

ANDERS KARLSSON
och
GERHARD KRISTENSSON

INTRODUKTION
TILL
ANTENNER

Lund, 20 oktober 2000

Innehåll

1	Några begrepp inom antenntekniken	1
1.1	Närzon, fjärrzon, närfält och fjärrfält	1
1.2	Sändarantenn, mottagarantenn	2
1.3	Strålningsdiagram, lobar	2
1.4	Effekt, direktivitet, antennvinst	2
1.5	Strålningsresistans, strålningseffektivitet	4
1.6	Effektiv area	5
1.7	Bandbredd	5
1.8	Polarisation	6
1.9	Friis transmissionformel	6
1.10	Radarekvationen	7
2	Några vanliga antenntyper samt radomer	9
2.1	Linjära antenner	9
2.2	Gruppantenn (arrayer)	11
2.3	Yagi-Uda antenner	12
2.4	Patchantenn (mikrostripantenn)	13
2.5	Hornantenn	14
2.6	Reflektorantenn	15
2.7	Slitsantenn	16
2.8	Fasstyrd grupptantenn	17
2.9	Adaptiva antenner	18
2.10	Syntetisk aperturradar, SAR	19
2.11	Frekvensoberoende antenner	20
2.12	Radomer	22
	Litteratur	25
	Register	27

Kapitel 1

Några begrepp inom antenntekniken

Inom antenntekniken finns ett stort antal begrepp som är familjära och viktiga för antenntekniker och andra som sysslar med antennteknik. I detta kapitel beskrivs och definieras några av de vanligaste begreppen. En mer ingående beskrivning av de olika begreppen finner du i t.ex. referenserna 1–3.

1.1 Närzon, fjärrzon, närfält och fjärrfält

För en antenn är fjärrzonen det område där fältet kan approximeras med en sfäriskt utåtgående våg. De reaktiva (icke-strålände) delarna av fältet kan försummas i fjärrzonen. Närzonen definieras som det område där de reaktiva delarna dominerar och den strålände delen kan försummas. Fältet i fjärrzonen kallas fjärrfält och i närzonen kallas det närfält.

I spridningsteorin används gränserna $r \gg d$, $r \gg \lambda$ och $r \gg kd^2$ för fjärrzonen (se kursboken) och samma gränser gäller i antennteorin. Det sista villkoret har man dock förfinat något vilket gör att följande villkor skall vara uppfyllda för att r skall finna sig i fjärrzonen

$$r \gg d \quad (1.1)$$

$$r \gg \lambda \quad (1.2)$$

$$r > 2d^2/\lambda \quad (1.3)$$

En förklaring till den sista gränsen finner du t.ex. i referens 1. Notera att för antenner som är mindre än eller av samma storlek som våglängden är det endast villkoret (1.2) som bestämmer fjärrzonen medan för antenner som är mycket större än våglängden är det endast villkoret (1.3) som ger fjärrzonen.

För närzonen används följande gränser (se referens 1):

$$r \ll \lambda$$

$$r < 0.62\sqrt{d^3/\lambda}$$

För antenner som är små i förhållande till våglängden blir det det övre villkoret som definierar närzonen medan det undre villkoret blir gällande för stora antenner.

1.2 Sändarantenn, mottagarantenn

En antenn kan användas som sändar- och/eller mottagarantenn. Strålningsdiagrammet och mottagardiagrammet är identiska för en antenn om det omgivande mediet är isotropt. Detta följer av en matematisk sats som kallas reciprocitetssatsen, se referens 1.

1.3 Strålningsdiagram, lobar

I de flesta tillämpningar är man intresserad av antennens fjärrfält och detta ges av

$$\begin{aligned}\mathbf{E}(\mathbf{r}) &= \frac{e^{ikr}}{kr} \mathbf{F}(\theta, \phi) \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}) &= \frac{1}{\eta_0 \eta} \hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{E}(\mathbf{r})\end{aligned}$$

där $\mathbf{F}(\theta, \phi)$ kallas fjärrfältsamplitud¹. Det är samma uttryck som används för det spridda fältet i spridningsteorin. Fjärrfältet är ett transversellt fält dvs. $\mathbf{F}(\theta, \phi) \cdot \hat{\mathbf{r}} = 0$. Fjärrfältsamplituden åskådliggörs ofta i ett strålningsdiagram där $|\mathbf{F}(\theta, \phi)|$ ritas i en polär graf. I figur 1.1 ges strålningsdiagrammen i planen $y = 0$ och $z = 0$ för en dipolarray med två dipoler. Strålningsdiagrammen formas av ett antal strålningslobar. Antennens *huvudlob* är den lob där antennens fjärrfältsamplitud är störst och de övriga loberna kallas *sidolobar*. Vissa antenner kan ha flera huvudlobar.

1.4 Effekt, direktivitet, antennvinst

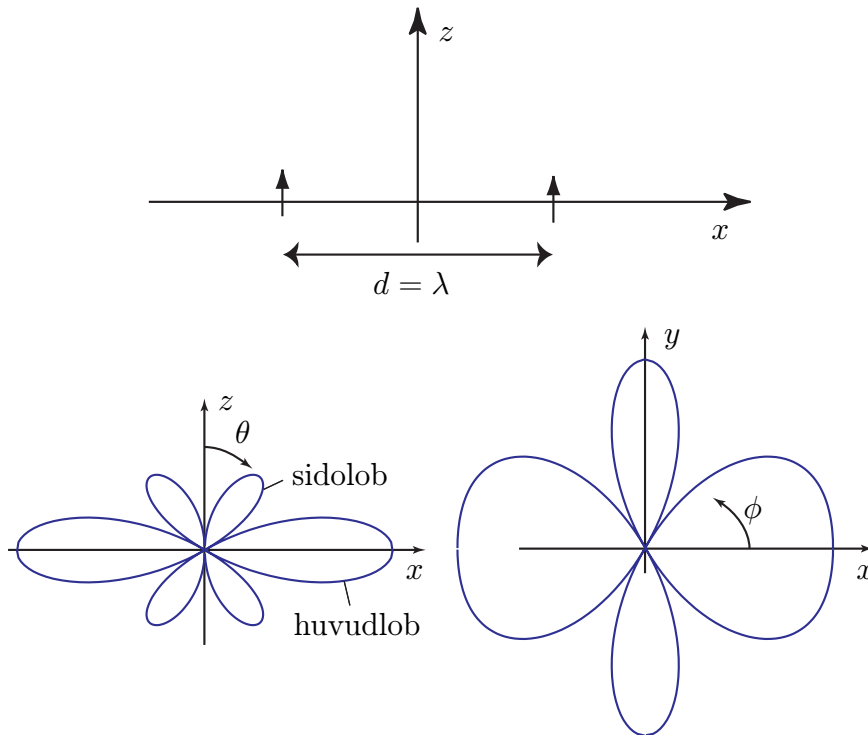
Den *utstrålade intensiteten* för en antenn ges av beloppet av strålningsvektorn, $\langle \mathbf{S}(t) \rangle = \text{Re}\{\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*\}/2$. Det är lämpligt att skala med r^2 , vilket på stort avstånd från antennen ger en funktion av riktningen $\hat{\mathbf{r}}$ eller de sfärsika vinklarna θ och ϕ . Vi inför $U(\theta, \phi)$

$$U(\theta, \phi) = r^2 \frac{1}{2} \hat{\mathbf{r}} \cdot \text{Re}\{\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*\} = \frac{1}{2\eta_0 \eta} |\mathbf{F}(\theta, \phi)|^2 k^{-2}$$

Den totalt *utstrålade effekten* fås genom att integrera $U(\theta, \phi)$ över enhetsfären

$$P_r = \oint U(\theta, \phi) d\Omega = k^{-2} \frac{1}{2\eta_0 \eta} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |\mathbf{F}(\theta, \phi)|^2 \sin \theta d\theta d\phi$$

¹Normeringen av fjärrfältsamplituden varierar i litteraturen.



