Invloed van het aardoppervlak op het verticale stralingsdiagram van antennes

Günter Schwarzbeck, DL1BU

Onder de titel 'Streifzug durch den Antennewald' publiceert DL1BU al enige jaren lang zeer interessante artikelen over metingen aan antennes in cq-DL, het maandblad van onze Duitse zusterorganisatie DARC. In de rubriek Reflecties door PAoSE is reeds dikwijls gewag gemaakt van de door DL1BU gevonden resultaten. In het aprilnummer van cq-DL 1980 komt een artikel voor waarin Günter Schwarzbeck behandelt hoe het verticale stralingsdiagram van een antenne in de vrije ruimte verandert als de antenne boven het aardoppervlak wordt opgesteld. Wij vonden dit artikel van zodanig belang, ook voor de lezers van Electron, dat wij de auteur toestemming hebben gevraagd het in ons blad te mogen overnemen. De toestemming werd door Günter graag verleend en wij zijn hem daarvoor zeer erkentelijk. Wim Rijnsburger, PAoWRL, vertaalde het artikel voor u uit het Duits.

Redactie Electron

Het verticale stralingsdiagram van kortegolfantennes

Heeft u ook wel eens gniffelend een antennetest meegemaakt, waarbij een geweldige 5-elements quad of een 7-elements mono-band yagi het moesten afleggen tegen een kleine 3-elements 3-banden yagi? Of beide de mindere waren van een dipool die op 5 meter hoogte tussen twee huizen was gespannen?

Maar het gniffelen verstomde zeker, wanneer in W6 de grote richtantenne dan toch een hele S-punt meer binnenbracht dan de kleine en de dipool het compleet liet afweten.

Hoe is dat te verklaren, gezien de 'antenne-winst' van deze types? Hoe kan de dipool-zonder-antennewinst op een short-skip afstand ongeveer 2 S-punten sterker zijn dan een grote yagi of quad? Wanneer de z.g. loodrechte grensfrequentie 14 MHz bereikt (en dat is momenteel in de wintermaanden het geval geweest) wordt ook in de 20-meterband loodrecht naar boven gerichte straling door de F2-laag teruggekaatst.

Dan is er geen dode zone, en het ontvangstgebied voor ruimtegolven vermengt zich met dat van de gering aanwezige grondgolf en de directe straling. In dit geval is een op slechts 5 meter hoogte opgehangen dipool voor korte afstanden de 'beste', want hij bevoordeelt op 14 MHz signalen onder een zeer steile stralingshoek, en vooral loodrechte, directe straling. De aarde doet er nog 2, 3 of 4 dB winst bovenop, afhankelijk van de bodemgesteldheid. De richtantennes hebben het moeilijker, want die hebben naar boven een beduidend geringere straling. Een onder andere omstandigheden goede DX-antenne als de ground-plane is nu veel slechter voor deze short-skip verbindingen met grote signaalsterkte, omdat deze loodrecht naar boven een 'nul'-richting heeft. In de praktijk valt het toch nog wel mee, omdat door onsymmetrie in het radialensysteem toch een kleine vertikale component overblijft. Op een afstand van 1000 km is een 10 m hoge 3-elements yagi wel optimaal op 14 MHz.

Een hoogte van een halve golflengte geeft n.l. de hoogste veldsterkte onder de 30° opstralingshoek, en wanneer dan de F2-laag op een hoogte van 320 km ligt, geeft dit op precies 1000 km de eerste 'sprong'.

Een lange yagi met zeer veel hogere antennewinst (in de stralingsrichting) is nauwelijks beter bij 30°, want superpositie van het slankere vrije-ruimte-diagram en deze hoogte-afhankelijkheid drukt het maximum een beetje naar beneden. Zulke vertikale diagrammen, die uit model-metingen tevoorschijn kwamen, werden reeds in *cq-DL* 11/78, blz. 504, gegeven voor antennes met een opstellingshoogte van 1 of 2 golflengten boven de grond. De oorzaak van het ontstaan van deze slanke 'lussen' in het stralingsdiagram is de interferentie tussen de directe straling met die via de aardreflectie, wat bij het in-fase zijn van beide een verdubbeling van de veldsterkte (bij perfecte reflectie) betekent en uitdoving bij tegenfase. De winst van een antenne boven een perfect reflecterende bodem kan, in vergelijking met een antenne in de vrije ruimte (ver van de aardbodem verwijderd) 6 dB hoger zijn.

