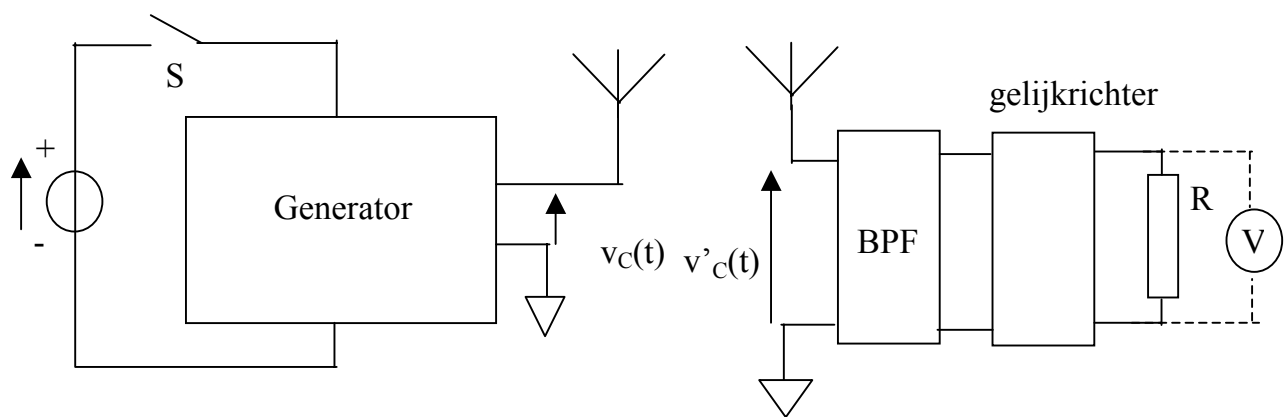


Meer informatie over fotonische cellen en fotodiodes vindt u in Paragraaf 5.3 en Paragraaf 5.2 in het vierde hoofdstuk van deze cursus. Meer uitgebreide informatie kunt u onder meer vinden in het boek 'Inleiding tot de industriële elektronica' van R. Devos en K. Eerlingen.

1.2: Draadloze communicatie met behulp van radiogolven

Indien we optische vezels buiten beschouwing laten, is het duidelijk dat de draadloze communicatie die hierboven beschreven is, slechts toelaat over een korte afstand te communiceren. Indien over lange afstanden gecommuniceerd wil worden, zal gebruik gemaakt worden van radiogolven.

Een eerste praktische toepassing welke we hierin zien is de draadloze telegrafie met behulp van de morsecode. De opstelling is weergegeven in Figuur 6.2.



Figuur 6.2: Zendinstallatie en ontvangstinstallatie

De zendinstallatie bestaat enerzijds uit een DC-voeding die een wisselspannings-generator van elektrische energie voorziet. Inderdaad, de DC-voeding kan met behulp van een schakelaar S aan- en afgeschakeld worden.

De generator genereert (indien S gesloten is) een elektrisch signaal $v_C(t) = V_C \cos(\omega_C t)$. Hierbij is $\omega_C = 2\pi f_C$. De frequentie f_C is bijvoorbeeld 1 MHz en V_C is bijvoorbeeld 2000 V.

De zendantenne zet de elektrische energie afkomstig van de generator om in elektromagnetische golven die de ether in gestuurd worden. De elektromagnetische golven worden dus uitgezonden indien de schakelaar S gesloten is. Deze elektromagnetische golven hebben dezelfde frequentie f_C .

Aan de ontvangstzijde is er de ontvangstantenne die elektro-magnetische golven ontvangt en omzet naar een elektrisch signaal. Dit elektrisch signaal heeft eveneens een zelfde frequentie f_C en we noteren het als $v'_C(t)$.

De amplitude van het signaal $v'_c(t)$ is wel vele malen kleiner dan de amplitude van $v_c(t)$. Hierbij is het gewoonlijk zo dat de amplitude van $v'_c(t)$ kleiner wordt naarmate de ontvanger verder verwijderd is van de zender.

Nu is het zo dat de ontvangstantenne meestal signalen van meerdere zenders tegelijk ontvangt. Nu is de ontvanger slechts in één van deze zenders geïnteresseerd. De andere zenders hun signalen worden daarom weggefilterd met behulp van een banddoorlaatfilter.

Na de antenne volgt bijgevolg een banddoorlaatfilter BPF (Band Pass Filter) die uitgevoerd kan worden als een parallel-RLC-kring. De capaciteitswaarde C is regelbaar zodat de resonantiefrequentie van de RLC-kring afgestemd kan worden op de frequentie f_c welke de gewenste zender uitstuurt.

Na de banddoorlaatfilter volgt er een gelijkrichter. De gelijkrichter bestaat uit de serieschakeling van een diode en een condensator (enkelzijdige gelijkrichter met afvlakcondensator). De spanning $v'_c(t)$ wordt dus gelijkgericht en de gelijkgerichte spanning staat over de condensator. Deze spanning over die condensator is dan ook de uitgangsspanning die over de weerstand R staat. Deze spanning kan gemeten worden met behulp van een voltmeter of een oscilloscoop.

Als alles goed gaat, is de spanning over deze weerstand een constante waarde (voldoende hoog) ten gevolge van het sluiten van de schakelaar S aan de zenderzijde. De spanning over deze weerstand is nul ten gevolge van het openen van de schakelaar S aan de zenderzijde. Op die manier is de spanning over de weerstand een reproductie van het ritme volgens welke men de schakelaar S aan de zenderzijde gesloten en geopend heeft.

Indien nu de weerstand R een "beeper" voorstelt, dan hoort men hoe men aan de zenderzijde de schakelaar S gesloten en geopend heeft. Dit kan een manier zijn om de morsecode hoorbaar te maken. Het is dan ook de manier om draadloze telegrafie mogelijk te maken.

We besluiten met de opmerking dat in de gelijkrichter aan de ontvangtzijde gebruik gemaakt wordt van een Schottky-diode of een Ge-puntcontact-diode. De diode moet namelijk voldoende snel kunnen schakelen om de hoogfrequente spanning $v'_c(t)$ (bijvoorbeeld 1 MHz) te kunnen gelijkrichten. Meer uitleg over deze snelle diodes vindt u in Paragraaf 2.3 en Paragraaf 2.4 in het vierde hoofdstuk van deze cursus.

1.3: Het frequentiespectrum

In de voorgaande paragraaf is besproken hoe morsecode draadloos verstuurd en ontvangen kan worden. In ons voorbeeld gebeurde dit met behulp van een draaggolffrequentie van 1 MHz. Doch verschillende zenders, die elk hun eigen bericht

in morsecode doorsturen, gebruiken elk een verschillende frequentie teneinde elkaar niet te storen.

Het is bovendien zo dat langs draadloze weg niet enkel morsecode doorgestuurd kan worden. Het in de voorgaande paragraaf beschreven principe kan uitgebreid worden zodat allerlei types informatie zoals onder meer audio- en videosignalen draadloos verstuurd kunnen worden.

Voor verschillende types verstuurde data, worden er andere frequenties gebruikt. Zo verstuurt een radiozender radiogolven met een totaal andere frequentie dan een televisiezender. Vanuit deze vaststelling is het mogelijk het frequentiespectrum in te delen in een aantal frequentiegebieden die elk hun eigen toepassingen bieden.

Naargelang hun toepassingen en hun kenmerken krijgen de frequenties van de EMG, die tot een bepaald frequentiegebied behoren, een verschillende benaming. Een beknopt overzicht is te vinden in de onderstaande tabel.

Frequentiegebied	Frequentie	Golflengte	Toepassing
LF (low frequencies)	30 tot 300 kHz	1 km tot 10 km	langegolf radio-omroep, tijdsignalen, luchtvaart- en scheepvaart- navigatie
MF (medium frequencies)	0,3 tot 3 MHz	100 m tot 1 km	middengolf radio-omroep
HF (high frequencies)	3 tot 30 MHz	10 m tot 100 m	radio-omroep, scheepvaart- communicatie, radio-amateurs
VHF (very high frequencies)	30 tot 300 MHz	1 m tot 10 m	televisie, FM-omroep, mobiele communicatie
UHF (ultra high frequencies)	0,3 tot 3 GHz	0,1 m tot 1 m	televisie, straalverbindingen
SHF (super high frequencies)	3 tot 30 GHz	10 mm tot 100 mm	straalverbindingen, sateliet-televisie, radar
EHF (extremely high frequencies)	30 tot 300 GHz	1 mm tot 10 mm	navigatieradar

De frequenties welke beschreven zijn in de bovenstaande tabel strekken zich uit van (ongeveer) 30 kHz tot 300 GHz. Lagere frequenties zijn mogelijk ten gevolge van atmosferische verschijnselen. Boven de 300 GHz treffen we achtereenvolgens het zichtbare licht en allerlei stralingen (zoals X- of Röntgenstralen) aan.

