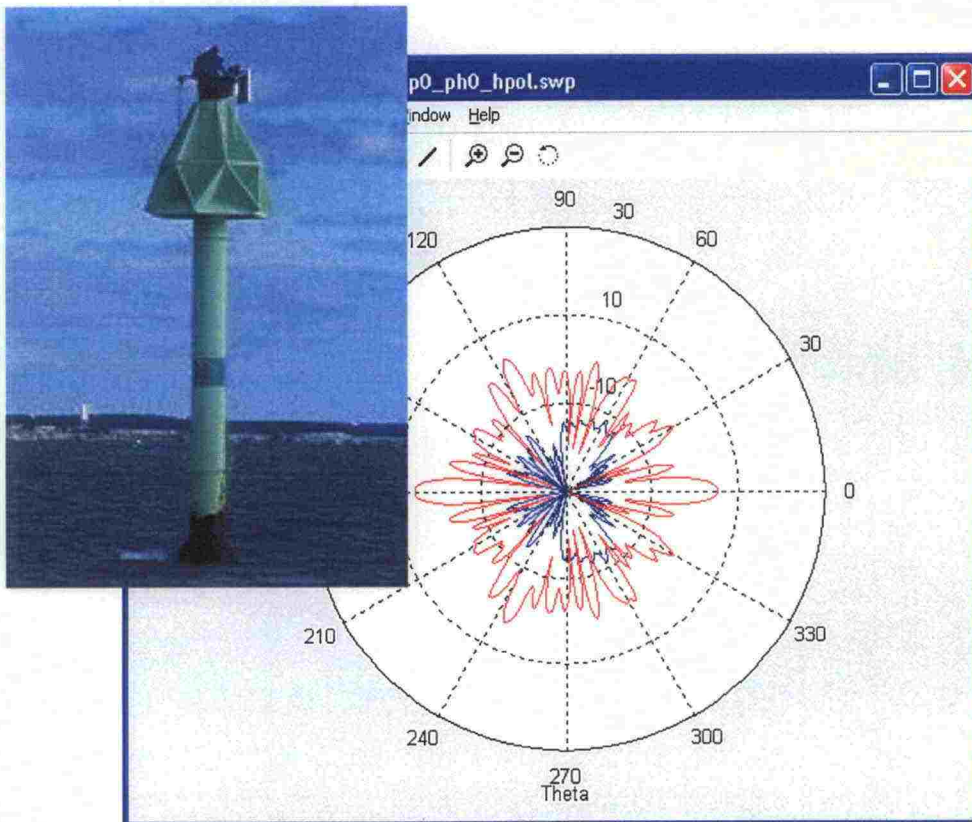


# TUTKAMERKKIEN JA TUTKASOPPIRYHMIEN NÄKYVYYTEEN VAIKUTTAVAT MEKANISMIT


Tutkimus tutkapoikkipinta-alan teoriasta



Helsinki 2004

ISSN 1456 - 9442



Tekijät (toimielimestä: toimielimen nimi, puheenjohtaja, sihteeri) Väylätekninen yksikkö, Risto Joro		Julkaisun laji Merenkululaitoksen sisäisiä julkaisuja	
		Toimeksiantaja Merenkululaitos, Väylänpito	
Tutkimus tutkapoikkipinta-alan teoriasta		Toimielimen asettamispäivämäärä	
Julkaisun nimi <b>TUTKAMERKKIEN JA TUTKASOPPIRYHMIEN NÄKYVYYTEEN VAIKUTTAVAT MEKANISMIT</b>			
Tiivistelmä			
<p>Tutkalta lähetetyn ja kohteesta vastaanotetun tehotiheyden suhdetta kutsutaan tutkapoikkipinta-alaksi (RCS, Radar Cross Section). Yksinkertaistettuna asia voidaan esittää näin. Tutkapoikkipinta-alaan vaikuttavat kuitenkin monet tekijät. Vaikuttavia tekijöitä ovat mm. valaistavan kohteen, kuten tutkamerkin, poijun tai tutkasoppi ryhmällä varustetun viitan asento, muoto ja materiaali sekä tutka-aallon polarisaatio, taajuus sekä valaisevan tutkan suorituskyky. Merellisessä ympäristössä tutkapinta-arvoon vaikuttaa yksittäisinä tekijöinä erityisesti valaistavan kohteen häilyntä, merivälke sekä ennen kaikkea sähkömagneettisen aallon monitie-eteneminen. Jotta monitie-etenemisen vaikutus osattaisiin määrittää lopputuloksesta, täytyy heijastuneiden aaltojen etenemisreitit ja aaltojen vaiheet vastaanottimella tuntea tarkasti.</p> <p>Tämän raportin tarkoituksena on kuvata tutkan teknisten ominaisuuksien, sähkömagneettisen taso-aallon siroamisominaisuuksien, kohteen ominaisuuksien sekä merellisen ympäristön vaikutukset tutkamerkkien sekä viittojen tutkapoikkipinta-alan määrittämisen osatekijöinä. Raportissa selvitetään tutkayhtälön perusperiaatteet ja sähkömagneettisen aallon etenemisvaimennukseen vaikuttavat tekijät, monitie-etenemisen vaikutukset lopputulokseen, RCS -laskennan teoriaa sekä tutkapoikkipinta-alan mittausmenetelmät.</p> <p>Raportti tukee tutkamerkkien ja viittojen näkyvyyden ymmärtämistä ja antaa pohjaa niiden sijoitteluun tutkan näkökulmasta. Työ antaa myös pohjatiedot tutkasoppi ryhmien suunnitteluun, valmistamiseen sekä niihin liittyvien tutkimusraporttien ymmärtämiseen.</p>			
<div style="text-align: right;">  <p>08 MKL</p> <p>9688</p> </div>			
Avainsanat (asiasanat) Tutkapoikkipinta-ala, tehotiheys, sähkömagneettinen tasoaalto, sironta.			
Muut tiedot			
Sarjan nimi ja numero Merenkululaitoksen julkaisuja 07 / 2004		ISSN 1456 - 9442	ISBN
Kokonaissivumäärä 2 + 45 + 3	Kieli Suomi	Hinta	Luottamuksellisuus
Jakaja		Kustantaja	





Tekijät (toimielimestä: toimielimen nimi, puheenjohtaja, sihteeri) Väylätekninen yksikkö, Risto Joro		Julkaisun laji Merenkululaitoksen sisäisiä julkaisuja	
		Toimeksiantaja Merenkululaitos, Väylänpito	
Tutkimus tutkapoikkipinta-alan teoriasta		Toimielimen asettamispäivämäärä	
Julkaisun nimi <b>TUTKAMERKKIEN JA TUTKASOPPIRYHMIEN NÄKYVYYTEEN VAIKUTTAVAT MEKANISMIT</b>			
<b>SISÄLLYSLUETTELO</b>			
1. TUTKATAAJUUSALUEET.....1 2. TUTKAYHTÄLÖ.....4 3. SÄHKÖMAGNEETTISEN SÄTEILYN JA KIINTEÄN AINEEN VUOROVAIKUTUS.....7 3.1 Taantumisen ja Snellin laki.....7 3.2 Taipuminen.....8 3.3 Heijastuminen.....9 3.4 Sironna.....11 3.5 Polarisaatio.....13 4. TUTKAPOIKKIPINTA.....14 4.1 Merellinen ympäristö ja tutkapoikkipinta.....18 4.1.1 Ilmakehän vaikutus.....23 4.1.2 Häilynnän vaikutus.....25 4.1.3 Todellisten kappaleiden tutkapoikkipinta.....28 5. TUTKAPOIKKIPINTA-ALAN MÄÄRITTÄMINEN.....29 5.1 Geometrinen optiikka.....29 5.1.1 Säteenheittomenetelmä.....31 5.1.2 Peilikuvamenetelmä.....31 5.2 Geometrinen diffraktioteoria.....32 5.3 Fysikaalinen optiikka.....33 5.4 Fysikaalinen diffraktioteoria.....34 5.5 Muut arviomenetelmät.....35 5.6 Kaupalliset laskentaohjelmat.....35 6. MITTAAMINEN.....37 6.1 Pienoismallimittaukset.....37 6.2 Täysmittakaavamittaukset.....39 6.2.1 ISAR -mittaukset.....39 6.2.2 Käytännön RCS –mittaukset.....42			
Sarjan nimi ja numero Merenkululaitoksen julkaisuja 07 / 2004		ISSN 1456 - 9442	ISBN
Kokonaissivumäärä 2 + 45 + 3	Kieli Suomi	Hinta	Luottamuksellisuus
Jakaja		Kustantaja	

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

$A_{lh}$	rms meriaallon korkeus
$A_r$	antennin sieppauspinta-ala
$B$	magneettivuontiheys
$B_k$	kohinakaistanleveys
$c_0$	valon nopeus tyhjiössä
$D$	sähkövuontiheys
$D_u$	aluksen maksimi uppouma
$D_{dif}$	diffraktiokerroin
$d$	sirottajan suurin dimensio
$E$	sähkökentän voimakkuus
$E_i$	kohteeseen saapuvan sähkökentän voimakkuus
$E_s$	siroavan sähkökentän voimakkuus
$F$	kohinakerroin
$F_q$	varaukseen kohdistuva voima
$f$	säteilyn taajuus
$f_D$	dopplertaajuus
$f_m$	modulointitaajuus
$f_o$	lähetystaajuus
$G_r$	vastaanottoantennin vahvistus
$G_t$	lähetysantennin vahvistus
$H$	magneettikentän voimakkuus
$J$	virrantiheys
$k$	Boltzmannin vakio
$n$	taitekerroin
$n_0$	taitekerroin tyhjiössä
$P_{r,min}$	pienin vastaanotettu teho, jolla signaali havaitaan
$P_t$	lähetysteho
$q$	varaus
$R$	tutkan ja kohteen välinen etäisyys
$R_m$	tutkan maksimikantama
$\Delta R$	tutkan erottelukyky
$S_r$	tehotiheys vastaanottimella
$S_t$	tehotiheys kohteella
$S/N$	signaali-kohinasuhde
$T$	säteilylähteen lämpötila
$T_0$	kohinalämpötila
$t_m$	modulointijakso
$\Delta t$	modulointijakson aikaero
$V_T$	kynnysjännite
$Z_0$	aaltoimpedanssi



$\lambda$	aallonpituus
$\sigma$	tutkapoikkipinta-ala
$\sigma_{av}$	keskimääräinen tutkapoikkipinta-ala
$\sigma_m$	tutkapoikkipinta-alan mediaani
$\varepsilon$	väliaineen permittiivisyys
$\varepsilon_0$	tyhjiön permittiivisyys
$\varepsilon_e$	kompleksinen permittiivisyys
$\varepsilon_r$	suhteellinen permittiivisyys
$\mu$	väliaineen permeabiliteetti
$\mu_0$	tyhjiön permeabiliteetti
$\beta$	lähtökulma
$\beta_0$	tulokulma
$\rho_h$	heijastuskerroin horisontaaliselle polarisaatiolle
$\rho_s$	heijastuskerroin merenpinnasta
$\rho_v$	heijastuskerroin vertikaaliselle polarisaatiolle
$\rho_\pi$	heijastuskerroin etenemissuunnassa
$\rho_\sigma$	heijastuskerroin kohtisuoraan etenemistasoa vastaan
$\psi$	heijastuskulma
$\theta$	suuntakulma
$\omega$	kulmataajuus

AGC	Automatic Gain Control
CW	Continous Wave (unmodulated)
FM-CW	Frequency Modulated – Continous Wave
GO	Geometrical Optics
GTD	Geometrical Theory of Diffraction
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
ISAR	Inverse Synthetic Aperture Radar
PO	Physical Optics
PPI	Plan Position Indicator
PTD	Physical Theory of Diffraction
RCS	Radar Cross Section
SAR	Synthetic Aperture Radar
UTD	Uniform Theory of Diffraction

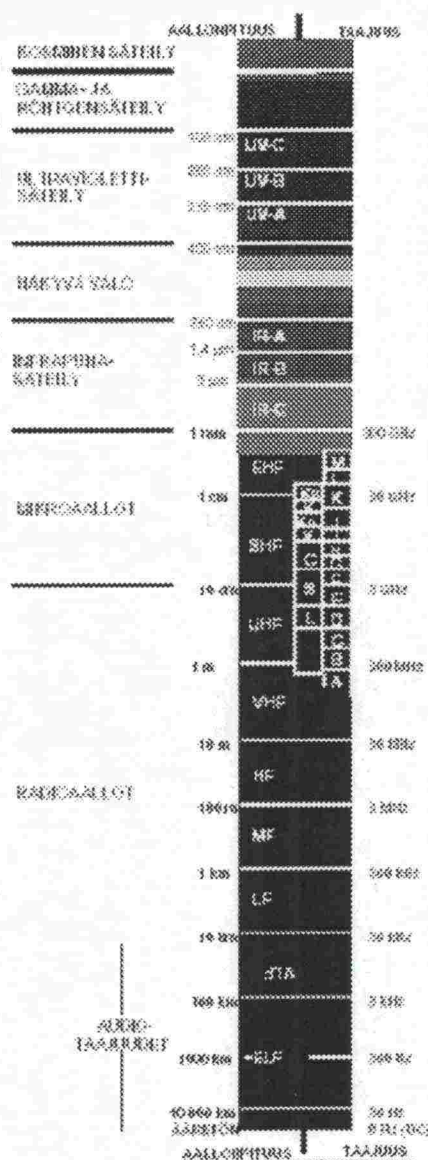
# 1. TUTKATAAJUUSALUEET

Sähkömagneettinen spektri jaetaan osa-alueisiin aallonpituuden tai taajuuden perusteella siten, että gamma- ja röntgensäteily muodostavat spektrin lyhytaaltoisimman eli korkeataajuisimman osan.

Spektrin matalataajuisimman osan vastaavasti muodostavat radioaallot, joiden aallonpituudet ovat tuhansista kilometreistä millimetrin osiin, jotka taajuusalueena ovat hertseistä noin terahertsiin.

Radioaaltojen jako tapahtuu dekadeittain ITU:n (International Telecommunication Union) määritelmän mukaisesti taulukon 1.1 osoittamalla tavalla:

Radioaalloissa alle 300 MHz:n taajuisia aaltoja kutsutaan RF -aalloiksi (Radio Frequency) ja UHF-sekä SHF -alueita mikroaaltoihin kuuluviksi. Käytännössä 1 Ghz:n yläpuolella olevaa aluetta kutsutaan mikroaalto -alueeksi.



Taulukko 1.1 Radioaaltojen taajuusalueet

ELF	(Extremely Low Frequency)	30 – 3000 Hz
VLF	(Very Low Frequency)	3 – 30 kHz
LF	(Low Frequency)	30 – 300 kHz
MF	(Medium Frequency)	0,3 – 3 MHz
HF	(High Frequency)	3 – 30 MHz
VHF	(Very High Frequency)	30 – 300 MHz
UHF	(Ultra-High Frequency)	0,3 – 3 GHz
SHF	(Super High Frequencies)	3 – 30 GHz
EHF	(Extreme High Frequencies)	30 – 300 GHz

ITU:n määritelmää käyttökelpoisempi taajuusaluejako tutka-alueelle on IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) standardissa määrätty jako, joka ottaa huomioon sähkömagneettisen säteilyn etenemisominaisuudet eri taajuuksilla sekä niitä vastaavat käyttötarkoituksalueet.

*Taulukko 1.2* Taajuusalueet IEEE:n mukaan

L	=	1 – 2 GHz	K	=	18 – 27 GHz
S	=	2 – 4 GHz	K <sub>a</sub>	=	27 – 40 GHz
C	=	4 – 8 GHz	V	=	40 – 75 GHz
X	=	8 – 12 GHz	W	=	75 – 110 GHz
K <sub>u</sub>	=	12 – 18 GHz	mm	=	110 – 300 GHz

Edellisten lisäksi NATO käyttää 1960 -luvulta vakiintunutta "military" -jakoa, joka on esitetty seuraavassa taulukossa.

*Taulukko 1.3* Taajuusalueet NATO -jaottelun mukaisesti

VHF = 300 – 100 MHz	G = 4 – 6 GHz
A = 100 – 250 MHz	H = 6 – 8 GHz
B = 250 – 500 MHz	I = 8 – 10 GHz
C = 500 – 1000 MHz	J = 10 – 20 GHz
D = 1- 2 GHz	K = 20 – 40 GHz
E = 2 – 3 GHz	L = 40 – 60 GHz
F = 3 – 4 GHz	M = 60 – 100 GHz

Tutkataajuuden valintaan vaikuttavat monet tekijät ja tutka-alueiden välillä voi olla runsaasti eroja erityisesti säteilyn etenemisominaisuuden osalta. Tämä ominaisuus vaikuttaa itse tutkan rakenteeseen siten, että matalilla taajuuksilla mm. lähetystehon aikaansaamiseksi voidaan käyttää puolijohdekomponentteja. kun vastaavasti mikroaaltoalueella tehon muodostamiseen tarvitaan mikroaltoputkia.



Tutkataajuusalueeseen soveltuvat sovellukset ja niihin liittyvät erityispiirteet sekä rajoitukset:

**HF -alue:** Horisontin taakse mittaava tutka, jonka kantama on hyvin pitkä, mutta erottelukyky ja mittaustarkkuus ovat huonot.

**VHF-UHF -alueet:** Pitkä kantama, valvonta horisontin yläpuolella, huono tai keskimääräinen erottelukyky ja tarkkuus, ei sään haittoja.

