

Technologische verkenning

Draadloze technieken en hun toepassingen

Dit document werd gemaakt in opdracht van Tecnolec in het kader van het project TechnologieWacht door:



HOWEST

Onderzoeksgroepen XIAK en ELIT

Graaf Karel de Goedelaan 5, 8500 Kortrijk

Henk Capoen, Wesley Cottegnie , Frederick Declercq, Jos Knockaert
(Hoofdstuk 1,2,3,4,5,6,8)



KAHO ST LIEVEN

Onderzoeksgroep Dramco

Gebroeders Desmetstraat 1, 9000 Gent

Lieven De Strycker, Jean-Pierre Goemaere , Nobby Stevens
(Hoofdstuk 7,9)



Instituut voor de Aanmoediging van Innovatie
door Wetenschap en Technologie in Vlaanderen



Lijst met afkortingen

3GPP:	3rd Generation Partnership Project
6LoWPAN:	IPv6 over Low Power WPAN
ACK:	Acknowledge
ADSL:	Asymmetric Digital Subscriber Line
AES:	Advanced Encryption Standard
AFH:	Adaptive Frequency Hopping
AM:	Amplitude Modulatie
AP:	Access Point
ASK:	Amplitude Shift Keying
BB:	Base Band
BER:	Bit Error Rate
BIPT:	Belgisch Instituut voor Post en Telecommunicatie
BPSK:	Binary PSK
BSC:	Base Station Controller
BSS:	Base Station Subsystem
BSS:	Basic Service Set
BTS:	Base Transceiver Station
CA:	Collision Avoidance
CCK:	Complementary Code Keying
CD:	Collision Detection
CDMA:	Code Division Multiple Access
CNR:	Carrier to Noise Ratio
CSMA:	Carrier Sense Multiple Access
CTS:	Clear to Send
DAB:	Digital Audio Broadcasting
DBPSK:	Differential Binary PSK
DC:	Direct Current
DCF:	Distributed Coordination Function
DIFS:	Distributed Interface Frame Space
DoS:	Denial of Service
DQPSK:	Differential Quadrature PSK
DRS:	Dynamic Rate Shifting
DS:	Distribution System

DSSS:	Direct-Sequence Spread Spectrum
DTF:	Distance to Fault
DVB:	Digital Video Broadcasting
EAP:	Extensible Authentication Protocol
EDGE:	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
E-EDGE:	Evolved EDGE
EHF:	Extremely High Frequency
EIRP:	Effective Isotropic Radiated Power
EPG	Electronic Programming Guide
ESS:	Extended Service Set
FDM:	Frequency Division Multiplexing
FDMA:	Frequency Division Multiple Access
FDR:	Frequency Domain Reflectometry
FFD:	Full Function Devices
FFT:	Fast Fourier Transform
FHSS:	Frequency Hopping Spread Spectrum
FSK:	Frequency Shift Keying
GSM:	Global System for Mobile Communications
GPS:	Global Positioning System
HART:	Highway Addressable Remote Transducer
HCI:	Host Controller Interface
HD	High Definition
HiFi	High Fidelity
HF:	High Frequency band
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
IBSS:	Independent Basic Service Set
IC:	Integrated Circuit
IEEE:	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP:	Internet Protocol
IR:	Infrared Radiation
ISA:	International Society of Automation
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISM:	Industrial, Scientific and Medical band
ITU:	International Telecommunications Union
IC:	Integrated circuit
LF:	Low Frequency band

LHCP:	Left Handed Circular Polarization
LLC:	Logic Link Control
LNB	Low Noise Block
LOS:	Line of Sight
LTE:	Long Term Evolution
LW:	Long Wave
MAC:	Medium Access Control
MIMO:	Multiple input Multiple output
MF:	Medium Frequency
MS	Mobile Station
MSC	Mobile service Switching Center
MW:	Medium Wave
NLOS:	Non Line of Sight
NSS	Network Switching Subsystem
OCARI:	Optimization of Ad Hoc Communications in Industrial Networks
OFDM:	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PCF:	Point Coordination Function
PSK:	Phase Shift Keying
PSK:	Pre-Shared-Key
QAM:	Quadrature Amplitude Modulation
QoS:	Quality of Service
QPSK:	Quadrature PSK
RADIUS:	Remote Authentication Dial In User Service
RF:	Radio Frequency
RFID:	Radio Frequency Identification
RFD:	Reduced Function Devices
RHCP:	Right Hand Circular Polarization
RL:	Return Loss
RSSI:	Received Signal Strength Indication
RTS:	Request to Send
SDMA	Space Division Multiple Access
SIFS:	Short Interface Frame Space
SHF:	Super High Frequency
SFN	Single Frequency Network
SSID:	Service Set Identifier

SW:	Short Wave
TDOA:	Time Difference Of Arrival
TDM:	Time Division Multiplexing
TDMA:	Time Division Multiple Access
TDR:	Time Domain Reflectometry
TKIP:	Temporal Key Integrity Protocol
TOA:	Time Of Arrival
TWR:	Two Way Ranging
UHF:	Ultra High Frequency
UMTS:	Universal Mobile Telecommunication System
UTP:	Unshielded Twisted Pair
UV:	Ultra Violet
VHF:	Very High Frequency
VLf:	Very Low Frequency
VPN:	Virtual Private Network
VSWR:	Voltage Standing Wave Ratio
WBAN:	Wireless Body Area Network
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WEP:	Wired Equivalent Privacy
WLAN:	Wireless Local Area Network
WMAN:	Wireless Metropolitan Area Network
WPA:	Wi-Fi Protected Access
WRAN:	Wireless Regional Area Network

Inhoud

1.	Inleiding en overzicht van het document	10
2.	Situering van draadloze communicatie	11
2.1.	Geschiedenis	11
2.2.	Draadloze netwerken	11
2.3.	Noodzaak en voordelen van draadloze netwerken t.o.v. bedrade netwerken.....	12
2.4.	Referenties	13
3.	Fundamentele principes van draadloze communicatie	14
3.1.	Inleiding.....	14
3.2.	Elektromagnetische golf.....	14
3.2.1.	Veldsterkte	14
3.2.2.	Frequentie en golflengte	15
3.2.3.	Polarisatie van een elektromagnetische golf	15
3.3.	Frequentiespectrum en frequentiebanden.....	16
3.4.	Propagatie-eigenschappen van elektromagnetische golven	18
3.4.1.	Free-space path loss	19
3.4.2.	Reflectie, transmissie en absorptie	19
3.4.3.	DiffRACTIE en verstrooiing.....	20
3.4.4.	Interferentie.....	21
3.4.5.	Multipath fading.....	21
3.4.6.	Delay spread of vertragingsspreiding.....	22
3.4.7.	Fresnel zone.....	23
3.5.	Friss formule.....	23
3.5.1.	Link budget en link margin.....	24
3.5.2.	Uitbreiding van het padverlies: verlies exponent	25
3.6.	Datasnelheid en signaalruis verhouding	25
3.6.1.	Datasnelheid	25
3.6.2.	Signaalruisverhouding	25
3.7.	Referenties	26
4.	Modulatie en multiplex methodes	27
4.1.	Inleiding.....	27
4.2.	Amplitude Shift Keying	28
4.3.	Frequency Shift Keying.....	28
4.4.	Phase Shift Keying	29

4.5.	Quadrature Amplitude Modulatie	30
4.6.	Direct-sequence spread spectrum	31
4.7.	Frequency Hopping Spread Spectrum.....	33
4.8.	Multiplexing en Multiple Access Methods.....	34
4.9.	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.....	36
4.10.	Referenties	37
5.	Connecteren van antennes	38
5.1.	Werkingsprincipe van antennes.....	38
5.2.	Eigenschappen van antennes.....	38
5.2.1.	Ingangsimpedantie en resonantiefrequentie	38
5.2.2.	Reflectiecoëfficiënt, Return Loss en VSWR	39
5.2.3.	Antennewinst, directiviteit en antenne-efficiëntie	41
5.2.4.	Stralingspatroon	42
5.2.5.	EIRP: Effective Isotropic Radiated power.....	44
5.2.6.	Antennepolarisatie	44
5.3.	Basis antennetypes	45
5.3.1.	Omnidirectionele antennes	45
5.3.2.	Directionele antennes	46
5.4.	RF kabels en connectoren	48
5.4.1.	De coaxiale kabel als transmissielijn.....	48
5.4.2.	Connectoren en adapters	50
5.5.	Antenne metingen	50
5.5.1.	Vector Network Analyzer	51
5.5.2.	Distance-to-fault meting	51
5.6.	Referenties	53
6.	Standaard draadloze technieken	54
6.1.	Inleiding.....	54
6.2.	Data.....	56
6.2.1.	WLAN	56
6.2.2.	WMAN	64
6.3.	Personal area	64
6.3.1.	WPAN.....	64
6.3.2.	Bluetooth.....	65
6.3.3.	Zigbee en Zigbee Pro	67
6.3.4.	6LoWPAN.....	69

6.3.5.	WirelessHART	69
6.3.6.	Andere	71
6.4.	Mobiele Telecommunicatie	71
6.4.1.	Cellulaire netwerken.....	72
6.4.2.	GSM.....	73
6.4.3.	Evolutie van de GSM standaarden	75
6.5.	Broadcasting.....	78
6.5.1.	Audio broadcasting	78
6.5.2.	Digital video broadcasting	79
6.5.3.	DVB-T	79
6.5.4.	DVB-S	80
6.6.	Referenties	84
7.	Europese en Vlaamse regelgeving	85
7.1	Referenties	87
8.	Beveiliging van draadloze netwerken	88
8.1.	Kwetsbaarheden van een netwerk	88
8.2.	Basismaatregelen bij installatie access points	88
8.3.	Databeveiliging en data encryptie (IEEE 802.11i / 802.1x)	88
8.3.1.	802.11i.....	88
8.3.2.	802.1X	89
8.3.3.	Encryptie – Decryptie	89
8.3.4.	WEP	89
8.3.5.	WPA	89
8.3.6.	WPA2	89
8.3.7.	EAP	89
8.3.8.	MAC Filters.....	90
8.3.9.	RADIUS protocol	90
8.3.10.	Datasnelheid	90
8.3.11.	Rogue Acces Points	90
8.3.12.	Man in the Middle Attack.....	91
8.3.13.	Access Point MAC Spoofing	91
8.3.14.	Denial Of Service (DoS)	92
Referenties.....		92
9.	Applicaties en toepassingen.....	93
9.1.	Indoor plaatsbepaling	93
9.1.1.	Inleiding	93

9.1.2.	Basistechnieken voor plaatsbepaling	93
9.1.3.	Praktische aspecten en beperkingen.....	96
9.2.	Draadloze vermogensoverdracht door inductieve koppeling.....	100
9.3	RFID	102
9.4	Referenties	105

1. Inleiding en overzicht van het document

TechnologieWacht informeert de sector van elektro-installateurs over de status van nieuwe technologieën. De nadruk wordt hierbij gelegd op technologieën die rechtstreeks of onrechtstreeks verband houden met hernieuwbare energie, maar ook andere innovatieve trends komen aan bod.

Deze informatieopdracht gebeurt op verschillende manieren: enerzijds door gemeenschappelijke acties zoals informatiedagen, anderzijds door meer individuele acties d.m.v. elektronische nieuwsbrieven of het ter beschikking stellen van technische artikels of technologische verkenningen via de website (www.tecnolec.be)

Met deze technologische verkenning hopen we de lezer kennis te laten maken met de wereld van de draadloze technieken.

Draadloze technieken zijn eerder nieuw en dusdanig nog niet wijd verspreid. De meest bekende techniek is deze van het draadloze internet. In vele woningen/gebouwen vind je vandaag één of meerdere acces-points die je computer draadloos verbindt met het internet.

Er ontstaan echter meer en meer toepassingen die draadloos communiceren of zelfs draadloze vermogensoverdracht mogelijk maken. Er bestaan multimeters waarmee je andere meters via een draadloze verbinding kan uitlezen. In de industrie zijn draadloze sensornetwerken aanwezig maar ook in eerder residentiële omgevingen kan je bepaalde lampen draadloos bedienen. In renovaties kan je bijvoorbeeld schakelaars plaatsen die draadloos communiceren met een centrale node en via deze weg de verlichting schakelen. Bepaalde smartphones bezitten de mogelijkheid om draadloos opgeladen te worden en ga zo maar door.

Na een vleugje geschiedenis en de situering van draadloze technieken behandelen we de fundamentele principes zoals veldsterkte, frequentie en polarisatie. Welke zijn de obstakels voor een elektromagnetische golf die zich wil verplaatsen van zender naar ontvanger?

Draadloze signalen dienen in een bepaalde vorm gegoten te worden om verspreid te kunnen worden. Hiervoor gebruikt men diverse modulatiemethodes. Door de grote hoeveelheid aan signalen zal men deze willen omvormen tot 1 signaal om een vlotte en efficiënte verzending te verkrijgen, dit noemt men multiplexen.

Verder bespreken we principes en eigenschappen van antennes en staan we even stil bij mogelijke metingen. Draadloze technieken kunnen we ruwweg onderverdelen in vier hoofdtoepassingen zijnde data (vb. WiFi) en personal area (vb. Bluetooth) maar uiteraard ook mobiele telefonie en broadcasting (vb. satelliettelevisie), deze worden besproken in hoofdstuk 6.