Meer gedetailleerde informatie in verband met het frequentiespectrum vindt u in Bijlage 6 verder in de cursus.

Bij het bestuderen van de bovenstaande tabel ziet u dat er voor elk frequentiegebied ook grenzen vermeld zijn in verband met de voorkomende golflengtes. Uit de fysica weten we dat er voor EMG (en dus ook voor radiogolven) een verband bestaat tussen de frequentie f (in Hz) en hun golflengte λ (in m). In het luchtledige (en ook in lucht) planten EMG zich voort met een snelheid van ongeveer $300 \cdot 10^6$ m/s.

De golflengte λ is de afstand afgelegd gedurende 1 periode. Dit betekent dat de golflengte

$$\lambda = 300 \cdot 10^6 / f.$$

Hierbij is de golflengte uitgedrukt in meter en de frequentie in Hertz.

1.4: Vragen en geleide oefeningen

Na wat ingegaan te zijn op de werkingsprincipes die aan de basis liggen van de draadloze communicatie, volgen hier een aantal technische vraagjes en een aantal technische opmerkingen

Beschrijf bondig de meest gebruikte antennetypes (de dipoolantenne en de Marconi-antenne). Theoretisch werkt elke zendantenne net zo goed als ontvangstantenne en omgekeerd.

Hoe kan een zender een ontvanger bereiken aan de andere kant van de aardbol?

Is de propagatiesnelheid van radiogolven altijd gelijk aan deze van het licht?

Wat is een BPF (band pass filter)? Teken de verhouding van de uitgangsspanning tot de ingangsspanning als functie van de frequentie. Definieer de centrale frequentie van een BPF.

Welke functie heeft een BPF in een ontvanger? Produceert de ontvangstantenne alleen een signaal met frequentie f_c (de frequentie van het signaal van de gewenste zender)?

Toon aan dat een parallel RLC-kring kan fungeren als een BPF. Hierbij is de centrale frequentie van de BPF de resonantiefrequentie van de RLC-kring. Ga hierbij uit van het verloop van de kringimpedantie in functie van de frequentie. Teken een

vectordiagram met de zelfinductiestroom i_L , de condensatorstroom i_C en de totale stroom i_T .

Het afstemmen van een zender betekent dat we de gewenste zender (frequentie) moeten selecteren uit de talloze andere zenders. Dit betekent dat we door een andere L of C te kiezen de resonantiefrequentie van de keten gelijk maken aan de f_C van de zender welke we wensen te ontvangen. In de praktijk is het meestal de C die variabel is en niet de zelfinductie L (zo is bijvoorbeeld $L = 200 \mu\text{H}$ en is C regelbaar tussen 50 pF en 450 pF).

Het is tenslotte belangrijk om op te merken dat er in een “volwassen” ontvanger meerdere banddoorlaatfilters noodzakelijk zijn. De verklaring zult u onder meer vinden in de cursussen ‘Telecommunicatie’ en ‘Zenders en ontvangers’ in het derde en vierde jaar elektronica.

2: Overdracht van analoge informatie

2.1: Inleiding

Hoe fungeert een microfoon? Hoe fungeert een hoofdtelefoon of luidspreker? Wat gebeurt er indien men een microfoon en een hoofdtelefoon met elkaar verbindt? Dit laatste kan gebeuren met of zonder tussengeschakelde versterker.

Zoals uitgelegd in het vijfde hoofdstuk, produceert de microfoon een AC-spanning die op elk ogenblik een elektrische vertaling is van het geluid. Dit AC-sigitaal willen we draadloos overbrengen naar een afgelegen plaats. Een zendantenne zet deze AC-spanning om naar een elektromagnetische golf. Deze elektromagnetische golf wordt door een ontvangstantenne ontvangen en omgevormd tot een AC-spanning. Indien we daar deze AC-spanning aanbieden aan een luidspreker, dan zal deze laatste het originele geluid reproduceren. Dit is het grondprincipe van de radio.

Via een zelfde werkwijze kan een camera een beeld omvormen tot een AC-spanning. Via een zendantenne wordt deze spanning omgevormd tot een elektromagnetische golf die de ether in gestuurd wordt. Een ontvangstantenne ontvangt die en zet ze terug om naar een AC-spanning die een monitor voedt. Deze monitor reproduceert het originele beeld. Dit is het werkingsprincipe van de televisie.

Vanzelfsprekend zijn de door de microfoon of camera geproduceerde AC-spanningen (deze spanningen worden vaak kortweg de “informatie” genoemd) doorgaans verre van sinusoïdaal. In feite kan de informatie aanzien worden als de som van een variërend aantal (gelijktijdig optredende) sinusoïden met diverse amplitudes en frequenties. Meer uitgewerkte uitleg is te vinden in de cursus ‘Toepasbare Analyse’ van Dr. R. Rousseau.

Niettemin staande de gegevens uit de vorige alinea, doet men eenvoudigheidshalve vaak alsof de informatie op elk ogenblik slechts 1 zuivere sinus bevat. Deze vereenvoudiging doet niets af van de werkelijke werkingsprincipes van radioschakelingen.

Meestal noemen we de informatie (dus het AC-signaal dat uit een microfoon of videocamera komt) $v_m(t)$. We stellen $v_m(t) = V_m \cos(\omega_m t)$. Uit het bovenstaande blijkt dat we zowel V_m als ω_m als veranderlijk moeten beschouwen.

2.2: Spraak, geluid en videosignalen

Langs draadloze weg is het zowel mogelijk om spraak, geluid als videosignalen te versturen. In deze paragraaf leggen we het verschil uit tussen deze verschillende types data.

Spraak bestaat doorgaans uit een som van vele trillingen met uiteenlopende amplitudes en frequenties. Spraak is goed verstaanbaar bij weergave van alle frequenties van 300 Hz tot 3000 Hz. Verklaar dit! Het radiosysteem moet dan ook zorgen voor de overbrenging van sinussen $v_m(t) = V_m \cos(\omega_m t)$ ($f_m = \omega_m/2\pi$) waarbij f_m alle waarden tussen 300 Hz en 3000 Hz kan aannemen.

In het geval van spraak, heeft men bijgevolg van bandbreedte B van 1 decade of 1000%. Men spreekt ook soms van een bandbreedte $B = 3000 \text{ Hz} - 300 \text{ Hz} = 2700 \text{ Hz}$.

Geluid bestaat doorgaans uit een som van vele trillingen met zeer uiteenlopende amplitudes en frequenties. We bekommen een geluidsoverdracht van zeer goede kwaliteit als wij alle frequenties van 20 Hz tot 20 kHz kunnen doorgeven. Verklaar dit! Ons radiosysteem moet dan ook zorgen voor de overbrenging van sinussen $v_m(t) = V_m \cos(\omega_m t)$ waarbij f_m alle waarden tussen 20 Hz en 20000 Hz kan aannemen.

In het geval van geluid heeft men een bandbreedte B van 3 decaden.

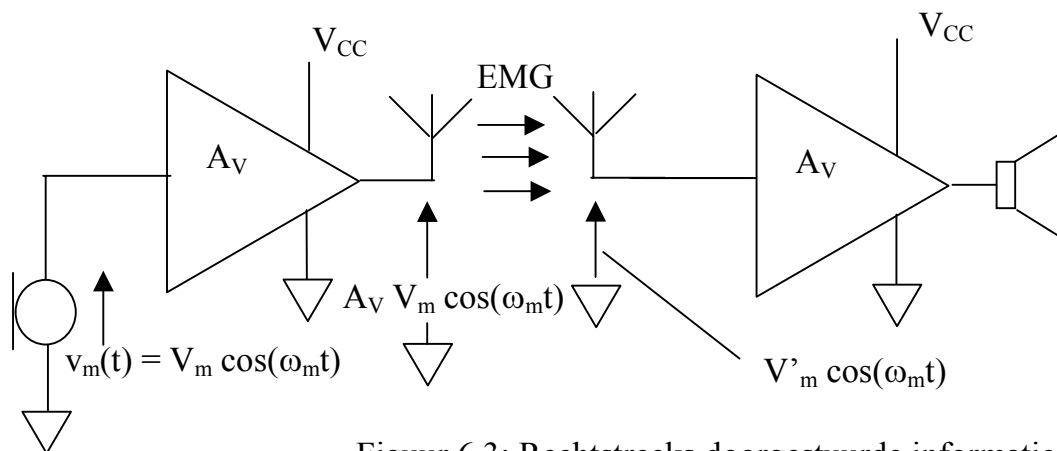
Videosignalen eisen een veel grotere bandbreedte dan spraak of geluid. Bij standaard TV-signalen worden alle frequenties van 0 Hz tot ongeveer 5 MHz weergegeven. Voor beelden met een zeer hoge resolutie gaat men zelfs tot 20 MHz en meer.