**L -alue:** Suurikantamainen valvonta, keskimääräinen erottelukyky. Pieniä sään aiheuttamia haittoja. Tyypillisinä sovelluksina ilma- ja **merivalvontatutkat**.

**S -alue:** Lyhyen kantaman valvonta ja pitkän kantaman seuranta. Keskimääräinen tarkkuus, sään vaikutus tuntuva kovassa vesi- ja lumisateessa. Sovelluksina **merenkulkututkat**, kohdevalvontatutkat ja 3D -tutkat.

**C -alue:** Lyhyen kantama valvonta ja pitkän kantaman seuranta hyvällä tarkkuudella. Sään haitat tuntuvia kohtalaisessa sateessa. Sovelluksena yleensä meteorologiset tutkat.

**X -alue:** Lyhyen kantaman valvonta kirkaalla säällä tai heikossa sateessa. Pitkän kantaman seuranta hyvällä tarkkuudella selkeällä säällä, mutta lyhyt kantama sateessa. Sovellukset lähinnä **merenkulkututkat**, maastonvalvontatutkat ja seurantatutkat.

**K<sub>u</sub>-K<sub>a</sub> -alueet:** Lyhyen kantaman seuranta, kun antennin on oltava hyvin pieni eikä vaadita joka sään toimintaa mm. lentokoneet, jotka lentävät "sään" yläpuolella.

**Mm -alue:** Käyttö rajoittuu lyhyen kantaman seurantaan.

## 2. TUTKAYHTÄLÖ

Tutkayhtälöllä, kuin se on perusmuodossa esitettyinä, voidaan arvioida eri tekijöiden kuten kohteen tutkapaikkipinta-alan vaikutusta tutkan kantamaan. Tutkayhtälöitä, perusmuodosta mukailtuna on useita riippuen sovelluskohteen häviötekijöistä. Häviötekijöinä voi olla esimerkiksi maalin ominaisuudet, integroitavien pulssien lukumäärä, tutkakeilan muoto sekä ilmakehävaimennus. Varsinainen tutkayhtälön perusmuoto ei kuitenkaan ole tarkka arvio tutkan kantamasta, vaan siinä on tehty tiettyjä oletuksia. Oletuksena on mm, että maali on pistemäinen ja häviötekijät on kaavasta jätetty huomioimatta. Lisäksi oletetaan, että maali on tutkakeilan keskiakselilla ja häviöttömässä avaruudessa. Perusmuodossaan tutkan kantama esitetäänkin liian positiivisena.

Tutkayhtälön (2.5) avulla voidaan todeta, että tutkan kantamaa kasvattaa lähetystehon, antennivahvistuksen sekä pulssin pituuden lisäys sekä antennin suuntaavuuden parantaminen. Sama tapahtuu, jos vähennetään järjestelmähäviöitä, järjestelmän kohinalämpötilaa sekä pienintä sallittua signaalikohinasuhdetta. Näistä kantaman lisäämiseen tähtäävistä toimenpiteistä on laitteistovalmistajan tehtävä kuitenkin kompromissi. Esimerkiksi antennin kokoa ei voida lisätä määrättömästi, pulssin pituuden kasvattaminen vähentää järjestelmän kohinatasoa kaistanleveyden kustannuksella ja pulssin pituuden kasvattaminen heikentää etäisyysresoluutiota. Tutkayhtälöstä voidaan lisäksi todeta, että lähetystehon kaksinkertaistuminen tai pienimmän havaittavan tehon puoliintuminen lisää tutkan toimintasädettä vain noin viidesosan [2].

Tehoa pulssin aikana kutsutaan lähetystehoksi  $P_t$  ja antennille voidaan laskea vahvistus  $G_t$  vertaamalla kentänvoimakkuutta halutussa suunnassa isotrooppisella antennilla aikaansaatuun kenttään. Näin etäisyydellä  $R$  aikaansaatu tehotiheys  $S_t$  saadaan kaavasta (2.1).

Ideaalitilanteessa, jossa pinta-alalle  $\sigma$  tuleva teho  $\sigma_s$  säteilee kaikkiin suuntiin isotrooppisesti, saadaan tehotiheys vastaanottimella saman suuruiseksi kuin itse kohteen aiheuttama tehotiheys.

$$S_t = \frac{P_t G_t}{4 \pi R^2} \quad (2.1)$$

Aallon tulo- ja lähtökulmien ollessa samat, sirontapoikkipinta on sama kuin kohteen tutkapoikkipinta-ala [2]. Kun tutkapoikkipinta-ala otetaan huomioon, saadaan tehotiheys vastaanottimella kaavasta (2.2). Kuvassa 2.1 on esitettyä vastaanotetun ja lähetetyn aaltorintaman (tehotiheyden) eteneminen häviöttömässä avaruudessa.

$$S_r = \frac{P_t G_t}{4 \pi R^2} \times \frac{\sigma}{4 \pi R^2} \quad (2.2)$$

missä  $\sigma$  = kohteen tutkapoikkipinta-ala

Antennin vahvistus  $G = G_t = G_r$ , tilanteessa jossa sekä lähetykseen että vastaanottoon käytetään samaa antennia. Antennin sieppauspinta-ala  $A_r$  voidaan laskea vahvistuksen avulla kaavan (2.3) osoittamalla tavalla.

$$A_r = \frac{G_r \lambda^2}{4 \pi} \quad (2.3)$$

Vastaanotettu teho saadaan edellisten perusteella:

$$P_r = S_r \times A_r \quad (2.4)$$

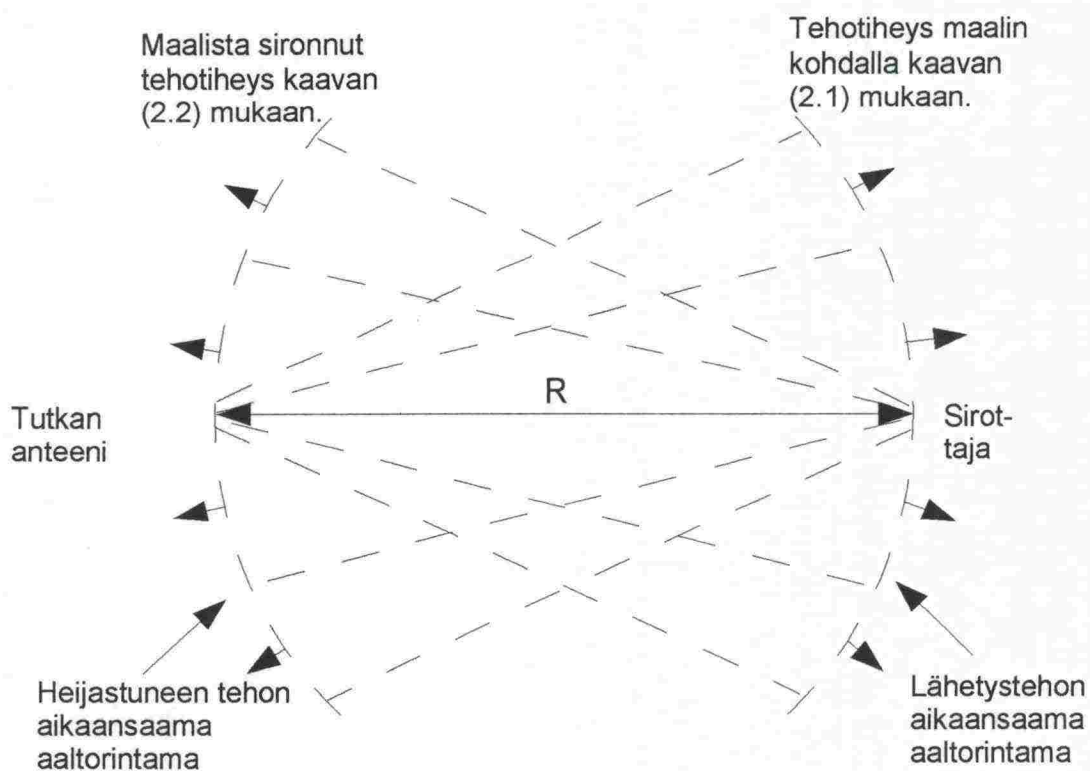
Tutkayhtälön perusmuoto saadaan sijoittamalla kaavat (2.2) ja (2.3) kaavaan (2.4). Tutkayhtälön perusmuoto osoittaa, että vastaanotettu teho on kääntäen verrannollinen etäisyyden neljänteen potenssiin ja antennin vahvistus vastaavasti kääntäen verrannollinen käytetyn aallonpituuden toiseen potenssiin. Kaavasta (2.4) voidaan ratkaista  $R$  ja jos merkitään  $P_{r,min}$  osoittamaan pienintä tehoa, jolla kaiku havaitaan, saadaan tutkan maksimimittausetäisyys kaavan (2.5)



osoittamalla tavalla.

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t \sigma \lambda^2}{P_{r,min} (4\pi)^3}} \quad (2.5)$$

Edellä esitetyistä kaavoissa kohteen tutkapaikkipinta-alan vaikutus huomioidaan yksinkertaistetulla tavalla. Tämän työn seuraavissa luvuissa kuvataan, että sähkömagneettisen säteilyn siroaminen kohteesta on erittäin monimutkainen prosessi. Toden mukaisessa tapauksessa on otettu huomioon myös otettava vaadittava signaali-kohinasuhde  $S/N$ , vastaanottimen piirien synnyttämä kohinaa kuvaava kohinalämpötila  $T_0$ , kohinakaista  $B$  sekä kohinakerroin  $F$ . Tämänkin jälkeen maksimikantama-arvio jää karkeaksi, mutta on huomattavasti tarkempi kuin tutkayhtälön perusmuodosta johdettu mittausetäisyys.



Kuva 2.1 Lähetetty ja vastaanotettu tehotiheys aaltorintaman edetessä häviöttömässä tilassa.

Pienin maalin ilmaiseva teho saadaan:

$$P_{r,min} = k F T_0 B (S/N)_{min} \quad (2.6)$$

Tutkan maksimikantama voidaan nyt kirjoittaa muotoon:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k F T_0 B (S/N)_{min}}} \quad (2.7)$$

missä  $k$  = Boltzmannin vakio

Yhtälöä (2.7) voidaan tarkentaa vielä ottamalla huomioon pulssien integrointi, ilmaisuun vaadittava signaali-kohinasuhde sekä tutkajärjestelmän ja ilmakehän aiheuttamat häviöt. Näistä lisätietoja löytyy esimerkiksi lähteestä [3] luvusta 7.

### 3. SÄHKÖMAGNEETISEN SÄTEILYN JA KIIINTEÄN AINEEN VUOROVAIKUTUS

Sähkömagneettisen säteilyn ja materian vuorovaikutuksen ymmärtäminen on olennaista tutkapaikkipinta-alan määräytymisessä. Tutkapaikkipinta-alaan suhteessa olevia kohteen ominaisuuksia ovat materiaali (taittuminen sekä sironta/absorboituminen) ja pinnan muodot (heijastuminen sekä taittuminen). Tutkapaikkipinta-alaan oleellisesti liittyvät säteilyn monitie-eteneminen, häilyntä sekä välke käsitellään myöhemmissä luvuissa.

#### 3.1 TAITTUMINEN JA SNELLIN LAKI

Sähkömagneettisen aallon kulkiessa eri aineiden läpi taajuus  $f$  säilyy vakiona, mutta etenemisnopeus  $c$  ja aallonpituus  $\lambda$  muuttuvat.

Kun sähkömagneettinen aalto menee tyhjiöstä viistosti rajapinnan läpi aineeseen, niin säteen suunta muuttuu rajapinnalla siten, että tulokulma  $\beta_0$  muuttuu lähtökulmaksi  $\beta$  kuva. Snellin lain mukaan taitekerroin  $n$  on määritelty seuraavasti:

$$n = \frac{\sin \beta_0}{\sin \beta} \quad (3.1)$$

Taitekerroin kuvaa siis säteilyn taittumista, joka aiheutuu säteilyn etenemisnopeuden eroista. Käytännössä se on toinen tapa esittää permittiivisyys eli dielektrisyysvakio. Toisin sanoen sähkömagneettisen säteilyn etenemisnopeus väliaineessa riippuu aineen permittiivisyydestä. Taitekerroin ilmaisee, kuinka suuri säteilyn etenemisnopeus aineessa on verrattuna etenemisnopeuteen tyhjiössä. Tämä voidaan esittää seuraavalla yhtälöllä. [6]

$$n = \frac{c}{v} = \frac{1}{\frac{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}{1}} = \sqrt{\epsilon \mu} \quad (3.2)$$

missä	$n$	= väliaineen taitekerroin
	$c$	= säteilyn eteneminen tyhjiössä
	$v$	= säteilyn etenemisnopeus väliaineessa
	$\epsilon_0$	= tyhjän permittiivisyys
	$\mu_0$	= tyhjän permeabiliteetti
	$\epsilon_1$	= väliaineen permittiivisyys
	$\mu_1$	= väliaineen permeabiliteetti

Ilmakehän aerosoliriippuvaan taitekertoimeen vaikuttaa mm ilman paine, lämpötila sekä kosteus. Taitekerroin muuttuu ilmakehän eri kerroksissa, joka aiheuttaa sähkömagneettisen säteilyn taipumisen kohti maanpintaa.

### 3.2 TAIPUMINEN

Kun sähkömagneettinen säteily kohtaan siroajan/valaistavan kohteen reunan, se taipuu siroajan suuntaan. Säteilyn aallonpituus vaikuttaa diffraktioon siten, että



mitä pidempi aallonpituus, sitä enemmän aalto taipuu. Taipuminen radioaalloilla on voimakkaampaa kuin esimerkiksi infrapuna-alueella.

Diffraktio vaikuttaa myös tutkan kantamaan. *Huygensin* teoreeman mukaan jokainen yhteyden välissä oleva este synnyttää yläpuolelleen pisteen, joka toimii uuden aallon lähtökohtana [2]. Diffraaktion ansiosta aalto voi edetä myös säteilijän/esteen taakse. Diffraaktion aiheuttamana säteilijän ja säteen muodostaman varjoalueen alalle muodostuu kenttä, joka vaikuttaa siroavan sähkökentän voimakkuuteen. Kun siroajan sähkökenttä muuttuu, vaikuttaa se myös siroajan tutkapaikkipinta-alaan. Seuraavassa luvussa kerrotaan lisää geometrisesta ja fysikaalisesta diffraktioteoriasta sekä diffraktion vaikutuksesta tutkapaikkipinta-alaan.

### 3.3 HEIJASTUMINEN

Sähkömagneettinen heijastuminen on erikoistapaus muiden heijastusilmiöiden joukossa. Sähkömagneettisessa heijastuksessa on huomioitava säteilyn sekä magneetti- että sähkökomponentti yhdessä. Yleisesti sähkömagneettisen säteilyn osuessa rajapintaan heijastuksen lisäksi aina tapahtuu myös säteilyn tunkeutumista (taittumista) aineeseen. Molemmat ilmiöt vaikuttavat toisiinsa merkittävällä tavalla. Sähkömagneettisen aallon eteen tulleen kohteen aineen ominaisuuksista riippuu, missä suhteessa tapahtuu aallon taittumista aineeseen päin ja heijastumista aineesta. Todellisen pinnan heijastuskerroin riippuu permittiivisyydestä  $\epsilon$ , aineen johtavuudesta, aallon tulokulmasta, aallon taajuudesta ja polarisaatiosta. Esimerkiksi, jos heijastunut ja aineeseen tunkeutunut (taittunut) aalto ovat sähkökenttensä mukaan kohtisuorassa toisiaan vastaan, heijastuneen aallon todetaan olevan etenemissuunnassa täysin polarisoitunutta.

Johteet ovat loistavia heijastimia. Vain pieni osa aallon energiasta tunkeutuu hyvin johtavaan aineeseen suurimman osan jäädessä heijastuneeseen aaltoon. Veden pinta kuuluu myös hyviin heijastimiin, mutta tutkasäteiden tapauksessa huomioon on otettava mm aallon muoto ja koko:

$$\rho_s = \exp\left[-\left(\frac{4\pi A l_h \sin \psi}{\lambda}\right)^2\right] \quad (3.3)$$

missä  $\rho_s$  = heijastuskerroin meriaallosta  
 $A l_h$  = rms meriaallon aallon korkeus  
 $\lambda$  = tutka-aallon pituus  
 $\psi$  = heijastuskulma

Voimakkaasti ionisoivat kaasut käyttäytyvät johteiden tavoin, jolloin sähkömagneettinen säteily voi heijastua näistä. Tutkatekniikassa voidaan käyttää hyväksi 60 – 1000 km korkeudella olevaa ionosfääriä, jossa ionosfääriin tuleva aalto taipuu Snellin lain mukaisesti kulkeutuen kaarevaa rataa pitkin. Ennen heijastusta takaisin maan pinnalle, aalto saattaa kulkea pitkänkin matkan ionosfäärissä eli aalto kanavoituu. Maanpinnan lähellä lämpötilojen sekä kosteuden muuttuminen aiheuttaa muutoksia ilmakehän taitekertoimessa. Kun säteily heijastuu eristeen pinnasta, sisältää heijastunut säde enemmän sitä komponenttia, joka värähtelee kohtisuoraan heijastustasossa ja se komponentti, jonka värähtelyt tapahtuvat heijastustasossa, taittuu enemmän.