Figur 1.1: En array med två dipoler med inbördes avstånd λ och dess strålningsdiagram i planen $y = 0$ (E -planet) och $z = 0$ (H -planet).

Direktiviteten och *antennvinst* (gain) är viktiga storheter som talar om hur bra riktverkan en antenn har. Definitionen av direktivitet är

$$D = 4\pi \frac{U_{\max}}{P_r} = \frac{\langle \mathbf{S}(\mathbf{r}, t) \cdot \hat{\mathbf{r}} \rangle_{\max}}{P_r / (4\pi r^2)}$$

där $\langle \mathbf{S}(\mathbf{r}, t) \cdot \hat{\mathbf{r}} \rangle_{\max}$ är den maximala effekttätheten på avståndet r från antennen. Antennvinsten definieras av

$$G = \frac{\langle \mathbf{S}(\mathbf{r}, t) \cdot \hat{\mathbf{r}} \rangle_{\max}}{P_{\text{in}} / (4\pi r^2)}$$

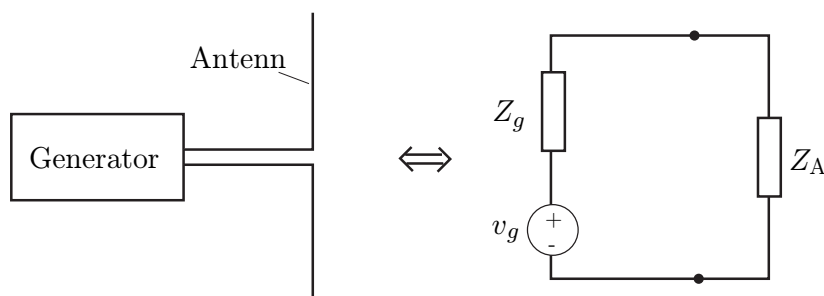
där P_{in} är den totala effekt som matas in i antennen. En del av effekten P_{in} förbrukas i antennen om den har förluster. Eftersom $P_{\text{in}} \geq P$ gäller alltså att

$$G \leq D$$

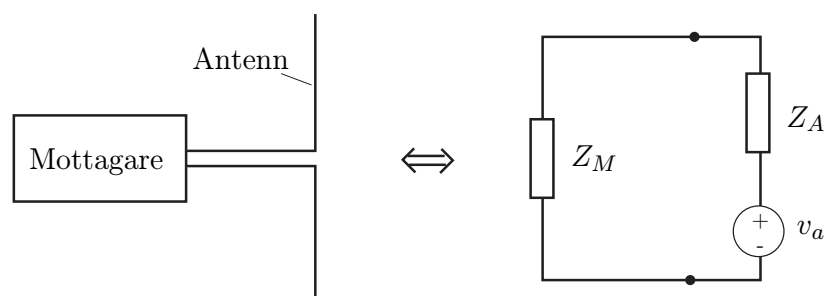
Endast om antennen är förlustfri gäller $G = D$.

Dimensionslösa storheter, såsom direktivitet och antenntvinst, kan med fördel anges i *decibel*, förkortat dB. Oftast används detta för normerade effekter eller amplituder. För effekter gäller

$$\text{antal decibel} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{ut}}}{P_{\text{in}}}$$



Figur 1.2: Sändarantenn med generator och motsvarande Théveninekvivalent.



Figur 1.3: Antennen som mottagare och motsvarande Théveninekvivalent.

Effekt är en kvadratisk storhet av amplituden och amplituden mätt i decibel ges då av

$$\text{antal decibel} = 20 \log_{10} \frac{V_{ut}}{V_{in}}$$

Ibland används förkortningen dBi för att indikera att definitionen gäller effekt och man jämför då med en tänkt isotropt strålände antenn, som t.ex. fallet med antennvinst. En antennvinst av 15 dBi betyder alltså att $G = 10^{1.5} = 31$.

1.5 Strålningsresistans, strålningseffektivitet

En antenn kan ersättas med sin Théveninekvivalent, enligt figur 1.2. Antennens ekvivalenta *impedans*, Z_A , kan delas upp enligt

$$Z_A = R_r + R_L + iX_A$$

där

R_r = strålningsresistansen

R_L = förlustresistansen

X_A = antennens reaktans

Förlusterna kommer i allmänhet från de ytströmmar som bildas på antennens delar.

Antennens *strålnings effektivitet* definieras av kvoten mellan utstrålad effekt, $P_r = R_r I^2/2$ och inmatad effekt $P_{in} = (R_r + R_L)I^2/2$

$$e = \frac{R_r}{R_L + R_r} = \frac{P_r}{P_{in}}$$

En helt förlustfri antenn har alltså $e = 1$, annars gäller $0 < e < 1$.

1.6 Effektiv area

Antennens effektiva area, A_e , definieras av

$$A_e = \frac{P_T}{\langle \mathbf{S}_i(t) \rangle \cdot \hat{\mathbf{k}}_i}$$

där

P_T = tidsmedelvärdet av den mottagna effekten i belastningen

$\langle \mathbf{S}_i(t) \rangle \cdot \hat{\mathbf{k}}_i$ = tidsmedelvärdet av den infallande effekttätheten

För en förlustfri antenn, $R_L = 0$, är A_e densamma som antennens absorptions-tvärsnitt, om antennen betraktas som en spridare, se kursboken. Om $R_L > 0$ är A_e mindre än absorptions tvärsnittet.

Mottagarantennens ekvivalentschema finns avbildat i figur 1.3. Antennens impedans är densamma som i den sändande moden, medan mottagarens impedans ges av Z_M .

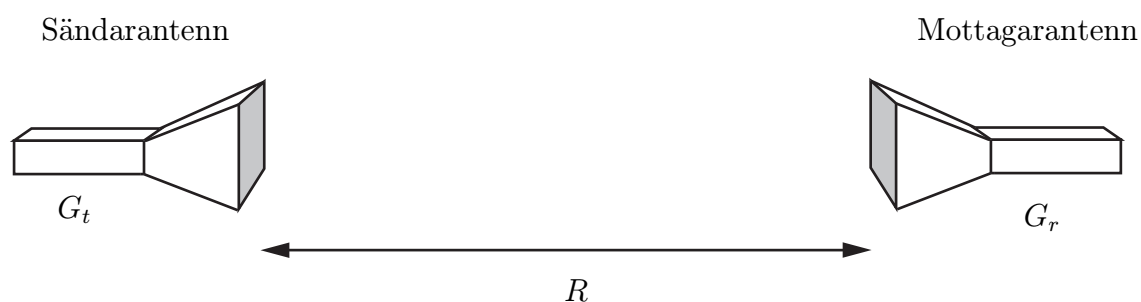
1.7 Bandbredd

Bandbredden för en antenn är bredden på det frekvensområde där den har bra prestanda och kan fungera. Bandbredden för smalbandiga antenner mäts i procent av centrumfrekvensen, dvs. av den frekvens där antennen strålar bäst. För bredbandiga antenner anges istället bandbredden som förhållandet mellan största och minsta frekvensen i operationsområdet. Detta förhållande uttrycks ofta i oktaver. En oktav svarar mot en frekvensför-dubbling.