2.3: Rechtstreekse uitzending van de informatie: foute aanpak

Uitgaande van Figuur 6.2 en de uitleg in Paragraaf 2.1, zou men voor de draadloze overdracht van geluidssignalen de onderstaande Figuur 6.3 kunnen voorstellen (bij videosignalen kan men zich een gelijkaardige opstelling inbeelden).

De zenderzijde bestaat uit een microfoon die het geluidssignaal omvormt tot een elektrisch signaal $v_m(t) = V_m \cos(\omega_m t)$ van dezelfde frequentie. Dit signaal wordt versterkt met een versterkingsfactor A_V . Dit versterkte signaal wordt aangelegd aan de

zendantenne die dit elektrisch signaal omvormt tot elektromagnetische golven met dezelfde pulsatie (frequentie).



Figuur 6.3: Rechtstreeks doorgestuurde informatie

De elektromagnetische golven planten zich voort doorheen de ether en bereiken de ontvangstantenne.

De elektromagnetische golven worden door de ontvangstantenne omgevormd tot een elektrisch signaal $V'_m \cos(\omega_m t)$. Hierbij is V'_m een flink stuk kleiner dan $A_V V_m$. Daarom is er aan de ontvangtzijde eveneens een versterker die $V'_m \cos(\omega_m t)$ terug versterkt. Dit versterkte signaal (met nog steeds dezelfde frequentie als het geluidssignaal bij de microfoon) wordt nu aangelegd aan een luidspreker.

Die luidspreker zet een elektrisch signaal om in een geluidssignaal. Dit betekent dat de luidspreker het geluidssignaal terug produceert die ontvangen is door de microfoon aan de zenderzijde (dezelfde frequentie).

Hoewel de bovenstaande uitleg en Figuur 6.3 vanuit een puur theoretisch standpunt zou kunnen werken, is het in de praktijk echter uitgesloten het zo te bouwen. Het is in de realiteit gewoonweg niet realiseerbaar. Waarom niet?

Deze aanpak werkt niet om meerdere redenen. We stippen hier gewoon een aantal items aan. Werk ze zelf uit. Hoe zit het met de afmetingen van de antennes? Als men werkt bij een lage pulsatie ω_m moeten de afmetingen van de antennes veel te groot zijn. Er zijn ook propagatiemoeilijkheden en er is een gebrek aan selectiviteit tussen de verschillende zenders.

3: Het modulatieprincipe

Zoals gezegd, geeft de aanpak beschreven in de voorgaande paragraaf geen voldoening. Inderdaad, het informatiesignaal (microfoon- of videocamerasignaal) $v_m(t)$

kan niet rechtstreeks uitgezonden worden. Een dergelijk signaal bevat terzelfdertijd veel te lage frequenties en veel te hoge frequenties. Dit betekent dat het signaal een veel te grote bandbreedte (1000% of meer) heeft.

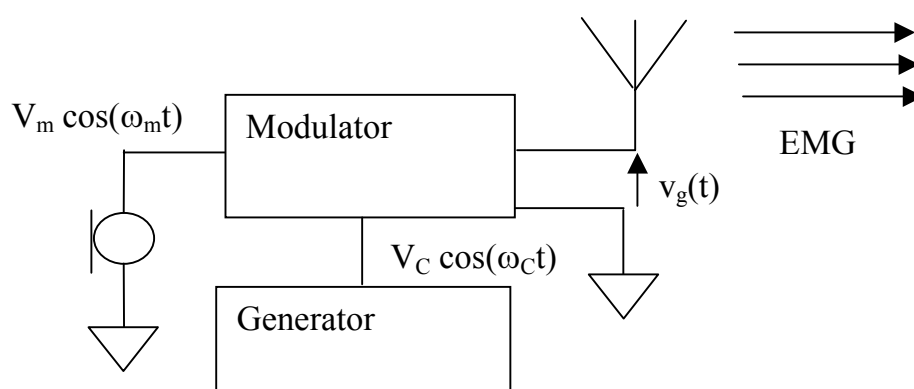
In Paragraaf 2.2 hebben we inderdaad gezien dat spraak een bandbreedte heeft van 1 decade terwijl geluid een bandbreedte heeft van 3 decaden. Videosignalen hebben een nog grotere bandbreedte.

Een hoogfrequent signaal (frequentie zeker groter dan 10 kHz) met smalle bandbreedte (1 enkele sinus met hoge frequentie f_c , of desnoods een aantal sinussen met frequenties die hoogstens enkele % van f_c afwijken) kan daarentegen wel met goed gevolg uitgezonden en ontvangen worden.

We zullen bijgevolg alleen een hoogfrequent signaal $v_c(t) = V_c \cos(\omega_c t)$ uitzenden. In eerste instantie is $v_c(t)$ een zuivere (onvervormde) sinus. Vervolgens gaan we het over te brengen informatiesignaal $v_m(t)$ uitsluitend aanwenden om er het hoogfrequente signaal $v_c(t)$ mee te “vervormen”. Dit “vervormen” noemt men moduleren. De modulatie gebeurt op een dusdanige manier dat het bekomen hoogfrequente signaal een soort “afdruk” is van het over te brengen informatiesignaal $v_m(t)$. Hoe dit precies in zijn werk gaat zien we later.

Houd wel in uw gedachten dat $v_c(t)$ de hoogfrequente draaggolf is. De notatie $v_c(t)$ was reeds eerder gebruikt om het spanningsverloop over een condensator C aan te duiden. Hier is de betekenis van de spanning $v_c(t)$ dus totaal anders. Ook verderop in de cursus zal het u uit de context duidelijk moeten worden wat met een spanning genoteerd als $v_c(t)$ bedoeld is.

3.1: De zendinstallatie



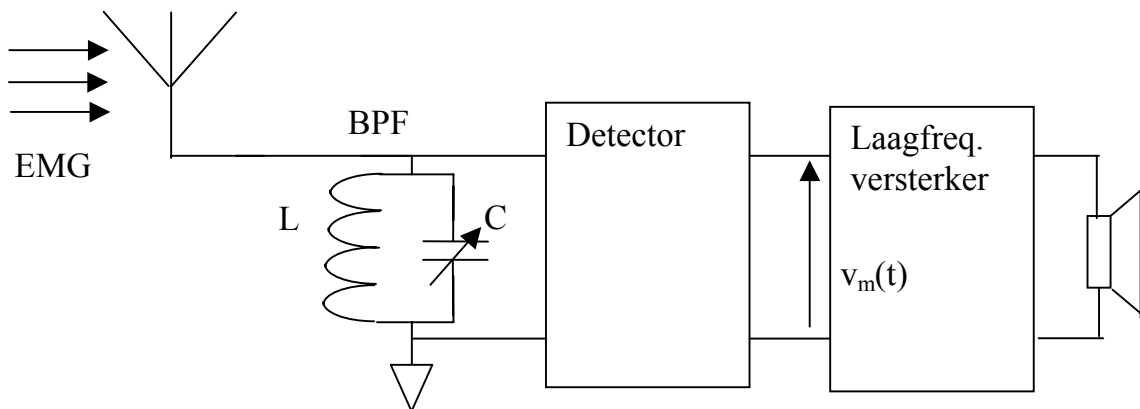
Figuur 6.4: Zendinstallatie

De zendinstallatie is voorgesteld in de onderstaande figuur. Herken de generator die de draaggolf $V_c \cos(\omega_c t)$ genereert. Herken de microfoon die het informatiesignaal $v_m(t)$ genereert. Herken de modulator die het informatiesignaal $V_m \cos(\omega_m t)$ en de draaggolf

$V_C \cos(\omega_C t)$ combineert tot $v_g(t)$. Dit gemoduleerde signaal $v_g(t)$ (dat net zoals $v_C(t)$ hoogfrequent is) wordt via de antenne omgevormd tot elektro-magnetische golven. Die elektro-magnetische golven planten zich dan voort doorheen de ether.