Heijastuskerroin on erilainen vertikaaliselle ja horisontaaliselle polarisaatiolle. Heijastuskertoimeen liittyvä kompleksinen permittiivisyys  $\epsilon_e$  riippuu pinnan suhteellisesta permittiivisyydestä  $\epsilon$ , väliaineen johtavuudesta  $\sigma_j$  ja sähkömagneettisen aallon kulmataajuudesta  $\omega$ : [9]

$$\epsilon_e = \epsilon_o \epsilon + \frac{\sigma_j}{i\omega} \quad (3.4)$$

Meriveden (Itämeri) suhteellinen permittiivisyys on tyypillisesti noin 80 ja sähkönjohtavuus eli *konduktiivisyys* on noin  $5 \times 10^{-3}$  S/m.[5]

Heijastuskertoimet  $\rho_v$  ja  $\rho_h$  verikaaliselle sekä horisontaaliselle polarisaatiolle voidaan nyt esittää: [9]

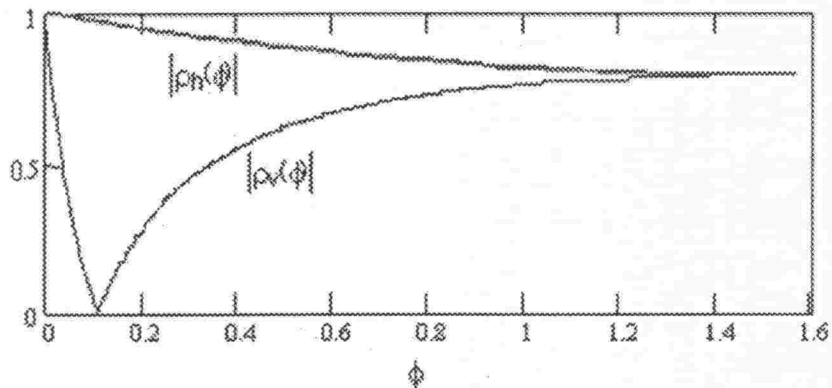
$$\rho_v(\theta) = \frac{\frac{\epsilon_e}{\epsilon_o} \sin(\theta) - \sqrt{\frac{\epsilon_e}{\epsilon_o} - \cos^2(\theta)}}{\frac{\epsilon_e}{\epsilon_o} \sin(\theta) + \sqrt{\frac{\epsilon_e}{\epsilon_o} - \cos^2(\theta)}} \quad (3.5)$$

sekä

$$\rho_h(\theta) = \frac{\sin(\theta) - \sqrt{\frac{\epsilon_e}{\epsilon_o} - \cos^2(\theta)}}{\sin(\theta) + \sqrt{\frac{\epsilon_e}{\epsilon_o} - \cos^2(\theta)}} \quad (3.6)$$

Vertikaalisesti polarisoituneen aallon heijastukseen vaikuttaa säteilyn ja väliaineen kohtaamiskulma. Horisontaalisesti polarisoituneeseen aaltoon kohtaamiskulma ei juuri vaikuta.

Kuvassa (3.1) on esitetty heijastuskertoimen itseisarvo aallon heijastuessa merenpinnasta:



Kuva 3.1 Vertikaalisen ja horisontaalisen polarisaation omaavien aaltojen heijastuskertoimet kohtaamiskulman  $\phi$  (astetta) funktiona, aaltojen heijastuessa tasaisesta merenpinnasta [9]

### 3.4 SIRONTA

Sirontaan vaikuttavat aineen johtavuus, sironajan muoto, aallon tulokulma, polarisaatio sekä sironajan koko säteilyn aallonpituuteen nähden. Sironnalla tarkoitetaan sähkömagneettisen säteilyn absorboitumista kohdalle osuneeseen aineeseen/materiaan, missä absorptio riippuu molekyylien erilaisten



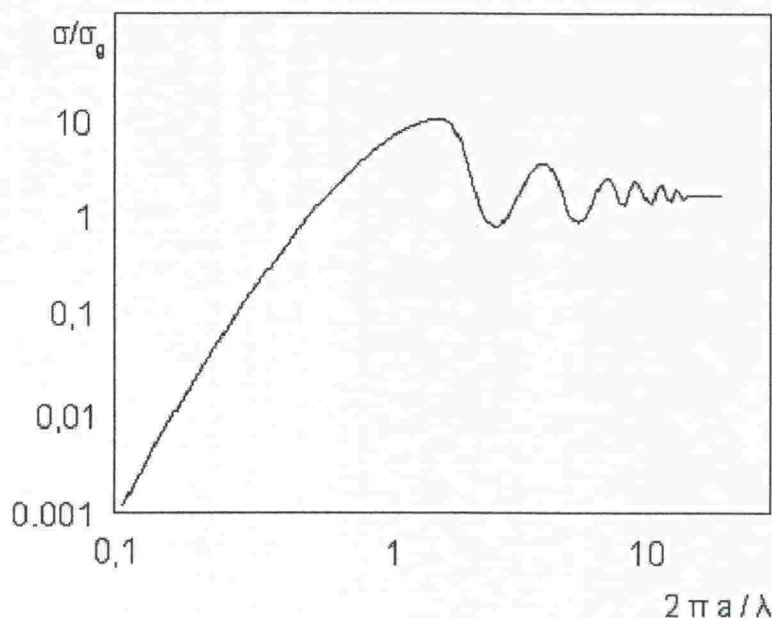
energiatilojen virittymisestä säteilyn vaikutuksesta. Absorptiossa säteily luovuttaa energiaansa väliaineeseen ja tässä indusoituneiden virtojen voidaan käsittää muodostavan omia sähkökenttiä ympärilleen. Energiatilan purkautuessa siroaja säteilee vaihtelevalla amplitudilla ja vaiheella sähkömagneettista säteilyä itsestään kaikkiin suuntiin [1]. Sironneen kentän laskemisessa voidaankin ajatella maalin kohdalle saapuvan kentän indusoivan siroajan pinnalle virtoja, jolloin maali toimii antennin tavoin. Kohteen tutkapoikkipinta-ala, edellisen perusteella, voidaan määrittellä pinta-ala, jolta sirottaja vastaanottaa tehon ja säteilee sen sitten isotrooppisesti ympäristöönsä [3].

Sirontapoikkipinta-ala voidaankin ilmaista:

$$\sigma = 4 \pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \frac{E^s}{E^i} \quad (3.7)$$

missä  $E^s$  = siroavan sähkökentän voimakkuus  
 $E^i$  = kohdistuvan sähkökentän voimakkuus

Kun tarkastellaan yksittäisen kappaleen tai partikkelin sirontaa, voidaan erottaa seuraavat sirontatyypit: Rayleigh -sironta, Mie -sironta sekä suurtaajuussironta (optinen sironta). Kuvassa 3.2 on kuvattuna johtavan pallopinnan sironta-alan vaihtelut ympärysmitta/aallonpituus -osamäärän funktiona. Huomattavaa on, että aallonpituuteen verrattuna suurenevan pallon sirontapinta  $\sigma$  lähenee sen geometrista poikkipintaa  $\sigma_g$  [2]. Sirontamekanismeja ja sirontapinnan laskentamenetelmiä käsitellään lisää tutkapoikkipinta-alan määrittämistä käsittelevässä luvussa.



Kuva 3.2 Metallipallon (säde  $a$ ) tutkapoikkipinta aaltoluvun funktiona [2]

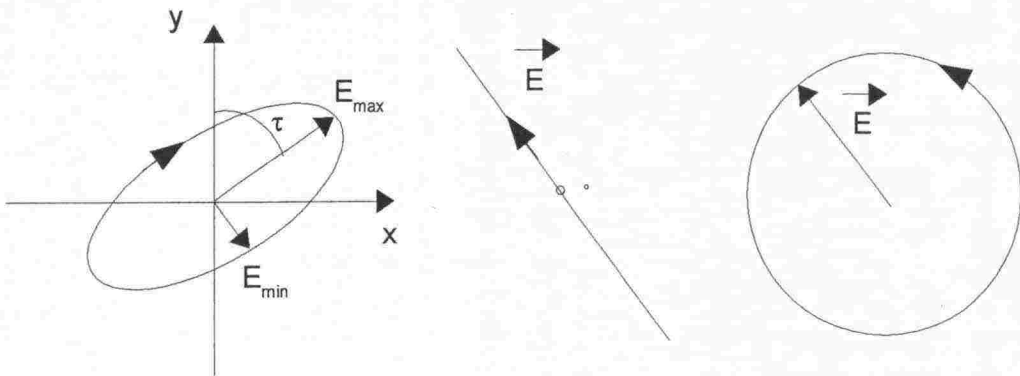
### 3.5 POLARISAATIO

Sähkömagneettiset kentät ovat vektorisuureita, joilla on tietty suunta. Kentän suuntaa ja amplitudin käyttäytymistä kuvaa kentän *polarisaatio*. Polarisaatio kuvaa sitä, millaisen geometrisen viivan vektorin kuviteltu kärki piirtää yhden värähtelyjakson  $t_v = 1/f$  aikana. Polarisaatiokäsitettä voidaan kuvata kolmella eri määritelmällä, *elliptisellä* polarisaatiolla, *lineaarisella* polarisaatiolla sekä *ympyräpolarisaatiolla*. Käytännössä kaikki polarisaatiotyypit ovat ympyräpolarisaation erikoistapauksia!!

Polarisaatiolla merkitys tutkapoikkipinnan määrittämisen osatekijänä. Sähkömagneettisen aallon polarisaatio muuttuu sen heijistuessa/sirotessa kohteesta tai merenpinnasta.

Elliptisesti polarisoituneen aallon sähkökenttää voidaan kuvata kahden toisiaan vastaan kohtisuoraan olevien komponenttien summana. Lineaarinen polarisaatio ilmenee kun  $E_1$  ja  $E_2$  ovat eri suuria kuin nolla ja komponenteilla on sama vaihe. Kun aallon komponenteilla on 90 asteen vaihe-ero ja ne ovat yhtä suuria, puhutaan ympyräpolarisaatiosta.

Kuvassa 3.3 on havainnollistettu elliptinen polarisaatio, lineaarinen polarisaatio sekä vasenkätinen ympyräpolarisaatio.



Kuva 3.3 Sähkökentän polarisaatio: elliptinen polarisaatio, lineaarinen polarisaatio sekä vasenkätinen ympyräpolarisaatio [2]

## 4. TUTKAPOIKKIPINTA

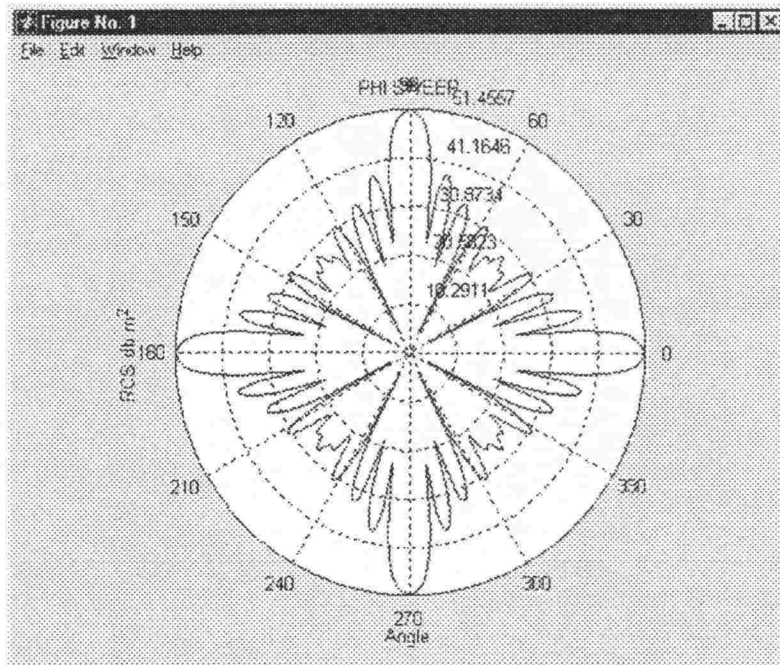
Tutkapoikkipinta, jota voidaan kutsua myös tutkapoikkipinta-alaksi tai sironta-alaksi, kuvataan tunnuksella RCS (radar cross section). Tutkapoikkipinta muodostuu kohteeseen saapuneen ja siitä takaisin kohti tutkaa sironneiden tehojen suhteesta. Se energian määrä, joka heijastuu/siroaa kohteesta, riippuu maalin asennosta, muodosta, materiaalista sekä kohtaavan aallon polarisaatiosta ja taajuudesta. Tutkapoikkipintaan vaikuttaa myös pulssitutkan pulssin pituus.

Kiinteiden kohteiden, aina ilmakehän eri partikkeleista todellisiin kappaleisiin, tutkapoikkipinta-ala voidaan kuvata ekvivalentin isotrooppisen heijastimen poikkipinta-alana. Tällöin edellytetään ekvivalentin heijastimen heijastavan antenniin saman tehon kuin tarkasteltava kohdekin. Tutkapoikkipinta voidaan edellisten ehtojen mukaan lausua [12]:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4 \pi R^2 \frac{S_r}{S_i} \quad (4.1)$$

missä  $S_r$  = vastaanotettu intensiteetti eli tehotiheys  
 $S_i$  = kohdetta valaiseva intensiteetti





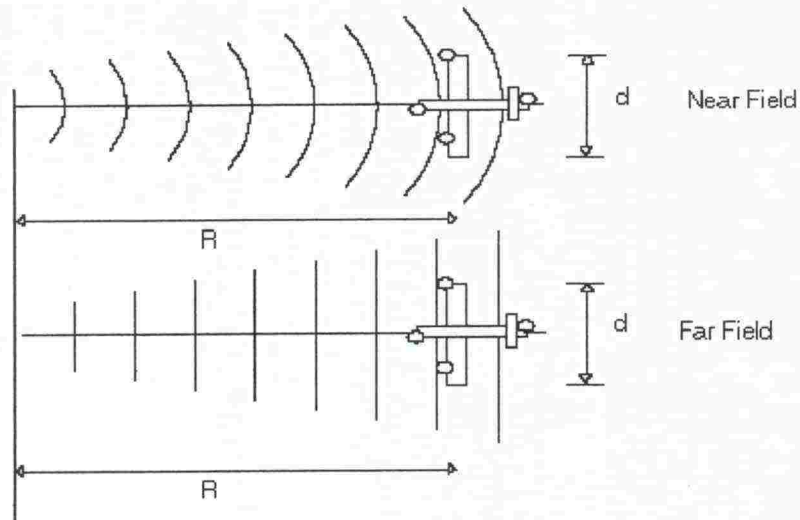
Kuva 4.1. RCS:lle on tyypillistä, että se voi vaihdella tuhatkertaisesti asteen matkalla. Tästä syystä RCS usein esitetään logaritmisesti  $10 \log_{10}(x)$ , tällöin yksikkönä on [dBm<sup>2</sup>] eli [dBsm].

Vastaanottoantennit useimmissa tapauksissa on suunniteltu toimiviksi kaukokentässä. Jotta aaltorintaman voidaan olettaa olevan voimassa, on etäisyyden oltava riittävän suuri, jotta rintama kohdetta vastaan on liki tasomainen kuvan 6.2 mukaisesti

Kaukokentän katsotaan alkavan etäisyydeltä  $R_k$ , joka saadaan

$$R_k = \frac{2 D^2}{\lambda} \quad (4.2)$$

missä  $D$  = antennielementin fyysinen mitta (halkaisija tai korkeus)  
 $\lambda$  = käytettävän taajuuden aallonpituus



Kuva 4.1 Aaltorintaman erilaisuus lähi- ja kaukokentässä.

Kun tutkitaan sirontapintaa kaukokentässä, voidaan kaava (4.1) saattaa seuraavaan muotoon, jossa kohteen *avaruuskulmaan*  $4\pi$  *sirottama teho* (W/sr) on yhtä suuri kuin *vastaanotettu teho / avaruuskulma* (W/sr) eli kaavan muodossa[11]:

$$\frac{\sigma I_i}{4 \pi} = I_r R^2 = \frac{I_r A_r}{(A_r / R^2)} \quad (4.3)$$

missä  $A_r$  = vastaanottimen pinta-ala

$$\frac{\sigma I_i}{4 \pi} = \text{kohteen avaruuskulmaan } 4\pi \text{ sirottama teho}$$

$$I_r R^2 = \frac{I_r A_r}{(A_r / R^2)} = \text{vastaanotettu teho/avaruuskulma}$$

Tutkapoikkipinta-ala voidaan myös sanallisesti esittää muodossa:

$$\rho = \text{maalin projektiopinta-ala} \times \text{heijastuvuus} \times \text{suuntaavuus} \quad (4.4)$$

missä

*Projektiopinta-ala* on se pinta-ala, jonka tutka valaisee (=optinen poikkipinta). Se määrittää kohteeseen osuneen säteilyn tehon.

