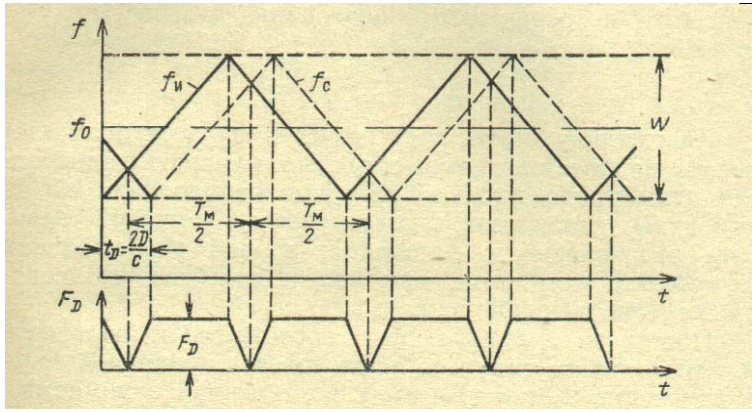
$$f_v = f_0 + \gamma(t - t_D) = f_0 + \frac{2W}{T_M}(t - t_D) = f_0 + \frac{2W}{T_M}(t - \frac{2D}{c});$$

$$F_D = f_s - f_v = \frac{4W}{T_M c} D$$

$$\overline{F_D} = \frac{4W}{T_M c} D\left(\frac{T_M - t_D}{T_M}\right)$$

Keskmine sageduste vahe

# Selgitav joonis








# Kasutusalad

- Radari põhimõttel üles ehitatud kõrgusemõõtjad
- Keeruliste signaalidega seireradarid
- Radari põhimõttel üles ehitatud liikumiskiiruse mõõtjad
- Jne.....





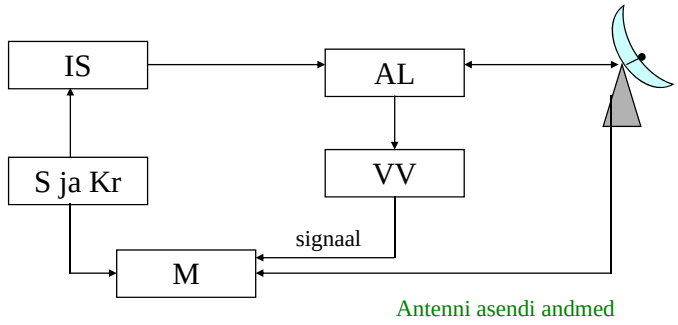
# 3. Impulsside viiteaja mõõtmine

- Impulssradari põhimõte $t_D \Rightarrow D$
  - Sondeerivad signaalid on impulsid, mõõdetakse levinud või tagasipeegeldunud impulsside viidet sondeerivate signaalide suhtes.
  - Meetodit kasutatakse laialdaselt nii radarites kui ka raadionavigatsiooni süsteemides, mis on üles ehitatud kauguste mõõtmistele.

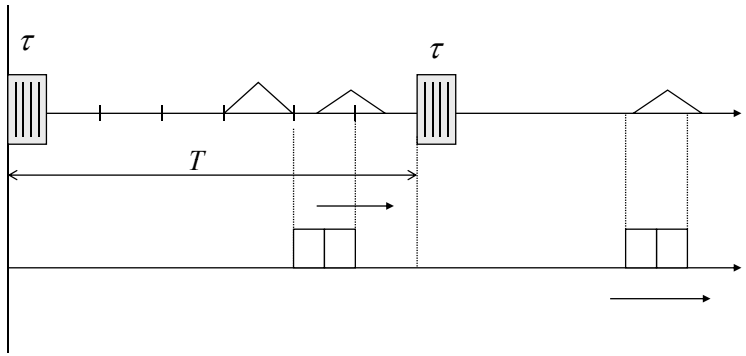




# Impulssradari struktuurskeem



# Ajalised diagrammid








# Mõned valemid

$D_{\min} = \frac{(\tau + \Delta\tau_r)c}{2}$ Minimaalne mõõdetav kaugus

$\Delta\tau_r$ *(recovery time )*

$D_{\max} = \frac{T \cdot c}{2} = \frac{PRI \cdot c}{2} = \frac{c}{2 \cdot PRF}$ Maksimaalne mõõdetav kaugus

$\Delta D \geq \frac{\tau \cdot c}{2}$ Kauguse lahutusvõime (*pulse signal*)

$\Delta D \geq \frac{c}{2 \cdot B_w}$ Kauguse lahutusvõime (*pulse compression*), $B_W$ - impulsi ribalaius

$\delta_t = \frac{\Delta t_d \cdot c}{2}$ Kauguse mõõtetäpsus

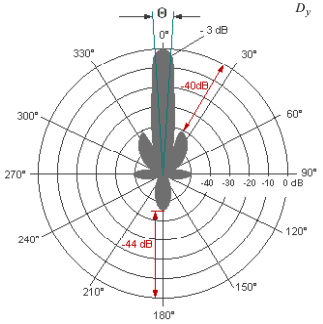




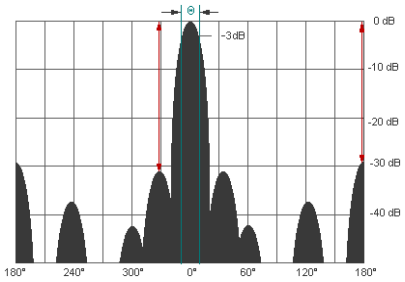
# Antenni suunadiagramm

$3\,dB\ pealehelaius = 0{,}89\frac{\lambda}{D_y}[rad]$

$D_y$ - apertuur




**Antenni suunadiagramm (*antenna pattern*) ringkoordinaatides (*polar-coordinate*)**



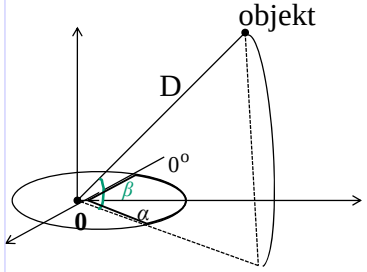

**Antenni suunadiagramm (*antenna pattern*) ristkoordinaatides (*rectangular-coordinate*)**

*http://www.radartutorial.eu*



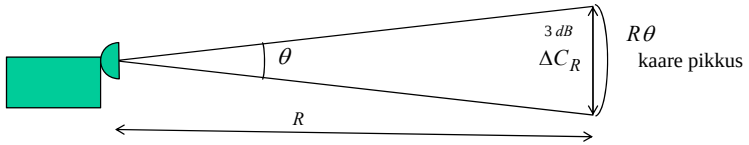


# Objekti asukoht




D – radiaalkaugus
$\beta$ – kohanurk (*elevation angle*)
$\alpha$ – asimuut (*azimuth*)

# Mõned valemid

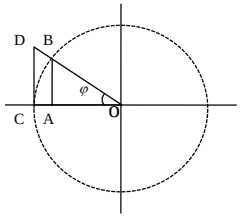



**lahutusvõime** $\Delta C_R = 2R\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \approx R\theta$

$\theta$ – asimuut või kohanurk [rad]

AB = tan $\varphi$

CD = sin $\varphi$




**Antenni apertuur horisontaaltasandil / vertikaaltasandil kaugusel *R***

# 5. **Kauguse mõõtmistel põhinevad RTIHS**

- Kauguste mõõtmine
- Kauguste summa mõõtmine
- Kauguste vahe mõõtmine
- Kauguste funktsiooni mõõtmine

*Multilateration: http://en.wikipedia.org/wiki/Multilateration*
*Sound ranging: http://en.wikipedia.org/wiki/Sound_ranging*
*time difference of arrival (TDOA), radio navigation systems, triangulation*

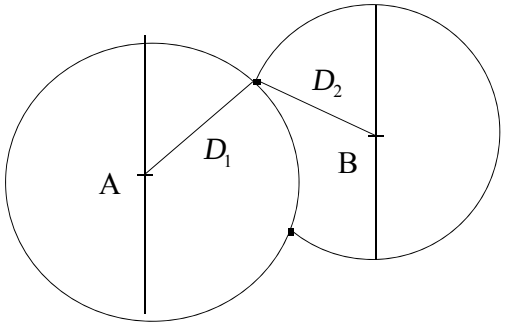




# Kauguse mõõtmise meetod (RN)

$D_1 = const \rightarrow ring_{tasapinnal}, D_2 = const_{tasapinnal} \rightarrow 2$

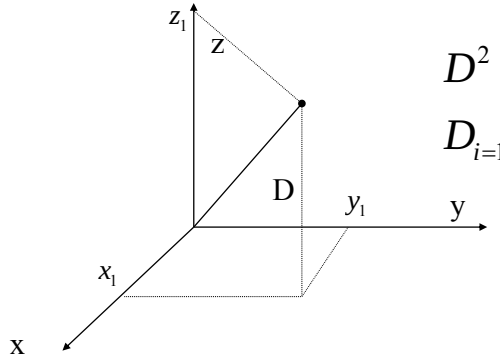
$D_1 = const \rightarrow sfäär_{ruumis}, D_2 = const \rightarrow sfäär_{ruumis} \rightarrow 2$








# Kauguste mõõtmise meetod



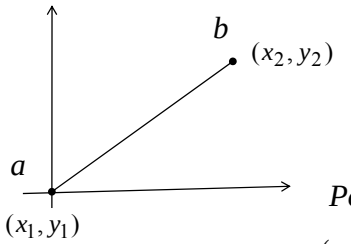

$$D^2 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2$$

$$D_{i=1;2;3}$$





# Valemid: vektori pikkus



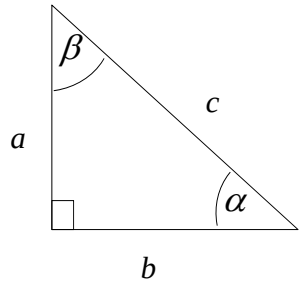

$$ab = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

*Polaarkoordinaatides:*

$$a(\rho_1, \varphi_1) \qquad b(\rho_2, \varphi_2)$$

$$ab = \sqrt{\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

# Valemid: täisnurkne kolmnurk




$$\beta = 90 - \alpha$$

$$a = c \cdot \sin\alpha = c \cdot \cos\beta$$

$$b = c \cdot \cos\alpha = c \cdot \sin\beta$$





# Valemid: lineaarvõrrandite süsteem

$$\left.\begin{aligned} a_1x + b_1y &= c_1 \\ a_2x + b_2y &= c_2 \end{aligned}\right\}$$

$$D = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1.$$

$$D_x = \begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix} = c_1 \cdot b_2 - c_2 \cdot b_1.$$

$$D_y = \begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix} = a_1 \cdot c_2 - a_2 \cdot c_1.$$

$$x = \frac{D_x}{D} \quad \text{and} \quad y = \frac{D_y}{D}.$$

*http://www.nabla.hr/Z_MemoHU-007.htm*





# Valemid: lineaarvõrrandite süsteem

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1z = d_1 \\ a_2x + b_2y + c_2z = d_2 \\ a_3x + b_3y + c_3z = d_3 \end{cases}$$

$$D = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}, \quad D_x = \begin{vmatrix} d_1 & b_1 & c_1 \\ d_2 & b_2 & c_2 \\ d_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix},$$

$$x = \frac{D_x}{D}, \quad y = \frac{D_y}{D} \text{ and } z = \frac{D_z}{D}.$$

$$D_y = \begin{vmatrix} a_1 & d_1 & c_1 \\ a_2 & d_2 & c_2 \\ a_3 & d_3 & c_3 \end{vmatrix}, \quad D_z = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & d_3 \end{vmatrix},$$

$$D = +a_1 \cdot \begin{vmatrix} b_2 & c_2 \\ b_3 & c_3 \end{vmatrix} - a_2 \cdot \begin{vmatrix} b_1 & c_1 \\ b_3 & c_3 \end{vmatrix} + a_3 \cdot \begin{vmatrix} b_1 & c_1 \\ b_2 & c_2 \end{vmatrix}.$$

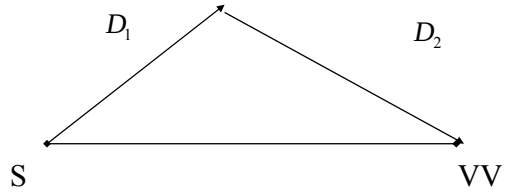




# Kauguste summa mõõtmine

- Passiivsed süsteemid
- Bi – staatilised süsteemid

## Bi – staatiline kolmnurk



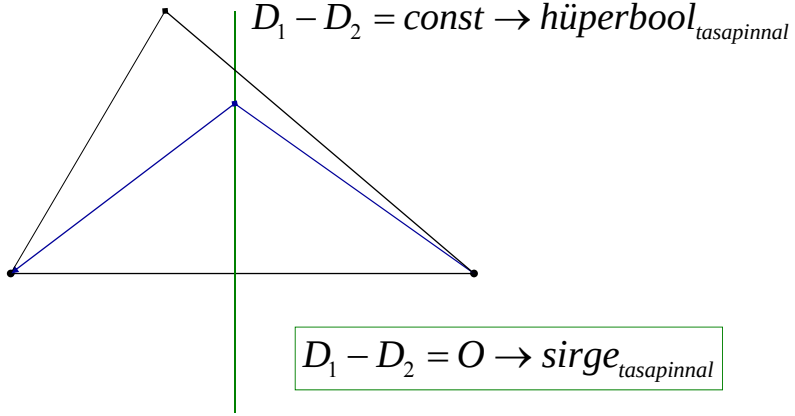

$$D_1 + D_2 = const \rightarrow ellips_{tasapind}$$

$$D_1 + D_2 = const \rightarrow ellipsoid_{ruum}$$





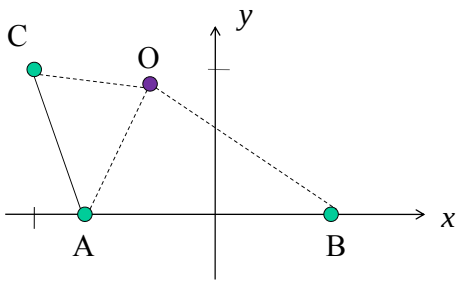
## Kauguste vahe mõõtmine








## Kauguste vahe mõõtmine




lineaarvõrrandite süsteem (*system of linear equations*)

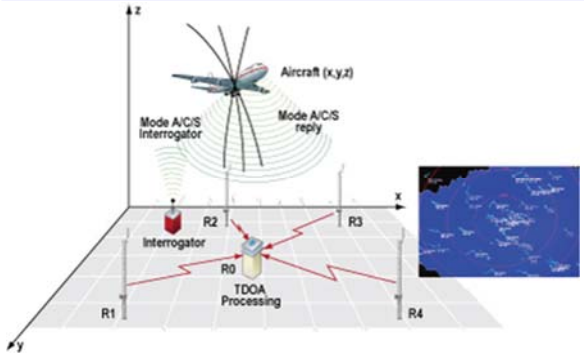




## Näide:

- Sound ranging
- Decca Navigator System
- OMEGA Navigation System
- LORAN-C
- Kopáč, Ramona, Tamara, VERA, Kolchuga
- Mobile phone tracking
- Reduced Vertical Separation Minima (RVSM)

# Näide:




*http://threemilesfinal.com/tag/atc/*





# Kauguste vahe mõõtmine

- LORAN
  - Mõõdetakse ajaintervalle (impulss-signaalid)
- OMEGA
  - Mõõdetakse faasinihkeid

*CHAYKA*





# LORAN-C jaamad

*http://en.wikipedia.org/wiki/Loran_C*



# LORAN (*LOng RAnge Navigation*)

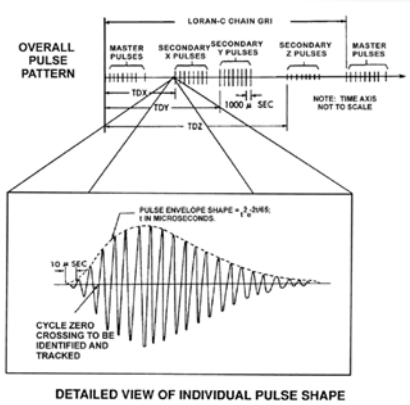
signal on100 kHz impulsside jada

1. *Master station*
2. *Secondary stations*

- master signaal: 9 impulssi
  ( vahe 1-8 – 1000 μs, 9 – 2000 μs)
- secondary signaal: 8 impulssi (1000 μs)

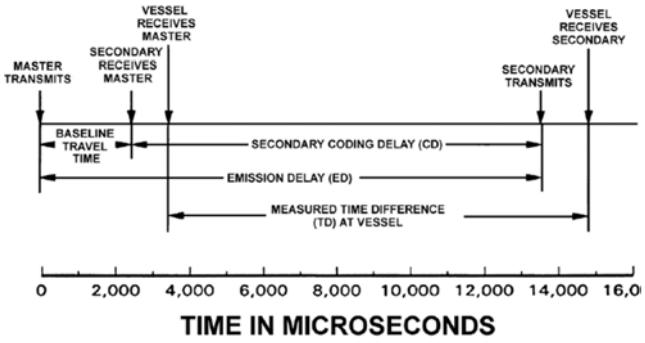
*group repetition interval (GRI)*

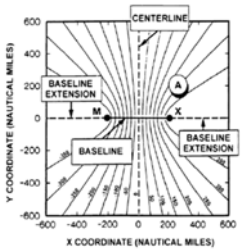
*99% of the radiated power is contained in a 20 kHz band centered on 100 kHz.*




*http://msi.nga.mil/NGAPortal/MSI.portal?_nfpb=true&_pageLabel=msi_portal_page_62&pubCode=0002*

# LORAN-C: ajaline vahe




*M - master station*
*X- secondary station*
*A – vastuvõtja, objekt*

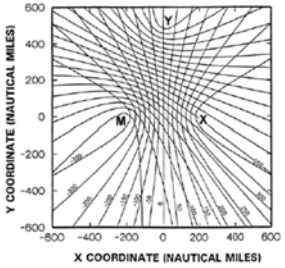
*http://msi.nga.mil/NGAPortal/MSI.portal?_nfpb=true&_pageLabel=msi_portal_page_62&pubCode=0002*

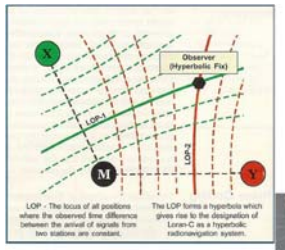




# LORAN

- GEE (*first hyperbolic navigation system* ) 644 km
- Loran A 1,930 km
- Loran C (kuni 2010.a)
- eLORAN (*Enhanced*) (2010.a kuni 2022.a)



*http://www.qsl.net/oz1dku/loran%20ant.jpg*

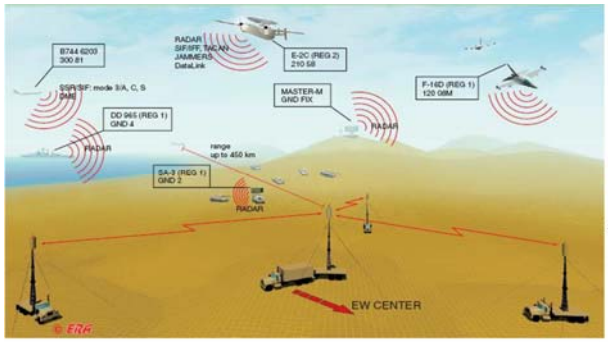
*http://www.fishingunited.com/forum/viewtopic.php?t=5334*

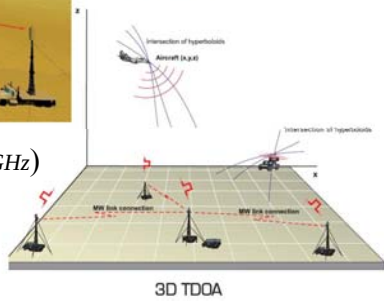
*http://content.answcdn.com/main/content/img/McGrawHill/Aviation/f0409-07.gif*





# VERA (*passive radiolocator),* Tamara





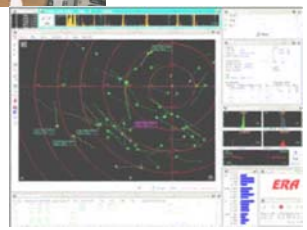

*Sagedusala 1-18 GHz (lisaks* 0,1-1 *GHz* kuni 18-40 *GHz*)
450 km, 200 objekti, tulemused 1-5 s.

*http://baris-malaysia.blogspot.com/2009/05/vera-esm.html*





# VERA-E



*http://www.zmne.hu/tanszekek/ehc/konferencia/april2001/prokob.html*

*http://www.minut.ee/article.pl?sid=05/06/29/1612204&mode=nocomment*

*http://www.minut.ee/files/mauri/tech/vera.jpg*

*http://www.ausairpower.net/APA-Warpac-Rus-PLA-ESM.html*

# Satelliitnavigatsioon

$$D = \left(x - x_s\right)^2 + \left(y - y_s\right)^2 + \left(z - z_s\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$D_1; D_2; D_3$$

$$D = \left(x - x_s\right)^2 + \left(y - y_s\right)^2 + \left(z - z_s\right)^{\frac{1}{2}} + \delta D_s$$

$$D_1; D_2; D_3; D_4$$

# 6. Doppleri efektil põhinevad RTIHS

- Mõõta saab
  - Liikumiskiiruse radiaalset komponenti
  - Kõrvalekalde nurka
  - Selekteerida monitorile liikuvaid objekte (***MTI*** - ***M****oving* ***T****arget* ***I****ndication*)
  - Sünteesida liikumisteed





# Doppleri sagedusnihe

- Informatiivne signaal

$$s(t-t_D, f_v) = U(t-t_D)\exp\{i[2\pi(f_0 + f_v) + \varphi(t-t_D) + \Theta + \Theta_0]\}$$

$$f_d = f_0 \frac{v}{c} = \frac{v}{\lambda_0}, \quad \lambda_0 = \frac{c}{f_0}$$

ühesuunaline

Levi "sinna"

$$f_d = \pm f_0 \frac{2v}{c} = \pm \frac{2v}{\lambda_0},$$

kahesuunaline

Levi "sinna ja tagasi"

Doppleri sagedusnihe on positiivne, kui mõõdetav objekt läheneb ja negatiivne, kui mõõdetav objekt eemaldub.





# Doppleri sagedus

Doppleri sagedus $f_d$ (Hz)

| Sagedusala | Sagedus(GHz) | 1 m/s | 1 knot | 1 mph |
|---|---|---|---|---|
| L | 1 | 6,67 | 3,43 | 2,98 |
| S | 3 | 20,0 | 10,3 | 8,94 |
| C | 5 | 33,3 | 17,1 | 14,9 |
| X | 10 | 66,7 | 34,3 | 29,8 |
| $K_u$ | 16 | 107 | 54,9 | 47,7 |
| $K_a$ | 35 | 233 | 120 | 104 |
| W | 95 | 633 | 326 | 283 |

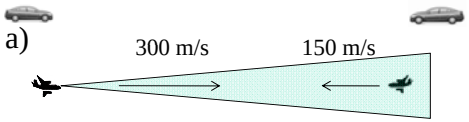
Näide: kiirus 1 m/s sagedusel 10GHz annab $f_d \approx 67\,\text{Hz}$





# Näide: Objekti liikumine

a)




$v = -(300 + 150) = -450$ m/s

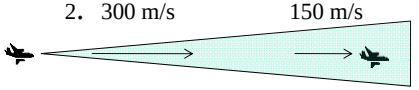
$$v = -(v_{radar} + v_{objekt})$$

$$f_d = -\frac{2v}{c} = \frac{2(v_{radar} + v_{objekt})}{\lambda_0}$$

sagedusnihe on positiivne

b)

1. 150 m/s
2. 300 m/s




$v_1 = -(150 - 300) = 150$ m/s

$v_2 = -(300 - 150) = -150$ m/s

$$v = -(v_{radar} - v_{objekt})$$

$$f_d = \pm\frac{2v}{c} = \pm\frac{2(v_{radar} - v_{objekt})}{\lambda_0}$$

## Doppleri sagedusnihke mõju

– On laialdasem, kui esialgu tundub (igasugune signaal koosneb erinevate amplituudidega, lähedaste sagedustega komponentide kogust). Doppleri sagedusnihe nihutab igat komponenti paigast ja muudab sellega informatiivse signaali kuju ka





## Doppleri efektil põhinevad RTIHS signaali liigid

1. Pidevad sagedusmodulatsiooniga (*FM – frequency modulation*)
   - (kas kolmnurkne või siinusjooneline sagedusmodulatsioon)
2. Pidev signaal kindlal sagedusel, ilma modulatsioonita
   - (lihtne sõiduki kiirusemõõtja) (*CW – continuous wave*)
3. Impulss-signaalid kõrgsagedusliku täitega (*pulse signals*)
   - (võimalikud keerulised impulsside sisesed sagedusmodulatsioonid)





## Tähelepanu!

- Tavaliste sondeerivate signaalidega ei saa moodustuda selliseid informatiivseid signaale, et mõõta sama süsteemiga suure täpsusega kaugust ja kiirust.

  – Kauguse ja kiiruse mõõtmiseks kasutatakse tavaliselt vähemalt erinevad süsteemi osi.





## Doppleri efektil põhinevad RTIHS kasutatakse

Doppleri efekti

1. Liikumiskiiruse määramiseks
   – Objekti liikumiskiiruse määramine eemalt (radari poolt)
   – Omaenda liikumiskiiruse määramine (lennukilt maa suhtes näiteks). Lennumasinale paigutatakse Doppleri efektil põhinevad liikumiskiiruse ja kõrvale kandenurga mõõturid

2. Liikuvate objektide selekteerimiseks
   (radar võtab vastu kõik peegeldunud EML signaalid ja eraldab neist signaalid liikuvatelt peegeldajatelt)

# Sageduslik mõõtemeetod

Kas kolmnurkse või siinusjooneline sagedusmodulatsiooniga on kasutatav

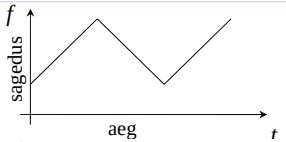
1. Kauguse mõõtmiseks
   – Suurem kaugus ja väiksem liikuva objekt radiaalne kiirus
2. Kiiruse mõõtmiseks
   – Väiksem kaugus ja suurem kiirus



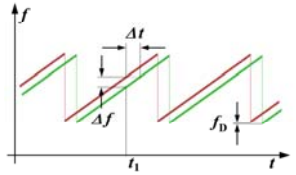


# Pidev sagedusmodulatsioon (*FMCW*)

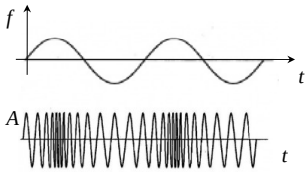
kolmnurkne:
(*triangular*)




saehambakujuline:
(*sawtooth*)




siinus:
(*sinusoidal*)



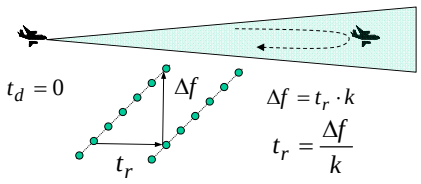

*http://en.wikipedia.org/wiki/Continuous-wave_radar*





# Kolmnurkne sagedusmodulatsioon

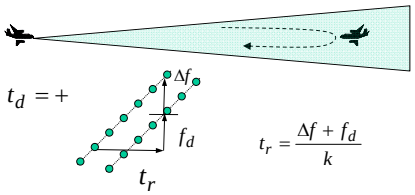
1.



