

Een antenne-analyzer zelf bouwen met Arduino (deel 1)

door ON7UF

Dit artikel is een samenvatting van een presentatie die op 23/09/2016 werd gegeven in de sectie TLS door ON7UF – Roland.

De bedoeling van de presentatie was om te verduidelijken wat een antenne-analyzer nu eigenlijk meet en op welke manier hij dat doet.

Om dit zo aanspreekbaar mogelijk voor te stellen gaan we uit van een ideale situatie:

- de uitgang van onze zender heeft een impedantie van 50 Ohm
- onze kabel, die onze zender verbindt met onze antenne, heeft een karakteristieke impedantie van 50 Ohm.
- de belasting (= onze antenne) heeft een impedantie van 50 Ohm

In dit geval gebeurt er een maximale overdracht van het vermogen van onze zender naar onze antenne en wordt er geen signaal teruggekaatst (onze VSWR = 1:1). De kring is perfect aangepast.

De volgende grafiek geeft het verloop weer van het afgeleverde vermogen aan de belasting in functie van de verhouding belastingsimpedantie (RL) / generatorimpedantie (RS). Het is een genormaliseerde grafiek. Dit betekent dat alle impedanties gedeeld zijn door de generatorimpedantie (RS) zodat de grafiek bruikbaar is voor alle waarden van de impedanties.

Hier zien we duidelijk dat een maximale overdracht van vermogen gebeurt wanneer $RL = RS$ (dus in ons geval $RL = RS = 50$ Ohm).

Spijtig genoeg komt deze ideale toestand in de praktijk zelden of nooit voor.

De impedanties van onze zender en van onze verbindingkabel zijn niet altijd precies 50 Ohm. De impedantie van onze antenne is van allerlei factoren afhankelijk zoals lengte, hoogte, kwaliteit van de grond, weersomstandigheden, plaatsing, montage, materiaal, enz.

De antenne-analyzer is nu juist het instrument dat ons een idee kan geven hoever de impedantie van onze antenne afwijkt van de ideale waarde. De resultaten van de meting kunnen dan gebruikt worden om de antenne af te regelen en/of een aanpassingsnetwerk te berekenen.

Laat ons nu eens proberen om een meer realistische voorstelling van onze antenne-impedantie weer te geven. We gaan er nog altijd van uit dat onze zender en onze verbindingkabel een ideale impedantie van 50 Ohm hebben en concentreren ons op de antenne-impedantie ZL.

We kunnen ZL voorstellen als een passief netwerk dat bestaat uit een serie weerstand R_s en een vakje, waarin jX_s vermeld staat, in serie met R_s .

Construire soi-même un analyseur d'antenne (1^{ère} partie)

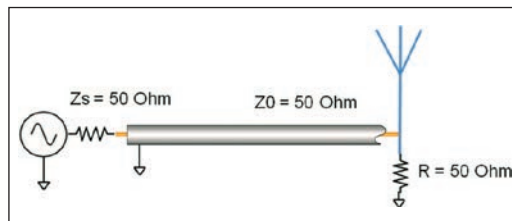
par ON7UF – traduit par Fabian ON3FHN

Cet article est le résumé d'une présentation qui a été faite le 23.09.2016 à la section TLS par ON7UF - Roland.

Le but de la présentation était de clarifier ce qu'un analyseur d'antenne mesure réellement et comment il le fait.

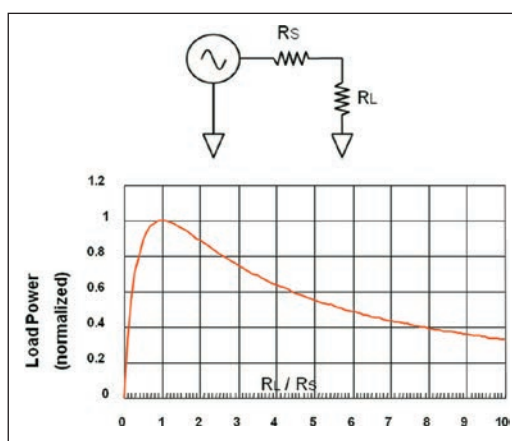
C'est pourquoi nous avons supposé une situation idéale pour être aussi clair que possible (voir graphique) :

- La sortie de notre émetteur a une impédance de 50 ohms
- Le câble, qui relie notre émetteur à l'antenne, a une impédance caractéristique de 50 ohms.
- La charge (= notre antenne) a une impédance de 50 Ohms



Dans ce cas, il y a un transfert maximum de puissance de notre émetteur à notre antenne et il n'y a pas de signal réfléchi (notre ROS = 1:1). Le circuit est parfaitement adapté.

