

# Hopdistance, MUF-faktor og refleksionsafstand

Af OZ7MA Arne R. Pedersen, Rønne Allé 34, 3450 Allerød.

## 1. Indledning

Ved radiobølgers udbredelse via ionosfæren gælder nogle i og for sig ret simple geometriske regler, som det er nyttigt at kende, hvis man vil gøre sig overvejelser om, i hvilke vertikale vinkler antennen helst skal udstråle for en given distance, herunder hvordan refleksion af en del af den udstrålede effekt fra jorden eller havet i antennens umiddelbare nærhed, påvirker forholdene.

Vi vil i det følgende kvalitativt forklare disse regler ud fra et par tegninger af de geometriske forhold. Herudfra har vi opstillet matematiske formler (de bygger alene på gymnasie matematik), hvoraf nogle er vist på tegningerne, og som vi har indkodet i en lommeregner. Dermed har vi beregnet tre sæt kurver, der kvantitativt viser resultaterne.

Eksempelvis kan kurverne bruges til at bedømme, om man ved QSO over en given afstand får nytte af refleksion fra havet, hvis man bor i nærheden af det og kender sin antennes højde over havet.

## 2. Hopdistance

I fig. 1 er vist, hvorledes en radiobølge udbreder sig fra et punkt A på jordens overflade via refleksion i et ionosfærelag til punkt B. Refleksionspunktet ligger midt imellem punkterne A og B. Bemærk, at ionosfærelaget er tegnet alt for højt i forhold til jordens krumning; hvis højden skulle tegnes i rigtig målestok, ville cirkelbuerne for jordoverfladen og for ionosfærelaget praktisk taget falde sammen, og det ville være umuligt at vise strålegangen. Hopdistancen d

er afstanden mellem punkterne A og B, målt langs jordoverfladen. Det ses umiddelbart, at jo større hopdistancen er, jo mindre bliver udstrålingsvinklen  $u$ . Den maximale hopdistance fås for  $u = 0$ , det vil sige, at radiobølgen skal sendes vandret ud, parallelt med tangenten til jordoverfladen i punktet A, vist stiplede på tegningen. Det ses også umiddelbart, at jo højere ionosfærelaget ligger, jo større bliver hopdistancen for en bestemt udstrålingsvinkel. Dermed bliver også den maximale hopdistance større, jo højere oppe ionosfærelaget ligger.

Som nærmere forklaret i ref. [1] findes der ionosfærelag i forskellige højder. Højden for de enkelte lag varierer med geografisk position, tid på året og på døgnet og med solpletperioderne. I fig. 2 har vi regnet med, at yderpunkterne for E-lagets højde er 90 og 120 km. E-laget findes kun om dagen. Indenfor samme højdeinterval forekommer somme tider det sporadiske E-lag, der kan være så kraftigt, at det kan reflektere meget høje frekvenser. F-laget, der findes om natten, er ret tykt, og vi regner med, at dets effektive højde ligger mellem 150 og 250 km. Det kraftige, men ret tynde F2-lag, der kun forekommer om dagen, ligger indenfor intervallet 300-350 km. Når vi her taler om dag og nat, er det lokaltidspunktet ved refleksionspunktet mellem de to stationer i punkterne A og B, der er afgørende.

Af fig. 2 ser vi, at den maximale hopdistance (for udstrålingsvinkel 0) er ca. 4000 km for F2-laget, omkring 3000 km for F-laget og godt 2000 km for E-laget, varierende lidt med lagenes aktuelle højder. I

