

Lidt om bølgeledere

Af OZ7J Jørgen Kragh, Forelvej 25, 3450 Allerød

1. Indledning

Ved meget høje frekvenser er det ikke hensigtsmæssigt at anvende almindelige transmissionslinjer, som vi kender dem i form af coaxialkabler. Det skyldes blandt andet, at ved meget høje frekvenser bliver kablernes dimensioner af samme størrelsesorden som bølgelængden, og det betyder, at der kan forekomme resonansfænomener inde i kablerne, således at det radiosignal, der sendes ind i kablet, ikke kan udbrede sig gennem kablet eller, hvis det udbreder sig, da kun udbreder sig med stort tab.

Det er derfor nødvendigt enten at anvende meget tyndt kabel eller at anvende en anden form for transmissionslinje. Tynde kabler kan godt anvendes, men der er dels en grænse for hvor tynde kabler, man kan fremstille, dels bliver kablernes evne til at overføre effekt mindre. Det betyder, at et meget tyndt coaxialkabel godt kan bruges sammen med en modtager, men samme kabel vil brænde sammen, hvis det anvendes i forbindelse med en sender.

Den anden form for transmissionslinje, der kan komme på tale, er bølgelederen, som vi skal se lidt på i denne artikel.

2. Lidt opfriskning fra VTS

Inden vi går i gang med at se på bølgelederen, skal vi genopfriske lidt teori fra VTS.

Vi har den kendte sammenhæng mellem bølgelængden μ , frekvensen f og lysets hastighed c :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

c er i vakuum 300.000 km/sek.

Hvis nu radiosignalet udbreder sig i et andet medium end vakuum, og her regner vi atmosfærisk luft for værende vakuum i radiomæssig forstand, har vi følgende sammenhæng mellem bølgelængden i vakuum λ og bølgelængden i det andet medium λ_e :

$$\lambda_e = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

Hvor ϵ_r er udbredelsesmediets relative dielektricitetskonstant, som for vakuum er 1. For stort set alle stoffer er ϵ_r større end 1.

Vi ser altså, at hvis et radiosignal udbreder sig i et coaxialkabel fyldt med et isolationsmateriale, eksempelvis polyethylen, så vil bølgelængden i kablet være mindre end i luften. Fænomenet er velkendt fra radioamatørers fremstilling af kvartbølge sugeskredse til fjernelse af eksempelvis TVI.

3. Bølgelederen

Bølgelederen er en special form for transmissionslinje, idet energitransporten, d.v.s. overførslen af radiosignalet, ikke foregår mellem to ledere som i almindelige kabler som coaxialkabler og twin-lead kabler, men derimod foregår i et hult rør. Alene navnet antyder, at energitransporten ikke er som i et kabel, men leder hen i retning af noget med bølgeudbredelse, altså i retning af antenner.

Bølgelederen er et hult metalrør, fremstillet af et godt ledende materiale som kobber eller messing eller, hvis det skal være let, aluminium. Som oftest er indersiden af dette rør tillige forsløvet, idet sølv jo som bekendt leder bedre end de andre nævnte metaller.

Bølgelederen kan have mange forskellige tværsnit. De mest almindelige er rektangulært, cirkulært eller elliptisk tværsnit, men der findes mange andre tværsnit afhængig af hvilket formål bølgelederen skal anvendes til. I fig. 1 har vi vist tværsnittet for nogle hyppigt anvendte bølgeledertyper. Fælles for alle disse tværsnit er, at der er nogle ganske bestemte sammenhænge mellem bølgelederens dimensioner og bølgelængden på det signal, som skal transporteres gennem den.

Hvilket tværsnit vi som radioamatører skal vælge hænger normalt sammen med hvilket tværsnit, vi kan skaffe som surplus eller lignende. Rektangulære bølgeledere anvendes meget i eksempelvis