Exempel 1: Om bandbredden är 5% och centrumfrekvensen är 1 GHz så är bandbredden 50 MHz, dvs. 975 MHz till 1025 MHz.

Exempel 2: Om en bredbandig antenn har bandbredden 10:1 är den högsta frekvensen 10 ggr större än den lägsta frekvensen i det område den sänder bra.

Exempel 3: Om en bredbandig antenn har bandbredden fyra oktaver är den högsta frekvensen $2^4 = 16$ ggr större än den lägsta frekvensen i det område den sänder bra.



Figur 1.4: Sändar- och mottagarantenn i Friis transmissionsformel.

1.8 Polarisation

Antennens polarisation är polarisationen av den våg som antennen sänder ut.

Exempel: En linjär antenn är linjärpolariserad. En helixantenn är, vid lämpliga frekvenser, cirkulärpolariserad. Hornantenner kan vara linjärpolariserade, elliptiskt polariserade, eller cirkulärpolariserade, beroende på hur de matas.

1.9 Friis transmissionsformel

En mycket användbar formel i mobilkommunikationssammanhang är Friis transmissionsformel som relaterar utsänd och mottagen effekt till varandra. Geometrien ges i figur 1.4. Den enklaste varianten av denna formel gäller för det fallet då sändar- och mottagarantennerna är uppställda i rak linje, ligger i varandras fjärrzoner, och är anpassade till sina respektive matningsnät samt är polarisationsanpassade.² Formeln ges här utan härledning [1, s. 86–88].

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_r G_t$$

I denna formel är:

P_t = utsänd effekt

P_r = mottagen effekt

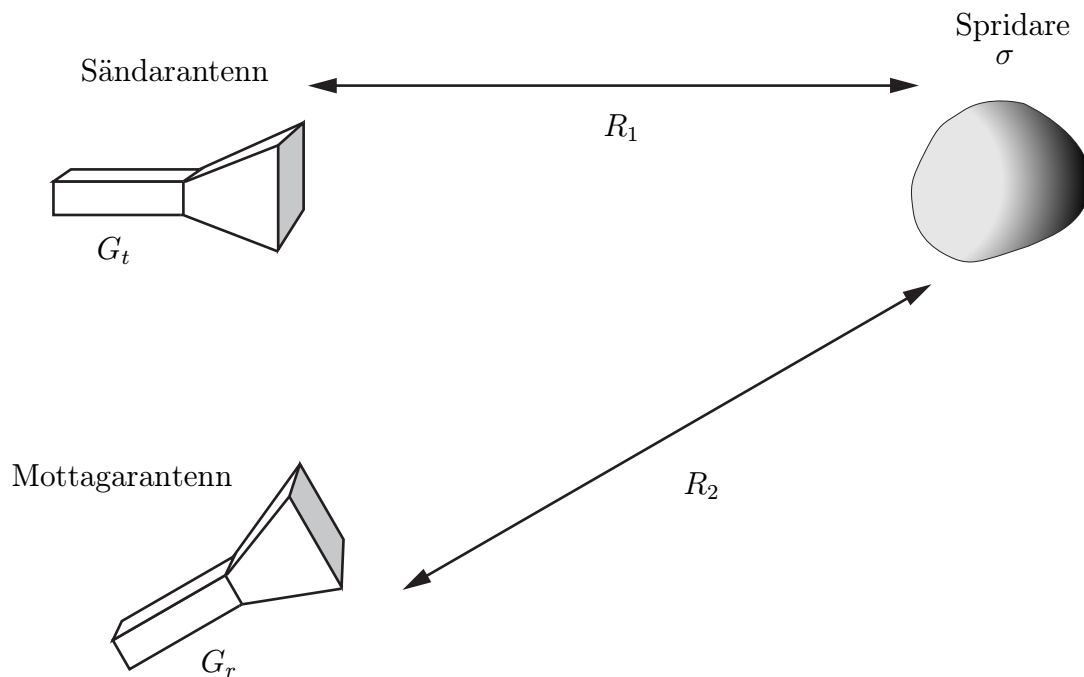
G_t = antennvinst hos sändarantennen

G_r = antennvinst hos mottagarantennen

λ = våglängden

R = avstånd mellan sändar- och mottagarantenn

²Det finns mer generella formler som tar hänsyn till missanpassning i matningsnät, polarisationseffekter, att antennerna inte ligger längs en rät linje etc., se Balanis [1].



Figur 1.5: Sändar-, mottagarantenn och spridare i radarekvationen.

1.10 Radarekvationen

Radarekvationen relaterar utsänd och mottagen effekt då vågen reflekterats mot ett föremål med spridningstvårsnitt σ . Geometrien ges i figur 1.5. Formeln finns härledd i Balanis [1, s. 88–90], och ges här i sin enklaste variant utan härledning.

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R_1 R_2} \right)^2 \sigma \frac{G_r G_t}{4\pi}$$

I denna formel är:

P_t = utsänd effekt

P_r = mottagen effekt

G_t = antennvinst hos sändarantennen

G_r = antennvinst hos mottagarantennen

λ = våglängden

R_1 = avstånd mellan sändarantenn och spridare

R_2 = avstånd mellan mottagarantenn och spridare

σ = spridarens spridningstvårsnitt

Kapitel 2

Några vanliga antenntyper samt radomer

Det finns ett stort antal antenntyper. Att välja rätt antenn är naturligtvis av största vikt när ett antennsystem skall konstrueras. Valet av antenn bestäms av en rad faktorer såsom frekvensintervall, önskad riktningsverkan, utstrålad effekt, begränsningar på form och storlek, och kostnad.

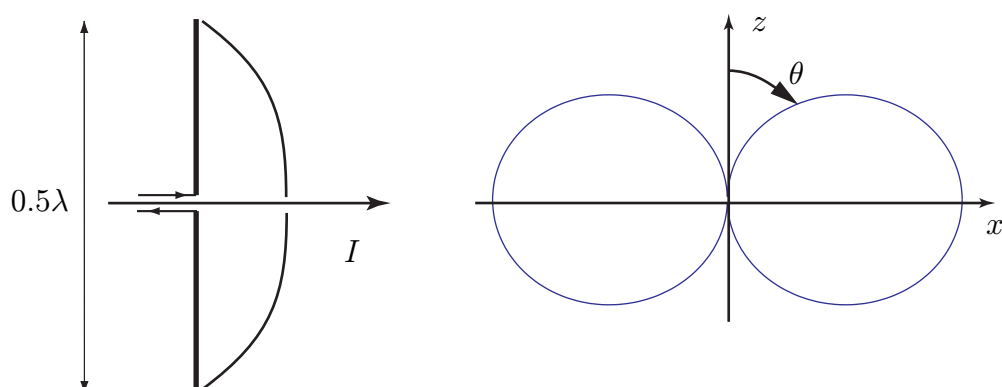
Ett mycket stort antal antenner finns beskrivna i den utmärkta boken ”Antenna Engineering Handbok”, referens 3. En kortfattad och trevlig beskrivning av några antenntyper finns i Cheng [2]. Vill man följa utvecklingen är *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* en lämplig tidskrift att läsa.