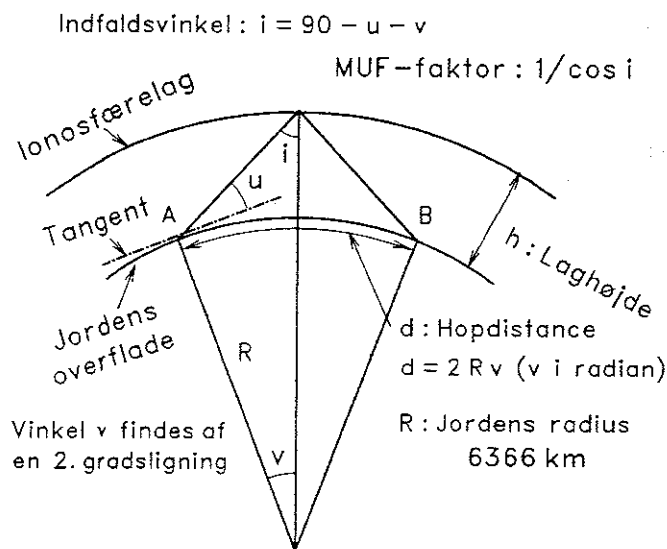


Fig. 1. Hopdistance ved radiobølgers udbredelse via ionosfæren. Ionosfærelagets højde er stærkt forøget.

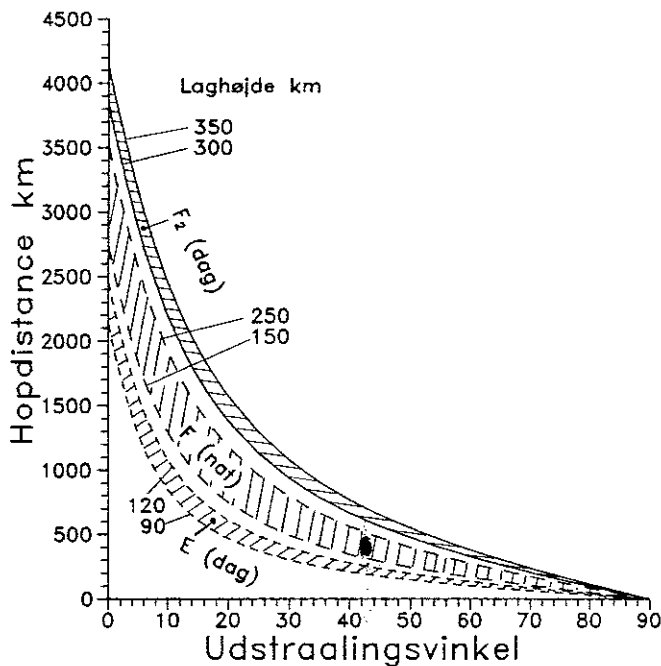


Fig. 2. Hopdistance som funktion af udstrålingsvinkel for de forskellige ionosfærelag. For hvert lag er vist en kurve for den minimale og maximale højde,

praksis kan man ikke få sin effekt udstrålet i 0 grader, næppe under 2-3 grader, hvorved hopdistancerne bliver lidt mindre, som det kan aflæses af kurverne. Til små hopdistancer svarer meget større udstrålingsvinkler, derfor skal effekten ved mere lokale QSO'er helst sendes ud i en vinkel på 30 grader eller mere.

Når afstanden mellem de to stationer er større end den maximale hopdistance, sker udbredelsen ved, at radiobølgen først reflekteres fra ionosfæren. Når den igen når jorden, reflekteres den herfra og sendes atter op mod ionosfæren, hvorfra den igen reflekteres tilbage til jorden. Dette gentager sig flere gange, hvis distancen er meget lang, f. eks. skal der 5-7 hop til for at nå herfra til Australien. Afhængig af lokaltiden ved de forskellige refleksionspunkter i ionosfæren kan refleksionerne ske i forskellige højder, og dermed kan hoppene være af forskellige længder.