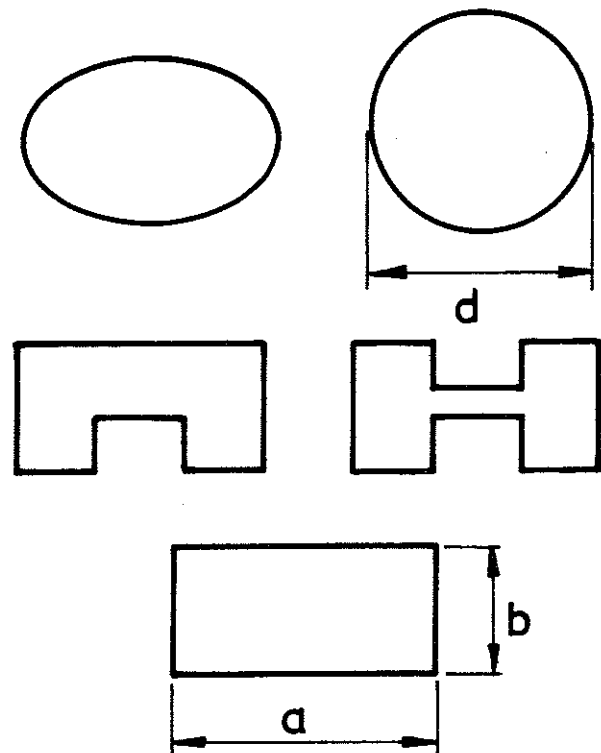


Fig. 1. Eksempler på bølgeledertværsnit.

radaranlæg, både stationære og eksempelvis flybårne, og kan derfor normalt skaffes forholdsvis let og til overkommelige priser. I denne artikel vil vi kun beskæftige os med de to simpleste tværsnit: Det rektangulære og det cirkulære. De beregninger, vi vil lave, kan naturligvis også gennemføres for de andre tværsnit, men de vil være lidt mere komplicerede. Et særtilfælde af den rektangulære bølgeleder er den kvadratiske bølgeleder, men for radioamatører er denne imidlertid i almindelighed også uinteressant.

4. Bølgetyper

Da energitransporten foregår ved at radiosignalet udbreder sig som elektromagnetiske bølger inde i bølgelederen, skal vi først se lidt på et begreb, som kaldes bølgetyper.

Det elektromagnetiske felt inde i bølgelederen kan eksistere på mange forskellige måder, afhængig af forholdet mellem bølgelederens dimensioner og bølgelængden på det signal, som skal transporteres. Der er generelt to forskellige bølgetyper, og disse kan så yderligere opdeles. De to bølgetyper kaldes hhv. tværelektriske (TE) eller tværmagnetiske (TM). Navnene relaterer sig til hhv. det elektriske og det magnetiske felts orientering i forhold til bølgelederens dimensioner. De enkelte bølgetyper betegnes dels ved enten TM eller TE og et tocifret tal, eksempelvis TE_{11} eller TM_{10} . De forskellige numre relaterer sig til bølgetypens orden og fortæller hvordan hhv. det elektriske og det magnetiske felt fordeles sig inde i bølgelederen. Jo højere orden, jo mere kompliceret er feltfordelingen inde i bølgelederen, og jo mere besværligt er det at regne på. Da radioamatører i almindelighed ikke bryder sig om at regne alt for meget, vil vi kun kort berøre højere ordens bølgetyperne og koncentrere os om de simpleste. Bølgetyperne har betydning for det frekvensområde, hvori bølgelederen kan anvendes.

5. Den rektangulære bølgeleder

Den simpleste bølgetype, der kan eksistere i en rektangulær bølgeleder, er TE_{10} typen, og i fig. 2 har vi

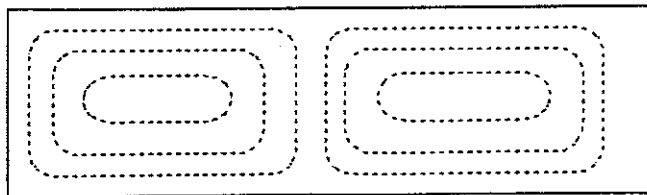
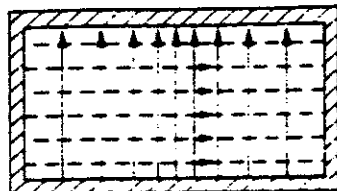


Fig. 2. Feltfordelingen i den rektangulære bølgeleder ved TE_{10} bølgetypen



tegnet, hvorledes det elektriske og det magnetiske felt ser ud inde i bølgelederen. Vi ser, at det elektriske felt står mellem de to sider af bølgelederen, som er tættest på hinanden, og vi ser tillige, at det magnetiske felt danner lukkede områder på langs i bølgelederen.

