

Antennes alimentées en bout

Eindgevoede antennes

par/door Bob ON9CVD

Traduit par ON4KCY

La raison pour laquelle je me suis intéressé aux antennes alimentées en bout est, entre autres, parce que j'envisage de monter une antenne pour les bandes basses avec un cerf-volant. Une bonne antenne pour ce faire est justement une antenne alimentée en bout.

Introduction

Les antennes alimentées en bout sont presque aussi vieilles que la technique radio elle-même et apparaissent déjà dans la littérature des années 20 du siècle dernier. Une ancienne forme de celle-ci est l'antenne "Zepp" qui tient son nom du fait qu'elle peut être utilisée comme antenne "traînante" par exemple pour une utilisation à partir d'un ballon ou d'un aéronef (Zeppelin).

Dans de telles circonstances, on doit fixer un seul point (un dipôle en exige deux) et il manque une terre comme "contre capacité" pour accorder l'antenne.

Aussi, pour accorder une antenne alimentée en bout, il faut utiliser juste la longueur de fil voulue afin de charger de manière optimale l'étage de sortie de l'émetteur. Du temps du Zeppelin, et des ballons, les émetteurs utilisaient encore des tubes et un couplage direct avec cette antenne se déréglait facilement.

Actuellement, le principe d'antenne alimentée en bout est également appliqué dans les antennes-J que nous rencontrons surtout pour les bandes 2 m et 70 cm.

La construction

L'antenne Zepp et l'antenne J appartiennent, comme d'autres constructions aussi connues comme la G5RV, au groupe des systèmes d'antennes. Ici, la dénomination est donnée à tout le système composé de l'antenne et de l'alimentation. Cette dernière permettant une transition souple entre l'antenne (représentant souvent pas mal d'Ohms) et l'étage final de l'émetteur (souvent avec une basse impédance).

Le système complet d'une antenne alimentée en bout est toujours composé de deux ou trois parties, voir **figure 1**.

Tout d'abord, l'antenne est constituée d'une partie rayonnante qui est le plus souvent égale à une demi longueur d'onde. Cette demi longueur

De reden dat ik geïnteresseerd raakte in eindgevoede antennes is o.a. te vinden in plannen om een antenne voor de lage amateurbanden omhoog te trekken met een vlieger. Een goede antenne voor dit doel is nu juist een eindgevoed antennesysteem.

Inleiding

Eindgevoede antennes zijn bijna zo oud als de radiotechniek zelf en komen al van in het begin van de twintiger jaren van de vorige eeuw in de literatuur voor. Een vroege vorm hiervan is de zogenaamde 'Zepp-antenne', die haar naam dankt aan het feit dat zij gemakkelijk toegepast kan worden als 'sleeptenne', bijvoorbeeld bij gebruik van een zendontvangstinstallatie in een ballon of luchtschip (zeppelin). In zulke omstandigheden is er maar één punt om de antenne te bevestigen (een dipool vraagt minimaal twee punten) en ontbreekt een aardvlak als 'tegen capaciteit' om de antenne 'tegen af te zetten'. Zo'n eindgevoede draad is ook gemakkelijk in afstemming te brengen door juist zoveel draad te vieren tot de zender eindtrap optimaal belast is. Ten tijde van de zeppelin- en ballontransceivers werden deze nog met buizen uitgevoerd en directe aankoppeling van deze antenne in de 'tankkring' van zo'n buizeneindtrap verliep dan ook gemakkelijk.

Eindgevoede antennes worden tegenwoordig ook toegepast in de vorm van de zgn. 'J-antenne' die we vooral aantreffen als uitvoering voor de 2 m en 70 cm amateurbanden.

De opbouw

De Zepp- en J-antenne behoren, samen met andere bekend geworden constructies zoals de 'G5RV', tot de groep van 'antennesystemen'. Hierbij wordt de benaming gegeven aan de hele samenstelling van antenne plus voedingsleiding, waarbij de laatste zorgt voor een soepele overgang van de (meestal hoogohmige) antenne naar de (meestal laagohmige) zender eindtrap.

Het totale systeem van deze typen eindgevoede antennes bestaat steeds uit twee of drie onderdelen, zie **figuur 1**.

Allereerst bestaat de antenne uit een stralend gedeelte dat meestal een halve golflengte lang is. De halve golflengte is geen 'harde' eis, maar wel