Har vi eksempelvis en afstand på 6000 km mellem to stationer, og regner vi med, at det er dag på strækningen mellem dem, så vil udbredelsen sandsynligvis ske ved to hop med refleksion i F2-laget to steder og med refleksion fra jorden eller havet i et punkt midt imellem stationerne. Regner vi med den nedre værdi, 300 km, for F2-lagets højde, ser vi af fig. 2, at for en hopdistance på 3000 km skal udstrålingsvinklen være ca. 4 grader. Men udbredelsen kunne også ske ved 3 hop á 2000 km. I så fald aflæses på fig. 2 en udstrålingsvinkel på ca. 12 grader. Normalt vil radiobølgen dog dæmpes mere, jo flere hop den tager, dels fordi den for hvert hop skal passere to gange gennem det stærkt dæmpende D-lag (kun om dagen) i omkring 80 km højde, dels fordi

den dæmpes, hver gang den reflekteres fra jorden, dog kun lidt ved refleksion fra havet. Så normalt vil det være udbredelsen med det færreste antal hop, man vil høre, og det vil svare til en lav udstrålingsvinkel, men under særlige forhold kan udbredelsen ske med flere hop end det minimale antal, og det vil betyde, at udstrålingsvinklen bliver større, end man normalt regner med ved DX.

### 3. MUF-faktor

Det er ikke altid, at en radiobølge bliver reflekteret af ionosfæren, i nogle tilfælde går den igennem ionosfærelagene og havner ude i verdensrummet, hvor vi ikke får fornøjelse af den, undtagen i forbindelse med satellit- eller månerefleksionsforbindelser. Jo kraftigere et ionosfærelag er, målt i antal elektroner pr. kubikcentimeter, jo højere en frekvens kan det reflektere. Og jo mere skråt radiobølgen falder ind på ionosfærelaget, altså jo større den på fig. 1 definerede indfaldsvinkel i er, jo højere en frekvens bliver reflekteret.

Hvis radiobølgen sendes lodret op (som det sker på ionosfærestationerne), så kan man finde den maximale frekvens,  $f_{krit}$ , der kan reflekteres for  $i = 0$ . Ved alle normale radioforbindelser er vinklen i større end 0, og det viser sig, at den maximale frekvens, der så kan reflekteres, er  $f_{krit}/(\cos i)$ . Derfor kaldes størrelsen  $1/(\cos i)$  for MUF-faktoren. MUF betyder Maximum Usable Frequency. Den optimale frekvens regnes for at være 15 % lavere. I fig. 3 er vist kurver for MUF-faktoren som funktion af udstrålingsvinklen  $u$  for de forskellige ionosfærelag.

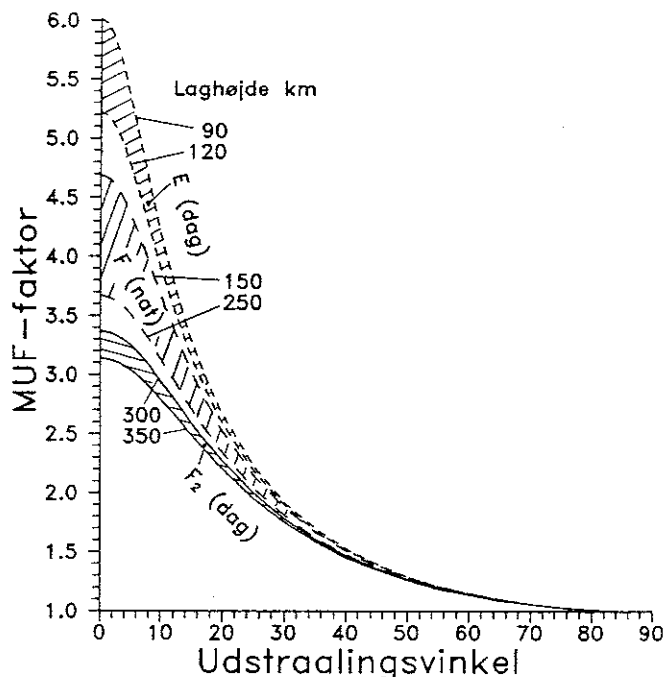


Fig. 3. MUF-faktor som funktion af udstrålingsvinkel for de forskellige ionosfærelag. For hvert lag er vist en kurve for den minimale og maximale højde, laget kan antage. MUF = Maximum Usable Frequency.