Bølgelederen er et højpasfilter forstået på den måde, at kun frekvenser, hvis bølgelængde er under en vis længde, effektivt kan udbrede sig i bølgelederen. Denne maximale bølgelængde kaldes bølgelederens cut-off bølgelængde. Frekvenser med en bølgelængde længere end cut-off bølgelængden kan godt udbrede sig i bølgelederen, men med meget stort tab.

Kalder vi nu, som i fig. 1 bølgelederens bredde for a og dens højde for b , har vi følgende simple sammenhænge mellem dimensionerne og cut-off bølgelængden λ_c :

$$\lambda_c = 2 \cdot a \quad (3)$$

Med andre ord, så skal bølgelederen være mindst en halv bølgelængde bred, førend signalet kan udbrede sig. Vi ser heraf, at der er visse praktiske forhold, som bestemmer ved hvor lav en frekvens, det vil være muligt at anvende bølgeledere. Bølgeledere har været anvendt ned til ca. 500 MHz, hvad der har krævet, at bølgelederen har været mindst 30 cm bred. Med fremkomsten af bedre kabeltyper med mindre tab er bølgelederens nederste frekvens blevet tvunget opad, og bølgeledere anvendes næppe mere i nykonstruktioner ved frekvenser under ca. 3 GHz, medmindre det drejer sig om helt specielle anvendelser, hvortil der ikke kan anvendes coaxialkabler, eksempelvis store luftkontrolradarer eller andre højeffekts sendeanlæg.

Inde i bølgelederen vil bølgelængden altid være længere end bølgelængden i fri luft (vakuum), modsat hvad vi kender fra coaxialkabler, hvor bølgelængden som regel på grund af dielektrikummet er mindre end bølgelængden i fri luft. Antager vi nu, at vi er over cut-off frekvensen, d.v.s. at bølgelængden er mindre end λ_c , har vi ved TE_{10} bølgetype følgende udtryk for bølgelængden λ_g inde i bølgelederen:

$$\lambda_{g, TE_{10}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}}$$

λ er bølgelængden i fri luft, som vi får fra (1).

Vi ser altså, at ved bølgeledere tales der mest om bølgelængder og ikke så meget om frekvenser, men frekvens og bølgelængde er jo to sider af samme sag, så det skulle ikke volde vanskeligheder. Samtidig ser vi, at bølgelederens højde slet ikke indgår i udtrykkene for hverken cut-off bølgelængden eller bølgelængden for TE_{10} bølgetype.

Det kan vises, at TE_{10} bølgetypen udover at være den simpleste også er den bølgetype med den laveste

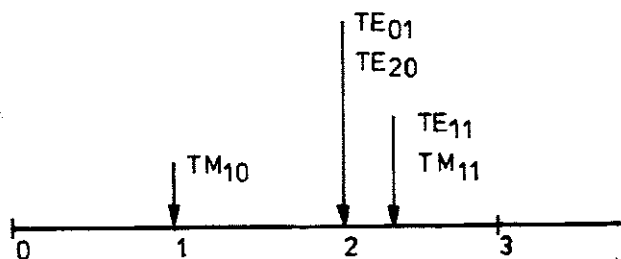


Fig. 3. Relativ afskæringsbølglængde for de 5 laveste bølgetyper.

afskæringsfrekvens. Alle andre bølgetyper har højere afskæringsfrekvens.

I en rektangulær bølgeleder, hvor højden er det halve af bredden ($b/a = 1/2$), er de to næste bølgetyper der kan eksistere, TE_{01} og TE_{20} , som begge har den samme cut-off frekvens, nemlig den dobbelte af TE_{10} bølgen. I fig. 3 har vi tegnet de relative indbyrdes cut-off bølglængder for de 5 laveste bølgetyper i en bølgeleder med $b/a = 1/2$. For bølgetyper med et andet side/bredde forhold er forholdene mellem de højere ordens bølgetyper ikke helt så simple. Her indgår højden af bølgelederen tillige.

Vi ser heraf, at en rektangulær bølgeleder med et side/bredde forhold på 0,5 kan anvendes i TE_{10} mode over en hel oktav. I praksis er frekvensområdet noget indskrænket, idet der allerede i nærheden af de to frekvenser begynder dels at komme større tab (nedre cut-off frekvens), men også begyndende særheder i TE_{10} bølgen (øvre cut-off frekvens). Rektangulære bølgeledere anvendes derfor typisk fra en frekvens ca. 25 % over den nedre cut-off frekvens og op til en frekvens ca. 10 % under cut off frekvensen for TE_{01} hhv. TE_{20} bølgetyperne.