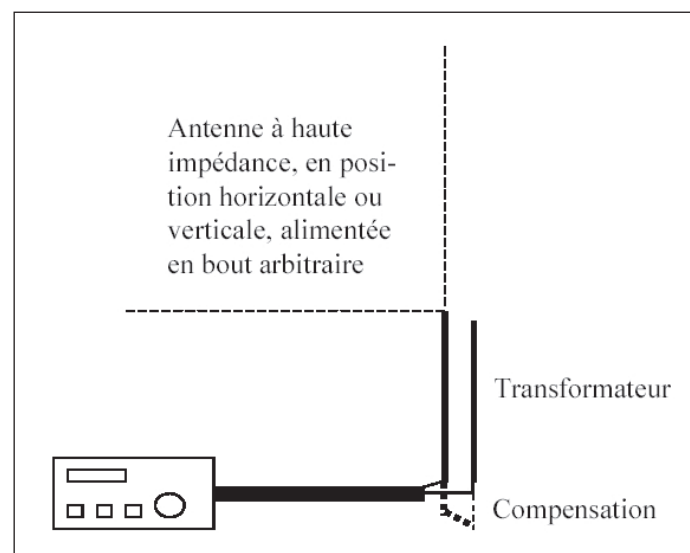


Fig.1 Composition du système d'antenne

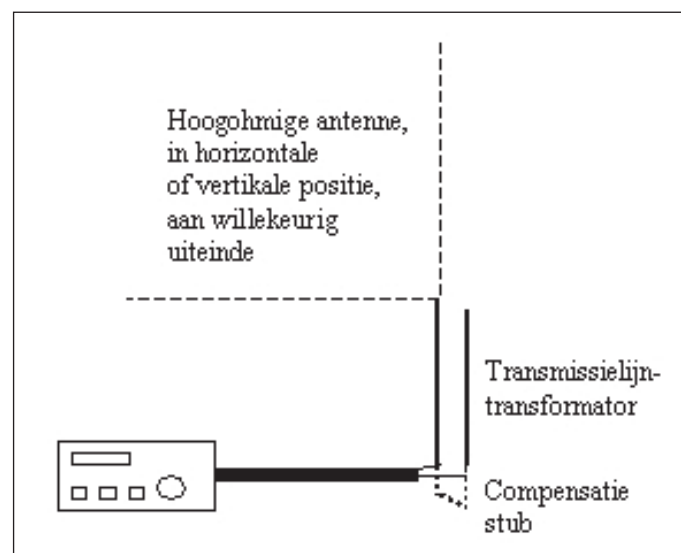


Fig.1 De antenneopbouw

d'onde n'est pas une valeur impérative, mais comme la partie rayonnante est alimentée en bout, elle présente une haute impédance. Donc tous les multiples d'une demi-onde sont acceptables. Par cette partie rayonnante, l'antenne est dans son ensemble déterminée comme étant un transformateur du champ électromagnétique en un signal électrique. Comment se comporte un brin rayonnant en demi-onde est suffisamment connu (voir par exemple le dipôle), et sinon, les nombreux programmes de calcul d'antenne fournissent bien une réponse. Pour la polarisation, elle est déterminée par le fait que l'antenne soit disposée horizontalement (comme zeppelin) ou verticalement comme l'antenne J. Comme le reste du système ne participe pas au rayonnement, il ne joue donc aucun rôle dans les propriétés d'émission ou de réception.

La deuxième partie du système est composée d'une adaptation qui transforme l'impédance élevée de l'antenne en une valeur proche de celle de l'émetteur, par exemple 50Ω . Cette adaptation est réalisée par un morceau de ligne de transmission qui est égale ou (généralement) plus petite qu'un quart d'onde. Pour cette ligne de transmission, aucune propriété n'est imposée si ce n'est que son impédance caractéristique doit être plus élevée que la valeur vers laquelle elle doit être transformée et plus élevée que l'impédance de l'autre côté (antenne demi-onde).

Il semble que cette ligne de transmission servant de "transformateur" est suffisamment souple pour permettre une adaptation d'impédance sur un grand domaine. Il semble aussi que nous trouvons toujours, en parallèle à la valeur voulue (choisie) par ex. 50Ω , une capacité dont la valeur dépend des paramètres du système choisi. Avec une simple ligne de transmission, nous ne pouvons donc jamais réaliser une adaptation de la valeur élevée de l'antenne demi-onde vers la valeur basse acceptée par le transceiver. Il y aura toujours une capacité en parallèle qui empêchera de trouver un TOS parfait au point alimentation. Des valeurs entre 1,5:1 et 2,5:1 sont acceptables. D'autre part, nous pouvons facilement corriger cette réactance induite avec un tuner d'antenne.

Si un tel tuner d'antenne est quand même raccordé, nous pouvons facilement appliquer le système de demi-onde plus ligne de transmission pour toutes les bandes amateur qui sont des harmoniques (impaires) par rapport à la fréquence de base pour laquelle l'ensemble a été développé. Sur chaque multiple de la fréquence, on trouve de nouveau une haute impédance sur l'extrémité de l'antenne qui, pour les multiples impairs, peut être diminuée par un morceau de ligne de transmission et ensuite, on peut ramener cette impédance à 50Ω avec le tuner. Nous disposons comme ça d'une bonne antenne multi bandes qui ne présentera un TOS faible que sur la fréquence la plus basse pour laquelle l'antenne a été développée. Comme le "transformateur" est en général composé d'un morceau de longueur réduite ($1/4$ de longueur d'onde) de ligne de transmission symétrique, les pertes ne jouent à peine un rôle même pour un TOS élevé.

Comme troisième élément, on trouve une ligne de transmission, ayant souvent la même impédance caractéristique que la ligne précédente qui est court-circuitée à la fin. Ce court morceau de ligne se comporte comme une induction avec laquelle on pourra compenser la capacité rencontrée lors de la transformation précédente de sorte qu'une adaptation correcte (1:1) du TOS est possible. Nous rencontrons surtout cette courte ligne court-circuitée dans les antennes-J.

Il semble, dans la conception pratique d'une antenne, la longueur de la ligne de transmission adaptatrice plus le court-circuit est d'environ un quart d'onde. Pour cette raison, ce bout de ligne de transmission est souvent appelé "adaptateur quart d'onde". Considérant cela de manière plus détaillée, ce transformateur est en fait composé de deux parties qui ont chacune une fonction différente et de plus, le calcul exact montre que la longueur totale de cette ligne de transmission est un peu plus grande qu'un quart d'onde.

N'oublions pas que la compensation avec un morceau de conducteur court-circuité n'est valable que pour une fréquence déterminée. Sans cette adaptation, nous avons une antenne monobande, mais en ajoutant ce court-circuit, nous obtenons seulement un système monobande. Mais

dat het stralende gedeelte eindgevoed is en daarbij een hoge impedantie vertoont. Alle veelvouden van een halve golflengte voldoen dus ook. Met dit stralende gedeelte is de antenne als omzetter van het elektromagnetisch veld naar een elektrisch signaal overigens geheel gekarakteriseerd. Hoe een halvegolfstraler zich gedraagt is genoegzaam bekend (zie bijv. ook de dipool), zoniet leveren de vele antenneberekeningsprogramma's hiervoor wel het antwoord. Voor de polarisatie maakt het wel uit of de antenne horizontaal gebruikt wordt, zoals bij de zeppelin, of verticaal, zoals bij de J-antenne. Maar omdat de rest van het systeem niet bijdraagt aan de straling, speelt dit verder ook geen rol in de ontvangst- of zend-eigenschappen.