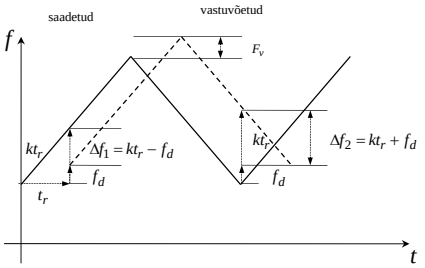

$$\Delta f = t_r \cdot k$$

$$t_r = \frac{\Delta f}{k}$$

2.




$$t_r = \frac{\Delta f + f_d}{k}$$








# Kauguse ja kiiruse mõõtmiseks

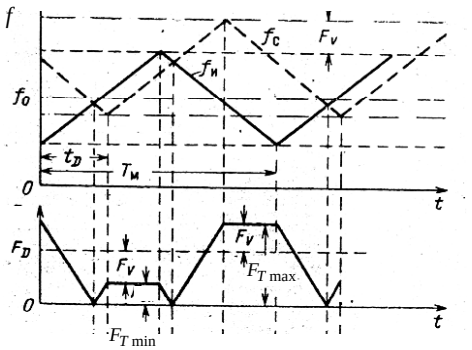
1. Suurem kaugus ja väiksem kiirus

$$F_D > F_v$$

$$F_T = F_D \pm F_v = \frac{4W}{cT_m} D \pm \frac{2 f_0}{c} v$$

$$\frac{F_{T\,\min} + F_{T\,\max}}{2} \approx F_D$$

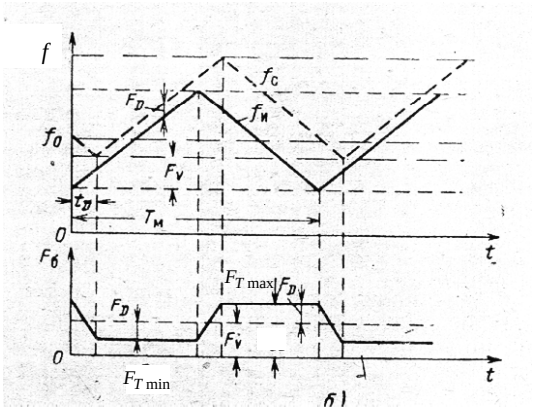
$$\frac{F_{T\,\min} - F_{T\,\max}}{2} \approx F_v$$



# Kiiruse ja kauguse mõõtmiseks

1. Väiksem kaugus ja suurem kiirus

$$F_D = F_{vkr}$$
$$F_v \geq F_{vkr}$$
$$\frac{F_{T\min} + F_{T\max}}{2} \approx F_v \rightarrow v$$
$$\frac{F_{T\min} - F_{T\max}}{2} \approx F_D$$








# Radari jaoks valitakse

- Kui on tarvis mõõta täpselt kaugust, siis

  1) $F_{D\min} > F_{v\max}$

- Kui on tarvis mõõta täpselt kiirust, siis

  2) $F_{D\max} < F_{vkr}$

1) ja 2) kindlustatakse sagedusdeviatsiooni W valikuga





# Doppleri efektil põhinevad liikumiskiiruse ja kõrvalekaldenurga mõõturid

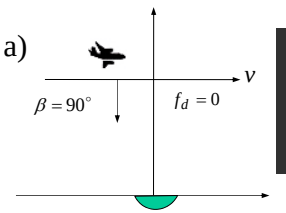
- Lennumasinal paigaldatakse radar, millelt
  - (lennuk, helikopter ja ka raket või kosmose laev)

  – Kiiratakse mingi nurga all maapinnale mitu kitsast EML kiir mitmes suunas
  – Tagasipeegeldunud (informatiivse signaali abil mõõdetakse lennumasina liikumiskiirust ja kõrvalekaldenurka

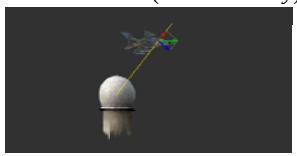


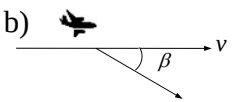


# Doppleri sagedus ja kõrvalekaldenurk




Radiaalkiirus (*radial velocity*)

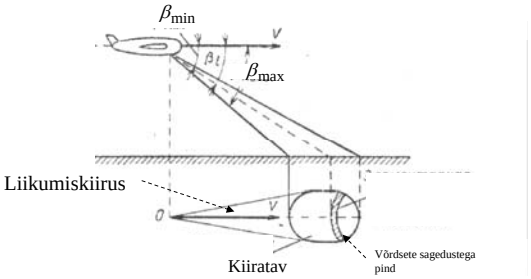





Igale ribale

$$f_d = \frac{2v}{\lambda}\cos\beta_i$$

$f_d$ – maapinna Doppleri sagedus
$v$ – radari kiirus
$\lambda$ – lainepikkus




*http://www.radartutorial.eu/*

# Süsteemi töö

Kui liikumiskiiruse vektori ja antenni suunadiagrammi vahelised nurgad on

$\gamma$ horisontaaltasandis

$\beta_0$ vertikaaltasandis

siis

$$F_{v_0} = \frac{2v}{\lambda}\cos\beta_0\cos\gamma$$

Kui antenni pööramisega horisontaaltasandis saavutada

$\gamma = 0$

$\beta_0$

$$F_{v_0} = \frac{2v}{\lambda}\cos\beta_0$$





# Liikumiskiiruse ja kandenurga mõõtmine

Ühe kiirega ühes suunas ei kasutada praktiliselt

Põhjuseks on liiga madal täpsus

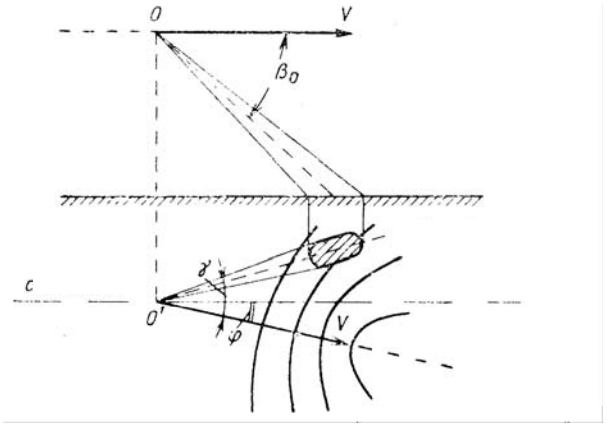
Näiteks, kui Doppleri sagedusnihke määramise täpsus on 1%, siis kaldenurga määramise täpsus on 8° (kraadi)





# Võrdsete sagedustega ribade moodustumine

Lennumasina telgjoon







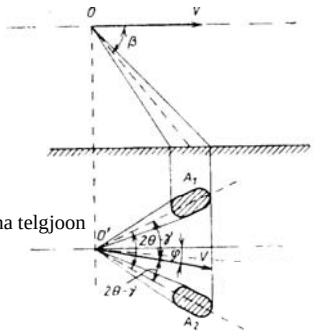

# Kaks kiirt ühes suunas

Kahe kiirega ühes suunas saavutatakse suurem täpsus:

Näiteks, kui Dopplerilise sagedusnihke määramise täpsus on 1%, siis kaldenurga määramise täpsus on 0,28° (kraadi)

Vertikaalnurga vea mõju on sama, kui eelmisel korral

Lennumasina telgjoon




Antenni telgjoon

.

# Kahe kiirega kahes suunas

Kahekiirega kahes suunas saavutatakse

suurem täpsus:

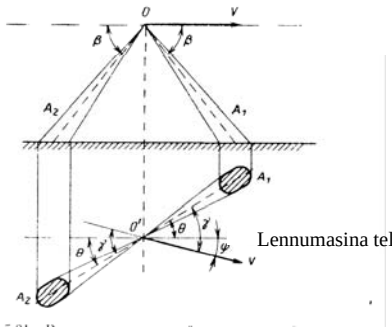
Näiteks, kui kaldenurga

määramise täpsus on 1° (kraadi),

siis Dopplerilise sagedusnihke

määramise täpsus on 0,015%,

Kõrvalekaldenurga määramise täpsus ei muutu



Lennumasina telgjoon





# Nelja kiirega neljas suunas

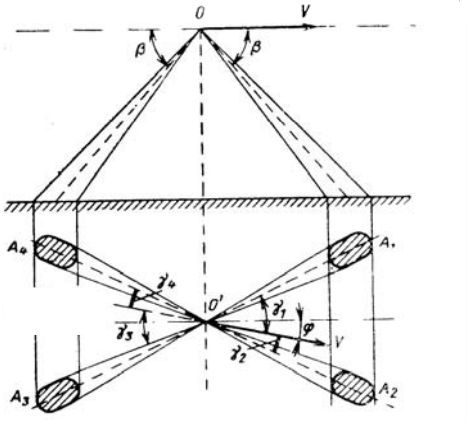
Nelja kiirega kahes suunas saavutatakse

suurem nii kandenurga

määramise täpsus, kui ka Dopplerilise sagedusnihke

määramise täpsus

Lennumasina telgjoon

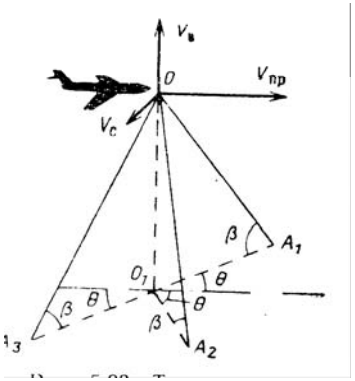






# Kolmekiireline süsteem

Mõõdab kõrgust ja liikumiskiirust







# Doppleri süsteemide iseärasused

- Kasutatakse
  - modulatsioonita signaale ja pidevat kiirgust
  - Impulss-signaale kõrgsagedusliku täitega

Süsteemide häirekindlus on väga madal

- (põhiliselt mõjuvad peegeldused lennumasinate vibreerivatelt osadelt ja töötavatest mootoritest tingitud turbulentsetest voogudest)
- Antennide vibratsioon on samuti häirete allikaks

# Dopplersüsteemide iseärasused

- Sagedusmodulatsiooniga signaalid pideva kiirgusega

Doppleri süsteeme nelja kiirega kahes suunas kasutatakse vertikaaltõusuga lennukitel, helikopteritel ja “pehmelt” maandatavatel kosmoselaevadel.

- Impulss-signaale kõrgsagedusliku täitega

Kolmekiirelises süsteemis kasutatakse impulss-signaale sisese koherentsusega nn koherentsed Doppleri süsteemid või välise koherentsusega nn mittekoherentsed süsteemid.





# Spektrite kaudu

Doppleri efektita

$$s(t) \mapsto S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$s(t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$f \rightarrow f + f_v = f_f$$

$$f_v = f \frac{v}{c}$$

Doppleri efektiga

$$s_f(t) \mapsto S(j\omega_f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega_f t} dt$$

$$s(t)$$

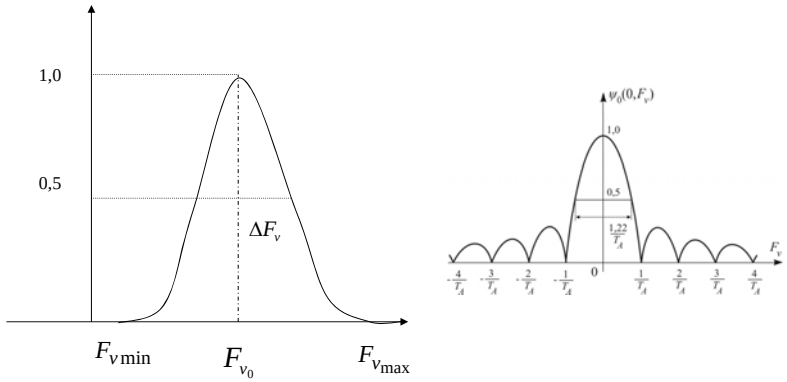
$$\omega_f = 2\pi f_f$$

$$f_v = f \frac{v}{c}$$





# Spektri laienemine








# Trajektoori süntees

- põhivalem

$$v(t) = \frac{d}{dt} s(t)$$

$$f_v(t) = \frac{2v}{c} f_0$$

$$s(t) = \int v(t) dt$$

# 6. Doppleri efektil põhinevad RTIHS

Vastuvõetud Doppleri spekter:

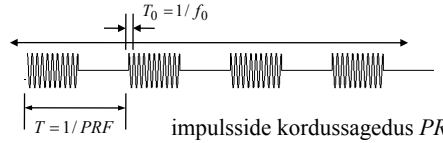
- Liikuvate ja statsionaarsete objektide peegeldused
- Maapinna või tausta peegeldus
- Müra ja häired (kanali müra, saatja/vastuvõtja müra, atmosfäärne müra)
- Elektroonilised vastumeetmevahendid ja –seadmed (*electronic countermeasures – ECM*)
- Elektromagnetilised häired (*Electromagnetic interference – EMI*)



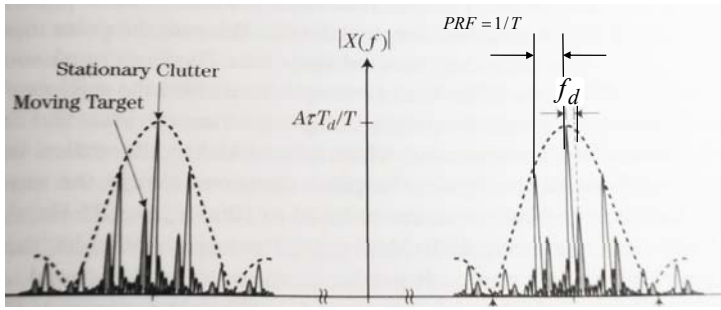


# Doppleri spekter: näide

Impulsside jada (*pulse burst*)




impulsside kordussagedus *PRF*




*Mark A. Richards, James A. Scheer, William A. Holm. Principles of Modern Radar: Basic Principles*



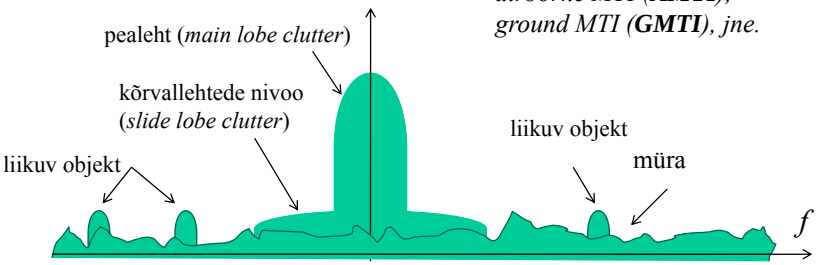


# 6. Doppleri efektil põhinevad RTIHS

Liikuvate objektide selekteerimine

*MTI – Moving Target Indication clutter*

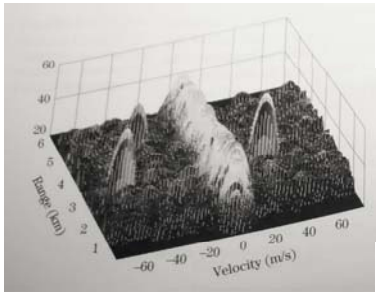
*airborne MTI (**AMTI**), ground MTI (**GMTI**), jne.*

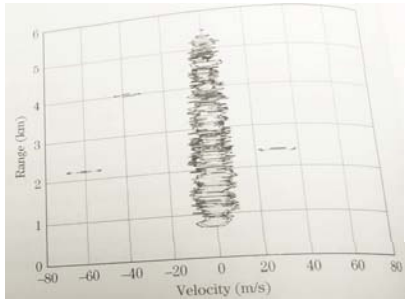






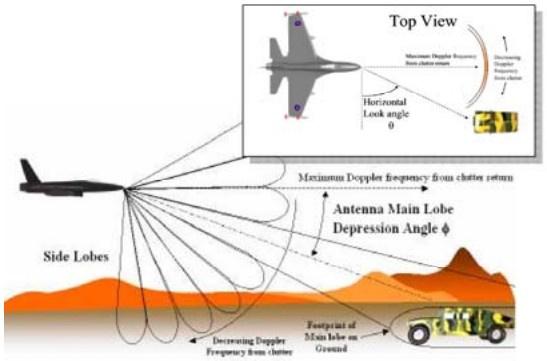

# Liikuvate objektide selekteerimine




*Mark A. Richards, James A. Scheer, William A. Holm. Principles of Modern Radar: Basic Principles*

# Näide: MTI



- signaalitöötlus
- pilditöötlus

*http://defense-update.com/20120402_raven_gimballed_eo_payload.html*

*http://www.grin.com/en/doc/249478/enhanced-detection-of-ground-targets-by-airborne-radar*





# 7. Signaalitöötluse algoritmid infohankesüsteemides

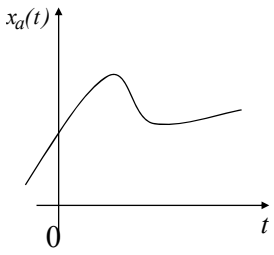
- Diskreetimine (*sampling*, ADC, DAC)
- FT, FFT (*Fourier Transform, Fast Fourier Transform*)
- Digitaalne filtreerimine (*Digital filtering, IIR, FIR*)
- Optimaalne/sobitatud filter (*Matched filter*)
- Libisev keskmistamine (*Sliding Window*)
- Kvadratuurdetektor (*Quadrature detector, I and Q components* )
- Juhuslikud signaalid (*Random signals*)
- Korrelatsioon (*Correlation*)
- Läve väärtus (*Threshold detection*)
- Automaatne võimenduse reguleerimine (*Automatic Gain Control*)
- Aegruumiline adaptiivne signaalitöötlus (*Space-time adaptive processing – STAP*)
- *Imaging and image processing*

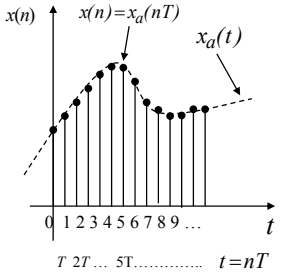




# Signaalitöötluse algoritmid

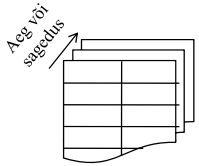
- Diskreetimine




$x(n)$ väärtuste tabel

| | |
|---|---|
| 0 | |
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | |
| 4 | |
| 5 | |
| ….. | |
| | |




$F_d = 1/T_d$ - Diskreetimissagedus (*sampling rate*), *Nyquist rate*

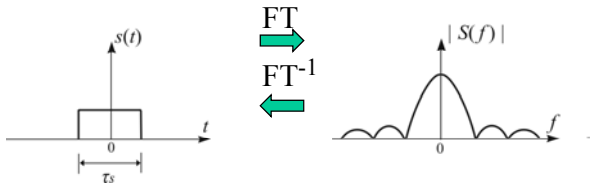
$F_d = 2F_{\max}$





# Signaalitöötluse algoritmid

Fourier teisendus (DFT, FFT), pöördteisendus (IDFT)




FFT:
- signaali punktide arv ($2^N$)
- spekter kahepoolne/ühepoolne
- komplekskuju (Re, Im)

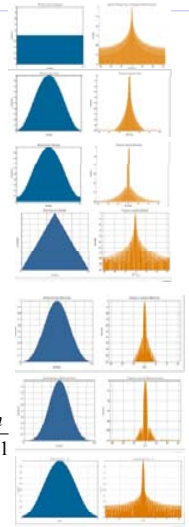
$F_d$
$F_{\max}$
$\Delta f$

Aknafunktsioonid

# Aknafunktsioonid *(Window functions)*

- Rectangular window $w(n) = 1$
- Hanning window (Hann) $w(n) = 0.5\left(1 - \cos\frac{2\pi n}{N-1}\right)$
- Hamming window $w(n) = 0.54 - 0.461 \cdot \cos\frac{2\pi n}{N-1}$
- Triangular windows, Bartlett $w(n) = 1 - \frac{2\left|n - \frac{N-1}{2}\right|}{N-1}$
- Blackman windows $w(n) = 0.42 - 0.5 \cdot \cos\frac{2\pi n}{N-1} + 0.08 \cdot \cos\frac{4\pi n}{N-1}$ *(for $\alpha = 0.16$)*
- Blackman–Harris window $w(n) = 0.35875 - 0.48829 \cdot \cos\frac{2\pi n}{N-1} + 0.14128 \cdot \cos\frac{4\pi n}{N-1} + 0.01168 \cdot \cos\frac{6\pi n}{N-1}$
- Kaiser windows

……



*http://en.wikipedia.org/wiki/Window_function*

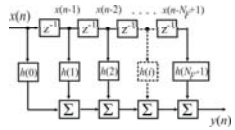




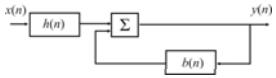
# Signaalitöötluse algoritmid

Digitaalne filtreerimine:

- Kõrgpääsfilter, madalpääsfilter (*High-pass filter, Low-pass filter*)
- Filtri järk (*filter order*)
- Impulsskaja, sageduskarakteristik
- Lõpliku siirdega filter (*finite impulse response – FIR*)



- Piiramatu siirdega filter *(Infinite impulse response – IIR)*



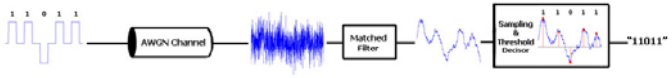




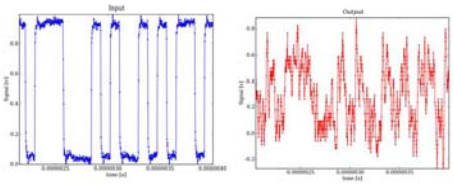
# Signaalitöötluse algoritmid:

Optimaalne/sobitatud filter näide

a)




b)




Triggering sequence sent to laser

Received sequence from detector

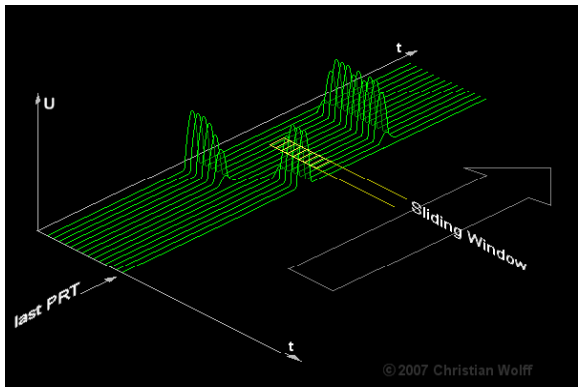
*http://en.wikipedia.org/wiki/Matched_filter*

*http://www.michiganaerospace.com/business_units/image_exploitation/matched_filter.shtml*



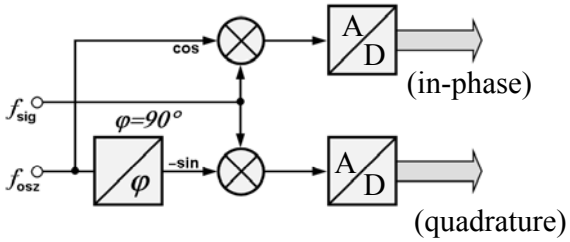


# Libisev keskmistamine (*Sliding Window*)




*http://www.radartutorial.eu/10.processing/pic/slw_anim.gif*

# Kvadratuurdetektor, sünkroondetektor



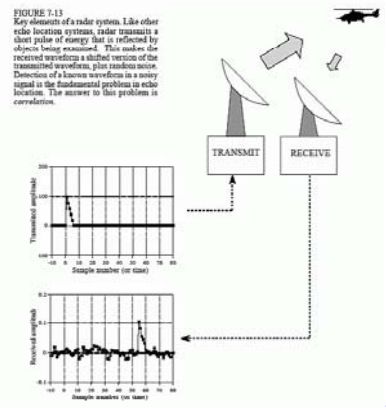

*http://www.radartutorial.eu/10.processing/sp06.en.html*

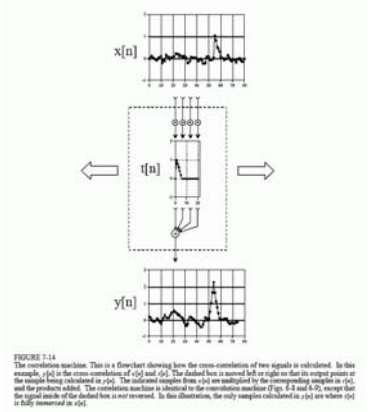




# Korrelatsioon

Korrelatsiooni koefitsient




*http://www.dspguide.com/ch7/3.htm*





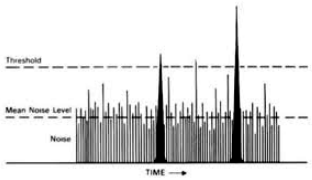
# Läve väärtus (*Threshold detection*)

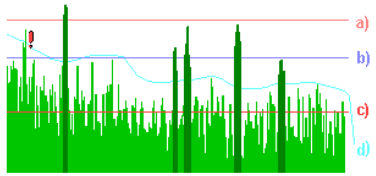
*a) threshold is set too high: Probability of Detection = 20%*

*b) threshold is set optimal: Probability of Detection = 80%*
*But one false alarm arises!*
*False alarm rate = 1 / 666 = 1,5 ·10$^{-3}$*

*c) threshold is set too low: a large number of false alarms arises!*

*d) threshold is set variable: constant false-alarm rate*



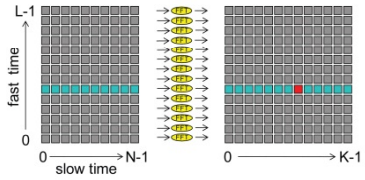
*http://williamson-labs.com/ltoc/ship-stealth-tech.htm* *http://www.radartutorial.eu/18.explanations/ex10.en.html*





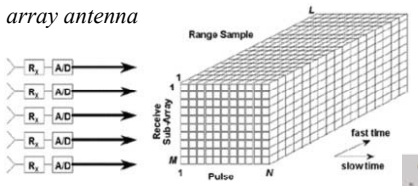
# Aegruumiline adaptiivne signaalitöötlus (*Space-time adaptive processing – STAP*)

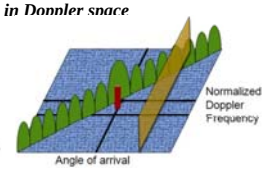
- ***N*** *- consecutive pulses considered "slow" time.*
- *The* ***L*** *radar samples collected during the pulse repetition frequency (PRF) interval are binned, which corresponds to the range. The PRF interval is referred to as "fast" time.*



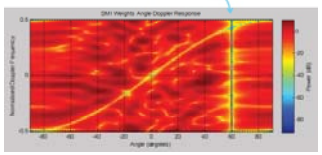

***Clutter and jammer effects in Doppler space***

*array antenna*



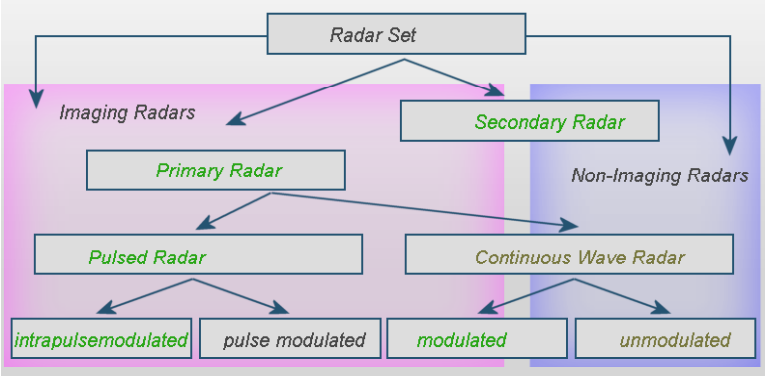




Jammer suppressed @ 60 deg.



*http://www.eetimes.com/General/PrintView/4217308*

# 8. Radarid ja nende liigid

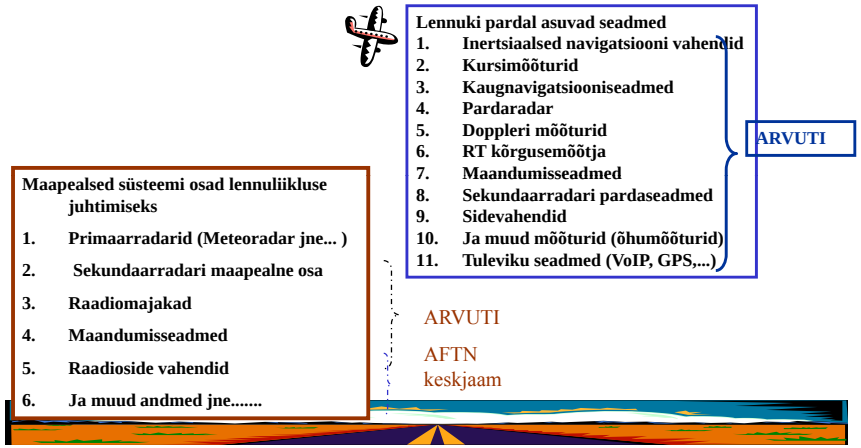



*http://www.radartutorial.eu/02.basics/rp04.en.html*





# 8. Radarid ja nende liigid

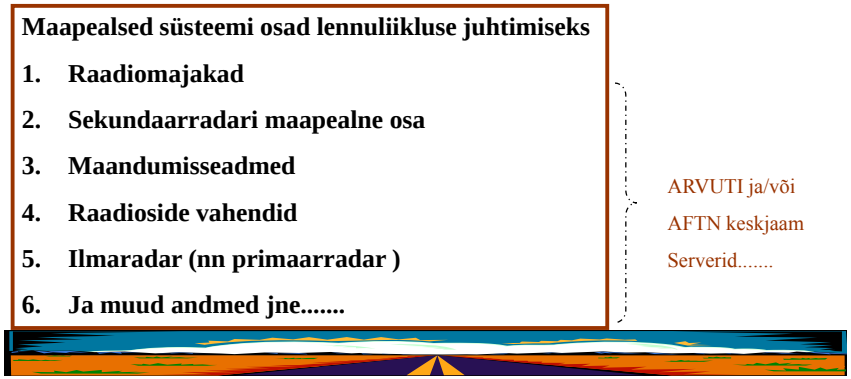



*http://en.wikipedia.org/wiki/Aeronautical_Fixed_Telecommunication_Network*





# Lennuvälja maapealsed süsteemid ja seadmed








# Primaarradari ülesanded lennuliikluse teeninduses

1. Liiklusinfo hankimine sekundaarradarile vastamisseadmeid mitteomavate ehk majakatundetute (MT) (i.k.: *nonbeacon*) lennukite kohta,
2. MT lennukite teenindamine hädaolukorras.
3. Ilmavaatlused radari abil
4. MT lennukite radarjärelvalve ja lennutrassi jälgimine
5. MT lennukite seireinfo pakettide säilitamine

## Primaarradari ülesanded lennuliikluse teeninduses

6. MT lennukite seireinfo pakettide säilitamine
7. MT ja teiste lennukite eraldamine
8. Lindude seire lennujaama alal
9. Abi radarmajakate täpsustamisel
10. Seiretugi maapealsete või lennukil asuvate seadmete rikete korral
11. Radarseire tornita lennuväljadele ja tornita lennuväljadelt





## Mõningad ATC primaarradarite tehnilised parameetrid

– M.I. Skolnik “Radar Applications” 1987, lk.50

1. Impulssradarid impulsside pikkustega 0,6 kuni 3 mikrosekundit
2. Impulsside kordussagedus 310 kuni 1040 Hz
3. Sagedusdiapasoonid vahemikus 1,25 kuni 2,9 GHz
4. Tegevusraadius 60 kuni 200 miili
5. Keskmine võimsus 550W kuni 3600W
6. Antennide liikumine 10 kuni 5 pööret minutis
7. Antenni suuna diagrammi laiused 1,1 kuni 1,7 kraadi





## Lennuliikluse juhtimiseks *(AIR Traffic Control - ATC)*

On vajalikud primaarradarid (*ATCR)*

1. Lennuvälja seireradar(järelvalveks)
   Lennuvälja seire *(Airport Surveillance Radar - ASR)*
2. Lennutrasside seire ühelt lennuväljalt teisele *(Air Route Surveillance Radar - ARSR)*
3. Lennuvälja pinnaseire seadmed (radar) *(Airport Surface Detection Equipment - ASDE)*
4. *Täppismaandumisradar (Precision Approach Radar* ehk *PAR) tsiviillennunduses ei kasutata.*
   (Töötab koos MLS iga)





## 1. Lennuvälja seireradarid (*ASR)*

- Kuni 25 000 jala kõrgusel lendavate lennukite avastamine ja nende liiklustee jälgimine, ilmaseire piirkonnas 40 kuni 60 miilini lennuvälja ümbruses
- On võimeline eraldama liikuvaid lennumasinaid seisvatest´ja/või liikuvatest pilvedest (LOS)
- On võimeline töötama maapinnalt peegelduste ja häirete tingimustes
- Esimene publikatsioon sellise targa radari kohta tehti 1974, kuid esimene rakendus 14 aastat hiljem (*ASR –9)*

## 2. Lennutrasside seire radarid
*(Air Route Surveillance Radar - ARSR)*

- On ettenähtud lennuteede avastamiseks ja seireks ühelt lennuväljalt teisele
- Jälgitavad on kuni 60 000 jala kõrgusel lendavad lennumasinad
- Tegevuskaugus kuni 200 miili
- Radarite puhul on tähtis ka tõrgeteta tööaeg, 50, 200, 600 tundi
- (ATC radarid on 2D radarid)





## 3. Lennuvälja pinnaseire seadmed (radar)
*(Airport Surface Detection Equipment - ASDE)*

- Asuvad tornis
- Kasutatakse lennuvälja pinna seireks ja on väga vajalikud halva ilma puhul
- Sagedusala on 16 GHz, antenn teeb 60 pööret minutis





## Lennuvälja ilmaradar

- ARSR ja ASR on ilmakanalid, mis on võimelised määrama ohtlike ilmatingimuste astmeid
- ARSR ja ASR ei ole väljatöötatud ilmaradariteks
- Eraldi kasutatakse lennunduse ilmaradarit näiteks
- *Nexrad*
- Väga kitsas nõelakujuline antennikiir selleks, et eraldada ilmatigimusi erinevatel kõrgustel, vajalik on mõõta Doppleri sagedusnihet ( suhtelise tuulekiiruse eraldamiseks) ja ka Doppleri spektri laiust koos õhuaukude (*wind shear)* ja õhu turbulentsi määramisega)





## 4. Täppismaandumisradar
*(Precision Approach Radar ehk PAR)*

- Maandumisel kasutati ja kasutatakse kas ILS või MLS, juhtimine käib õhust, st piloot otsustab, kuidas maanduda
- *PAR* kasutatakse maandumiseks halva ilma korral:
- piloot saab käsklused maapealselt radarilt, st juhtimine maalt
  - i.k.: *Ground – Controlled Approch Radar*
- Tsiviillennunduses ei kasutata

## Lennuliikluse juhtimine õhust

On mõeldud lennuliikluse juhtimist satelliidilt.