Veel voorkomende bezwaren rond draadloos communiceren zijn de regelgeving (met betrekking tot gezondheid) en de beveiliging van netwerk of data. Deze worden behandeld in hoofdstukken 7 en 8.

Als laatste stippen we een aantal applicaties en toepassingen aan zoals indoor plaatsbepaling, draadloze vermogensoverdracht en RFID.

Graag willen we via deze weg de auteurs van dit naslagwerk bedanken: Jos, Lieven, Henk, Nobby, Wesley, Jean-Pierre en Frederick hartelijk bedankt voor jullie bereidwillige medewerking.

2. Situering van draadloze communicatie

2.1. Geschiedenis

Draadloze communicatietechnologie bestaat iets meer dan 100 jaar. Hoewel de theoretische basis omtrent elektromagnetische golven reeds vastgelegd werd door James Clerk Maxwell, werd draadloze informatieoverdracht voornamelijk onderzocht door Heinrich Hertz. Hertz gebruikte een vonkzender voor het genereren van vonkbogen. Deze vonken genereren een veld, dat opgepikt werd door een ontvanger op enkele meters. Hertz was in staat om elektromagnetische golven te produceren en reflectie, breking en interferentie te demonstreren. Deze eigenschappen waren in volledige overeenstemming met Maxwell's resultaten. Het was echter wachten op Guglielmo Marconi om draadloze communicatie over een grote afstand toe te passen. Deze communicatie gebeurde in de welgekende gecodeerde vorm met twee mogelijke toestanden (lang en kort), waardoor het beschouwd kan worden als digitale, binaire communicatie.

Daarna brak echter niet de digitale, maar analoge communicatie door. Lee deForest ontwikkelde in 1907 het eerste toestel, waarmee transmissie van spraak over een grotere afstand mogelijk was. Hij zag hierbij niet enkel draadloze telefonie als mogelijke toepassing, maar ook overdracht van muziek. In 1920 startte de eerste AM-zender, in 1935 werd de FM-radio uitgevonden, wat een enorme kwaliteitsverbetering betekende. Waar FM-radio zich oorspronkelijk tussen 42 en 49 MHz bevond, werd vanaf 1945 de nog altijd gebruikte frequentieband 88 tot 108 MHz gebruikt.

Mobiele telefonie werd theoretisch vastgelegd in 1947, door het principe van cellulaire communicatie theoretisch te onderbouwen. Bij cellulaire mobiele communicatie worden een groot aantal draadloze zenders met beperkt vermogen geografisch verspreid. Elke cel bestrijkt op deze manier een beperkt oppervlak. Deze aaneensluiting van cellen zorgen er echter voor dat een groot oppervlak bestreken wordt. Dit principe werd ontwikkeld in de jaren 50 en 60 door Bell labs. De eerste mobiele telefoon kwam er in 1973.

De eerste cellulaire mobiele communicatienetwerken werden geëxploiteerd vanaf 1979. Dit waren analoge netwerken (AMPS – Cnetz). Dit principe liep al snel tegen capaciteitslimieten aan, zodat nieuwe technieken nodig waren, wat resulteerde in de volgende stap, nl. digitale telefonie vanaf de jaren 90. Bij digitale telefonie wordt hetzelfde analoge netwerk gebruikt. Het verschil is echter dat het getransporteerde signaal met behulp van modulatietechnieken, die verder besproken worden, meerdere parallele gesprekken en data tegelijk kunnen doorsturen.

Maar draadloze communicatie is meer dan telefonie alleen. Aangezien niet alleen spraak, maar ook data doorgestuurd kan worden, kan in principe alle bedrade communicatie vervangen worden door draadloze communicatie. Waar telefonie mensen met elkaar wil verbinden, is er evengoed een evolutie om “dingen” met elkaar te verbinden. Draadloze communicatie wordt dan ook meer en meer toegepast in de industrie (draadloze sensoren), thuis (Wi-Fi, Bluetooth, ...), door de auto-industrie (intelligent transport, car-to-car communicatie, ...) ...

2.2. Draadloze netwerken

Netwerken kunnen opgesplitst worden in “bedrade” en “draadloze” netwerken. Een bedraad netwerk verbindt apparaten met een netwerk door middel van kabels, zoals een UTP-kabel. In draadloze netwerken wordt de communicatie mogelijk gemaakt d.m.v. elektromagnetische golven. Deze hebben een beperkt aantal beïnvloedbare parameters,

nl. amplitude, frequentie en fase. Op deze manier zijn drie basismodulaties mogelijk, amplitudemodulatie, frequentiemodulatie en fasemodulatie. Hoewel deze voldoende zijn voor een basisbehoefte als radiocommunicatie, is veel meer technologie nodig om een draadloos netwerk mogelijk te maken. De belangrijkste technologie hierbij is het principe van multiplexing. Deze worden in een verder hoofdstuk besproken. Om draadloze communicatie voldoende snel en vooral veilig te maken werden diverse standaarden ontwikkeld, waarbij elke technologie zijn eigen toepassingsgebied heeft. Draadloze opstellingen kunnen vast of mobiel zijn. Vaste opstellingen kunnen bijvoorbeeld interessant zijn, waar bedraad werken problemen geeft. Het is de bedoeling om u in deze tekst wegwijst te maken in deze boeiende wereld.

Draadloze netwerken zijn in ons dagelijks leven overal aanwezig. De eisen van de gebruikers blijven de technologische vernieuwingen vooruit duwen, aangezien de systemen telkens tegen nieuwe limieten aanlopen. Bij radio is een unidirectionele communicatie voldoende, bij telefonie is een bidirectionele communicatie nodig. Echter, door de digitale communicatie is een ware revolutie ontstaan. Niet enkel spraak, maar ook beeld en data worden doorgestuurd. De klant van vandaag wil bereikbaar zijn, altijd en overal, wat maakt dat de huidige communicatiesystemen geografisch alles dekkend en robuust moeten zijn. Draadloze communicatie dringt ook meer en meer de industriële en energiesector binnen. Binnen de automatisering worden draadloze sensoren gebruikt, veldbussen worden omgezet naar draadloze varianten, binnen de energiewereld maken smartgrids gebruik van bedrade en draadloze communicatie.

Deze evolutie zorgt ook voor enorme uitdagingen. Van elektrische energie verwacht men dat deze altijd beschikbaar is en nooit uitvalt. Indien deze systemen meer en meer steunen op communicatiemiddelen, dan wordt dezelfde beschikbaarheid, robuustheid en veiligheid van deze middelen geëist. In die zin is de geëiste *quality of service* (QoS) hoog. Waar internet vroeger werkte met een *best effort* principe, is dit vandaag niet meer voldoende voor de gewenste dienstverlening.

Hoewel de draadloze technologie vele voordelen heeft ten opzichte van de bedrade is de lijst van technische uitdagingen indrukwekkend. De draadloze verbinding is afhankelijk van vele parameters, zoals afstand, reflecties, interferenties, weersomstandigheden, en nog veel meer. Om een gewenste verbindingsskwaliteit te bereiken, dienen grote veiligheidsmarges gebruikt te worden. Hierdoor zal een draadloze verbinding nooit een 100% perfecte transmissie kunnen garanderen.

2.3. Noodzaak en voordelen van draadloze netwerken t.o.v. bedrade netwerken

Mobiliteit, dit is waarschijnlijk de belangrijkste drijfveer geweest voor de ontwikkeling van draadloze systemen. Een mobiel elektronisch systeem vereist in de eerste plaats draadloze energie, meestal onder de vorm van batterijen. Daar echter mensen en toestellen meer en meer onderling willen communiceren, hebben de mobiele systemen ook nood aan efficiënte draadloze communicatiemiddelen. Maar mobiliteit is niet het enige voordeel van draadloze netwerken. Draadloze netwerken zijn bijv. eenvoudig uitbreidbaar. Er dienen geen bijkomende kabels gelegd te worden. Dit beperkt de kostprijs van de installatie.

Zijn er ook nadelen aan draadloze systemen? Er zijn twee nadelen die regelmatig genoemd worden. Het eerste is de veiligheid. Bedrade systemen hebben de indruk van veiliger te zijn. Data opvangen uit een draadloos systeem lijkt veel gemakkelijker. De technologische evolutie maakt echter dat de veiligheid van een draadloos systeem evenwaardig is en zelfs hoger is dan bij bedrade systemen. Codering van de data is één toegepaste methode. Het toepassen van *frequency hopping* en *spread spectrum* technieken is een andere efficiënte methode. Het tweede is de invloed van elektromagnetische velden op de mens. De tak van de wetenschap die zich bezighoudt

met deze materie is de BioEMC. Of draadloze netwerken invloed hebben op ons functioneren, daar willen de auteurs geen uitspraak over doen.

Tenslotte zijn er nog een aantal moeilijkheden. Co-existentie is een eerste probleem. Meerdere zenders met gelijke of verschillende technologieën gebruiken hetzelfde medium, nl. de lucht. Dit kan problemen geven bij de communicatie. De omgevingsruis kan maken dat het signaal verloren gaat. Omgevingsruis wordt veroorzaakt door alle toestellen die werken op elektrische energie. Aangezien er meer en meer elektrische toestellen gebruikt worden, stijgt de omgevingsruis continu. Hierdoor daalt de signaal-ruisverhouding en daarmee het bereik van de draadloze zender. Daarnaast zorgen reflecties en demping voor een slechte tot geen communicatie. Er zijn voorbeelden gekend, waarbij metalen rekken in magazijnen er voor zorgen dat op bepaalde plaatsen in het magazijn geen communicatie mogelijk is. Standardisatie is een andere moeilijkheid. Er zijn standaarden, maar er zijn er veel. Hierdoor is het voor een gebruiker soms moeilijk om te weten wat ideaal is voor zijn toepassing. Voor de installateur is het moeilijk om te weten wat de mogelijkheden en de beperkingen zijn de diverse systemen.

2.4. Referenties

[1] Munro P. , Gilbert, R, *Wireless Communication Technology, Past, present and future*, pp. 26, Pittsburgh, 2003.

3. Fundamentele principes van draadloze communicatie

3.1. Inleiding

Draadloze communicatie maakt gebruik van hoog frequente wisselspanningen waardoor elektrische ladingen in een antenne oscilleren. Deze beweging van de elektrische ladingen zorgt ervoor dat het elektrische veld varieert in functie van de tijd. Hierdoor ontstaat er ook een variërend magnetisch veld en op zijn beurt zal dit bewegend magnetisch veld terug een veranderlijk elektrische veld opwekken die op zijn beurt terug een veranderlijk magnetisch veld opwekt, enz. Dit gecombineerd opwekken van elektrische en magnetische velden vormt de elektromagnetische straling die zich voortplant in het propagatiemedium. Bij draadloze communicatie is het medium voornamelijk lucht. Hoe antennes deze elektromagnetische straling efficiënt genereren en verspreiden in de ruimte wordt verder besproken in dit document.

In dit hoofdstuk worden de eigenschappen van elektromagnetische golven en hoe ze zich voortplanten in een omgeving besproken.

3.2. Elektromagnetische golf

Een elektromagnetische golf bestaat zoals te zien in Figuur 3-1 uit een elektrisch veld E en een magnetisch veld M . In het verre veld, i.e. op een voldoende grote afstand van de antenne, staan het magnetisch en elektrisch veld loodrecht op elkaar. De elektromagnetische golf propageert doorheen het vacuüm of lucht met een snelheid gelijk aan de lichtsnelheid ($c = 299\,792\,458$ m/s) en staat loodrecht op die propagatierichting. De velden afgebeeld in Figuur 3-1 variëren sinusoidaal in functie van de tijd. De voornaamste kenmerken van een elektromagnetische golf zijn:

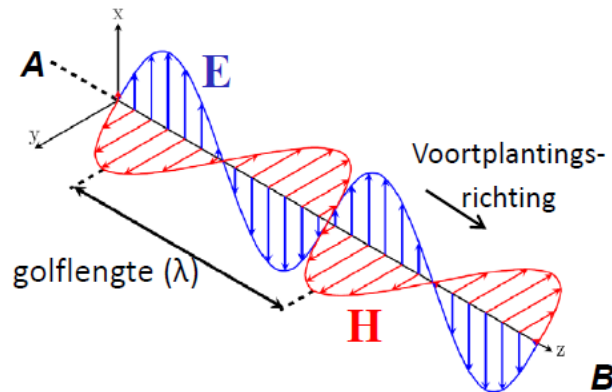
- de veldsterkte van het elektrisch [V/m] of magnetisch veld [A/m],
- de frequentie f [Hertz of Hz]
- de golflengte λ [m].

3.2.1. Veldsterkte

De veldsterkte is de amplitude van het elektrisch of magnetisch veld op een bepaald punt in de ruimte. In het verre veld is er een eenvoudige relatie tussen de elektrische veldsterkte E en de magnetische veldsterkte H , namelijk $E = Z_0 H$. Deze eenvoudige relatie heeft sterke gelijkenissen met de wet van Ohm ($V=IR$) en steunt op de impedantie van de vrije ruimte Z_0 :

$$Z_0 = 120\pi \Omega \approx 377\Omega$$

De afstand tot de antenne waar deze verre veld conditie geldig is, hangt af van de grootte van de antenne en de golflengte. In het verre veld is de elektromagnetische golf een vlakke golf. Indien men zich dicht bij de antenne bevindt is het verband tussen het elektrisch en magnetisch veld veel complexer en spreekt men van het nabije veld.