6. Den cirkulære bølgeleder

I den cirkulære bølgeleder har vi kun en parameter, nemlig bølgelederens diameter, som vi i fig. 1 har kaldt d , men det bliver ikke simplere af den grund.

For den cirkulære bølgeleder har vi et udtryk for cut-off bølglængden, som er analogt med (3):

$$\lambda_c = 1,71 \cdot d \quad (5)$$

Den laveste ordens bølgetype i en cirkulær bølgeleder er TE_{11} typen, og ganske analogt med (4) har vil følgende udtryk for bølglængden:

$$\lambda_{g, TE_{10}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (6)$$

I fig. 4 har vi tegnet feltfordelingen for TE_{11} bølgen. Den næste højere ordens bølgetype er TM_{01} typen, som har en cut off bølglængde givet ved:

$$\lambda_{c, TM_{01}} = 1,31 \cdot d \quad (7)$$

Vi ser heraf, at det område, hvori en cirkulær bølgeleder kan anvendes med sin simpleste bølgetype, er noget indskrænket i forhold til den rektangulære bølgeleder.

Fuldstændigt analogt med den rektangulære bølgeleder kan der nu udarbejdes udtryk for de højere ordens bølgetyper, men igen er det ikke særligt relevant for radioamatører.

7. Ind- og udkobling af signaler

Bølgeledere anvendes normalt som transmissionslinje mellem et radioanlæg og den tilhørende antenne. I terminalenden indkobles signalet fra senderen (eller signalet til modtageren) gerne via en bølgeleder til coaxialkabel overgang, der som vist i fig. 5 og er meget simpel. Inde i bølgelederne er der i afstanden en kvart bølglængde (λ_g) fra endevæggen anbragt en monopol, som uden for bølgelederen fortsætter i coaxialkablets inderleder.

Monopolens længde og tykkelse er afgørende for, om der er impedanstilpasning mellem coaxialkablet og bølgelederens impedans.

Hvis der ønskes en bredbåndet indkobling, eksempelvis i forbindelse med radiokæder eller lig

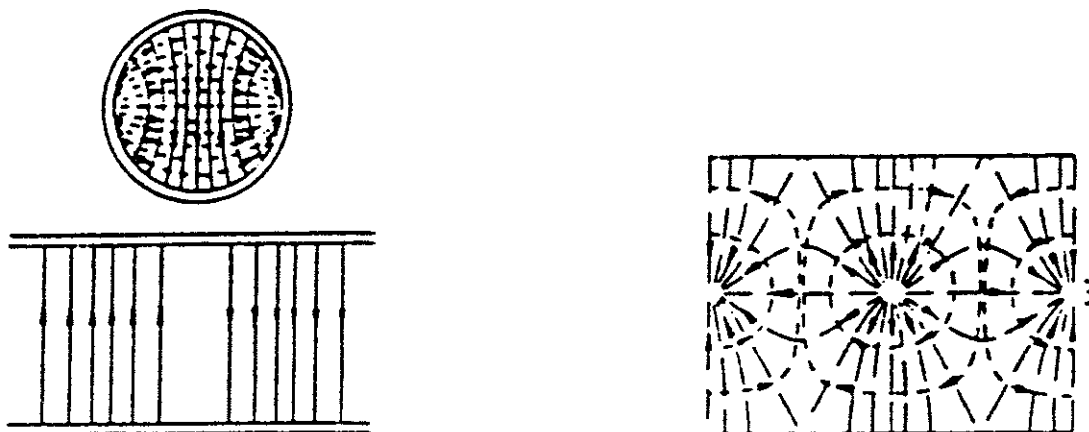


Fig. 4. Feltfordelingen i den cirkulære bølgeleder ved TE_{11} bølgetypen.

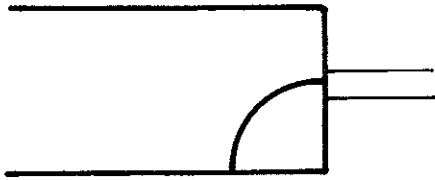


Fig. 5. Ind- og udkobling af coaxialkabel i bølgeleder

nende, anbringes der i toppen af monopolen en lille kugle.