Vajalik on see eriti ookeanide kohal

See sisaldaks siis täppisnavigatsiooni ja sateliitside vahendeid ja ka radarit sateliidil.

M.I. Skolnik “Radar Applications” 1987, lk.313. – 387.





## Lennuliikluse juhtimiseks (ATC)

2. Sekundaarradar
   – Lennuliikluse juhtimise radarmajakad *(Air Traffic Control Radar Beacon System)*

Selle süsteemi käsutuses on lennukite identsus koos lennukõrgusega ja asukoha nurkadega. Süsteem teostab koopereerunud lendavate objektide avastamist, asukoha määramist ja identifitseerimist.





## Lennuki peal

**Lennuki pardal asuvad seadmed**

1. **Inertsiaalnavigatsioonivahendid**
2. **Kursimõõturid**
3. **Kaugnavigatsiooniseadmed**
4. **Pardaradarid**
5. **Dopplerimõõturid**
6. **RT kõrgusemõõtja**
7. **Maandumisseadmed**
8. **Sekundaarradari pardaseadmed**
9. **Sidevahendid**
10. **Ja muud mõõturid**
11. **Tuleviku seadmed (VoIP, GPS,.....)**

**ARVUTI**





## Pardaradarid

Tsiviilaladel kasutatakse

1. Lennuliikluse teeninduseks
2. Ilmaseireks
3. Maapinna kaardistamine
4. Maapealsete seadmete kaugjuhtimine
5. Merealased kasutused
   - Jääolude seire
   - Õlilaikude seire
   - Jne.....

# Pardaradarid

Paigaldatakse

1. Lennukitele
2. Helikopteritele
3. Balloonidele
4. Jne.....
5. Sõjalennukitele kindlasti *( Aircraft Warning and Control System - AWACS)*
   Avastada kaugel ja madalalt kiiresti lendavad ohtlikud lennumasinad





# Pardaradarite võimalused

- Lennuk piirab radari võimalusi
  1. Antennid ei või olla suuremad kui maal
  2. Radar töötab suuremate häirete tingimuste kui maal
  3. Antenni külglehtedest tulevad suured häired suurematel kaugustel
  4. Häired muutuvad Doppleri sagedusnihke tõttu
  5. Häirete spekter on laienenud ja muutuv
  6. Operaatori töötingimused on kõike muud kui mugavad
  7. Maksumus on kõrge





# Pardaradarid

Jaotatakse oma otstarbe järgi kahte klassi

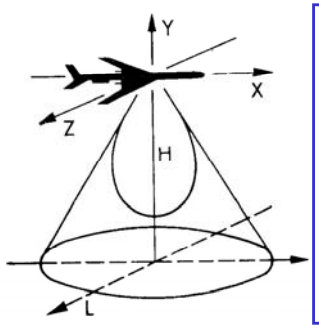
1. Need radarid, mis ainult asuvad lennumasina pardal
   Pinnaseire ja kaardistamine
   Jne....
2. Radarid, mis on abivahendid lennuliikluseks
   Kõrgusemõõtur
   Hoiatusradar *(Early Warning Radar - EWR)*
   Ilmaradar pardal
   Dopplerilised mõõturid
   Jne.....





# Kõrgusemõõtja

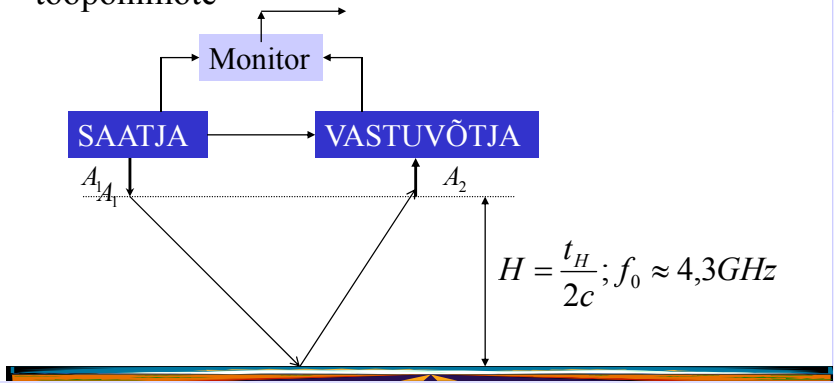
- On radar, kiirgusega vertikaalselt maa peale




**Lennuki pardal on kõrgusemõõturid**
**1. Väikeste kõrguste mõõtmiseks**
**H< 1500 meetrit**
**Kasutatakse maandumisel ja/või koos autopiloodiga.**
**Annavad piloodile infot ohtlikust kõrgusest või ka teatud kõrguse saavutamisest.**
**Sageduslikud radarid.**
**2. Suurte kõrguste mõõtmiseks , H<30km**
**Kasutatakse aerofotode tegemisel jne...**
**Impulss-radarid.**

## Kõrgusemõõturi

- tööpõhimõte








## Kõrgusemõõturite tehnilised parameetrid

1. Tööpiirkond

$$H_{min} \div H_{max}$$

2. Täpsus
3. Kandesagedus
4. Väljundvõimsus
5. Sagedusdeviatsioon
6. Modulatsioonisagedus
7. Vastuvõtja tundlikkus





## Mõned kõrgusemõõtja tehnilised parameetrid Kõrgusemõõturi näidis

| | | |
|---|---|---|
| 1. Tööpiirkond | | 0 – 750 m |
| 2. Täpsus | $2\sigma$ | |
| AJSle piirides 0 – 10 m | | $\pm 0{,}6m$ |
| AJSle piirides 10 – 750 m | | $\pm 6\%H$ |
| Kõrgusenäitajale piirides 0 – 10 m | | $\pm 0{,}8m$ |
| Kõrgusenäitajale piirides 10 – 7500 m | | $\pm 8\%H$ |
| Saavutatud kõrguse signaalile piirides 2 – 10 m | | $\pm 0{,}5m$ |
| Saavutatud kõrguse signaalile piirides 10 – 750 m | | $\pm 5\%H$ |





## Kõrgusemõõturi näidis

| | |
|---|---|
| 3. Kandesagedus | 4,3 GHz |
| 4. Väljundvõimsus | 0,4 W |
| 5. Sagedusdeviatsioon | 50 MHz |
| 6. Modulatsioonisagedus | 150 Hz |
| 7. Vastuvõtja tundlikkus | 85 dB |

$$10\log\frac{P_{svv}}{\sigma_n^2}(dB)$$

$$\sigma_n^2 = N_0\Delta f_{vv}$$

# 9. Seireradarid

- Näide:

  Mittekoherentne ringvaatluse seireradar ühe kanaliga

  Sellised radarid võimaldavad mõõta lendava objekti

  radiaalkaugust D, piirides $D_{\min} \div D_{\max}$

  tema asimuuti $\alpha$, ette antud sektoris

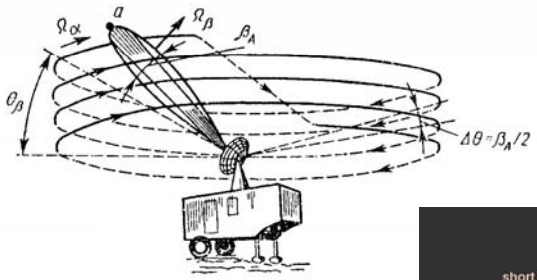
  Antenni suunadiagrammi laius horisontaaltasandis $\Delta\alpha$

  Antenn teeb ühe täispöörde ajaga $T_A$

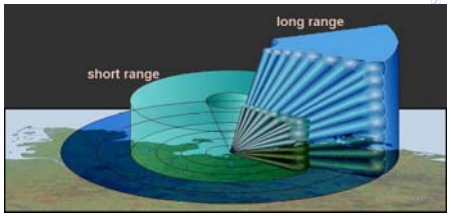




# Võimalik seiremoodus



Keermeline



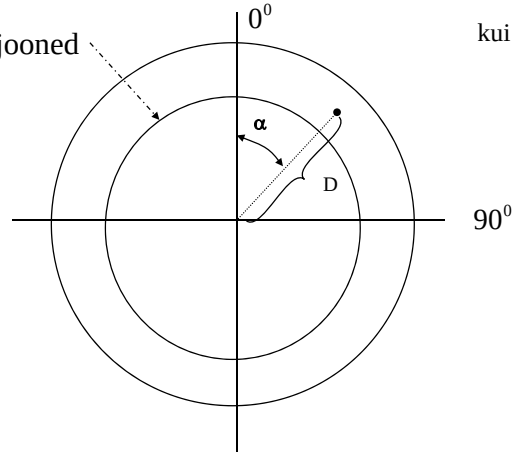

*http://www.radartutorial.eu/06.antennas/an17.en.html*





# Ringlaotusmonitor

Kauguste ringjooned

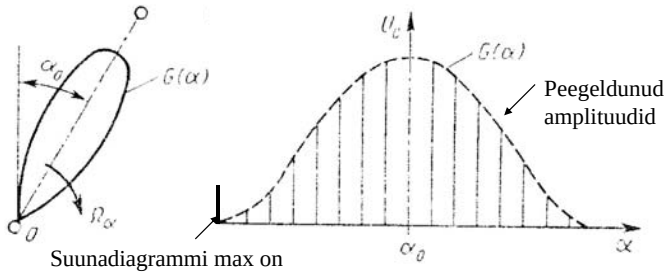



kui $\beta = \beta_i$





# Asimuudi mõõtmine ringseires




Suunadiagrammi max on põhja suunas

Tallinna Tehnikaülikool Raadio ja sidetehnika instituut Urve Madar

# Radari aegdiagrammid

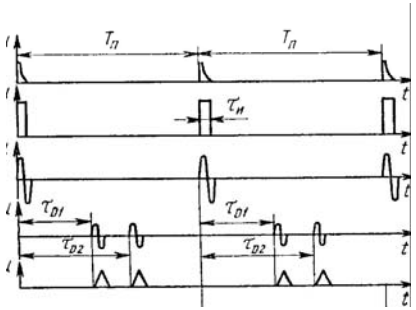
Sünkroimpulsid

Modulatsiooni impulsid

Kõrgsageduslikud impulsid

Peegeldunud impulsid

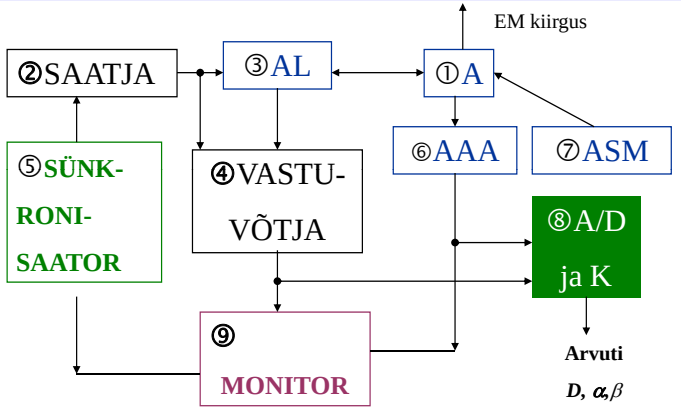
Peegeldunud videoimpulsid





Tallinna Tehnikaülikool Raadio ja sidetehnika instituut Urve Madar

# Struktuurskeem






Tallinna Tehnikaülikool Raadio ja sidetehnika instituut Urve Madar

# Selgitused

| | |
|---|---|
| ①A | Saateks ja vastuvõtuks kasutatav suunadiagrammiga antenn, mida skaneeritakse ruumis |
| ③AL | Antenni ümberlüliti saatja väljundist vastuvõtja sisendisse |
| ⑥AAA | Antenni suunadiagrammi asendi andur |
| ⑦ASM | Antenni suunadiagrammi asendi muutja ehk antenni skaneerimisseade |

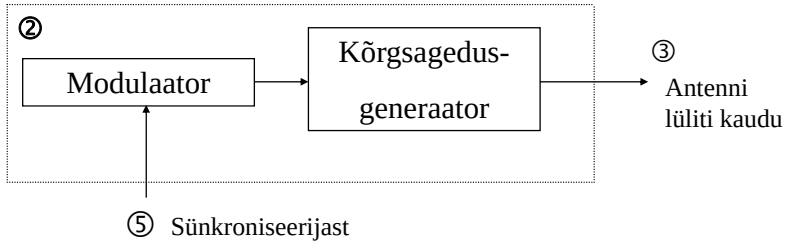


Tallinna Tehnikaülikool Raadio ja sidetehnika instituut Urve Madar

# Selgitused

②SAATJA

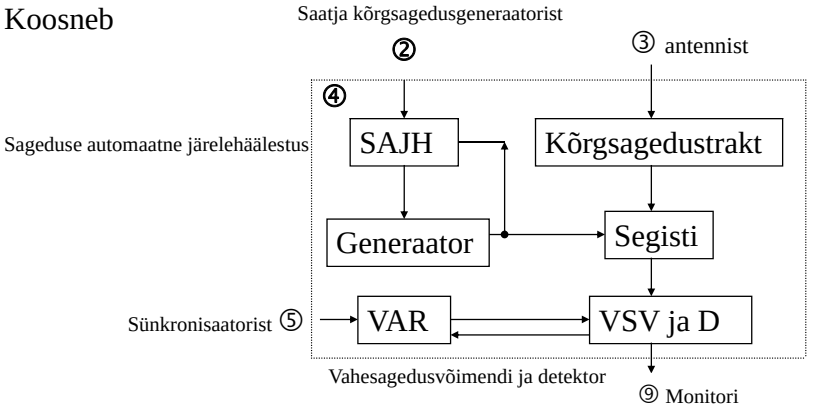
Koosneb



# Selgitused

④VASTUVÕTJA

Koosneb



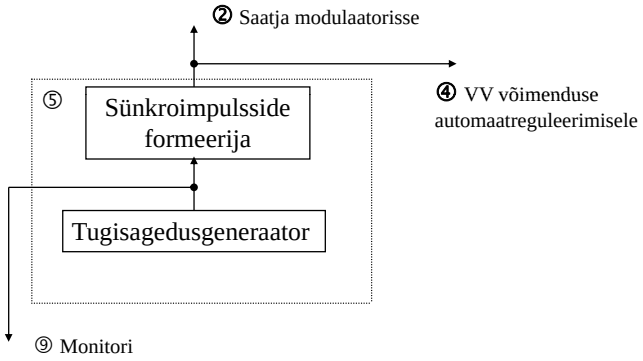





# Selgitused

⑤Sünkronisaator

Koosneb

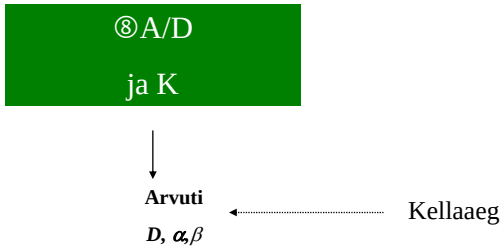







# Selgitused

⑧ Andmete digitaliseerimine ja kodeerimine arvutisse viimiseks








# Mõned tehnilised karakteristikud

– Minimaalne kaugus

$$D_{\min} \geq \frac{c(\tau_s + \Delta\tau_v)}{2}$$

$\Delta\tau_v$ Vastuvõtja saab töökorda pärast antenni ümberlülitust saatjalt

## 2. Seireradari tegevuskaugus

Radari sondeeriva signaali võimsus on $P_s$

Saateantenni võimendustegur on $G$

Vastuvõtu antenni võimendustegur on $G$

Vastuvõtja tundlikkus on $P_{v\min}$

Objekti efektiivne pindala on $\sigma_o$

Objekti radiaalkaugus radarist on **D**





## Seireradari tegevuskaugus

Objekti poolt haaratav võimsus on

$$P_o = \frac{P_s G}{4\pi D^2}\sigma_o$$

Objekti poolt haaratav võimsus peegeldub ühtlaselt ruuminurka

Radari vastuvõtja sisendis on võimsus

$$P_v = \frac{P_s G \sigma_o A_A}{(4\pi)^2 D^4} = \frac{P_s G \sigma_o \lambda_s^2 G}{(4\pi)^3 D^4} = \frac{P_s G^2 \sigma_o \lambda_s^2}{(4\pi)^3 D^4}$$





## Seireradari tegevuskaugus

Mida suurem on objekti radiaalkaugus radarist, seda väiksem on signaali võimsus vastuvõtja sisendis

*kui* $D = D_{\max}$, *siis*

$P_v = P_{v\min}$,

Järelikult

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_s G^2 \sigma_o \lambda_s^2}{(4\pi)^3 P_{v\min}}}$$

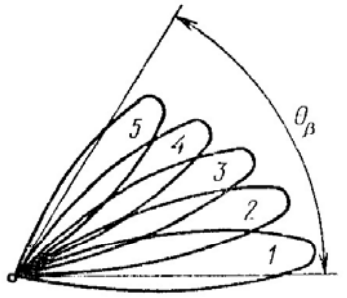
$$D_{ON} = 4,2_{km}\left(\sqrt{H_{R(m)}} + \sqrt{H_{O(m)}}\right)$$

Otsenähtavus!



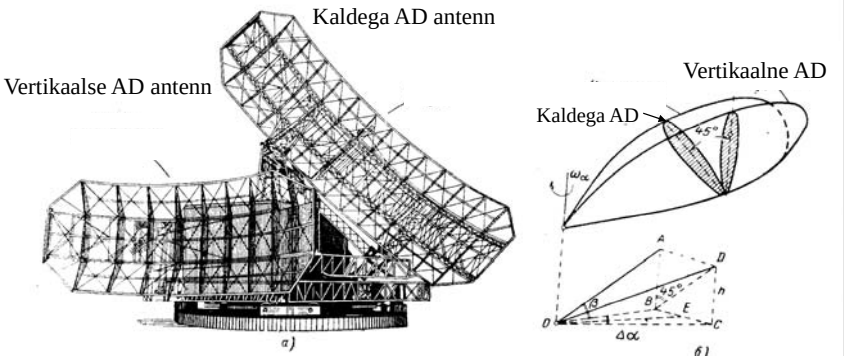


## Seire mitme (5) kanaliga




Ühe antenni pöördega toimub seire terves kohanurgas alas

# Seire lehvikuga








# 9a1. Seireradarid

1. Madalalt lendavatele objektide avastuskaugus :

$$D_R = 4{,}1\left(\sqrt{h} + \sqrt{h_o}\right)$$

$D_R$ |$_{km}$ ,

$h, h_0$ |$_m$

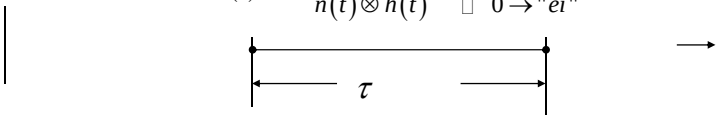




# Seireradari probleemid

2. Avastamine:

$$y(t) = \begin{cases} s(t) \otimes n(t) \otimes \hat{h}(t) & \to 1 \to \text{"}ja\text{"} \\ n(t) \otimes \hat{h}(t) & \to 0 \to \text{"}ei\text{"} \end{cases}$$








# Avastamine

- lihtsustamine

$$y(t) = \begin{cases} s(t) \otimes n(t) \otimes \hat{h}(t) & \to 1 \\ n(t) \otimes \hat{h}(t) & \to 0 \end{cases}$$

$\otimes \to +$

# Avastamine

- lihtsustades

$$y(t) = \begin{cases} s(t)+n(t) & \rightarrow 1 \\ n(t) & \rightarrow 0 \end{cases}$$

$\otimes \rightarrow +$

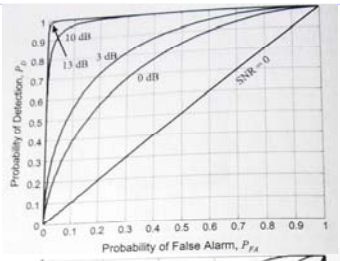
⟶ Ühekordne avastamine





# Avastamine

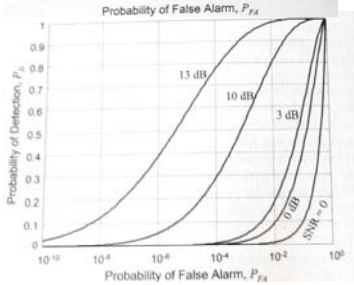
X ⟶ Avastamine ⟶ Y




$$W(X,Y) = W(X)W_X(Y) = W(Y)W_Y(X)$$

*Probability density function (PDF)*
*Probability of detection* $P_d$
*Probability of false alarm* $P_{fa}$
*Probability of miss* $P_m$

$$P_m = 1 - P_{fa}$$








# Avastamine

1)

$y(t) = n(t)$ ⟶ Y Avastamine ⟶ $\rightarrow$ *"ja"*, $\rightarrow$ *"ei"*

1a) valeavastamine ⟶ *F*

1b) õige mitteavastamine ⟶ *F**

*F+F*=1*





# Avastamine

2)

$y(t) = s(t) + n(t)$ ⟶ Y Avastamine ⟶ $\rightarrow$ *"ja"*, $\rightarrow$ *"ei"*

2a) objekti avastamine ⟶ *D*

2b) objekti mitteavastamine (kaotamine) ⟶ *D**

*D+D*=1*

## Avastamine

1. Valehäire (*false alarm)* $W(0)\cdot F$
2. Objekti mitteavastamine (kaotamine) $W(1)\cdot D^*$
3. Objekti õige avastamine (*detection*) $W(1)\cdot D$
4. Objekti mitteavastamine $W(0)\cdot F^*$

*Constant False Alarm Rate (CFAR)*





## Risk

- keskmine

$$R = aFW(0) + bD^*W(1) \rightarrow \min$$





## Lihtsustades

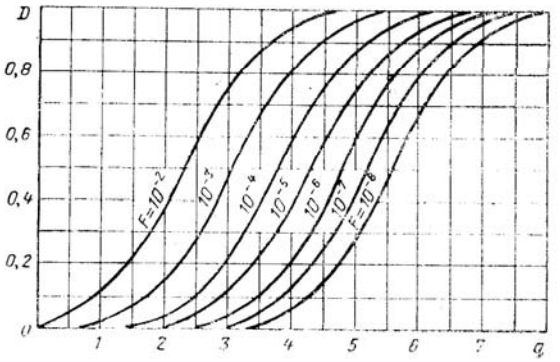
$$R = F + D^* \rightarrow \min$$

$$\left.\begin{array}{l} F = const \\ D^* \rightarrow \min \end{array}\right\}$$





## Avastuskõverad




$$q = \sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}$$

$$E_s = \int_0^{\tau} s^2(t)dt$$

Tallinna Tehnikaülikool Raadio ja sidetehnika instituut Urve Madar

## Avastamine ja seire

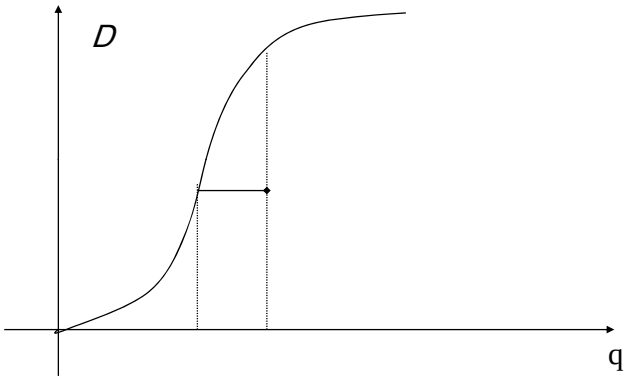
- Seirete arv *j*

$$D_j = 1 - (1 - D)^j$$



Tallinna Tehnikaülikool Raadio ja sidetehnika instituut Urve Madar

## Kadude arvutamine



# 10. Sekundaarradarid (*ATCRBS*) *(Air traffic control radar beacon system)*

- Sekundaarradari nimetus on rohkem levinud Euroopas *(Secondary surveillance radar – SSR),* **(*ATCRBS*)** rohkem USAs
- Sisuliselt on sekundaarradar sideliin maalt lennukile ja tagasi:

1. Maalt lennukile — Küsitluse raadioliin
2. Lennukilt maale — Vastuste raadioliin

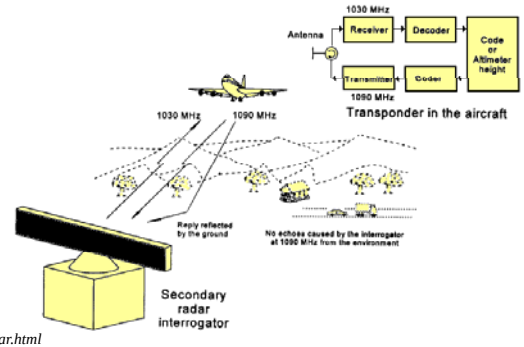




# Sekundaarradari tegevus

Küsitlused lähevad paljudele lennukitele

Tavaliselt on süsteem piiratud lõpliku läbilaskevõimega

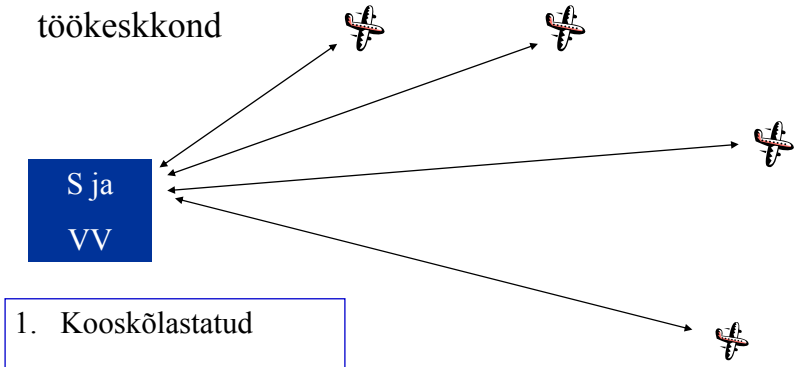



*http://www.radartheory.8m.com/secondaryradar.html*





# Sekundaarradari








# Ajalugu

- II maailmasõja ajal kasutati küsitlus-vastus süsteemi omade ja "võõraste" lennukite eristamiseks. *Identification friend or foe (IFF*).
- Maapealne saatja töötas sagedusel 1030 MHz ja lennukisaatja sagedusel 1090 MHz.
- 1953 aastal soovitas USA kaitseministeerium kasutada seda raadiomajakate süsteemi nii õhuväe kui ka tsiviillennunduse juhtimiseks
- Ühiste jõupingutuste tulemina töötati USAs aastatel 1950 kuni 1969 välja üsna täiuslik lennuliikluse juhtimissüsteem *(ATCRBS).* On olemas *ICAO* Standard. Aparatuur peab olema kõigil lennukitel, mis lendavad kõrgemal kui 5500m.