Figuur 3-1: Elektromagnetische golf

3.2.2. Frequentie en golflengte

Tussen golflengte, frequentie en lichtsnelheid is er een eenvoudig verband:

$$c = \lambda f$$

Het product van de golflengte λ van een golf in [m] en de overeenkomstige frequentie f van de golf [Hz] is gelijk aan de lichtsnelheid c . Met andere woorden hoe groter de frequentie, hoe kleiner de golflengte en omgekeerd. Tabel 3.1 illustreert hoe een aantal frequenties zich verhouden tot een zekere golflengte. De golflengte is bovendien ook afhankelijk van de materiaaleigenschappen van het medium waarin de elektromagnetische golf zich voortplant. In vergelijking met de golflengte in lucht of vacuüm zal de golflengte in eender welk medium altijd kleiner zijn.

Tabel 3.1: Omzettingstabel van frequentie in functie van golflengte (vacuüm)

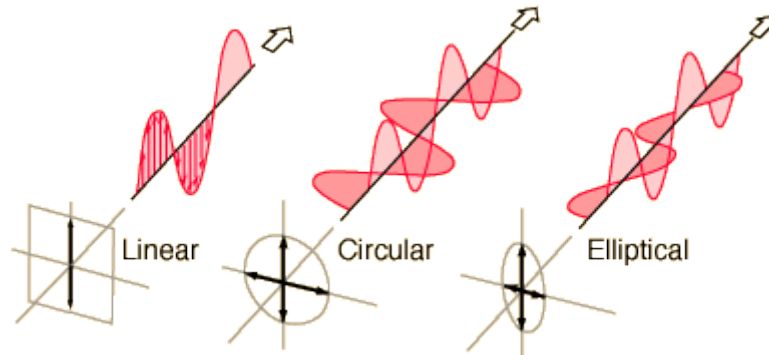
Frequentie	1 MHz	10 MHz	30 MHz	100 MHz	300 MHz
Golflengte	300 m	30 m	10 m	3m	1m
Frequentie	1 GHz	3 GHz	30 GHz	300 GHz	3 THz
Golflengte	30 cm	10 cm	1 cm	1mm	100 μ m

3.2.3. Polarisatie van een elektromagnetische golf

Polarisatie verwijst naar de richting van de elektrische veldvector in het vlak loodrecht op de propagatierichting van de elektromagnetische golf. Dit vlak wordt het polarisatievlak genoemd. De oriëntatie en sterkte van de veldvector veranderen in functie van de tijd. Hoe die verandering verloopt is bepalend voor het type van polarisatie. De drie verschillende vormen van polarisatie zijn (zie Figuur 3-2):

1. **Lineaire polarisatie:** Het elektrisch veld kent slechts één richting. Indien het elektrische veld loodrecht staat op het aardoppervlak spreekt men van een verticale polarisatie. Is het elektrisch veld evenwijdig aan het aardoppervlak dan is de elektromagnetische golf horizontaal gepolariseerd
2. **Elliptische polarisatie:** De elektrische veldvector draait rond in functie van de tijd in het vlak loodrecht op de propagatierichting. De veldsterkte is niet constant waardoor de vector een ellips beschrijft in het polarisatievlak.
3. **Circulaire polarisatie:** De elektrische veldvector draait rond in functie van de tijd in het vlak loodrecht op de propagatierichting. De veldsterkte is constant waardoor de vector een cirkel beschrijft in het polarisatievlak. Bij circulaire polarisatie maakt men een onderscheid tussen rechtshandig circulaire polarisatie (RHCP) en linkshandig circulaire polarisatie (LHCP). De conventie volgens IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) is als volgt: Men kijkt van de

bron weg in de richting van propagatie. Men spreekt van RHCP indien de elektrisch veld vector in wijzerzin draait. indien de rotatie in tegenwijzerzin is, dan spreekt men van LHCP.

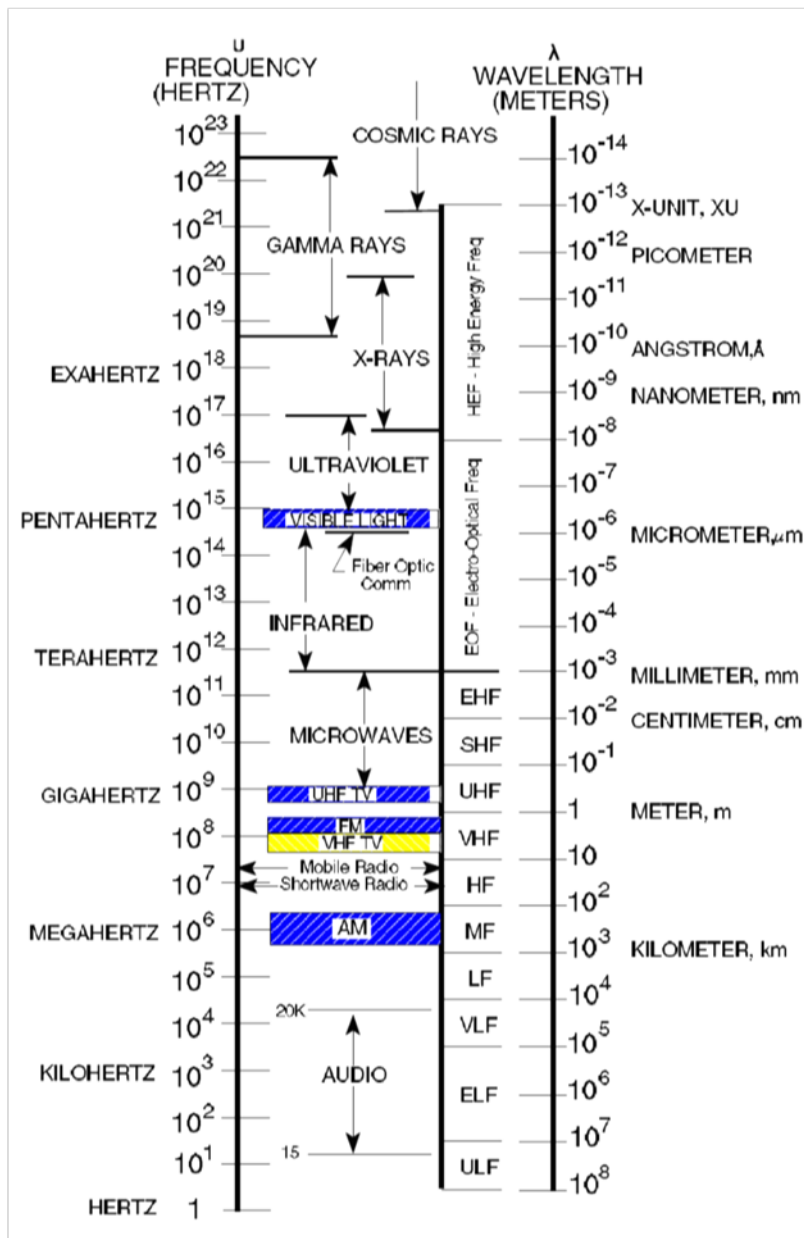


Figuur 3-2: De drie mogelijke types van polarisatie van een elektromagnetische golf [1]

3.3. Frequentiespectrum en frequentiebanden

De frequentie van de elektromagnetische golf is bepalend voor het type van straling. Globaal wordt het frequentiespectrum, afgebeeld in Figuur 3-3, opgedeeld in ioniserende straling en niet-ioniserende straling. Voor radiocommunicatie wordt niet-ioniserende straling gebruikt en dit vanaf enkele kHz tot in het GHz domein. Tot de ioniserende straling behoort UV-licht, röntgen -en gamma straling dat schadelijk is voor de menselijke gezondheid. Optische communicatie gebruikt elektromagnetische straling vanaf enkele honderden THz, namelijk het zichtbaar licht en infrarood straling (IR). In het geval van optische communicatie spreekt men meestal van de golflengte van de elektromagnetische straling, bv. 1500nm of 1350nm.

Bij radiocommunicatie maakt men gebruik van radiogolven en microgolven. Het frequentiespectrum wordt verder opgedeeld in 9 verschillende frequentiebanden zoals weergegeven in Tabel 3.2 en is vastgelegd door het ITU (International Telecommunication Union). De VLF band wordt voornamelijk gebruikt voor maritieme communicatie daar de lage frequenties het mogelijk maken om over lange afstanden te communiceren. De LF (LW longwave of lange golf), MF (MW mediumwave of midden golf) en HF (SW shortwave of korte golf) frequentiebanden worden voornamelijk gebruikt voor amplitude modulatie (AM) broadcasting en amateur radio. De VHF band is gekend door de FM radio omroep. Alle FM omroepen zenden uit in de frequentieband gelegen tussen de 87.5 en 108 MHz. Deze frequenties worden meestal nationaal vastgelegd en kunnen dus van land tot land verschillen. De FM frequentieband wordt verder opgesplitst in verschillende frequentiekanalen die worden toegekend aan de verschillende omroepen. Gaan we naar hogere frequenties, de VHF en UHF banden, dan komen we bij de digitale broadcasting van radio, DAB (digital audio broadcasting) en video, DVB (digital video broadcasting). De DAB frequentiebanden liggen tussen de 174-230 MHz en 1452-1492 MHz. DVB in België vindt plaats in de frequentiebanden 470-608 MHz, 618-790 MHz en 790-862 MHz [2]. Ook telecommunicatie toepassingen zoals mobiele telefonie (GSM) gebruiken de UHF band: 876-960 MHz, 1850-1880 MHz. Draadloos internet vindt plaats in de niet-gelicentieerde Industrial, Scientific and Medical (ISM) band 2.4-2.4853 GHz of 5.725-5.875 GHz band. De Hierboven vermelde draadloze communicatietoepassingen worden in Hoofdstuk 6 meer in detail behandeld. De SHF en EHF band wordt dan eerder ingezet voor satelliet communicatie.



Figuur 3-3: Opdeling van het frequentiespectrum [3]

Het spreekt voor zich dat er meerdere draadloze communicatie toepassingen zijn dan hier aangehaald. Dit leidt tot een overvol radiospectrum waarin bandbreedte schaars is. Als gevolg daarvan wordt het radiospectrum sterk gereguleerd door de overheid. In België is dit het Belgisch Instituut voor Post en Telecommunicatie (BIPT) die verantwoordelijk is voor het toewijzen van bandbreedte, in het frequentiedomein van 9kHz – 275 GHz, aan de verschillende telecommunicatietoepassingen.

Tabel 3.2: Opdeling van het radiospectrum in 9 verschillende frequentiebanden volgens het ITU

Band nummer	Naam	Frequentiebereik
4	Very low frequency (VLF)	3-30kHz
5	Low frequency (LF)	30-300kHz
6	Medium Frequency (MF)	300-3000kHz

7	High Frequency (HF)	3-30MHz
8	Very High frequency (VHF)	30-300MHz
9	Ultra high frequency (UHF)	300-3000MHz
10	Super high frequency (SHF)	3-30GHz
11	Extremely high frequency (EHF)	30-300GHz
12	Terahertz frequency (THF)	300-3000GHz

3.4. Propagatie-eigenschappen van elektromagnetische golven

Voor de voortplanting van een elektrisch signaal is een propagatiemedium noodzakelijk. Dit kan bijvoorbeeld een coax of unshielded twisted pair (UTP) kabel zijn. In tegenstelling tot elektrische signalen kunnen elektromagnetische golven zich voortplanten in het luchtledige en is er geen medium vereist. Vroeger was men ervan overtuigd dat er wel een medium vereist was en dit medium noemde men de "ether". In tegenstelling tot communicatie over een elektrische kabel, zullen radiogolven zich driedimensionaal verspreiden in de vrije ruimte, dat voornamelijk uit lucht bestaat. Een eigenschap van dit medium is dat er een grote signaalverzwakking optreedt en dat het om een erg willekeurig medium gaat. Met name, de opbouw van de omgeving (binnenshuis, stedelijk gebied, platte land, fabriekshal...), voorwerpen in het medium en eventuele beweging van deze voorwerpen zorgen voor een continue variatie van het propagatiekanaal. Dit brengt specifieke problemen met zich mee wat betreft de draadloze overdracht van informatie. Bovendien zijn deze propagatie-eigenschappen van elektromagnetische golven frequentie-afhankelijk.