2.1 Linjära antenner

De linjära antennerna finns beskrivna i de flesta elementära böcker som innehåller ett avsnitt om antenner, t.ex. Cheng [2]. Dessa antenner är enkla och billiga och därför vanligt förekommande. Linjära antenner matas vanligen i mitten, t.ex. via en transmissionsledning. Deras strålningsresistans, se avsnitt 1.5, är relaterad till den maximala amplituden av den komplexa strömmen i antennen, I_0 , genom $P = R_r I_0^2 / 2$, där P är den utstrålade effekten. I figur 2.1 ses en halv vågsantenn, som är en mycket vanlig antenntyp. Strömmen bildar ett halvt våglängd långt stående vågmönster. Det visar sig att strålningsresistansen för halv vågsantennen är 72Ω , se t.ex. referens 2, och impedansanpassningen blir därför god om man kopplar den till en 75Ω standardkoaxialkabel.

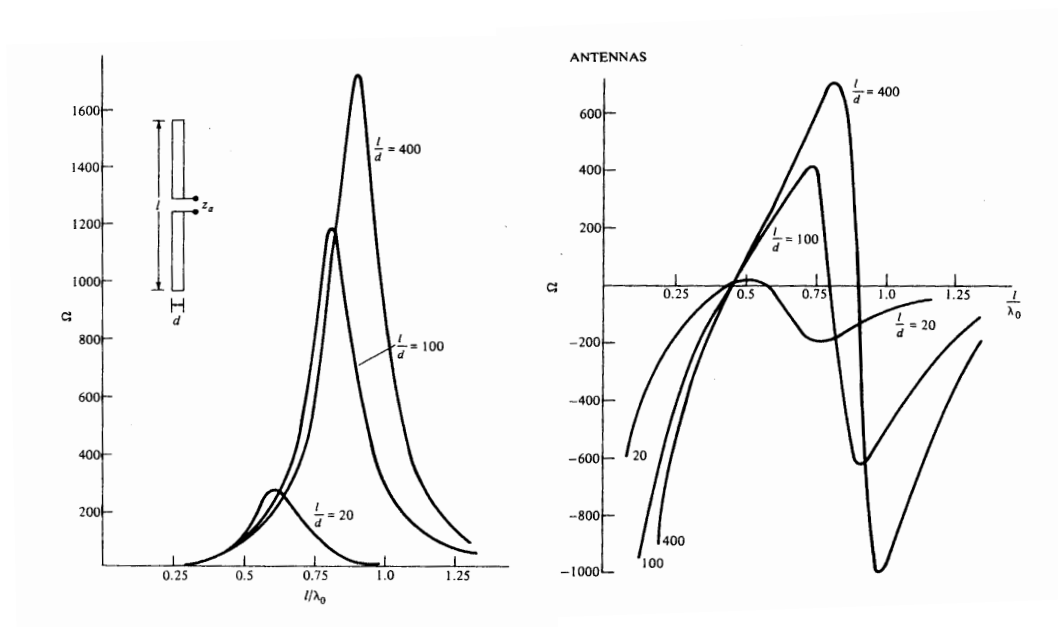
I många tillämpningar kan en halv vågsantenn vara för lång. Man använder då kanske istället en dipolantenn vars längd är mycket mindre än en våglängd. En kort dipolantenn har en bred huvudlob i E -planet och lobbredden minskar med ökande längd. Den har liten strålningsresistans jämfört med halv vågsantennen och dess strålnings effektivitet är liten. Benämningen linjära dipolantenner används även för linjära antenner vars längd är av samma storleksordning som våglängden.

Det går bra att bestämma strålningsdiagrammet för en tunn linjär antenn med de enkla metoder som finns beskrivna i t.ex. Cheng 2. Tjockare antenner kan be-



Figur 2.1: En linjär halv vågsantenn med tillhörande strålningsdiagram i E -planet

handlas med integralekvationsmetoder såsom momentmetoden (MoM=methods of moments). Resultatet av en sådan beräkning visas i figur 2.2.



Figur 2.2: Ingångsresistans och ingångsreaktans för en linjär antenn för olika värden på antennens tjocklek d .

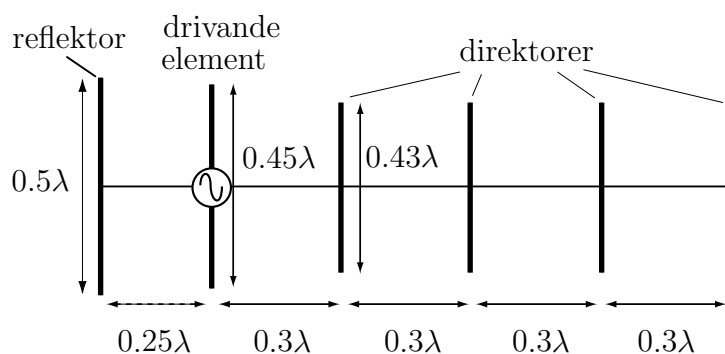
2.2 Gruppantenner (arrayer)

En gruppantenn består av flera antennelement som interfererar. De används för att uppnå ett visst strålningsdiagram. Ofta används antennelement som är identiska så när som på att faser på den matande strömmen kan skilja sig. Fjärrfältsamplituden, $\mathbf{F}_g(\theta, \phi)$, för en sådan gruppantenn kan skrivas som följande produkt mellan arrayfaktorn, $A(\theta, \phi)$, och elementfaktorn, $\mathbf{F}_e(\theta, \phi)$

$$\mathbf{F}_g(\theta, \phi) = A(\theta, \phi)\mathbf{F}_e(\theta, \phi)$$

Här är $\mathbf{F}_e(\theta, \phi)$ elementfaktorn, vilket motsvarar ett enskilt antennelements fjärrfältsamplitud, och $A(\theta, \phi)$ är arrayfaktorn, vilken endast beror på frekvensen, elementens lägen och elementens faslägen. I referens 2 finner du uttrycken för arrayfaktorn i några enkla fall.

Genom att välja faser hos den matande strömmen i elementen på lämpligt sätt kan huvudloben riktas i en viss riktning. Två specialfall är *broadside array* och *end-fire array*. I en broadside array har alla elementen samma fas och huvudloben blir riktad vinkelrätt ut från gruppantennen. I en end-fire antenn är fasförskjutningen mellan strömmarna valda så att huvudloben är riktad i gruppantennens riktning.