*Heijastuvuus*: Heijastuneen ja pintaan osuneen tehon suhde. Metalleilla usein lähellä arvoa yksi (1). Tietyillä absorvoivilla materiaaleilla suhde voi olla jopa 1/100!. Heijastuvuus kaavana:

$$\text{Heijastuvuus} = \frac{P_{sir}}{A \cdot S_t} \quad (4.5)$$

*Suuntaavuus* on takaisin tutkaa kohti sironneen säteilyn tehon suhde siihen tehoon, joka olisi sironnut takaisin tutkalle kohteen ollessa ympärisäteilevä => pallon RCS = geometrinen poikkipinta. Kohtisuoran tason RCS vastaavasti on huomattavasti suurempi kuin geometrinen poikkipinta. Suuntaavuus kaavana:

$$\text{Suuntaavuus} = \frac{P_{ts}}{(1/4 \pi) P_{sir}} \quad (4.6)$$

joissa

- $P_{sir}$  = maalista sironnut teho
- $A$  = maalin pinta-ala
- $S_t$  = maalin sieppaama tehotiheys
- $P_{ts}$  = tutkaan sironnut teho / avaruuskulmayksikkö

Kun oletetaan maalin koostuvan useista toisistaan riippumattomista sirottajista (laivat, soppiryhmät), voidaan tutkapoikkipinta-ala johtaa muotoon:[3]

$$\sigma = A \cdot \frac{P_{sir}}{A \cdot S_t} \cdot \frac{P_{ts}}{(1/4 \pi) P_{sir}} \quad (4.7)$$

Edellisiin on huomioitava, että merenpinnasta heijastuneet kaiut voivat vahvistaa ja vaimentaa toisiaan tutkan suunnassa (monitie-eteneminen). Tässä edellytyksenä, että kentät ovat samassa vaiheessa keskenään. On myös huomioitava, että sähkömagneettisen aallon polarisaatio muuttuu sen sirotessa kohteesta.



Tasopinnan RCS lasketaan:

$$\sigma = 4\pi \frac{A^2}{\lambda^2} \quad (4.8)$$

missä

A = tason geometrinen pinta-ala  
 $\lambda$  = tutka-aalon pituus [m]

Soppiheijastimen a) perusyhtälö :

$$\sigma = 4\pi \frac{A_{eff}^2}{\lambda^2} \quad (4.9)$$

missä

$A_{eff}$  = tehollinen pinta-ala eli se tutkan valaisema pinta-ala, jolta heijastus tapahtuu

Soppiheijastimen b) perusyhtälö:

$$\sigma = 4\pi \frac{a^2}{3\lambda^2} \quad (4.10)$$

missä

a = käytetyn sopen sivun pituus [m]

Todellisilla kohteilla ja soppiheijastimilla/-ryhmillä RCS -on monimutkainen ja se täytyy laskea ja mitata paikkansapitävän tuloksen saamiseksi.

## 4.1 MERELLINEN YMPÄRISTÖ JA TUTKAPOIKKIPINTA

Tutkittaessa tutkamerkkien ja soppiryhmien tutkapoikkipinta-alaa niiden luonnollisessa ympäristössä, vaikuttaa tutkapinta-arvoihin ilmakehän kaasujen ja sateen aiheuttama sironta sekä vaimennus. Tutkapoikkipinta-alan vaihteluun vaikuttaa edellisiä määräävämminkin kuitenkin tutkasäteilyn monitie-eteneminen

sekä tutkamerkin tai valaisevan tutkan(laivan) liikkeiden aikaansaama häilyntä. Mittaustapahtumassa on huomioitava myös merivälke, jota käsitellään RCS-mittauksia käsittelevessä luvussa tarkemmin.

Sähkömagneettisten aaltojen vaikuttamista toisiinsa sanotaan interferenssiksi. Kun tutka-aallot ovat kulkeneet kahta eripituista reittiä pitkin ja saapuvat vastaanottimen antenniin saman aikaisesti, ne vahvistavat toisiaan. Tilanteessa, jossa aallot saapuvat antenniin erivaiheisina ne vastaavasti heikentävät toisiaan. Vaihe-ero johtuu matkasta sekä heijastuksen aiheuttamasta vaihesiirrosta. Radiossa interferenssi kuullaan joskus huojumisena ja häipymisenä: äänen voimakkuus vaihtelee. Heijastuneen aallon matkaeroa  $R_h$  voidaan kuvata [3]

$$R_h = \frac{2 h_r \cdot h_t}{R} \quad (4.11)$$

missä  $h_r$  = tutkan antennin korkeus  
 $h_t$  = maalin korkeus  
 $R$  = tutkan ja maalin välinen etäisyys

Merellistä mittausympäristöä havainnollistaa seuraava esimerkki, jossa sovelluksena on seurantatutka ja seurantaetäisyys on 1 km. Kohteen oletetaan olevan 3 m korkea. Lisäksi oletetaan heijastuskaiun heijastuvan täydellisesti johtavasta pinnasta, jossa horisontaalinen polarisaatio ja säteilyn 180° vaihesiirron johdosta pinnan heijastuskerroin määräytyy arvoon -1. Horisontaalisella polarisaatiolla tutkan keila "liuskostuu" elevaatiotasossa eli tutka näkee maalin ja tämän peilikuvan samanaikaisesti. Tästä voidaan käsittää, että antenni ja tämän peilikuva muodostavat antenniryhmän. Oikeasta kohteesta saatavan suoran kaiun sekä tasaisesta pinnasta heijastuneen kaiun (kohteen peilikuvan) kulmaero on, edellisten ehtojen mukaisesti, siis vain 2 mrad. Tutkalta vaaditaan näin hyvää kulmaresoluutiota, jotta suorakaiku voidaan erottaa heijastuskaiusta. Monitie-etenemisilmiöstä ei merellisessä ympäristössä kuitenkaan päästä eroon. Kulmaresoluutiota kuitenkin voidaan parantaa keilanleveyttä pienentämällä elevaatiotasossa.

Tuloksena edellisestä voidaan todeta, että mitä suurempi tarkastelukulma sitä

pienempi tutkapaikkipinta-ala. Vaatimuksena on, että myös tarkastelija on lähellä merenpintaa. Tiedyt tutkataajuusalueet voivat antaa myös vastakkaisen tuloksen em. esimerkin tapaukselle.

Tässä tapauksessa kohteeseen / tutkamerkkiin osuvien aaltojen kentänvoimakkuuksien summa saadaan

$$E = E_0 [1 + \rho_{180} e^{-jk2h_r h_t / R}] = E_0 [1 - e^{-jk2h_r h_t / R}] \quad (4.11)$$

missä  $E_0$  = suoraan tutkasta laivaan tulleen aallon kentänvoimakkuus  
 $\rho_{180}$  = -1 heijastuvuuskerroin horisontaalisella polarisaatiolla

Normalisoitu kentänvoimakkuus eli keilan etenemiskerroin  $F_b$ , joka kuvaa kentänvoimakkuuden  $E$  ja suoraan tutkasta laivaan tulleen aallon kentänvoimakkuuden  $E_0$  suhteen itseisarvoa, saadaan

$$F_b = \left| \frac{E}{E_0} \right| = 2 \sin \frac{2 \pi h_r \cdot h_t}{\lambda R} \quad (4.12)$$

Keilan etenemiskerroin on välillä 0 – 2, mutta resiprookkisuu den (antennin ominaisuudet ovat samat lähetyksessä ja vastaanotossa) takia palaavan kaiun normalisoitu kentänvoimakkuus saa arvot väliltä 0 – 4. Mikäli keilan etenemiskerroin saa arvon 4, tarkoittaa se sitä, että meren pinnan läheisyydessä olevan pistemaal in tutkapaikkipinta voi kasvaa 16 -kertaiseksi vapaan tilan tutkapaikkipintaan verrattuna.

Laivojen / soppiryhmien voidaankin ajatella koostuvan edellä mainituista, äärettömästä määrästä pistemaaleja. Tällöin tarkastelun kohteena olevan laivan tutkapinta saadaan integroimalla pistemaalien yli, josta kaavan (4.13) mukaisesti nähdään, että efektiivinen tutkapaikkipinta-ala voi olla kuusikertainen vapaan tilan tutkapintaan nähden [11]. Kaavasta nähdään myös, että meren pinnan tasaisuudella sekä jo aiemmin todetun mukaan, tarkastelukulmalla on voimakas suhde efektiivisen tutkapaikkipinta-alan suuruuteen.



$$\sigma_{eff} = \sigma(1 + 4\rho^2 + \rho^4) \quad (4.13)$$

missä  $\sigma$  = vapaan tilan tutkapaikkipinta-ala  
 $\rho$  = pinnan heijastuskerroin ( $0 \leq \rho \leq 1$ )

Sähkömagneettinen säteily vaimenee etäisyyden neliössä. Tästä saadaan [10]

$$R_{max} \approx \sqrt[4]{\sigma} \quad (4.14)$$

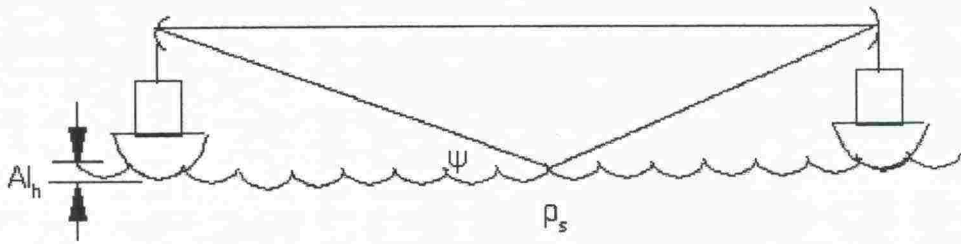
Edellisen perusteella havaintoetäisyyden kaksinkertaistuminen vaatii siis tutkapaikka-alaan kasvamista 12dBsm ! Tämä on helppo tarkastaa tutkayhtälöstä.

Heijastuksen mekanismeja käsiteltiin edellisessä luvussa varsin kattavasti, lukuun ottamatta pinnan karheuden ja epätasaisuuden vaikutusta heijastukseen. Rayleigh'n kriteerin mukaan pintaa voidaan pitää oleellisesti tasaisena, jos pinnan korkeuserot  $\Delta h$  toteuttavat seuraavaa

$$\Delta h \cdot \sin \theta = \lambda / 8 \quad (4.15)$$

Ehdon toteutuessa esimerkiksi tutkasoppien valmistuksessa tulleet epätasaisuudet kuten hitsauksen lämpölaajentuman aiheuttamat kohoumat/epätasaisuudet voidaan jättää huomioimatta laskettaessa sopien tutkapaikkipinta-ala.

Kuten tämän luvun laivaesimerkissä havaittiin, pitkien etäisyyksien johdosta tarkastelukulma on merisovelluksissa hyvin pieni. Tällöin vähäisen aallokon vaikutus myöskin vähenee tutkapaikkipintaan nähden. Aallokon vaikutusta voidaan tutkia heijastuskertoimen  $\rho_s$  avulla yhtälön (4.16) sekä kuvan 4.2 mukaan seuraavasti [13]



Kuva 4.2 Aaltorintaman heijastuminen meren aalloista

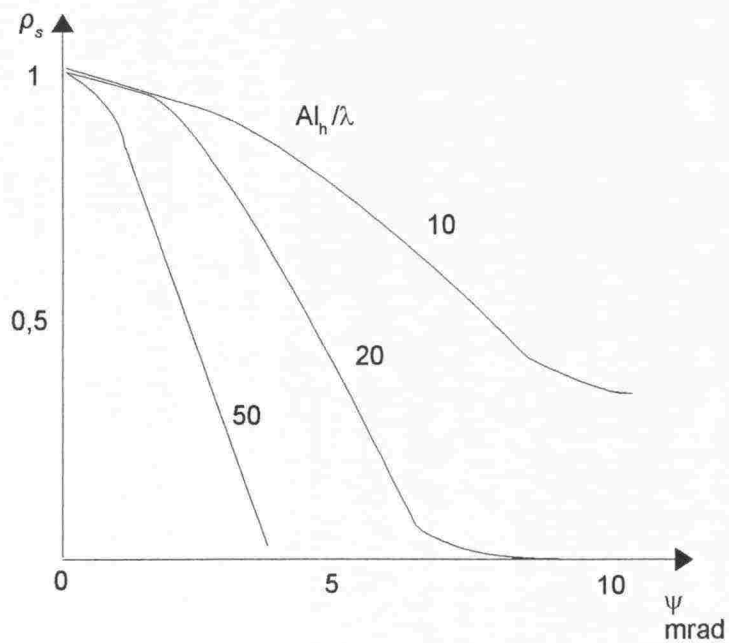
Kuvan 4.2 esittämässä tilanteessa voidaan meren aallonkorkeudelle, tutka-aallon pituudelle sekä tarkastelukulmalle muodostaa yhteys yhtälön (4.16) osoittamalla tavalla, jossa heijastuskerroin määrätään näiden funktiona. [13]

$$\rho_s = \exp\left[-\left(\frac{4\pi A|h \sin \psi}{\lambda}\right)^2\right] \quad (4.16)$$

missä

- $\rho_s$  = heijastuskerroin meriaallosta
- $A|h$  = rms meriaallon aallon korkeus
- $\lambda$  = tutka-aallon pituus
- $\psi$  = heijastuskulma

Kuvasta 4.32 voidaan nähdä, että heijastuskerroin kasvaa heijastuskulman kasvaessa yhdessä meriaallon korkeuden ja tutka-aallon suhteen kanssa. Jo vähäisenkin tarkastelukulman muutos lisää tai vähentää voimakkaasti heijastuskerrointa tilanteessa, jossa meriaallon korkeuden ja tutka-aallon pituuden suhde on yli 20.



Kuva 4.3 Heijastuskertoimen määräytyminen aallokossa

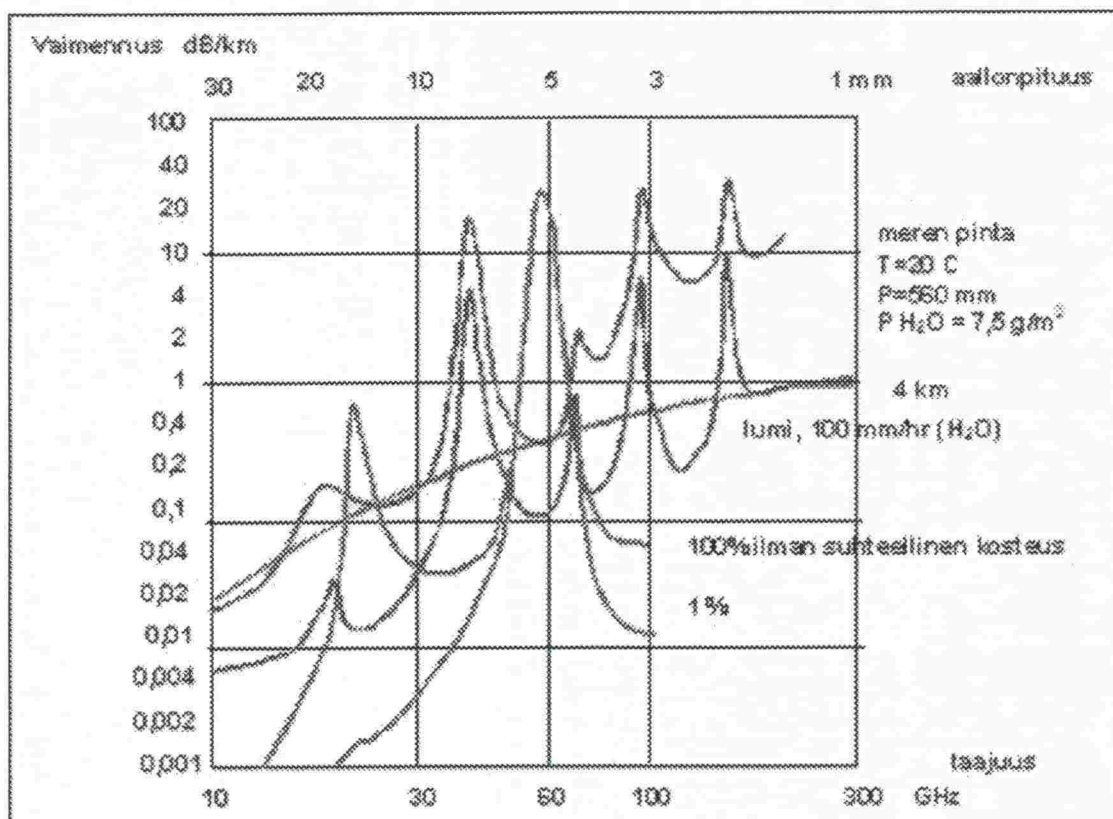
#### 4.1.1 ILMAKEHÄN VAIKUTUS

Monitie-etenemisen ollessa merkittävä tutkakoikkipinta-alaan vaikuttava tekijä on tällainen myös ilmakehässä tapahtuva säteilyn absorptio ja siroaminen. Merkittävimpinä ovat veden ja hapen absorptio, jossa osa radioaallon energiasta absorboituu vesipisaroiden tai hapen muodostamaan dielektriseen väliaineeseen. Hapen ja vesihöyryn resonanssitaajuuudet aiheuttavat näin vaimennuspiikkejä ilmakehässä.