Het tweede onderdeel van het systeem bestaat uit een aanpassing die de hoge aansluitimpedantie van de antenne 'vertaalt' naar een waarde waarmee we in de buurt van de zender uit de voeten kunnen, bijv. 50Ω . Deze aanpassing bestaat uit een stuk transmissielijn dat gelijk is aan of (meestal) korter is dan een kwart golflengte. Aan dit stuk transmissielijn worden geen speciale eisen gesteld, behalve dat de karakteristieke impedantie hiervan hoger moet zijn dan de (lage) waarde waar we naartoe willen transformeren, en lager dan de impedantie aan de andere zijde (de halvegolfantenne). Het blijkt dat deze transmissielijn 'transformator' flexibel genoeg is om - met de juiste afmetingen - een groot gebied van impedantie-omzettingen mogelijk te maken. Het blijkt ook dat we, hoe we deze transformatie ook kiezen, altijd parallel aan de gewenste (en gekozen!) waarde van bijv. 50Ω , een capaciteit terugvinden waarvan de waarde afhankelijk is van de gekozen systeemparameters. Met een enkele transmissielijn kunnen we dus nooit een transformatie maken van de hoge, reële waarde van de halvegolfantenne naar een lage, reële waarde voor de transceiver. Er blijft altijd een capacatieve reactantie parallel staan, die maakt dat de SWR op het aansluitpunt nooit perfect zal worden. Waarden tussen 1,5:1 en 2,5:1 zijn echter in het algemeen goed haalbaar. Verder kunnen we deze ongewenste reactantie doorgaans met een antennetuner gemakkelijk weggeregelen (uitstemmen).

Als zo'n antennetuner toch aanwezig is, kunnen we het systeem van halvegolfantenne plus transmissielijn gemakkelijk toepassen voor alle amateurbanden die (oneven) harmonisch liggen t.o.v. de basisfrequentie waarvoor het geheel was ontworpen. Op elk frequentievelvoud vinden we op het uiteinde van de antenne immers weer een hoge impedantie die op de oneven veelvouden door het stuk transmissielijn 'vertaald' zal worden naar een lagere waarde die de tuner dan weer kan omzetten naar de gewenste 50Ω voor de transceiver. Hierdoor hebben we een goed bruikbare, 'meerbanden' antenne in handen, die echter enkel op de laagste ontwerpfrequentie een echt lage SWR zal vertonen. Omdat de 'transformator' meestal uit een stuk symmetrische transmissielijn bestaat van een beperkte lengte (doorgaans ca. $1/4$ golflengte), spelen de eventuele verliezen hierin nauwelijks een rol, ook niet bij hogere SWR.

Als derde onderdeel vinden we een stukje transmissielijn, vaak met dezelfde karakteristieke impedantie als de eerdergenoemde lijn, dat aan het einde is kortgesloten. Dit korte stukje lijn gedraagt zich als een inductieve impedantie waarmee we het capacatieve deel van de eerder gevonden transformatie kunnen compenseren, zodat een perfecte aanpassing met SWR 1:1 mogelijk wordt. Dit stukje kortgesloten lijn komen we vooral tegen bij de J-antenne.

Het blijkt dat voor praktisch antenneontwerp de lengte van het transformerende stuk transmissielijn plus het kortgesloten stukje in de buurt komt van een kwart golflengte. Daarom wordt het stuk transmissielijn bij deze eindgevoede antennes vaak een 'kwartgolftransformator' genoemd. Bij nadere beschouwing bestaat zo'n transformator dus eigenlijk uit twee delen die elk een aparte functie hebben en bovendien blijkt bij de juiste berekening dat het totale stuk transmissielijn wat langer wordt dan een kwart golflengte.

Denk erom dat de compensatie met het stukje kortgesloten leiding enkel geldig is voor één frequentie. Zonder deze toevoeging hadden we bij gebruik van een antennetuner een effectieve meerbandantenne, maar met het kortgesloten stukje dus een monobandsysteem. Daartegenover staat

d'autre part, nous avons maintenant un système accordé présentant 50 Ω et qui ne nécessite pas de tuner.

Retour à la base

La formule de l'impédance que nous "voyons" à l'entrée d'une ligne de transmission qui est raccordée à la sortie avec une impédance (importante) a une forme un peu confuse qui devient plus simple si nous considérons que la ligne de transmission n'a pas de perte. Cette hypothèse est acceptable parce que nous avons dans la pratique une longueur réduite qui de plus a souvent une structure symétrique, aussi gage de faible perte. La formule de transformation est alors:

$$Z_i = R_0 (Z_a + j R_0 \tan \varphi) / (R_0 + j Z_a \tan \varphi)$$

Dans laquelle:

R_0 = impédance caractéristique de la ligne de transmission

Z_a = impédance finale (dans notre cas notre antenne quart d'onde)

φ = la longueur électrique du bout de ligne de transmission, exprimée en degrés (360 degrés étant une longueur d'onde entière)

Il est évident que cette formule a un caractère plus complexe pour une longueur électrique φ et donc que toute charge réelle Z_a sera traduite en une impédance complexe Z_i . Nous devons donc de préférence écrire l'impédance Z_i comme étant un circuit parallèle d'une partie réelle R_p avec une partie imaginaire X_p , par exemple:

$$R_p = R_0 \left(\frac{(Z_a/R_0)^2 + (\tan\varphi)^2}{\text{et}} \right) / \left(\frac{Z_a/R_0 + (Z_a/R_0) (\tan\varphi)^2}{\text{en}} \right)$$

$$X_p = -j R_0 \left(\frac{((Z_a/R_0)^2 + (\tan\varphi)^2)}{((Z_a/R_0) \tan\varphi - \tan\varphi)} \right)$$

La partie imaginaire a ici un signe négatif et est donc une capacité. Nous pouvons compenser cette partie par un bout de ligne de transmission court-circuitée qui se comporte comme une longueur électrique inductive entre 0 et 90 degrés. La formule pour ce bout court-circuité peut être facilement déduite de la formule précédente de Z_i , où Z_a est placé à 0. La formule devient alors:

$$Z_i = j R_0 \tan \varphi_2 = X_k$$

Dans laquelle φ_2 est la longueur électrique du bout de ligne de transmission court-circuitée.