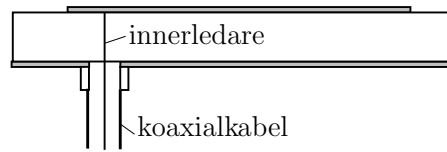


Figur 2.3: Ett exempel på en Yagi-Uda antenn

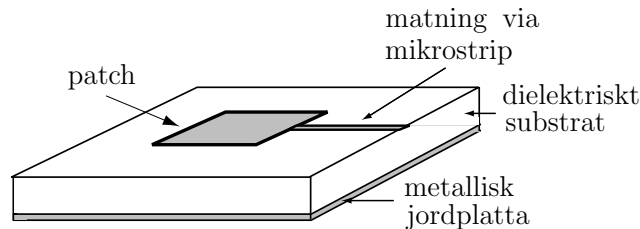
2.3 Yagi-Uda antenner

En linjär antenn är vad man kallar rundstrålände (omni-directional) i azimuthled. För att få bättre riktverkan kan man lägga till passiva element enligt figur 2.3. Man får då en Yagi-Uda antenn (oftast används benämningen Yagi-antenn). Det bakre elementet kallas reflektor och de främre passiva elementen kallas direktorer. Det är vanligt att det drivande elementet är en halv vågsantenn. Det visar sig att störst direktivitet fås om det drivande elementet är lite mindre än en halv våglängd (0.45λ) och direktorerna ytterligare något kortare (0.4λ). Avståndet mellan direktorerna brukar vara omkring 0.3λ . Reflektorn är längre än det drivande elementet och avståndet mellan reflektorn och det drivande elementet är normalt 0.25λ . De olika längderna och avstånden varierar lite från antenn till antenn beroende på antennelementens tjocklek och antalet direktorer. Vid mottagning inducerar den infallande vågen strömmar i de passiva direktorerna och dessa fungerar som en linjär arrayantenn som strålar mot det drivande elementet (end-fire array). Vågen reflekteras mot reflektorn och en stående våg med buk vid det drivande elementet bildas. Vid sändning bildar istället de passiva elementen en end-fire array med huvudlob ut från det drivande elementet.

Antennvinsten för en Yagi-Uda antenn beror på antalet direktorer. Grovt räknat är antennvinsten proportionell mot antalet direktorer. De vanliga TV-antennerna som finns på hustaken har en antennvinst på 10-15 dBi. Yagi-Uda antenner är linjärpolariserade.



Figur 2.4: Patchantenn med matning via koaxialkabel.



Figur 2.5: Patchantenn med mikrostripmatning.

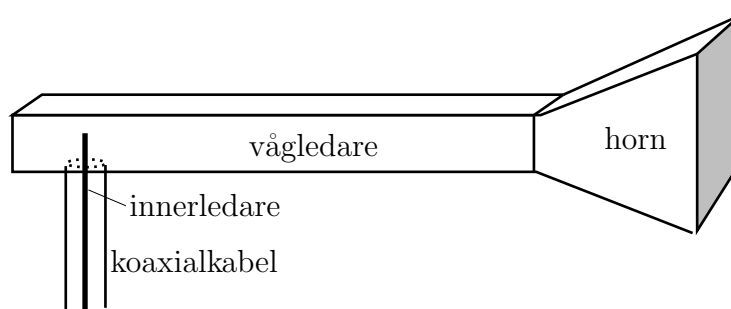
2.4 Patchantenner (mikrostripantenner)

Patchantenner har bara funnits i drygt 25 år men har redan hunnit bli en av de allra viktigaste antenntyperna. Benämningen mikrostripantenn används lika ofta för denna antenntyp. En patchantenn är en tunn metallbit (patch) placerad (ofta etsad) på ett tunt dielektriskt substrat som i sin tur ligger ovanpå en jordad metallskiva.

Patchen kan matas på flera olika sätt. I figur 2.4 matas den via en koaxialkabel och i figur 2.5 via en transmissionsledning. Patchen kan också matas via en transmissionsledning som ligger mellan två dielektriska skikt eller via en mikrostrip på undersidan av jordplanet. I det senare fallet finns ett rektangulärt hål i jordplanet genom vilket kopplingen mellan matningen och patchantennen sker. Oavsett hur patchantennen matas bildas ett fält mellan patchen och jordplanet och det induceras ytströmmar på patchen och jordplanet. Ytströmmarna ger upphov till fält som strålar. Normalt genererar man ett fält som svarar mot en resonansmod för utrymmet mellan patchen och jordplanet. Moden skall vara sådan att det elektriska fältet har en buk vid kanterna av patchen.

Det är enkelt och billigt att skapa arrayer av patchantenner genom fotoetsning. Arrayerna behöver inte vara plana utan kan ligga på en bucklig yta (s.k. konform antenn). Det pågår mycket forskning med mål att integrera patchantennen och elektronik på en enda kiselplatta. Ett sådant antennelement blir oerhört kompakt. Genom att använda arrayer av sådana antenner kan strålningsdiagrammet styras i mjukvara. Dessa arrayer kan användas som fasstyrda gruppantenner och adaptiva antenner, som finns beskrivna nedan, se avsnitt 2.8 respektive 2.9.

Patchantenner har vissa nackdelar jämfört med andra antenntyper. Den största begränsningen är den smala bandbredden. Matning enligt figur 2.4 och 2.5 ger en bandbredd på endast 5%. Med mer avancerade matningar kan något större bandbredd (10-15%) uppnås. En annan nackdel är att mikrostrippen som matar antennen strålar och ger upphov till störfält. Det är dessutom svårt att sända ut stora effekter med patchantenner och besvärligt att styra polarisationen.

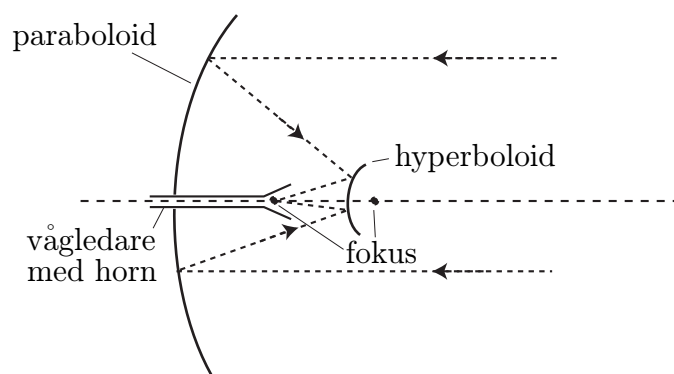


Figur 2.6: Rektangulärt horn som matas av koaxialkabel via en rektangulär vågledare.

2.5 Hornantenner

Hornantennen är en antenntyp som ofta är kombinerad med en reflektorantenn. Hornantennen fungerar då som en matarantenn och fältet som den genererar reflekteras mot reflektorn. Resultatet blir en antenn med smal huvudlob. Det vanliga är att hornantennen är sammanbyggd med en vågledare, med rektangulärt eller cirkulärt tvärsnitt, som kan matas av någon form av diod, eller via en koaxialkabel, se figur 2.6. Hornets tvärsnitt har oftast samma form som vågledaren och man kan se hornet som en bit vågledare, med expanderande tvärsnitt, som mynnar ut i fria rummet. Principen för hornantennen är att en eller flera vågledarmoder genereras i vågledaren och propagerar mot hornantennen. I hornantennens mynning bildas då en våg som kan försätta ut i rummet.

