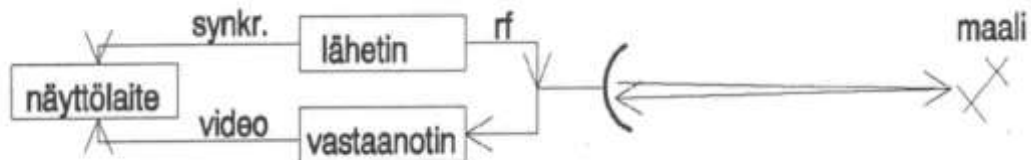


Radioaaltotutkalla (RADAR Radio Detection And Ranging) voidaan mitata kohteen (lentokone, alus, ajoneuvo, ihminen, sääilmiöt, kartoitus tms.)

- sijainti (etäisyys, suunta ja korkeus)
- radiaalinen nopeus dopplersiirtymästä
- vektorinopeus, lasketaan sijaintimuutoksista
- ominaisuuksia (koko, luonne, liike)



Tutkan periaate

- lähetään suunnattu, moduloitu rf-signaali (pulssisarja, cw, pulssi)
- vastaanotetaan kohteesta heijastunut signaali, josta mitataan edestakainen kulku-aika (saadaan matka: 1 μ s vastaa 150 m) tai/ja doppler-siirtymä (saadaan nopeus, matka, liike, läheisyys)
- suunta saadaan keilan suunnasta tai/ja keilaparin amplitudi-/vaihe-erosta

Tutkatyyppejä

- valvontatutka (ilma- ja merivalvonta-, lähestymis-, maalinsoitus-, säätutka)
- lentokoneen laskeutumistutka (maassa)
- seurantatutka: takaisinkytkentä antennille; kartiokeilaus, monopulssi (tulenojohto-, ohjus-, satelliittiseurantatutka)
- lentokoneen korkeusmittari
- nopeustutka (lentokoneen nopeusmittari, poliisi-liikennetutkat)
- lentokoneen doppler-säätutka vaarallisten syöksyvirtausten havaitsemiseksi laskussa
- tykin tai krh:n paikantamistutka: mitataan ammuksen lentorata ja lasketaan sijainti
- ammussytytintutka (doppler)
- liikkeen tunnistustutka
- kartoitustutka (topografia, maaperä)

Ongelmia, joita tutkatekniikassa joudutaan ratkaisemaan

- pitkä mittausetäisyys (lähetyksenenergian tarve kasvaa etäisyyden neljänteen potenssiin)
- mittaustarkkuus ja erottelukyky (ongelma etäisyyden kasvaessa)
- maakaiut, merikaiut (aallokko) ja sääkaiut (vesipisarakaiku kasvaa taajuuden kasvaessa)
- antennin sivukeilat (lähialueella harhamaaleja, häirinnälle alttius)
- häirintä (sotilaallinen)
- keilan taipuman muutokset (ilmanpaine)
- heijastumat meren pinnasta (aiheuttavat keilan vertikaalista sormekkeisuutta)

Ongelmia, joihin ei ole teknillistä ratkaisua tavanomaisella yhden tutkan mittausperiaatteella

- katveet: maanpinnan kaarevuus, mäet ja vuoret, sade (vaimennus kasvaa taajuuden kasvaessa)
- kanavointi (vertikaalinen): poikkeuksellisen ilmastollisen tilan aiheuttama keilan jakautuminen
- (ionosfääriheijastusta käytävällä matalataajuisella, HF-alueen tutkajärjestelmällä on kehitetty ratkaisu maan kaarevuuden katveen ongelmaan)

Tutkayhtälö (yhdele pulssille, yksinkertaistettu)

– maksimi mittausetäisyys R_{\max}

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_L t G A_e A_m}{(4\pi)^2 W_{\min}}}$$