Le graphique ci-dessous montre l'évolution de la puissance délivrée à la charge en fonction du rapport entre l'impédance de charge (RL) / l'impédance du générateur (RS). C'est un graphique normalisé. Cela signifie que toutes les impedances sont divisées par l'impédance du générateur (RS), de sorte que le graphique peut être utilisé pour toutes les valeurs d'impédance.



Ici nous voyons donc clairement qu'un transfert maximum de puissance se produit quand $RL = RS$, donc, dans notre cas, $RL = RS = 50$ Ohms. Malheureusement, dans la pratique cette situation idéale n'arrive que rarement et pour ainsi dire jamais.

Les impedances de l'émetteur et de notre câble de raccordement ne sont pas toujours équivalentes à 50 ohms de façon précise. L'impédance de notre antenne dépend de divers facteurs tels que la longueur, la hauteur, la qualité du sol, les conditions météorologiques, le positionnement, l'assemblage, le matériel, etc.

L'analyseur d'antenne est précisément l'outil qui peut nous donner une idée de la façon dont l'impédance de notre antenne dévie de la valeur idéale. Les résultats de l'analyse peuvent ensuite être utilisés pour régler l'antenne et/ou pour calculer un réseau d'adaptation.

Essayons maintenant de refléter une représentation plus réaliste de notre impédance d'antenne. Nous continuons cependant à supposer que notre émetteur et notre connexion ont une impédance idéale de 50 ohms et à nous concentrer sur l'impédance de l'antenne ZL.

Xs stelt de ohmse waarde voor van ofwel een spoel (XL) ofwel een condensator (XC). Zoals we kunnen afleiden uit de formules voor XL en XC (zie tekening) is deze ohmse waarde afhankelijk van de frequentie f.

Hier kunnen we al een paar zeer interessante zaken uit afleiden:

- als de frequentie f stijgt dan stijgt XL en dan daalt XC
- als X=0 dan zegt men dat de antenne in resonantie is en dan is de antenne-impedantie gelijk aan Rs (Rs is dan niet noodzakelijk 50 Ohm!!!). We noemen de resonantiefrequentie van de antenne fres.
- als de frequentie hoger is dan fres dan wordt de antenne inductief en is de ohmse waarde van XL = 2.pi.f.L
- als de frequentie lager is dan fres dan wordt de antenne capacitief en is de ohmse waarde van XC = 1/2.pi.f.C

Vanwaar komt nu echter de "j" die in het vakje jXs staat?

Om dat te begrijpen moeten we een tijdje terug gaan in de geschiedenis.

In de zestiende eeuw zochten 2 Italiaanse wiskundigen *Scipione del Ferro* en *Niccolo Fontana Tartaglia* naar de wortels van een vergelijking van de derde graad. (vorm: $ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$). Zo een vergelijking heeft 3 wortels maar onze Italiaanse vrienden werden herhaaldelijk geconfronteerd met het feit dat er geen vierkantswortel kan getrokken worden uit een negatief getal. Zo hadden ze voor een vergelijking $x^2 = -4$ geen oplossing. Het heeft dan nog geduurd tot in de 18de eeuw dat grote wiskundigen zoals *Leonhard Euler* en *Carl Friedrich Gauss* besloten dat als de vierkantswortel uit een negatief reëel getal niet bestaat ze hem dan zelf zouden uitvinden. Ze definieerden het getal i als de vierkantswortel uit -1. Aangezien het getal niet bestond en enkel kon bestaan in de verbeelding, noemde men het een imaginair getal. Door een reëel getal te vermenigvuldigen met i kan men uit ieder negatief reëel getal een vierkantswortel trekken. Omdat er verwarring zou kunnen ontstaan. In de elektrotechniek en in de elektronica, waar i gebruikt wordt als symbool voor (wissel)stroom, gebruikt men j in de plaats van i in de berekeningen.