3.2: De ontvangstinstallatie

Tenslotte is er nog de ontvangstinstallatie voorgesteld in de volgende figuur.



Figuur 6.5: Ontvangstinstallatie

Herken bij Figuur 6.5 de ontvangstantenne, de BPF, de detector of demodulator, eventueel een laagfrequentie-versterker en tenslotte de luidspreker.

Op de ontvangstantenne ontstaat er een AC-spanning die dezelfde frequentie en golfvorm heeft als het uitgezonden signaal $v_g(t)$. Dit signaal is enkel kleiner geworden t.o.v. het originele gemoduleerde signaal $v_g(t)$. Zoals steeds is er na de antenne een BPF die toelaat 1 enkele zender te selecteren. Ook na die BPF is er een signaal die dezelfde frequentie en golfvorm heeft als het originele uitgezonden en gemoduleerde signaal.

Na de BPF moet er een schakeling volgen die het gemoduleerde signaal terug omvormt tot $v_m(t)$. Dus het gemoduleerde hoogfrequente signaal $v_g(t)$ moet omgevormd worden tot het laagfrequente en breedbandige informatiesignaal $v_m(t)$. De schakeling die hiervoor zorgt is de demodulator of detector.

Tenslotte wordt dit signaal $v_m(t)$ (na een eventuele versterking) aan de luidspreker of video-monitor aangelegd. Dit betekent dat deze elementen het eerder door de microfoon of camera opgevangen geluid of beeld zullen reproduceren.

3.3: Opmerkingen en vragen

In wezen is het hoogfrequent signaal $v_C(t) = V_C \cos(\omega_C t)$ een hulpsignaal dat (via de aangebrachte “vervorming” of “modulatie”) dient om het informatiesignaal $v_m(t)$ van de zender naar de ontvanger over te dragen. Daarom wordt de hoogfrequente $v_C(t)$

vaak de draaggolf of drager genoemd. In het Engels spreekt men van “carrier” waar de index c vandaan komt. Op basis van de uitleg op de voorgaande bladzijden zou het duidelijk moeten zijn waarom een dergelijke carrier gebruikt wordt.

De schakeling die (aan de zenderzijde) de met $v_m(t)$ evenredige “vervorming” van $v_c(t)$ veroorzaakt noemt men de modulator. Deze modulator zorgt voor het zogenaamde modulatieproces of kortweg voor het moduleren. Het over te brengen informatiesignaal $v_m(t)$ wordt vaak het modulatiesignaal of kortweg “de modulatie” genoemd. Van deze benaming is de index m afkomstig.

De demodulator of detector (in de ontvanger) zorgt voor de demodulatie of detectie van de volgens $v_m(t)$ gemoduleerde $v_c(t)$. Eerder is al uitgelegd wat dit proces precies inhoudt.

4: Soorten modulatie

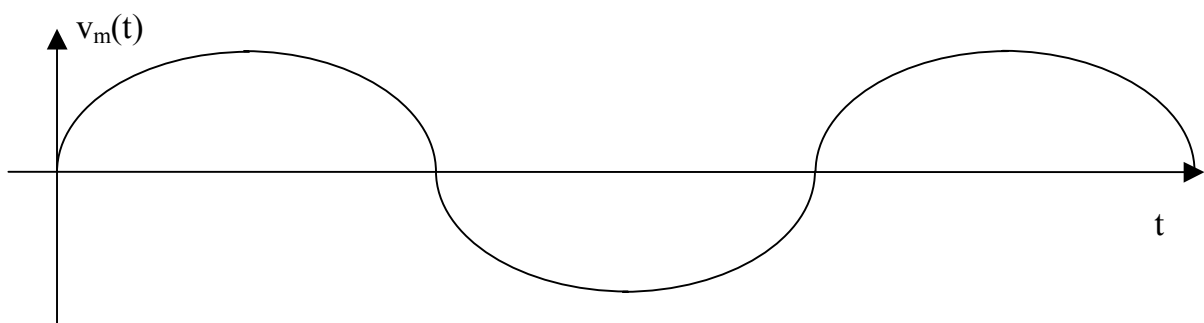
In de huidige paragraaf is het de bedoeling een overzicht te geven van de bestaande soorten modulatie waaronder amplitudemodulatie, frequentiemodulatie en fasemodulatie. Een diepgaander studie van amplitudemodulatie vindt u in Paragraaf 5.

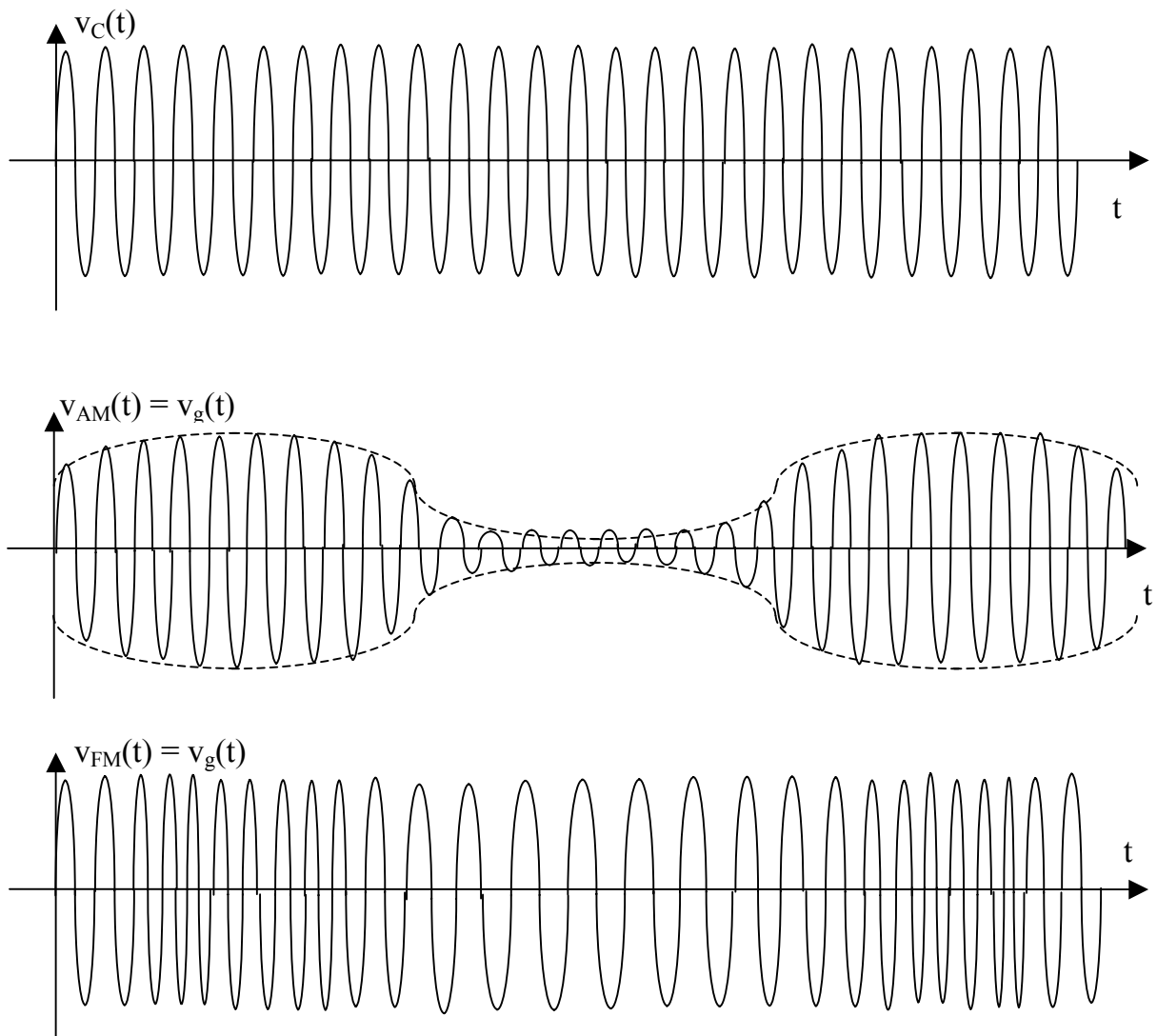
We vertrekken van de hoogfrequente draaggolf $v_c(t) = V_C \cos(\omega_C t + \phi_C)$ ($f_C = \omega_C/2\pi$). De over te brengen informatie (bijvoorbeeld een audio- of een videosignaal) stellen we voor als $v_m(t) = V_m \cos(\omega_m t)$. Doorgaans is $v_m(t)$ een laagfrequente breedbandige AC-spanning.