P_L = lähtimen teho

t = lähetyspulsstin pituus

G = antennin vahvistus = $4\pi A_e / \lambda^2$

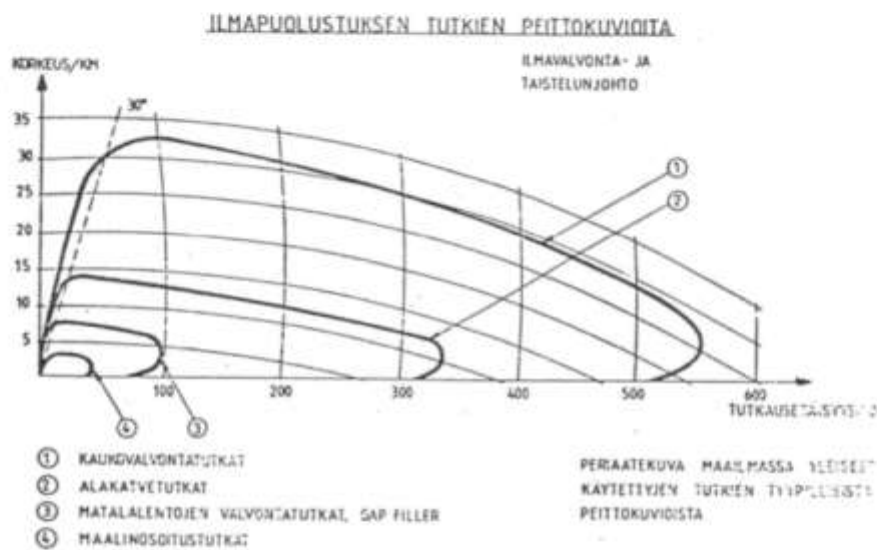
A_e = antennin teholl. heijastuspinta

A_m = maalin " " "

W_{\min} = minimi vastaanottoenergia

λ = aallonpituus

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_L t A_e^2 A_m}{4\pi \lambda^2 W_{\min}}}$$



Hawkins and LaPlant³⁷ performed such a calculation for an X-band radar with the following parameters: peak power = 50 kw, antenna gain = 28.6 db, $\lambda = 3.2$ cm, receiver noise figure = 16 db, and pulse length = $0.6 \mu\text{sec}$. The results are shown in Fig. 12.13 for several rainfall rates. For example, with the above assumptions, a dry-air range capability of 25 nautical miles against a given target would be reduced to 15 nautical miles when operating in light rain.

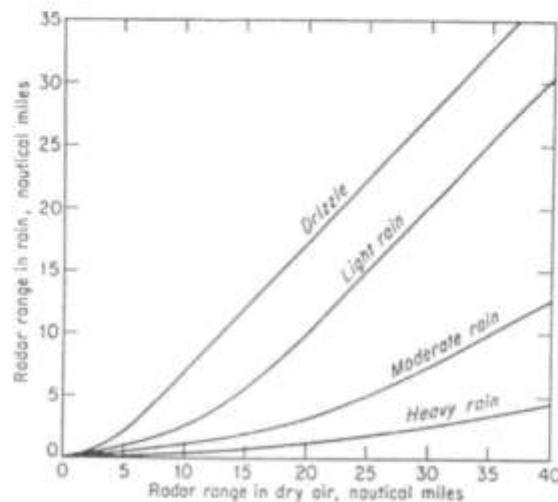


Fig. 12.13. Reduction of radar range due to attenuation in rain. See text for radar parameters. (From Hawkins and LaPlant,³⁷ IRE Trans.)

PULSSITUTKAN LOHKOKAVIO

27.4.1998
päiv 29.8.2012

Pulssitutkalla mitataan maalin etäisyys ja sivusuunta, tai korkeus, tai nämä kaikki kolme dimensiota.

AJASTIN: generoi toistotaajuuden ja siihen synkronoidut muut ohjauspulssit.

LÄHETIN: generoi lyhytaikaiset, suurtaajuiset ja suuritehoiset lähetyspulssit

LV-KYTKIN: ohjaa lähetystehon antenniin ja suojaa vastaanotinta lähetyspulssin teholta, sekä ohjaa kaikusignaali vastaanottimeen. Nykyisin lyhyen kantaman tutkissa lähetyspulssi voi olla toistojakson mittainen, ja siten hyvin pienitehoinen.

TEHONSIIRTOLINJA: aaltoputki; yhdistää LV-kytkimen antenniin.