Pour le calcul nous déduisons d'abord la longueur électrique de la ligne de transmission qui adapte notre impédance (élevée) Z_a en résistance souhaitée R_p (la plupart du temps 50 Ω). Avec cette longueur électrique trouvée φ , nous calculons ensuite la réactance parallèle X_p qui est égale mais de signe opposé à l'impédance du bout de ligne court-circuitée X_k . Nous déduisons de la formule de cette dernière valeur la longueur électrique φ_2 du bout de ligne court-circuitée.

A l'aide du graphique en **fig. 2** il est possible de déterminer les dimensions du transformateur de ligne de transmission. Le graphique est conçu pour une résistance de $R_p = 50 \Omega$. Avec les courbes les plus basses, la longueur électrique du bout de ligne de transmission est déterminée, pour différentes valeurs d'impédance d'antenne, afin de réaliser une transformation vers 50 Ω. Ensuite, on calcule la longueur du bout de "compensation" qui compense la partie capacitive de l'impédance aux points de raccordement. Ce bout de ligne, établie précédemment par calcul, donne donc la longueur totale de la ligne de transmission qui est nécessaire pour adapter n'importe quelle impédance Z_a en 50 Ω. Pour un TOS = 1: 1, on utilise la partie supérieure du graphique. La différence est donc la valeur de la longueur électrique du bout de "compensation".

En figure 2, nous voyons que la longueur totale de la ligne n'approche la valeur de 90 degrés (1/4 λ) que pour des valeurs élevées de la résistance de charge Z_a . Le, soi-disant, transformateur quart d'onde est donc en réalité toujours un peu plus long qu'un quart d'onde! On observe également que les lignes de transmissions avec impédances élevées

dat we nu een perfecte aanpassing naar 50 Ω hebben gemaakt zonder dat we daarvoor een antennetuner nodig hebben.

Enige achtergrond

De formule voor de impedantie die we zien aan de ingang van een transmissielijn die aan de uitgang is afgesloten met een (hoge) impedantie, heeft een wat onoverzichtelijke vorm, die eenvoudiger wordt als we ervan uitgaan dat de transmissielijn geheel verliesvrij is. Deze hypothese is toegestaan omdat we in de praktijk te maken hebben met een relatief kort stukje leiding, dat bovendien vaak een symmetrische structuur heeft, hetgeen ook al borg staat voor lage verliezen. De transformatieformule luidt dan:

$$Z_i = R_0 (Z_a + j R_0 \tan \varphi) / (R_0 + j Z_a \tan \varphi)$$

waarin:

R_0 = karakteristieke impedantie van de transmissielijn

Z_a = afsluitimpedantie (in dit geval onze halvegolfantenne)

φ = de elektrische lengte van het stuk transmissielijn, uitgedrukt in graden (360 graden is een hele golflengte)

Het is duidelijk dat deze formule voor elke elektrische lengte φ , een complex karakter heeft en dat elke reële belasting Z_a dus steeds vertaald zal worden naar een complexe impedantie Z_i . We kunnen daarom de impedantie Z_i beter meteen schrijven als de parallelschakeling van een reëel deel R_p met een imaginair deel X_p , bijvoorbeeld:

$$R_p = R_0 \left(\frac{(Z_a/R_0)^2 + (\tan\varphi)^2}{\text{en}} \right) / \left(\frac{Z_a/R_0 + (Z_a/R_0) (\tan\varphi)^2}{\text{en}} \right)$$

$$X_p = -j R_0 \left(\frac{((Z_a/R_0)^2 + (\tan\varphi)^2)}{((Z_a/R_0) \tan\varphi - \tan\varphi)} \right)$$

Het imaginair deel heeft hierin een negatief teken en is dus capacitef. We kunnen dit deel compenseren met een kortgesloten stukje transmissielijn dat zich bij een elektrische lengte tussen 0 en 90 graden inductief gedraagt. De formule voor zo'n stukje kortgesloten transmissielijn kunnen we gemakkelijk afleiden uit de eerdere formule voor Z_i , waarbij Z_a op 0 wordt gesteld. De formule verandert dan als volgt:

$$Z_i = j R_0 \tan \varphi_2 = X_k$$

waarin φ_2 de elektrische lengte is van het stukje kortgesloten transmissielijn.

Voor de berekening leiden we dus eerst de elektrische lengte af voor het stuk transmissielijn dat de (hoge) antenne impedantie Z_a omzet naar de gewenste aansluitweerstand R_p (meestal 50 Ω). Met de gevonden elektrische lengte φ berekenen we vervolgens de parallelreactantie X_p die gelijk maar tegengesteld van teken is aan de impedantie van het stukje kortgesloten leiding X_k . Uit de formule voor deze laatste grootte leiden we dan weer de elektrische lengte φ_2 af voor het kortgesloten stukje leiding.

Met behulp van de grafiek in **fig. 2** is het mogelijk om de afmetingen van de transmissielijntransformator te bepalen. De grafiek is gemaakt voor een gewenste aansluitweerstand $R_p = 50 \Omega$. Met het onderste stel lijnen wordt de elektrische lengte bepaald van het stuk transmissielijn dat voor diverse waarden antenne-impedantie de transformatie naar 50 Ω realiseert. Vervolgens werd de lengte van de 'compensatiestub' uitgerekend die het capaciteve deel van de impedantie op de aansluitpunten compenseert. Dit stukje lijn opgeteld bij het eerder berekende deel geeft dan de totale transmissielijnlengte die nodig is om van elke aansluitimpedantie Z_a naar 50 Ω te gaan, bij SWR = 1: 1, in de grafiek voorgesteld door het bovenste stel lijnen. Het verschil tussen elke twee lijnenparen is dan weer de elektrische lengte van de stub.