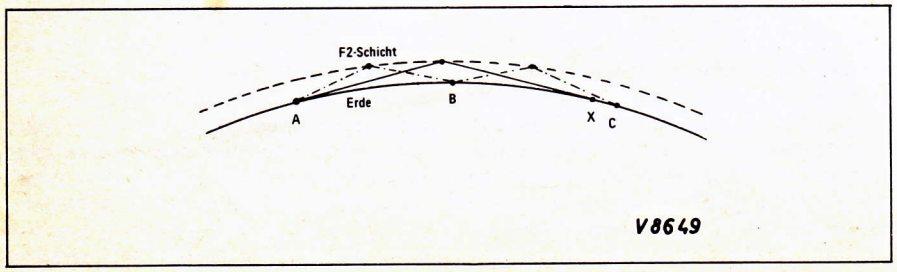
In eerdere afleveringen werd reeds verklaard, waarom kortegolfantennes boven de aarde een zeer veel hogere winst geven, wanneer ze worden vergeleken met een dipool in de vrije ruimte. Met deze kwestie zullen wij ons in het vervolg nogmaals bezig houden, omdat op dit gebied nog steeds veel onduidelijk is, ook voor hen die in antennes geïnteresseerd zijn. Maar nu terug naar de antenne-vergelijking waar we mee begonnen. Voor de tijdens een zonnevlekken-maximum optredende short-skipverbindingen op 14 MHz en de superioriteit van een slechts 5 m hoog opgehangen dipool hebben we de oorzaken reeds besproken. Binnenlandse verbindingen op 14, 21 en 28 MHz zijn ook mogelijk met een lagere loodrechte grensfrequentie van 10 MHz of minder, door verstrooiing in achterwaartse richting ('backscatter') uit een bepaalde hemelrichting, die juist ook voor DX 'open' is. 's Morgens dus op 10 en 15 m, uit het oosten, op 20 m uit het westen, 's avonds op alle drie de banden. Aanvankelijk uit het noordwesten, later uit zuidwestelijke richting. Europese stations moeten dan in deze backscatterrichting stralen wanneer ze een verbinding willen maken. Het richten van de antenne op het tegenstation heeft slechts vermindering van de geluidssterkte of het verloren gaan van de verbinding tot gevolg. De reflectie komt gedeeltelijk uit de ionosfeer terug, maar ook voor een deel uit gebieden waar hoge veldsterkten optreden na de eerste 'sprong'. Backscatter wordt zowel door vlakke als ook door wat steilere straling opgewekt. De geluidssterkten zijn veel geringer dan bij short-skip op 14 MHz of bij propagatie via de sporadische E-laag op 28 MHz en de klank van EZB-signalen is ruw en schor door looptijdverschillen in de verschillende verstrooiingsgebieden.

DX-verbindingen gaan onder dezelfde hoeken als backscatter, maar zijn kieskeuriger in het treffen van de gunstigste hoek. De horizontale hoek (azimuth) verloopt bij ongestoorde propagatie volgens de 'grootcirkel' (globe!) door de beide plaatsen, bij gestoorde propagatie en in schemeringsgebieden kunnen duidelijke afwijkingen optreden. Voor wat betreft de (vertikale) hoek voor optimale overdracht treden wel aanmerkelijke veranderingen op, vaak in korte tijd. In het algemeen is het duidelijk dat de lage stralingshoeken voor grote afstanden het gunstigste zijn, en wat steilere naarmate de afstanden kleiner worden.

Bij een gemiddelde hoogte van de F2-laag van 320 km geeft een stralingshoek van 50° ca. 500 km, 30° ca. 1000 km, 20° ca. 1500 km, 10° ca. 2300 km, 7° ca. 2700 km, en 5° ca. 3000 km. Onder 5° wordt de straling reeds wat verzwakt door de invloed van de aarde. Vanuit een hoog punt en met plaatselijke helling van het terrein in de gewenste richting of boven zeewater komt ook nog onder kleinere hoeken propagatie tot stand. Bij straling evenwijdig aan het aardoppervlak worden afstanden tot ca. 4000 km nog in één sprong overbrugd, wanneer we rechtlijnige op- en terugstraling via de ionosfeer veronderstellen. Wat aanzienlijk verder weg ligt kan alleen via een tweede, derde, vierde of vijfde sprong bereikt worden. Wie bijv. door de schaduw van een berg de straling in de onderste 15° kwijtraakt, heeft voor dezelfde afstand het dubbele aantal 'sprongen' nodig. Daarbij is het dan maar de vraag, of deze steilere straling

door de F2-laag nog wordt gereflecteerd.
Zo kan het gebeuren dat bij het lager worden van de grensfrequentie het verschil in signaalsterkte tussen de gelukkige aan de kust, of hij op een heuvel enerzijds en degene die tussen de bergen ingeklemd zit anderzijds, steeds groter wordt. Tot tenslotte alleen het onder een lage hoek binnenkomende station nog luid binnenkomt en het andere onhoorbaar wordt. Dat heeft weinig te maken met de antenne, doch veel met de plaatselijke omstandigheden.
In fig. 1 zijn deze situaties ongeveer op schaal getekend. Veronderstel in plaats A een station dat onder een vertikale hoek van 7° kan stralen (7-elements yagi op een hoogte van tweemaal de golflengte, of een kleinere antenne of dipool op iets grotere hoogte). Dit station bereikt in één 'sprong' het punt X op 3000 km afstand (vanzelfsprekend ook kleinere en grotere afstanden, omdat de vertikale afstralingshoek geen fijne straal omvat maar een hele bundel tussen ca. 4° en 11° representeert. Bovendien zijn er in het stralingsdiagram ook lussen onder ongeveer 22° en 36°. De tweede sprong bereikt al 6000 km, dus bijv. de Verenigde Staten).
Het andere station in punt A gebruikt een antenne op een hoogte van 0,75 golflengte. Dat betekent dus op 14 MHz een hoogte van 15 m. Hier ontstaat de grootste veldsterkte bij een dipool onder 19,5°, bij een 3-elements yagi onder 18°. Nu zal de grootste veldsterkte ontstaan na de eerste sprong over 1600 km, de tweede komt tot stand bij 3200 km en voor de Verenigde Staten hebben we minstens vier sprongen nodig. Het signaal wordt door het dubbele aantal sprongen enige dB zwakker en het wordt eerder 'afgekapt' door de MUF (Maximum Usable Frequency). De antennewinst heeft hier dus minder invloed dan

Fig. 1. De afstand die in één sprong kan worden overbrugd hangt af van de opstralingshoek. *Het trajekt AB is ongeveer 1600 km lang, ABC ongeveer 3200 km; dit correspondeert met een opstralingshoek van circa 18 graden. Het trajekt AX van ongeveer 3000 km wordt onder een hoek van 7 graden in één keer overbrugd; de tweede sprong brengt ons op 6000 km afstand.*