ANTENNI: muodostaa lähetyksessä ja vastaanotossa kapean, suunnattavan keilan.

VASTAANOTIN: erottaa kaikusignaalin muilla taajuuksilla olevista signaaleista, vahvistaa ja ilmaisee kaikusignaalin, päästää oikeanmuotoisen kaikupulssin läpi, vähentää häiriöitä ja häirintää.

PROSESSOINTI: ilmaisee vaiheilmastusta videosignaalista hyötymaalin väärrien maalien joukosta (välkkeestä)

NÄYTTÖLAITE JA LASKIN: näyttää kuvaputkella maalit ja laskee maalille tai ampuma-arvoille koordinaatit ja lähettää ne. (PPI-näyttö = Plan Position Indikator; näyttää maalit karttapohjalla. RHI-näyttö; etäisyys- ja korkeusnäyttö.)

PULSSITUTKAN LOHKOJEN TOIMINNOT

4.11.1996 päiv 20.8.1999
päiv 29.8.2012

Ajastin

- toistotaajuus määrää mittausetäisyyden (esim. 300 Hz vastaa n.450 km:n mittausetäisyyttä, lepoajan vastatessa 45 km), voidaan vaihtaa mittausetäisyyden tarpeen mukaan (lähetysergia vastaavasti muutettava)
- toistotaajuusgeneraattori (haritus: MTI:n sokeiden nopeuksien eliminointi ks. signaaliprosessointi, häirintäesto, edellisen toistojakson kaikkujen eliminointi)

Lähetin

- moduloivan pulssin generointi
 - koodattu pulssi tyypillisesti muutamasta μs :sta lähes 100 μs :iin: lineaarinen / epälineaarinen fm- tai vaihekoodi $0^\circ/180^\circ$ koodatusti vaihdellen, voidaan lukea ROM:ista DAC:iin, pitkä pulssi vähentää lähetystehon tarvetta ja koodaus parantaa häiriösietoisuutta
 - koodaamaton pulssi tyypillisesti 0,1 – 2 μs , vanhat pidempiäkin esim 5 μs , (vanhoissa tutkissa keinolinja määrää pulssin pituuden), pulssinpituus määrää mitta- ja erottelutarkkuuden; 0,1 μs vastaa noin 4 m mittaustarkkuutta ja noin 15 m erottelutarkkuutta
 - nykyisin on koodattua pulssia käyttäviä tutkia, joissa pulssinpituus on koko toistojakson pituinen. Pulssitehoksi riittää silloin esim 1/1000 vastaavasta vanhojen koodaamattomien tutkien pulssitehosta. Tutkayhtälöstä nähdään, että pulssin energia on määräävä, ei pulssiteho, kun vain erottelutarkkuus pystytään ratkaisemaan, eli $P_L \times t = \text{pulssin energia}$. Lyhyen kantaman vene- ja laivatutkissa käytetään tätä tekniikkaa.
- rf-pulssin generointi: mikro-aaltotaajuus, syntetisaattori, taajuushypitys (häirintäesto ja merivälkevaimennus)
- suurjännitepulssin generointi: keinolinja (kela-kondensaattoriketju), pulssimuuntaja 10 - 100 kV
- rf-pulssin lähetys: klystron ja kulkuaaltoputki (elektronisuihkun nopeusmodulointi), ristikenttävahvistinputki ja magnetron (sähkö- ja magneettikentät ristissä, magnetron itsevärähtelevä), transistorit antennielementeissä; tehot kW \rightarrow MW

L/V-kytkin

- lähetyksen ja vastaanoton kytkennän vaihto antenniin
- kiertoelin (tai 3 dB:n kytkin, jossa passiiviset T/R-putket – vanhoissa tutkissa) + T/R-putki ja PIN-vaimennin (vastaanotinhaarassa)
 - kiertoelin: ferriitit magneettikentässä suuntaavat mikroaaltosignaalin
 - T/R-putki: lähetyspulssin ionisoima kaasu oikosulkee vastaanotinhaaran lähetyspulssin ajaksi
 - PIN-diodi toimii lähialuevaimentimena (STC)