In figuur 2 zien we dat de totale lijnlengte pas bij hoge waarden van de belastingsweerstand Z_a in de buurt van 90 graden (1/4 λ) komt. De zogenaamde 'kwartgolftransformator' is dus in werkelijkheid altijd iets langer dan een kwartgolf! Ook valt op dat transmissielijnen met hogere impedantie (bijv. 600 Ω) pas verder in de grafiek 'beginnen'. Links van

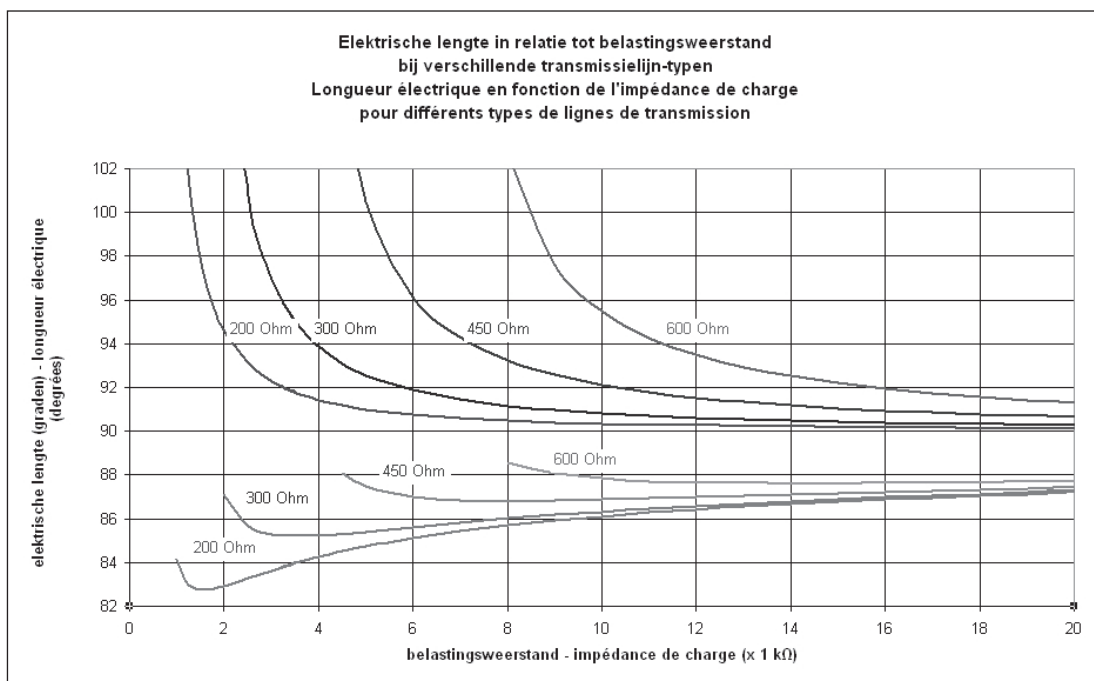


Fig. 2. Le lien entre la longueur électrique et l'impédance de charge pour différentes impédances caractéristiques de la ligne de transmission, pour réaliser une adaptation vers 50 Ω.

Fig. 2. Het verband tussen de elektrische lengte en belastingsimpedantie bij verschillende karakteristieke impedanties van de transmissielijn, voor transformatie naar 50 Ω.

(par ex. 600 Ω) commencent plus tard sur le graphique. A gauche de la courbe, la formule ne fournit pas de solution ce qui signifie également que l'adaptation n'est pas possible sauf si la résistance de charge est de valeur très élevée ($Z_a > 8 \text{ k}\Omega$). On doit donc tenir compte de cela lors de l'emploi de lignes ouvertes (R_0).

La charge d'antenne ' Z_a '

L'impédance de l'antenne (Z_a) joue un rôle important et mérite plus d'attention.

Si nous considérons une antenne d'exactly une demi-onde, nous voyons que la tension est maximale aux extrémités et que le courant devient nul. En première approximation, cela signifie que l'impédance en ces points est infinie et que c'est favorable lors de l'utilisation d'une ligne de transmission court-circuitée d'exactly un quart d'onde. Le court-circuit à l'entrée offre donc une impédance "infinie" à l'autre bout et s'applique donc parfaitement à l'utilisation d'une antenne demi-onde à impédance "infinie".

Le manuel d'antennes de l'ARRL fournit également des informations relatives à l'impédance à attendre pour une antenne demi-onde. Les valeurs théoriques devraient être de l'ordre de 5000 - 8000 Ω, dépendant de la taille de l'antenne et du nombre de demi-onde qui lui est appliqué. On peut y lire plus loin que pour les longueurs d'antennes expérimentales, on atteint des valeurs plus basses de l'ordre de 1000 - 5000. Si on simule, dans un programme de modélisation d'antennes (par ex. EZNEC), une antenne demi-onde alimentée en bout, il semble de nouveau que cette impédance "infinie" en résonance n'est pas si infinie que ça, mais se situe vers une valeur de 2500 Ω.

Pour me rendre compte par moi-même de l'impédance d'une telle antenne demi-onde, j'ai mesuré différentes antennes (dans les bandes HF basses) en les raccordant à un circuit résonnant de valeurs connues (par ex. C, Q), pour déduire la résistance du circuit parallèle équivalent. En mesurant une nouvelle fois la qualité du circuit Q avec l'antenne raccordée, on peut définir l'impédance (élevée) de l'antenne à partir de la variation par rapport à de la valeur initiale. En différentes circonstances, j'ai obtenu des valeurs entre 2700 et 3370 Ω.