In het algemeen kennen radiogolven 4 fundamentele principes van propagatie:

1. **Ground-wave propagation of Grondgolf ($f < 2\text{MHz}$):** Deze golven volgen het aardoppervlak en planten zich voort over grote afstanden. Ze zijn verticaal gepolariseerd omdat deze polarisatie beter het aardoppervlak volgt.
2. **Sky-wave propagation of Luchtgolf ($f=2-30\text{ MHz}$):** Deze golven worden gereflecteerd aan de ionosfeer en kunnen zo heen en weer botsen tussen het aardoppervlak en de ionosfeer (Ionosferische propagatie). Hierdoor kunnen nog grotere afstanden overbrugd worden en is intercontinentale communicatie mogelijk.
3. **Line-Of-Sight propagatie ($f > 30\text{ MHz}$):** Bij hogere frequenties volgen de elektromagnetische golven een rechte lijn zoals het zichtbaar licht. Indien zo een lijn aanwezig is tussen zender en ontvanger zonder onderbreking van objecten dan spreekt men van een Line-of-Sight (LOS) conditie. Over grote afstanden zal deze rechte lijn lichtjes afgebogen worden ten gevolge van refractie in de atmosfeer (verandering van de propagatierichting van de elektromagnetische straling doordat de brekingsindex in de atmosfeer verandert). Hierdoor kan een draadloze link opgezet worden die verder reikt dan de optische horizon.
4. **Non Line-Of Sight-propagation of obstructed propagation:** Indien het directe pad onderbroken is zullen verschillende mechanismen zoals reflectie, diffractie en transmissie er voor zorgen dat het uitgestraalde signaal toch de ontvanger bereikt.
Bij lagere frequenties zoals in de HF band werkt dit heel goed. Naarmate de frequentie toeneemt is de penetratie van elektromagnetische golven doorheen objecten al heel wat moeilijker.

Aangezien de meeste commerciële mobiele communicatietoepassingen gebruik maken van de twee laatst vermelde, komen enkel deze in dit document aan bod.

3.4.1. Free-space path loss

In de vrije ruimte planten radiosignalen met relatief hoge frequenties zich voort zoals licht, met andere woorden ze volgen een rechte lijn. Het vermogen van elektromagnetische straling dat zich voortplant in de vrije ruimte verzwakt volgens een kwadratische evenredigheid in functie van de afgelegde afstand d . Verder is de verzwakking ook afhankelijk van de frequentie f of golflengte λ . Hoe lager de frequentie of hoe groter de golflengte is, hoe verder een elektromagnetische golf met een bepaald zendvermogen zal dragen. Het vermogen verlies van een elektromagnetische golf bij voortplanting doorheen de ruimte wordt free-space path loss L_p (padverlies) genoemd en kan berekend worden aan de hand van de onderstaande formule:

$$L_p = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2,$$

Meestal gebruikt men een logaritmische schaal:

$$L_p[dB] = 32.44[dB] + 20 \log_{10} d[m] + 20 \log_{10} f[GHz],$$

De eenheid van de grootheid staat telkens vermeld tussen []. Bij een bepaalde frequentie kan men eenvoudig zien dat er een verzwakking van 100 of 20dB optreedt als een ontvanger van 1 m naar 10 m wordt verplaatst. Het verdubbelen van de afstand tussen zender en ontvanger zorgt voor een verzwakking van de signaalsterkte met een factor van 4 of 6dB. Het verlies neemt ook toe met het kwadraat van de frequentie. In Tabel 3.3 staan enkele numerieke voorbeelden van padverlies bij 900MHz en 2.4GHz.

Tabel 3.3 : Voorbeelden van free-space path loss bij 900MHz en 2.4GHz

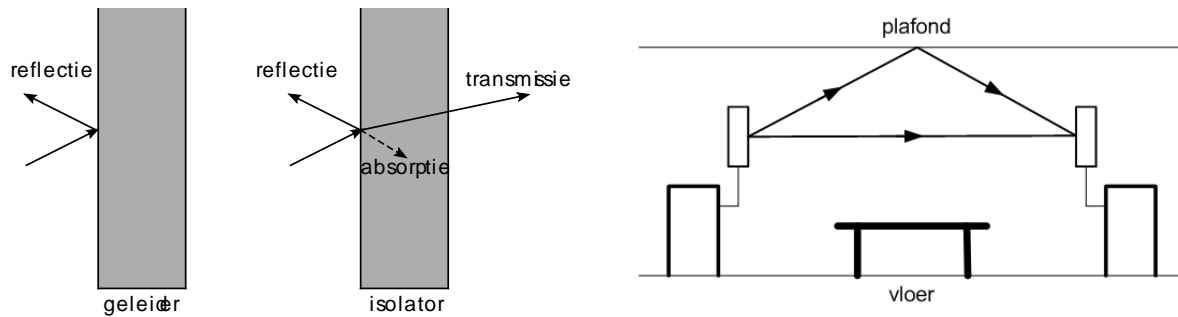
Afstand d	900 MHz padverlies	2.4 GHz padverlies
10 m	51.5 dB	60 dB
100 m	71.5 dB	80 dB
1000 m	91.5 dB	100 dB

Aangezien draadloze communicatie meestal plaats vindt in de atmosfeer (lucht), zullen regen, mist, sneeuw, stof en dergelijke verantwoordelijk zijn voor extra verzwakking (attenuatie) van het signaal. Bij korte communicatieverbindingen is deze extra verzwakking niet zo belangrijk terwijl draadloze communicatie over langere afstanden (satellietcommunicatie) sterk wordt beïnvloed door de atmosfeer. Bij GSM netwerken kan hevige regenval zelfs verantwoordelijk zijn voor het uitvallen van de verbinding [4].

In steden, bergachtige gebieden of bij indoor communicatie is er zelden een Line-of-Sight conditie tussen zender en ontvanger. Zo is bij mobiele communicatie de zendmast bijna nooit zichtbaar omwille van: het menselijk hoofd, gebouwen, muren of bomen die het rechtstreekse pad onderbreken. Bij indoor draadloze communicatie zijn de obstructies: muren, deuren, kasten, menselijk lichaam, enz. De aanwezigheid van objecten in de propagatieomgeving zorgen echter voor andere effecten die non Line-of-Sight (nLOS) communicatie mogelijk maken. Deze verschillende effecten worden hieronder beschreven.

3.4.2. Reflectie, transmissie en absorptie

Als een elektromagnetische golf invalt op een object waarvan de oppervlakte groot is ten opzichte van de golflengte dan zal de golf gereflecteerd worden. Indien het voorwerp een geleider is zal de golf praktisch volledig gereflecteerd worden. Bestaat het object uit niet geleidende materialen (isolator) dan zal de elektromagnetische golf voor een deel gereflecteerd worden terwijl de rest wordt doorgelaten (transmissie). Bij transmissie door een niet-geleidend object dat elektrisch verlies-hebbend is zal een gedeelte van het vermogen geabsorbeerd worden. Bijkomstig is er ook nog refractie die verantwoordelijk is voor het veranderen van de propagatierichting van de EM golf.

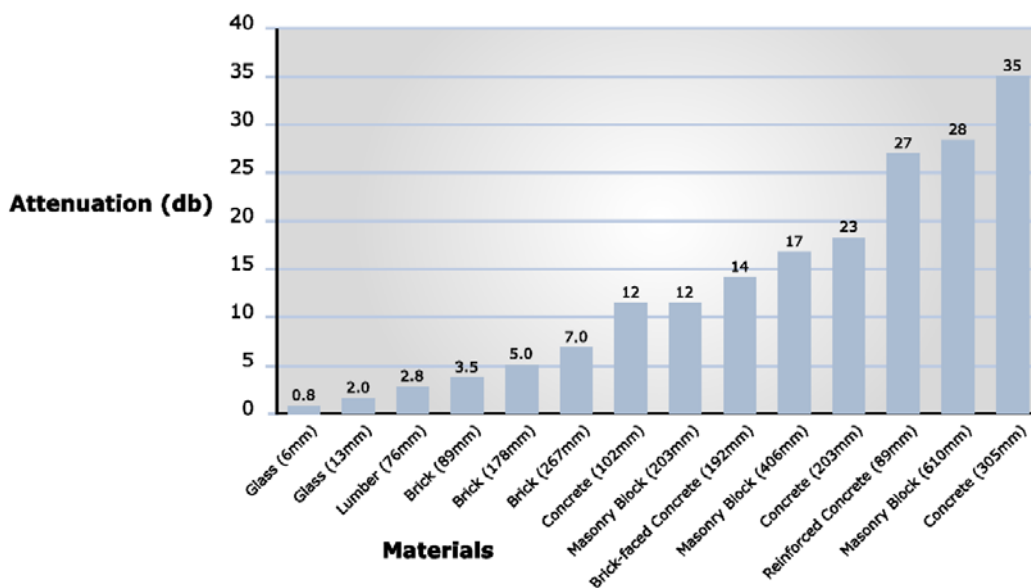


Figuur 3-4: Schematische voorstelling van reflectie, transmissie en absorptie van elektromagnetische golven aan objecten

Ten gevolge van dit reflectiemechanisme zal een elektromagnetische golf via verschillende paden de zender kunnen bereiken zoals afgebeeld in figuur 3-4. Dit fenomeen wordt multipath (multipad) genoemd. Transmissie zorgt ervoor dat men nog steeds het signaal kan ontvangen indien de zender bijvoorbeeld achter een venster of muur staat.

In het algemeen zal een signaal met een lagere frequentie beter doorheen objecten gaan. Naarmate de frequentie toeneemt wordt de absorptie in materialen groter. Enkele attenuatiewaarden bij 900 MHz van veel voorkomende bouwmaterialen staan in Figuur 3-5.

Attenuation Measures



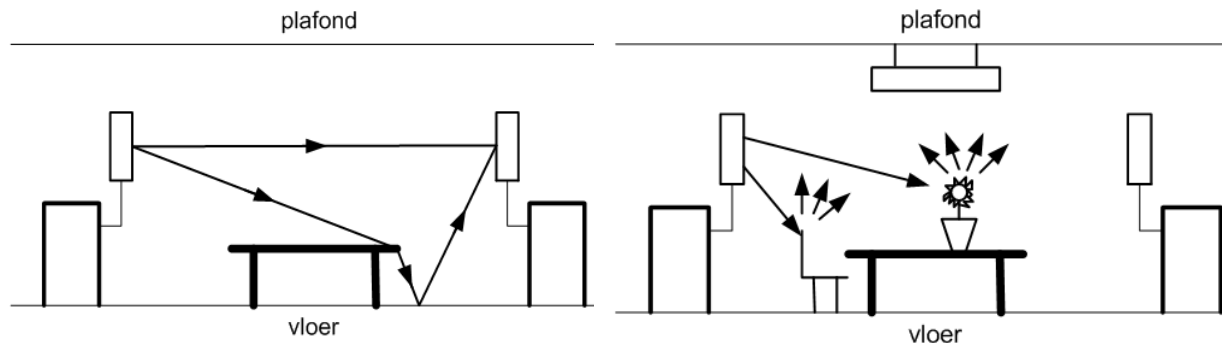
Figuur 3-5: Vermogenverlies bij 900 MHz van veelgebruikte bouwmaterialen [5]

Indien het signaal volledig geblokkeerd wordt door een object dan spreekt men van shadowing of blocking. Afhankelijk van de frequentie van het signaal kunnen kleine objecten zoals een muur of vrachtwagen al verantwoordelijk zijn voor het volledig blokkeren van het signaal. Bij elke reflectie gaat er aldus een deel van het vermogen verloren. Het zijn dus enkel de signalen afkomstig van het directe pad en de dominante reflecties die een significante bijdrage leveren aan het signaalvermogen bij de ontvangstantenne

3.4.3. Diffractie en verstrooiing

Diffractie is het verschijnsel waarbij elektromagnetische golven zich buigen rond een oppervlak met scherpe randen. Dit verschijnsel maakt het mogelijk dat er nog steeds ontvangst kan zijn zelfs al is er geen Line-of-Sight conditie tussen de zender en

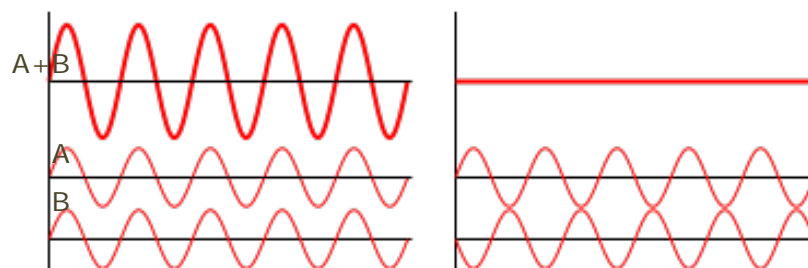
ontvanger. Als een elektromagnetische golf invalt op een object dat klein is ten opzichte van de golflengte, dan zal de elektromagnetische energie verstrooid worden in alle richtingen. Dit zorgt voor een groot aantal communicatiepaden.



Figuur 3-6: Schematische voorstelling van diffractie (links) en verstrooiing (rechts) van elektromagnetische golven aan objecten

3.4.4. Interferentie

Deze hierboven vermelde mechanismen zorgen voor het ontstaan van een groot aantal communicatiepaden. Meerdere elektromagnetische golven die dezelfde frequentie hebben kunnen met elkaar interfereren zoals afgebeeld in Figuur 3-7. Als de golven in fase zijn treedt er constructieve interferentie op. Het signaal dat ontstaat uit de twee oorspronkelijke signalen heeft een amplitude die gelijk is aan de som van de amplitudes van de signalen. Indien de golven in tegenfase zijn ontstaat er destructieve interferentie. De amplitude van het signaal is in dat geval gelijk aan het verschil van de twee amplitudes. .