Als we nu terugkeren naar onze impedantie van onze antenne dan kan die geschreven worden als de som van een reëel gedeelte Rs en een imaginair gedeelte jXs. Samen vormen zij een complex getal $ZL = Rs + jXs$ dat de volledige impedantiewaarde weergeeft.

Rs is een zuivere ohmse weerstand.

jXs noemen we de reactantie. Als de reactantie inductief is spreken we van inductantie, als de reactantie capacitief is spreken we van capacitantie.

Hoe kunnen we deze impedantie nu visueel voorstellen?

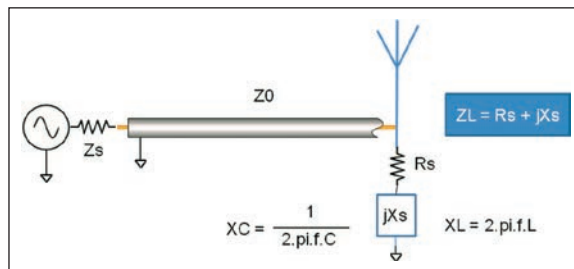
Hier steekt René Descartes, een Franse filosoof en wiskundige uit de 16de eeuw ons een handje toe. Met de Cartesiaanse coördinaten kunnen we onze impedantie mooi in een grafiek voorstellen. We zien een horizontale as voor het reëel gedeelte Rs en een verticale as voor het jX gedeelte.

Hoe komt het nu dat de as van de reactantie 90 graden gedraaid staat ten opzichte van de as van de ohmse weerstand Rs?

Om dit te begrijpen moeten we een klein proefje doen.

We meten de stroom in de drie schakelingen in de afbeelding. We zien (op de eerste grafiek op de volgende pagina) dat de stroom door de condensator 90 graden voorijlt op de spanning en dat de stroom door de spoel 90 graden naijlt op de spanning terwijl de stroom door de weerstand mooi in fase is.

Als we onze Cartesiaanse voorstelling van de impedantie doorlopen in tegenwijzerzin, dan zien we dat dit perfect overeenstemt met de afbeelding



On peut imaginer ZL comme un réseau passif constitué d'une résistance série Rs et d'une boîte, dans laquelle jXs est comprise, montée en série avec Rs. Xs représente la valeur en ohms soit d'une inductance (XL) ou d'un condensateur (XC). Comme on peut le déduire des formules XL et XC (voir dessin), cette valeur résistive dépend de la fréquence f.

Ici, nous pouvons déjà remarquer des choses très intéressantes :

- Lorsque que la fréquence f augmente, XL augmente également mais par contre XC diminue.
- Si X = 0, alors on dit que l'antenne est en résonance et l'impédance de l'antenne est égale à Rs (Il n'est donc pas nécessaire que Rs = 50 ohms). Nous appelons la fréquence de résonance de l'antenne "fres".
- Si la fréquence est supérieure à celle de fres, l'antenne devient inductive et la valeur ohmique de XL = 2.pi.f.L
- Si la fréquence est inférieure à celle de fres, l'antenne devient capacitife et la valeur ohmique de XC = 1/2.pi.f.C

D'où vient le "j", qui est dans la boîte jXs ?

Pour comprendre cela, nous devons revenir un peu en arrière dans notre exposé.

Au XVI^e siècle, deux mathématiciens italiens *Scipione del Ferro* et *Niccolo Fontana Tartaglia* ont recherché les racines d'une équation du troisième degré (sous la forme $ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$). Une tel équation a 3 racines. Mais nos amis italiens ont été, à plusieurs reprises, confrontés au fait qu'une racine carrée ne peut pas être tirée d'un nombre négatif. Ils n'avaient donc pas de solution pour une équation $x^2 = -4$. Cela a duré ainsi jusqu'à ce que, au 18^{ème} siècle, des grands mathématiciens tels que *Leonhard Euler* et *Carl Friedrich Gauss* décident que si la racine carrée ne consiste pas en un nombre réel négatif qu'il fallait l'inventer. Ils ont donc défini le nombre i comme la racine carrée de -1. Étant donné que ce nombre n'existait pas et ne pouvait exister que dans l'imaginaire, il a été dénommé "nombre imaginaire". En multipliant un nombre réel avec i, je peux définir une racine carrée d'un nombre réel négatif. Cependant une confusion pouvait se produire. Dans l'ingénierie électrique et électronique où i est utilisé comme symbole pour le courant, on utilise j au lieu de i dans les calculs.