*ICAO, Annex10, Aeronautical Telecommunications, Volume IV, Surveillance and Collision Avoidance Systems*

# Kooskõlastatud süsteem

- On ettenähtud oma lennukite ja laevade äratundmiseks
- Küsitlusi teostab otseselt radar ja vastusega lendavad objektid on näha monitoril. Lennukilt tuleb ka lennukõrgus H
- Vastaja võib töötada ühe kindla radariga
- *ATCRBS* on edasi-tagasi andmeedastuse digitaalne liin, mida nimetatakse ka *DABS (Discrete Aadress Beacon System)*





# Sekundaarradari saatja ja vastuvõtja

**Interrogation:**

| | |
|---|---|
| Frequency | 1030 MHz |
| Modulation | Binary Differential Phase-Shift Keying (DPSK), 180º phase reversals |
| Data Rate | 4 Mbps |

**Reply**

| | |
|---|---|
| Frequency | 1090 MHz |
| Modulation | Pulse Position (PPM) |
| Data Rate | 1 Mbps |

*http://www.eldis.cz/index.php?content=produkt&lang=en&IDproduktu=4*





# Sekundaarradar

| Military Mode | Civilian Mode | Description |
|---|---|---|
| 1 | | provides 2-digit 5-bit **mission code** (cockpit selectable). |
| 2 | | provides 4-digit octal **unit code** (set on ground for fighters, can be changed in flight by transport aircraft). |
| | A | provides a 4-digit octal **identification code** for the aircraft, assigned by the air traffic controller. Mode 3/A is often combined with Mode C to provide altitude information as well. |
| 3 | | |
| | C | provides the aircraft's **pressure altitude** and is usually combined with Mode 3/A to provide a combination of a 4-digit octal code and altitude as Mode 3A/C, often referred to as Mode A and C. |
| 4 | | provides a 3-pulse **reply to crypto coded challenge**. |
| 5 | | provides a **cryptographically secured version of Mode S** and **ADS-B GPS position**. |
| | S | provides **multiple information** formats to a **selective interrogation**. Each aircraft is assigned a fixed 24-bit address. |



*http://en.wikipedia.org/wiki/Aviation_transponder_interrogation_modes*



# Sekundaarradar Mode A/C

P1 ja P3 impulsside intervall:

Mode A $8 \pm 2$ µs

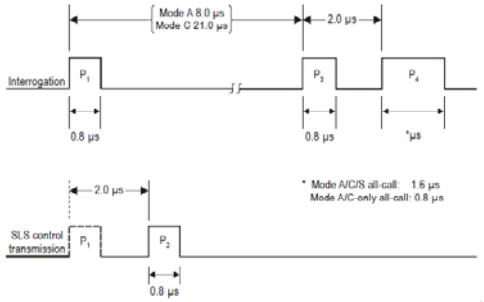
Mode C $21 \pm 2$ µs

Impulsside P1, P2 ja P3 pikkus:

$0{,}8 \pm 0{,}1$ µs

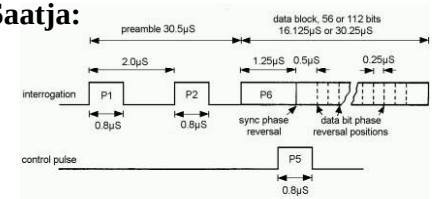
P1 ja P2 vaheline intervall:

$2 \pm 0{,}15$ µs

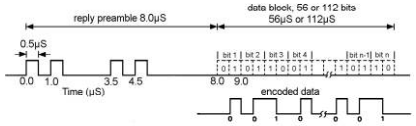


# Mode S (Selective)

**Saatja:**




**Vastus:**

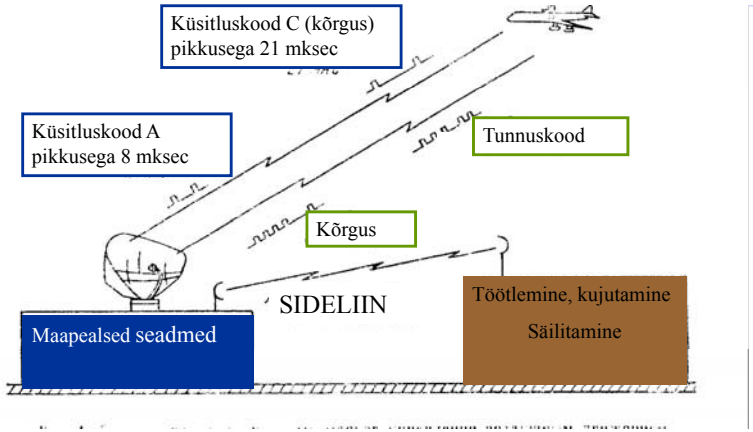



*http://www.eetimes.com/design/military-aerospace-design/4398289/Understanding-Mode-S-technology-*





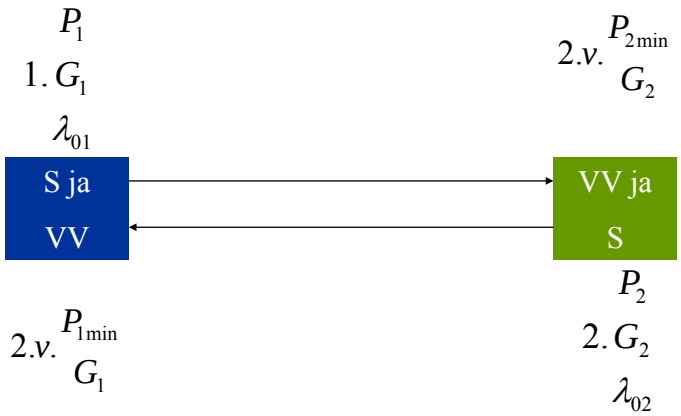
## Struktuur M. I. Skolnik RADAR HANDBOOK , kd III








# Struktuurskeem (kooskõlastatud süsteem)








# Radiaalkauguse arvutamine

Vastus hilineb

$$t_{m\to l\to m} = t_{2D} + t_{2v},$$

$$t_{m\to l\to m} - t_{2v} = t_{2D},$$

$$D = \frac{(t_{m\to l\to m} - t_{2v})c}{2}$$

Lennukilt on teada:

1. Viide $t_{2v}$
2. Lennuki nr.
3. Edastatakse lennukõrguse näit

## Küsitluse raadioliin

Saatja maal

Vastuvõtja lennukil

## Küsitluse raadioliin

- Tegevuskauguse valem

$$P_{2v} = \frac{P_1 G_1 A_2}{(2\pi) D^2} = \frac{P_1 G_1 \lambda_{10}{}^2}{(2\pi)^2 D^2}$$

*kui* $P_{2v} = P_{2\min}$, *siis*

$$D = D_{m \to l,\max} = \frac{\lambda_{10}}{2\pi} \sqrt{\frac{P_1 G_1 G_2}{P_{2v} L}},$$

*L on kaod*





## Vastuse raadioliin

Vastuvõtja maal

Saatja lennukil

## Vastuse raadioliin

- Tegevuskauguse valem

$$P_{1v} = \frac{P_2 G_2 A_1}{(2\pi) D^2} = \frac{P_2 G_2 \lambda_{20}{}^2}{(2\pi)^2 D^2}$$

*kui* $P_{1v} = P_{1\min}$, *siis*

$$D = D_{l \to m,\max}$$

## Sekundaarradari

- Tegevuskaugus on saadud tulemustest

$D_{l\to m,\max}$,

$D_{m\to l,\max}$

VÄIKSEIM

$$D_{\max} = \frac{\lambda_{10}}{2\pi}\sqrt{\frac{P_1 G_1 G_2}{P_{2v} L}},$$

*L on kaod*





## Tasakaalu tingimused

Kui

$D_{l\to m,\max} = D_{m\to l,\max}$

$\lambda_{10} \approx \lambda_{20}$,

$G_1 \approx G_2$,

$$\frac{P_1}{P_{2v\min}} = \frac{P_2}{P_{1v\min}}$$

Mõlemad liinid ühtemoodi töökindlad

$$D_{\max} = \frac{\lambda_{10}}{2\pi}\sqrt{\frac{P_1 G_1 G_2}{P_{2v} L}},$$

*L on kaod vv liinides*

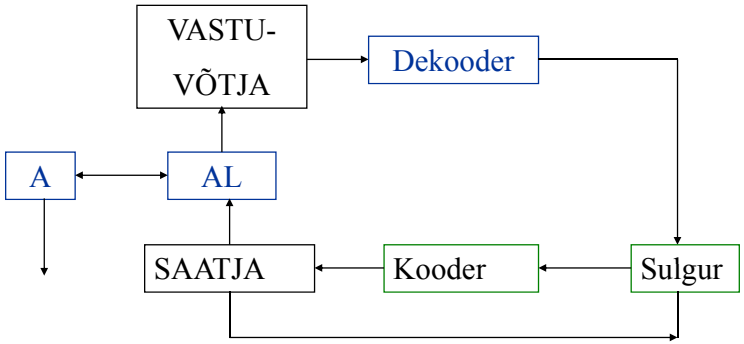
D kuni 350 km

Energeetiline varu 5 dB





## Superheterodüünvastuvõtjaga vastaja








## Autonoomne süsteem

Kasutatakse koos 2D radariga

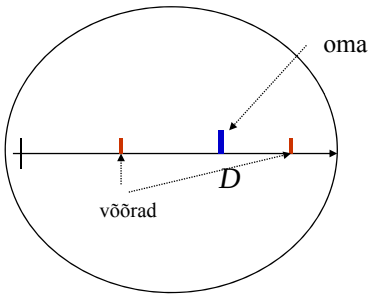
Esmalt toimub radari poolt avastamine ja küsitlussignaal kiiratakse välja peale avastamist.

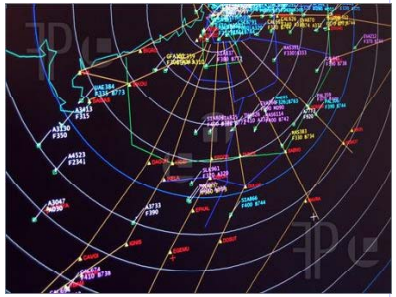
Liin **küsitlus – vastus – küsitlus** peab olema võimeline koostööks 2D radariga.

Autonoomsetes süsteemides kooderitakse nii küsitlus kui ka vastus.

# Monitoril

maal



*http://www.featurepics.com/online/Secondary-Surveillance-Radar-Situation-Display-Picture325283.aspx*





# Superheterodüün vastuvõtja

Põhimõte:

$f_s - f_h = f_v$

$f_s \uparrow, -f_h \uparrow = f_v = c$

Sagedusmuundamine

$(A_s \cos \omega_s t + A_h \cos \omega_h t)^2 =$

$A_s^2 \cos^2 \omega_s t + A_s \cos \omega_s t \times A_h \cos \omega_h t + A_h^2 \cos^2 \omega_h t$

$\cos 2\alpha = 2\cos^2 \alpha - 1$

$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2}\left[\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)\right]$

$\omega_s$

$\omega_h$

$2\omega_s$

$2\omega_h$

$\omega_s - \omega_h$

$\omega_s + \omega_h$





# Superheterodüün vastuvõtja

Sagedusmuundamine

$(A_s \cos \omega_s t + A_h \cos \omega_h t)^2 =$

$A_s^2 \cos^2 \omega_s t + A_s \cos \omega_s t \times A_h \cos \omega_h t + A_h^2 \cos^2 \omega_h t$

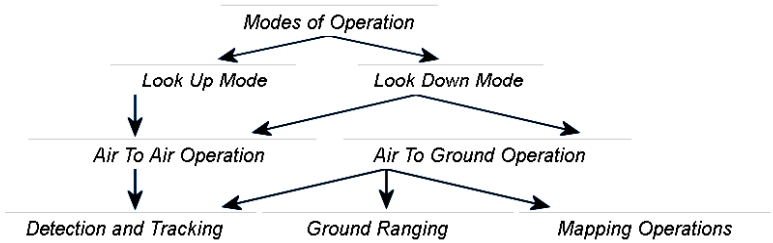
$\cos 2\alpha = 2\cos^2 \alpha - 1; \cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2}\left[\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)\right]$

$\omega_s; \omega_h$

$2\omega_s; 2\omega_h$

$\omega_s - \omega_h; \omega_s + \omega_h$

# 12. Radarid lennukil




*http://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab04.en.html*





# Radarid lennukil

*George W. Stimson*
***Introduction to Airborne Radar,***
SciTech Pub

Representative
**AIRBORNE RADAR APPLICATIONS**

**Hazardous Weather Detect.**
- Storm avoidance
- Windshear warning

**Navigational Aid**
- Marking remote facilities
- Facilitating air traffic control
- Avoiding air-to-air collisions
- Blind low-altitude flight
- Forward altitude msmt.
- Precision velocity update

**Ground Mapping**
- Ice patrol
- Terrain mapping
- Environmental monitoring
- Law enforcement
- Blind landing guidance

**Short-Range Sea Search**
- Search and rescue
- Submarine detection

**Recon./Surveillance**
- Long-range surveillance
- Early warning
- Sea surveillance
- Ground battle mgmt.
- Low-altitude surveillance

**Fighter/Interceptor Sup.**
- Air-to-air search
- Raid assessment
- Target identification
- Gun/missile fire control
- Missile guidance

**Air/Gnd. Weapon Delivery**
- Blind tactical bombing
- Strategic bombing
- Defense suppresion

**Proximity Fuses**
- Artillery
- Guided missile

■ Civil and military ■ Primarily military

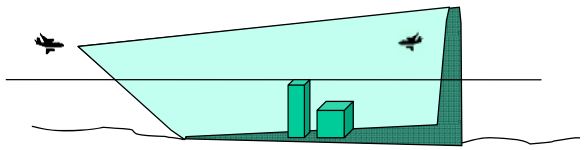




# Radarid lennukil

1. *Pencil Beam*

2. *Fan Beam*

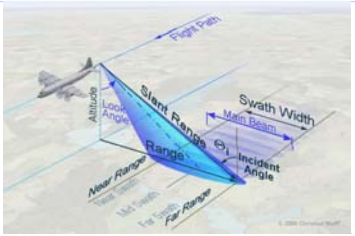




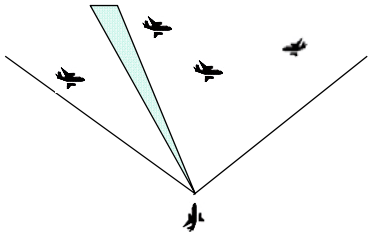


# Radarid lennukil

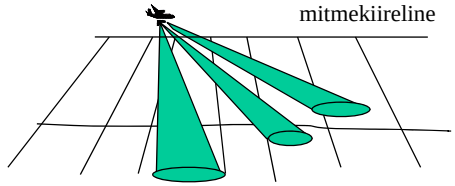
*Side Looking Airborne Radar (SLAR)*




Skaneeritav (*track-while-scan*)

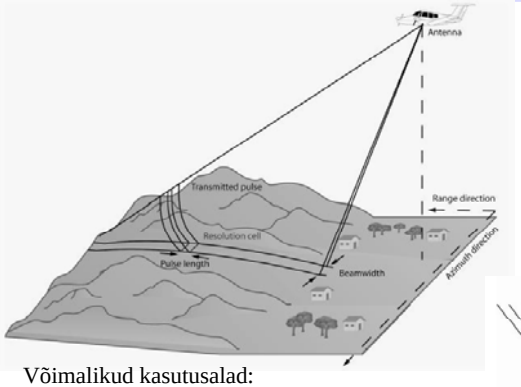


mitmekiireline

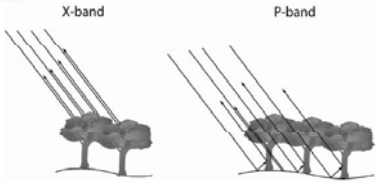


*http://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab06.en.html*

# Radarid lennukil




Erinevad sagedusalad




Võimalikud kasutusalad:
- Jää liikumine (*Ice patrol*)
- Õlisaaste merel (*Oil Pollution*)
- Metsa biomass (*forest biomass*)
- Monitooring

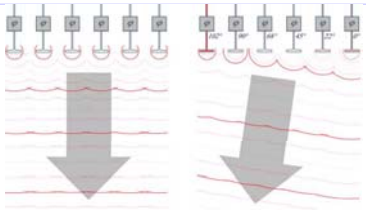
*http://forsys.cfr.washington.edu/JFSP06/radar_overview.htm*

*Foliage and Ground Penetration*
*(*10's of MHz to 1 GHz*)*





# Antennivõre (*Phased Array Antenna)*



- *Planar Arrays*
- *Frequency Scanning Array*

*"crow nest antenna"*

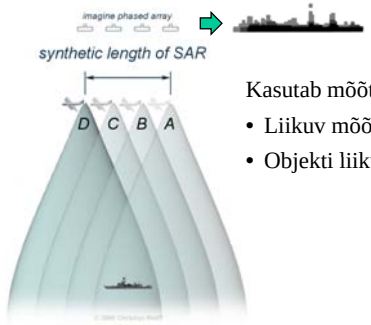
*http://en.wikipedia.org/wiki/File:Radar_RAF_Fylingdales.jpg*



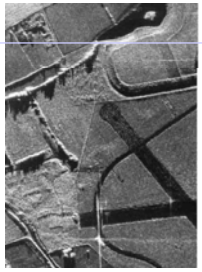


# *Sünteetilise apertuuriga radar (Synthetic Aperture Radar -SAR)*

*coherent airborne or spaceborne sidelooking radar*




Kasutab mõõtepunkti või objekti liikumist:
- Liikuv mõõtepunkt *SAR*
- Objekti liikumine *Inverse SAR (ISAR)*



*Washington DC, imaged by the Sandia Ku-band airborne SAR (0.1-m resolution,* 2005*)*

*http://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab07.en.html*

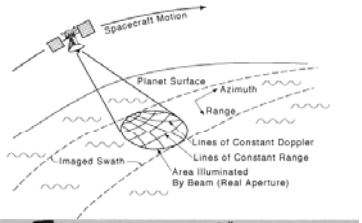


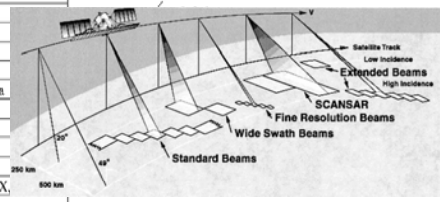


# *Synthetic Aperture Radar -SAR*

**Table 1: Some Orbital and Airborne SAR Systems Showing the Variety of Imaging Radar Systems**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Shuttle missions | SIR-A | 1981 | 40 m × 40 m | L |
| | SIR-B | 1984 | 25 m × 17 m | L |
| | SIR-C | 1994 | 10 m ×30 m | L, C, X |
| | X-SAR/SRTM | 2000 | 25 m × 25 m | C, X |
| Satellite based | Lacrosse | 1988 | < 1 m × 1 m | X |
| | ERS-1 | 1991 | 26 m × 28 m | C |
| | J-ERS-1 | 1992 | 18 m × 18 m | L |
| | RADARSAT | 1995 | 10 m × 9 m | C |
| | ENVISAT | 2002 | 25 m × 25 m | C |
| | TerraSAR-X | 2006 | < 1 m × 1 m | X |
| | Radarsat II | 2005 | 3 m × 3 m | C |
| | SAR-Lupe | 2005 | < 1 m × 1 m | X |
| | IGS-2b | 2008 | 30 cm × 30 cm | X |
| Airborne SAR | DOSAR | 1989 | < 1 m × 1 m | S,C,X,Ka |
| | CARABAS-II | 1997 | 3 m × 3 m | VHF |
| | PAMIR | 2003 | 10 cm × 10 cm | X |
| | Lynx | 1999 | 10 cm × 10 cm | Ku |
| | MISAR | 2003 | 0.5 m × 0.5 m | Ka |
| | RAMSES | 1994 | 10 cm × 10 cm | P,L,S,C,X, |
| | MEMPHIS | 1997 | 20 cm × 20 cm | Ka,W |
| | E-SAR | 1994 | 1.5 m × 1.5 m | P,L,S,C,X |



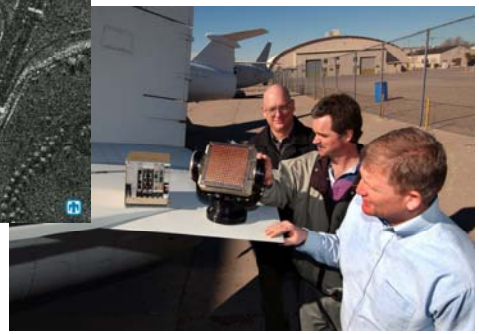

*Operating modes of RADARSAT-SAR (C-band).*

*http://astrogeology.usgs.gov/PlanetaryMapping/VenusMappers/Overview.html*
*http://www.scribd.com/doc/41758559/Introduction-to-Synthetic-Aperture-Radar-SAR*

# *Synthetic Aperture Radar -SAR*

Näide: Sandia SAR Ku-Band (15 GHz)

*(1-m resolution)*



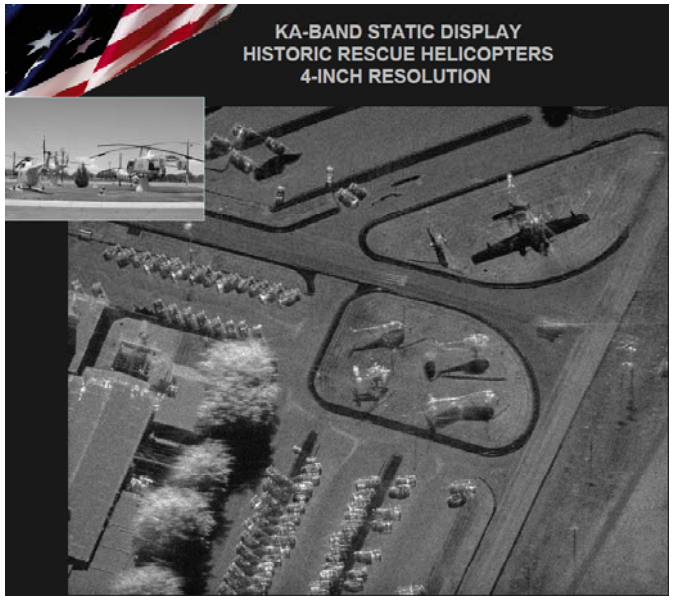
*http://www.sandia.gov/RADAR/imageryku.html*

*https://share.sandia.gov/news/resources/releases/2007/minisar.html*



Tallinna Tehnikaülikool Raadio ja sidetehnika instituut Urve Madar, Julia Berdnikova

**Ka-band SAR**

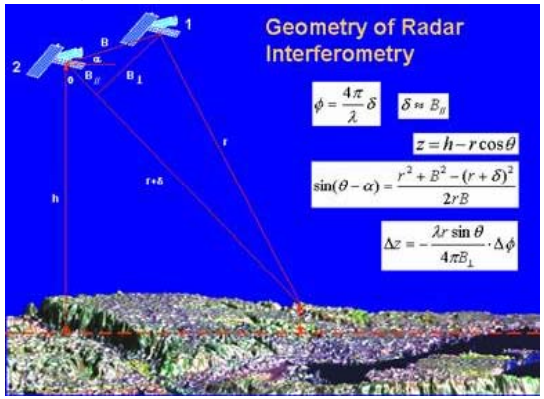


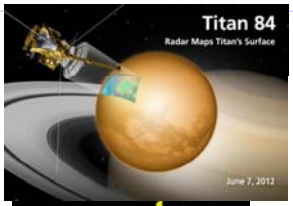


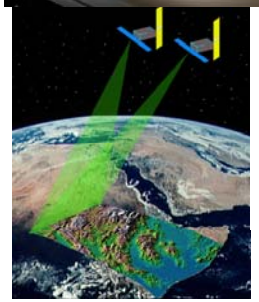

Tallinna Tehnikaülikool Raadio ja sidetehnika instituut Urve Madar, Julia Berdnikova

# *Interferometric synthetic aperture radar (IFSAR)*

*Interferometry*



*http://www3.imperial.ac.uk/earthscienceandengineering/research/geophysics/remotesensing/sarinterferometry*

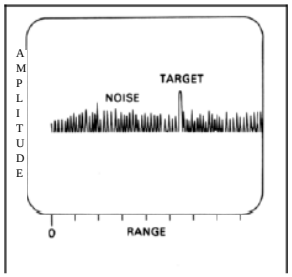
*http://en.wikipedia.org/wiki/Interferometric_synthetic_aperture_radar*



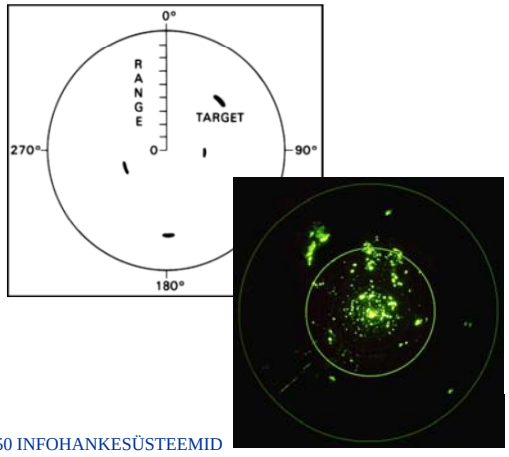
Tallinna Tehnikaülikool Raadio ja sidetehnika instituut Urve Madar, Julia Berdnikova

# 13. Radari pildid

*A- Scope (Display)*




*PPI – Scope (Plan Position Indicator)*

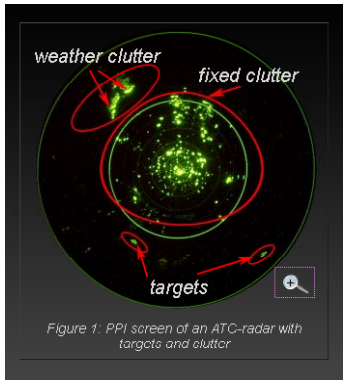


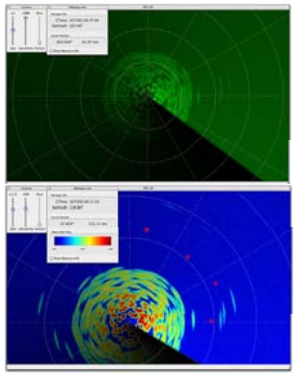

*http://en.wikipedia.org/wiki/Radar_display*

# Radari pildid

*PPI display*

läve väärtus *(threshold level)*



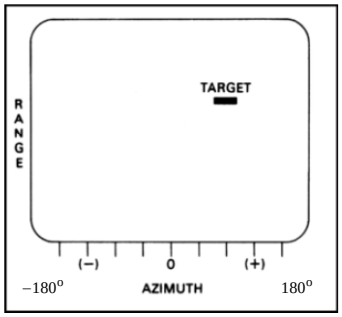
*http://www.opengl.org/discussion_boards/showthread.php/145160-Radar-Display-Imaging* *http://www.radartutorial.eu/11.coherent/co04.en.html*

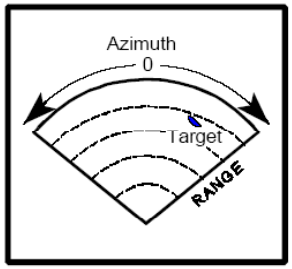


Tallinna Tehnikaülikool Raadio ja sidetehnika instituut Urve Madar, Julia Berdnikova

# Radari pildid

*B- Scope (Display)*




*Sector PPI display*

*ground mapping*

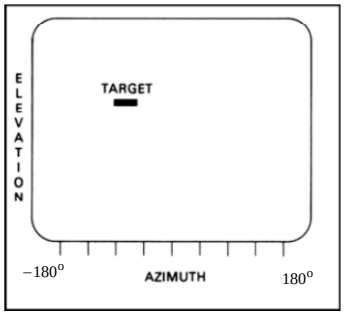
*E-scope* Elevation



Tallinna Tehnikaülikool Raadio ja sidetehnika instituut Urve Madar, Julia Berdnikova

# Radari pildid

***C-Display***



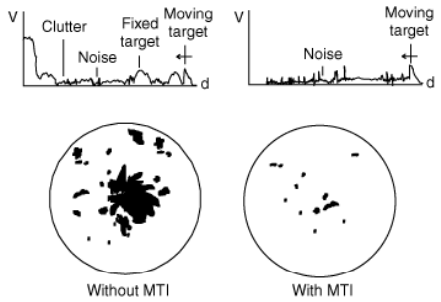



Tallinna Tehnikaülikool Raadio ja sidetehnika instituut Urve Madar, Julia Berdnikova

# Radari pildid: MTI

Doppleri radar ja liikuvate objektide selekteerimine

*MTI - Moving Target Indication*



# Radari pildid: SAR

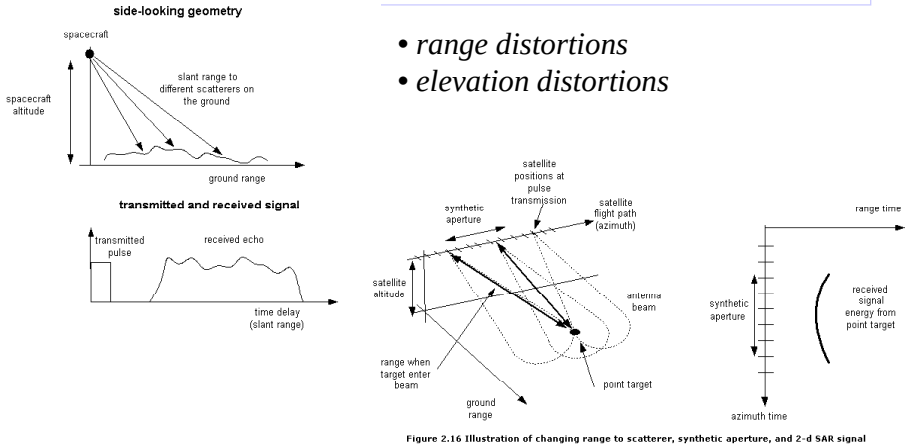



Figure 2.16 Illustration of changing range to scatterer, synthetic aperture, and 2-d SAR signal

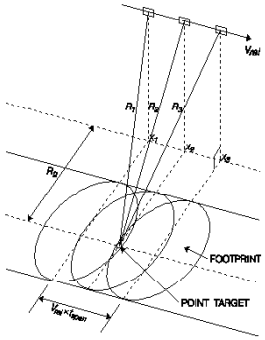
- *range distortions*
- *elevation distortions*

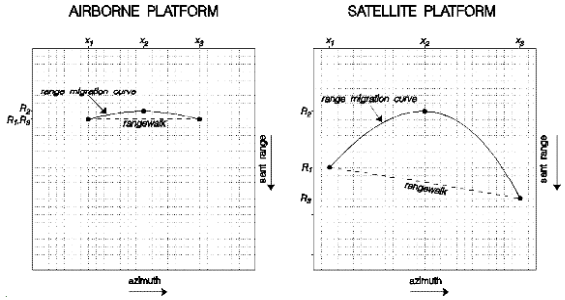
*http://envisat.esa.int/handbooks/asar/CNTR2-6.htm*



Tallinna Tehnikaülikool Raadio ja sidetehnika instituut Urve Madar, Julia Berdnikova

# Radari pildid: SAR



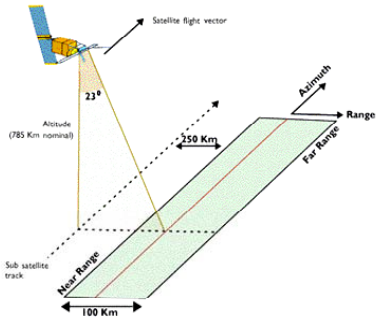



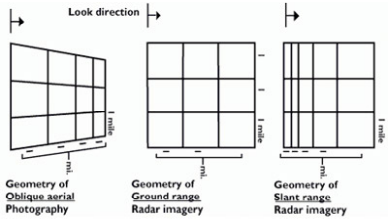

**Theory of Synthetic Aperture Radar**
http://www.geo.uzh.ch/~fpaul/sar_theory.html

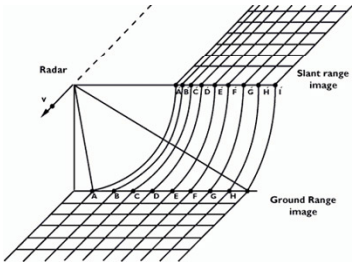


Tallinna Tehnikaülikool Raadio ja sidetehnika instituut Urve Madar, Julia Berdnikova

# Radari pildid: SAR




- **Slant range** image, in which distances are measured between the antenna and the target.
- **Ground range** image, in which distances are measured between the platform ground track and the target, and placed in the correct position on the chosen reference plane.