Det finns många sätt att analytiskt och numeriskt behandla hornantenner. En metod är modanpassningsmetoden som finns beskriven i referens 4. Fälten kan också bestämmas med FDTD metoden (finite difference time domain method), momentmetoden (MoM=methods of moments) eller finita elementmetoden (FEM).



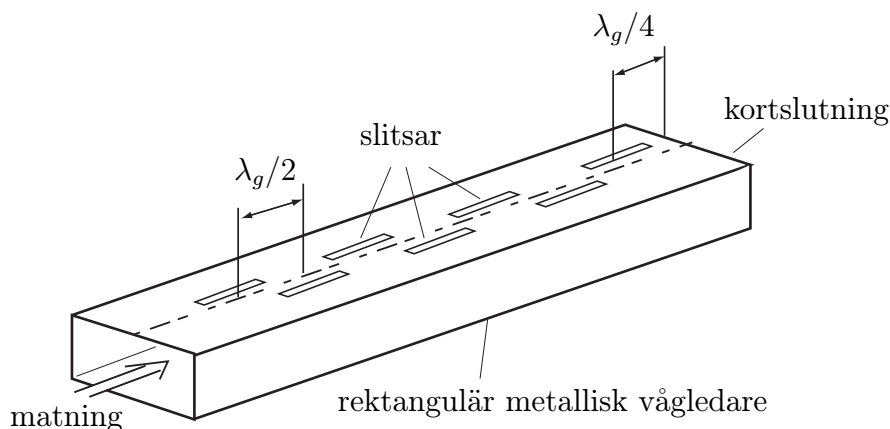
Figur 2.7: En Cassegrainantenn med strålgångar för en infallande planvåg.

2.6 Reflektorantenn

En reflektorantenn är ett passivt antennelement som reflekterar en infallande våg. Den vanligaste typen är parabolantennen (paraboloiden). Dess yta är en paraboloid som kan genereras genom att rotera en andragskurva kring dess symmetrilinje. Då parabolantennen används som mottagarantenn reflekteras en infallande planvåg mot ytan och fokuseras i paraboloidens fokalpunkt. I denna punkt är mottagaren placerad, vanligtvis en hornantenn. Då paraboloiden används för sändning sänds vågor ut från en sändarantenn som är placerad i eller nära fokalpunkten. Vågen som lämnar sändarantennen är en bit ut en sfärisk våg. Då den sfäriska vågen reflekteras mot paraboloiden bildas en plan våg vilket ger en smal huvudlob. Ju större reflektorantennen är i förhållande till våglängden desto smalare blir huvudloben.

Vissa reflektorantennar matas via en subreflektor. Detta är fallet med Cassegrainantennar, se figur 2.7, där den stora reflektorn är en paraboloid och subreflektorn en hyperboloid. En fördel med Cassegrainantennen gentemot en frontmatad antenn är att konstruktionen blir kompakt och hållfast eftersom mottagarenheten kan placeras nära huvudreflektorn. Ett problem med reflektorantennar, både frontmatade och med subreflektorer, är att en del av den utsända eller infallande vågen träffar matarelementet eller subreflektorn. Ett sätt att komma runt detta problem är att ”offsetmata” reflektorytan så att den reflekterade vågen inte träffar matarenheten. De vanligt förekommande parabolantennerna som används för att ta emot satellitsända TV-signaler är oftast offsetmatade. Det har dessutom den fördelen att de kan placeras vertikalt längs en husvägg.

Reflektorantennar är ofta stora jämfört med våglängden och kan därför med fördel behandlas med fysikalisk-optik-approximationen eller med geometrisk optik i kombination med integralrepresentationen. I kursboken finns beskrivet hur detta går till.



Figur 2.8: En slitsantenn i form av en rektangulär vågledare.

2.7 Slitsantenn

Slitsantenn består av en eller flera vågledare i vilka man fräst ut slitsar. Genom slitsarna strålar fältet ut i rummet. Slitsarna placeras i allmänhet där ytströmtätheten på vågledarens innervägg är som störst och de riktas så att de skär ytströmmarna vinkelrätt. I figuren 2.8 är slitsarna placerade där grundmoden ger stora ytströmtätheter. Våglängden λ_g är grundmodens våglängd i utbredningsriktningen och är densamma som ytströmtätheternas våglängd på vågledarens innerväggar. Om flera slitsar är urfrästa får man en gruppantenn. Strålningsdiagrammet för gruppantennen beror på vilken vågledarmod man genererar i vågledaren och vilken frekvens man använder. Det vanliga är att vågledarens grundmod används. Gruppantennens huvudlob kan styras genom att ändra frekvensen (frekvensstyrd antenn).

2.8 Fasstyrda gruppantenner

En fasstyrd gruppantenn (phased array) består av antennelement vars amplitud och fas kan styras individuellt. Man kan på detta sätt forma ett önskat strålningsdiagram och huvudlobens riktning kan styras i realtid på elektronisk väg utan någon mekanisk rörelse.

De fasstyrda antennerna har många militära tillämpningar. De används där för att söka efter och följa missiler och flygplan. De kan även användas för att styra missiler. I samband med Gulfkriget blev Patriot systemet mycket känt. Detta system användes för att finna inkommande fientliga missiler och att skjuta ned dessa. De viktigaste delarna i detta system är de fasstyrda antennerna.

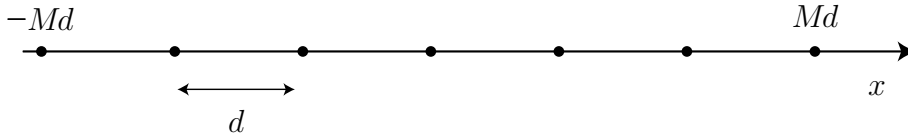
Fasstyrda antenner är effektiva men betydligt dyrare än enklare antenntyper. Man kan dock räkna med att de fasstyrda antennerna, liksom all annan elektronik, kommer att bli billigare i framtiden och att den civila användningen av dem kommer att öka.

2.9 Adaptiva antenner

Adaptiva antenner används framförallt som mottagarantenner. De är nära besläktade med fasstyrda antenner och är liksom dessa effektiva men dyra. De fasstyrda antennerna används oftast som sändarantenner och deras strålningsdiagram styrs genom att ändra fasen hos de olika antennelementen. De adaptiva antennernas strålningsdiagram kan styras på samma sätt, men här är det ofta den mottagna signalen som bestämmer hur de olika elementen skall viktas. Antennen anpassar sig alltså till sin omgivning i realtid så att mottagningen optimeras. Adaptiva antenner kan vara fasstyrda gruppantenner, flerlobantenner (multibeam antennas) eller en kombination av gruppantenn och flerlobantenner. De kan undertrycka signaler från oönskade källor och interferenssignaler genom att fas och amplitud av signalen från de olika antennelementen i en gruppantenn viktas i realtid. Viktningen kan ske genom någon form av återkoppling. Antag som exempel en adaptiv antenn med N element. Signalerna e_n (en komplex spänning) från vart och ett av antennelementen kan viktas med de komplexa vikterna W_n så att den totala signalen från antennen ges av

$$e_0 = \sum_{n=1}^N W_n e_n$$

Vikterna W_n används för att placera nollgenomgångar i strålningsdiagrammet i de riktningar där oönskade källor finns. Algoritmen som bestämmer de olika vikterna W_n är naturligtvis mycket viktig. Teorin för sådana algoritmer ligger dock utanför fältteorin.