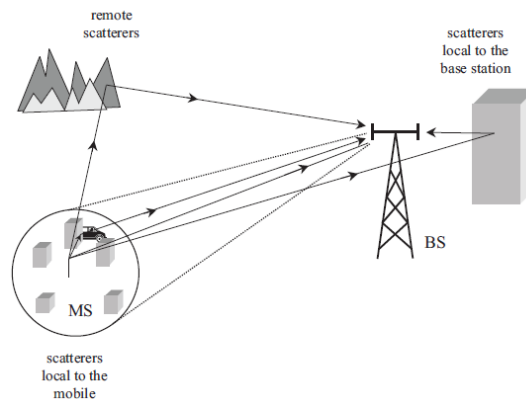
Figuur 3-7 : Constructieve interferentie (links) en destructieve interferentie (rechts)

3.4.5. Multipath fading

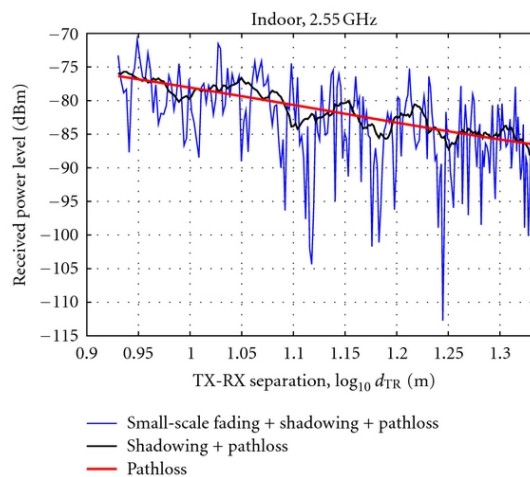
In een multipad omgeving zorgen alle verschillende propagatiemechanismen die hierboven staan beschreven voor een sterke fluctuatie in het ontvangen signaalvermogen. Dit fenomeen wordt Multipad fading genoemd. Er bestaan twee verschillende types van fading, namelijk fast-fading en slow-fading.

- Slow-fading is een langzame variatie in het ontvangen signaalvermogen die zich manifesteert over meerdere golflengtes. Deze variatie ten gevolge van grote objecten in het propagatiemedium zorgen ervoor dat het signaal geblokkeerd wordt (shadowing).
- Fast-fading ontstaat door de vele reflecties tegen objecten in de propagatie omgeving waardoor het signaal langsheen verschillende paden naar de ontvanger propageert. Aangezien al deze paden een verschillende afstand overbruggen, zullen alle signalen die aan de ontvangstantenne toekomen, een verschillende fase en amplitude hebben. Constructieve en destructieve interferentie zijn

verantwoordelijk voor de extreem vlugge fluctuaties (ordegrootte halve golflengte tss. maximum en minimum) in het ontvangen signaalvermogen.



Figuur 3-8 : Multipad in een outdoor propagatie omgeving. [6]



Figuur 7 Fluctuaties in het ontvangen signaalvermogen ten gevolge van fading, shadowing en padverlies [7]

Indien de ontvanger zich op een slechte locatie bevindt dan zal interferentie verantwoordelijk zijn voor een sterke reductie van het signaalvermogen. Dit resulteert in een slechte communicatielink of verbreking van de link. Ter illustratie: Wanneer een pad een halve golflengte langer is dan een ander pad, dan treedt er destructieve interferentie op. Dit resulteert in merkbaar minder vermogen dat ontvangen wordt. Dit kan opgelost worden door de ontvanger een halve golflengte te verplaatsen. Vandaar zijn vele Access Points met twee antennes uitgerust. Wanneer toevallig één van beide antennes in een fadingdip zit, dan zal de andere antenne een optimum ontvangen. Een Acces Point uitgerust met twee antennes maakt aldus gebruik van spatiale diversiteit.

3.4.6. Delay spread of vertragingsspreiding

Een bijkomend gevolg van het multipad verschijnsel is delay spread of vertragingsspreiding. Eén symbool verstuurd op een bepaald tijdstip zal bij de ontvanger meerdere keren opgevangen worden en dit doordat de verschillende paden in het communicatiekanaal allemaal een verschillende lengte hebben. Het kortste pad is het LOS pad. De signalen die via de andere paden toekomen bij de ontvanger hebben allemaal een langere afstand afgelegd en komen bijgevolg later toe aan de ontvanger.

De vertragingsspreiding is het tijdsverschil tussen het eerste ontvangen signaal en het laatste ontvangen signaal afkomstig van hetzelfde verstuurd signaal.

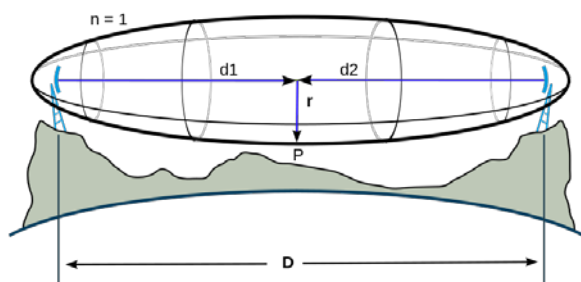
Dit verschijnsel zorgt ervoor dat verschillende signalen elkaar gaan verstoren waardoor er fouten kunnen optreden in de communicatie. Deze verstoring wordt meestal verholpen door gebruik te maken van de juiste modulatie-techniek. Bij een indoor-propagatie omgeving is deze delay spread uiteraard kleiner dan in een outdoor omgeving. Enkele typische waarden voor vertragingsspreiding in een indoor en outdoor omgeving staan in Tabel 3.4.

Tabel 3.4: Realistische vertragingsspreiding in een indoor en outdoor propagatie omgeving

Omgeving	Vertragingsspreiding	Max verschil padlengte
Indoor	40 ns -200 ns	12 m -60 m
Outdoor	1µs - 20µs	300 m – 6 km

3.4.7. Fresnel zone

In een point-to-point communicatielink is het belangrijk om een zekere ruimte vrij te houden rond het Line-of-Sight pad. Dit gebied noemt men de Fresnel zone en heeft de vorm van een ellipsoïde zoals te zien is in Figuur 3-9. Indien dit gebied verstoord wordt door objecten is er een sterke afname van het ontvangen signaalvermogen. Mogelijke obstructies staan weergegeven in Figuur 3-9. In de meeste praktische applicaties is het voldoende om 60% van de Fresnel zone vrij te houden [4].



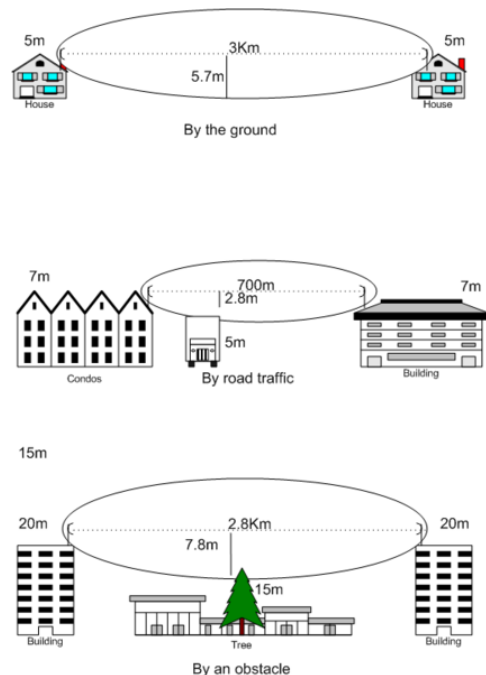
Berekening grootste straal 1^{ste} orde Fresnel zone (midden van de ellipsoïde):

$$r = 17.32 \sqrt{\frac{D}{4f}}$$

D = afstand in km

r = straal in m

f = frequentie in GHz



Figuur 3-9: Definitie van de Fresnel zone (links) en mogelijke verstoringen van die zone (rechts)

3.5. Friss formule

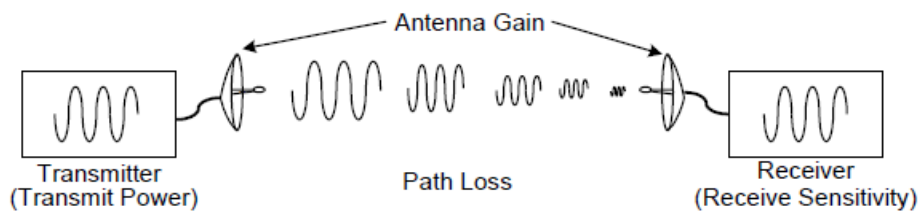
Voor het opzetten van een draadloze communicatielink is het belangrijk om een voorspelling te kunnen maken van het verwachte transmissiebereik. Dit is echter niet zo eenvoudig omwille van de invloed van de omgeving op radio signalen. Is er een Line-of-

Sight situatie dan kan men een goede benadering maken van de maximale afstand die men kan overbruggen

Om een schatting te kunnen maken van het transmissiebereik moeten 4 factoren gekend zijn.

- **Transmit power (zendvermogen):** Het vermogen dat wordt uitgestraald door de zender. Dit wordt uitgedrukt in [W], [mW] of [dBm].
- **Receiver sensitivity (gevoeligheid van de ontvanger):** Het minimale signaalvermogen dat door de ontvanger kan waargenomen worden. Meestal uitgedrukt in [dBm]. Ontvangstgevoeligheid hangt nauw samen met datasnelheid (vb Belkin router /AP: 11 Mbps @ -78dBm). Een ontvangen signaalvermogen hoger dan -78dBm garandeert een datasnelheid van 11Mbps. Indien het signaalvermogen lager is dan zal de datasnelheid gereduceerd worden.
- **Antenna gain (antennewinst):** Geeft aan hoe goed een signaal wordt opgevangen of uitgestraald door de antenne en wordt uitgedrukt in [dBi] of [dBd]. Soms spreekt men van signaalversterking van de antenne. Dit is echter verwarrend want het signaal wordt niet actief versterkt. Antennewinst wordt gedetailleerd besproken in Hoofdstuk 5 van dit document.
- **Padverlies (Path loss):** De afname van de signaalsterkte naarmate het signaal door de lucht propageert. Indien er ook propagatie is door objecten moet dit in rekening gebracht worden.

Deze vier factoren staan schematisch afgebeeld in Figuur 3-10



Figuur 3-10: Schematische voorstelling van de 4 factoren die het transmissiebereik beïnvloeden [5]

Deze vier parameters vormen de Friss formule die toelaat het ontvangen vermogen P_r te berekenen indien het zendvermogen P_t gekend is:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2,$$

G_t en G_r zijn respectievelijk de antennewinsten van de zendantenne en ontvangstantenne. Beide antennes staan in Line-of-Sight (LoS) en bevinden zich op een gegeven afstand d van elkaar. Meestal wordt er een logaritmische schaal gehanteerd waardoor de Friss formule herschreven wordt als:

$$P_r[\text{dBm}] = P_t[\text{dBm}] + G_t[\text{dBi}] + G_r[\text{dBi}] - L_p[\text{dB}],$$

Met L_p het vrije ruimte padverlies.

3.5.1. Link budget en link margin

Het link budget is een uitbreiding van de Friss formule en tracht hierbij rekening te houden met alle verliezen die optreden in de communicatielink. Een typische link budget vergelijking is als volgt:

$$P_R = P_T + G_T + G_R - (L_P + L_T + L_R + L_M).$$

Hierin worden de volgende factoren in rekening gebracht: Zo heb je L_T en L_R die de kabelverliezen, connectorverliezen en verliezen ten gevolge van misaanpassing voorstellen. Deze verliezen worden besproken in Hoofdstuk 5. L_M stelt verliezen ten gevolge van polarisatiemismatch (zie Hoofdstuk 5) of een zekere fading marge (fading

margin) voor. Dit laatste is een additioneel verlies dat men introduceert om fading in rekening te brengen. Een goede minimum fading marge is bijvoorbeeld 15 dB. Indien het ontvangen vermogen voldoende groot is ten opzichte van de ontvangstgevoeligheid van de ontvanger, dan is de link geschikt om data over te sturen.

Link margin geeft aan hoeveel extra signaalverlies er nog mag bijkomen opdat de communicatie verbroken wordt. De Link margin wordt berekend door het verwachte signaalvermogen aan de ontvanger te vergelijken met de ontvangstgevoeligheid. Een ontvangstgevoeligheid van -85dBm en een verwacht signaalvermogen van -62dBm geeft een link marge van 23 dB.

3.5.2. Uitbreiding van het padverlies: verlies exponent

Bij het ontbreken van een LOS conditie is het werkelijke padverlies groter dan het padverlies in de vrije ruimte. In die situatie zal het werkelijk padverlies geschat worden door een propagatiemodel. Verscheidene propagatiemodellen zijn beschikbaar in de literatuur en het geschikte propagatiemodel is afhankelijk van het type van communicatie en de omgeving (platte land, steden, beboste gebieden, kantoor omgeving,...) [4]. Een bespreking van de verschillende types van propagatiemodellen valt buiten de scope van dit document.

De meest eenvoudige manier om de omgeving in rekening te brengen is door het vrije ruimte verlies uit te breiden met een extra verlies factor n die de omgeving benaderend in rekening brengt. Het padverlies wordt nu:

$$L_p[dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 + 10 n \log_{10} d,$$

De exponent n heeft een belangrijke invloed op het transmissiebereik en wordt experimenteel bepaald door meetcampagnes in de desbetreffende omgeving. Indien $n=2$ dan spreekt men van een free-space omgeving. Indien $n<2$ dan zal de omgeving de straling gaan bundelen waardoor het padverlies kleiner is dan in een free-space omgeving. Dit komt typisch voor in gangen van gebouwen (indoor) of in straten (outdoor). Dit fenomeen komt echter zelden voor. Is $n>2$ dan is de omgeving verantwoordelijk voor extra attenuatie ten opzichte van free-space. In dichtbebouwde stedelijke gebieden varieert de factor n tussen 3 en 5. In randsteden met lage bebouwing tussen de 2.7 en 3.5. terwijl in een indoor omgevingen de factor n tussen 4 en 6 ligt [6].