Veden tai vesihöyryn määrä on suoraan verrannollinen näitten aiheuttamaan vaimennukseen. **Sateen merkittävä vaimennus alkaa 10 Ghz taajuudesta alkaen**, missä vesipisaroiden koko vaihtelee millimetrin osista muutamiin millimetreihin. Tässä radioaaltojen sironta noudattaa Rayleigh -sirontaa eli  $\sigma$  on verrannollinen  $f^4$ :een. Sumu vastaavasti koostuu 10 – 50  $\mu\text{m}$  kokoisista vesipartikkeleista, joita enimmillään saattaa olla 1  $\text{g}/\text{m}^3$ . Veden määrä sumussa on suoraan verrannollinen sumun aiheuttamaan vaimennukseen alle 300 Ghz taajuuksilla. **Merenkulkututkissa S ja X -alueella vaikutukset kuitenkin jäävät**

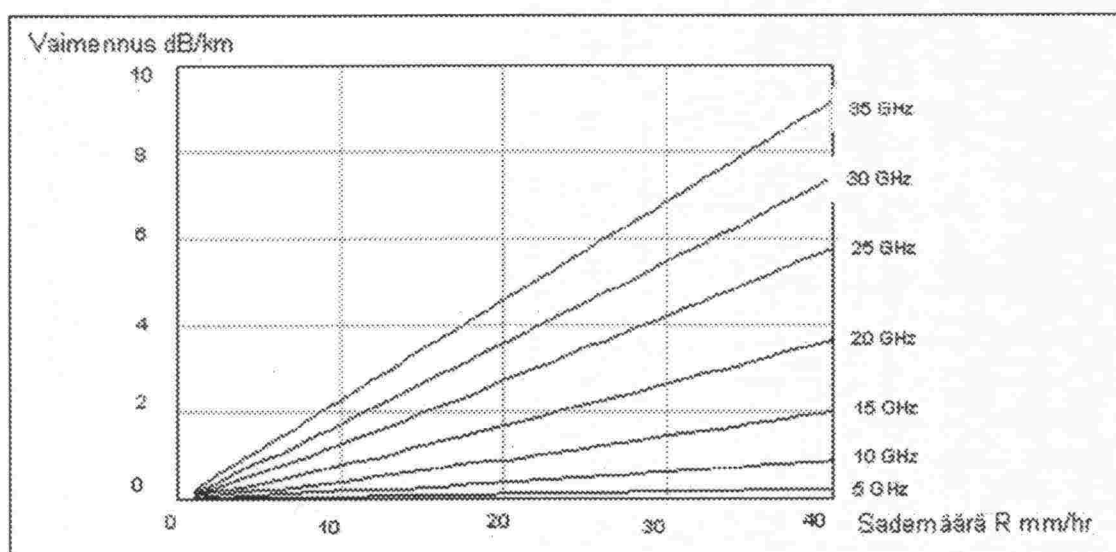


varsin vähäiseksi.

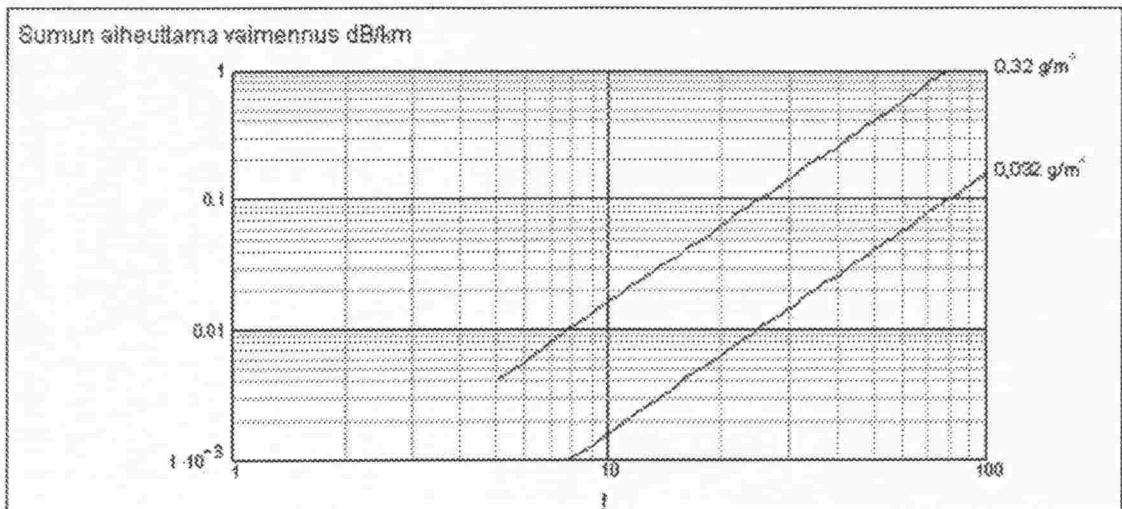


Kuva 4.4 Ilmakehän aiheuttaman vaimennuksen riippuvuus aallonpituudesta (punainen), ilmankosteudesta (sininen) ja sademäärästä (vihreä). [9]

Märkä räntä sekä lumi niinkään aiheuttavat suoraan niiden sisältämään vesimäärän verrannollisen vaimennuksen kuten sumukin.



Kuva 4.5 Radioaallon vaimennus (dB/km) sademäärän R (mm/h) funktiona eri taajuuksilla. [9]



Kuva 4.6 Sumun aiheuttama vaimennus taajuuden (GHz) funktiona. Ylempi kuvaaja esittää sumua, jossa vesipitoisuus on  $0,32 \text{ g/m}^3$  ja alempi sumua, jossa vesipitoisuus on  $0,032 \text{ g/m}^3$ .

#### 4.1.2 HÄILYNNÄN VAIKUTUS

Kun keilaavan tutka sijaitsee laivassa, ei tämän asento pysy vakaana kohteeseen/tutkamerkkiin tai soppiryhmään (viitat) nähden. Laivan muuttuvan asennon johdosta kohteen tutkapaikkipinta-ala voi muuttua useita desibelejä. Merenkäynnin lisääntyessä laivan keinunta lisääntyy ja näin tämä voi pienentää pidemmän aikajakson yli integroitua keksimääräistä tutkapaikkipinta-alaa [10]. Keinunnan lisääntyminen tarkoittaa myös tutkapaikkipinta-alan vaihtelun lisääntymistä, jolloin myös hetkellisiä huippuja vastaanotettavassa tehotiheydessä esiintyy useammin !

Keinunnasta aiheutuvaa tutkapaikkipinta-alan muutosta kutsutaan häilynnäksi. Häilyntä on otettava huomioon tutkayhtälössä, sillä häilynnän takia ilmaisuun vaadittava S/N -suhde kasvaa ja ilmaisutodennäköisyys pienenee. Häilynnän tyyppi määrää vaadittavan S/N -suhteen. Näitä häilyntä tyyppisiä, joita vieläkin käytetään mallinnuksessa, tutki Swerling 1950 -luvulla. Hän kehitti häilyntämallit, jotka on jaoteltu viiteen eri malliin, niistä ensimmäisen ollessa täysin häilymätön malli eli Swerling 0. Swerling malleilla voidaan riittävällä tarkkuudella mallintaa häilyntää useimpien maalityyppien tapauksissa.

Swerling mallit 1-4 määritetään seuraavasti [3]:

Malli 1: Mallissa oletetaan, että maali koostuu useista riippumattomista, tutkapoikkipinta-aloiltaan samansuuruisista satunnaissirottajista. Yhden keilauksen aikana saatujen kaikupulssien amplitudi oletetaan vakioksi (keilan muodosta johtuvaa amplitudivaihtelua ei oteta huomioon). Useista eri keilauksista saadut kaikupulssit oletetaan korreloimattomiksi. Kyseessä on ns. hidas häilyntä eli kaikupulssien amplitudi vaihtelee keilauksesta toiseen. Tutkapoikkipinnan todennäköisyyden tiheysfunktio on Rayleigh -jakautunut eli

$$p_{\sigma} = \frac{1}{\sigma_{av}} e^{-\sigma/\sigma_{av}} \quad (4.17)$$

missä  $\sigma_{av}$  = keskimääräinen tutkapoikkipinta

Malli 2: Tutkapoikkipinnan todennäköisyyden tiheysfunktio on yhtälön (4.17) mukainen, mutta kaikupulssien amplitudi vaihtelee riippumattomasti pulssista toiseen saman keilauksen aikana. Kyseessä on ns. nopea häilyntä. Mallia 2 voidaan soveltaa esim silloin, kun tutkan pulssintoistotaajuus ja antennin pyörimisnopeudet ovat pieniä.

Malli 3: Malli soveltuu käytettäväksi silloin, kun maalissa on yksi hallitseva sirottaja ja useita pienempiä sirottajia. Yhden keilauksen aikana saatujen kaikupulssien amplitudi oletetaan vakioksi ja useista eri keilauksista saadut kaikupulssit oletetaan korreloimattomiksi, kuten mallissa 1. Kyseessä on jälleen hidas häilyntä. Todennäköisyyden tiheysfunktio saadaan

$$p_{(\sigma)} = \frac{4}{\sigma_{av}^2} \sigma e^{-2\sigma/\sigma_{av}} \quad (4.18)$$

Malli 4: Tutkapoikkipinnan todennäköisyyden tiheysfunktio on yhtälön (4.18) mukainen. Erona malliin 3 on se, että häilyntä on nopeaa eli kaikupulssien amplitudi vaihtelee pulssista toiseen saman keilauksen aikana.

Swerling -mallien lisäksi on kehitetty myös muita häilyntämalleja kuten Weinstock ja Rice -mallit. Näistä saa lisätietoja lähteestä [7].



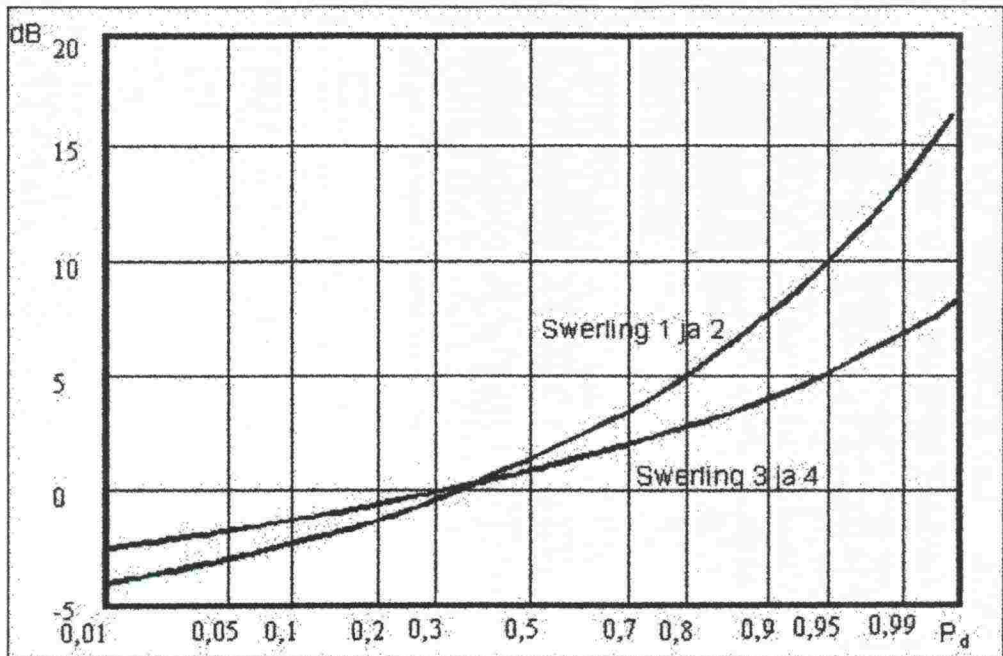
Soppiheijastimien tapauksessa Swerling -malleja soveliaampaa on käyttää *log-normaali-jakaumaa*, missä maalista saadaan suuria kaikapulsseja vain muutamasta suunnasta. Malli onkin kehitetty suurien, yksittäisten metallipintojen sekä erityisesti erikokoisten soppiheijastimien muodostamien ryhmien häilynnän tutkimiseen. Mallia käytetään edellisten lisäksi mm. sateliittien ja avaruusalusten mallintamiseen. Tiheysfunktio tässä saadaan [3]

$$P_{(\sigma)} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi s_d \sigma} e^{[-\ln(\sigma/\sigma_m)]^2 / 2s_d^2} \quad (4.19)$$

missä  $\sigma_m$  = tutkapaikkipinnan  $\sigma$  mediaani  
 $s_d$  = termin  $\ln(\sigma/\sigma_m)$  keskihajonta

Kohteiden herätteiden mallintaminen ei häilyntämalleista huolimatta ole yksinkertaista monitie-etenemisestä johtuen.

Häilynnän huomioimista varten on kirjallisuudessa [1][2][3][7][9][12] runsaasti valmiita käyrästöjä, joista yksi on esitettyä kuvassa 4.7, missä kuvataan maalin häilynnän huomioon ottamiseen tarvittava lisä (dB) signaalikohinasuhteeseen eri häilyntämalleissa havaitsemistodennäköisyyden  $P_d$  funktiona.



Kuva 4.7 Swerling -mallien vaikutus S/N -suhteeseen otettavaan lisään havaitsemistodennäköisyyden funktiona. [9]

#### 4.1.3 TODELLISTEN KAPPALEIDEN TUTKAPOIKKIPINTA

Liitteessä 1 on esitettyinä eräiden yksinkertaisten kappaleiden tutkapaikkipintoja. Liitteen esimerkeissä on oletuksena, että niiden mitat ovat aallonpituutta  $\lambda$  suuremmat. Näitä tarkasteltaessa on kuitenkin huomioitava, että tutkapaikkipinta on hyvin voimakkaasti riippuvainen tarkastelukulmasta. Seuraavassa muutamia esimerkkejä näiden suuntaa antavista tutkapinta-arvoista (9 Ghz):

- laivat n. 10000 m<sup>2</sup> sivusta (40 dB)
- kuljetuskoneet n. 1000 m<sup>2</sup> (30 dB)
- soppiryhmälä varustettu 350 mm meriviita 600 m<sup>2</sup> (28 dB)
- pienkoneet n. 10 m<sup>2</sup> (10 dB)
- USS Sea Shadow ? m<sup>2</sup> (? dB)
- ihminen n. -10 – 0 m<sup>2</sup> (-10 – 0 dB)
- linnut n. 0,01 m<sup>2</sup> (-20 dB)
- hyönteiset 0,001 m<sup>2</sup> (-30 dB)
- häivemuotoiltu F117 -hävittäjä edestä n. 0,0005 m<sup>2</sup> (-35 dB)





Kuva 4.8 USS Sea Shadow (kuva luettu 07.02.2004 ositteesta [members.aol.com/patmat2351/seashadow.htm](http://members.aol.com/patmat2351/seashadow.htm))

## 5. TUTKAPOIKKIPINTA-ALAN MÄÄRITTÄMINEN

Teoreettisia laskentamenetelmiä tai paremmin arviointimenetelmiä on mm. fysikaalinen ja geometrinen optiikka, näiden diffraktiomallit, lähdejakaumatekniikka, jako geometrisiin komponentteihin, momentti- ja UTD -menetelmä sekä ns. Skolnikin "mediaanimalli". Näitten menetelmien pohjalta on kehitetty myös kaupallisia laskentaohjelmistoja, joista nimeltä mainittuna muutamia tämän luvun lopussa.

### 5.1 GEOMETRINEN OPTIIKKA

Laskentamenetelmänä geometrisessa optiikassa (Geometrical Optics, GO) tutkapoikkipinnan laskennassa voidaan hyödyntää sädeteoriaa, jolla voidaan mallintaa tutka-aallon suoraa etenemistä, heijastumista ja läpäisyä. Itse asiassa geometrisessa optiikassa mallinnetaan valon etenemistä lisäämällä ilmiöön epätasaisuuksien aiheuttama sironna sekä reunoista tapahtuva diffraktio (geometrinen diffraktioteoria, GDT) [7]. Geometrisessa optiikassa sironnan vaikutusta varsinaisesti ei oteta huomioon vaan se lasketaan siroajien läpäisy- ja heijastuskertoimissa.



Geometrista optiikkaa voidaan käyttää, kun aallonpituus on hyvin pieni verrattuna laivan fyysisiin mittoihin. Tällöin heijastus noudattaa tasoallon heijastuslakeja. Menetelmässä jaetaan saapuva kenttä sädekimppuihin, joilla on omat tulevan kentän amplitudinsa. Laskennassa jätetään polaariset vaikutukset huomiotta ja kohteeseen osuvan säteen tulokulma oletetaan yhtä suureksi kuin lähtökulma pinnan normaaliin nähden [14]. Jotta teoria olisi käyttökelpoinen tulee soveltajan tietää laivan heijastuspisteet ja pintojen kaarevuussäteet eri tarkastelukulmista, jolloin voidaan muodostaa tutkapaikkipinnan ja pinnan kaarevuussäteiden välille toisistaan riippuva yhteys [14].

Geometrista optiikkaa pidetään soveliaimpana teoreettisena menetelmänä arvioitaessa sirontaa suurista kappaleista ja moninkertaisissa heijastuksissa siroavien pintojen ollessa toistensa lähikentässä. Lähikentän yläraja määritetään [15]

$$R_L = \frac{(d \cdot \cos \theta_i)^2}{\lambda} \quad (5.1)$$

missä  $d$  = sirottajan suurin dimensio  
 $\theta_i$  = säteen tulokulma pinnan normaaliin nähden

Geometrisen optiikan laskennan vaiheet voidaan jaotella seuraavasti:

1. Mallinnetaan todellinen kappale halutuista tarkastelukulmista (esim mittatarkka tekninen piirros, CAD -kuva).
2. Projisoidaan tuleva aalto tarkastelusuunnassa kappaletta vasten käyttäen säteenheitto- tai peilikuvamenetelmää.
3. Valaistut alueet rajataan ja kolmioidaan.
4. Tarkastetaan, että "valaistut kolmiot" ovat kooltaan aallonpituuksissa riittävän suuria (min kaksi aallonpituutta).
5. Moninkertaisia heijastuksia varten tarkastetaan, että kolmiot sijaitsevat vastaavien "valaisevien kolmioiden" lähikentässä (diffraktion johdosta "varjosäde" ei jatka suoraan tulevien säteiden suuntaisesti vaan hajoaa halkaisijaltaan  $d + L\lambda/d$  [varjon leveys + varjon pituus \* aallonpituus / varjon leveys] leveäksi aaltorintamaksi. [15]

6. Määritetään kolmioiden kenttäjakaumat ja suoritetaan laskentarutiinit kolmio kerrallaan.

Geometrisessa optiikan mallinnusmenetelmiä on säteenheittomenetelmä ja peilikuvamenetelmä [1].