*http://www.tiger.esa.int/TrainingCds/cd_01/content_2/sez_2_2/pg2_2_03.htm*



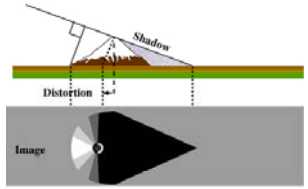
Tallinna Tehnikaülikool Raadio ja sidetehnika instituut Urve Madar, Julia Berdnikova

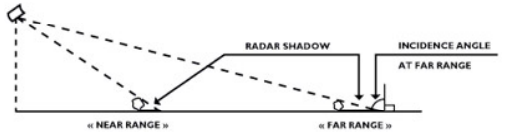
# Radari pildid: SAR

*slant range image*

*ground range image*

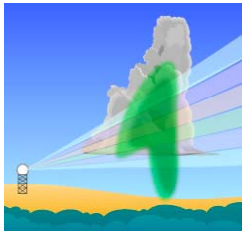
objektide varju pikkus:

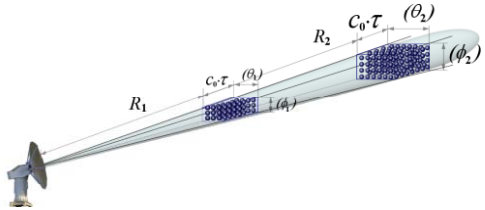


# 14. Ilmaradar

**Ilmaradar** on impulss-Doppler radar, mida kasutatakse sajuala piiritlemiseks, selle levimise arvutamiseks ja sademete tüübi (vihm, lumi, rahe jne) määramiseks






Konstantse kõrguse *PPI (Plan Position Indicator)* ehk *CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator)* kasutab ühel fikseeritud kõrgusel saadud mõõtmistulemusi.

*http://et.wikipedia.org/wiki/Ilmaradar*
*http://zoomradar.com/blog/?p=1782*





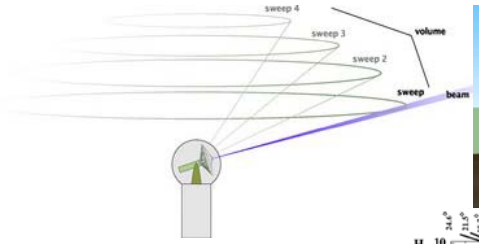
# Ilmaradar

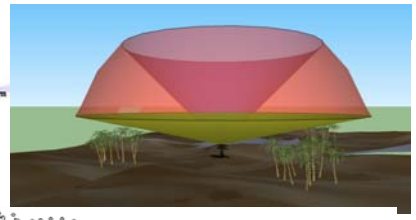
- *X-band (9 GHz)*, töökaugus 50-100 km, väike antenn
- *C-band (5.5 GHz)* töökaugus kuni 250 km, antenni läbimõõt 4-6 m. Avastab sademeid (vihma, lund, rahet) ja mõõdab Doppler efektiga suunalist liikumiskiirust, kasutab pöörleva paraboolse suundantenni.
- *S-band (3 GHz)*, Väga suur antenn
- Ka-band kasutatakse väga väikeste osakeste (näiteks uduvihma ja udu) uurimiseks.





# Ilmaradar

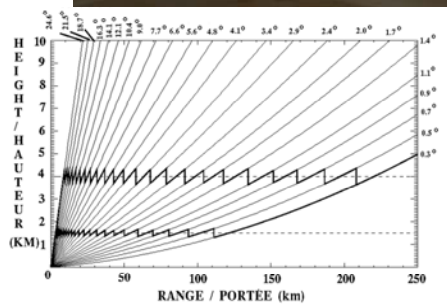


Tiirud konstantse kõrgusnurgaga

Polarisatsioon

Sik-sak joon näitab, millistelt nurkadelt pärinevad andmed CAPPIde koostamiseks 1,5 ja 4 km kõrgusel








# Ilmaradar:

$$\overline{P}_v = \frac{P_s G^2 \lambda_s^2 \sigma_m}{(4\pi)^3 D^4}$$

1. Vastuvõtja sisendis on keskmiselt mitme seireperioodiga:

$$\sigma_m = V_m \sum_i^N \sigma_i;$$

2. Meteomoodustise efektiivne peegelduspindala

$$V_m \approx \frac{\pi}{4} D^2 \Delta\beta\Delta\alpha \frac{c\tau_i}{2}$$

3. Radari ruumiline eraldusvõime kaugusel D, $\tau_i$ – impulssi pikkus

$$\sum_i^N \sigma_i$$

$i$ : *meteoosakesed*

# Ilmaradar: Meteopeegeldused

R – vihmaosakese diameeter,
K – sihtobjekti dielektriline konstant

$$\sigma_i = \frac{\pi^5}{\lambda^4}|K|^2 R_i^6$$

$$|K|^2 = \left|\frac{m^2-1}{m^2+2}\right|;$$

$\lambda \Rightarrow R_i$ osakeste suurusjaotus

Rayleigh hajumine

$m$=$n$-$jk$
$n$- murdumistegur
$k$ - neeldumistegur

$$vesi\left(0-20^oC\right) \rightarrow |K|^2 \approx 0,93$$

$$jää \rightarrow |K|^2 \approx 0,20$$

$$\sum_i^N \sigma_i = \frac{\pi^5}{\lambda^4}|K|^2 \sum_i^N R_i^6; Z = \sum_i^N R_i^6; Z_{ühikuks}\left(\frac{mm^6}{m^3}\right)$$





# Ilmaradar: Meteopeegeldused

$$\overline{P_v} = \frac{P_s G^2 \lambda_s^2 V_m \sum_i^N \sigma_i}{(4\pi)^3 D^4} =$$

$$\frac{P_s G^2 \lambda_s^2 \frac{\pi}{4} D^2 \Delta\beta\Delta\alpha \frac{c\tau_i}{2} \sum_i^N \sigma_i}{(4\pi)^3 D^4} =$$

$$\frac{P_s G^2 \lambda_s^2 \frac{\pi}{4} D^2 \Delta\beta\Delta\alpha \frac{c\tau_i}{2} \sum_i^N \frac{\pi^5}{\lambda_s^4}|K|^2 R_i^6}{(4\pi)^3 D^4} =$$

$$\frac{\pi^3 P_s G^2 \Delta\beta\Delta\alpha \cdot c\tau_i \cdot |K|^2 \sum_i^N R_i^6}{32\lambda_s^2 D^2} = \beta_{sm} Z$$





# Ilmaradar: Logaritmiline skaala

$$10\log\frac{\overline{P_v}}{Z} = dBZ$$

$Z = ar^b; r - sademete\ hulk(\frac{mm}{tunnis});$

$dBZ = 10\log Z$

$Z = 200r^{1,6}$

$Z_e$

$-40dBZ$ Väga külm

$-20dBZ \leftrightarrow 10dBZ$ Selge ilm

Peegeldustegur (*reflectivity factor)*
*Antenniosa on täidetud*
*Rayleigh peegelduse*
*Peegeldajad on kas vee või jää osakesed*





# Ilmaradar: Z valemid

$1.Z = 200r^{1,6}$

$2.Z = 31r^{1,71}$

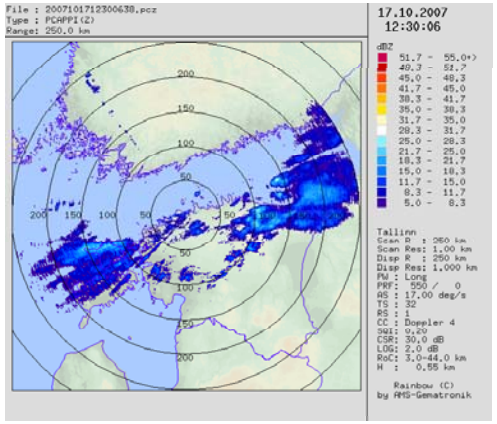
$3.Z = 486r^{1,37}$

$4.Z = 2000r^2$

1.Tavaline vihm
*Stratiform rain*
2. Vihm mägedes?
*Orographic rain*
3. Paduvihm
*Thunderstorm rain*
4. Lumi
*Snow*

# Ilmaradari tulemused

Sademed
Tuul




*Krista Odakivi, ILMARADARITEST, 2007a*





# Ilmaradar: EMHI – Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut

**Sürgavere radar**

- Viljandi lähedal
- Torni kõrgus 28 m
- Maapinna kõrgus merepinnast 130 m
- Antenni kõrgus merepinnast 158 m
- Antenni läbimõõt 4.5 m

*http://www.emhi.ee/data/files/yritused/meteopaevad/2011/Kaldma2011.pdf*

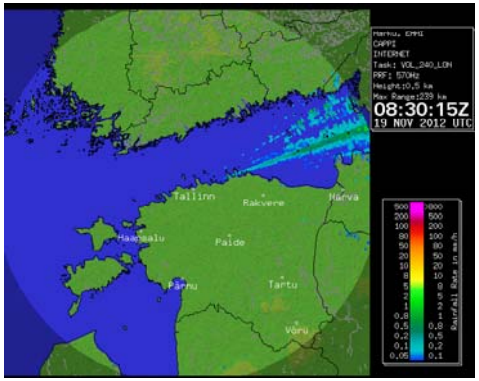




# Ilmaradar: EMHI

**Harku radar**

- Torni kõrgus 16.3 m
- Maapinna kõrgus merepinnast 32.7 m
- Antenni kõrgus merepinnast 49 m
- Antenni läbimõõt 4.5 m








# Ilmaradar: EMHI

# 15. Hüdroakustilised infohankesüsteemid

**Kirjandus:**

Arro I. Sonartehnika, Tln., TTÜ kirjastus, 1998

**Otsingu sõna:**
Sonar + signal processing, echo sounding, underwater acoustics, hydroacoustics, active sonar, underwater measurements, jne

IHO (*International Hydrographic Organization*),





# Hüdroakustilised süsteemid

Underwater acoustics (sagedusala 10 Hz – 1 MHz):

- *Sonar*
- *Underwater communication (hydrophones)*
- *Underwater Navigation and Tracking*
- *Seismic exploration*
- *Weather and climate observation*
- *Oceanography*
- *Marine biology (Bioacoustics)*
- *Minehunting*

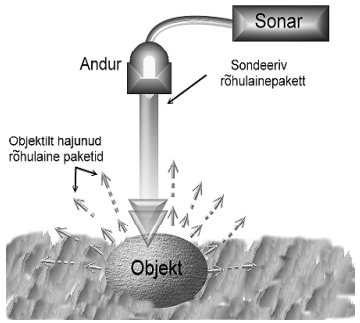
Jne.

***"SONAR** (**SO**und **NA**vigation and **R**anging) — is a technique that uses sound propagation under water to navigate, communicate or to detect other vessels."*
*http://en.wikipedia.org/wiki/Sonar*





# Sissejuhatus: Kauguste mõõtmine




*Aktiivsonari mudel*

Punktide A ja B vaheline kaugus on võimalik esitada valemiga:

$$D_{AB} = C_0 \cdot \tau_{AB},$$

kus $\tau_{AB} = t_B - t_A$

$t_A$ – levimise algmoment,

$t_B$ – saabumismoment B punkti,

$C_0$ – levikiirus keskkonnas

laine levimise kiirus on ~1500 m/s
*(speed of sound in water* 25 °C*)*

*~ 345 m/s (*speed of sound in air 25 °C*)*





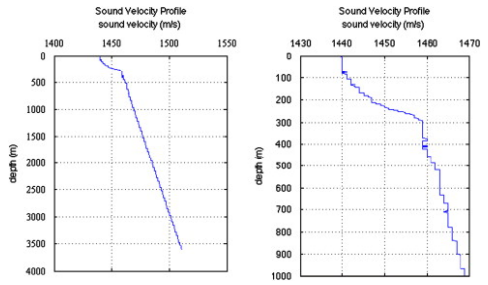
# Sissejuhatus

Sondeeriv signaal levib andurist A objektini B ja peegeldunud signaal levib tagasi andurile.

$$2D_{AB} = C_0 \cdot \tau_{AB},$$

Sügavus:

$$D_{AB} = \frac{C_0 \tau_{AB}}{2}$$



# Sonarite liigitused:

Tsiviil- ja militaarrakendused:

– sondeeriva signaali tekke järgi

- Aktiivsed (*active*)
- Passiivsed (*passive*)

– suuna järgi

- *down-looking*
- *forward-looking*

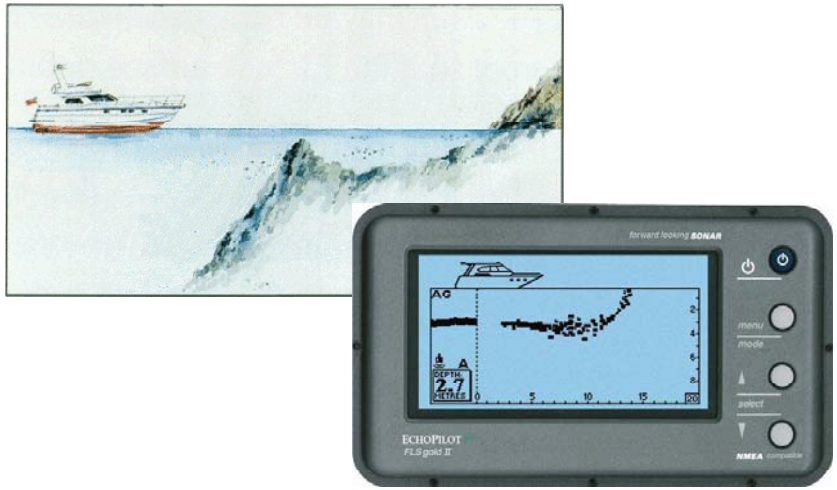
jne.

– kasutusala järgi

– bi- ja multistaatilised *http://en.wikipedia.org/wiki/Bistatic_sonar*





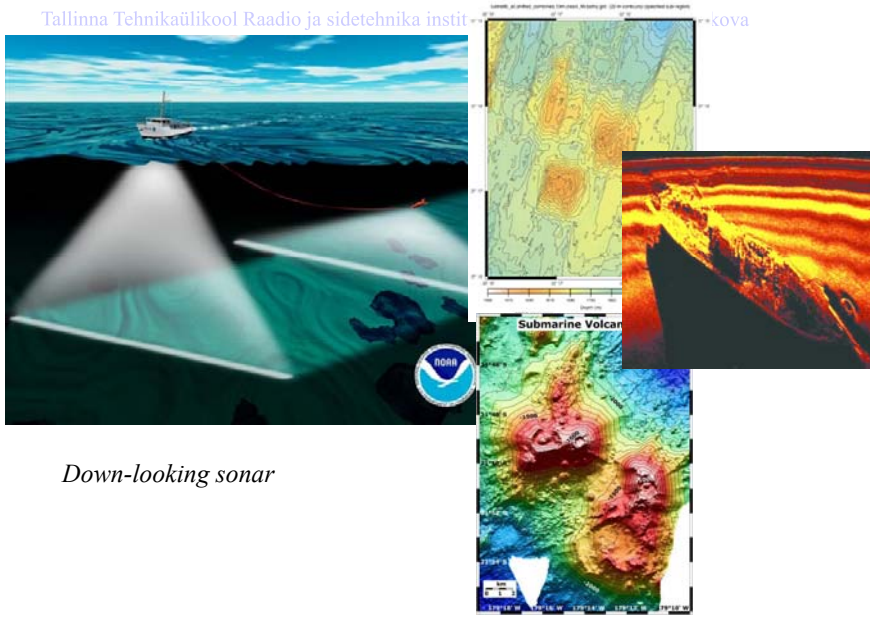



*Forward-looking sonar*

*http://www.pilotmarine.com*








*Down-looking sonar*

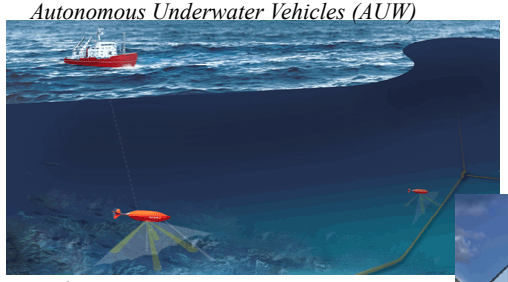
*http://www.oceanexplorer.noaa.gov*



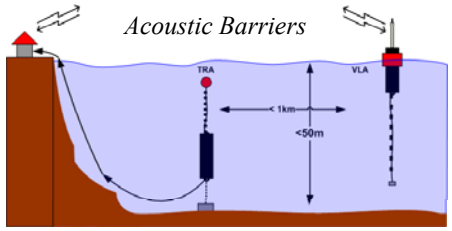


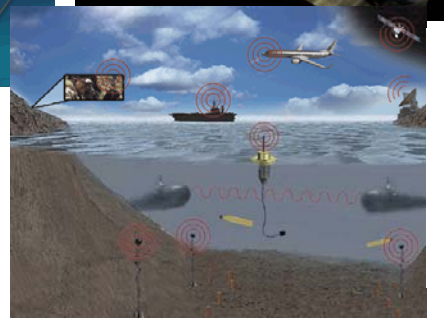
# Rakendused:

*Autonomous Underwater Vehicles (AUW)*



*Acoustic Barriers*

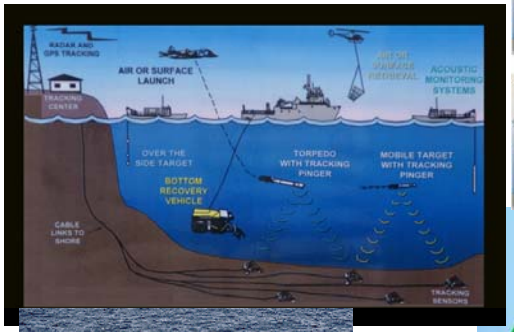


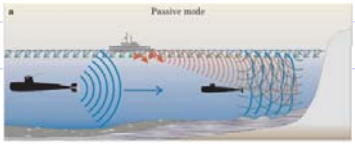



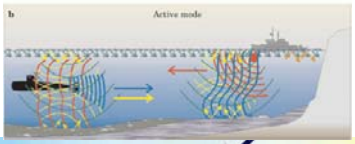
*http://www.navy.mil/navydata/cno/n87/usw/issue_30/art.html*

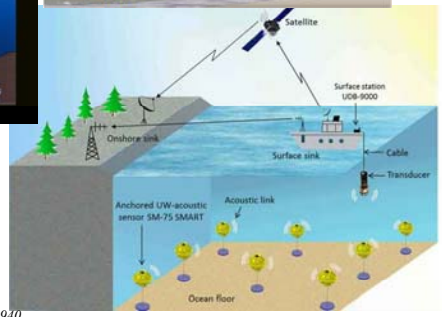
*http://www.siplab.fct.ualg.pt/harborprot.shtml*

# Rakendused:






*http://adventuresrediscovery.files.wordpress.com/2012/08/sidescansonar1.jpg?w=940*

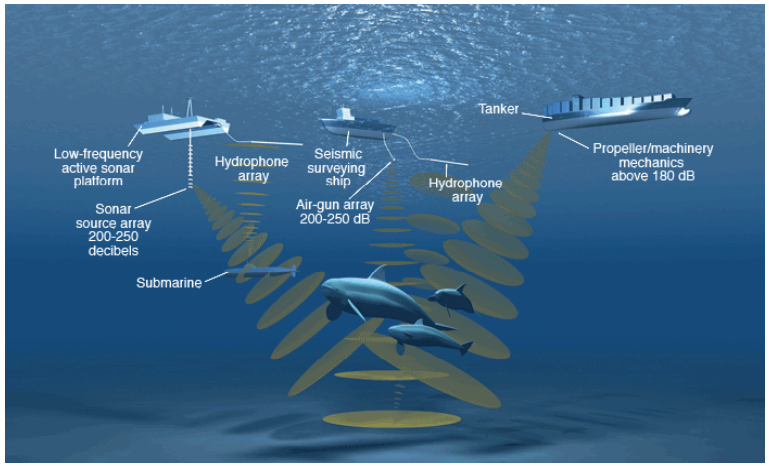
*http://www.eng.buffalo.edu/wnesl/underwater_testbed.php*





# Rakendused:

http://en.wikipedia.org/wiki/Marine_mammals_and_sonar








# Süsteemide karakteristikud:

- Sagedusala
- Erinevad sondeerivad signaalid
- Määramatuse funktsioon ( Doppler)
- Võimsus
- Lahutusvõime
- Mõõtetäpsus
- Mõõtekaugus
- Vastuvõtja tundlikkus
- Andurid, suunadiagrammid
- Töötluse algoritmid

Jne.





# Hüdrograafia (1)

**Hüdrograafilised standardid:**

- **IHO SP44** (*International Hydrographic Organization Special Publication 44*)
- **SMA** (*Swedish Maritime Administration*)
- **USACE** (*United States Army Corps of Engineers*)
- **LINZ** (*Land Information New Zealand*)
- **IMCA** (*International Marine Contractors Association*)

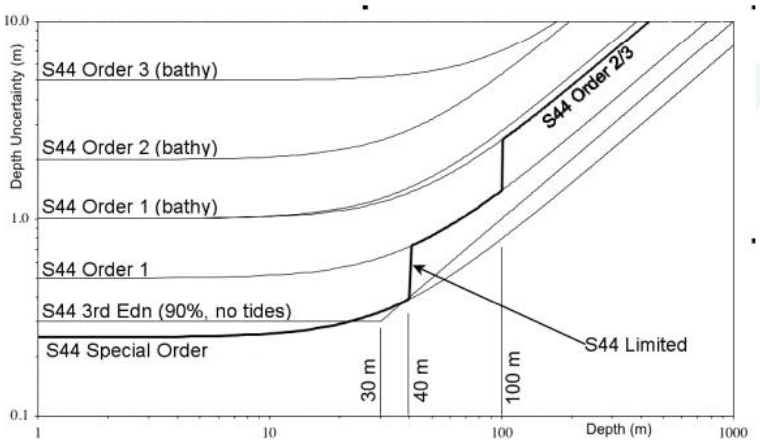
# Hüdrograafia (2)

| Order | S44 Special | S44 1 | S44 2 | S44 3 |
|---|---|---|---|---|
| Depth uncertainty for reduced depths (95% Confidence Level) | a = 0.25 m<br>b = 0.75% | a = 0.5m<br>b = 1.3% | a = 1.0 m<br>b = 2.3% | a = 1.0 m<br>b = 2.3% |
| Bathymetric model uncertainty (95% Confidence Level) | a = 0.25 m<br>b = 0.75% | a = 1 m<br>b = 2.6% | a = 2 m<br>b = 5% | a = 5 m<br>b = 5% |





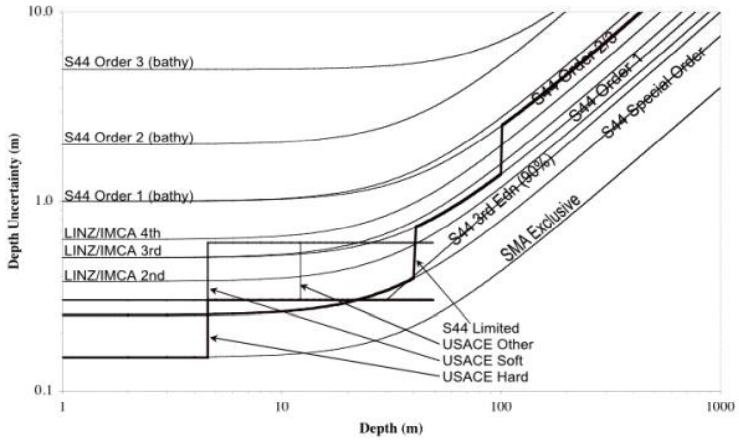
# Hüdrograafia (3)








# Hüdrograafia (4)





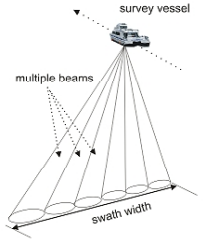


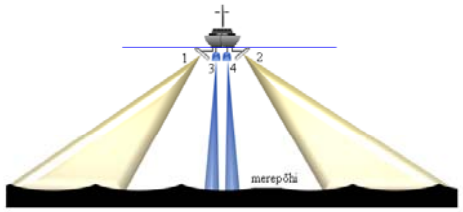

# Meremõõdistus (1)

**Sonarid:**

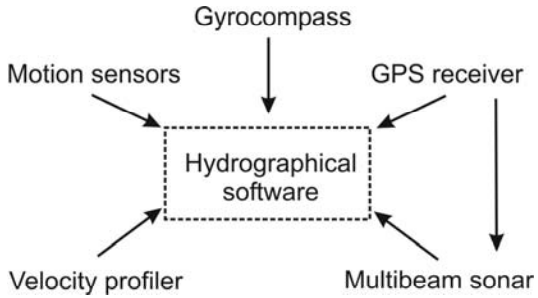
- ***Multichannel*** **(Mitmekanaliline)** – merepõhja kaardistamiseks
- ***Multibeam*** **(Lehviksonar)** – merepõhja kaardistamiseks
- ***Sidescan*** **(Külgvaatlussonar)** – merepõhja külgvaatluseks
- ***Geological*** **(Geosonar)** – merepõhja geoloogilise struktuuri määramiseks

# Meremõõdistus (2)



# Meremõõdistus (4)




*Multibeam sonar system*





# Meremõõdistus (4)

RSTI ja signaalitöötluse õppetooli, OÜ Ahero, OÜ Adimir, OÜ R-süsteemid ja VTA (Veeteede Amet) kollektiivide koostöös on valminud järgmised sonarid:

1) Lehviksonar

2) Külgvaatlussonar

3) Geosonar



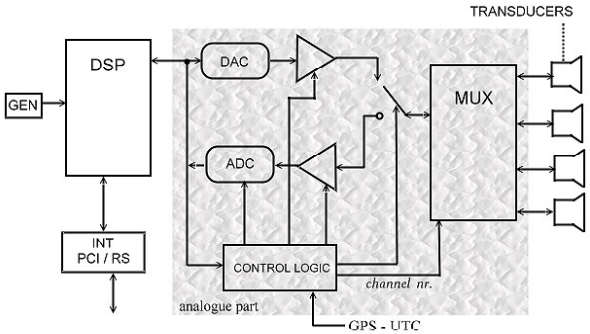


# Eksperimentaalsed tulemused (1)

PCI liidesiga digitaalne sonar

- Sagedus 180 – 430 kHz
- Sondeerimissagedus 1- 64 Hz
- Võimsus on 0,31 / 1,25 / 5W
- Kanalite arv 2/4
- Tarbitav võimsus 8 W
- Liides PCI

# Sonari struktuur




**DSP** - digital signal processor, **INT** – interface (PCI or RS), **GEN** – clock signal generator (40 MHz), **DAC** – digital-analogue converter, **ADC** – analogue-digital converter, **MUX** – channel multiplexer, **CONTROL LOGIC** – automatic receiver amplification, and choice of a working channel.