Het is de bedoeling om onze drager $v_c(t)$ te moduleren zodanig dat op onze drager een duidelijke afdruk van $v_m(t)$ ontstaat. Op die manier wordt een gemoduleerde draaggolf bekomen. Deze wordt uitgezonden en terug ontvangen. Uit het ontvangen signaal kan de detector opnieuw het originele signaal $v_m(t)$ reproduceren.

De drager $v_c(t) = V_C \cos(\omega_C t + \phi_C)$ heeft drie parameters die evenredig met $v_m(t)$ kunnen variëren. Dit is enerzijds de amplitude V_C , de pulsatie ω_C en tenslotte de fase ϕ_C . In deze drie gevallen wordt achtereenvolgens amplitudemodulatie (AM), frequentiemodulatie (FM) en fasemodulatie (PM) bekomen.

De onderstaande figuur illustreert AM en FM.





Figuur 6.6: AM en FM

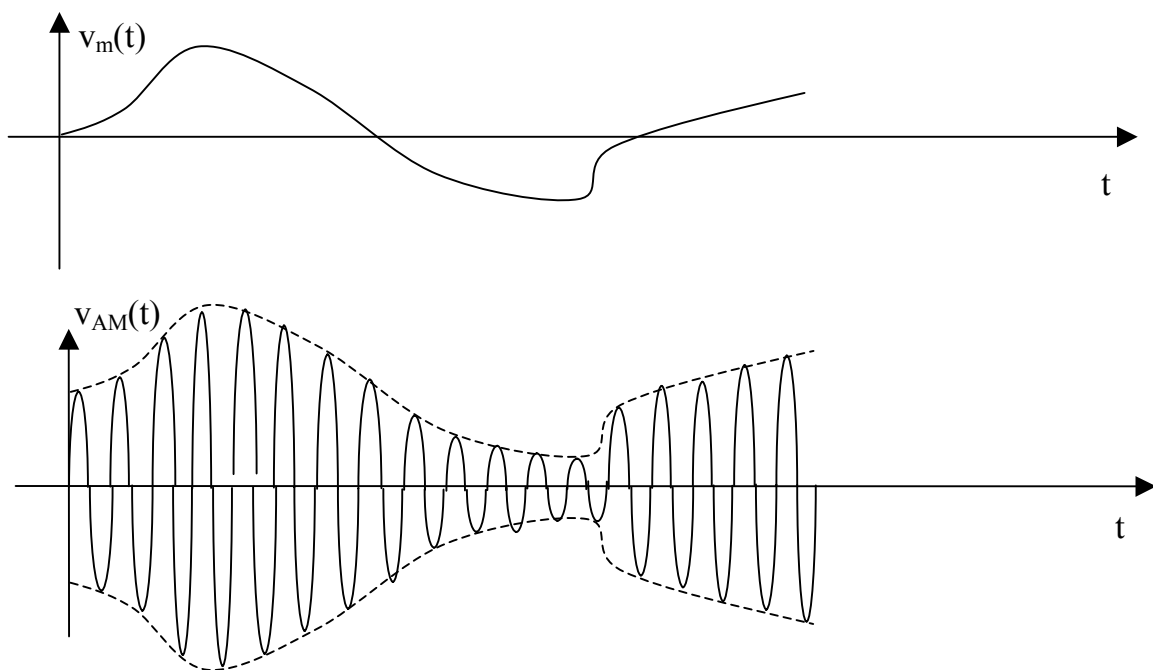
4.1: Amplitudemodulatie

Zoals op Figuur 6.6 te zien is, heeft het amplitude gemoduleerde signaal $v_{AM}(t)$ geen constante amplitude. De amplitude van $v_{AM}(t)$ varieert lineair mee met $v_m(t)$. Indien $v_m(t)$ groter en positiever wordt, dan neemt de amplitude van $v_{AM}(t)$ toe. Indien $v_m(t)$ negatief wordt, dan neemt de amplitude van $v_{AM}(t)$ af ten opzichte van de amplitude die $v_{AM}(t)$ had terwijl $v_m(t)$ nul was (zie Figuur 6.6).

Aangezien dus de amplitude van $v_{AM}(t)$ evenredig is met de grootte van $v_m(t)$, verloopt de omhullende van $v_{AM}(t)$ precies volgens het over te brengen laagfrequente signaal $v_m(t)$.

Dit betekent dat het hoogfrequente signaal $v_{AM}(t)$ (dat uitgezonden wordt en verzwakt ontvangen wordt) een perfecte afdruk bevat van het over te brengen informatiesignaal $v_m(t)$. Dit betekent dat het mogelijk is om in de ontvanger vanuit $v_{AM}(t)$ het signaal $v_m(t)$ te reproduceren. Hiermee is dus de gewenste draadloze overdracht van $v_m(t)$ gerealiseerd.

De overdracht via AM-modulatie is niet beperkt tot sinusvormige signalen zoals dit het geval was in Figuur 6.6. Dat is maar goed ook, want audio- of videosignalen zijn zelden of nooit perfect sinusoïdaal zijn. Dit is in Figuur 6.7 geïllustreerd met behulp van een willekeurig gekozen signaal $v_m(t)$.



Figuur 6.7: Amplitude gemoduleerd signaal

Op de bovenstaande figuur blijkt duidelijk dat de frequentie van $v_{AM}(t)$ constant blijft en gelijk is aan de frequentie van de carrier $v_c(t)$. Wel varieert de amplitude.

4.2: Frequentiemodulatie

Tot nu toe hebben we hoofdzakelijk amplitudemodulatie besproken. Maar zoals op Figuur 6.6 te zien is, bestaat er ook de mogelijkheid een signaal $v_{FM}(t)$ te bekomen.

Het is duidelijk dat de amplitude van $v_{FM}(t)$ constant is. Wat echter niet constant is, dat is de frequentie van $v_{FM}(t)$. Dit betekent dat de frequentie van de carrier gewijzigd wordt. Die wijziging gebeurt proportioneel met de ogenblikkelijke waarde van $v_m(t)$.

Inderdaad, als $v_m(t)$ groter wordt, dan wordt ω_C groter. Als $v_m(t)$ kleiner wordt, dan wordt ω_C kleiner.

In de huidige cursus worden enkel AM-modulatie en AM-demodulatie bestudeerd. Meer informatie in verband met frequentiemodulatie kunt u terug vinden in de cursussen die in het derde en vierde jaar gedoceerd worden.

4.3: Fasemodulatie

Een sinusgolf wordt gekenmerkt door drie parameters, de amplitude, de frequentie en de fase. Dit betekent dat we algemeen schrijven $v_C(t) = V_C \cos(\omega_C t + \phi_C)$.

We hebben al gezien dat het mogelijk is om V_C en ω_C afhankelijk te maken van de ogenblikkelijke grootte van $v_m(t)$. Het is eveneens mogelijk om ϕ_C afhankelijk te maken van de grootte van $v_m(t)$. Dit noemt men fasemodulatie. Fasemodulatie wordt afgekort als PM welke afkomstig is van de Engelstalige benaming “Phase Modulation”.

Het is mogelijk om aan te tonen dat fasemodulatie een speciale vorm is van frequentiemodulatie. Hiervoor verwijzen we echter naar cursussen die gedoceerd worden in het derde en het vierde jaar.

In de huidige cursus worden enkel AM-modulatie en AM-demodulatie bestudeerd. Meer informatie in verband met fasemodulatie kunt u terug vinden in de cursussen die in het derde en vierde jaar gedoceerd worden.

5: Amplitudemodulatie

In de voorgaande paragraaf hebben we een overzicht gegeven van een aantal modulatie technieken. Daarbij hebben we amplitudemodulatie niet enkel vermeld maar ook kort uitgelegd. In de huidige paragraaf zullen we een stuk dieper ingaan op de werking van amplitudemodulatie.