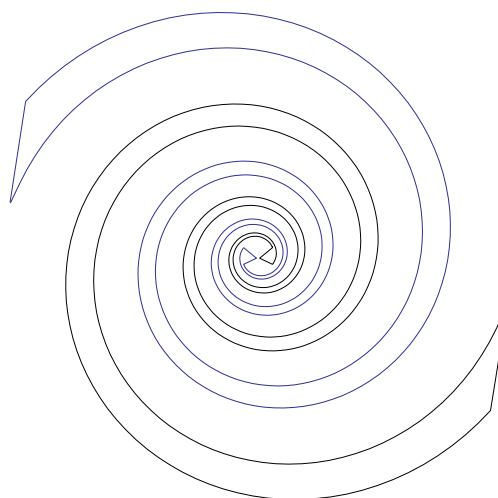


Figur 2.9: Positioner för SAR antenn

2.10 Syntetisk aperturradar, SAR

En linjär gruppantenn med många element ger en smal huvudlob. Om man använder gruppantennen som en radar får denna bra upplösning. Om man bara har tillgång till en antenn kan man också få mycket bra upplösning genom att förflytta antennen. För att efterlikna gruppantennen i figur 2.9 kan man först lägga antennen i position $x = -Md$ varefter man sänder iväg en signal. Den reflekterade signalen mottages och sparas. Därefter förflyttas antennen till $x = -(M-1)d$, där en likadan signal sänds iväg, mottages och sparas. Samma förfarande upprepas för $x = -(M-2)d, -(M-3)d, \dots, Md$. Efter mätningen sammanställs de sparade signalerna, s.k. koherent addition. Det är då mycket viktigt att hålla reda på både fas och amplitud för signalerna. Genom att summera signalerna efter en eventuell fasförskjutning får man i stort sett lika bra mottagning som motsvarande array bestående av $2M + 1$ element. Med detta förfarande har man åstadkommit en *syntetisk gruppantenn*. Genom att använda denna som en radar fås en *syntetisk aperturradar* (förkortas SAR). En fördel med SAR gentemot en vanlig icke-fasstyrd gruppantenn är att man i mjukvaran kan skapa det antenndiagram man vill ha. I detta avseende liknar den de fasstyrda och adaptiva antennerna. En annan fördel är att den syntetiska arrayen kan göras mycket lång.

SAR används både kommersiellt och militärt som högupplösande radar för satelliter. Upplösningen av föremål på marken kan vara så hög som några meter, även från en satellit. SAR har en klar fördel gentemot optiska metoder eftersom den ser genom moln. De flesta SAR-antennerna använder sig av frekvenser på över 1 GHz. Det finns dock undantag. Det flygplansburna radarsystemet CARABAS, som utvecklats vid FOA i Linköping, använder sig av en radar i frekvensintervallet 20-90 MHz. Vid dessa förhållandevis låga frekvenser tränger vågorna ned en bit i marken vilket kan vara av intresse. De tränger också igenom bladverk och grenar.



Figur 2.10: En tvåarmad log-spiral antenn.

2.11 Frekvensoberoende antenner

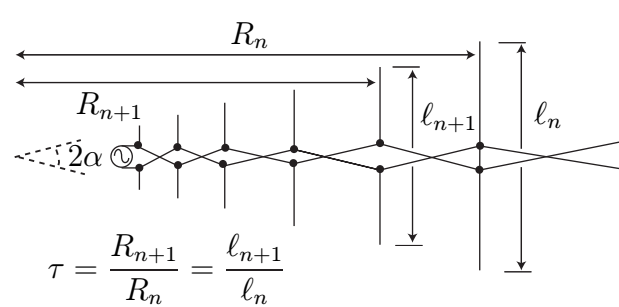
I vissa tillämpningar vill man ha mycket bredbandiga antenner. Man kanske vill använda antennerna för att svepa i frekvens eller att skicka ut snabba pulser med brett spektrum.

En effektiv typ av bredbandiga antenner är de frekvensoberoende antennerna. Principen för en frekvensoberoende antenn är följande: En antens impedans och strålningsdiagram vid en viss frekvens beror dels på antennens form och dels på antennens dimension, mätt i våglängder. Antag att man konstruerar en antenn vars form och dimension mätt i våglängder vid en godtycklig skalning av längdskalan är oförändrad. Det betyder att en sådan antenn har samma impedans och strålningsdiagram för alla våglängder och därmed för alla frekvenser. Antennen blir frekvensoberoende. Naturligtvis är det omöjligt att tillverka en helt frekvensoberoende antenn eftersom denna skulle bli oändligt stor. Idag finns antenner vars bandbredd är såpass bra som 40:1, dvs kvoten mellan den högsta och lägsta frekvens i operationsområdet är 40.

I figur 2.10 ses en tvåarmad log-spiral antenn. Varje arm utgörs av området mellan de två kurvorna

$$\begin{aligned} r &= r_0 e^{a\phi}; & \phi &\in (0, 2n\pi) \\ r &= r_0 e^{a(\phi+\delta)}; & \phi &\in (-\delta, 2n\pi) \end{aligned}$$

där n är antalet varv i spiralen. Om n är stort och r_0 liten blir denna struktur oberoende av skalningen. Ibland lägger man log-spiralen på en kon, vilket ger en konisk spiralantenn. En annan typ av spiralantenn som är bredbandig är Arkimedes-



Figur 2.11: En log-periodisk antenn

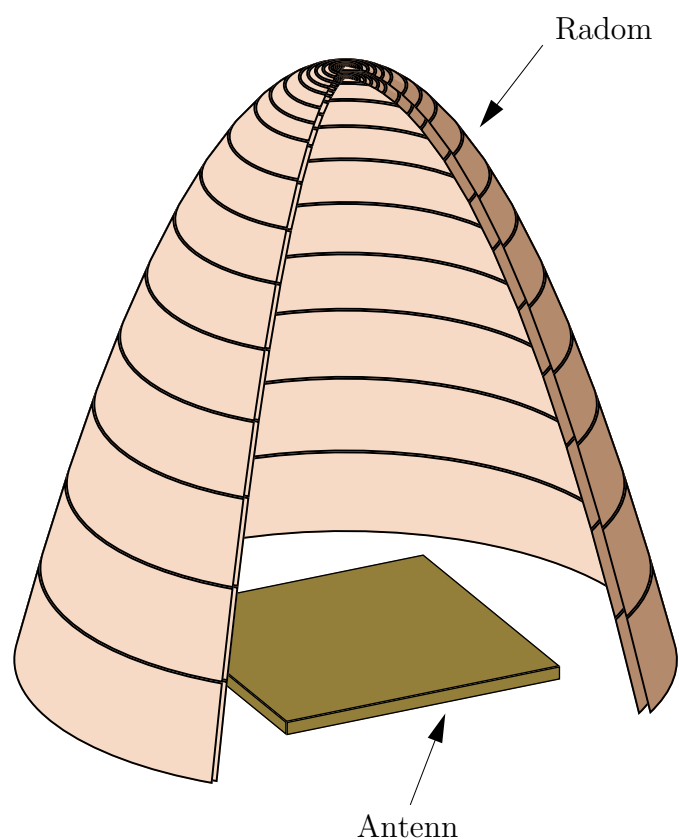
spiralantennen. Dess armar utgörs av området mellan

$$r = a \left(\phi \pm \frac{\delta}{2} \right)$$

Denna är inte oberoende av skalningen men är kompaktare än log-spiral antennen.