Lad os betragte et eksempel. Vi tænker os, at den kritiske frekvens for et eller andet af lagene er 5,0 MHz. Sender vi et 7 MHz signal lodret eller omtrent lodret op, vil det altså løbe igennem laget. For at det få det reflekteret, skal MUF-faktoren være mindst  $7/5 = 1,4$ . Går vi nu ind på fig. 3 med MUF-faktor 1,4, ser vi, at der dertil svarer en udstrålingsvinkel på ca. 43 grader, næsten uafhængigt af, fra hvilket lag refleksionen sker. Hvis MUF-faktoren derimod var betydeligt større, f.eks. 3, så ville udstrålingsvinklerne blive meget forskellige for E-, F- og F2-laget. Nu kan vi gå ind med de 43 grader i fig. 2 og se, at hvis refleksionen sker i E-laget i 90 km højde, så bliver hopdistancen ca. 180 km. Det vil sige, at hvis de to stationer er nærmere hinanden end de 180 km, så kan de ikke høre hinanden, undtagen hvis de er så tæt på hinanden, at jordbølgen kan række (op til 30-50 km afstand). Hvis afstanden derimod er større end 180 km, hører de hinanden udmærket, indtil en vis, betydeligt større afstand. De 180 km i dette tilfælde er det, der kaldes skip distance. For F-laget i 200 km højde aflæser vi på fig. 2 en skip distance på ca. 400 km for de 43 grader, og for F2-laget i 350 km højde bliver skip distance ca. 700 km; her skal stationerne altså være mindst 700 km fra hinanden for at få QSO.

#### 4. Refleksionsafstand

Den vertikale vinkel  $u$ , hvorunder en antenne udstråler bedst (eller forsåvidt dårligst), er bestemt både af selve antennens konstruktion, af dens højde over omgivelserne og af de nære omgivelseres evne til at reflektere radiobølgerne.

Har vi en dipol i det frie rum, er det klart, at den stråler lige godt i alle retninger i et plan vinkelret på midten af den. Har vi derimod en yagi-antenne i det frie rum, så vil strålingen koncentreres i den ene af bommens to retninger, som vi vil kalde fremad-retningen. Det sker fordi strålingen i det plan, hvori antennen befinder sig, koncentrerer sig fremad, så at strålen bliver smallere end for en dipol, der iverdigt også ville stråle lige så godt i den modsatte retning. Men det sker også, fordi strålingen i planet vinkelret på midten af yagi-antennens elementer ligeledes koncentrerer sig i fremad-retningen.

Når antennen nu ikke mere er i det frie rum, men befinder sig i en vis højde over jorden, så stråler den ikke nødvendigvis bedst lige netop i vandret retning. Nu bliver strålingen nemlig bestemt dels af en direkte bølge, der går fra antennen og op til refleksionspunktet i ionosfæren, dels af en bølge, der reflekteres fra jorden (eller havet) og derefter går parallelt med den direkte bølge op til refleksionspunktet, se fig. 4. Denne jordrefleksion sker inden for en afstand af omkring 1 km, derfor behøver vi ikke her at regne med, at jorden er rund, men kan betragte den som flad. Hvis nu de to bølger ankommer til refleksionspunktet i ionosfæren i fase med hinanden, så vil de

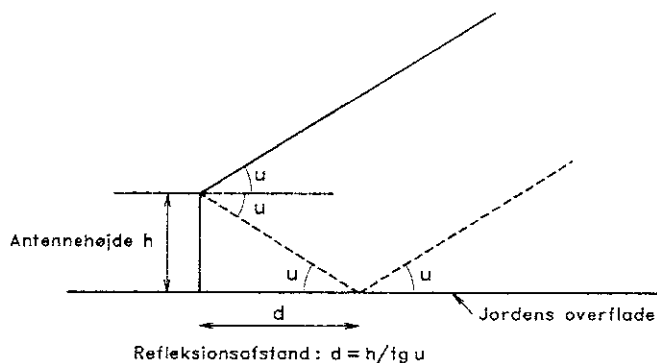


Fig. 4. Refleksionsafstand. Da refleksionen sker inden for ca. 1 km, kan jorden regnes for flad.