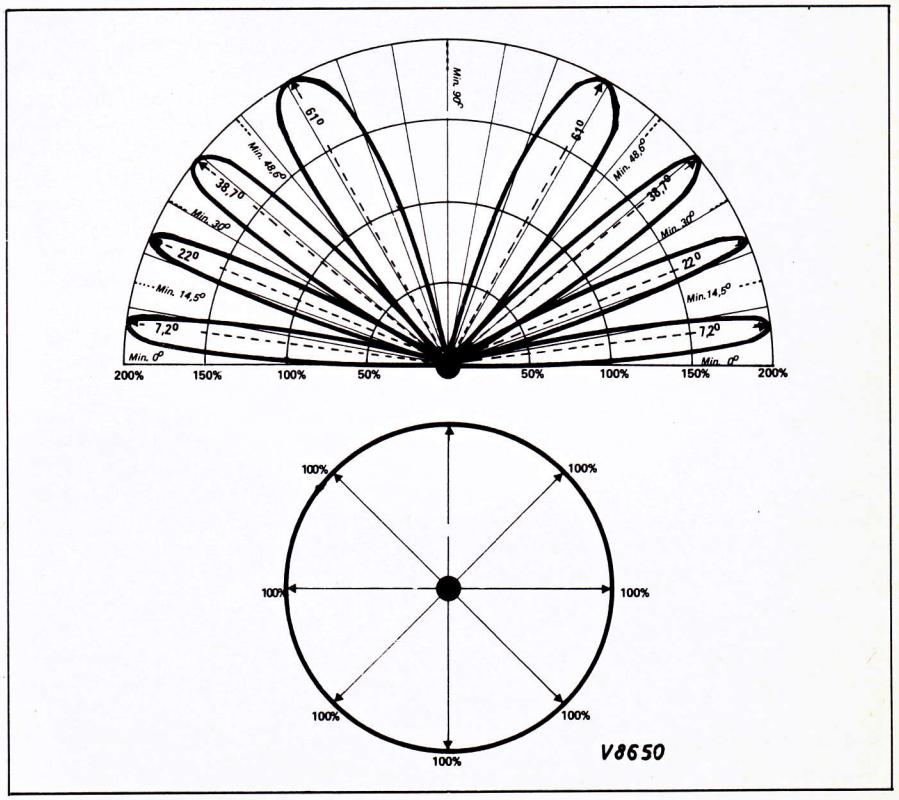


Fig. 2. Boven: Stralingsdiagram van een dipoolantenne op een hoogte van 2 golflengten boven een perfect geleidend grondvlak. *Onder het diagram in de vrije ruimte.*

de door hoogte en omgeving bepaalde elevatiehoek voor beste straling; een antennewinstvergelijking is onder deze omstandigheden niet mogelijk.
De afhankelijkheid van de vertikale hoek als functie van de hoogte boven de grond kan worden berekend. Hoe we dat doen zal vanwege het fundamentele belang ervan in het aanhangsel worden uitééngezet. Wie zich alleen voor de praktijk interesseert kan het rustig overslaan en zich met de nu voorgestelde praktisch gemeten vertikale stralingsdiagrammen bezighouden.
(In dit voor *Electron* vertaalde artikel is het aanhangsel niet opgenomen).
In fig. 2 is één van de berekeningsuitkomsten grafisch voorgesteld. Een dipool is op een hoogte van tweemaal de golflengte boven de grond gemonteerd, dus bijv. een 28 MHz-antenne op een hoogte van 20 m. De as van de dipool vormt het centrum van de 'libellenvleugels', we kijken dus langs het dipool-element. Door het interfereren van de directe dipoolstraling met het door de perfect geleidende aarde gereflecteerde deel ontstaan maxima en minima van de straling onder bepaalde stralingshoeken, zoals in het begin is uitgelegd. De intensiteit van het veld is langs de onderste schaal aangegeven in %. De vertikale stralingshoek bij een antennehoogte van 2 x de golflengte bedraagt resp. 7,2°, 22°, 38,7° en 61°, de minima liggen bij 0°, 14,5°, 30°, 48,6° en 90°. Er ontstaat een maximum naar boven bij een antennehoogte van een oneven aantal malen de kwart-golflengte. Onder het 'libellenvleugel'-diagram van fig. 2 zien we het overeenkomstige beeld van de veldverdeling voor een dipool in de vrije ruimte, dus ver van de aarde verwijderd. Rondom de as straalt deze antenne in alle richtingen 100%, in de asrichting natuurlijk 0%. Hier zien we dus nog eens de antennewinst van een korte-golf-antenne boven de aarde aanschouwelijk voorgesteld: De winst is voor een dipool wel '200%' t.o.v. één in de vrije ruimte, dus 6 dB in elke lus van het stralingsdiagram.

Bij een richtantenne die reeds in de vrije ruimte een bepaalde horizontale openingshoek (voor een 3-elements yagi bijv. 60°) en een vertikale openingshoek (bijv. 90°) heeft, moet dit diagram wor-

den vermenigvuldigd met het 'libellendiagram', om de uiteindelijke antennewinst in de diverse richtingen te verkrijgen. De opstralingshoeken verschillen slechts zeer weinig, alleen bij erg lange richtantennes (of samengestelde antennes met een groot oppervlak) wordt de opstralingshoek door de vermenigvuldiging van de beide diagrammen iets kleiner gemaakt. Heel duidelijk echter zullen de onderste lussen de andere in intensiteit overtreffen omdat het smalle 'vrije ruimte'-diagram van een lange yagi de onderste lussen van het diagram het meest accentueert.