Revenons maintenant à l'impédance de notre antenne qui peut alors être décrite comme la somme d'une partie réelle Rs et d'une partie imaginaire jXs. Ensemble, ils forment un nombre complexe $ZL = Rs + jXs$ qui affiche la pleine valeur d'impédance.

Rs est une charge résistive pure.

jXs est appelé réactance. Si la réactance est inductive, nous parlons d'inductance, et si la réactance est capacitife, nous parlons de capacitance.

Comment pouvons-nous visualiser cette impédance ?

René Descartes, philosophe et mathématicien français du 16^{ème} siècle va nous donner un coup de main. Les coordonnées cartésiennes vont nous permettre de présenter notre impédance dans un beau graphique. Nous voyons un axe horizontal pour la partie réelle Rs et un axe vertical pour la partie jX.

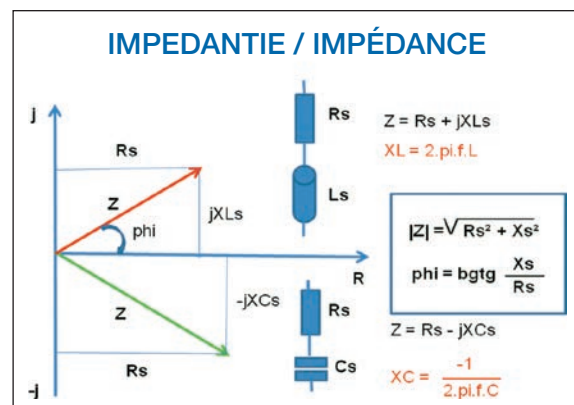
Comment est-il possible de faire tourner l'axe de la réactance à 90 degrés par rapport à l'axe de la résistance ohmique Rs ?

Pour comprendre cela, nous devons faire un petit exercice.

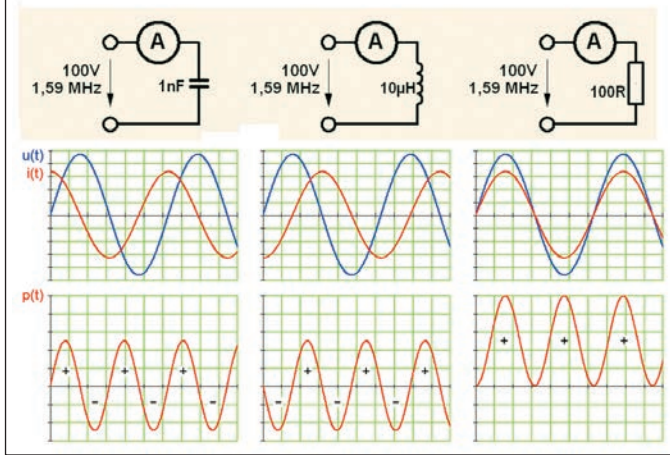
Nous mesurons le courant dans les trois circuits de l'image. Nous voyons (sur le premier graphique à la page suivante) que le courant passant à travers le condensateur devance la tension de 90 degrés et que le courant passant à travers la bobine est

retardé de 90° par rapport à la tension alors que l'alimentation est bien en phase avec la résistance.

Comme nous passons par notre représentation cartésienne de l'impédance dans le sens anti-horlogique, on voit que cela correspond parfaitement à



Wisselstroomweerstand Résistance au courant alternatif



van de capacitantie en de inductantie. $-jXC$ ijlt 90 graden voor op R_S en jXL ijlt 90 graden na op R_S .

De totale impedantie kunnen we berekenen door toepassing van de stelling van onze vriend Pythagoras ($a^2 + b^2 = c^2$) en de vectoriële som te maken zoals vermeld in het kader van de tekening.