5.1: Inleiding

Bij amplitudemodulatie wordt de amplitude van een hoogfrequent signaal gewijzigd in functie van de over te brengen informatie. Het hoogfrequent signaal, ook draaggolf (carrier) genoemd, is altijd een sinusvormig signaal en wordt in de verdere uitwerking voorgesteld door $v_C(t) = V_C \cos(\omega_C t)$ ($\phi_C = 0$ genomen). Hierbij is $f_C = \omega_C/2\pi$ de zendfrequentie.

De over te brengen informatie wordt het modulerend of laagfrequent signaal genoemd. Dit signaal kan een willekeurige vorm hebben. Om echter de verdere uitwerking te vereenvoudigen, zullen we uitgaan van een modulerend signaal dat maar één toon bevat: $v_m(t) = V_m \cos(\omega_m t)$.

Hierbij is het belangrijk dat $\omega_m \ll \omega_C$.

5.2: Analytische uitwerking

Het AM-signaal met een draaggolf $v_C(t) = V_C \cos(\omega_C t)$ en een modulerend signaal $v_m(t) = V_m \cos(\omega_m t)$, kan wiskundig als volgt voorgesteld worden:

$$V_{AM}(t) = (V_C + V_m \cos(\omega_m t)) \cos(\omega_C t).$$

De amplitude van de draaggolf moet immers afhankelijk gemaakt worden van het modulerend signaal. Een verdere uitwerking van de bovenstaande formule geeft de volgende uitdrukkingen:

$$V_{AM}(t) = V_C(1 + m \cos(\omega_m t)) \cos(\omega_C t)$$

$$V_{AM}(t) = V_C \cos(\omega_C t) + (m/2) V_C \cos(\omega_C - \omega_m)t + (m/2) V_C \cos(\omega_C + \omega_m)t.$$

Hierbij is $m = V_m/V_C$ de modulatiediepte.

De drie bovenstaande uitdrukkingen van $v_{AM}(t)$ zijn alle drie identiek. De eerste twee zijn handig indien we het signaal $V_{AM}(t)$ willen uittekenen in het tijdsdomein en de derde uitdrukking is handig indien we het signaal willen voorstellen in het frequentiedomein.

Ga zelf na wat de drie termen in de derde uitdrukking van $v_{AM}(t)$ voorstellen. Vul alle frequenties in als de zendfrequentie f_C bijvoorbeeld 1 MHz is en het over te brengen microfoonsignaal een sinus is met een frequentie $f_m = 1$ kHz.

De frequenties $(f_C - f_m)$ en $(f_C + f_m)$ worden respectievelijk de onderste en de bovenste zijfrequenties genoemd. Wanneer het modulerend signaal een complex signaal is, dan spreken we van zijbanden in plaats van zijfrequenties. Het signaal $v_{AM}(t)$ bevat een draaggolf, een onderste zijfrequentie en een bovenste zijfrequentie. Merk hierbij wel op dat de nuttige informatie niet in de draaggolf zit, maar in elk van de zijbanden.

Het is bij de uitzending mogelijk om de draaggolf te onderdrukken en dus enkel de zijbanden uit te zenden. Dit betekent een belangrijke energiebesparing. Het is ook mogelijk om enkel de onderste zijband of enkel de bovenste zijband uit te zenden. Op die manier vereist de uitzending nog minder energie.

Wat bedoelt men met DSB-, SSB-, LSB- en USB-uitzendingen?

DSB is de Engelstalige afkorting van double side band. Bij een DSB-uitzending worden beide zijbanden uitgestuurd samen met de draaggolf. Indien enkel de twee

zijbanden uitgestuurd worden (dus zonder draaggolf), dan spreekt men van double side band with suppressed carrier.

Bij een SSB-uitzending (single side band) wordt slechts één zijband uitgezonden. Is die ene zijband die uitgezonden wordt de onderste zijband, dan spreekt men van LSB (lower side band). Is die ene zijband die uitgezonden wordt de bovenste zijband, dan spreekt men van USB (upper side band).

In de huidige cursus beperken we ons weliswaar tot amplitude gemoduleerde signalen waarbij zowel de draaggolf alsook de beide zijbanden uitgezonden worden.

5.3: De modulatie diepte

In de analytische uitwerking kwam het begrip ‘modulatie diepte’ voor. De modulatie diepte m is per definitie gelijk aan de verhouding van de amplitude van het modulerend signaal tot de amplitude van de draaggolf:

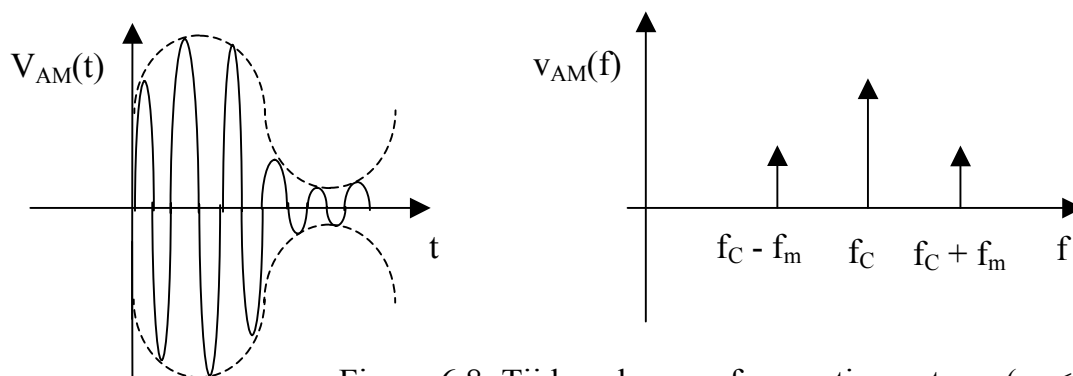
$$m = V_m/V_C.$$

De modulatie diepte wordt ook vaak procentueel uitgedrukt:

$$\%m = (V_m/V_C) \cdot 100\%.$$

Er kunnen zich nu drie gevallen voordoen. In het eerste geval is de modulatie diepte kleiner dan 100%, in het tweede geval is de modulatie diepte precies 100% en in het derde geval is de modulatie diepte groter dan 100%.

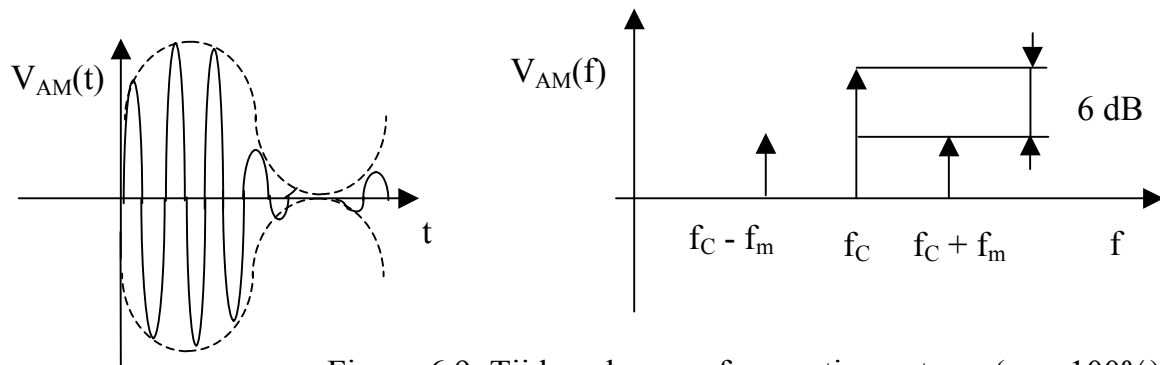
Indien de modulatie diepte kleiner is dan 100%, dan is de amplitude van het AM-signaal steeds groter dan nul. In dit geval treedt er geen vervorming op. Hieronder in Figuur 6.8 is het tijdsverloop van $v_{AM}(t)$ weergegeven samen met het bijhorende frequentiespectrum. Het frequentiespectrum bevat de frequenties f_C , $f_C - f_m$ en $f_C + f_m$. Bemerk wel dat het frequentiespectrum in Figuur 6.8 niet op maat getekend is. In realiteit is $f_m \ll f_C$ waardoor $f_C - f_m$ en $f_C + f_m$ erg dicht bij f_C gelegen zijn.



Figuur 6.8: Tijdsverloop en frequentiespectrum ($m < 100\%$)

Een dergelijk tijdsverloop kan opgemeten worden met behulp van een oscilloscoop. Het frequentiespectrum kan opgemeten worden met behulp van een spectrum-analyser.

Indien de modulatiediepte gelijk is aan 100%, dan krijgen we als tijdsverloop en als frequentiespectrum de volgende Figuur 6.9.