### **5.1.1 SÄTEENHEITTOMENETELMÄ**

Tässä menetelmässä mallinnetaan tutkasäteiden etenevän siten, että kahden vierekkäisen säteen välinen etäisyys tai heijastuskulma pidetään samassa tilassa toistensa suhteen. Maalin oletetaan sijaitsevan kaukokentässä, jolloin käytettävänä aaltomuotona on tasoaalto.

Säteenheittomenetelmässä käsiteltäviksi säteiksi hyväksytään vain heijastuneen säteen komponentit ja säteitä seurataan vain siihen asti kunnes niiden teho siirtyy tutkittavan alueen ulkopuolelle. Laivan pinnoista "läpiheijastuneet" tai kulmassa etenemissuuntaan kimmonnet säteet hylätään laskennassa.

Laskentaan asetettujen säteiden kappalemäärä määrää laskentatarkkuuden. Menetelmässä voidaan mallintaa monitie-etenemistä ja se mahdollistaa muidenkin kuin tasoaaltojen mallintamisen.

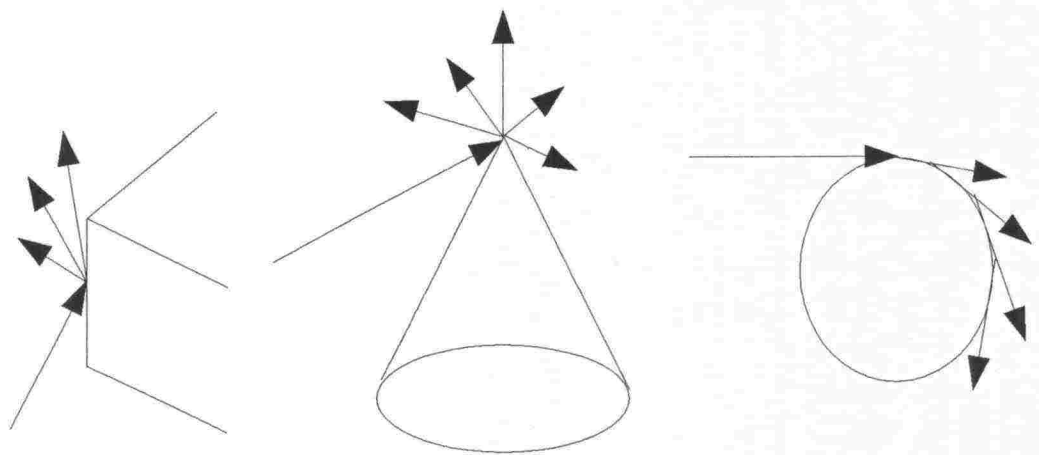
### **5.1.2 PEILIKUVAMENETELMÄ**

Peilikuvamenetelmässä tarkastellaan sitä, syntyykö yhteys heijastuneen säteen vastaanottimen välille vai ei. Tässä, tarkasteltavan kohteen esim laivan kaikki pinnat oletetaan heijastaviksi tasoiksi. Menetelmässä puhutaan todellisesta heijastumisesta ja puhtaasta heijastumisesta. Tasopintaan osuva säde peilataan kohtauskulmansa suhteen aallon etenemissuunnan mukaisesti. Kuvitellulta lähettimeltä/tutkalta vedetään suora jana peilikuvapisteeseen. Jos peilaustason ja edellä mainitun janan leikkauspiste pysyy tutkittavan tason sisällä, voidaan heijastus hyväksyä laskentaan mukaan. Tällöin puhutaan todellisesta heijastuksesta. Jos vastaavasti säteen kohdalle ei osu muita tarkasteltavia tasoja, puhutaan puhtaasta heijastumisesta [1].

Kun kaikki heijastukset on saatu määritettyä, voidaan vastaanotettu sähkökenttä laskea. Monimutkaisille tai monia tasopintoja käsittäville kohteille peilikuvamenetelmä on raskas. Malli soveltuukin paremmin yksinkertaisen geometrian omaaville kohteille. Geometrian ymmärrys on kuitenkin tämän menetelmän etu keilanheittomenetelmään verrattuna.

## 5.2 GEOMETRINEN DIFFRAKTIOTEORIA

Tutkasäteen osuessa reunaan tai särmään, syntyy tähän uusi säteilylähde eli syntyy diffraktiosäteitä. Näistä säteistä osa etenee särmän varjoalueelle. Tutkittaessa särmää reilun etäisyyden päässä, käyttäytyvät diffraktiosäteet kuin muutkin tutkasäteet. Tätä ilmiötä silmälläpitäen kehitettiin geometrisen optiikan laajennus jota kutsutaan geometriseksi diffraktioteoriaksi (Geometrical Theory of Diffraction, GTD).



Kuva 5.1 Tutkasäteen hajoaminen diffraktiossa. Diffraktiomekanismit järjestyksessä vasemmalta: terävä särmä, kärki ja kupera pinta. Jokaiselle edellä mainitulle tyypille on omat diffraktiokaavansa.

Geometrisessa diffraktiomenetelmässä lasketaan geometrisen optiikan tapaan heijastuneille sekä "läpiheijastuneille" säteille läpäisy ja heijastuskertoimet. Käytettävän aaltotyypin mukaisesti voidaan määrittää säteen vastaanottopisteen diffraktiokenttä  $E_{diff}$ . Aaltorintaman ollessa sylinteriaalto (esimerkkiä tasoaallostaa ei löytynyt) voidaan diffraktiokenttä laskea kaavasta 5.2).

Geometrisen diffraktioteorian ongelmana on se, ettei se kykene mallintamaan



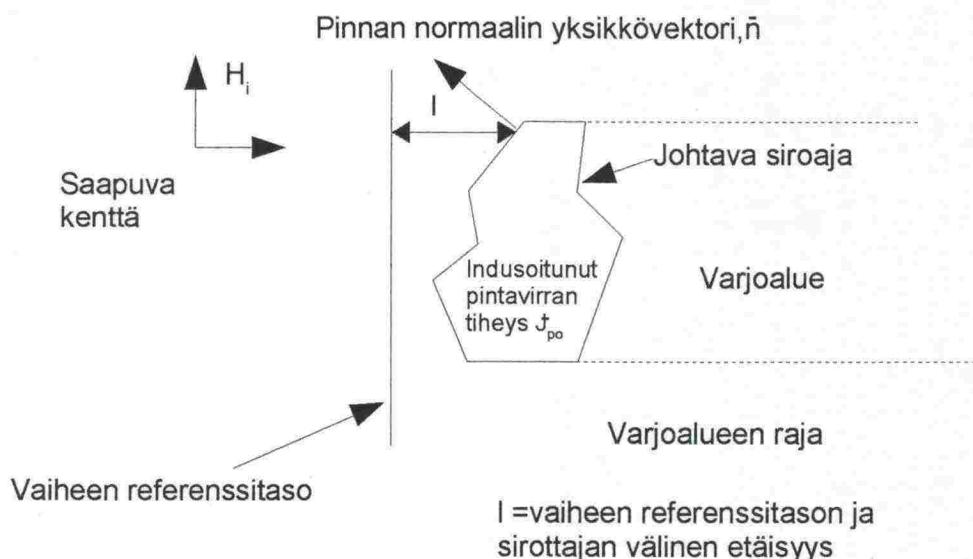
kenttää lähellä heijastus- ja varjoalueen rajapintoja. Geometrista diffraktioteoriaa kehittyneempi teoria on ns UTD -menetelmä (Uniform Theory of Diffraction). Lisätietoja tästä löytyy lähteestä [1].

$$E_{diff} = D_{diff} \cdot E_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{r}} \cdot e^{jkr} \quad (5.2)$$

missä  $E_0$  = diffraktiopisteen kenttä  
 $r$  = etäisyys diffraktiopisteestä vastaanottimeen  
 $D_{diff}$  = diffraktiokerroin

### 5.3 FYSIKAALINEN OPTIIKKA

Fysikaalisessa optiikassa (Physical Optics, PO) kohde oletetaan jaetuksi tasomaisiin pintaelementteihin eli maalin kaarevuussäteen oletetaan olevan paljon suurempi kuin tutka-aallon pituus. Jaetut pinnat toimivat laskennassa siroavan kentän lähteenä, joista heijastukset voidaan ilmaista indusoituneiden pintavirtojen eli rajapintaehtoien avulla. Pintaa, jonka asetettu säde peittää kutsutaan valaistuksi alueeksi (kuva 5.2), jossa kaikki pisteet peittoalueella sirottaa kentän ikään kuin pisteen kohdalla olisi suuri tangenciaalinen tasopinta.



Kuva 5.2 Indusoitunut pintavirta täydellisen johteen pinnalla [3]

Fysikaalinen optiikka on menetelmänä yksinkertainen ja se on myös sen etu. Menetelmä on käyttökelpoinen yksinkertaisten muotojen mallintamisessa. Monimutkaiset pinnat voidaan vastaavasti jakaa sellaisiin osiin, että yksittäisten osien laskenta onnistuu fysikaalisen optiikan keinoin. Tässäkin menetelmässä diffraktio jää huomioonottamatta.

Fysikaalista optiikkaa käyttävät mallit on helpompia mallintaa kuin geometrista optiikkaa käytettäessä. Laskentakaavojen yksinkertaisuus maksetaan kuitenkin laskennan lisääntymisenä.

## 5.4 FYSIKAALINEN DIFFRAKTIOTEORIA

Fysikaalinen diffraktioteoria ottaa huomioon myös reuna- ja pinta-aaltosironnan. Menetelmä ei kuitenkaan huomioi kulkuaaltoja eikä ryömiviä aaltoja, mikä on sen heikkous. Perusidea menetelmässä on jakaa pinta "tasaisen virran" sekä "epätasaisen virran" alueisiin. Tällä periaatteella myös sironnut sähkökenttä saadaan kaavasta (5.5).

$$E_{kok}^S = E_{po} + (E_K^d - E_{po}^d) = E^{unif} + E^{nu} \quad (5.3)$$

missä

- $E_{unif}$  = "tasainen sähkökenttä"
- $E_{nu}$  = "epätasainen" sähkökenttä
- $E_{po}$  = heijastunut + diffraktoitunut kenttä
- $E_K^d$  = Kellerin diffraktiokertoimella laskettu kenttä
- $E_{po}^d$  = fysik. optiikan avulla lask. Diffraktoitunut kenttä

Tasainen kenttä määritetään fysikaalisen optiikan keinoin. Epätasaisen kenttä määritetään fysikaalisen diffraktioteorian mukaan. Tämän määrittäminen on kuitenkin matemaattisesti hankalaa. Menetelmällä, monimutkaisuudesta huolimatta, voidaan paikantaa diffraktiota aiheuttavat kohdat monimutkaisestakin rakenteesta. Fysikaalinen optiikka ja fysikaalinen diffraktioteoria onkin käyttökelpoisia tilanteissa, joissa kappaleella on monia aallonpituutta pienempiä pintoja (yhteisvaikutus suuri), joissa geometrisen optiikan teoria ei toimi.

## 5.5 MUUT ARVIOINTIMENETELMÄT

Kun tutkapinta-alasta ollaan kiinnostuneita karkealla tasolla, voidaan arvio tehdä Skolnikin mediaanimallilla tai jakamalla kohde geometrisiin komponentteihin. Jälkimmäisessä mallissa kohde jaetaan osakomponentteihin. Oletuksena on, että osakomponenttien tutkapinta on tiedossa. Osasirottajien tutkapinta-aloista otetaan neliöjuuri ja lasketaan ne oikeassa vaiheessa yhteen. Edellytyksenä on, että kaikkia vaiheita verrataan kentän etenemissuuntaa vastaan olevaan kohtisuoraan referenssitason, jolloin tutkapoikkipinta saadaan

$$\sigma = \left| \sum_{i=1}^N \sqrt{\sigma_i} e^{j\phi_i} \right|^2 \quad (5.4)$$

missä  $\sigma_i$  = i:nen komponentin tutkapoikkipinta  
 $\phi_i$  = edellisen suhteellinen virhe

## 5.6 KAUPALLISET LASKENTAOHJELMAT

Kaupallisia laskentaohjelmistoja on ollut jo vuosia saatavilla. Sotilaskäyttöön näitä on kehitetty arviolta jo 1980 -luvulta lähtien. Ohjelmia käytettäessä on kohteen muoto oltava tarkasti selvillä eli käyttöä varten tarvitaan tarkka CAD -piirustus. Seuraavassa yhteenveto kahdesta ohjelmistokokonaisuudesta.

### **CAST -ohjelmisto**

Valmistaja: VTT Tietotekniikka

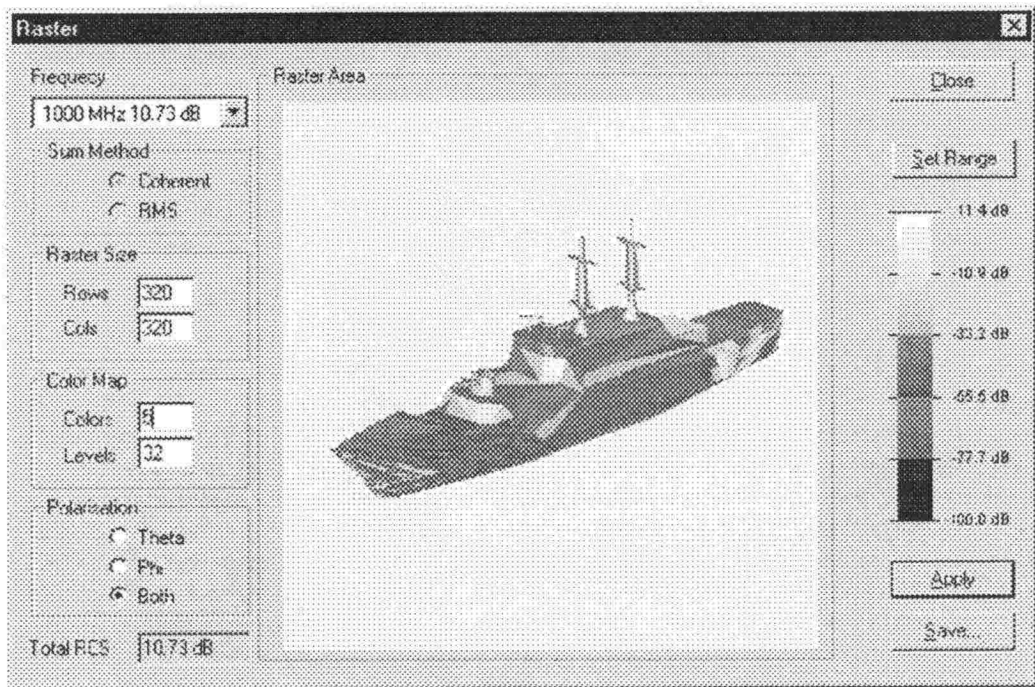
Rahoittaja: Merivoimien tutkimuslaitos

CAST -ohjelma huomioi tasoallon suorat sekä monikertaiset heijastukset. Laskentamenetelminä käytetään fysikaalista optiikka, fysikaalista diffraktioteoriaa sekä APO -menetelmää eli antenniteoriaa hyväksikäyttävää fysikaalisen optiikan menetelmää [16]. Tässä kohteen muodot saadaan mittatarkasta CAD -piirustuksesta, jotka saadaan suoraan luettua ohjelmaan. "Valaisupinnalle" käytetään kolmiointi menettelyä, joista jokainen pinta lasketaan erikseen.



Ohjelmistossa aluksen vesiraja voidaan asettaa haluttuun tasoon ja ohjelmisto ottaa huomioon myös materiaalin vaikutuksen tulokseen.

Cast -ohjelmiston laiteympäristö tukee Windows NT/2000 -ympäristöä. Ohjelmointi on suoritettu VisualC++ -ohjelmalla. Tulokset voidaan esittää Matlab -ympäristössä, jossa lisäfunktioiden laadinta on mahdollista.



Kuva 7.3 Esimerkki CAST -ohjelman kolmiointimallista ja tulosten esitystavasta

## Epsilon Release 14

Roke Manor Research Ltd:n valmistama Epsilon tutkapaikkipinta-alan määrittämiseen tarkoitettu ohjelmisto käyttää laskennassa hyväksi fysikaalista optiikkaa sekä fysikaalista diffraktioteoriaa. Valmistaja lupaa, että ohjelmalla voidaan laskea myös moninkertaiset heijastukset geometrisen ja fysikaalisen optiikan yhdistelmän keinoin, missä varjoalueet voidaan ottaa laskentatuloksessa huomioon.

Ohjelma tukee useimpia CAD -formaatteja, jotka ohjelma mainoksen mukaan

Roke www -sivuilla lupaa automaattisesti tunnistaa ja muuttaa ohjelman käyttöön erityisen CAD -muuntimen avulla. Ohjelmiston perusversio toimii UNIX-ympäristössä Roke Manor Research Ltd tutkii, kehittää ja valmistaa tutkajärjestelmiä sekä myy simulointipalveluja sekä julkiselle- että sotilassektorille.