Wanneer een richtantenne 5 dB vrijeruimtewinst oplevert, dan treedt dat ook op bij gebruik boven het aardoppervlak in de onderste lussen en dit telt op bij de (theoretische) 6 dB t.g.v. de invloed van het aardoppervlak. In werkelijkheid is de aardreflectie minder, zodat de winst van deze richtantenne bij de veronderstelde 4 dB aardreflectie 9 dB boven de halvegolfdipool in de vrije ruimte ligt. Alleen volgens deze redenering is winstopgave voor kortegolf-antennes zinvol, zij het niet erg praktisch. Physisch-mathematisch bekeken is de dipool niet zo'n geschikte antenne, omdat hij weliswaar om zijn as gelijkmatig straalt (cirkeldiagram), maar loodrecht daarop het bekende achtvormige diagram heeft, hetgeen reeds een winst van 2,15 dB in de hoofdstralingsrichting betekent. Voor de theoretische beschouwing van een straler is een in alle richtingen gelijkmatig stralende bron prettiger. Deze, niet perfect te realiseren antenne, is als bolstraler of isotrope antenne bekend. Ten opzichte van de isotrope straler in de vrije ruimte (alleen in de vrije ruimte is hij van betekenis) is de winst van een kortegolfantenne boven de grond nogmaals 2,15 dB hoger, de hierboven als voorbeeld genoemde antenne met 5 dB vrijeruimtewinst heeft dan al ruim 11 dBi antennewinst (de letter i betekent: winst t.o.v. de isotrope straler).

Zo bekeken en toegelicht is er niets tegen dergelijke winstopgaven in te brengen. Het resultaat is hetzelfde bij winstberekeningen aan kortegolfantennes boven de aarde wanneer de isotrope antenne als basis wordt gebruikt.

Deze herhaling van reeds vroeger in het kort behandelde verschijnselen was nodig om de nu volgende praktisch gemeten antennediagrammen van kortegolfantennes te kunnen begrijpen. Moge dit alles bij eerste beschouwing op dorre en droge theorie lijken, het is de grondslag van alle, dagelijkse verschijnselen op de kortegolfbanden.

We kunnen deze verschijnselen in eerbiedige verbazing accepteren, zonder verder over de oorzaken na te denken. Een dieper indringen is echter noodzakelijk bij het optimaliseren van een installatie, waarbij wij ons moeten realiseren dat dit vaak alleen voor een clubstation mogelijk is, dat een goede lokatie en de juiste antennetoren vrij kan kiezen. Vertikale diagrammen kunnen op aarde alleen redelijk worden gemeten aan modelantennes in het UHF-gebied. Om diegenen die alleen in het resultaat geïnteresseerd zijn niet langer op de proef te stellen, zullen we het later nog hebben over modelmetingen en de daarvoor benodigde hulpmiddelen. Hier volgen meteen de uitkomsten.

Van alle in het kortegolfgebied interessante antennes heb ik modellen voor 435 MHz gemaakt. In fig. 3 zien we v.l.n.r. een HB9CV, een 3-elements yagi, de 'Log-Yag' van K4EWG (*QST* 12/76), een gedeeltelijk collineair werkende antenne met centrale afstemming volgens Hans Rückert en tenslotte twee naast elkaar collineair werkende 3-elements yagi's, ieder in het midden gevoed. In fig. 4 zien we links een 1296 MHz standaardantenne voor antennewinstmetingen (hierover wordt in samenhang met de meting van VHF - UHF - antennes later bericht).

Dan volgt een 5-elements yagi met gevouwen dipoolstraler, tenslotte een 7-elements yagi en een 5-elements quad-antenne.

Al deze antennemodellen zijn op schaal nagebouwd van verzilverd koperdraad, zodanig dat de afstanden tussen de elementen naar believen kunnen worden veranderd met behulp van op de drager verschuifbare klemmen met bevestigingsschroeven. De in fig. 4 zichtbare 7-elements yagi is bijv. een 28 MHz-yagi op een schaal 1:15,5. Daarvan kloppen de gegevens op 435 MHz volkomen met die welke aan de werkelijke antenne werden gemeten (zie *cq-DL* 12/79, pag. 548). In tegenstelling met de grote antenne, waar dit zeer tijdrovend was, kon aan dit model de winst nogmaals verbeterd en de horizontale openingshoek van 42° tot 38° worden verkleind door 'rommelen' met de directorafstanden. De afstand tussen de voorste en de tweede director, van voren af gerekend, werd groter, de daaropvolgende afstand iets kleiner, de dan volgende weer groter. Deze variatie, die ook voor de lengten van de directoren mogelijk is, geeft de mogelijkheid tot een verdere winstvergroting bij lange yagi's, welke ook rekenkundig te bewijzen is (hoewel de berekening alleen tot een niet zonder meer te realiseren hogere winst voert, de laatste verfijningen kunnen alleen via metingen experimenteel worden gevonden). Van de in fig. 4 rechts zichtbare quadantenne werd, evenals bij de yagi's, door het wegnemen van directorelementen vanzelfsprekend ook een 2-, 3-, 4-, en 5-elements versie gemeten. De metingen werden met een zelfgemaakte modelmeetopstelling, fig. 5, een vector-voltmeter (HP 8405 A) en een signaalgenerator (HP 8640 B) uitgevoerd.