3.6. Datasnelheid en signaalruis verhouding

3.6.1. Datasnelheid

Bij het evalueren van een communicatielink zijn data rate (datasnelheid) [Mbits/s] en bandbreedte belangrijke parameters. In het algemeen kan men aannemen dat naarmate de frequentie toeneemt de beschikbare bandbreedte ook zal stijgen. Een grotere bandbreedte impliceert een hogere datasnelheid. Het theoretische maximum van de datasnelheid in een in bandbreedte beperkt communicatiekanaal, wordt bepaald door het kanaal capaciteits theorema van Shannon:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right),$$

met C de kanaalcapaciteit in bits/s, B de kanaal bandbreedte in Hz, S het signaal vermogen in en N het ruisvermogen. Dit is echter een theoretische limiet die in de praktijk nooit gerealiseerd wordt.

3.6.2. Signaalruisverhouding

Naast de ontvangstgevoeligheid is de signal-to-noise ratio (signaalruisverhouding) of SNR ook belangrijk. SNR is de verhouding van het gewenste ontvangen signaalvermogen tot

het ruisvermogen. Ruis is afkomstig van interfererende ruisbronnen zoals thermische ruis, straling van elektronische apparatuur (vb. microgolfoven werkt bij 2.45 GHz en zorgt voor interferentie met WLAN) of straling afkomstig van interfererende draadloze communicatie netwerken. De SNR of S/N wordt gegeven door

$$SNR[dB] = 10 \log_{10} \frac{S}{N}.$$

De signaalruisverhouding wordt soms ook nog vermeld als CNR of carrier-to-noise ratio waarin carrier het vermogen van de draaggolf voorstelt. Indien het ruisvermogen laag is, zal het communicatiesysteem eerder beperkt worden door de ontvangstgevoeligheid dan door de SNR.

Voor de WLAN frequentieband is het ruisvermogen typisch -100dBm. Stel dat men een datasnelheid van 11Mbps wenst, om dit te realiseren vereist de ontvanger een SNR = 16dB. Dit resulteert in een voorwaarde voor een ontvangen signaalvermogen van -84dBm. Indien de ontvangstgevoeligheid van die ontvanger -78dBm is voor een datasnelheid van 11 Mbps dan is de ontvangstgevoeligheid hoger wat inhoudt dat een datasnelheid van 11Mbps niet zal gehaald worden. Door het signaalvermogen met 6dB te verhogen zal men toch de 11Mbps kunnen realiseren: -84 dBm + 6 dB = -78 dBm.

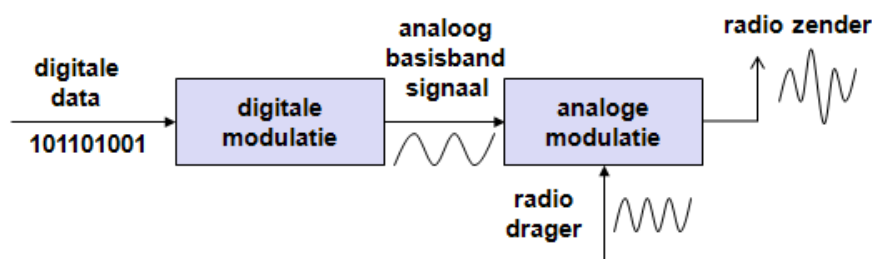
3.7. Referenties.

- [1] R. Nave, "Hyperphysics," [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polclas.html>.
- [2] Belgian Institute for Postal and Telecommunication, "Frequentieplan," [Online]. Available: <http://www.bipt.be/NL/217/ShowContent/1057/Tabel/Plan.aspx>.
- [3] "www.tscm.com/freqspec.pdf," [Online].
- [4] J. S. Seybold, Introduction to RF propagation, Wiley Interscience, John Wiley & Sons, 2005.
- [5] Digi key, "Inoor path loss, Application Note XST-AN005a-Indoor," [Online]. Available: <http://ftp1.digi.com/support/images/XST-AN005a-IndoorPathLoss.pdf>.
- [6] H. Rogier, *Course on Antennas and Propagation*, Ghent: Ghent University, INTEC, 2012.
- [7] S. K. Rajesh, L. Anastasia, K. Dirk and T. S. Reiner, "Cognitive Scout Node for Communication in Disaster Scenarios," *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 2012, pp. 11 pages, 2012. doi:10.1155/2012/160327, 2012.

4. Modulatie en multiplex methodes

4.1. Inleiding

Bij het draadloos verzenden van data moeten enkele belangrijke stappen gebeuren alvorens deze effectief verzonden kan worden. Een eerste stap is het coderen van de data. Hierbij wordt bepaald hoe een logische 0 en een logische 1 elektrisch zullen voorgesteld worden. Dit gebeurt met een bepaald principe zoals NRZ code, Manchester code, unipolair rz code, DBP code, Miller code, differentiële codering, puls-pauze codering,... Het doel van deze codering is het detecteren van een eventuele foutieve transmissie. Naast de correctiemechanismen van de signaalcodering is er op een hogere laag een manier om de data integriteit te behouden m.b.v. CRC checks. Na het coderen van het signaal bekomt men het zogenaamde baseband signaal.



Figuur 4-1. Moduleren van data

Een tweede stap tijdens het verzenden van data is de modulatie. De modulatie is nodig om het baseband signaal geschikt te maken voor transmissie over het beschikbare kanaal. Het baseband signaal wordt gemoduleerd op een zogenaamde draaggolf. De draaggolf is een sinusvormig signaal dat gemakkelijk verzonden kan worden over het kanaal. Een hoogfrequent informatiesignaal kan voorgesteld worden door de wiskundige uitdrukking:

$$x(t) = \text{acos}(\omega t) + \varphi$$

Een dergelijk signaal wordt beschreven door 3 parameters, nl. de amplitude, de fase en de frequentie. Moduleren is het dynamisch wijzigen van de karakteristieken van het hoogfrequent signaal (amplitude, frequentie of faseverschuiving t.o.v. een referentiesignaal). Indien de data niet gemoduleerd zou worden, dan is er voor het verzenden van een baseband signaal met een frequentie van 3000 Hz, een antenne nodig van ongeveer 25 km. Door het signaal te moduleren op een drager van 900 MHz, kan een antenne van 8cm gebruikt worden.

Modulatie brengt nog meer voordelen met zich mee. Als er meerdere signalen eenzelfde kanaal gebruiken, dan kunnen deze geïdentificeerd worden m.b.v. *bandpass modulatie*. Dergelijke techniek is frequency division multiplexing.

Modulatie kan ook gebruikt worden om de effecten van interferentie te minimaliseren. Dergelijke modulatietechnieken worden de spread-spectrum modulatietechnieken genoemd. Deze techniek vereist een grotere bandbreedte dan de minimum bandbreedte die vereist zou zijn voor het bericht.

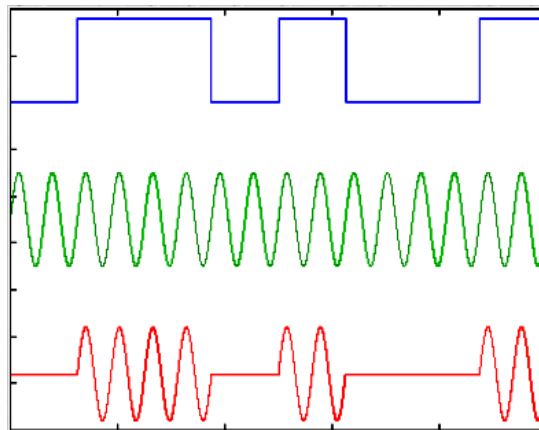
Een draaggolf heeft drie eigenschappen: de amplitude, de frequentie en de fase. Om data te kunnen versturen over een draaggolf moet men gebruik maken van deze eigenschappen. Afhankelijk van digitale of analoge modulatie krijgt de modulatietechniek een andere naam. Bij analoge modulatie wordt een analoog signaal gemoduleerd naar een signaal om te verzenden, bij digitale modulatie wordt een digitaal signaal naar een te verzenden signaal gemoduleerd. Als bij een modulatie de amplitude aangepast wordt om

de data te verzenden, dan spreekt men bij analoge modulatie van *amplitude modulatie* en bij digitale modulatie van *amplitude shift keying*.

4.2. Amplitude Shift Keying

Bij amplitude shift keying (ASK) of ON/OFF keying worden de twee binaire waarden voorgesteld door twee verschillende amplitudes van de drager. Meestal wordt een *logische 1* weergegeven door de aanwezigheid van de drager en een *logische 0* met de afwezigheid van de drager. Dit is de eenvoudigste vorm van modulatie, vereist weinig bandbreedte maar is zeer gevoelig aan interferentie. Een voorbeeld van ASK zijn LED transmitters zoals gebruikt bij glasvezel verbindingen. Voor een LED transmitter geldt:

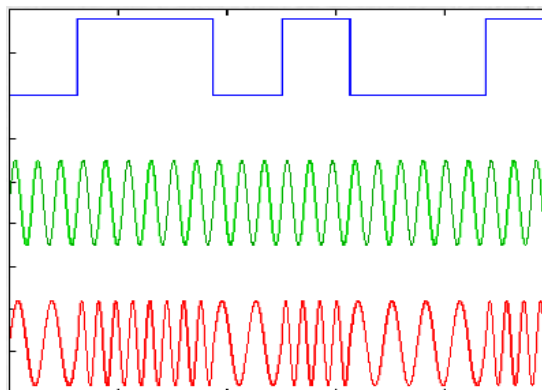
$$\text{ASK } s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binair 1} \\ 0 & \text{binair 0} \end{cases}$$



Figuur 4-2. ASK

4.3. Frequency Shift Keying

De meest voorkomende vorm van frequency shift keying (FSK) is binary FSK (BFSK), waarbij twee binaire waarden voorgesteld worden door twee verschillende frequenties dichtbij de frequentie van de drager.



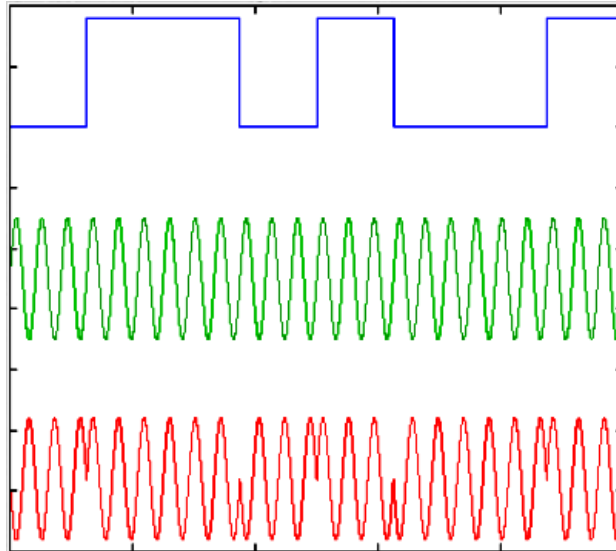
Figuur 4-3. FSK

BFSK is minder onderhevig aan fouten dan ASK maar vereist een grotere bandbreedte.

$$\text{BFSK } s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_1 t) & \text{binair 1} \\ A \cos(2\pi f_2 t) & \text{binair 0} \end{cases}$$

4.4. Phase Shift Keying

Bij phase shift keying (PSK) wordt de fase van de draaggolf aangepast om de data correct weer te geven. Deze modulatietechniek is de meest complexe van de drie, het voordeel van deze techniek is de robuustheid tegen interferentie.

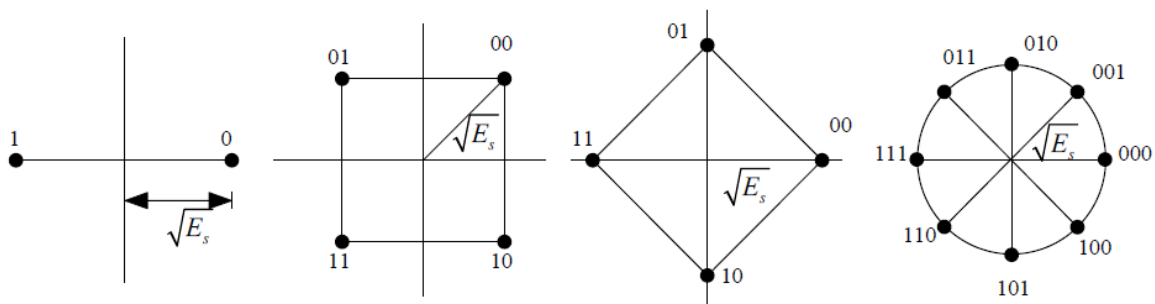


Figuur 4-4. PSK

De eenvoudigste vorm gebruikt twee fases om twee binaire digits weer te geven, namelijk BPSK.

$$\text{BPSK } s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binair 1} \\ A \cos(2\pi f_c t + \pi) & \text{binair 0} \end{cases} = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{binair 1} \\ -A \cos(2\pi f_c t) & \text{binair 0} \end{cases}$$

Alternatieve vormen van PSK zijn DBPSK (Differential Binary PSK), DQPSK (Differential Quadrature PSK) en 8PSK. QPSK werkt met een faseverschuiving van 90° i.p.v. 180° , wat voor een efficiënter gebruik van de bandbreedte zorgt. Per symbool kunnen nu meerdere bits verstuurd worden.