forstærke hinanden, men hvis de ankommer i modfase, vil de modvirke hinanden, så at den resulterende bølge bliver svagere, end hvis vi kun havde haft den direkte bølge. Faseforskellen afhænger dels af vejlængdeforskellen mellem den reflekterede bølge (vist punkteret i fig. 4) og den direkte bølge (fuldt optrukket), dels af den faseforskydning, der fås ved refleksionen fra jorden eller fra havet. Denne faseforskydning er yderst kompliceret, idet den foruden af vinklen  $u$  afhænger af, om bølgen er vandret eller lodret polariseret og af, om refleksionen sker i havet eller i jord af forskellig beskaffenhed. Disse komplicerede forhold er detaljeret omtalt i ref. [2], hvorfor interesserede henvises hertil; i nærværende artikel betragter vi forholdene mere kvalitativt.

I fig. 5 er vist det vertikale udstrålingsdiagram for en dipol ophængt i en højde af 1 bølgelængde over en perfekt ledende jord. En sådan jord har man ikke i virkelighedens verden; skulle man lave den, skulle man lægge en plan kobberplade fra antennen og ud i en afstand af omkring 1 km, men havvand er omtrent lige så godt. Ved perfekt ledende jord reflekteres bølgen helt uden tab, så den reflekterede bølge er nøjagtig lige så kraftig som den direkte. I vandret retning vil de to bølger i dette tilfælde imidlertid ligge nøjagtigt i modfase, så de vil helt ophæve hinanden, og vi får som vist på figuren slet ingen stråling ud i vinkel 0 grader. Ved en udstrålingsvinkel på ca. 14 grader fås det modsatte tilfælde. Her er for

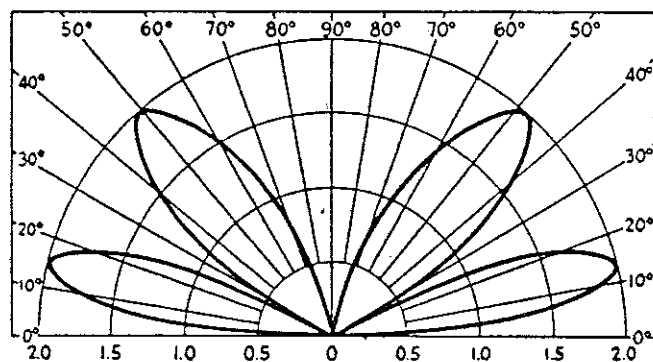


Fig. 5. Vertikalt udstrålingsdiagram for vandret dipol i 1 bølgelængdes højde over jorden. Jorden regnes at være perfekt ledende.