De hoek phi is de fasehoek tussen R_S en de reactantie.

We kunnen echter nog iets heel belangrijk leren uit het proefje.

Door op ieder moment de stroom en de spanning te vermenigvuldigen van de eerste grafiek bekomen we het vermogen dat gedissipeerd wordt in de tweede grafiek.

Over één alternantie genomen zien we dat, zowel bij de condensator als bij de spoel, de positieve en de negatieve vermogens elkaar opheffen. Dat betekent dat, zowel in de condensator als in de spoel, er geen vermogen wordt gedissipeerd.

Waar gaat het vermogen van onze zender dan naartoe? Er is maar één verklaring: het wordt teruggekaatst naar de zender. (zèér hoge VSWR!).

Als we naar de weerstand R_S kijken dan zien we dat al het vermogen hier wel degelijk gedissipeerd wordt.

Hieruit kunnen we een aantal belangrijke zaken afleiden:

- het vermogen van onze zender wordt gedissipeerd in het reële deel R_S van de antenne impedantie.
- het reactief gedeelte van de impedantie kaatst het vermogen terug naar de zender.
- het aanpassen van een antenne bestaat er nu in om het reactief gedeelte zo klein mogelijk en liefst nul (resonantie) te maken en de weerstand te herleiden tot (in ons geval) 50 Ohm. Hiervoor bestaan er een heleboel technieken die buiten het bestek van dit artikel vallen.

In de volgende tekening kunnen we zien hoe de antenne impedantie verandert in functie van de lengte van de antenne (in dit geval een vertical).

We zien dat de impedantie capacitief wordt als de antenne korter is dan de lengte waarop ze in resonantie is ($jX=0$).

De impedantie wordt inductief als de antenne langer is dan de lengte waarop ze in resonantie is.

Hoe gaan we de antenne impedantie meten?

Hiervoor bestaan er verschillende methodes die elk hun voor- en nadelen hebben met betrekking tot de kost, de nauwkeurigheid, het frequentiebereik, de gebruiksvriendelijkheid, de mogelijkheden om verschillende meetmethodes toe te passen enz.

Op internet kan men veel verschillende zelfbouw ontwerpen vinden van heel eenvoudig tot zeer complex en moeilijk na te bouwen.

Een veel gebruikt meetstelsel is de brug van Wheatstone. Er bestaan vele varianten op deze brug zoals de brug van Wien. Die werkt volgens hetzelfde principe maar dan voor wisselstroom (HF) toepassingen.

L'image de la capacité et de l'inductance. $-jXC$ se trouve 90 degrés avant R_S et jXL se trouve 90 degrés après à R_S .

L'impédance totale peut être calculée par l'application du théorème de notre ami Pythagore ($a^2 + b^2 = c^2$), et de faire la somme vectorielle comme mentionné dans le contexte du dessin.

L'angle phi est l'angle de phase entre R_S et la réactance.

Mais nous pouvons encore apprendre quelque chose de très important de cet exercice.

A tout moment, en multipliant le courant et la tension du premier graphique, on obtient la puissance dissipée dans le deuxième graphique.

Dans l'ensemble, pour une alternance donnée, nous voyons qu'aussi bien dans le condensateur que dans la self, le positif et le négatif s'annulent. Cela signifie que, aussi bien dans le condensateur que dans la self, il n'y a pas de puissance dissipée.

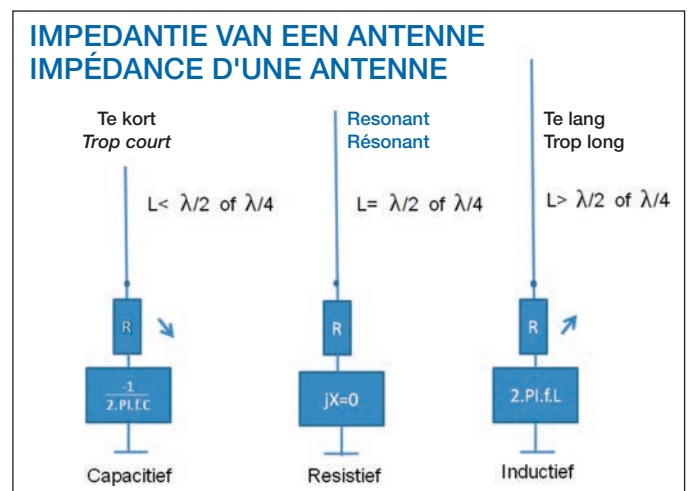
Où va la puissance de notre émetteur ? Il n'y a qu'une seule explication : elle est réfléchiée vers l'émetteur. (ROS très élevé !)