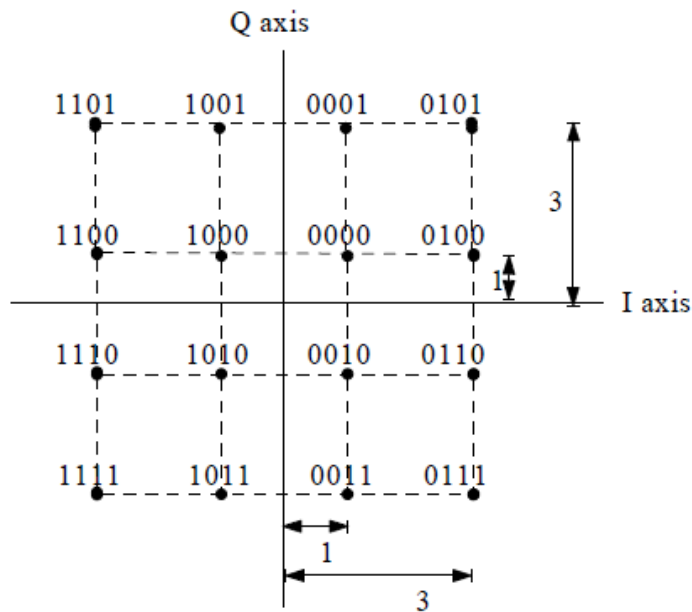
M-PSK modulations, a. BPSK, b. QPSK, c. also QPSK, d. 8PSK

Figuur 4-5. PSK

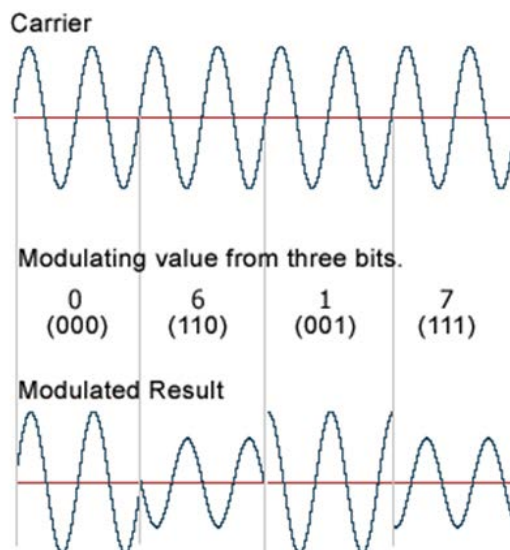
4.5. Quadrature Amplitude Modulation

Deze techniek combineert het gebruik van ASK en PSK. De ASK kan ook toegepast worden door gebruik te maken van meerdere amplitudes. Afhankelijk van het aantal mogelijke toestanden van een symbool spreekt men van 16-QAM, 64-QAM, 128-QAM of 256-QAM. Het spreekt voor zich dat een modulatie met meer mogelijke toestanden per symbool een hogere bit error rate zal bekomen omdat de toestanden moeilijker van elkaar te onderscheiden zijn. De gebruikte modulatie hangt dan ook sterk af van het gebruikte propagatiemedium. 16-QAM wordt bijv. gebruikt bij ADSL.

Onderstaande figuur toont een constellatie diagram. Deze toont een gemoduleerd signaal door een digitale modulatietechniek. Het signaal wordt weergegeven in een complex vlak waarbij al de mogelijke symbolen weergegeven zijn.



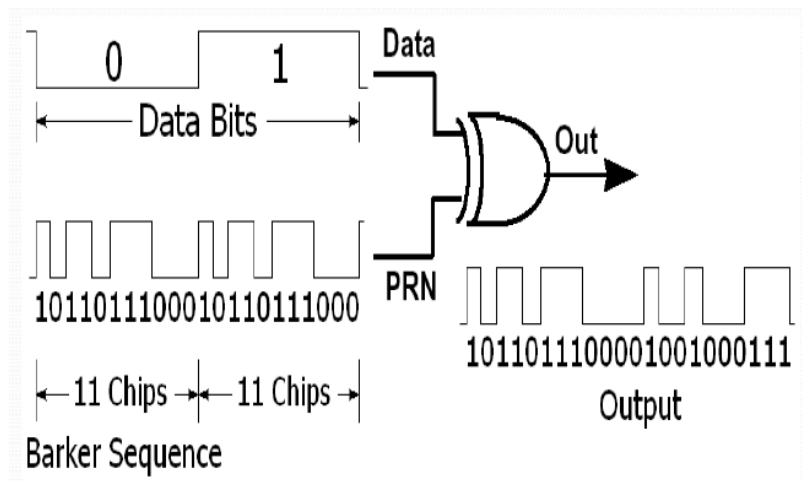
Figuur 4-6. Constellatie diagram 16-QAM



Figuur 4-7. 8-QAM

4.6. Direct-sequence spread spectrum

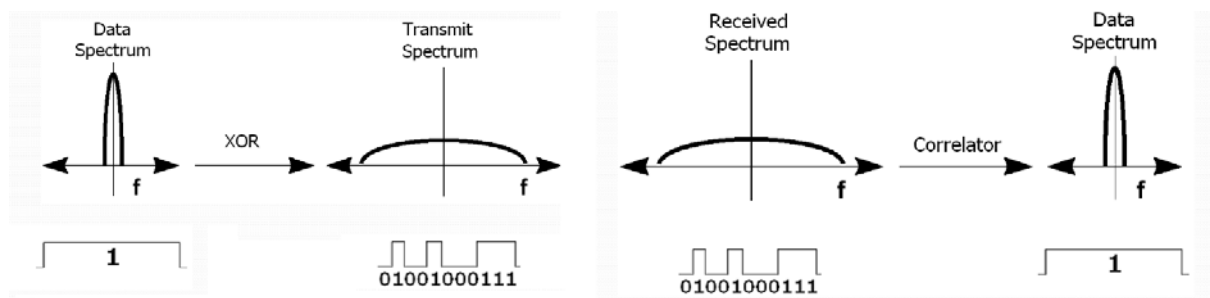
Bij Direct-Sequence Spread Spectrum (DSSS) wordt de te coderen bit string via een XOR gecombineerd met een hoge snelheid pseudo random bitcode. Voor 1 en 2 Mbps is dit een 11 bit code, bijv. 10110111000 (de Barker Sequence genoemd). Deze sequentie heeft een nauwkeurig bepaalde wiskundige opbouw zodat er een minimale autocorrelatie is. Men kan de autocorrelatie beschouwen als de mate van gelijkheid tussen de code en een in de tijd verschoven kopie daarvan. Hierdoor is de techniek tolerant t.o.v. o.a. multipath fading.



Figuur 4-8. Chip-code

Het uitgangssignaal van de XOR wordt vervolgens gemoduleerd m.b.v. BPSK (voor 1 Mbps) of QPSK (voor 2 Mbps) en getransporteerd. Het signaal is nu zeer breedbandig.

BPSK		QPSK	
0	0	00	0
1	π	01	$\pi/2$
		11	π
		10	$3\pi/2$

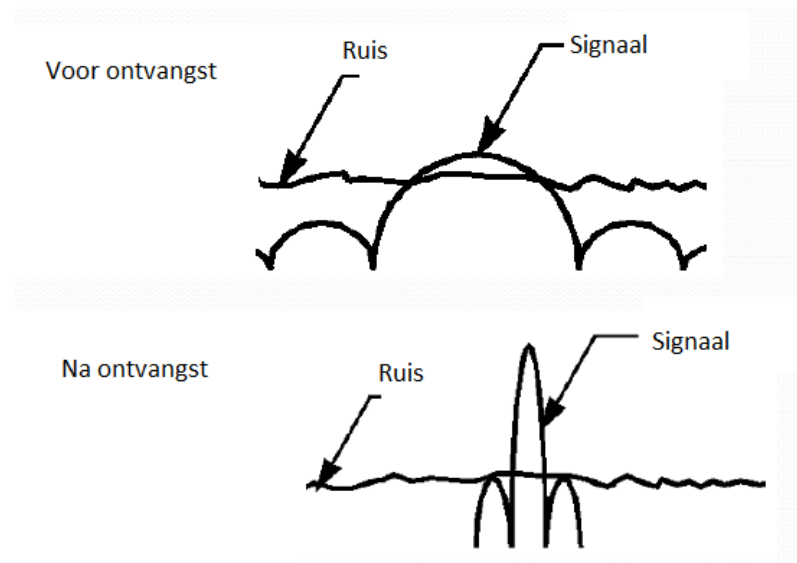


Figuur 4-9. Chipping (zender) en correlatie (ontvanger)

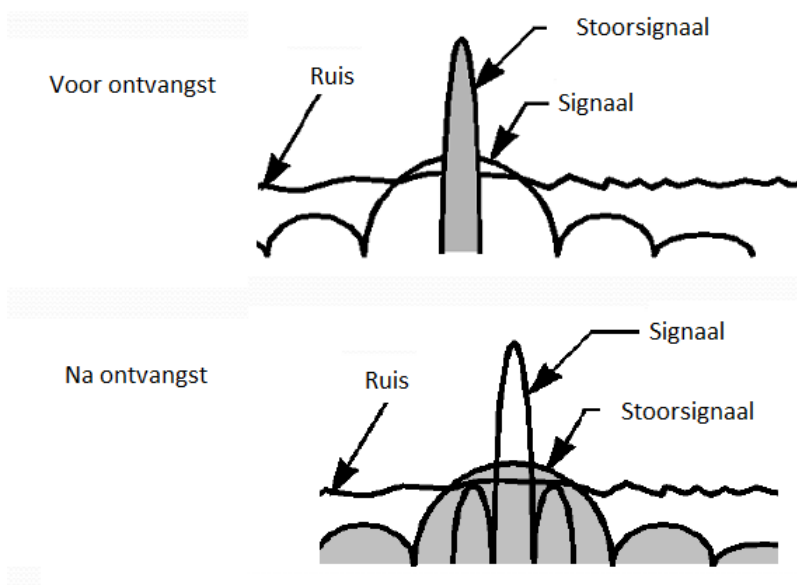
Aan de ontvangerzijde wordt het ontvangen signaal gemengd met dezelfde 11 bit code. Het breedbandige signaal wordt hierdoor terug smalbandig. Om het verschil tussen data en ruis of andere te achterhalen wordt gebruik gemaakt van correlatie.

Smalbandige stoorsignalen en ruis hebben weinig invloed op de datatransmissie. De reden is dat de correlator een wiskundige integratie uitvoert over de volledige breedte

van de frequentieband. De correlator zal bijgevolg het smalbandig signaal uitspreiden over het volledige spectrum, waardoor het als ruis aanzien wordt. Het verspreide signaal zal echter als een sterk signaal naar boven komen.

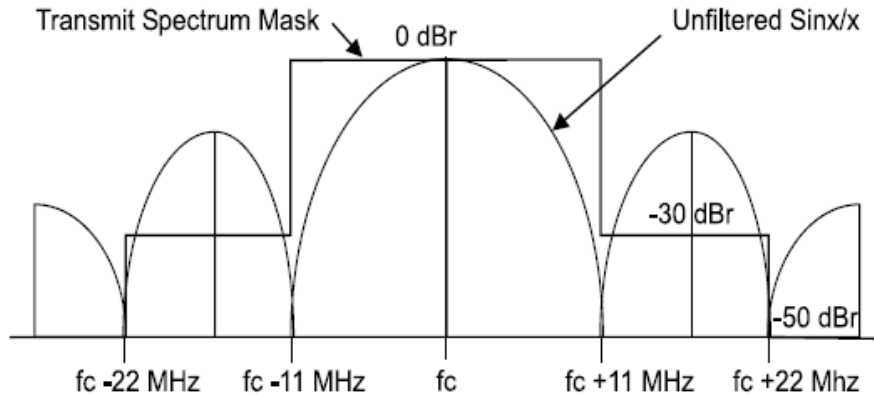


Figuur 4-10. Invloed van ruis op het signaal voor en na het decoderen



Figuur 4-11. Invloed van een smalbandig stoorsignaal op het signaal voor en na het decoderen

Na het chippen is een signaal erg breedbandig, meer dan 66 MHz. Dit is een probleem aangezien bij WLAN de volledige 2,4GHz band maar 85MHz breed is. Met dergelijke brede signalen zou er in één omgeving maar één IEEE802.11b netwerk kunnen opereren. Met een speciale filter wordt het gechipte signaal afgetopt op alle frequenties buiten een bereik van $f-11$ tot $f+11$ MHz zodat 99,9% van de energie hierin terug te vinden is. Zo komt de benodigde bandbreedte van een kanaal op 22 MHz. De specifieke waarden van signaalsterkte waaraan een signaal moet voldoen worden weergegeven in een *transmit spectrum mask*.