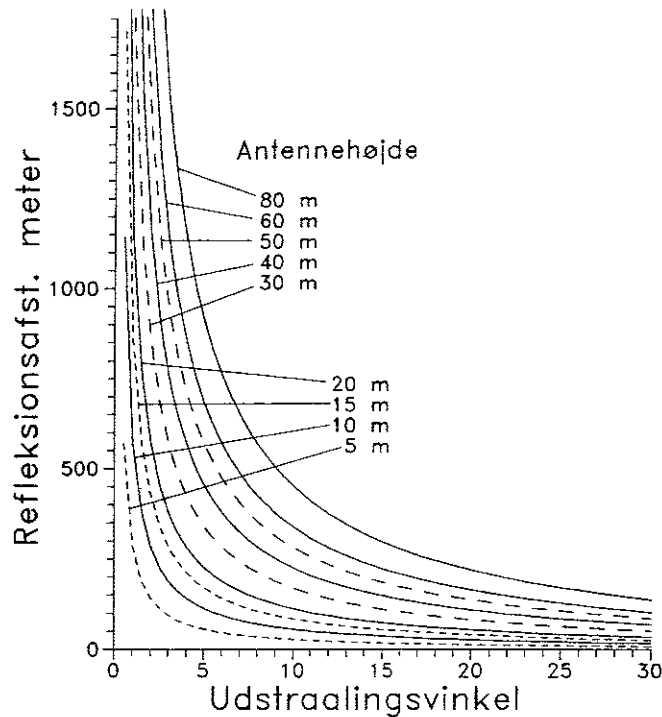


Fig. 6. Refleksionsafstand som funktion af udstrålingsvinkel for forskellige antennehøjder.

skellen i vejlængde mellem den reflekterede og direkte bølge sådan, at den totale faseforskel netop bliver 360 grader, hvilket er det samme som 0 graders faseforskel; de to signaler er altså netop i fase og adderes således, at det resulterende signal bliver dobbelt (6 dB) så stort, som hvis vi kun havde haft det direkte signal. Disse 6 dB er det absolut maximale, man kan opnå takket være refleksion, i praksis nærmer man sig dette tal ved refleksion fra havet. Ved udstrålingsvinkel ca. 27 grader er de to bølger igen i modfase og udslukker hinanden, medens de ved ca. 48 grader atter er i fase og giver et kraftigt resulterende signal. Hvor de forskellige minima og maxima, målt i grader, ligger, afhænger af antennens højde over jorden.

Det forstås heraf, at det kan være af interesse at vide, hvor langt fra ens antenne refleksionen i jorden eller havet finder sted. Viser det sig, at man bor så tæt på havet, at man i visse retninger kan opnå refleksion fra havet, kan det være en fordel at benytte en lodret antenne fremfor en vandret, som det nærmere fremgår af ref. [2]. I fig. 6 har vi ud fra geometrien i fig. 4 beregnet afstanden fra antennen til refleksionspunktet som funktion af udstrålingsvinklen  $u$  for en række forskellige antennehøjder. Bor man på fladt land, er det naturligvis selve antennens højde, man skal regne med, men bor man - evt. på en bakketop - tæt ved havet og med direkte sigt fra antennen til havet, er det antennens højde over havet, der tæller. Vi ser, at ved lave udstrålingsvinkler, velegnede til DX, og med antennehøjder på 15 meter eller mere,

bliver refleksionsafstanden nogle hundrede meter. Er man så heldig at bo på en bakketop med udsigt over havet, kan man godt få gavn af havet, selv om afstanden dertil er 1/2 til 1 km.

## 5. Afslutning

Formålet med denne artikel har været dels at give læseren en kvalitativ forståelse for samspillet mellem antennen og radiobølgers udbredelse via ionosfæren, dels at forsyne den læser, der er seriøst interesseret i disse forhold, med nogle værktøjer i form af kurveblade, som kan være en hjælp ved en nærmere bedømmelse i det konkrete tilfælde.

Beregningerne forudsætter retlinet strålegang og tager således ikke hensyn til den svage afbøjning, der kan forekomme, når radiobølgen passerer gennem den nedre atmosfære, eller til diffraktion. Dette er et fænomen, der bevirker, at selvom man forsøger at afskære radiobølger eller lys ved at opsætte en skærm af et uigennemtrængeligt materiale med en skarp kant, så vil der på skyggesiden af skærmen alligevel forekomme svage radiobølger eller svagt lys.

## Referencer

- [1] Arne R. Pedersen, OZ7MA: P. O. Pedersen og radiobølgerne. OZ Juli 1992, pp. 373-376.
- [2] Arne R. Pedersen, OZ7MA: Vertikal kontra horisontal polarisation. OZ Juli 1994, pp. 369-373.

**OZ**