Si nous regardons la résistance R_S , nous voyons que toute la puissance y est bien dissipée.

Nous pouvons déduire de cela un certain nombre de conclusions importantes.

- La puissance de notre émetteur est dissipée dans la partie réelle R_S de l'impédance de l'antenne
- La partie réactive de l'impédance réfléchit la puissance à l'émetteur
- Le réglage d'une antenne vise à rendre la partie réactive aussi faible que possible -et de préférence près de zéro (résonance)- et à réduire la résistance à 50 ohms (dans notre cas). Pour cela, il existe bien des techniques qui ne relèvent pas du champ d'application de cet article.

Dans les graphiques qui suivent, nous pouvons voir comment varie l'impédance de l'antenne en fonction de la longueur de celle-ci (dans ce cas verticale).



On voit que l'impédance est capacitive si l'antenne est plus courte que la longueur à laquelle elle est en résonance ($jX = 0$)

L'impédance devient inductive lorsque l'antenne est plus longue que la longueur à laquelle elle est en résonance.

Comment mesurer l'impédance de l'antenne ?

Pour cela, il existe différentes méthodes, chacune avec leurs avantages et leurs inconvénients en ce qui concerne le coût, la précision, la gamme de fréquence, la facilité d'utilisation, la capacité d'appliquer différentes méthodes de mesure, etc.

On peut trouver de très nombreux exemples variés de construction personnelles sur internet, allant du très simple au très compliqué à construire.

Un système de mesure très utilisé est le pont de Wheatstone. Il y a pas mal de variantes de ce pont telle que le pont de Wien. Ça fonctionne toujours sur le même principe mais pour les applications de courant alternatif (HF).

Voor de werking van de brug van Wheatstone verwijzen we naar de vele artikels die hierover te vinden zijn op het internet.

Aangezien onze antenne-analyzer werkt met een Arduino moeten we op de één of andere manier de HF-signalen op verschillende plaatsen van de brug kunnen aftappen en onder de juiste vorm (0 tot 5 volt dc) naar de analoge ingangen van de processor sturen zodat die dan de nodige berekeningen kan maken.

Een veel gebruikte methode is de amplitudedetectie aan de hand van diodes.

Door de juiste keuze van de componenten wordt het HF-signaal gelijkgericht door de diode en wordt de drager kortgesloten naar de massa door de condensator zodat enkel de amplitude van het HF-signaal overblijft. Dit signaal kan dan versterkt worden tot het gewenste niveau van 0 – 5V.

Het systeem is eenvoudig maar vertoont een groot nadeel. Het HF-signaal moet vrij groot zijn voordat de diode gaat geleiden in het lineair gedeelte van zijn karakteristiek. Bij kleinere signalen krijgen we een grote niet-lineaire vervorming die men probeert te compenseren met allerlei middelen:

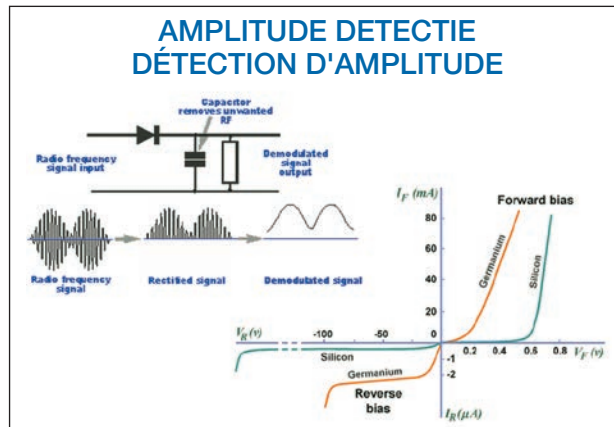
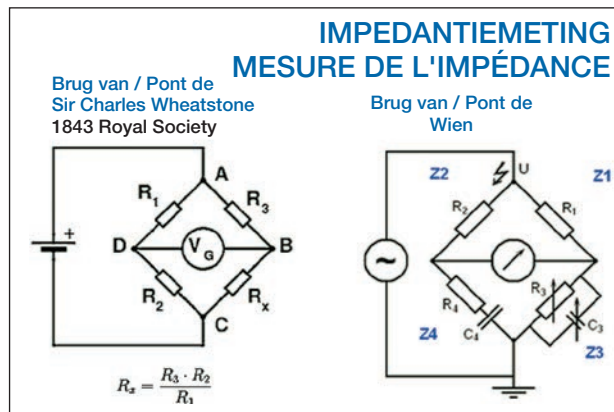
- diodes kiezen met een lage voorwaartse spanningsval (germanium, schottky,...)
- de diodes opnemen in de terugkoppelkring van een operationele versterker. Hiervoor moeten echter diodes uitgekozen worden met eenzelfde karakteristiek wat geen eenvoudige opdracht is.
- een voorwaartse stroom (bias) door de diodes sturen zodat hun werkpunt verschuift naar het lineair gedeelte van de grafiek.

Al deze maatregelen maken het eenvoudige systeem veel complexer en hebben allemaal een invloed op het frequentiebereik van het toestel.

Ik heb een paar opstellingen met dit systeem getest met wisselend succes. De meeste van die opstellingen geven een matig resultaat in een beperkte frequentieband.

Daarmee wil ik niet beweren dat de brug van Wheatstone niet kan gebruikt worden om een nauwkeurig meettoestel te bouwen. Dit bewijzen de ontwerpen van N2PK en DG8SAQ. In deze ontwerpen wordt er echter geen gebruik gemaakt van diodes. De HF-signalen worden rechtstreeks van de brug naar mingschakelingen gevoerd en men gebruikt hier de geluidskaart van een PC om alle berekeningen te doen aan de hand van Digital Signal Processing. Deze ontwerpen zijn echter moeilijk te bouwen en het gebruik van de toestellen is weggelegd voor gevorderde amateurs met kennis van Vector Network Analyze. Naar verluidt behalen zij echter zeer goede resultaten.

In een volgend deel wordt dieper ingegaan op een meetmethode gebaseerd op een bidirectionele coupler en wordt de praktische opbouw van het toestel beschreven.



plus petits, nous obtenons une forte distorsion non linéaire que l'on essaie de compenser à l'aide d'une variété de ressources.

- Choisir des diodes avec une faible chute de tension (germanium, Schottky, ...)
- Placer des diodes dans la boucle de contre-réaction d'un amplificateur opérationnel. Pour cela choisir des diodes avec la même caractéristique, ce qui n'est pas évident.
- Envoyer un courant (bias) à travers les diodes de sorte que les points de fonctionnement se décalent vers la partie linéaire de la courbe.

Toutes ces mesures rendent un système simple plus complexe et ont toutes une influence sur la fréquence de l'appareil.

J'ai testé quelques configurations avec ce système avec un succès variable. La plupart de ces configurations donnent des résultats modérés dans une bande de fréquence réduite.

Cela ne veut pas dire que le pont de Wheatstone ne peut pas être utilisé pour construire un dispositif de mesure précis. Cela est basé sur les recherches de N2PK et DG8SAQ. Dans cette conception, toutefois, les diodes ne sont pas utilisées. Les signaux RF sont prélevés directement sur le pont et transmis

à des circuits mélangeurs. On utilise ici la carte-son d'un PC pour faire tous les calculs à l'aide d'un Digital Signal Processing. Cependant, ces modèles sont difficiles à concevoir et l'utilisation de ces appareils est réservée aux amateurs chevronnés avec une connaissance de l'analyse vectorielle des réseaux. Il semblerait, cependant, que l'on obtient des vraiment bons résultats.

Dans la partie suivante un procédé de mesure basé sur un coupleur bi-directionnel sera plus profondément analysé et la réalisation pratique du dispositif y sera décrite.