Vi kan også anvende indkoblingen som vist i fig. 6. Her kobles signalet ind gennem bølgelederens endevæg med en koblingssløjfe.

For både fig. 5 og 6 gælder naturligvis, at hvis vi er i TE₁₀ bølge typens frekvensområde, vil der ikke blive anslået andre bølge typer.

I den anden ende af bølgelederen anbringes enten en tilsvarende udkobling til kabel, eller der anbringes

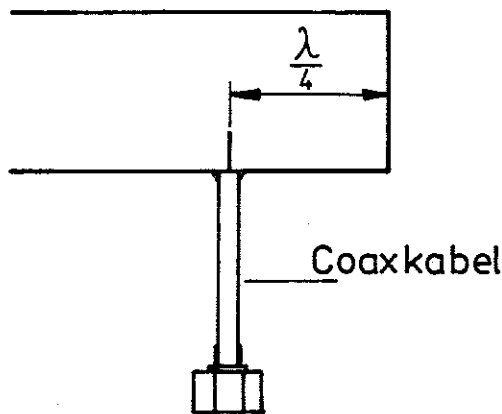


Fig. 6. Induktiv indkobling.

en form for antenne, enten i form af en hornantenne eller en reflektor. Begge dele kan anvendes som fødeantenne til en parabolantenne. Bølgelederen kan også, hvis man ikke har brug for så meget forstærkning, direkte anvendes som antenne. I dette tilfælde vil den åbne bølgeleder virke som antenne med en direktivitet omkring 6 dBi. Fælles for disse afslutningsmetoder er, at bølgelederen 'ser' ud i det omgivende rum, og at det udstrålede signal vil have samme polarisation som bølgen inde i bølgelederen.

I en rektangulær bølgeleder, som drives med TE₁₀ mode står det elektriske felt mellem de to bredeste sider. For at en sådan bølgeleder ved sin åbne ende kan udstråle et vandret polariseret felt, sådan som det normalt anvendes af radioamatører, skal bølgelederen derfor stå på højkant.

For den cirkulære bølgeleder er forholdene lidt anderledes. Det er meget svært at bevare polarisationen i den cirkulære bølgeleder, idet selv en ganske lille uregelmæssighed enten i rundingen af bølgelederen eller ved en samling vil bewirke, at feltet begynder at dreje og dermed ændre polarisation. Selv om bølgelederen er orienteret således, at feltet, der hvor signalet kobles ind er vandret polariseret, kan det godt, hvor det forlader bølgelederen, have en helt anden polarisation.

Her kan man imidlertid benytte den teknik, jeg har beskrevet i en tidligere artikel, nemlig at selve coaxial til bølgeleder overgangen kan drejes i forhold til bølgelederen. Herved kan man ved at dreje til maksimalt signal kompensere for den polarisationsdrejning, der sker gennem den cirkulære og ikke helt ideelle bølgeleder.

OZ

Udvidet teknisk prøve for radioamatører

Maj 1996

1. Tegn et blokdiagram (»kassediagram«) med angivelse og navngivelse af de enkelte trin, incl. frekvensmultiplikatortrin, i en FM sender for VHF amatørbandet.
Angiv herudfra en passende frekvens for sendersens oscillator.
Forklar kort hvilken klasse et frekvensmultiplikatortrin arbejder i og grundprincippet i dets virkemåde.
2. Tegn principdiagram (kredsløbsdiagram med de vigtigste elektroniske komponenter vist) af
 - a) de to sidste MF-trin.
 - b) LF-detektortrin.
 - c) kredsløb til frembringning af en spænding for automatisk forstærkningsregulering i en enkeltsidebåndsmodtager.
3. Tegn principdiagram af dels en oscillator hvis frekvens kan varieres (VFO), dels en krystalstyret oscillator.
Forklar kort - gerne i stikordsform - hvad man kan gøre med hensyn til selve den frekvensbestemmende kreds i VFO'en for at opnå god frekvensstabilitet (det forudsættes, at ydre foranstaltninger som anvendelse af buffertrin og stabiliseret spændingsforsyning er truffet).
4. Tegn principdiagram af et VHF FM senderudgangstrin med udgangsfiler for dæmpning af harmoniske og tilpasning til et 50 ohms antennekabel.
Forklar kort hvad man forstår ved forstærkertrinet virkningsgrad.
Idet udgangstrinet regnes lineært, beregn da hvor