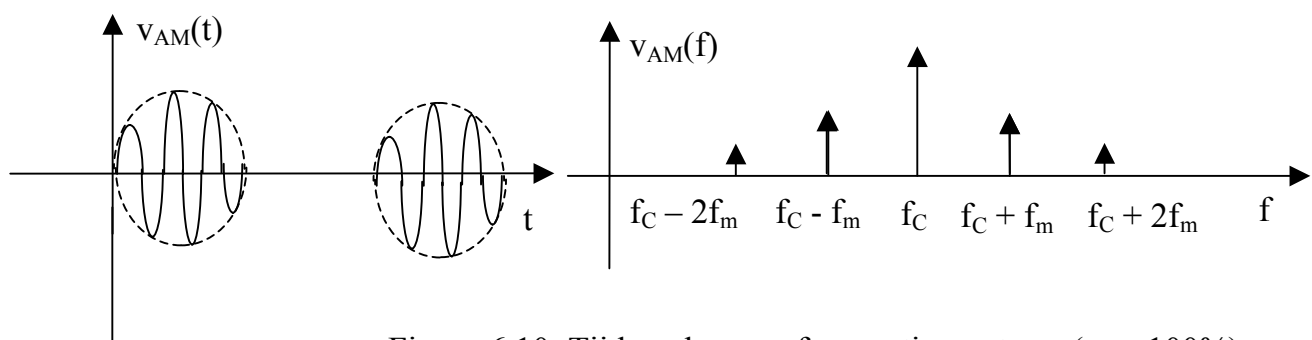


Figuur 6.9: Tijdsverloop en frequentiespectrum ($m = 100\%$)

De amplitude van het AM-sigitaal varieert tussen 0 en $2V_C$. Het frequentiespectrum bevat de frequenties f_C , $f_C - f_m$ en $f_C + f_m$. Zoals verder wordt aangetoond, bedraagt het verschil in signaalsterkte tussen de draaggolf en één zijband precies 6 dB. Er treedt nog net geen vervorming op.

Meer uitleg in verband met het gebruik van de decibel (dB) vindt u in Bijlage 5. Een verschil in signaalsterkte van 6 dB tussen de draaggolf en één zijband betekent dat de amplitude van de draaggolf dubbel zo groot is als de amplitude van een zijfrequentie. Inderdaad, steunende op de resultaten bekomen in Paragraaf 5.2 geldt met $m = 1$ dat $v_{AM}(t) = V_C \cos(\omega_C t) + (V_C/2) \cos(\omega_C - \omega_m)t + (V_C/2) \cos(\omega_C + \omega_m)t$.

Indien de modulatiediepte groter is dan 100%, dan krijgen we als tijdsverloop en als frequentiespectrum de volgende Figuur 6.10.



Figuur 6.10: Tijdsverloop en frequentiespectrum ($m > 100\%$)

Zoals duidelijk is op de Figuur 6.10 blijft het AM-sigitaal nul gedurende een zeker tijdsinterval. Hierdoor ontstaan er naast de twee gewenste zijfrequenties $f_C - f_m$ en $f_C + f_m$ ook nog andere frequentiecomponenten. Inderdaad, het hier getekende

frequentiespectrum bevat niet enkel de frequenties f_C , $f_C - f_m$ en $f_C + f_m$, maar ook de frequenties $f_C - 2 f_m$, $f_C + 2 f_m$, $f_C - 3 f_m$, $f_C + 3 f_m$ enzovoort.

Er zal een sterke vervorming optreden van het signaal. Bovendien kan die vervorming storingen veroorzaken bij andere zenders. Een modulatie diepte groter dan 100% is dus absoluut niet toegelaten.

Hoe zal men de modulatie diepte in praktijk kiezen? Waarom? Wat doet men indien $v_m(t)$ voortdurend varieert?

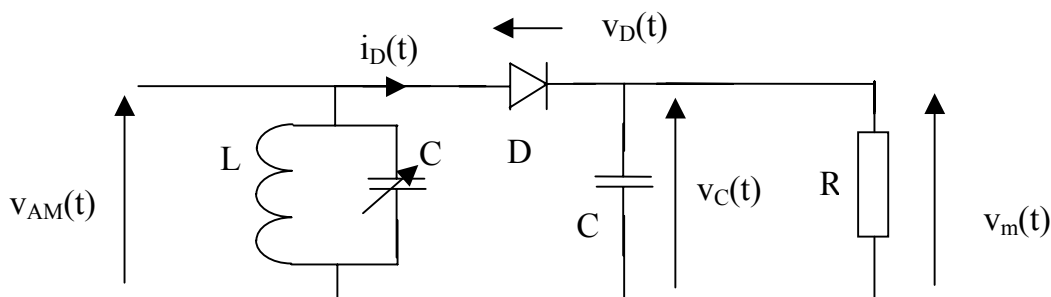
6: AM-detectoren

Uitgaande van het ontvangen gemoduleerde HF-signaal $v_{AM}(t)$, moet de modulator of detector in de ontvanger het oorspronkelijke informatiesignaal $v_m(t)$ reproducen. Met andere woorden, de informatie vevat in $v_{AM}(t)$ moet teruggewonnen worden

Er zijn twee belangrijke types AM-detectoren, de diode detector en de synchroon detector.

6.1: De diode detector

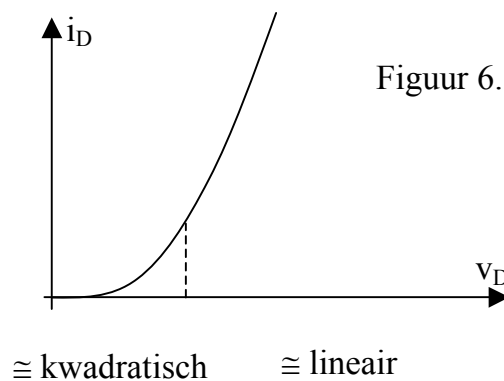
De diode detector is de meest eenvoudige schakeling waarmee een AM-signaal kan gedemoduleerd worden. Ze is voorgesteld in de onderstaande figuur.



Figuur 6.11: De diode detector

De eigenschappen van deze diode detector zijn afhankelijk van de grootte van het ingangssignaal.

Bij kleine ingangsamplitudes werkt de diode in het kwadratisch gedeelte van de spanning-stroom-karakteristiek. Bij voldoende grote ingangsamplitudes werkt de diode veel meer in het lineaire gedeelte van de spanning-stroom-karakteristiek.



Figuur 6.12: Diodekarakteristiek

Indien de diode in het kwadratische gedeelte gebruikt wordt, dan spreken we van een kwadratische detector. Indien de diode in het lineaire gedeelte gebruikt wordt, spreken we van een omhullende detector. Dus zowel de kwadratische detector als de omhullende detector zijn allebei een diodedetector.

6.2: De kwadratische detector

Bij een kwadratische detector (dus de detector van Figuur 6.11 met een klein ingangssignaal) wordt het AM-signaal aangelegd aan een niet-lineair element. We veronderstellen hierbij dat het verband tussen het ingangssignaal en het uitgangssignaal weergegeven wordt door een tweedegraadsvergelijking:

$$V_O(t) = k_0 + k_1 v_i(t) + k_2 v_i^2(t).$$

Wanneer we $v_i(t)$ gelijkstellen aan $V_C (1 + m \cos(\omega_m t)) \cos(\omega_C t)$, dan vinden we, na uitwerking, dat het signaal $v_O(t)$ de pulsaties ω_C , $\omega_C - \omega_m$, $\omega_C + \omega_m$, $2\omega_C$, $2(\omega_C - \omega_m)$, $2(\omega_C + \omega_m)$, $2\omega_C - \omega_m$, $2\omega_C + \omega_m$, ω_m en $2\omega_m$ bevat.

De laagfrequente componenten in $v_O(t)$ zijn:

- de nuttige component: $k_2 (m/2) (V_C)^2 \cos(\omega_m t)$
- de vervormingscomponent: $k_2 (m/2)^2 (V_C)^2 \cos(2\omega_m t)$.

De hoogfrequente componenten in $v_O(t)$ worden weg gefilterd met behulp van een laagdoorlaatfilter. Dit betekent dat enkel de laagfrequente componenten overblijven.

Uit deze berekeningen blijkt dat het gedemoduleerde signaal steeds aanzienlijk vervormd is. Die vervorming neemt bovendien toe naarmate de modulatie diepte groter wordt. Dit alles heeft tot gevolg dat de kwadratische detector weinig gebruikt wordt.