Tehonsiirtolinja

- aaltoputki tai koaksiaalijohto
- pyörivä liitos; koaksiaalirakenne (useampiakin sisäkkäin) ja liukuharjat

Antenni

- käytettäessä samaa antennia lähetyksessä ja vastaanotossa, keilat ovat samanmuotoiset (resiprookkisuus)
- heijastinantenni
 - paraboloidi: syöttöpolttopisteestä torvella tai dipolilla (yksi tai useampi säteilyelementti, esim. monopulssilla 2 tai 4)
 - cosec²; syöttö rakolinjalla, keila korkea ja kapea (valvontatutkat)

- tasoantenni
 - elementtissäteilijät (–antennit)
 - tehon jako elementeille tai päällekkäisille /vierekkäisille rakolinjoille tai elementtilähettimet ja –vastaanottimet
 - vaiheohjaus: Elementtien väliseen vaihesiirtoon perustuen keila saadaan syntymään haluttuun suuntaan lähetyksessä ja vastaanotossa samanlaisena (nopea sähköinen ohjaus vaiheensiirtimillä) tai vastaanotossa välitaajuudella (ks vastaanotin). Lähetettäessä elementtiriveiltä säteileville signaalikomponenteille säädetään sellainen vaihesiirto, että halutussa keilakulmassa signaalikomponenttien vaihe-ero (ilmatilassa) on nolla, muissa suunnissa jotakin muuta, jolloin samavaiheisessa suunnassa signaali vahvistuu muihin suuntiin verrattuna. Vastaanotossa tietyistä kulmista tuleva kaiku saapuu kauempana oleville elementtiriveille (elementeille) viivästyneenä, eli syntyy vaihe-eroa, joka vaiheensiirtimillä kompensoituna nollaksi, saa keilan aikaan ko suuntaan, kuten lähetyksessäkin tapahtui.
 - monopolssilla kulmatarkkuutta voi parantaa
- antennin vahvistus kasvaa (keila kapenee), kun pinta-ala kasvaa tai aallonpituus pienenee (ks tutkayhtälö); sitä kapeampi keila mitä leveämpi antenni (aallonpituuden suhteessa): poikkileikkaukselta ellipsi keila syntyy vastakkaisuuntaisesti ellipsillä tai suorakaideantennilla
- sivukeilataso pieni, kun keskeltä tehonsyöttö suurempi (haitta: keila levenee)
- polarisaatio: pysty- tai vaakapolarisaatio ja usein sään mukaan valittavissa ympyrä- ja lineaarisen polarisaation väliltä (tyynen merenpinnan kaiku pienempi vaakapolarisaatiolla)
- keilan jako vertikaalisuunnassa kahteen osaan: maa- ja merikaiut eivät häiritse ylemmän keilan vastaanottokanavaa
- vertikaalisuunnassa ohjattavalla keilalla tai sormekkeiseksi jaetulla keilalla voidaan vähentää sään häirtäviä vaikutuksia (ja poistaa maa- ja merivälke maahan sijoitetulla tutkalla ylemmiltä keiloilta)
- monopolssiantenni (amplitudimonopolssi): ks monopolssitutkan lohkokaavio. Lähetyksessä yksi keila, vastaanotossa 2 (2D) tai 3 (3D) keilaa. Keilat synnytetään kahtia vastakkaisvaiheisesti jaetulla syöttöpäällä, tai vastaavasti vaihejaetuilla elementtissäteilijöillä. Lähetyksessä lähetyssignaalit ovat samassa vaiheessa, summakanava Σ , mutta vastaanotossa toisella kanavalla eli erotuskanavalla Δ puolet signaalitehosta otetaan vastaan 180° vaihesiirrettynä (kaksi syöttöpäätä tai toinen puoli vaihe-ohjatusta antennista 180° vaihe-erossa). Erotuskeila(t) Δ muodostuu kaksiahaaraiseksi, toisen haaran ollessa samassa vaiheessa summakeilan Σ kanssa ja toisen puolen ollessa 180° vaihe-erossa). (Koordinaattien määrittäminen ks ”Näyttölaite & laskin”).
- keilan ohjaus
 - antennin mekaaninen pyöritys
 - antennin mekaaninen nyökytys
 - pystykeilaus Robinson-keilauksella: heijastimeen syötetään teho kahden metallilevyn muodostamasta kapeasta solasta levyparin takana liikkuvalla (ylös alas vispaavalla tai pyörivällä) syöttöpäällä – haittapuolena pieni keilan nyökytyskulma
 - kartiokeilauksessa syöttöpään pyöritys (*keilan ympyräliikkeen kuvaus puuttuu sivu 10*)
 - vaiheohjaus: pysty /vaaka-keilaus, mutta ei ympäri pyöritys
 - valvonnassa yleensä mekaaninen vaakapyöritys ja vaiheohjattu pystykeilaus
- sivukeiloiden vaimentamiseksi voidaan vastaanotossa käyttää erillistä ympärisäteilevää vertailuantennia (SLB-antennia)