## 6. MITTAAMINEN

Tässä luvussa käsitellään kahta erilaista mittaustapaa, pienoismallimittauksia laboratoriossa sekä täysmittakaavamittauksia. Molemmille mittaustavoille on olemassa useita mittausten menetelmiä ja se mikä parhaiten kulloinkin tiettyyn mittaukseen sopii, riippuu mitattavasta kohteesta, käytössä olevista mittalaitteista sekä käytetystä analyysimenetelmästä.

### 6.1 PIENOISMALLIMITTAUKSET

Pienoismallimittaus on käyttökelpoinen tapauksissa, joissa kohteen mittaaminen sen oikeassa toimintaympäristössä on vaikeaa tai on tilanne ettei käytössä ole kuin antennimittauksiin soveltuva laitteisto ja tila. T

Mittaustilan, missä toimenpiteet suoritetaan, täytyy täyttää tietyt vaatimukset mittauksen ja erityisesti analysoinnin onnistumiseksi. Mittaustilan pitää olla heijastukseton eli radiokaiuton. Tätä tarkoitusta varten huone ja huoneen tukirakenteet täytyy päällystää/vuorata absorptiomateriaalilla. Absorptiomateriaalit jaetaan absorboiviin, resonoiviin sekä dispersiivisiin materiaaleihin. Absorboivissa materiaaleissa sähkömagneettinen säteily muutetaan lämmöksi molekyylien värähtelyn ansiosta. Resonoivissa kohteen pinnoilta ja pinnoitteesta heijastuneet säteet kumoavat toisensa. Rajoitteena tässä on, että pinnoitemateriaalin tulee olla aallonpituuteen nähden van  $\frac{1}{4}$  -osa. Dispersiivisissä pinnoitteissa absorptio saadaan aikaan permeabiliteetin ja permittiivisyyden suhteesta käytettyyn aallonpituuteen nähden. Absorptiomateriaaleista saa lisätietoja lähteestä [1].

Mittausta pienoismallista ei voi suorittaa ilman tiettyjä reunaehtoja. Oikean



kohteen ja pienoismallin suhde asettaa myös käytettävän tutkan aallonpituuden suhteen siihen aallonpituuteen, joka olisi käytössä siinä tutkassa, jolla luonnollisen kokoista kohdetta valaistaisiin. Tälle suhteelle voidaan johtaa yhtälö

$$\frac{\lambda_M}{\lambda_0} = \frac{D_M}{D_0} \quad (6.1)$$

missä  $\lambda_0$  = aallonpituus luonnollisessa mittauksessa  
 $\lambda_M$  = aallonpituus pienoismallimittauksessa  
 $D_0$  = kohteen mikä tahansa luonnollinen mitta  
 $D_M$  = kohteen vastaava mitta pienoismallissa

Kaukokenttä etäisyys saadaan vastaavasti

$$\frac{R_M}{R_0} = \frac{D_M}{D_0} \quad (6.2)$$

missä  $R_0$  = kaukokentän raja luonnollisessa mittauksessa  
 $R_M$  = kaukokenttä pienoismallimittauksessa

Pienoisallimittauksissa ongelmallisinta on pienoismallin materiaalien sähköisten ominaisuuksien skaalaus oikeaan suhteeseen. Pienoisallin eri materiaalien permittiivisyydet ja permeabiliteetit täytyy olla samat kuin luonnollisella kohteellakin. Ongelmaksi usein muodostuu hyvien johteiden skaalaus. Monissa tapauksissa tämä voi olla jopa mahdotonta. Se kuinka paljon tämä aiheuttaa virhettä, riippuu hyvin skaalattavien ja huonosti skaalattavien materiaalien suhteesta luonnollisessa kohteessa.

Pienoisallista saatujen tulosten perusteella todellinen tutkapaikkipinta saadaan

$$\sigma_0 = \left( \frac{\lambda_0^2}{\lambda_M^2} \right) \cdot \sigma_M \quad (6.3)$$

Jotta maalista saadaan todellinen kuva, on sitä valaistava useasta kulmasta sekä



useasta korkeustasosta. On myös muistettava, että mittaus on vain tietyn taajuuden antama kuva. Jotta todellinen tilanne saadaan, on mittauksia myös suoritettava useammilla taajuuksilla ja eri polarisaatioilla. Tuloksia luettaessa onkin huomattava, että tulokset usein esitetään keskimääräisenä tutkapoikkipinta-arvona.

## 6.2 TÄYSMITTAKAAVAMITTAUKSET

Seuraavassa esitetään kaksi menetelmää täysmittakaavamittauksille. Ensimmäisenä esitetään mittaus, jossa käytetään käänteistä synteettisen apertuurin tutkaa eli ISAR -tutkaa (Inverse Synthetic Aperture Radar) ja toisena laivan tutkapoikkipinta-alamittaus eräällä seurantatutkalla (X -alue)..

### 6.2.1 ISAR -MITTAUKSET

Tutkapoikkipinta-alamittauksia voidaan suorittaa ISAR -tutkalla maa-asemasta käsin. Kun synteettisen apertuurin tutka (SAR -tutka) muodostaa kaksiulotteisen kuvan liikkeessaan kohteeseen nähden, ISAR -tutka puolestaan pysyy paikoillaan ja kohde, edellä kuvatun mukaisesti pyörii akselinsa ympäri. Poikittaissuuntainen informaatio saadaan dopplertaajuuden avulla, jossa erottelukykyä voidaan parantaa kapeakaistaisella antennilla. Pulssikompression avulla vastaavasti voidaan parantaa etäisyysuuntaista resoluutioita [1]

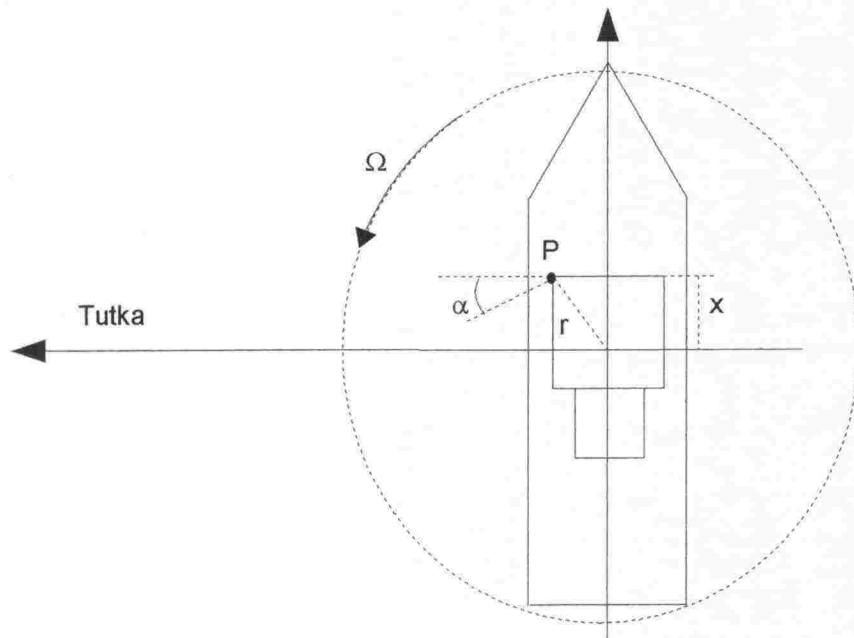
Kuvassa 6.1 on esitetty pyörivän laivan etäisyys-dopplermittaus lähteessä [3] olevan esimerkin mukaisesti, jossa tutka valaisee kohdetta, kohde pyörii paikallaan akselinsa ympäri kulmanopeudella  $\omega$ . Mittaus tehdään kaukokentässä ja aalto etenee  $z$  -suunnassa pyörähdyksen tapahtuessa  $y$  -akselin suuntaan. Tästä voidaan synteettisen apertuurin syntyvän kappaleen ympärille, jossa pyörimisakselilta etäisyydellä  $r$  olevan pisteen  $P$  aiheuttama dopplertaajuus saadaan seuraavasta kaavasta

$$f_D = \frac{2 \Omega r \cos \alpha}{\lambda} = \frac{2 \Omega x}{\lambda} \quad (6.4)$$

Doppler taajuus on näin verrannollinen pyörityspisteen ja pisteen  $p$  väliseen etäisyyteen  $x$ -akselilta katsottuna. Kohteen heijastinkertoimen mittausta voidaan tehdä FFT -algoritmia hyväksikäyttäen. Yhtälöstä (6.4) saadaan erottelukyvyn poikittaissuunnassa [3]

$$\Delta x = \Delta f_D \frac{\lambda}{2\Omega} = \frac{1}{\Delta T} \cdot \frac{\lambda}{2(\Delta\theta/\Delta T)} = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \quad (6.5)$$

missä  $\Delta f_D$  = dopplertaajuuden erottelukyky  
 $\Delta T$  = dopplertaajuuden mittausaika l. integrointi-aika  
 $\Delta\theta = \Omega \Delta T$  = kulma, jonka kohde pyörii aikana  $\Delta T$



Kuva 6.1 Pyörivän maalin etäisyys-dopplermittaus [3]

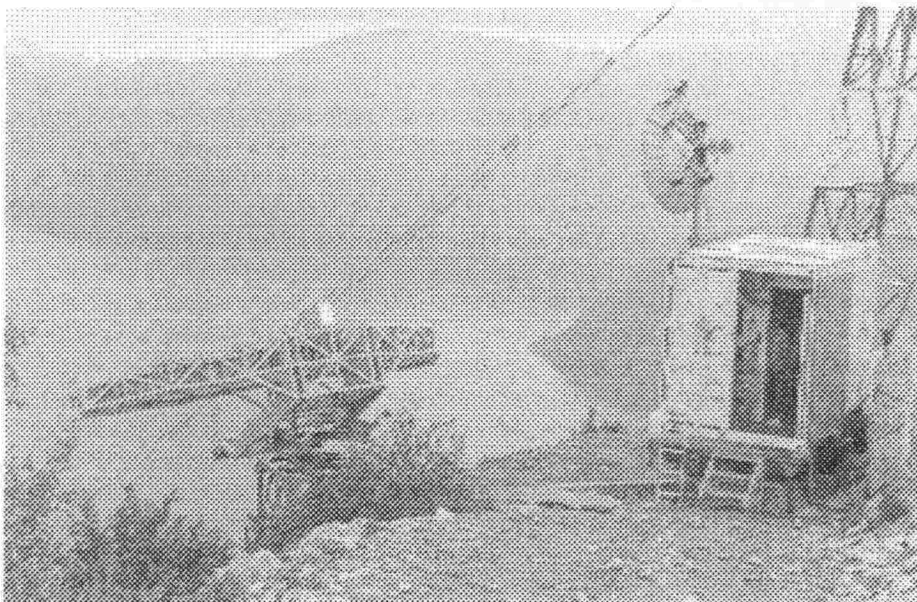
Menetelmässä on monia erityispiirteitä, jotka pitää tarkkaan tuntea, jotta mittaus onnistuu ja tuloksia voidaan pitää luotettavina. Esimerkiksi sirontakohtien liike



erottelukyky alkiosta toiseen on eräs ongelma, joka pitää osata kompensoida. Tämä tapahtuu, jos kaavan (6.5) tapauksessa  $\Delta T$  on liian suuri. Tästä seuraa, että piste  $p$  ei pysy poikittais- eikä etäisyysuuntaisessa erottelukykyalkiossaan eli pisteen  $p$   $x$ -koordinaatti muuttuu dopplertaajuuden muuttuessa  $\Delta T$  aikana. Myös poikittais- ja etäisyysuuntaisella erottelukyvillä on rajoituksensa [1][19].

Edellisen lisäksi on huomioitava, että jos kohteen kahdella pisteellä on eri  $y$ -koordinaatit, mutta samat  $x$  ja  $z$ -koordinaatit, pisteitä ei voida erottaa toisistaan koska pisteiden etäisyys ja myös dopplertaajuus muuttuvat samalla tavalla. Edellytys on, että kunkin pisteen etäisyys muuttuu eri tavalla kohdetta pyöritettäessä [3].

Kun aallokossa keinuvan, keskiakselinsa ympäri pyörivän/pyöritettävän kohteen liikemekanismeja ei tunneta, tuottaa tämä epätarkkuutta mittaukseen. Lisäksi juuri oikean kaiun poimiminen signaallsita on oma lukunsa, joka vaatii sopivan suodattimen rakentamista järjestelmään. Tässä tyydytään ISAR -tutkalla tapahtuvan mittauksen esittelyyn yllä olevassa laajuudessa. Riittävän taustatiedon omaava henkilö voi hakea lisätietoja ISAR -mittauksista lähteistä [1] ja [19].



*Kuva 6.2* Metrateg Ltd:n ISAR -mittausasema.  
Kuva luettu 16.02.2004 [www.ziplink.net/users/metrateg/html/](http://www.ziplink.net/users/metrateg/html/)



## 6.2.2 KÄYTÄNNÖN RCS MITTAUKSET

Mittauksissa, joissa ei käytetä referenssikohdetta voidaan mittaukset suorittaa esimerkiksi diodi-ilmaisimen ilmaisujännitettä mittaamalla. Tällainen diodi-ilmaisim on esimerkiksi aaltojohtoon tai aaltoputkeen sovitettu Schottky-, pn- tai jokin muu neliölakia noudattava ilmaisim. Tässä hyötysignaali on tehoon verrannollinen tasakomponentti, joka on suoraan verrannollinen suurtaajuuden signaalin tehoon eli jännitteen neliöön. Ilmaistun jännitteen ja liitokseen syötetyn signaalin tehon suhde  $P_s$  saadaan:

$$\beta_v = \frac{V_o}{P_s} \quad (6.6)$$

“Diodi-menetelmä” ei ole yksinkertainen. Menetelmässä on huomioitava liitoksen esijännite, piiriin resistanssit sekä mahdollisesti aiheutuvat hajainduktanssit ja -kapasitanssit. Saatavaa lopputulosta varten on tämän lisäksi huomioitava mittausvälin vaimennukset, joka on usein hankalaa ja arvio on vain suuntaa antava. Käytännön mittaukset kestävät useita tunteja, minkä aikana ilmakehän ominaisuudet saattavat muuttua ja näin tuoda epävarmuutta lopputulokseen.

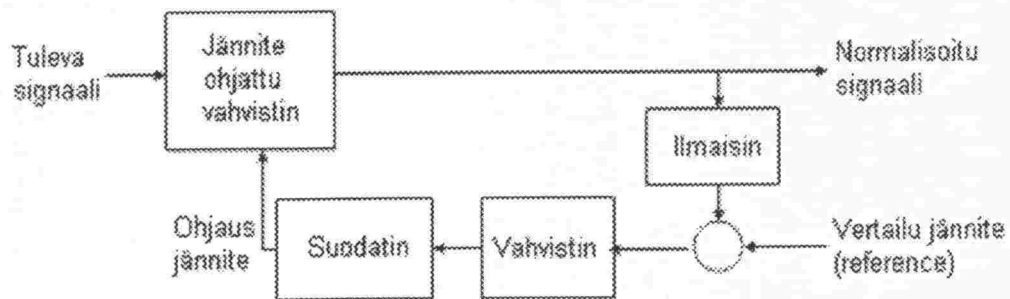
Tunnettuun referenssimalliin perustuva vertailumittaus/analysointi onkin välttämätöntä ilmakehässä tapahtuvan sironnan ja absorption aiheuttaman vaimennuksen huomioon ottamiseksi luotettavasti mittaustuloksissa. Vertailumittauksissa menetelmänä käytetään vastaanotettuun tehoon reagoivaa automaattisen vahvistuksen säätöjännitteen (Automatic Gain Control, AGC) mittaamista. Mittaustulosten analysoinnissa muodostetaan yhteys kalibroidun ja mitatun AGC -jännitteen välille ja saadaan näin kohteen seurantasuunta riippuvainen tutkapinta-ala.

### AUTOMAATTINEN VAHVISTUKSEN SÄÄTÖ

Tutkan vastaanottimeen tulevien pulssien amplitudivaihtelu voi olla hyvinkin suuri. Signaalin tason vaihtelua voidaan kuvata esimerkiksi, jossa 100 km etäisyydellä on maali, jonka tutkapoikkipinta-ala on 0,1 m<sup>2</sup>. Yhden kilometrin päässä tutkasta on vastaavasti toinen maali, jonka  $\sigma$  on 300 m<sup>2</sup>. Näiden

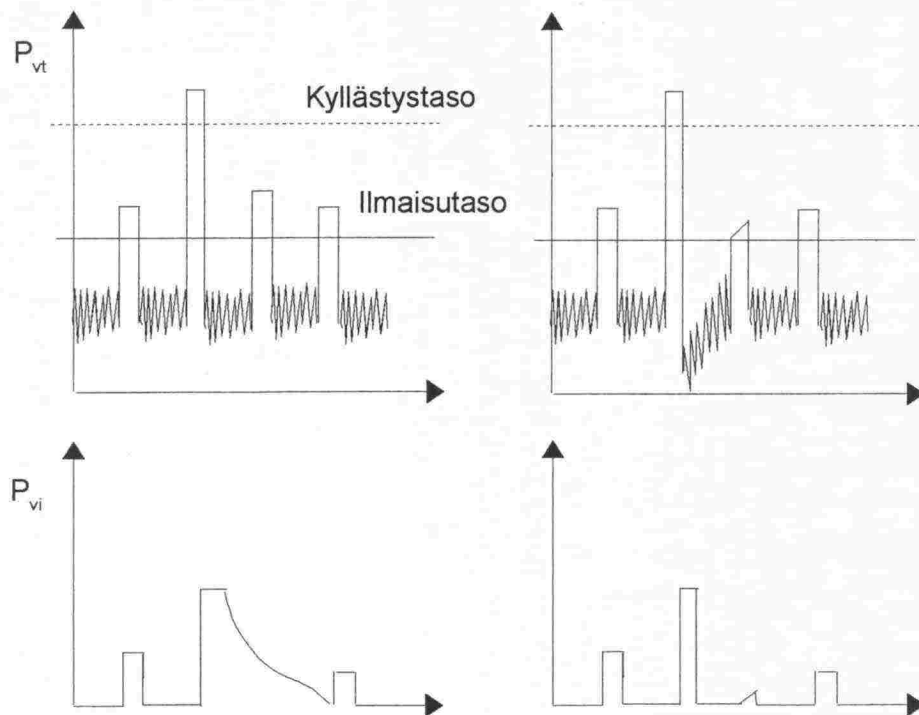
kahden maalin ero voi olla jopa 114,8 dB! Mitä tämä aiheuttaa järjestelmälle? Signaalitaso täytyy pitää vahvistimen dynaamisella toiminta-alueella, mikä onnistuu automaattisen vahvistuksen säädön (AGC) avulla. AGC-piiri, välitaajuusvahvistinta säätämällä, pystyy pitämään signaalitason vaaditulla tasolla.