Des données ci-dessus, on peut donc conclure que l'impédance d'une antenne demi-onde raccordée en bout aura une valeur comprise entre 1000 et 5000 Ω avec une valeur plus probable vers les 3500 Ω. Cela a une conséquence pour l'impédance caractéristique du bout de ligne de transmission que nous voulons adapter. Pour la longueur électrique d'une ligne 1/4 onde, nous appliquons de nouveau la première formule pour

de beginpunten heeft de formule namelijk geen 'oplossing', hetgeen betekent dat er geen transmissielijnlengte bestaat waarmee de transformatie mogelijk is, tenzij de belastingsweerstand erg hoog wordt ($Z_a > 8 \text{ k}\Omega$). Hiermee dient dus rekening te worden gehouden bij gebruik van open lijnen (hoge R_0).

De antennebelasting ' Z_a '

De impedantie van de antenne (Z_a) speelt een grote rol en verdient meer aandacht.

Als we een antenne beschouwen van exact een halve golflengte lang, dan zien we dat op de uiteinden de spanning maximaal wordt en de stroom naar nul gaat. In eerste benadering betekent dit dat de impedantie op deze punten 'naar oneindig' gaat en dat is gunstig bij gebruik van een kortgesloten transmissielijn van precies 1/4 golflengte lang. De kortsluiting aan het begin wordt daarmee getransformeerd tot een 'oneindige impedantie' aan het andere einde en dat past goed bij de 'oneindige impedantie' van de halvegolfantenne.

Het ARRL antennehandboek geeft ook enige informatie over de te verwachten aansluitimpedanties van een halvegolfantenne. Theoretische waarden zouden liggen in het gebied van 5000 - 8000 Ω, afhankelijk van de antennemetingen en het aantal halve golflengtes dat hierop past. Men schrijft hierin verder dat experimentele antennemetingen een lager bereik laten zien en waarden in het gebied van 1000 - 5000 Ω realistischer zijn. Als we in één van de antennemodellerprogramma's (bijv. Eznec) zo'n halvegolfantenne simuleren en aanstoten aan het einde, dan blijkt wederom dat die 'oneindige impedantie' in resonantie niet zo erg 'oneindig' is, maar meer in de buurt ligt van 2500 Ω. Om zelf ook een beetje gevoel te krijgen voor de impedantie van zo'n halvegolfantenne, heb ik verschillende van dergelijke antennes gemeten (in het lage HF-gebied) door de antenne aan te sluiten op een afgestemde kring met bekende grootheden (bijv. C, Q), waaruit de equivalente kringparallelweerstand kan worden berekend. Door opnieuw de kringkwaliteit Q te meten met de aangesloten antenne-in-resonantie, kan uit de nu veranderde waarde (lager), de (hoge) impedantie van de antenne goed worden bepaald. Onder verschillende omstandigheden vond ik waarden tussen 2700 en 3370 Ω.

Uit alle bovenstaande zaken samen kunnen we de conclusie trekken dat de aansluitimpedantie van de eindgevoede halvegolfantenne zal liggen tussen 1000 en 5000 Ω met een meest waarschijnlijke waarde rond de 3500 Ω. Dit heeft consequenties voor de karakteristieke impedantie van het stuk transmissielijn dat we zouden willen toepassen. Voor een lijn van 1/4 lambda elektrische lengte kijken we opnieuw naar de eerste formule

Z_i , mais maintenant pour $\varphi = 90$ degrés, donc $\tan \varphi$ infinie. La formule devient donc:

$$Z_i = R_0^2 / Z_a$$

of nog

$$R_0 = \sqrt{Z_a \cdot Z_i}$$

Avec une impédance souhaitée de 50 Ω et une impédance maximale d'antenne de 5000 Ω nous calculons:

$$R_{0 \max} = \sqrt{(5000 \cdot 50)} = 500 \Omega$$

of, meer waarschijnlijk (3500 Ω),

$$R_{0 \max} = \sqrt{(3500 \cdot 50)} = 420 \Omega$$

Regardons alors le graphique, nous voyons que seule les premiers 30 % du graphiques sont intéressants pour nous.

Nous avons aussi vu et aussi déduit que la ligne de transmission utilisée doit avoir une impédance inférieure à si nous voulons réaliser une adaptation vers 50 Ω .

Un exemple appliqué

La raison pour laquelle je m'intéresse à ce type d'antenne se trouve dans la combinaison de quelques activités dont l'élaboration et la construction de grands cerfs-volants. C'est comme que l'idée est venue de monter une antenne pour les bandes basses avec un cerf-volant. Une expérience de trois cerfs-volants qui montent un antenne 80 m avait déjà été mentionnée et il était dans mes intentions de d'utiliser un seul cerf-volant pour une antenne 80m afin de dépendre de moins d'assistants pour cette expérience. Ce n'est pas chose facile d'avoir un nombre restreint de personnes à la même heure et en même temps.

Une bonne antenne pour les bandes basses montée sans problème par un seul cerf-volant avec d'éventuelles contre capacités (problème de terre) est justement une antenne alimentée en bout. Pour tout avoir léger, transportable et flexible, il a été décidé de réaliser l'antenne à partir d'une moitié d'un câble électrique (fil côte à côte) surtout parce qu'il était disponible. Pour le morceau de la ligne d'adaptation, un twinlead de 300 Ω a été choisi parce qu'il est souple et léger et qu'en plus il montre une impédance constante, aussi il sera secoué lors du transport et des mouvements du cerf-volant.

La longueur exacte du fil électrique pour résonner en demi-onde pour le centre de la bande des 80 m (3,65 MHz) est définie en utilisant une ligne de 40 m raccordée à un générateur à haute impédance et en cherchant la fréquence pour laquelle la tension est la plus élevée. La ligne doit bien sûr être élevée librement comme il s'agit d'une mesure de haute impédance..