Zij zouden ook met gelijke nauwkeurig-

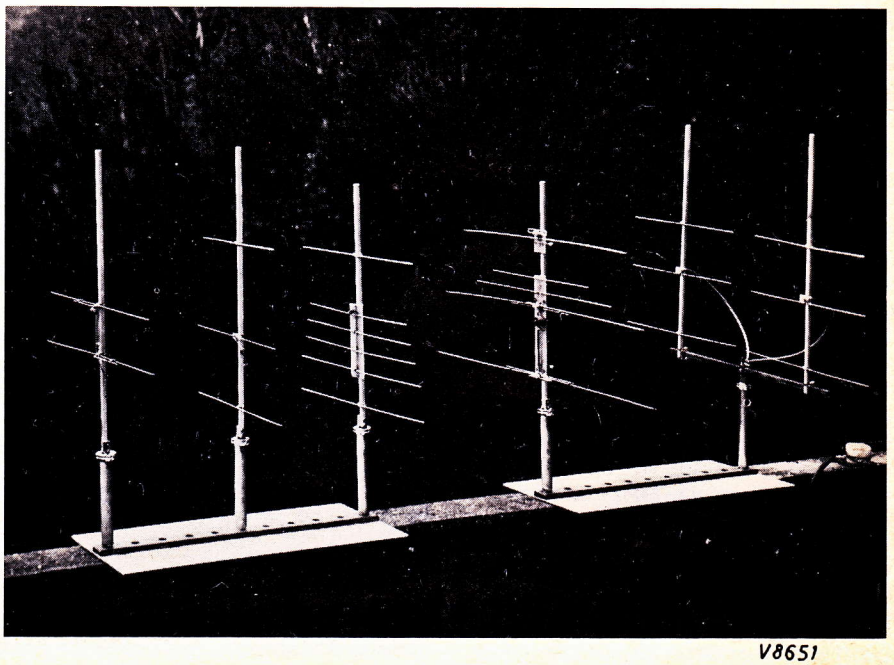


Fig. 3. Enige modelantennes voor een frequentie van 435 MHz. *Van links naar rechts HB9CV, 3-elements yagi, 'Log-Yag' van K4EWG, antenne volgens Hans Rückert, twee collineair werkende yagi's.*

V8651

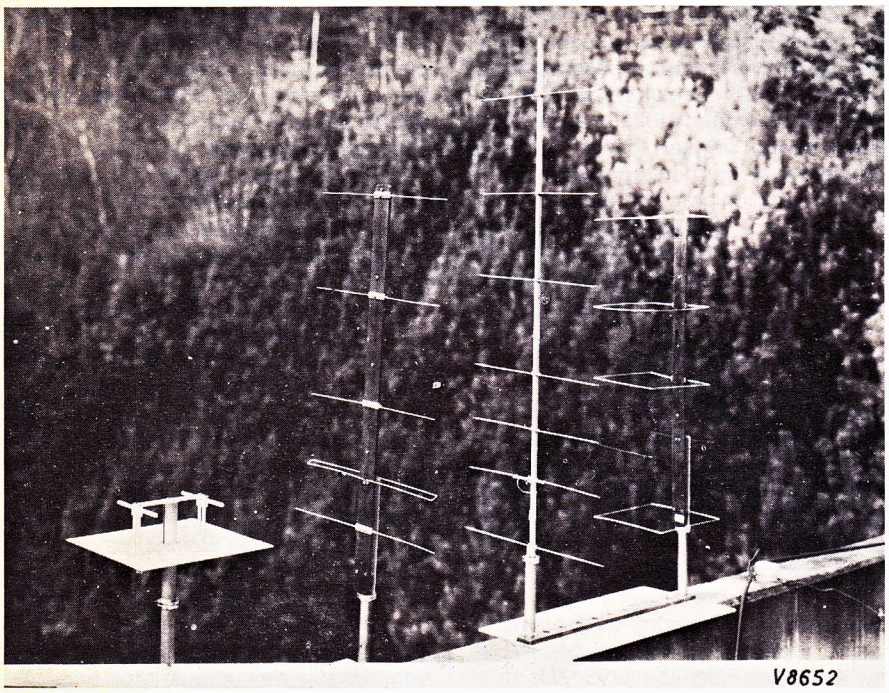
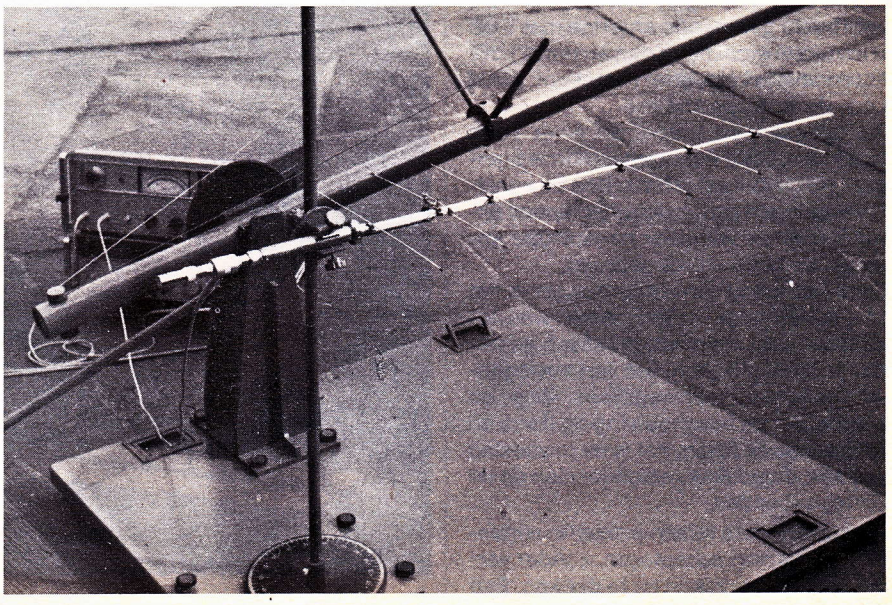