Seurantatutkassa AGC:lla saadaan servojärjestelmää ohjaava virhesignaali riippumattomaksi signaaliamplitudin vaihtelusta eli kohteen koko etäisyys tai tutkapoikkipinta-alan vaihtelut eivät vaikuta tarkkuuteen. AGC-piiri reagoi välittömästi tutkapoikkipinnan vaihteluun lisäämällä tai vähentämällä ohjausjännitettä jänniteohjattuun välitaajuusvahvistimeen.



Kuva 6.3 Seurantatutkan AGC -piirin lohkokkaavio. Valitun referenssijännitteen tarkoituksena on estää järjestelmän kyllästyminen normaalitilanteessa. Piirin/säädön nopeus määräytyy piirin aikavakion mukaan. [Tucker]

AGC -piiri siis reagoi suoraan vastaanotettuun tehoon verrannollisesti, josta säätöjännitettä mittaamalla saadaan tarvittava informaatio kohteesta (ks vertailumittaus). Mittauksessa on kuitenkin huomioitava, mittausympäristöä valittaessa, ettei mittaussektorilla ole voimakkaita kaikuja aiheuttavia maaleja tai häiriölähteitä, jotka voivat kyllästyä vastaanottimen AGC -piirin (välitaajuusvahvistimen). Järjestelmällä kuluu tietty aika ennen kuin päästään lineaariselle toiminta-alueelle. Kaikupulssit, jotka vastaanotetaan ennen vahvistimen pääsyä edellä mainitulle toiminta-alueelle, jäävät "kyllästytilan" alle ja eivät tule näin havaituksi spektristä. Seuraavassa on esitetty AGC -piirin kyllästytilan vaiheet [16].

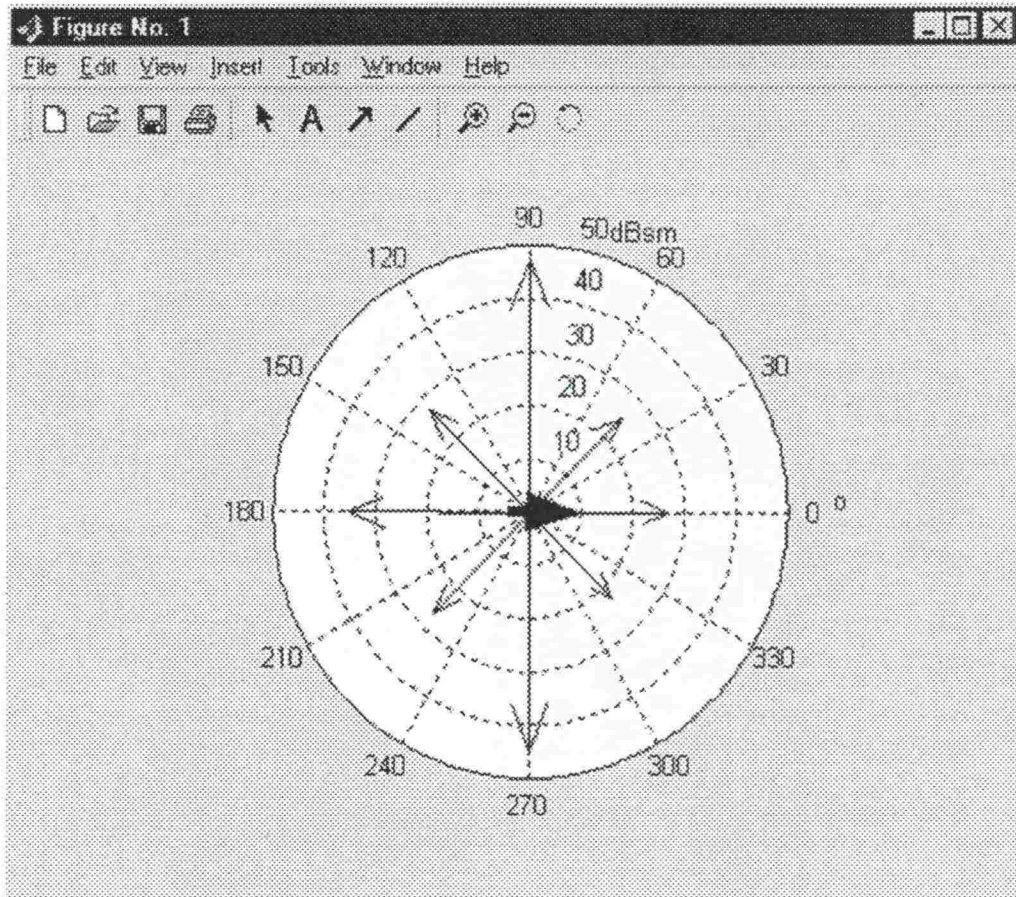


Kuva 6.5 AGC -piirin kyllästyminen [16]

Käytännön mittauksissa kohteen etäisyys on valittava siten, että maalista saatava kaiku on tarpeeksi suuri, jotta toiminta olisi järjestelmän dynaamisella alueella. Toisaalta kohteen oltava riittävän kaukana, jotta ollaan kaukokentän alueella ja AGC -piirin toiminta on vakaa ilman kyllästysvaaraa.

Tutkapoikkipinnalle on tyypillistä, että se voi vaihdella tuhatkertaisesti asteen matkalla. Tästä syystä tutkapoikkipinta esitetään, jo aiemmin todetun mukaan logaritmisesti  $10 \cdot \log_{10}(x)$ , tällöin yksikkönä  $[\text{dBm}^2]$  tai  $[\text{dBsm}]$ . Mittaustuloksien kulmariippuvia jännitearvoja vastaava dB -arvo katsotaan AGC -kalibrointikäyrästä. Saadut dB -arvot on suoraan verrannollisia kalibrointisuoran mittausetäisyyden kohdalta saatuun dB -arvoon. Tästä suhteella voidaan ratkaista tarkasteltava tutkapoikkipinta-arvo, joka muutetaan vastaavaan dBsm arvoon.





Kuva 6.6 Erään kohteen tutkapoikkipinnat pääsuunnista esitettynä. Tyypillisiä merikohteiden tutkapoikkipintoja on esitettyä liitteessä 2.

Mittauksista saadussa raakadatassa näkyy erittäin lyhyitä, mutta korkeita kohinapiikkejä. Tutkajärjestelmässä nämä havaitaan AGC -piirin jälkeen virheilmaisuna eli kohinapiikki on ylittänyt ilmaisukynnyksen. Tässä välitaajuusvahvistin muodostaa pulssin, joka tulkitaan kaikupulssiksi. Jotta virheilmaisujen määrä ei nousisi, järjestelmä nostaa ilmaisukynnystä. Järjestelmässä on erityinen virheilmaisujen vakiointi, joka pitää signaalikohinasuhteen vakiona. Oikeat kaikupulssit on selkeästi eroteltavissa kohinapiikeistä. Datan analysoinnissa piikit saadaan poistettua esim. mediaanisuodatuksen avulla.

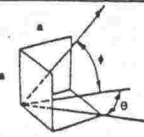
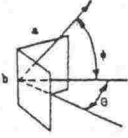
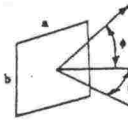
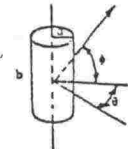
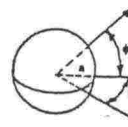
## LÄHDELUETTELO

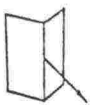

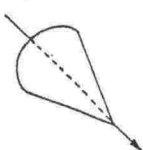
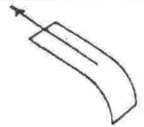


1. E. F. Knott, J. F. Shaeffer, M. T. Tuley "Radar Cross Section" 1985, Artec House, Inc. Dedham, Book-mart Press. 462 s.
2. A. Räisänen, A. Lehto "Radiotekniikka" 7. painos 1996. Otatieto Oy. Helsinki, Hakapaino Oy, 280 s.
3. O. Klemola, A. Lehto "Tutkatekniikka" 1998, Otatieto Oy. Helsinki, Hakapaino Oy, 275 s.
4. Philips Elektronikindustrier Ab "Radar Techniques" 1970. Järfälla, 160 s.
5. J. I. Marcum "A statistical theory of target detection by pulsed radar" 1960. IRE Transactions 6,2. 330 s.
6. L. Battan "Radar observation of the atmosphere" 1973. The University of Chicago Press. 220 s.
7. M. W. Long "Radar Reflectivity of Land and Sea" Second Edition 1983. Artec House, Inc. Dedham, Lexington Books. 385 s.
8. D. K. Barton, H. R. Ward "Hand Book of Radar Measurements" 1969. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs. 298 s.
9. J. Kosola, T. Solante, 2000. Digitaalinen taistelukenttä. Helsinki, Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, Julkaisusarja 1, Tutkimuksia, n:o 7. 402 s.
10. M. Kalliomäki "Tutkaherätetutkimus" 2001. Merivoimien Tutkimuslaitos, Tutkimus- ja kehittämisosaston tutkimusraportti. 14 s.
11. M. Kalliomäki "Tutka- ja infrapunaheräte" 1993. STAE, osa 1. Sivut 524 – 525.
12. M. I. Skolnik "Introduction to Radar Systems" 1981. Singapore, McGraw-Hill Book Company, 581 s.
13. B-O. Ås 1982 "Selection of Wavelengths for Sea-Skimmer Defence". International Naval Technology Expo '82 in Maastricht, March 1982. Sivut 1 – 5.
14. O. Klemola 1997 "Stealth -käsitteet ja teknologia" SähköTK, opetusmoniste, Riihimäki 16.10.1997, 27 s.

15. L. Landau, D. Lifshitz "The Classical Theory of Fields. 2<sup>nd</sup> ed. 1962 Oxford, Pergaman Press. 285 s.
16. T. W. Tucker 2003 "Electronic Countermeasures Effectiveness Evaluation". PMS Professional Development Seminar, Stockholm, April 8 to 10, 2003. Angle Deception Analysis -osio, sivut 23 – 28.
17. <http://www.Roke.co.uk/sensors/epsilon/index.htm>. Luettu 22.02.2004
18. P. Eskelinen 2004 "Tutkan kehitys". Radiotaajuiset sensoriratkaisut seminaari. Espoo, 29.01.2004. MATINE, Elektroniikkajaosto.
19. D. Ausherman, A. Kozma, J. Walker, H. Jones, E. Poggio 1984 "Development in Radar Imaging". IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Sivut 363 – 400.



Table 6-1  
Hierarchy of Scattering Shapes

Geometry	Type	Freq. Dep.	Size Dep.	Formula	Remarks
	Square trihedral corner retro-reflector	$r^2$	$L^4$	Maximum $\sigma = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2}$	Strongest return; high RCS due to triple reflection
	Right dihedral corner reflector	$r^2$	$L^4$	Maximum $\sigma = \frac{8\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$	Second strongest; high RCS due to double reflection, tapers off gradually from the maximum with changing $\theta$ and sharply with changing $\phi$ .
	Flat plate	$r^2$	$L^4$	Maximum $\sigma = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$ Normal Incidence	Third strongest; High RCS due to direct reflection, drops off sharply as incidence changes from normal.
	Cylinder	$r^1$	$L^3$	Maximum $\sigma = \frac{2\pi a b^2}{\lambda}$ Normal Incidence	Prevalent cause of strong, broad RCS over varying aspect ( $\theta$ ), drops off sharply as azimuth ( $\phi$ ) changes from normal. Can combine with flat plate to form dihedral corner reflector.
	Sphere	$r^0$	$L^2$	Maximum $\sigma = \pi a^2$ Normal Incidence	Prevalent cause of strong, broad RCS peaks other than those due to large openings in target body. Energy defocused in two directions.

Geometry	Type	Freq. Dep.	Size Dep.	Formula	Remarks
	Straight edge normal incidence	$r^0$	$L^2$	$f(\theta, \phi) L^2$ $\theta$ - aspect $\theta_{int}$ - interior dihedral angle between faces meeting at edge	Limiting case of 2-dimensional curved plate mechanism as radius shrinks to 0. Prevalent cause of strong, narrow RCS peaks from supersonic aircraft.
	Curved edge normal incidence	$r^{-1}$	$L^1$	$f(\theta, \theta_{int}) a \lambda / 2$ $a \geq \lambda$	Limiting case of 3-dimensional curved plate mechanism as principal radius shrinks to 0. The function $f$ is the same as in mechanism 1.
	Apex	$r^{-2}$	$L^0$	$\lambda^2 g(a, b, \theta, \phi)$ $a, b$ - interior angles of tip $\theta, \phi$ - aspect angles	Limiting case of previous mechanism as $a$ shrinks to 0. For $a=b$ , the tip is that of a cone. For $a=0$ , the tip is the corner of a thin sheet, or fin.
	Discontinuity of curvature along a straight line, normal incidence	$r^{-2}$	$L^0$	$\frac{\lambda^2}{64\pi^3} \left(\frac{1}{a}\right)^2 \left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{-3/2}$ $a \geq \lambda$ $(1/a)$ - jump in reciprocal of $dy/dx$ - slope of surface w.r.t. incident ray	Strongest of an infinite sequence of discontinuities. Very weak mechanism which together with 6 shares dominance of nose-on RCS of cone sphere.
	Discontinuity of curvature of a curved edge	$r^{-3}$	$L^{-1}$	$f(\theta, \phi) \frac{\lambda^3 b}{a^2} \left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{-3/2}$ $f(\theta, \phi)$ - function of aspect $b$ - radius of edge $> \lambda$	Important mechanism for traveling wave backscatter where RCS of discontinuity is augmented by gain of traveling wave structure. Dependences are based on dimensional considerations.
	Discontinuity of curvature along an edge	$r^{-4}$	$L^{-2}$	$g(\theta, \phi) \lambda \left(\frac{1}{a}\right)^2 \left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{-3/2}$ $g(\theta, \phi)$ - function of aspect	Important mechanism for traveling wave backscatter where RCS of discontinuity is augmented by gain of traveling wave structure. Dependences are based on dimensional considerations.

Ship RCS Table  
 (Source: Williams/Champ/Curtis: Experimental study of the radar cross section of maritime targets, Electronic Circuits and Systems, Vol. 2, No. 4, July 1978, amended by I. Herre, 2004)

Target Ship		Median radar cross section of target vessel, m <sup>2</sup>										approx. min. RCS	approx. max. RCS
Type	Overall length (m)	Gross tonnage	10	100	1,000	10,000	100,000	1,000,000	10,000,000	100,000,000	1,000,000,000		
Inshore fishing vessel	9	5	■									3	100
Small coaster	40-46	200-250		■ S	■ B/Q							20	794
Coaster	55	500		■ ns	■ B/Q	■ B/W/Q						40	1,995
Coaster	55	500			■ Q	■ B/W						316	3,981
Coaster	57	500			■ B/W	■ Q						1,000	15,849
Large Coaster	67	838-1,000			■ ns	■ B/W						1,000	5,012
Collier	73	1,570			■ B	■ B/W						316	1,995
Warship (frigate)	103	2000*				■ B	■ B					5,012	100,000
Cargo liner	114	5,000				■ B/W	■ Q					10,000	15,849
Cargo liner	137	8,000				■ B/W/Q	■ Q					3,981	15,849
Bulk carrier	167	8,200			■ B/W	■ B/Q	■ B					398	10,000
Cargo	153	9,400				■ B/W	■ B					1,585	12,589
Cargo	166	10,430			■ B/W	■ Q	■ Q					398	15,849
Bulk carrier	198	15,000-20,000				■ ns	■ B/Q	■ B				1,000	31,623
Ore carrier	206	25,400				■ B/W	■ ns	■ B				1,995	25,119
Container carrier	212	28,436**					■ B/W	■ Q/B/W				10,000	79,433
Medium tanker	213-229	30,000-35,000				■ ns	■ Q	■ B				5,012	79,433
Medium tanker	251	44,700					■ ns	■ B				15,849	1,584,893

\* Displacement cargo  
 \*\* Considerable deck cargo  
 S = stern on  
 Q = quarter  
 B = broadside  
 ns = bow  
 B/W = bow on  
 B/Q = near

ISSN 1456-9442  
Oy Painopaikka Ab, Helsinki 2004