Wanneer we een diodedetector als AM-demodulator willen gebruiken, dan zullen we er steeds voor zorgen dat de amplitudes van het ingangssignaal voldoende groot zijn

om in het lineaire gebied van de stroom-spanningskarakteristiek te werken. Mits een juiste dimensionering van de RC-kring, wordt de vervorming dan veel meer beperkt. Hiervoor verwijzen we echter naar de uitleg die hoort bij de omhullende detector.

6.3: De omhullende detector

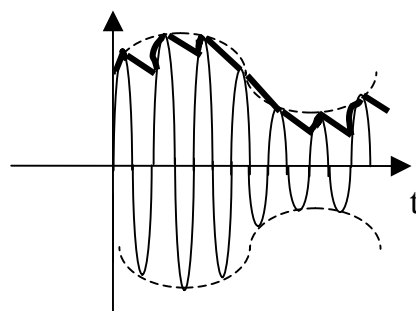
Een omhullende detector (dus de detector in Figuur 6.11 met een voldoende grote ingangsamplitude) werkt op een analoge manier als een enkelzijdige gelijkrichter met afvlakcondensator en belastingsweerstand.

Indien $v_{AM}(t) > v_C(t) + v_D(t)$, dan laadt de condensator zich op. Dit gebeurt met een tijdsconstante $R_d C$. Hierbij is R_d de dynamische weerstand van de diode D in doorlaatrichting. Het is van belang dat $R_d C$ kleiner is dan $1/f_C$ wat betekent dat C niet al te groot gekozen mag worden.

Indien $v_{AM}(t) < v_C(t) + v_D(t)$, dan spert de diode D en ontlaaft de condensator C zich met een tijdsconstante RC. Hierbij is $RC \gg R_d C$.

Dit laad- en ontlaadverschijnsel heeft tot gevolg dat de uitgangsspanning (welke gelijk is aan de spanning over de condensator, dus $v_C(t)$) een goede benadering kan zijn van de omhullende van hetingangssignaal. Dit betekent dat de uitgangsspanning een goede benadering is van $v_m(t)$.

De uitgangsspanning is bijgevolg van de vorm weergegeven in de onderstaande Figuur 6.13. U ziet op Figuur 6.13 de exacte omhullende in streeplijn. $v_{AM}(t)$ is in dunne volle lijn getekend. U ziet tenslotte de uitgang van de detector $v_C(t)$ in dikke lijn getekend. Dit is een goede benadering is van de exacte omhullende in streeplijn. Houd in gedachten dat $v_C(t)$ hier de spanning voorstelt over de condensator C en dat $v_C(t)$ hier niet de draaggolf is.



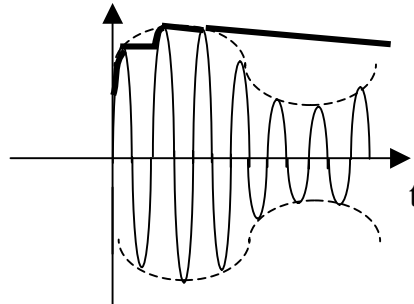
Figuur 6.13: Uitgangsspanning bij omhullende detector

6.4: Opmerkingen bij de omhullende detector

Nu is het niet zo vanzelfsprekend een mooie figuur als Figuur 6.13 te bekomen. Hiervoor moet er aan een aantal voorwaarden voldaan zijn. Inderdaad, de vervorming

van het gedemoduleerde signaal is bij dit type detector sterk afhankelijk van de keuze van de tijdsconstante RC.

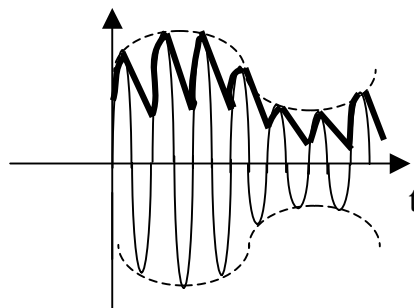
Wanneer RC te groot gekozen wordt ten opzichte van het LF-signaal, dan zal de spanning over de condensator niet snel genoeg dalen. De condensator zal niet snel genoeg ontladen op de ogenblikken dat de omhullende van $v_{AM}(t)$ daalt.



Figuur 6.14: Uitgangsspanning indien RC te groot is

Zoals op de bovenstaande Figuur 6.14 te zien is, heeft de uitgangsspanning (dikke continue lijn) absoluut niet te gewenste vorm.

Wanneer RC te klein gekozen wordt, dan krijgen we teveel rimpel aan de uitgang van de omhullende detector.



Figuur 6.15: Uitgangsspanning indien RC te klein is

Zoals op de bovenstaande Figuur 6.15 te zien is, heeft de uitgangsspanning (dikke continue lijn) niet de gewenste vorm. Indien RC verder daalt, dan zal deze rimpel nog groter worden zodat er nog meer vervorming optreedt.

De tijdsconstante RC kan dus te groot of te klein zijn. Meer specifiek kiest men

$$2\pi/\omega_C \ll RC \ll 2\pi/\omega_m.$$

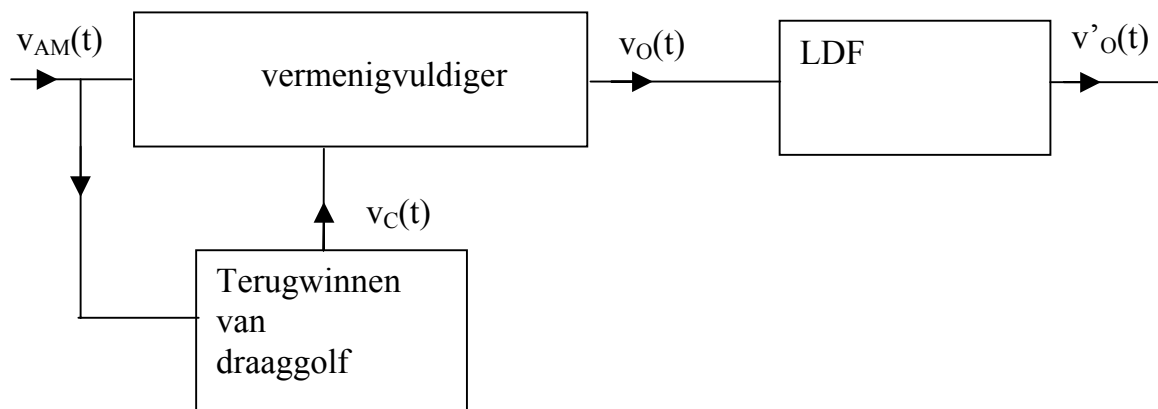
Zoals reeds eerder aangehaald moet liefst ook voldaan zijn aan de eis $R_d C < 2\pi/\omega_C$. Bovendien wil men de weerstand R voldoende groot teneinde de parallel LC-kring die voorafgaat aan de detector niet te veel belasten.

Een realistisch voorbeeld is een $C = 2,2 \text{ nF}$ met een $R = 22 \text{ k}\Omega$ gecombineerd met een diode met een $R_d < 100 \Omega$. Bij dit alles denken we aan een standaard AM-signaal met audiofrequenties van maximaal $4,5 \text{ kHz}$ en een $f_c = 1 \text{ MHz}$.

6.5: De synchroondetector

Was zowel de kwadratische detector als de omhullende detector een diodedetector zoals voorgesteld in Figuur 6.11, hier bespreken we een totaal ander type detector.

Een AM-signaal kan ook gedemoduleerd worden door het te vermenigvuldigen met zijn draaggolf.



Figuur 6.16: De synchroondetector

Meer specifiek bekomen we via Figuur 6.16 een

$$v_o(t) = v_{AM}(t) \cdot v_C(t)$$

$$v_o(t) = V_C (1 + m \cos(\omega_m t)) \cos(\omega_c t) \cdot \cos(\omega_c t + \varphi)$$

Door het signaal $v_o(t)$ aan te leggen aan de ingang van een laagdoorlaatfilter worden enkel de lage frequenties doorgelaten. De uitgang van de laagdoorlaatfilter is het signaal $v'_o(t)$. Hierbij is

$$v'_o(t) = (mV_C/2) \cos \varphi \cos(\omega_m t) + (V_C/2) \cos \varphi.$$

Dit is het oorspronkelijke signaal $v_m(t)$ die we gereconstrueerd hebben (op een DC-offset en een evenredigheidsfactor na).