De cette mesure et de la longueur réelle du fil, on peut déterminer le facteur vitesse de ce matériau qui semble être 0,88. C'est beaucoup plus bas que ce qui avait été imaginé avec ce type de fil.

Avec le choix de la ligne de transmission (300 Ω), l'adaptation d'impédance souhaitée (50 Ω) et l'impédance de la demi-onde (3 - 4 k Ω) comme facteurs connus, tout le système d'antenne peut être calculé.

Dans le graphique (pour une valeur de 50 Ω), nous considérons une ligne de transmission de 300 Ω . Pour une charge d'antenne $Z_a \sim 3,5$ k Ω , nous obtenons une longueur électrique de $\varphi = 85$ degrés. La longueur réelle est donc déterminée par la formule suivante:

$$l = (\varphi / 360) \times (c / f) \times vf$$

Avec:

φ = longueur électrique de la ligne de transmission

f = fréquence utilisée (dans l'exemple 3,6 MHz)

c = vitesse de la lumière

vf = facteur de réduction ou de vitesse de la ligne de transmission (pour twinlead: 0,84, selon les information du fabricant ou mesurée)

pour Z_i , mais nu voor $\varphi = 90$ graden, dus $\tan \varphi$ oneindig. De formule gaat dan over in het bekende:

$$Z_i = R_0^2 / Z_a$$

of nog

$$R_0 = \sqrt{Z_a \cdot Z_i}$$

Met een gewenste impedantie van 50 Ω en een maximale antenne-impedantie van 5000 Ω berekenen we:

$$R_{0 \max} = \sqrt{(5000 \cdot 50)} = 500 \Omega$$

of, meer waarschijnlijk (3500 Ω),

$$R_{0 \max} = \sqrt{(3500 \cdot 50)} = 420 \Omega$$

Kijken we opnieuw naar de grafiek, dan zien we dat voor HF-antennes alleen de eerste 30 % van de grafiek voor ons interessant is. We zien, en hebben nu ook afgeleid, dat de gebruikte transmissielijn een lagere impedantie moet hebben dan 450 Ω als we hiermee een aanpassing naar 50 Ω willen maken.

Een toepassingsvoorbeeld

De reden dat ik geïnteresseerd raakte in dit type antennes is te vinden in de combinatie van enkele activiteiten, waarbij het ontwerpen en maken van grotere vliegers nog dateert uit vroegere jaren. Ik had daarom het plan opgevat om met een van de overgebleven vliegers uit die tijd een antenne omhoog te trekken voor de lagere radioamateurbanden. Er was al eens een experiment gemeld waarbij drie vliegers een dipoolantenne voor tachtig meter omhoog brachten en het werd mijn doelstelling om met een enkele vliegerantenne op 80 m uit te komen, ook al om van minder 'assistenten' afhankelijk te zijn bij zo'n experiment. Dat dit geen loze gedachte is, blijkt al bij het huidige experiment, waarbij het niet gemakkelijk is om het beperkte aantal deelnemers toch allemaal op hetzelfde tijdstip op dezelfde plaats aanwezig te krijgen.

Een goede antenne voor de lage banden, door een enkele vlieger omhoog te brengen zonder problemen met eventuele tegencapaciteiten (aardingsproblemen), is nu juist zo'n eindgevoed antennesysteem. Om alles licht, transporteerbaar en flexibel te houden, werd besloten om de antenne te construeren uit de helft van een stukje elektriciteitsnoer (tweelingsnoer), vooral omdat dit voorradig was. Voor het stuk aanpassingslijn werd 300 Ω twinlead gekozen omdat dit soepel en licht is en bovendien een constante impedantie vertoont, ook als dit door transport of vliegerbewegingen wat dooreen wordt geschud.

De juiste lengte van het stuk elektriciteitsnoer voor resonantie in een halvegolfteantenne voor het midden van de 80 meter band (3,65 MHz) werd bepaald door een lijn van 40 m lang van dit materiaal aan te sluiten op een hoogohmige generator en te zoeken naar de frequentie waarbij een spanningsmaximum optreedt. De lijn moet hierbij natuurlijk volkomen vrij hangen, omdat dit een hoogohmige meting is. Uit deze meting en de werkelijke lengte van de draad kan de snelheidsfactor van dit materiaal worden bepaald en deze bleek te liggen op 0,88. Dat is heel wat lager dan waar doorgaans mee gerekend wordt bij dit type geïsoleerde draad.

Met de keuze voor de transmissielijn (300 Ω), de gewenste aanpassingsimpedantie (50 Ω) en de aansluitimpedantie van de halvegolfantenne (3 - 4 k Ω , zie hiervoor) als gekende factoren, kan het hele eindgevoed antennesysteem worden berekend.

In de grafiek (voor 50 Ω gewenste aansluitwaarde) beschouwen we de lijn voor een 300 Ω transmissielijn. Bij een antennebelasting $Z_a \sim 3,5$ k Ω vinden we een elektrische lengte $\varphi = 85$ graden. De werkelijke lengte wordt dan bepaald met de formule:

$$l = (\varphi / 360) \times (c / f) \times vf$$

waarin:

φ = elektrische lengte van de transmissielijn

f = gebruiksfrequentie (in ons voorbeeld 3,65 MHz)

c = lichtsnelheid

vf = verkortings- of snelheidsfactor van de transmissielijn (voor twin lead: 0,84, via gegevens van de fabrikant of zelf opmeten)

Pour l'antenne cerf-volant sur 3,65 MHz. Cela devient:

$$l = (85 / 360) \times (3 \cdot 10^8 / 3,65 \cdot 10^6) \times 0,84 = 16,3 \text{ m}$$

Dans le graphique, nous trouvons pour la ligne totale de transmission (ligne 300 Ω), pour une charge $Z_a \sim 3,5 \text{ k}\Omega$, une longueur de 94 degrés. Le bout de ligne court-circuitée est de 94-85 degrés = 9 degrés. De la même manière que ci-dessus, nous trouvons la longueur réelle: 1,73 m.