En frekvensoberoende antenn som är uppbyggd av linjära antenner är den log-periodiska antennen, se figur 2.11. Den går utmärkt att tillverka med etsningsteknik.

En nackdel med log-spiraler och log-periodiska antenner är att deras antennvinst är liten i förhållande till deras fysiska storlek. Anledningen till detta är att endast en del av antennen exciteras vid en viss frekvens.



Figur 2.12: Schematisk bild på en radom och bakomliggande antenn ofta använd i flygtillämpningar.

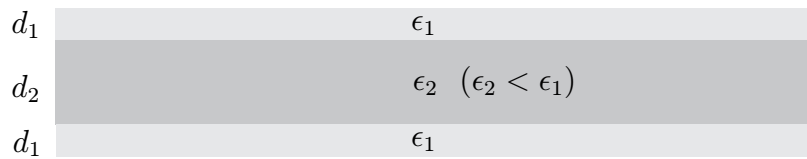
2.12 Radomer

En radom har till uppgift att skydda den bakomliggande antennen mot väder och andra skadliga effekter. En typisk situation som uppträder i flygtillämpningar finns avbildad i figur 2.12.

Helst vill man att radomen inte skall påverka antennens egenskaper allför mycket. De viktigaste parametrarna att tänka på vid konstruktion av radomen är transmissionsförluster. Om radomen har krökt yta, måste även korpolarisations- och s.k. pekfels-effekter begränsas.

Ytterligare komplikationer i flygtillämpningar är att radomkonstruktionen måste tåla stora mekaniska påfrestningar, varför radomen ofta förstärks genom att glasfiberväv gjuts in i radomväggarna. Dessa glasvävar förändrar radomens egenskaper och därmed den bakomliggande antennens strålningsegenskaper. Förändringarna sker ofta på ett oönskat sätt. Det är därför väsentligt att radomen och antennen konstrueras tillsammans för att en bra teknisk konstruktion skall erhållas.

En ofta använd teknik att bygga radomer på är s.k. sandwich-teknik, där radomen består av flera lager olika dielektriska material, se figur 2.13. För en s.k. A-sandwich gäller att $\epsilon_2 < \epsilon_1$. Typiska data på täckskikt (E-poxy) och distansmaterial (Rohacell) finns i tabell 2.1. Täckskikten är vanligtvis tunna; typiskt 1 mm tjoc-



Figur 2.13: Radom av sandwich-typ (tre lager, s.k. A-sandwich).

Material	ϵ
Epoxy	$3.65(1+i0.0320)$
Rohacell	$1.10(1+i0.0004)$

Tabell 2.1: Materialparametrar för typisk A-sandwich. Dielektricitetsfunktionen skrivs på formen $\epsilon(1 + i \tan \delta)$, där δ kallas materialets förlustvinkel.

ka. För ännu bättre prestanda använder man sig av ännu fler lager, t.ex. 5 eller 7 lager. Nackdelen med alltför många lager är att transmissionsförlusterna ökar och att konstruktionen blir tyngre och klumpigare.

Litteraturförteckning

- [1] C. A. Balanis. *Antenna Theory*. John Wiley & Sons, New York, second edition, 1997.
- [2] D. K. Cheng. *Field and wave electromagnetics*. Addison-Wesley, Reading, MA, USA, 1989.
- [3] R. C. Johnson. *Antenna Engineering Handbook*. McGraw-Hill, New York, third edition, 1993.
- [4] A. D. Olver, P. J. B. Clarricoats, A. A. Kishk, and L. Shafai. *Microwave Horns and Feeds*. IEEE Press, New York, 1994.
- [5] W. L. Stutzman, and G. A. Thiele. *Antenna Theory and Design*. John Wiley & Sons, New York, second edition, 1998.

Sakregister

- A-sandwich, 22
- Absorptionstvärsnitt, 5
- Antenn
 - adaptiv, 13, 18
 - Arkimedesspiral, 21
 - breddbands, 5, 20
 - Cassegrain, 15
 - dipol, 9
 - förlustfri, 5
 - faststyrd, 17, 18
 - flerlobs, 18
 - frekvensoberoende, 20
 - grupp, 11, 13, 16
 - syntetisk, 19
 - halvvågs, 9
 - horn, 14
 - linjär, 9
 - log-periodisk, 21
 - log-spiral, 20
 - mikrostrip, 13
 - mottagar, 2, 18
 - parabol, 15
 - patch, 13
 - phased array, 17
 - reflektor, 15
 - rundstrålande, 12
 - sändar, 2, 18
 - slits, 16
 - smalband, 5
 - Yagi-Uda, 12
- Antennelement, 11
- Antennvinst, 3, 12
- Array, 11
- Arrayfaktor, 11
- Bandbredd, 5
- CARABAS, 19
- Centrumfrekvens, 5
- Decibel, 3
- Dipol, 9
- Direktivitet, 3
- Direktor, 12
- E-poxy, 22
- Effektiv area, 5
- Elementfaktor, 11
- Finita elementmetoden, 14
- Fjärrfält, 1
- Fjärrfältsamplitud, 2, 11
- Fjärrzon, 1
- Friis transmissionsformel, 6
- Fysikalisk optik, 15
- Förlustresistans, 4
- Gain, 3
- Geometrisk optik, 15
- Gruppantenn
 - broadside, 11
 - end-fire, 11
- Gruppantenner, 11
- Helixantenn, 6
- Hornantenn, 6
- Huvudlob, 2, 11
- Impedans, 4
- Intensitet, 2
- Linjär antenn, 9
- Lob, 2
 - huvud, 2
 - sido, 2
- Log-periodisk antenn, 21
- Log-spiral antenn, 20

Momentmetoden, 10, 14

Närfält, 1

Närzon, 1

Oktav, 5

Patchantenn, 13

Patriot systemet, 17

Polarisation, 6

 cirkulär, 6

 elliptisk, 6

 linjär, 6

Radarekvationen, 7

Reaktans, 4

Reciprocitet, 2

Reflektor, 12, 14

Resistans

 förlust, 4

 strålnings, 4

Rohacell, 22

Sandwich-teknik, 22

SAR, 19

Sidolob, 2

Strålningsdiagram, 2

Strålningseffektivitet, 5

Strålningsresistans, 4

Strålningsvektorn, 2

Subreflektor, 15

Syntetisk aperturradar, 19

Théveninekvivalent, 4

Vågledare, 14, 16

Yagi-Uda antenn, 12