Fig. 4. Nog meer modelantennes. *1296 MHz standaardantenne voor antennewinstvergelijkingen, 5-elements yagi met een gevouwen dipool als gevoed element, een 7-elements yagi en een 5-elements cubical quad antenne.*

heid gedaan kunnen worden met een 1 W amateurzender op 435 MHz, een geijkte deler en een primitieve HF-indicator met 50 ohm weerstand en detector.
De indicator moet dan steeds dezelfde uitslag aangeven terwijl de nauwkeurigheid door een voorgeschakelde geijkte deler met gecalibreerde verzwakker wordt bepaald. In fig. 5 is als voorbeeld de 7-elements model-yagi op een geïsoleerd draaimechanisme met een gradenboog gemonteerd. De tegen-antenne, een 2-elements yagi, is aan het eind van een lange drager geplaatst. Deze is op afstand te bewegen via een cardankoppeling en een wormas met tandwiel van hardweefsel, waarmee de vertikale hoek versteld kan worden. Het hardweefseltandwiel draagt ook een gradenverdeling. Alle onderdelen, tot op de kleinste schroefjes, zijn van isolatiemateriaal.
De resultaten van de metingen zijn voor de echte 'antenne-fans' in een tabel (fig. 6) gegeven, omdat alle resultaten in beeldvorm verwarring kunnen geven. De voeding van de 2-elements zendantenne (aan het einde van de lange drager) gebeurde op 435 MHz met constant 10 mW, dus %10 dBm (10 dB boven 1 mW). De ontvangstprestatie van het beproefde model zijn eveneens in dB in de tabel opgenomen onder verschillende hoeken en bij 50 ohm belasting. Fig. 7 geeft een selectie uit de gemeten vertikale diagrammen van de vele antennes. De getrokken lijnen zijn van de 7-elements yagi, de gestreepte lijnen van de 3-elements yagi en de lijnen bestaande uit cirkeltjes van de halve-golf-dipool. De waarden voor een 2-elements quad liggen dicht bij de kromme van de 3-elements yagi, die van een 5-elements quad bij die van de 7-elements yagi.
Op het eerste gezicht zijn de vertikale hoeken voor de 1-, 3- en 7-elements antennes gelijk en alleen afhankelijk van de opstellingshoogte boven de aarde.

Fig. 5. Opstelling voor het meten van stralingsdiagrammen

Bij nadere beschouwing blijken de hoeken iets kleiner te zijn voor de 'lange yagi', omdat deze door zijn smalle vertikale diagram in de vrije ruimte de lussen van het diagram tengevolge van de invloed van de aarde wat 'naar beneden' trekt.
Bekijken we echter zeer lage afstralingshoeken, dan wordt het voordeel van de 'lange yagi' boven de dipool werkelijk spectaculair. De tabel toont dat ook. De relatieve winst ten opzichte van de dipool boven aarde is in de onderste lus bij de op twee golflengten hoog opgestelde 7-elements yagi 8,4 dB (vóór het 'rommelen'), bij een hoek van 2° echter 9 dB. Bij een opstellingshoogte van één golflengte stijgt het verschil in antennewinst bij 2° al tot 10,4 dB en bij een hoogte van 0,75 golflengte tot 11,5 dB. Zo kan dus bij gunstige helling in de goede richting, het voordeel van een 7-elements yagi of een 5-elements quad in het grensgeval 2 S-punten zijn. Daarbij komt dan nog de vermindering van de fading als gevolg van het grote antenneoppervlak. Anderzijds toont fig. 7 (boven) onder 50° elevatie (500 km shortskip-QSO) gelijkwaardigheid van de 7-elements yagi en de dipool, en de superioriteit van de 3-elements yagi boven de beide concurrenten! Bij een hoogte van 2 golflengten en onder 60° is het voordeel van de 3-elements yagi zelfs nog groter.
Zo kunnen dus de in het begin genoemde antennevergelijkingen op het eerste gezicht volkomen onbegrijpelijke waarden opleveren. Alleen op een vrij terrein en op gelijke hoogte gemonteerde, naast elkaar staande antennes, kunnen zinvol met elkaar worden vergeleken in het werkelijke radioverkeer.