L'antenne demi-onde, avec un facteur de réduction de $vf = 0,88$, a une longueur comparative de:

$$l = (180 / 360) \times (3 \cdot 10^8 / 3,65 \cdot 10^6) \times 0,88 = 36,16 \text{ m}$$

Comme l'antenne est reliée directement au cerf-volant et que toute la ligne de transmission (symétrique) doit quitter le sol pour obtenir l'impédance correcte, le cerf-volant doit atteindre une altitude minimale de:

$$16,3 + 1,73 + 36,16 = 54,19 \text{ m}$$

Cela ne semble pas particulièrement difficile.

Il faut penser que dans cet exemple, l'antenne est accordée par un morceau de stub sur 3,65 MHz et fonctionnera encore correctement pour une fréquence pas trop éloignée de cette fréquence centrale. Pour une application à plus large bande, ou même l'utilisation sur des harmoniques (impaires) en bandes HF, le stub ne sera pas utilisé mais on raccordera un tuner d'antenne.

Les calculs sont en outre identiques.

L'expérience

Pour conclure, quelques photos de l'expérience qui doit vérifier les calculs. Comme l'antenne, le câble d'alimentation, la ligne de stub et le coax vers le transceiver ont un poids non négligeable, le cerf-volant utilisé ne doit pas être trop petit.

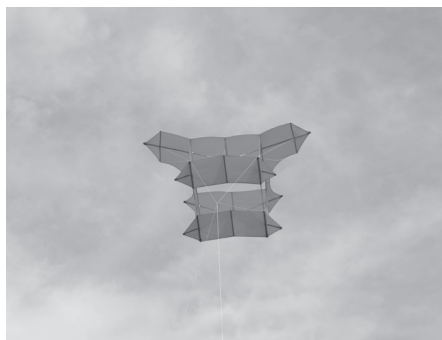
Heureusement quelques malabars d'un hobby "parallèle" étaient présents aider à cette "corvée". Il restait à attendre un jour favorable avec un vent adapté pour passer à l'essai.

Bob J. van Donselaar
ON9CVD (@amsat.org)



Fig. 4 Le cerf-volant est en l'air et l'antenne est clairement visible.

Fig. 4 De 'hefvlieger' is in de lucht en de antenne draad (recht omlaag) is duidelijk zichtbaar.



Voor de vliegerantenne op 3,65 MHz. wordt dit:

$$l = (85 / 360) \times (3 \cdot 10^8 / 3,65 \cdot 10^6) \times 0,84 = 16,3 \text{ m}$$

In de grafiek vinden we vervolgens voor de lengte van de totale transmissielijn (lijn 300 Ω) bij een belasting $Z_a \sim 3,5 \text{ k}\Omega$, een lengte van 94 graden. Het stukje kortgesloten stublijn wordt dan: 94 - 85 graden = 9 graden. Op dezelfde wijze als hierboven vinden we als werkelijke lengte: 1,73 m.

De halvegolfantenne, met een verkortingsfactor $vf = 0,88$, krijgt op vergelijkbare wijze een lengte van:

$$l = (180 / 360) \times (3 \cdot 10^8 / 3,65 \cdot 10^6) \times 0,88 = 36,16 \text{ m}$$

Als de antenne direct aan de vlieger wordt verbonden en de gehele (symmetrische!) transmissielijn van de grond moet komen voor een juiste karakteristieke impedantie, moet de vlieger dus minimaal een hoogte bereiken van:

$$16,3 + 1,73 + 36,16 = 54,19 \text{ m}$$

Dat lijkt geen bijzonder moeilijke opgave.

Denk erom dat in dit vliegervoorbeeld de antenne werd afgestemd door toepassing van de stub-sectie op 3,65 MHz en nog goed zal werken (perfecte tot zeer lage SWR) op niet te grote afstand van deze frequentie. Voor een breedbandtoepassing en zelfs het gebruik op meerdere, (oneven-)harmonische gelegen HF-bandens, dient de stub niet te worden aangesloten en moet in een antennetuner worden voorzien. De berekeningen verlopen verder identiek.

Het experiment

Tot slot enkele foto's van het experiment dat de berekeningen moest verifiëren. Omdat de antenne plus voedingskabel plus stublijn plus coax naar de transceiver toch een aardig gewicht 'in de schaal' leggen, moest hiervoor een niet te kleine vlieger worden gebruikt. Gelukkig waren er een paar forse 'lifters' beschikbaar uit een 'parallèle' hobby die dit karweitje konden klaren. Het wachten was nog op een gunstige dag met aangepaste windsnelheden om een en ander ook werkelijk uit te voeren.

Bob J. van Donselaar
ON9CVD (@amsat.org)

Fig. 3 La station Radio et le cerf-volant prêt pour le lancement. La ligne du cerf-volant est presque invisible. Le gros fil blanc attaché au cerf-volant est l'antenne demi-onde sur 3,65 MHz.

Fig. 3 Het radiostation (voorground) en de vlieger, gereed voor de lancering. De vliegerlijn is vrijwel onzichtbaar. De dikke witte draad aan de vlieger is de halvegolf antenne op 3,65 MHz.



Fig. 5 La ligne d'alimentation (partie supérieure). Le stub est replié et maintenu par des élastiques et des écarteurs à la ligne d'alimentation (partie médiane). La dernière partie en noir est le coax vers la station.

Fig. 5 De lintlijn voedingslijn (bovenste deel). De stublijn is teruggevouwen en met schuimrubber afstandstukjes bevestigd aan de voedingslijn (middelste deel). Het laatste deel (zwart) is de coax naar het station.