# Lehviksonar (1)

- Süsteemi kasutatakse merepõhja profiili mõõtmiseks ja kaardistamiseks.
- Lehviksonari süsteem tervikuna koosneb 12-st või 16-st neljakanalilisest sonari plaadist PCI liidesega.
- Lehviksonari töötsükliks on ühesekundiline ajavahemik (võib olla määratud GPS – UTC-ga)

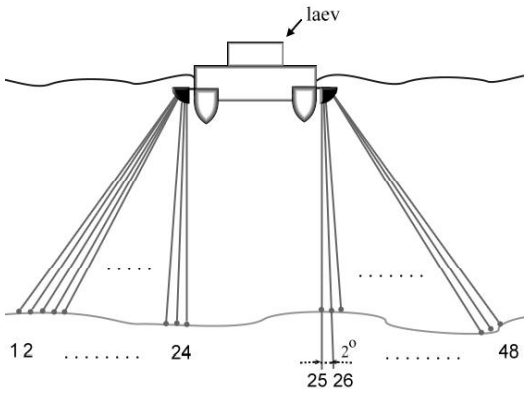
<u>Põhiparameetrid:</u>

- Kanalite arv on 48 kuni 64
- Kanali väljundvõimsus on 5 W / 30W
- Anduri töösagedus on 400 kHz
- Mõõtesügavus on 0,7 – 170 m / 1 – 280 m
- Mõõtetäpsus alates ± 4 mm





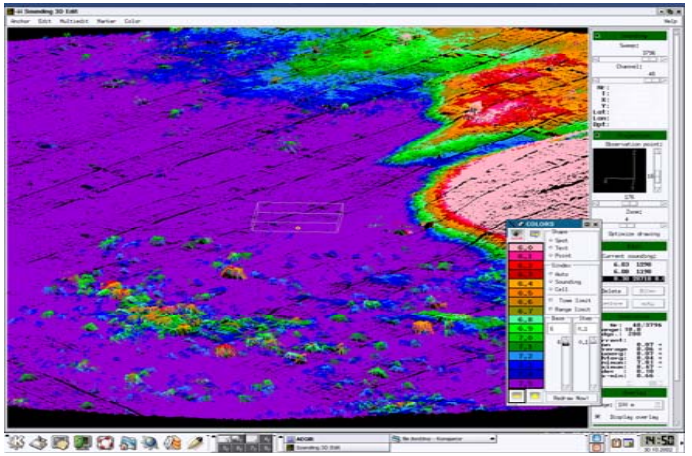
# Lehviksonari mõõtesuunad





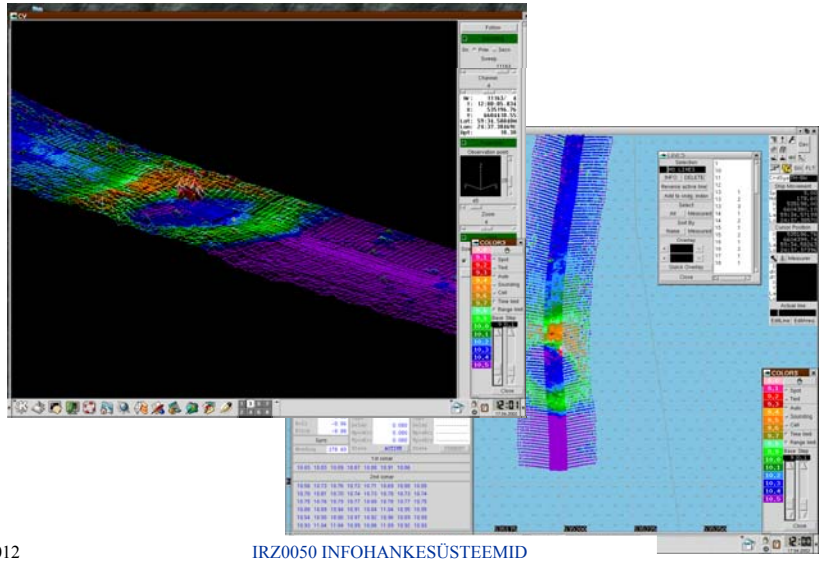



# Lehviksonari mõõtetulemused



Tarkvara on OÜ R-süsteemide poolt

# Lehviksonari mõõtetulemused







# Lehviksonari mõõtetulemused

# Külgvaatlussonar

Süsteemi kasutatakse merepõhja külgvaatluseks ja merepõhja erisusi avastamiseks, näiteks kive, poste, laevavrakke jne.

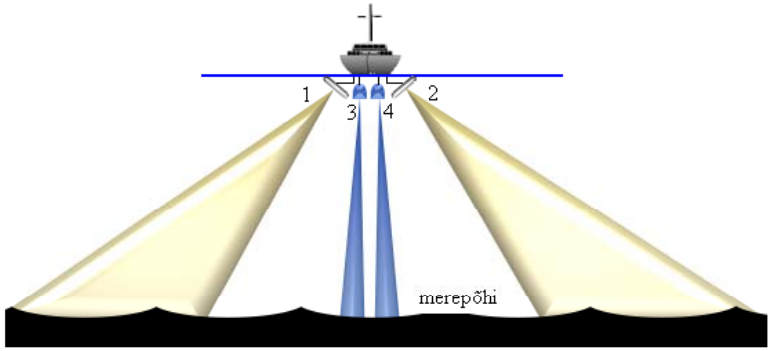
Põhiparameetrid:

- Väljundvõimsus on 5 W
- Anduri töösagedus on 400 kHz
- Mõõtesügavus on 3 – 100 m
- Radiaalsuunaline lahutusvõime on 3 – 6 cm
- Sondeerimise sagedus on 1 – 16 Hz



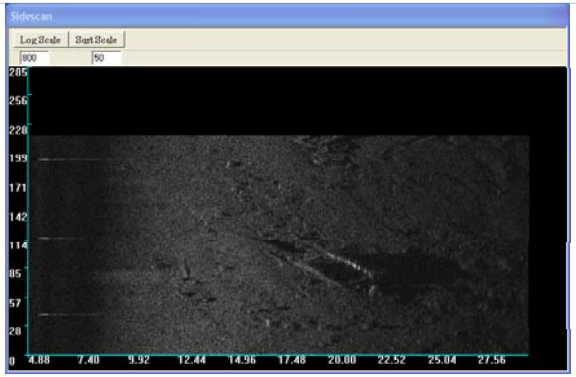


# Külgvaatlussonar neljakanalilise PCI-plaadiga




1 ja 2 on külgvaatlus andurid, 3 ja 4 on teravasuunalised andurid

# Külgvaatlussonari tulemused

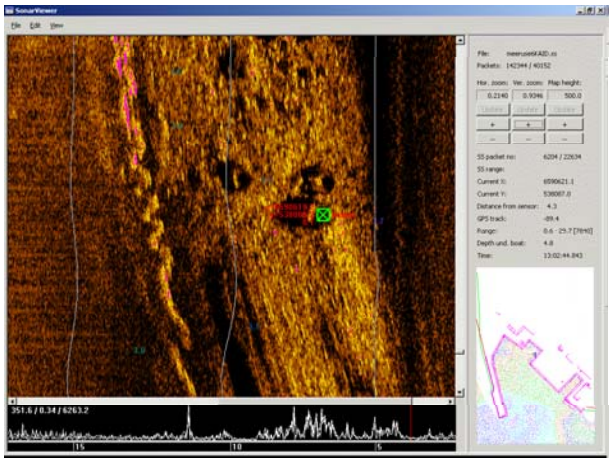



Pildil on näha merepõhjal asuv laevavrakk sügavusel 18 – 23m. Joonise horisontaal - teljel on toodud kaugus meetrites, vertikaal- teljel on realisatsioonide arv





# Külgvaatlussonari tulemused

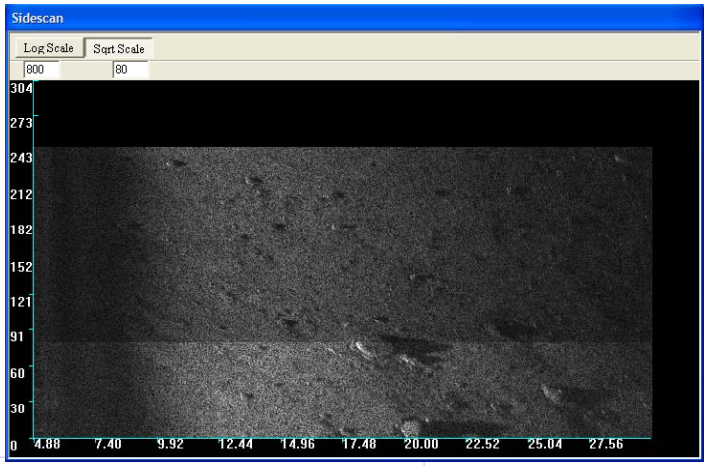


Pildil on autokummid ja on märgitud erinevad sügavused





# Külgvaatlussonari tulemused

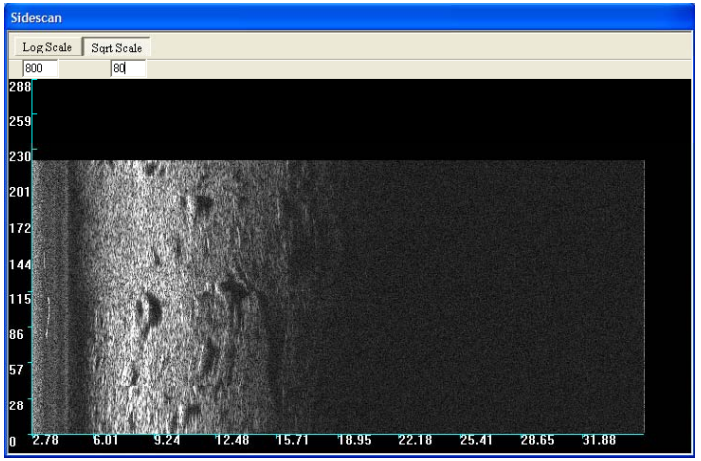



Pildil on suured kivid sügavusel 17,5 –26 m.





# Külgvaatlussonari tulemused




Pildil on autokummid sügavusel 8 m.

# Geosonar

Süsteemi kasutatakse veekrundi läbivaatamiseks ja merepõhja geoloogilise struktuuri määramiseks suure lahutusvõimega.

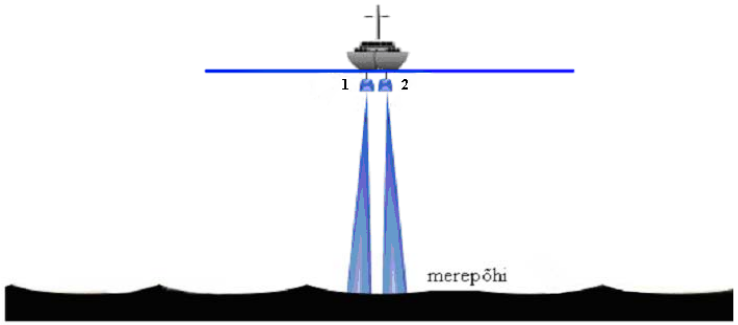
Põhiparameetrid:

- Väljundvõimsus on 100 W
- Anduri töösagedus on 12 kHz
- Mõõtesügavus on 1 – 500 m
- Mõõtetäpsus on 0,65 – 1 m
- Sondeerimise sagedus reguleeritakse





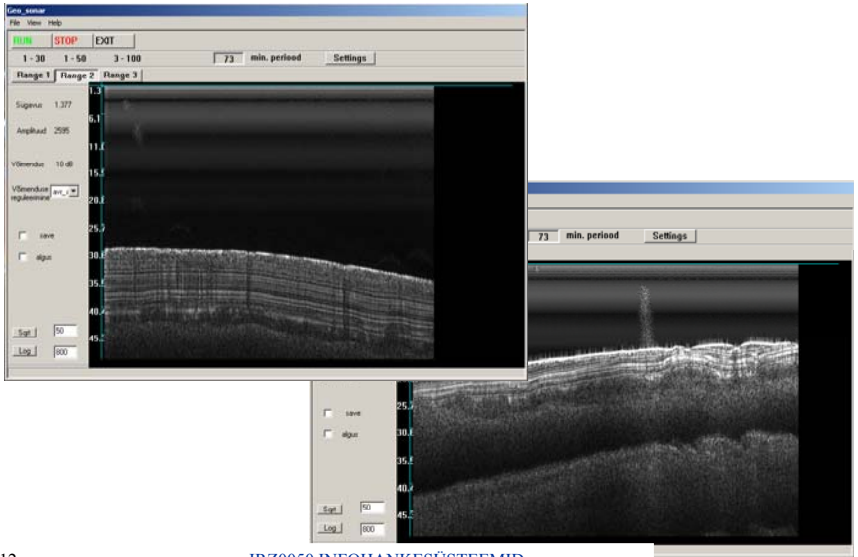
# Geosonar kahekanalilise PCI-plaadiga







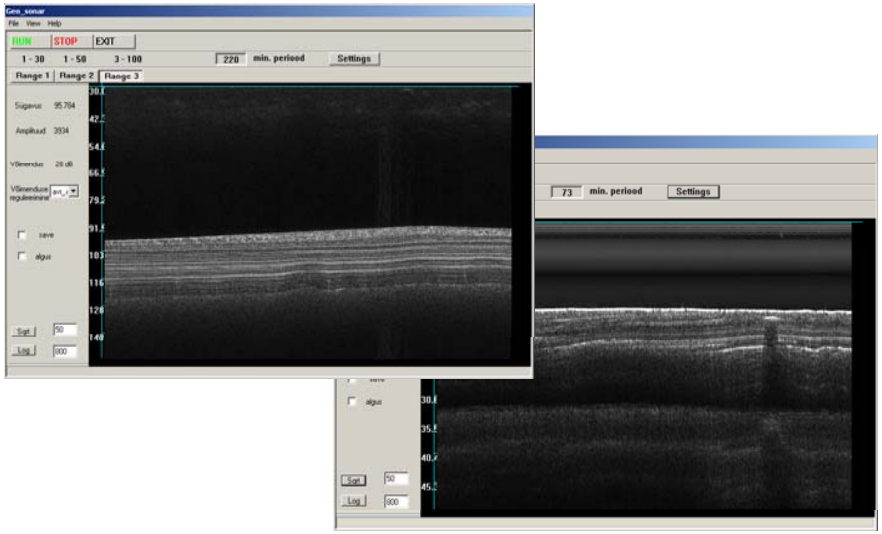

# Geosonari mõõtetulemused








# Geosonari mõõtetulemused

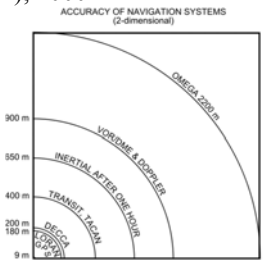


# 16. Raadionavigatsioonisüsteemid

1. NAVSTAR (*Navigation System with Timing and Ranging)*
   GPS (Global Positioning System) - USA
2. GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) – Venemaa
   GPS3
3. Galileo

1957 --------1967 -1973; 1974-1979;1980-1989; 1994 (24); 2000

I Transit ja Timation II GPS
Tsikada (1960)
Hs 1000km(Doppler)




*http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_navigation*





# Koordinaatide süsteemid (globaalsed).

1. Astronoomiline (geograafiline, geotsentraalne ja geotsentriline liikuv)

Sfääriline koordinaatide süsteem: maa on kera; antakse

laius- ja pikkuskraadid on nurgad sfääri keskpunkti ja L ning P pooluste suhtes. Kõrgus.

2. Geodeetiline

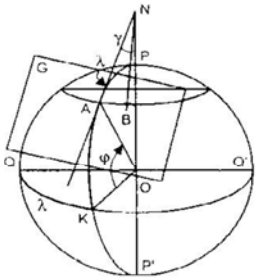
Sfääriline koordinaatide süsteem: maapind on ellipsoid, nurgad antakse punkti normaali suhte. Kõrgus ellipsoidi pinnalt.

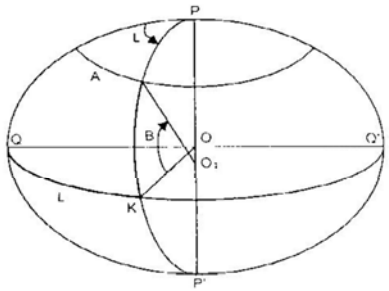
3. Täisnurksed koordinaadid
4. Polaarkoordinaadid





## Globaalsed koordinaadid




Maa on kerakujuline: Maapind on ellipsoid:
Tavalisteks asukoha määramiseks geodeesia tarbeks
Ekvaatortasapind Ekvaatori tasapind

Asukoha koordinaadid on erinevad





## Plaan, kaart ja aerofoto

Kasutavad mõisteid
1. Rist- ehk ortogonaalprojektsioon ja tsentraalprojektsioon (perspektiiv)
2. Vähendatud kujutis – ehk plaan tasapinnal suurema maa osa jaoks võib olla moonutatud.
3. Kaart topograafilised kaardid tehakse kasutades Gaussi projektsioone
**http://www.ekk.edu.ee/vvfiles/0/kartograafia_oppematerjal.pdf**
**http://www.ekk.edu.ee/vvfiles/0/GIS_loeng.pdf**

4. Kaarti või plaani mastaap ehk mõõtkava
5. Koordinaatide võrk
6. Numbrilised ehk digitaalsed topograafilised kaardid
7. Raadionavigatsiooni koordinaadid

Raadiotehniliste vahenditega mõõdetakse koordinaate EML kiirgusalaallikate suhtes. Globaalsed koordinaadid saadakse arvutustega erinevate programmide abil

# Projektsioonid

Rist- ehk ortogonaalprojektsioon  Tsentraalprojektsioon





# Globaalsed raadionavigatsioonisüsteemid

1. NAVSTAR (*Navigation System with Timing and Ranging)*
   GPS (Global Positioning System) – USA

2. GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) – Venemaa
   GPS

3. Galileo (GNSS) - Euroopa globaalne satelliitnavigatsiooni süsteem alates 2007 aastast. Valmis peaks saama 2014.
Täpne ja avatud kasutusega.

*Galileo will start offering first services from 2016*
**http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Navigation_Satellite_System**





# NAVSTAR (*Navigation System with Timing and Ranging)*

GPS (Global Positioning System)
USA – 1977 - I satelliit .
1983 avati tsiviilkasutuseks,
1991 eemaldati müügipiirangud,
1993 aastast täielikult valmis ja avatud kasutuseks, kuid mitte kõik koodid.
Valmistamine maksis ~15 miljardit $. Kasum GPS seadmete müügist oli aastaks 2006 ~100 miljardit $.
GPS oli ette nähtud sõjaliseks otstarbeks.
Eelloos on kaks globaalset navigatsioonisüsteemi: Transit ja GLONASS





# Eellugu.

Transit
**http://en.wikipedia.org/wiki/Transit_(satellite**)
Timation TIMenavigATION alustati 1964.
Timation edastas täpse aja tugisignaale maale paigaldatud vastuvõtjatesse.
Satelliidid Timation -1 paigaldati 1967 aastal, Timation -2 1967.
See projekt muudeti projektiks 621B ja sai aluseks GPS süsteemile, milles pöörati äärmiselt suurt tähelepanu täpse ühtse aja probleemile.

## Eellugu

**2. GLONASS** (*Global Navigation Satellite System*) – Venemaa GPS.
I satelliit lasti üles 1982, kasutusele võeti 1993 ja lõplikult valmis 1995
GLONASS oli ette nähtud sõjaliseks otstarbeks
Tsikada ja Parus
http://www.astronautix.com/craft/tsikada.htm





## Globaalsed raadionavigatsioonisüsteemid.

3. **Galileo** - Euroopa globaalne satelliitnavigatsiooni süsteem alates 2007 aastast. Valmis peaks saama 2014. Täpne ja avatud kasutusega.
Arendatakse EL s programmiga EGNOS (*European Global Navigation Overlay System*).
Ette on nähtud nii GPS kui ka GLONASS süsteemide signaalide vastuvõtmine.
EGNOS parandused nendele vastuvõtjatele, millistel on EGNOS-enable edastatakse kolme geostatsionaarse satelliidi abil.Kaks neist kuuluvad süsteemi INMARSAT (Atlandi ja India ookeani ala) ja Kolmas on ESA Artemis (Aafrika ala)
Süsteemi kuuluvad veel neli peajuhtimiskeskust *(Master Control Centres)*,
34 RIMS (*Ranging and Integrity MonitoringStations*) maajaama ja neli NLES *(Navigation Land Earth Station)*





## Globaalsed raadionavigatsioonisüsteemid. Ühisosad

1. Kõik süsteemid kasutavad nn maa suhtes liikuvaid satelliite erinevatel orbiitidel. Navigatsioonisüsteemide satelliidid ei ole geostatsionaarsed. Need orbiidid on maale lähemal, kui geostatsionaarsete satelliitide omad. Igal süsteemil on erinev arv satelliite erineval arvul orbiitidel (sünkroonsed või mittesünkroonsed).

2. Kõigil süsteemidel peab olema lahendatud täpse ja ühtse aja probleem. Põhimõttelised lahendused on aatomkelladega.

3. Kõik süsteemid kasutavad pseudokauguste mõõtmise meetodit.

4. Kõik süsteemid võimaldavad diferentsiaalnavigatsiooni.

3. Kõikidel süsteemidel on kolm alamsüsteem.





## Ajad

1.Universaalsed ajad
UT0 –astr. *Greenwich*
UT1 – keskmine *Gr* (poolused)
UT2 – nagu eelmine (aasta-aeg)
UT1R – nagu eelmine (tõus-mõõn)
UTC – aatom-kellaga (0,5-2,5)

2. Navigatsioonisüsteemi ajad
Süsteemne ajaskaala
Aatomkell juhtimiskeskuses
Satelliidi ajaskaala
Korrigeeritakse ja ennustatakse
Kasutaja ajaskaala
sünkroniseeritakse

## Põhivalemid

$$(D_1 + c\Delta t)^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2$$
$$(D_2 + c\Delta t)^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2$$
$$(D_3 + c\Delta t)^2 = (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2$$
$$(D_4 + c\Delta t)^2 = (x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2$$

Satelliidid: nr.1.;2.;3.;4. kellad täpsusega kuni nanosec
Mõõdetud kaugused
Tundmatud: x;y;z; Δt S ja M kellaaegade nihe





## Kui mõõdetakse ka kiirust

Näide

$f = 1GHz$ Kandesagedus
$\delta f = 10^{-10} f$ Sageduste erinevus
$\delta f = 0,1Hz$ Suhteline
Absoluutne
$T_{DM} = 1sek \rightarrow \delta t = 1nsek \rightarrow \delta v = 0,3\frac{m}{sek}$ Ajaskaala nihe koos kauguse muutusega
$\delta D = 0,3m$





## Tähistus $\frac{dx(t)}{dt} = x'$

$$(D_1 + c\Delta t)(D_1' + \delta D_1') = (x_1 - x)(x_1' - x') + (y_1 - y)(y_1' - y') + (z_1 - z)(z_1' - z')$$
$$(D_2 + c\Delta t)(D_2' + \delta D_1') = (x_2 - x)(x_2' - x') + (y_2 - y)(y_2' - y') + (z_2 - z)(z_2' - z')$$
$$(D_3 + c\Delta t)(D_3' + \delta D_1') = (x_3 - x)(x_3' - x') + (y_3 - y)(y_3' - y') + (z_3 - z)(z_3' - z')$$
$$(D_4 + c\Delta t)(D_4' + \delta D_1') = (x_4 - x)(x_4' - x') + (y_4 - y)(y_4' - y') + (z_4 - z)(z_4' - z')$$





## Süsteemne ülesehitus (GPS)

1. Satelliitide alamsüsteem (GPS)
   *(Space Segment)*
   (24 tk keskmisel kõrgusel, orbiite 6(4tk), nihutatud laiuskraadidel, T=12h)
2. Maapealsed juhtimis- ja jälgimiskompleksid (J.:USA: *Colorado Springs)*
   *(Control Segment; Monitoring Stations)*
3. Kasutaja seadmed
   *(User Segment)*

## Süsteemne ülesehitus (GLONASS)

1. Kosmiline segment
   (24 tk keskmisel kõrgusel, orbiite 3, nihutatud 120 kraadi. Numbrid 1., 2., 3. Igas 8 satelliiti, 15 kraadi nihkes: kõrgus 18840 – 19440 km
2. Maapealsed juhtimis- ja jälgimiskompleksid
   1. Juhtimiskeskus
   2. Kesksünkronisaator
   3. Kontrolljaamad
   4. Kvant-optilised jaamad
3. Kasutaja seadmed





## Süsteemne ülesehitus (GLONASS)

1. Maapealsed juhtimis- ja jälgimiskompleksid
   5. Väljade kontrolljaamad

Kõik osad on omavahel seotud ja sobitatud.
Maapealt

a. Mõõdetakse NS liikumisteid
b. Mõõdetakse aegaja ajalisi nihkeid NS del ja sünkroniseeritakse NS
c. Vormitaks e ja laaditakse teenusinfo NSle
d. Juhitakse NS telemeetrilise info baasil.
e. Teostatakse navigatsioonivälja seiret.

http://en.wikipedia.org/wiki/GLONASS





## GPS Maapealsed juhtimis- ja jälgimiskompleksid

GPS: USA *Colorado Springs*
*(Control Segment; Monitoring Stations)* x

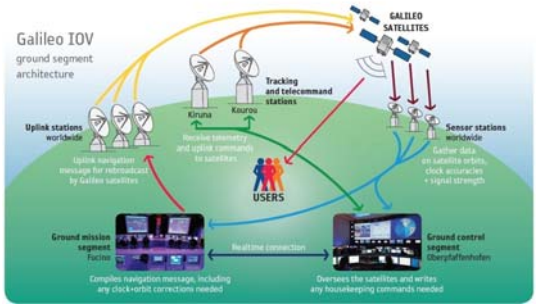
## GLONASS Maapealsed juhtimis- ja jälgimiskompleksid

http://en.wikipedia.org/wiki/GLONASS#Ground_control

Maapealne juhtimine ja aja standardid on Moskvas, Peterburgis, Ternopolis, Jeniseiskis ja Komsomolsk - Amuuril.
GLONASS ja Galileo signaalid on üksteisele sobivad

## Galileo maapealsed juhtimis- ja jälgimiskompleksid

http://www.esa.int/esaNA/SEM5K8W797E_galileo_0.html



http://www.redorbit.com/media/uploads/2012/02/spacepress-022812-002c.jpg



## Satelliitide alamsüsteem

Igal satelliidil on DFM signaal

$F_e T_k \approx\sim 1000;$

$f \approx\sim 1,5GHz$

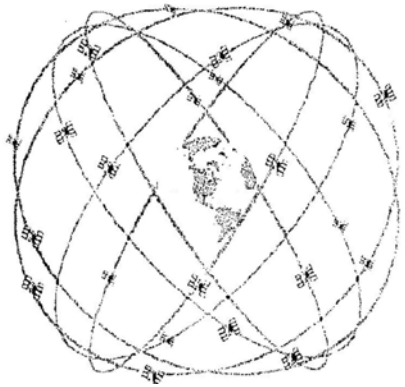
$N \approx\sim 1000;$

$50 \frac{bit}{\text{se}\,k}$





**Globaalsed sateliit – navigatsioonisüsteemid**
**GPS: 24 satelliiti 6 orbiidil (sünkroonsed või poolsünkroonsed)**







## Satelliitide alamsüsteem
## GLONASS (orbiidid on asünkroonsed)

Konstruktiivselt koosneb satelliit hermeetilisest silinderkonteinerist seadmete plokiga, antenni ja fiidrite raamist, suunamissüsteemi seadmetest, päikesepatareide paneelidest koos ajamitega, satelliidi mootorite plokist ja termoreguleerimiskardinatest koos ajamitega ja optiliste nurkpeegeldite plokist koos ajamitega.
Pardaaparatuuris on