	Elevationswinkel Elevation Angle	2°	4°	6°	8°	10°	12°	13°	15°	17°	19°	21°	26°	31°	36°	40°	50°	60°	70°	80°
Höhe über Grund 0,75 λ	Dipol 0,75 λ hoch dipole .75 λ high	−29,5	−24,5	−21,5	−19	−17,5	−17,0	−16,5	−16,5	−16,2	−16,2	−16,2	−17,3	−21,0	−22,0	−23,5	−19,5	−19,0	−21,0	−21,5dBm
	2-El. HB9CV 0,75λ 2 El., both driven	−23,5	−19,0	−17,0	−14,8	−13,3	−12,4	−11,9	−11,5	−11,5	−11,7	−12,0	−14,2	−17,0	−19,0	−18,0	−16,0	−16,0	−17,2	−21,0 dBm
	3-El.-Yagi 0,75λ hoch 3-el.parasitic Yagi	−23,0	−18,0	−15,2	−13,1	−11,9	−11,1	−10,5	−10,5	−10,0	−10,3	−10,5	−12,6	−15,8	−16,5	−17,2	−16,0	−16,5	−20,0	−26,0 dBm
	2-El.-Quad 0,75λ hoch 2 el. parasitic Quad	−22,0	−17,9	−15,0	−13,1	−11,8	−11,0	−10,4	−10,2	−10,0	−10,2	−10,7	−13,5	−17,0	−18,0	−17,3	−17,2	−18,0	−22,0	−24,5 dBm
	EIA-Gewinn-Normal EIA gain standard .75λ	−21,3	−16,3	−13,5	−11,8	−10,5	−9,8	−9,2	−8,9	− 8,9	−9,2	−9,3	−11,5	−14,8	−16,7	−18,5	−19,0	−21,5	−27,0	−27,3 dBm
	7-Element Yagi 0,75λ 7 el.parasitic yagi	−18,0	−13,3	−11,0	−9,0	−8,0	−7,3	−6,9	−6,8	−6,9	−7,0	−7,8	−10,8	−15,7	−18,5	−20,0	−26,0	−32,0	−23,5	−24,0 dBm
	5-Element Quad 5 elem.quad .75 λ up	−17,8	−12,9	−10,4	−8,8	−7,8	−7,0	−6,7	−6,7	−6,9	−7,1	−8,0	−11,5	−16,2	−17,8	−18,0	−21,3	−34,0	−26,0	−23,0 dBm
Höhe über Grund 1 λ	Dipol, 1 λ hoch dipole, 1 λ height	−26,0	−21,5	−18,5	−17,0	−16,0	−15,6	−15,3	−15,9	−16,3	−17,0	−18,0	−23,0	−25,0	−21,0	−19,0	−18,0	−21,0	−20,0	−20,5 dBm
	2-Elem. HB9CV, 1λ 2 el.,both driven,1λup	−21,6	−17,1	−14,7	−13,1	−12,0	−11,5	−11,2	−11,5	−12,2	−13,1	−14,8	−19,7	−18,5	−15,8	−14,3	−15,7	−17,7	−18,5	−20,0 dBm
	3-Elem.-Yagi, 1λ hoch 3 el.parasitic Yagi 1λup	−20,4	−16,0	−13,3	−11,5	−10,6	−10,1	−9,9	−10,2	−10,6	−11,5	−12,5	−17,5	−17,5	−14,8	−13,8	−15,5	−19,0	−21,0	−24,0 dBm
	2-El.-Quad, 1λ hoch 2 el. parasitic quad	−19,0	−15,0	−12,9	−11,3	−10,6	−10,2	−10,4	−10,9	−11,8	−13,1	−14,8	−20,0	−15,4	−13,6	−14,0	−18,2	−18,5	−18,5	−20,0 dBm
	EIA-Gewinn-Normal EIA standard, 1λ up	−18,8	−14,7	−12.0	−10,3	−9,2	−8,7	−8,5	−8,4	−8,6	−9,5	−10,5	−15,0	−17,5	−15,5	−15,1	−18,0	−22,0	−24,0	−25,0 dBm
	7-El.-Yagi, 1 λ hoch 7 el.parasitic Yagi 1λ↗	−15,6	−11,5	−9,3	−8,8	−7,0	−6,7	−6,5	−7,0	−7,9	−9,0	−10,4	−14,8	−14,3	−13,0	−14,5	−25,0	−30,0	−24,0	−24,0 dBm
	5-Element Quad 1λ↗ 5 el. Quad, 1λ height	−14,7	−10,8	−8,6	−7,2	−6,6	−6,5	−6,8	−7,3	−8,5	−10,0	−11,8	−15,1	−12,0	−11,7	−14,0	−23,0	−29,0	−25,0	−23,0 dBm
Höhe über Grund 2 λ	Dipol, 2 λ hoch dipole, 2 λ height	−21,5	−17,7	−16,1	−15,8	−16,6	−18,3	−22,2	−26,6	−23,3	−21,0	−17,2	−17,0	−23,0	−18,0	−16,0	−20,5	−18,0	−18,3	−21,5 dBm
	2-El.-HB9CV, 2 λ ↗ 2 el. both driven,2λ up	−19,5	−15,5	−14,0	−13,5	−14,2	−17,0	−21,0	−25,0	−20,0	−16,4	−14,5	−14,5	−20,5	−16,8	−14,7	−19,0	−16,7	−18,5	−22,0 dBm
	3 Elem.Yagi, 2λ hoch 3 el.parasitic Yagi, 2λ↗	−16,3	−12,6	−11,0	−10,4	−11,2	−13,6	−18,0	−20,5	−16,5	−13,2	−11,4	−11,5	−17,0	−13,5	−11,7	−16,2	−14,5	−17,0	−22,0 dBm
	2-El.Quad, 2λ hoch 2 el.parasitic quad,2λ ↗	−16,0	−12,3	−11,0	−11,0	−12,0	−15,3	−20,0	−19,0	−14,8	−12,2	−11,1	−13,0	−17,2	−12,6	−13,0	−16,2	−15,5	−19,7	−21,5 dBm
	EIA-Gewinn-Normal EIA standard, 2λ up	−15,5	−11,2	−9,4	−8,9	−9,5	−11,0	−12,9	−17,0	−16,5	−13,5	−11,6	−10,2	−14,5	−14,8	−13,0	−18,0	−17,0	−22,0	−28,0 dBm
	7-El.-Yagi, 2 λ hoch 7 el.parasitic Yagi,2λ↗	−12,5	−8,8	−7,4	−7,4	−8,6	−11,0	−13,5	−13,3	−10,8	−9,3	−8,5	−10,0	−13,0	−11,3	−13,0	−20,5	−33,0	−21,5	−23,5 dBm
	5-Element Quad,2 λ↗ 5 el.Quad, 2 λ height	−12,0	−8,5	−7,0	−7,1	−8,8	−10,4	−14,0	−12,4	−9,7	−8,4	−8,0	−10,6	−12,2	−10,0	−12,1	−18,0	−28,0	−25,0	−23,0 dBm
	Elevationswinkel Elevation Angle ⊼	2°	4°	6°	8°	10°	12°	13°	15°	17°	19°	21°	26°	31°	36°	40°	50°	60°	70°	80° ⊼