Vastaanotin

- rf-esivahvistus (pienikohinainen, mahdollisimman lähellä antennia)
- rf-sekoitus alas: 1-2 vaiheessa (kahdella sekoituksella estetään peilitaajuuden ilmaisu)
- vt-vahvistus: 1-2 välitaajuutta, taajuuskaistan leveys ja muoto sovitettu omalle pulssimuodolle, logaritminen vahvistus maa- ja merivälkettä vastaan, kyllästymisen (häirinnän seurauksena) esto Dicke-fix rakenteella (laajakaistainen etuvahvistusaste, amplitudirajoittaja ja kapeakaistainen vahvistusaste)

- vaiheilmaistu I & Q eli 0° ja 90°:een ilmaisut; MTI:n ns sokean vaiheen ilmaisun eliminoimiseksi ja koherenttia ilmaisua varten (doppler-suodatin)
- pulssikompressio ennen vaiheilmaisua (ajallinen puristus eli lyhennys ja amplitudin kasvatus): kompressori on sovitettu oman pulssin koodille, kompression avulla saavutetaan pitkällä pulssilla lyhyen pulssin mittaus- ja erottelukyky ja parempi häiriösietoisuus
 - fm-koodi kompressoidaan pulssille sovitetulla akustisella viivelinjalla, joka viivästää tulopulssin eri taajuuskomponentit niin, että ne ovat viivelinjan lähtöpäässä samanaikaisesti summautuneina
 - vaihe-koodi kompressoidaan syöttämällä signaali lähetyspulssin pituiseen viivelinjaan ja summataan sen väliotoista oman pulssin koodille asetetulla kooderilla samavaiheisiksi käännetty osasignaalit
- vastaanotin on suunniteltu omalle pulssille sovitetuksi suodattimeksi S/N-suhteen maksimoimiseksi (vt-vahvistin & kompressio)
- (jos vertikaalimittaus tapahtuu monopulssilla, edelliset toiminnot toisintona erotuskanavalle ja 3D-monopulssilla vielä kolmas samanlainen kanava)
- vaiheistetulla antennilla vastaanottimet voivat sijaita antennissa (ks antenni): keilat voidaan muodostaa tällöin vasta vastaanotossa ja lähetyksessä käyttää laajakulmaista keilaa
 - esim. 8 vertikaalikeilaa vastaanotossa; 60 vastaanotinta. Summataan jokaiseen ”keilakanavaan” ao keilan kulmaa vastaavasti vaihesiirretyt (= viivästetyt) 60 vt-signaalia. Keila muodostuu tällöin samavaiheisten signaalikomponenttien suuntaan (samavaiheisten signaalien summa-amplitudi vahvistuu suhteessa erivaiheisiin). Analogiatekniikalla toteutettuna vaiheensiirtimiä tarvittaneen 7 x 60 – 7 kpl.