1. Navigatsioonikompleks
2. Juhtimiskompleks
3. Stabiliseerimise ja suunamise süsteem
4. Korrigeerimise süsteem
5. Termoreguleerimise süsteem
6. Elektritoite süsteem

http://et.wikipedia.org/wiki/Geograafilised_koordinaadid

# Täpsused

Vead:
- Kontrollseadmetelt
- Satelliidilt (faasihilistus)
- Levitrassilt (kahesageduslikud vastuvõtjad)
- Kasutaja vastuvõtjalt

Arvuliselt meetrites satelliidi kohta
- Satelliidi kellast – 1,5
- Sateliidi orbiidist -2,5
- Ionosfäärist – 5
- Troposfäärist - 0,5
- Vastuvõtja mürast – 0,3
- Mitmekiireline levi - 0,6
- Kokku - 30





# Kasutaja seade

Militaarne kasutus
Tsiviilametid
Eraisikud

Kõigil:
- Raadiosageduslik osa koos signaalide primaartöötlusega

Erinevus:
- Arvutamine
- Juurdepääs pseudokaugustele (DGPS)





# DGPS (standard RTCM SC-104) Euroopas EGNOS (täpsus 3 – 5m)

Militaarne kasutus
Tsiviilametid
Erinevus:
- Arvutamine
- Juurdepääs pseudokaugustele (DGPS)

Maapealsed jaamad annavad parandusi
1. Ainult konkreetse satelliitide komplekti jaoks
2. Kõikide satelliitide jaoks

500 km raadius baasjaamadest (RDS, INMARSAT, FM raadio, side 283,5kHz kuni 325kHz)

a. Koodiline meetod pseudokauguste töötlemisega

b. Pseudofaasilised mõõtmised (ühesageduslikud tegevuskaugus 10 – 12km, täpsus cm, kahesageduslikud tegevuskaugus kuni 100km )





# 17. Globaalnavigatsioonisüsteemid

1. Satelliitide alamsüsteem
   - Mis on paigaldatud ühele satelliidile
2. Kasutaja seade
   - Milline on struktuurskeem

# 1. Satelliitide alamsüsteem
# GPS (Satelliidid on kõrgusel ~20 000 km)

Kaks kandesagedust (L1 ja L2)

$$f_1 = 1575,2MHz$$
$$f_2 = 1227,6MHz$$

Moduleeritud C/A ja P koodiga
Modulatsiooni liik:
Suhteline diskreetne faasmodulatsioon faasinihkega 180 kraadi

$$B = F_e T_k \approx 1000;$$
$$N \approx 1000;$$
$$R_{NAV} = 50\frac{bit}{se\,k}$$





## Satelliitide alamsüsteem

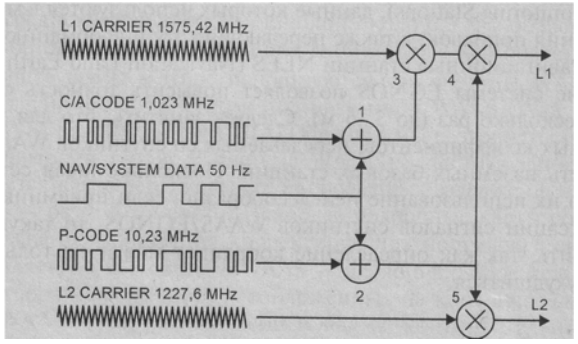
Moduleeritud C/A ja P koodiga
Modulatsiooni liik:
Suhteline diskreetne faasmodulatsioon faasinihkega 180 kraadi

$$B = F_e T_k \approx 10000;$$
$$N \approx 1000;$$
$$E : \frac{\tau_s}{\tau_N} = N; \frac{\Delta f_N}{\Delta f_S} = B$$
$$GL : \tau_S = 20m\sec; \tau_N = 2\mu\sec$$
$$GPS : \tau_S = 20m\sec; \tau_N = 1\mu\sec$$





## Satelliitide alamsüsteem GPS saatja




L1 on moduleeritud C/A ja P koodiga,
C/A ja P koodsignaalid on kvadratuuris (nihe 90 kraadi)
L2 on moduleeritud P koodiga





## Signaalid

**Satelliit: nr.*i*.**

$$s_i(t) = XG_i(t) D_{ci}(t) \sin 2\pi f_1 t$$
$$XG_i(t), \tau_0 = 1\mu\sec; i.\,Goldi\ \ jada, N = 1023$$
$$D_{ci}(t) \rightarrow \pm 1; 50bit/\sec, T_0 = 20m\sec$$

# Satelliitide alamsüsteem GPS saatja

**L1** on moduleeritud **C/A** ja **P** koodiga, C/A ja P koodsignaalid on kvadratuursed (nihe 90 kraadi)
**L2** on moduleeritud P koodiga,
Signaali spektri laius NAV/SYSTEM DATA 50 Hz on 100Hz
Signaali spektri laius C/A koodi jaoks on 2,046 MHZ
Signaali spektri laius P koodi jaoks on 20,46 MHZ
P kood annab suure täpsuse ja alates 1994 aastast on ta täiendatud krüptokaitsega *(A/S – Anti-Spoofing)* ja on tähistatud P(Y)
P koodiga töötavad ka mõned *Trimble* geodeetilised vastuvõtjad
C/A (Coarse Acguition) töörežiimis SPS on täpsus horisontaaltasandil 100m , kõrguses 140 m , ajas 0,34 µsec,
P (Precise) töörežiimis PPS on täpsus
horisontaaltasandil 22 m , kõrguses 27,7 m , ajas 0,09 µsec,





# Satelliitide alamsüsteem GLONASS saatja

L1 = ~1600 MHz ja L2 = ~1250MHz . Kasutuses on sageduslik eraldamine: iga satelliit Kasutab oma sagedust aladest L1 ja L2. Standardset täpsust kindlustav signaal taktsagedusega 0,511MHz on ette nähtud kõikidele kasutajatele.
See võimaldab tõenäosusega 0,997 saada järgmised täpsused

| | |
|---|---|
| •Koordinaatidele horisontaaltasandil | 59 kuni 70 m |
| •Koordinaatidele vertikaaltasandil | 70 m |
| •Kiirusvektori komponentidele | 15cm/sec |
| •Aja mõõtmisele | 0,7 µsec |

Kõrge täpsusega signaal moodustatakse taktsagedusega 5,11 MHz ja ei ole avatud kasutamiseks kõigile.
Navigatsioonisignaal on mitmest komponendist koosnev diskreetse suhtelise faasmodulatsiooniga. Faasinihe 180 kraadi. Kauguse mõõtmisekoodiks kasutatakse m – jada perioodiga 1 msec ja edastuskiirusega 511kbit/sec. Navigatsiooniinfo edastatakse kiirusega 50 bit/sec. See on jaotatud kaheks osaks: operatiivseks ja mitteoperatiivseks. Kaadrireas kasutatakse Hammingi koodi ühekordsete vigade parandamiseks ja kahekordse avastamiseks :

N = 85 , k = 77, r = 8





# Satelliitide alamsüsteem GLONASS saatja

M – jada moodustamiseks kasutatakse 10 järgulist registrit, tagaside on võetud 7. ja 9. järgust, algselt on registrisse kirjutatud 1, tekitav hulkliige on

$$G(z) = 1 + x^5 + x^9$$

Navigatsioonisignaali pikkus on 2 sec. 1,7 sec edastatakse navigatsiooniinfot ja 0,3 sec edastatakse ajamärki. Ajakood on lühendatud m – jada. 30 sümbolist pikkusega 10 msec ja mille tekitav hulkliige on

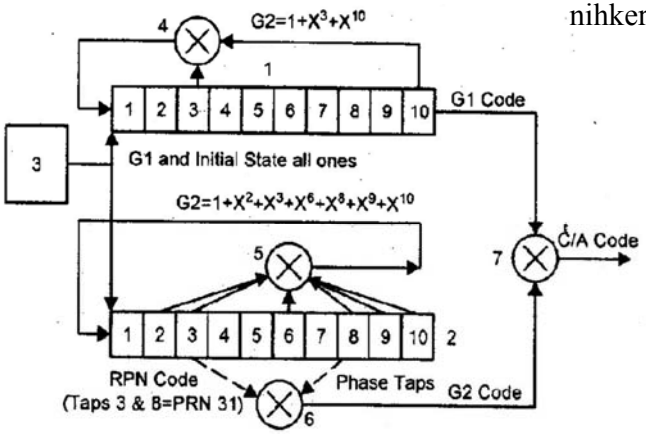
$$G(z) = 1 + x^3 + x^5$$





# C/A kood: Goldi jada

1. Ja 2. 10- järgulised nihkeregistrid



# C/A kood: Goldi jada

1 ja 2 - 10- järgulised nihkeregistrid, mis algseisundis on täidetud ühtetega
4 Ja 6 - loogiline korrutus (korrutamine *modulo* 2)
G1 ja G2 - tekitavad hulkliikmed
3 - täiendav registrite juhtimine
Registris 2 moodustatakse satelliidi number (*PRN – Pseudo Random Number*)
Ühel ja samal sagedusel saab vastuvõtja ka satelliidi numbri

Navigatsiooni info edastatakse kiirusega 50 bit/sec kaadritena 1500 bit, kestvus 30 sec. Iga kaader koosneb 5 alamkaadrist.

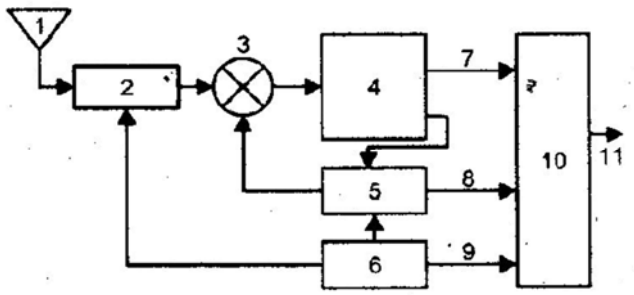
1. Alamkaader – satelliidi sageduse triiv , mis määrab ära satelliidi töökorras oleku
2. ja 3. alamkaader – satelliidi orbiidi reaalsed parameetrid kõrge täpsusega. Korratakse iga 30 sec järel. Vastuvõtja haarab nende järgi koodi
3. 4. ja 5. alamkaader korrataks 25 korda

Täielik edastus võtab aega 12,5 minutit





# GPS vastuvõtja struktuurskeem







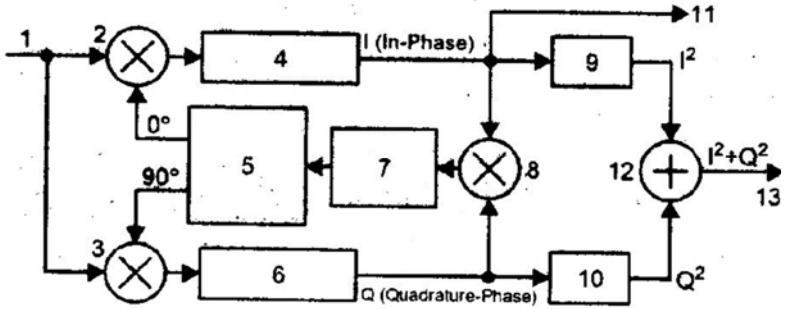

# GPS vastuvõtja struktuurskeem

1. Antenn
2. Eelvõimendi korellaator
3. Segisti (sageduskonverter)
4. Demodulaator – dekooder
5. Kohalik C/A kood
6. Sagedushäälestusega taktgeneraator
7. Šiin
8. Šiin
9. Šiin
10. Info koordinaatidest ja ajast NMEA-183 formaadis
11. Väljund





# 2. GPS vastuvõtja funktsionaalne struktuurskeem



## GPS vastuvõtja funktsionaalne struktuurskeem

1. Sisend
2. Faasdetektor
3. Faasdetektor
4. Madalpääsfilter
5. Sagedushäälestusega takt - generaator, sisuliselt vastuvõtja kell
6. Filter
7. Digitaalne filter
8. Võrdlev detektor
9. Kvadraator (tõstab sisendi ruutu)
10. Info koordinaatidest ja ajast NMEA-183 formaadis
11. Väljund
12. Summaator





## GPS vastuvõtja funktsionaalne struktuurskeem

1. Funktsionaalselt toimub vastuvõtmine toimub kvadratuurkanalites, st et korrelaatori tugisignaalid on 90 kraadilise faasinihkega (nn sin ehk I kanal ja cos ehk Q kanal).
2. Toimub taktgeneraatori sageduslik järelehäälestus, milles digitaalne filter on

7 kindlustab järelehäälestuse stabiilsuse, välistab dünaamilisi vigu ja kindlustab sobiva siirdeaja.

GPS vastuvõtjast edastatakse andmed NMEA – 0183 formaadis näiteks arvutisse. Kõik käsud ja teated on ASCII koodis. Algus on

$GP.....CRLF

Kogu formaat sisaldab korrigeerivat summat. Häirekindel kood on eraldatav ja Selle tõttu koodi liiane osa antud nn kontrollsummana.

NMEA formaadi asemel võib olla kasutatav kahendkood SiRF , Protokoll TSIP (Trimble spetsialiseeritud geodeesiale) või

Garmin protokoll, mis lisab

a. Teekondade salvestused ja eraldamised
b. Teekonnapunkti koordinaatide ja eraldamise koos kõikide karakteristikutega





## Täpsused

**Vead on tingitud:**

Kontroll- ja juhtimis-seadmetelt ja

Satelliidi seadmetelt:

- Need vead on omavahel seotud ja tingitud sellest, kuidas on kindlustatud kogu süsteemis aeg ja efemeriidid. Kui kauguse koodisignaalid ja ajamärgid nihkuvad paigast ära 1 msec, tekib kauguse mõõtmise viga 300km. Ajanihe on määratud satelliidi pardakellaga. Ööpäevas on lubatud 10nsec. Kasutatakse alalist korrektsiooni.
- Raadionavigatsiooni signaali grupihilistusest satelliidi seadmetes: (Satelliidi kella ja antenni faasikeskme vahel) tingitud vead. Suurusjärk on 3 nsec.
- Efemeriidsed vead (GPS: üks koostisosa annab 1 m viga)





## Täpsused

**Vead on tingitud:**

Levitrassilt :

- Maa atmosfäär moonutab EML levitrassi. Tavaliselt ei ole need moonutused ette ennustatavad.
- Troposfäärist (12 kuni 18 km) moonutused ja levi suuna kõverdumised on kergemini ennustatavad. On suuremad madalamatel kõrgustel
- Ionosfäärilised (= 60 kuni 1000 km). Viide refraktsioonist satelliidi sagedustel on 0,08 kuni 0,25 nsec. Kogu viide sõltub oluliselt regioonist ja väga erinev, mitmeid kordi. Toimub ionosfääri monitooring
- Kahesagedusliku süsteemi kasutamine.

## Täpsused

Vead:
- Kontrollseadmetelt
- Satelliidilt (faasihilistus)
- Levitrassilt (kahesageduslikud vastuvõtjad on täpsemad )
- Kasutaja vastuvõtjalt

**Arvuliselt meetrites satelliidi kohta**
- Satelliidi kellast – 1,5
- Satelliidi orbiidist -2,5
- Ionosfäärist – 5
- Troposfäärist - 0,5
- Vastuvõtja mürast – 0,3
- Mitmekiireline levi - 0,6
- Kokku - 30





## Kasutatakse

1. Militaarne otstarve
2. Lennundus
3. Meretransport
4. Maine transport
5. Geodeesia
6. Ehitus
7. Põllumajandus
8. Maavarade hankimine
9. Päästeteenistus
10. Täpse aja teenistus
11. Eraisikud





## Kasutaja seade

Militaarne kasutus
Tsiviilametid
Eraisikud

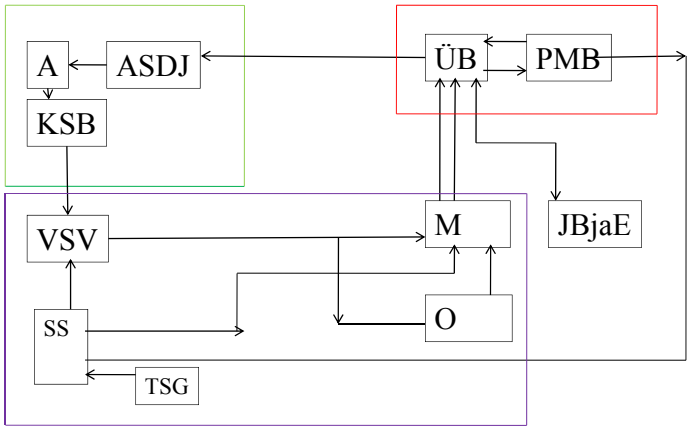
Kõigil:
- Raadiosageduslik osa koos signaalide primaartöötlusega

Erinevus:
- Arvutamine
- Juurdepääs pseudokaugustele (DGPS)





## Kasutaja seade struktuurskeem



## Tähistus

Antenn ja kõrgsagedusosa
- A – antenn
- ASDJ – antenni suunadiagrammi juhtimine
- KSB – kõrgsagedusblokk





## Tähistus

Arvuti
- ÜB – ühenduste blokk
- PMB – protsessorite ja mälude blokk





## Tähistus

Vastuvõtja
- VSV – vahesagedusvõimendi
- SS – sagedussüntesaator
- M – mõõtmine
- O – otsing
- TSG – tugisageduse generaator





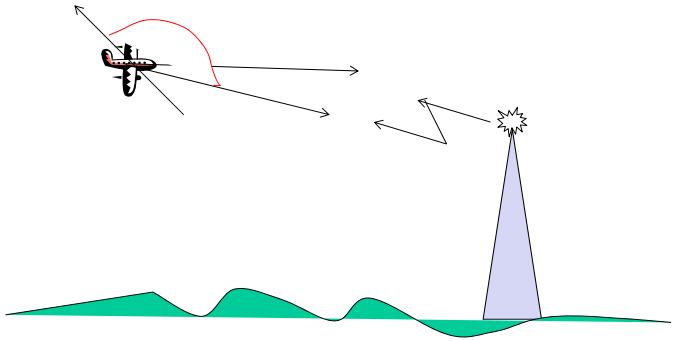
Pärast otsingut

Sagedus järelhäälestus
Sageduse faasiline järelehäälestus
Aja järelehäälestus
Signaalisageduse järgimine
Ajalise viite järgimine

# 18. Raadiopeilimine

on EML kiirgusallika suuna määramine

a. Õige peiling (asimuut on nurk P – L suuna ja kiirgusallika suuna vahel )
b. Suhteline peiling







## Peilimine on vajalik

1. Raadiomonitooringuks
2. Terrorismivastases võitluses
3. Kaitseotstarbeliselt
4. Ühispöördumisega raadiosüsteemide jaoks
5. Teadusuuringuteks

Alustati väga vara 1917 aastast alates

*Raamat:*
*Anatoly Rembovsky* ***Radio Monitoring: Problems, Methods and Equipment,***
Springer, 2009





## Peilijate liigid Meetodid:

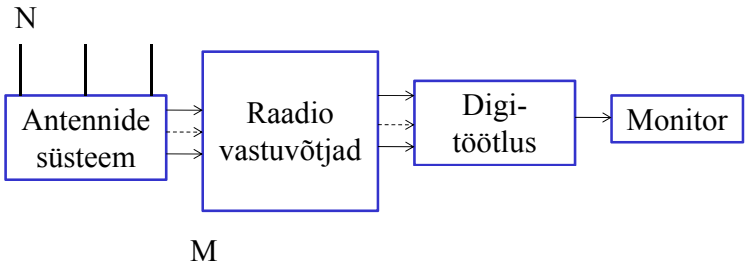
1. Keerlevate antennidega
2. Kahe vastuvõtu kanaliga (*Watson-Watt ja Adcock*)
3. Pseudo – dopplerilised (*Quasi-doppler*)
4. Interferomeetrid
   - Faasilised laias sagedusalas
   - Korrelatiivsed interferomeetrid (*correlative interferometer CMI)*

Lai sagedusala, kallid, väike kiiretoimelisus





## Peilija struktuurskeem




Täppispeilijad : viga alla 1 kraadi näiteks 30MHz kuni 1300 MHz / 9 AE/

# Antennid

1. Kokku N tükki, mis võivad olla
   - Paigutatud erinevalt:
     - Joonele
     - Ringile
     - .....
   - Olla erinevad
     - Raamid
     - Koonilised ja bikoonilised vibraatorid
     - Logperioodilised
     - Lainekanalantennid
     - .....





# Vastuvõtjate plokk

1. Monopulss - peilijates
   - N = M (tavaliselt keerulised)
   - Vajalik sagedussüntesaator
   - Kalibreerimine
2. Tavalised
   - M (1 kuni 3)< N;
   - Kommutatsioon , tavaliselt järjestikku
   - Antenni elemendid lülitatakse ümber
   - Väljund on vahesagedusel





# Digitöötlus

1. A/D muundamine
2. Määratakse asimuut EML kiirgusallikale
3. Tihti selles plokis tehakse spektraalanalüüs
4. Vahel ka digitaalne
   - demodulatsioon ja
   - dekodeerimine





# Monitor

1. Nagu meeldib operaatorile
2. Arvuti
   - Annab peilimistulemuse
   - Annab spektrid
   - Juhib seadmeid
   - Salvestab tulemid
   - Teeb protokollid ja aruanded

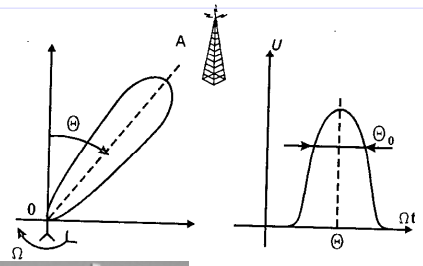
# Peilija tehnilised karakteristikud

1. Täpsus
2. Tundlikkus
3. Häirekindlus
4. Kiiretoimelisus
5. Eraldusvõime
6. Sagedusala
7. Peilitava signaali liik
8. Paigaldamisaeg
9. Kaal ja gabariidid
10. Maksumus
11. Kasutamise keerukus





# Peilimine keerlevate antennidega: maksimummeetod




$$U_A = h_A E F[\alpha, \beta]$$

$$\delta\Theta = 0,2\Theta_0 \quad \text{täpsus}$$

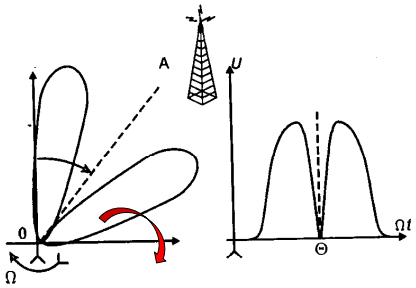
$$U_A = U_{max} F[\Omega t - \Theta]$$

$\Omega$ - antenni pöörlemise ringsagedus

Fig. 8.11 Main parts of ARK-RP3 handheld radio direction finder: 1 – ARK-PP wrist control panel; 2 – Handle for directional antennas; 3 – Receiving and processing unit; 4 – Directional antennas in the bag

# Peilimine keerlevate antennidega: miinimummeetod

Kahe antenniga




$$\delta\Theta = 0,1\Theta_0$$

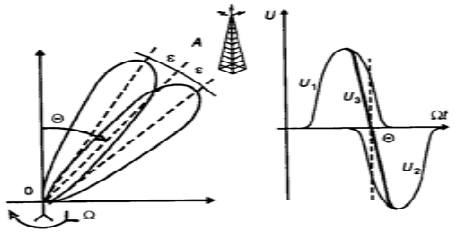
Väiksem täpsus kui SNR on madal





# Peilimine keerlevate antennidega: võrdsete signaalide meetod

*equisignal method*



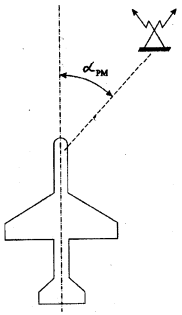

$$U_A = U_1(\Theta) - U_2(\Theta) 0$$

$$k\left[F(\Theta+\varepsilon) - F(\Theta-\varepsilon)\right]$$

$$\delta\Theta = 0,05\Theta_0$$

- Suurem täpsus võrreldes maksimummeetodiga
- Suurem tundlikus võrreldes miinimummeetodiga

# Raadiokompass: suhteline peiling




1. Tavakompass vahel ei tööta.
2. Raadiomajaka asemel võib olla mõni teine kiirgusallikas
3. Lennuki asukoht on teada
4. Lennuki kursinurk on ka teada
5. Kasutuses on raam ja varrasantennid

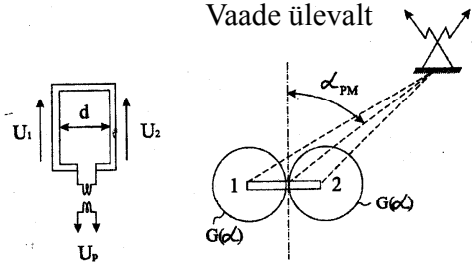
*Radio direction finder*





# Raadiokompass raam- ja varrasantenniga

Vaade ülevalt



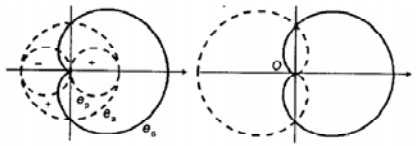

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot d \cdot \sin\alpha$$

$$U_R = U_1 = U_2 = U_R \cdot \sin\alpha \cdot \sin\omega_0 t$$





# Raadiokompass raam- ja varrasantenniga: valemid



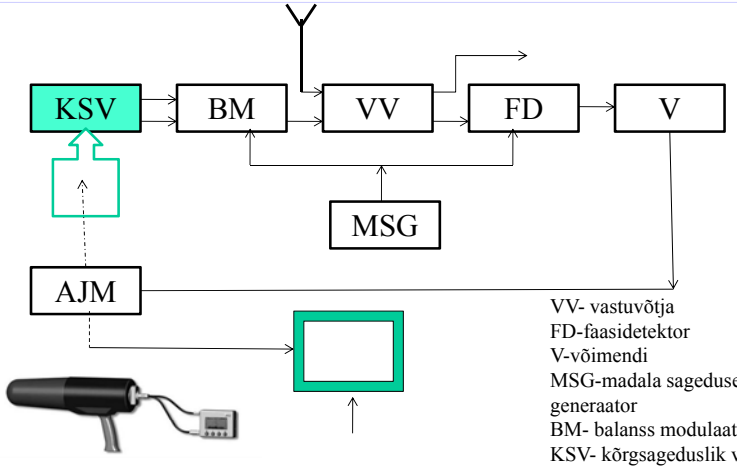
Raami pinge nihutatakse 90 kraadi ja liidetakse varrasantenni pingega

$$U_R \sin\alpha \cdot \cos\omega_0 t + U_R \cos\omega_0 t =$$
$$U_R \left[1 + \sin\alpha\right] \cos\omega_0 t$$





# Raadiokompass raam- ja varrasantenniga: struktuurskeem




VV- vastuvõtja
FD-faasidetektor
V-võimendi
MSG-madala sageduse generaator
BM- balanss modulaator
KSV- kõrgsageduslik võimendi
AJM- amplituudi mõõtur (***selsyn sensor)***

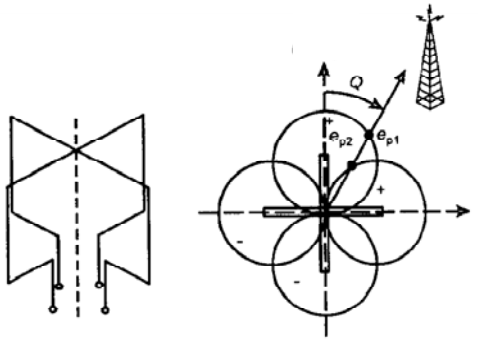
## Raadiokompass raam- ja varrasantenniga: tehnilisi karakteristikuid

| | |
|---|---|
| 1. Sagedusala | 120kHz kuni 1240kHz |
| 2. Tegevuskaugus | 250 – 500 km<br>H 0 10km |
| 3. Tundlikkus | ~10 - 30µv<br>Signaal 15W – vv väljundis<br>Müra 10 W |
| 4. Täpsus | ~3 kraadi |





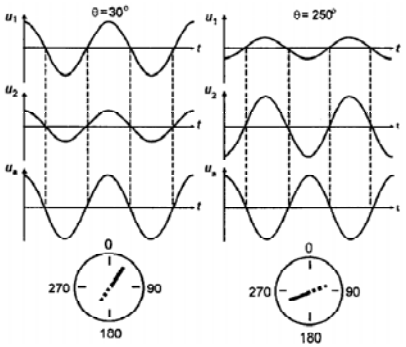
## Raadiokompass kahe raamantenniga








## Raadiokompass kahe raamantenniga: pingete diagrammid

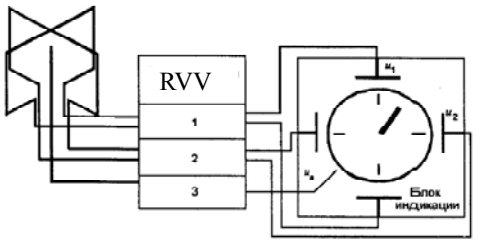


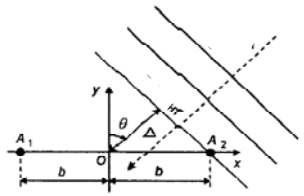

$$U_{R1} = U_R \cdot \cos\alpha \cdot \sin\omega_0 t$$
$$U_{R2} = U_R \cdot \sin\alpha \cdot \sin\omega_0 t$$
$$tag\varphi = \frac{U_{R1}}{U_{R2}} = tag\alpha$$





## Raadiokompass kahe raamantenniga: struktuurskeem




Peilimispaari lainefrondid ja käiguvahed

## Raadiokompass kahe raamantenniga: mõningad tehnilised karakteristikud

| | |
|---|---|
| 1. Sagedusala | 150kHz kuni 1800kHz |
| 2. Tegevuskaugus | 200 – 400 km<br>H 0 10km |
| 3. Tundlikkus | ~5 µv<br>Signaal 15W – vv väljundis<br>Müra 10 W |
| 4. Täpsus | < 3 kraadi |





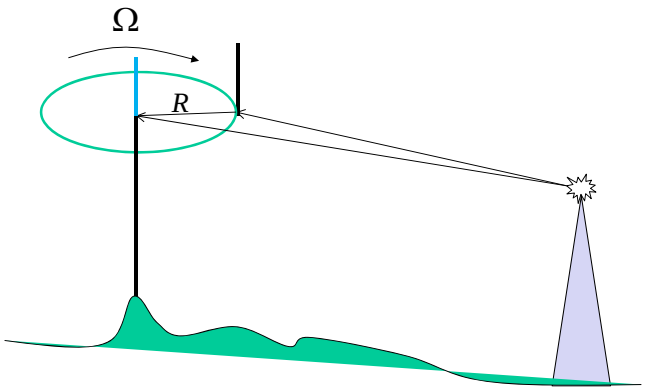
## Dopplerpeilija ja pseudodopplerpeilija

1. Saatja ja vastuvõtja vahelise liikumise tulemina tekib sageduste doppleri nihe, mis on tekitatud kiiruse radiaalkomponendist.
2. Kiiruse komponendid tekivad vastuvõtu antenni keerlemisest.
3. Kui vastuvõtu antenn keerleb, siis selle aja jooksul, mil antenn eemaldub kiirgusallikast on doppleri sagedusnihe negatiivne ja lähenemise aja jooksul positiivne.
4. Iga sagedusega on seotud faasid.
5. Moodustatakse võrdsete faasidega pinnad või jooned.