V8654

Fig. 6. Verticale stralingshoeken van verschillende antennes op hoogten van 0,75; 1 en 2 golflengten boven het grondoppervlak. *De vermelde waarden geven het vermogen aan dat wordt opgevangen door de gemeten antenne (in dB ten opzichte van 1 mW) vanuit een twee-elements zendantenne op 6,5 golflengte afstand. Aan de zendantenne wordt een vermogen van 10 mW toegevoerd en die antenne heeft zelf een antennewinst van 3 dB, er wordt dus effectief 20 mW uitgestraald in de hoofdrichting. De meetfrequentie bedraagt 435 MHz.*

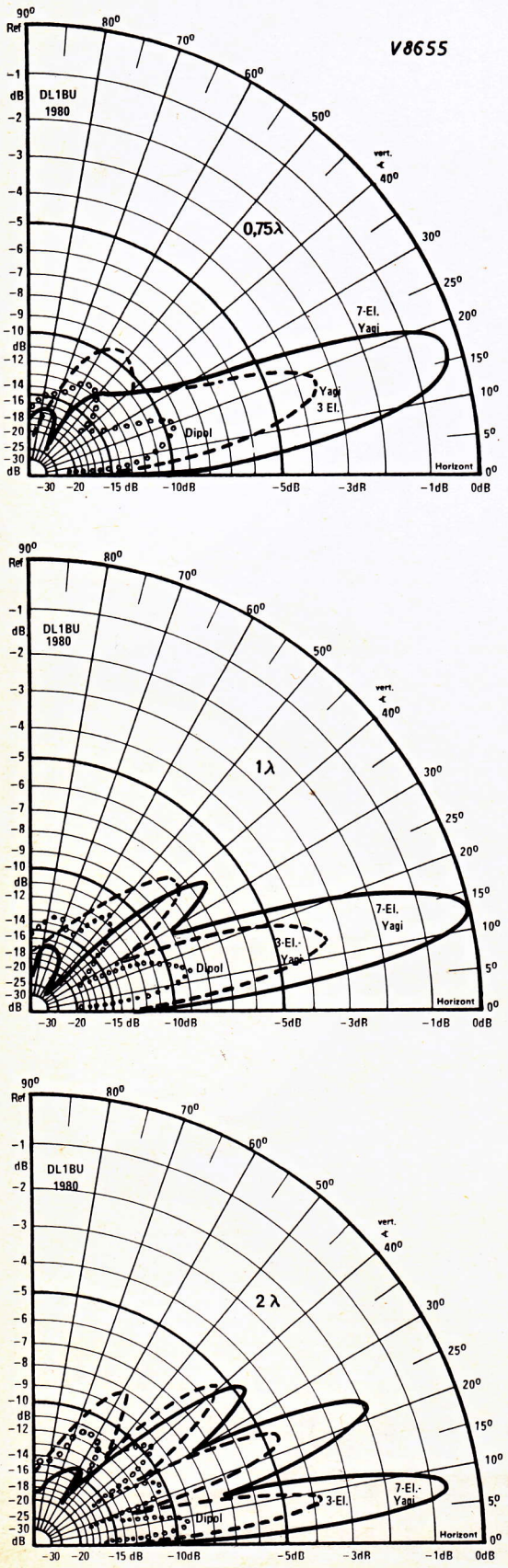


Fig. 7. Gemeten stralingsdiagrammen van een aantal antennes op hoogten van 0,75; 1 en 2 golflengten boven de aarde.

Worden daarbij DX-stations betrokken die soms van de 7°-, 13°-, of 16°-hoofdlussen (afhankelijk van de opstellingshoogte) profiteren, dan treden de verschillen in de rapporten op die opvallend nauwkeurig overeenkomen met de hier gemeten antennewinstverschillen in de diverse lussen van het vertikale stralingsdiagram.

Bij betere bodemgeleiding zijn de insnoeringen in de figuren 7-9 nog dieper, bij slechte bodemgeleiding ontaarden zij in een zwakke, golvende contour. De modelmetingen werden gedaan boven een goede reflecterende stenen vloer met een onderlaag van met staal gewapend beton. Deze vertikale diagrammen (die veldsterktemetingen met een helicopter aan een echte kortegolfantenne ook zouden opleveren) zijn voor de verklaring van vele verbazingwekkende verschijnselen wel ons belangrijkste hulpmiddel. De diagrammen laten ons ook zien dat de van het begin af aan door ons doorgevoerde metingen in de hoofdlus van het diagram op een tegenover liggende berg de enige betrouwbare meetmethode voor kortegolfantennes is, in tegenstelling tot de metingen onder 0° in het horizontale vlak, waar het geringe hoogteverschil ernstige fouten veroorzaakt, als gevolg van de snelle insnoering van de hoofdlus bij 0°.

Literatuur:

(1) *Optimum Element Length for Yagi -Uda Arrays* (Chen und Cheng, IEEE Transactions on Antennas and Propagations, Jan. 1975).

(2) *Microwave modelling of h.f. Yagi antennas over imperfectly - conducting ground* (Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Electronics, April 1978. Dus niet van IEEE in de Verenigde Staten!)