Signaaliprosessointi (nykyisin digitaalinen)

20.03.2026

- liikkuvan maalin ilmaisun MTI vaimentaa kiintomaalit: peräkkäisten pyyhkäisyjen* vertaus ja samavaiheisten signaalien ”sammutus”, (kiinteällä toistotaajuudella maalin lentäessä ”sokealla nopeudella”, ilmaisussa vaihe ei muutu peräkkäisillä pyyhkäisyillä ja maali sammuu.)
- tuulen liikuttaman sateen ja silpun vaimennin, FT-nopeus-suodatin (Fourier Transform), jossa on 8 nopeuskanavaa eri nopeuksilla liikkuville - mikroprosessorilla FFT-filter (Fast FT). Peräkkäisten pyyhkäisyjen kaikusignaalit nopeutensa perusteella samavaiheisina valikoituvat yhteen kahdeksasta kanavasta, jossa ne sammutetaan, mutta samassa kanavassa lentokonekaiut erivaiheisina ilmaistuvat, vrt. MTI. Toistotaajuus pitää pysyä vakiona riittävän monen pyyhkäisyn burstin ajan, ja sokeat nopeudet vältetään burstin vaihtuessa.) Muissa kanavissa sade- ja silppukaiut erivaiheisina eivät sammua, mutta kunkin kanavan CFAR ilmaisun ei niitä liian pitkänä tasalataisina kaikuina ilmaise.
- jos sivukeilojen vaimennus on käytössä: vertailulaskenta SLB-signaalin kanssa ja vaimennus
- häirinnän ja muiden häirtatekijöiden ja vaimennusmenetelmät
- pulssin pituusdiskriminointi pld: omaa pulssia lyhyemmät ja pidemmät pulssit hylätään
- pulssin toistotaajuusdiskriminointi prfd: väärällä toistotaajuudella tulevat pulssit vaimennetaan
- videon integrointi (auttaa myös prfd:ssa)
- CFAR-ilmaisukynnyssätöt yhdessä pyyhkäisyssä (Constant False Alarm Rate = vakio virrehälytyssuhde); signaalin tasoa verrataan sen edellä ja jäljessä esiintyviin signaalitasoihin tietyille etäisyyksille saakka ja hyväksytään hyötysignaali tietyillä ehdoilla (amplitudi, lukumäärä, rajattu pituus ym)
- CFAR-ilmaisukynnyssätöt useista pyyhkäisyistä: signaalin tasoa verrataan lähiympäristön (myös viereisten pyyhkäisyjen) signaalitasoihin ja hyväksytään hyötymaaliksi tietyillä ehdoilla (amplitudi, lukumäärä, rajattu pituus ym). Myös edellisten antennikerrosten informaatiota voidaan käyttää vertailussa.
- videokorrelaattori: useampaa peräkkäistä CFAR-ilmaistua pyyhkäisyä verrataan keskenään ja samoissa kohdissa esiintyvä signaali hyväksytään maaliksi, jos se esiintyy tietyistä pyyhkäisymäärästä riittävän monessa, (monopulssivideoille ei voi tehdä korrelointia)

Näyttölaite & laskin

- valvonta- tai maalinsoitustutkalla tms
 - ihminen operoi PPI-kuvalla tai automaattinen maalinseulonta
 - plottien koordinaattien laskenta ja lähetys: maalien sijaintikoordinaatit (xyz, xy tai z), sekä hyöty- että häirtamaaleista
 - seurantojen laskenta ja lähetys: sijainti- ja nopeuskoordinaatit
 - korkeuden laskenta monopulssilla, monikeila-antennilla tai erillisellä korkeustutkalla
- tulenjohtotutkalla
 - kartiokeilauksen virhejännitteiden perusteella antenni ohjataan seuraamaan maalia, ja antennin kulmista ja etäisyydestä lasketaan ampuma-arvot
 - monopulssitutkalla (amplitudi) summa- ja erotusvideoiden etumerkin (vaihe-ero 0° ja 180°) ja amplitudierojen perusteella antenni ohjataan seuraamaan maalia ja antennin (keilan) suuntakulmista ja etäisyydestä lasketaan kulma-arvot

* pyyhkäisy = lähetyspulssien välinen kuuntelujakso eli sweep, näyttölaitteen elektronisuihku pyyhkäisee kuvapintaa kuvan keskeltä reunaan, kun tutkapulssi samanaikaisesti ”pyyhkäisee” ilmatilassa

.....

päiv 20.05.2015