## Dopplerpeilija








## Dopplerpeilija

Valemid musta ja sinise antenni vaheline faasinihe

$$\varphi_A = \frac{2\pi R}{\lambda}\sin\left(\Omega t + \Theta\right)$$

$$\Delta\omega_A = \frac{d\varphi_A}{dt} = \frac{2\pi R\Omega}{\lambda}\cos\left(\Omega t + \Theta\right)$$

## Doppler- ja pseudodopplerpeilija

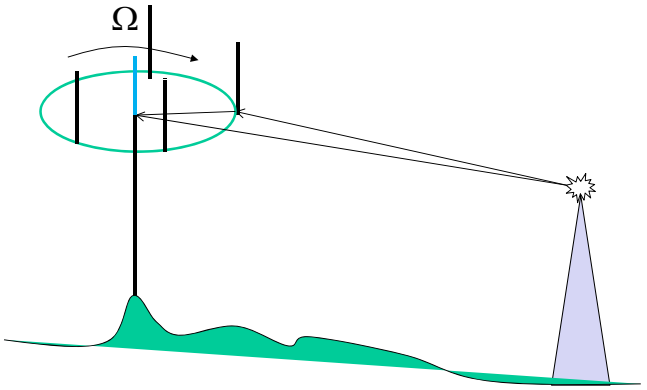
1. EML kiirgusallikas on AM, SM või FM ga

Ω on suurusjärgus 100 kuni 150Hz ja kasutades
Keskendamist mitme keerlemisperioodi kohta,
saab vähendada SM või FM mõju peilimistäpsusele.
AE vaheline kaugus peab olema mitte vähem, kui λ/2.
Praktiliselt 1/3 minimaalsest λ





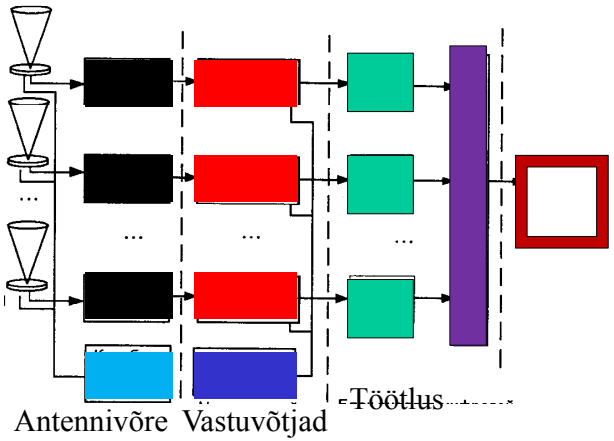
## Pseudodopplerpeilija (antenni elemendid kommuteeritakse)








## Faasiline interferomeeter








## Faasiline interferomeeter

Antenn koosneb N bikoonilisest antenni elemendist
Antenni buffer
Vastuvõtja
Kalibreerimisgeneraator
Sagedussüntesaator
A/D muundaja
STP
Arvuti

## Faasiline interferomeeter

Valemid N – kanalite jaoks (N AE ja N vastuvõtjat)
Antenni võre keskel ja iga AE faasikeskmes:

$$e(t)_{AVkeskel} = E_0 \sin\left(\omega t + \varphi(t) + \varphi_0\right)$$

$$e_m(t)_{AVm} = E_0 \cos\left(\omega t + \varphi_m(t) + \varphi_{0m}\right) =$$

$$E_0 \sin\left(\omega\left(t + \tau_m\right) + \varphi_m\left(t + \tau_m\right) + \varphi_{0m}\right) = \text{kitsas riba}$$

$$E_0 \sin\left(\omega t + \omega\tau_m + \varphi_m(t) + \varphi_{0m}\right) =$$





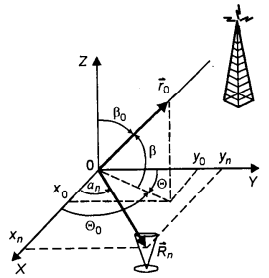
## Faasiline ja korrelatsiooniline interferomeetrid

1. Paljude kanalitega peilijad moodustuvad mitme AE , millised on monopulss tüüpi

$$\vec{r}_0 = \left[x_0; y_0; z_0\right]^T$$

$$\vec{R}_m = \left[x_m; y_m; z_m\right]^T$$

$$\Delta_n = \left(\vec{r}_0 \square \vec{R}_m\right)$$








## Faasiline interferomeeter

Valemid N – kanalite jaoks (N AE ja N vastuvõtjat)
Antenni võre keskel ja iga AE faasikeskmes:

$$e_m(t)_{AVm} = E_0 \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}\left(\vec{r}_0 \square \vec{R}_m\right) + \varphi(t) + \varphi_0\right)$$

$$\vec{E}_m = E_0 \exp j\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}\left(\vec{r}_0 \square \vec{R}_m\right) + \varphi(t) + \varphi_0\right)$$

$$\vec{E}_m = E_0 \exp j\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}\left(x_0 x_m + y_0 y_m + z_0 z_m\right) + \varphi(t) + \varphi_0\right)$$

$$\left(x_0 x_m + y_0 y_m + z_0 z_m\right) = x_m \sin\beta_0 \cos\Theta_0 + y_m \sin\beta_0 \sin\Theta_0 + z_m \cos\beta_0$$

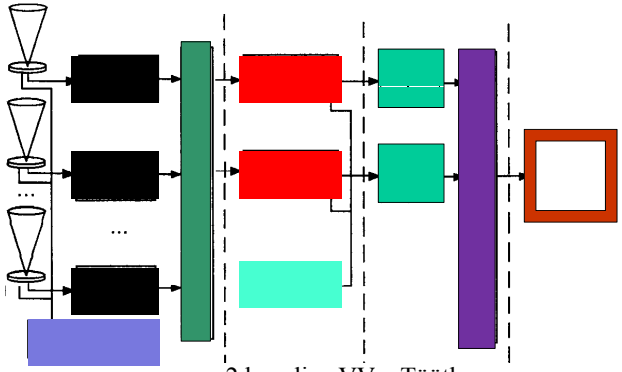




## Faasiline interferomeeter

Valemite järgnevate lihtsate trigonomeetriliste teisendustega saame korraga nii EML kiirgajale suuna asimuudi ja kohanurga
Vältida mitteühesust (kui faasinihe ületab 360 kraadi). Praktiliselt 180 kraadi. Selleks antenni elementide vaheline kaugus ei tohi ületada λ/2. Mida suurem N, seda suurem täpsus.
Laiaribalistes FI kasutatakse mitme baasiga AE. Baasid valitakse optimaalselt
Tavaliselt N = 3+1 - paigutatud võrdhaarse kolmnurga tippudesse (alla 30MHz) või ringile (kõrgemad sagedused)

## Korrelatsiooniline interferomeeter








## Korrelatsiooniline interferomeeter

Antenni buffer
Antenni elementide kommutaator
Vastuvõtja
Kalibreerimisgeneraator
Sagedussüntesaator
A/D muundaja
STP
Arvuti

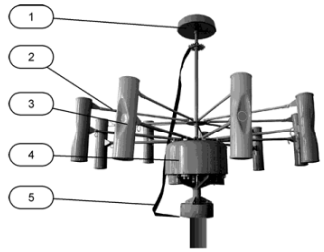



**Fig. 8.40** Antenna-receiver unit of ARTIKUL-M4 direction finder: 1 – Antenna array 1,000–3,000 MHz; 2 – Fold-down cross-arm; 3 – Antenna element 22.5–1,000 MHz; 4 – ARU case; 5 – Mounting strap





## Korrelatsiooniline interferomeeter

Aluseks on idee, et võrrelda AE mõõdetuid faasinihkeid teoreetiliste erinevate suundadega kiirgusallikale arvutatud ruumilise signaali faasinihetega. Arvutada ruutkeskmine viga või korrelatsioonikordaja. Otsus võtta vastu maksimumi järgi.

Praktiliselt on vastuvõtja kahe kanaliga ja koherentne
Vastuvõtjal on kaks sisendit, signaali sisend ja tugisisend.
Antennid elementide paarid lülitatakse ümber järjestikku vastuvõtjate sisenditesse.



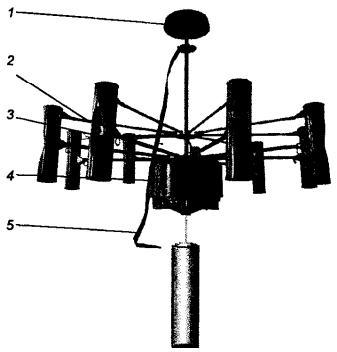


## Korrelatsiooniline interferomeeter

AE paigutatakse tavaliselt asimuuttasapinnale
N peab olema vähemalt 3
AV peaks olema sümmeetriline kindlustamaks skaneerimine 360 kraadi ulatuses
Praktikas kasutatakse ühe või kahe ringiga võrdsetele kaugustele paigutatud AE, kas on keskmise elemendiga või ilma.
Peilingu arvutamine võtab kaua aega.
Lahendus võib olla mitmebaasiline ja optimaalne.

## Antennivõre
## 25MHz kuni 3GHz

Kaks antenniringi:
1. 1GHz kuni 3 GHz
2. AE hoidjad
3. AE 25MHz kuni 1GHz
4. Korpus
5. Kinnitusrihm








## Raadioluure koondülesanne

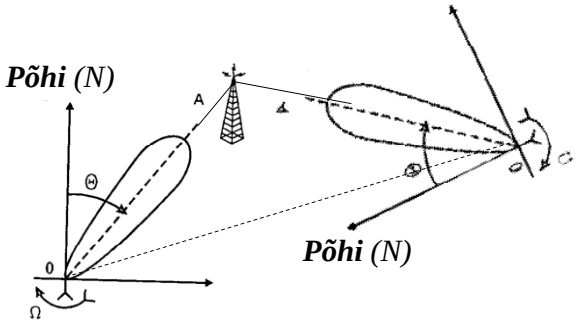
Avastada raadiokiirgus
EML kiirgusallika asukoha määramine
Modulatsioonimeetodi kindlaks tegemine ja selle parameetrite mõõtmine
Kodeeritud ja salastatud raadioedastuste hõive
Mõõtma peab
- sagedust, ribalaiust
- Modulatsiooni parameetreid
- peilinguid ja EML kiirgusallika asukohta,
- elektrivälja tugevust või võimsus tihedust





## EML kiirgusallika asukoha määramine

1. Nurkmeetodid

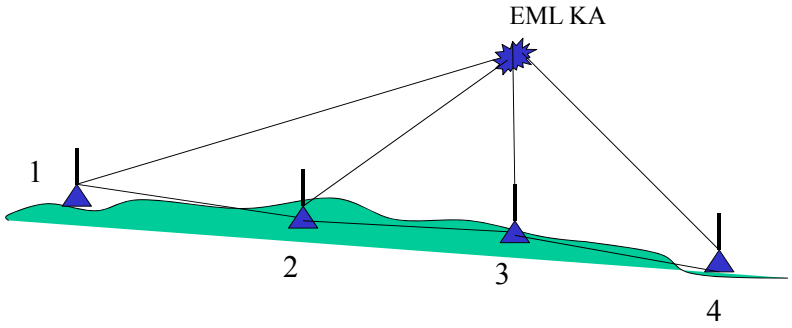







## EML kiirgusallika asukoha määramine

2. Kauguste vahe meetod



## EML kiirgusallika asukoha määramise kauguste vahe meetod

Baas i – j, mõõdetakse

$$\Delta\tau_{12} \rightarrow D_1 - D_2 \rightarrow \Delta D_{12}$$
$$\Delta\tau_{23} \rightarrow D_2 - D_3 \rightarrow \Delta D_{23}$$
$$\Delta\tau_{34} \rightarrow D_3 - D_4 \rightarrow \Delta D_{34}$$
$$\ldots\ldots\ldots jne$$
$$\Delta\tau_{ij} = \frac{\Delta D_{ij}}{c}; \Delta D_{ij} = \Delta\tau_{ij} \cdot c$$





## 19. Raadio(luure)sõda. (*Electronic Warfare*)

- Kasutatud kirjandus.
  - Ю. М. Казаринов «Радиотехнические системы» 1999 (J. M. Kazarinov)
  - R. Skaug, J.F. Hjelmstad "Spread Spectrum in Communication" 1985
  - S. A. Vakin, L. N. Shustov, R. H. Dunwell "Fundamentals of Electronic Warfare" 2001
  - D.C. Schleher "Electronic Warfare in Information Age" 1999
  - R.G. Wiley Electronic Intelligence: The Analysis of Radar Signals II edition 1993

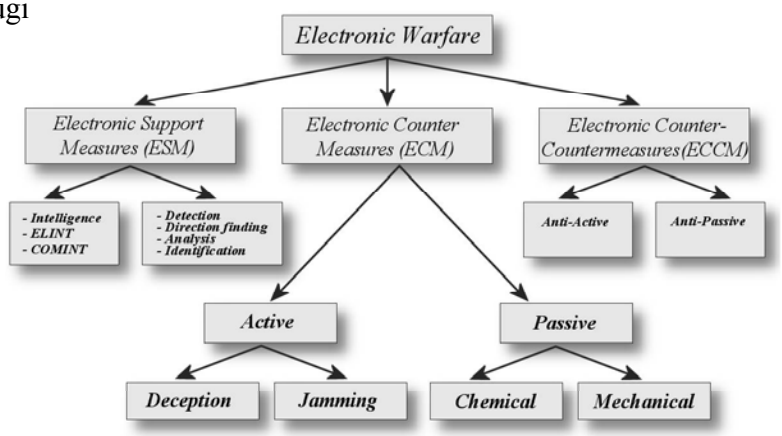




## Elektrooniline sõda

Elektromagnetkiirguse ja suunatud energia kasutamine sõjaks

1. ES tugi
2. ES
3. OT




http://www.radartutorial.eu/16.eccm/ja05.en.html

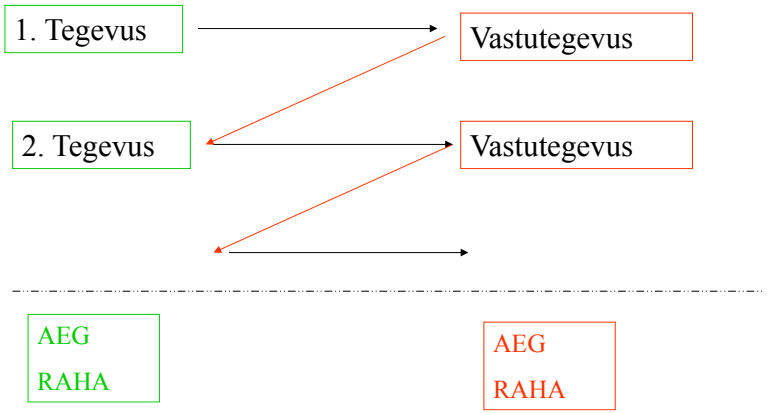




## Eesmärgid

| OMAD<br>Meie<br>(seadmed) | VAENLANE<br>Nemad<br>(seadmed) |
|---|---|
| 1. Paigaldada omad seadmed ja kindlustada nende töövõime<br>2. Vastutegevus igale vaenlase püüdele pidurdad või kasutada infovoogusid | 1. Avastada ja/või määrata seadmete asukoht<br>2. Salakuulamine (*eavesdroping*) ja/või analüüs<br>3. Infovoogude blokeerimine (*jamming*)<br>4. Väärinfo sisestamine (*spoofing*)<br>5. Strateegia vahetus |

# Tegevused








# Maksumused

$M_0$ → Meie seadmete kasutamise maksumus meile

$M_v$ → Vaenlase seadmete kasutamise maksumus vaenlastele

$H_0$ → Vaenlase seadmete hävitamise maksumus meile

$H_v$ → Meie seadmete hävitamise maksumus vaenlasele





# Indeksid

$$\eta_0 = \frac{M_0}{H_0 + M_0} \to 1$$

$$\eta_v = \frac{M_v}{H_v + M_v} \to 0$$





# Raadiosõda

On osa elektroonilisest sõjast.
Koosneb

1. Raadioluure
   - Sagedusala monitooring
   - Vastase asukoha määramine
2. RT vastutoime
   - Suunata raadiolained vastasele (aktiivne häire)
   - Imiteerivate signaalide kasutamine (i.k. *zombi*)
   - Passiivsed meetodid
3. RT maskeering
4. RT kaitse

## Raadiosõda

On osa elektroonilisest sõjast.
Koosneb

1. RT maskeering
   - Kaitsta end raadioluure eest viia oma seadme(te) avastamise tõenäosus võimalikult madalale. (Hinnatakse tõenäosusega). Seadmete RT kvaliteet.
   - Mõne suure RJ kõrval või taga
   - Kaitsev varjestus (kuni 100 dB)
2. RT kaitse
   - Eraldamine (ruumiline, sageduslik, ajaline, amplituudiga)





## Monitooring on esmane tegevus raadioluureks

1. Sagedusala monitooring väga laias alas.

   Sagedusala analüüsi võib teha
   Järjestikku või
   Paralleelset
   Otsene vastuvõtmine
   Töötlemine sagedusaknas (R&S 10 kuni 30 MHz)





## 1. Sagedusala analüüs

1. Superheterodüün vastuvõtmine.

$$f_s - f_h = f_v$$

$$f_v = f_{vo}, kui\ \ f_s - f_h = const$$

$$f_{s1} \div f_{s2}$$

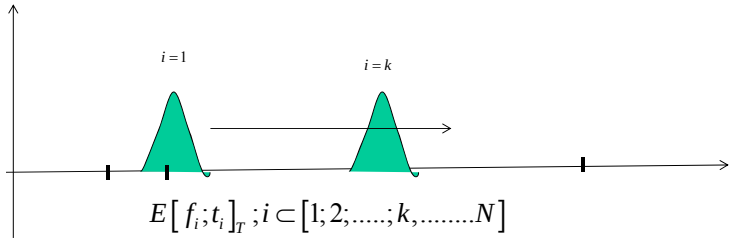
$$f_{h1} \div f_{h2}$$

2. Otsene vastuvõtmine





## Järjestikuline sagedusala analüüs (superheterodüün)




$$E\left[f_i; t_i\right]_T; i \subset \left[1; 2; .....; k, .....N\right]$$

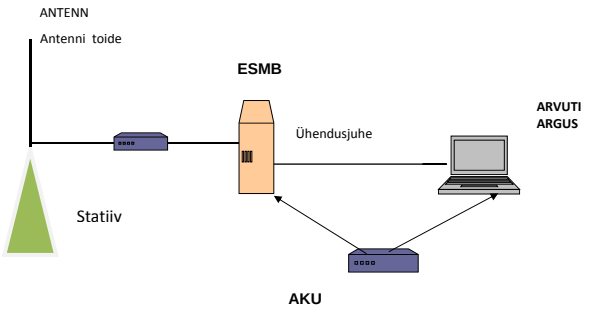
$$f_i \div \Delta f$$

$$t_i$$

$$t_1; t_2; .....$$

$$f_1; f_2; .....$$

## Sagedusala järjestikune analüüsi seadmed








## Sagedusala monitooringu tulemus

Järjestikulise monitooringu üldistatud tulemiteks elektrivälja tugevuse $E$ ühikutes fikseeritud ESMB seadistuste (VV seadistused) ja elektriliste paigalduste korral on:

$$E\left[\, f(t_i), p_{H,V}, kT = t, A_{GK}, LA(f) \,\right]_{\substack{VV\ Seadistused \\ Elektrilised\ paigaldused}} \quad (dB\mu V/m)$$





## Sagedusala monitooringu tulemus

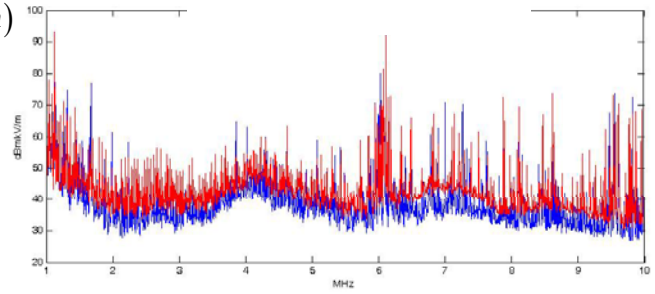
Väljatugevus sagedusel, mida mõõdetakse kindlal ajamomendil
asukoha geograafilised koordinaadid,
mõõteantenni sageduskäik
on monitooringu tsükli järjekorra number;
on ühe sagedusala monitooringu aeg.
Tüüpiline sagedusala monitooringu pilt on esitatud joonisel 1.





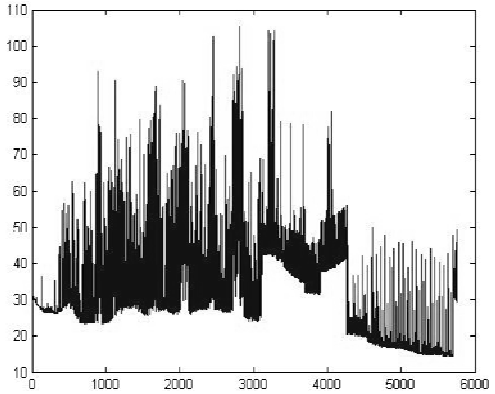
## Üks monitooringu pilte

$E\left(dB\mu v/m\right)$



## Üks monitooringu pilte

$E\left(dB\mu v/m\right)$







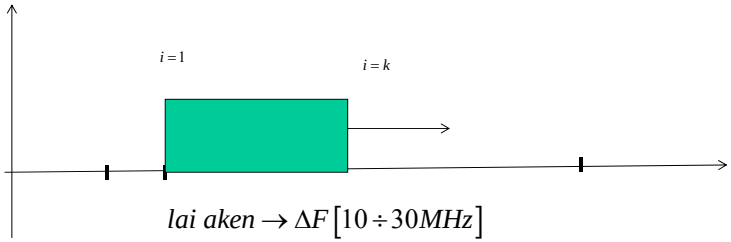

## Monitooring peab olema kompleksne

1. Vastuvõtja järjestikuliseks sagedusala monitooringuks on superheterodüün – vastuvõtja
2. Komplekteeritud koos antenniga
   - Aktiivantennil on silutus antenni sageduskäik
3. Töötab koos arvuti ja juhtprogrammiga
   - Arvuti paneb paika VV tehnilised parameetrid: ribalaiuse, detektori tüübi, ümberlülitused jne vastavalt sagedusala standarditele
   - Salvestab tulemused, natuke töötleb ka
4. Elektritoide!!!!!





## Järjestikuline sagedusala analüüs (superheterodüün)




$lai\ aken \rightarrow \Delta F\left[10 \div 30MHz\right]$

$\Delta F \rightarrow FFT$

$t_j; \Delta F$ □

$\sum_{j=1} a_j \sin(\omega_j t + \varphi_j)$





## Mõtlemiseks

$lai\ aken \rightarrow \Delta F\left[10 \div 30MHz\right]$

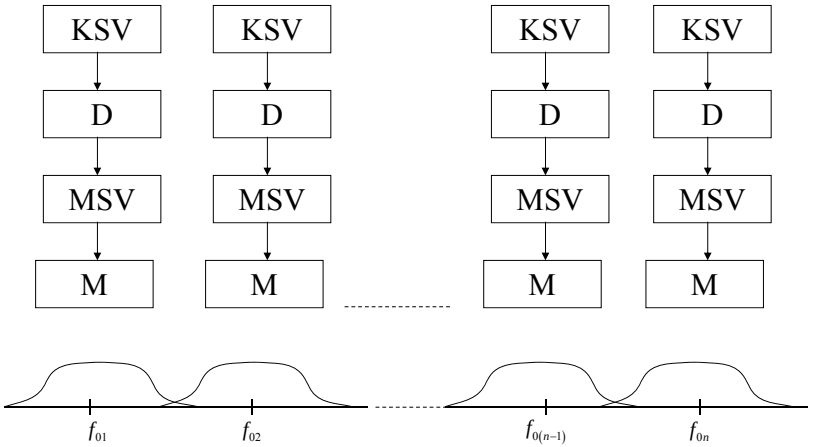
$\Delta F \rightarrow FFT$

$t_j; \Delta F$ □

$\sum_{j=1} a_j \sin(\omega_j t + \varphi_j)$

$[\sum_{j=1} a_j \sin(\omega_j t + \varphi_j)]^2$

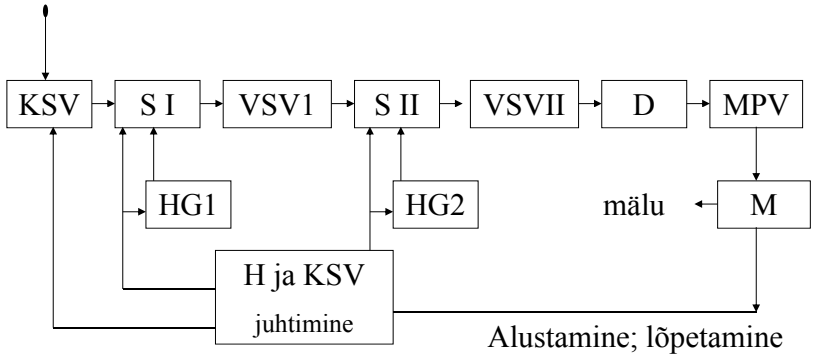
## 2. Otsene vastuvõtt (hoiatusteks).








## 2. Superheterodüünvastuvõtt








## Tingimused

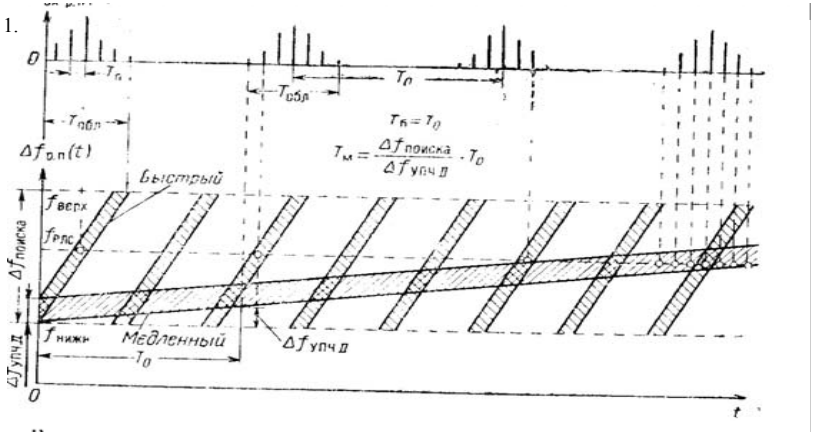
- 1. Antenni suunadiagramm
- 2. Kandevsagedus.





## Otsing

1.



# Vahesagedusvõimendid

- Ribalaiused

$\Delta f_1$

$\Delta f_2$





# Aegdiagramm

- Valemid

HG1---- aeglane muutus

HG2----kiire muutus

$$T_k = \frac{\Delta\alpha_R}{360} T_0 = \frac{\Delta\alpha_R}{360} \frac{60}{n_\alpha}$$

Otsing:

$T_{kiire} = T_k$

$$T_{aeglane} = \frac{\Delta f_{otsing}}{\Delta f_2} T_k$$





# Analüüs

- Kandevsagedus
- Kestvus
- Kuju
- Kordussagedus
- Seire moodus
- Antenni suunadiagrammi
- Polarisatsioonid ja nende intensiivsused





# Raadioluure tegevuskaugus

- Tavaline raadioliini tegevuskaugus

$$D_{L\max} = \sqrt{\frac{P_k G_k \lambda^2 \gamma}{16\pi^2 P_{\min}}}; \gamma < 1$$