Figuur 4-12. Een transmit spectrum mask zonder waarden van signaalsterkte

Op deze manier wordt de 2,4 GHz band opgedeeld in verschillende kanalen van elk 22 MHz breed. De centerfrequenties van ieder kanaal liggen 5 MHz uiteen. Dit zorgt ervoor dat deze kanalen elkaar overlappen. De breedte van de 2,4 GHz band is 72 MHz breed conform de FCC in Amerika en 85 MHz breed conform de ETSI in Europa. Daardoor worden in Amerika 11 kanalen en in Europa 13 kanalen gedefinieerd.

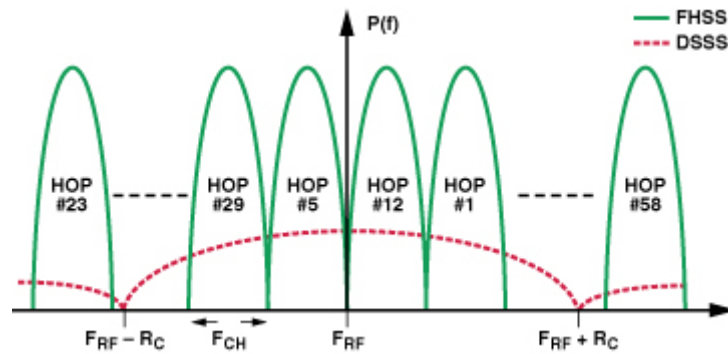
DSSS bestaat in verschillende varianten.

- Differential Binary Phase Shift Keying (DBPSK): Elke draaggolf bestaat uit 1 bit, dus 1 bit wordt gecodeerd in een 11 bits code. De transmissiesnelheid bij dit principe bedraagt 1 Mbps.
- Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK): Elke draaggolf bestaat uit 2 bits, dus 2 bits worden gecodeerd in een 11 bits code. De transmissiesnelheid bedraagt 2 Mbps.
- Complementary Code Keying (CCK): Elke draaggolf bestaat uit 4 of 8 bits. Elke 4 bits worden gecodeerd in een 11 bits code. De transmissiesnelheid bedraagt 5,5 Mbps of 11 Mbps.

Het Dynamic Rate Shifting (DRS) systeem zorgt ervoor dat de snelheid automatisch aangepast wordt afhankelijk van de signaalsterkte.

4.7. Frequency Hopping Spread Spectrum

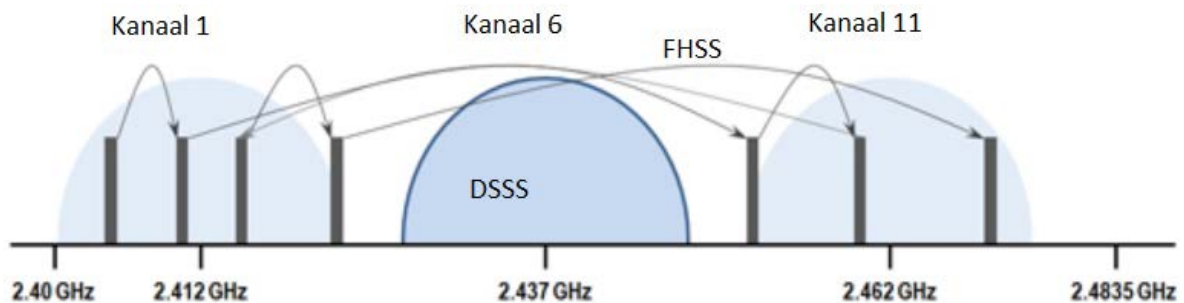
Bij Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) wordt snel gewisseld tussen verschillende kanalen. Het wisselen gebeurt via een pseudo-random sequentie, die zowel door de zender als de ontvanger gekend zijn. Deze sequentie is de hopping code. Een set van hopping codes die nooit dezelfde frequentie gebruiken op hetzelfde moment worden orthogonaal genoemd. Hierdoor is FHSS net als DSSS robuust en moeilijk te onderscheppen. Daarnaast kan deze technologie gebruikt worden naast andere technologieën op dezelfde frequentieband zonder te interfereren.



Figuur 4-13. FHSS in vergelijking met DSSS

Bij FHSS wordt geen spreiding gebruikt in het frequentiedomein zoals bij DSSS. De spreiding vindt plaats in het tijdsdomein. Hierdoor is het nodige vermogen om een voldoende signaal-ruis verhouding te bekomen groter dan bij DSSS. Daarnaast vraagt FHSS ook meer tijd om te synchroniseren.

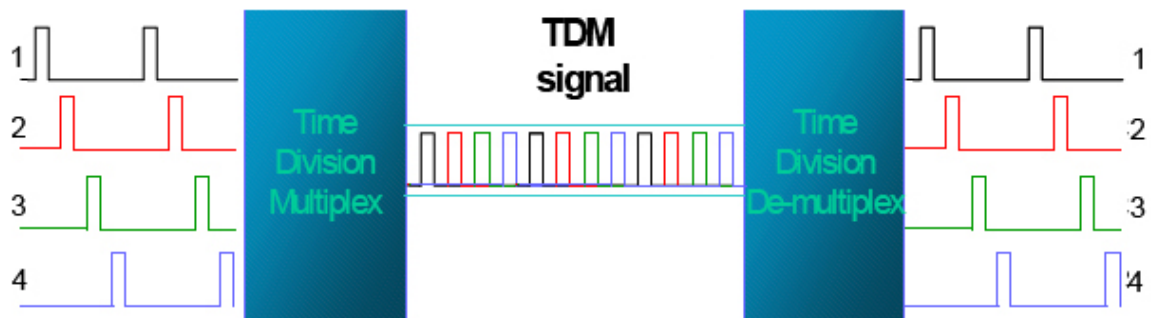
FHSS wordt gebruikt door bijv. Bluetooth. Binnen dezelfde frequentieband wordt DSSS gebruikt door WLAN. Om de coëxistentie te verbeteren wordt Adaptive Frequency Hopping (AFH) toegepast. Hierbij zal het Bluetooth-toestel de frequentieband scannen om na te gaan of er bepaalde banden in gebruik zijn. Indien dit zo is, dan zal bij het hopping-proces die band(en) vermeden worden.



Figuur 4-14. AFH

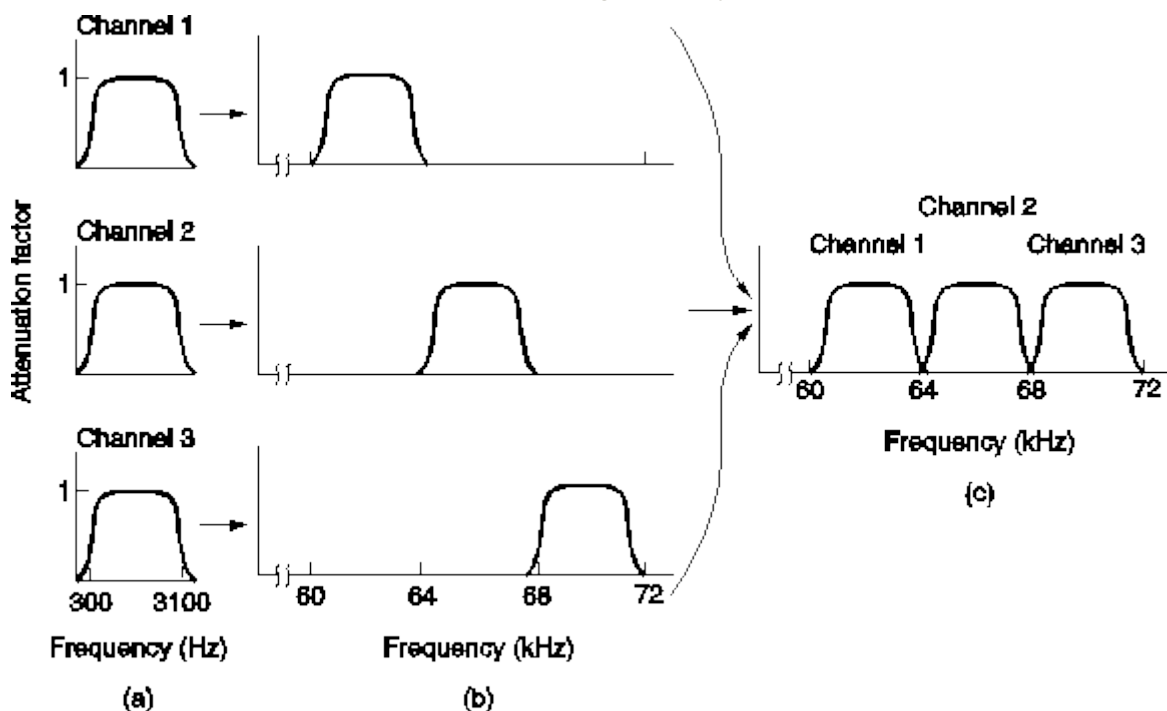
4.8. Multiplexing en Multiple Access Methods

Het multiplexen van signalen wil zeggen dat verschillende signalen (analoog of digitaal) gecombineerd worden tot één signaal. Dit ene signaal wordt dan verder gestuurd via een kabel of draadloos via een draaggolf. Aan de ontvangerzijde wordt het signaal opnieuw 'gedemultiplexed'. Het voordeel is dat voor meerdere signalen slechts één transmissiesysteem nodig is. Een eerste type van multiplexing is Time Division Multiplexing (TDM). Hierbij krijgt elk signaal (meestal digitaal) een stukje van de totale beschikbare tijd om de gegevens langs het transmissiepad door te sturen. TDM wordt toegepast bij telefonie en bij optische communicatie (via glasvezel).



Figuur 4-15. Principe TDM

Bij Frequency Division Multiplexing (FDM) wordt niet de tijd, maar het frequentiespectrum verdeeld. Elke zender krijgt een centerfrequentie aangewezen en een bepaalde bandbreedte. Dit principe wordt toegepast bij de klassieke FM-radio.



Figuur 4-16. Principe FDM

Time Division Multiple Access (TDMA) is vergelijkbaar met TDM, maar is toch verschillend. Bij TDM worden twee nodes met elkaar verbonden via één medium (bijv. een draad). Bij TDMA wordt hetzelfde medium gebruikt door meerdere nodes van een verschillend netwerk. Een praktisch voorbeeld is de 2,4 GHz band die gebruikt wordt door diverse netwerken met heel wat gebruikers, maar die allemaal gebruik maken van hetzelfde medium, nl. de lucht. TDMA wordt bijvoorbeeld gebruikt door DECT telefonie. TDMA wordt meestal in combinatie met FDMA gebruikt. Hierbij krijgt elke gebruiker een timeframe toegewezen op een bepaalde frequentieband.

Frequency Division Multiple Access (FDMA) en FDM zijn terug verschillende technologieën. Bij FDM worden meerdere laagfrequentie signalen gemengd met een hoogfrequente draaggolf en tenslotte gesommeerd tot één signaal. Alle signalen worden vanuit één zender gestuurd. Bij FDMA willen verschillende nodes gebruik maken van hetzelfde netwerk. Bij FDMA wordt een signaal (met gemoduleerde data, bijv. PSK) gemaakt op een correcte frequentieband. Hier komt bijgevolg geen multiplexer aan te pas.

Bij Code Division Multiple Access worden meerdere datastromen over hetzelfde communicatiekanaal gestuurd. Om dit mogelijk te maken wordt de data gecodeerd zoals bij spread spectrum technieken. Om het correct signaal aan de ontvangerzijde te bepalen moet dezelfde code gekend zijn. De extractie van het signaal gebeurt d.m.v. correlatie.

4.9. Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Hoewel de naam eerder doet denken aan een multiplex techniek, is Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) een wijd verspreide modulatietechniek, wat intern gebruik maakt van multiplexing. OFDM maakt het mogelijk om data op een veel hogere snelheid door te sturen met een beperkte error rate.

De basis van OFDM zijn orthogonale functies.

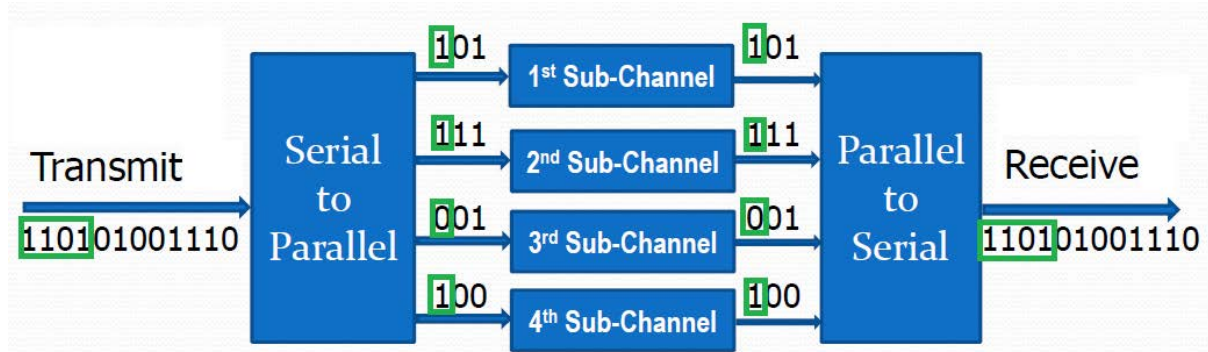
Veronderstel twee sinusoidale functies met een verschillende frequentie f_1 en f_2 . Als beide een geheel veelvoud zijn van een basisfrequentie f_0 , dan zijn deze functies orthogonaal. Men spreekt in dit opzicht van orthogonale frequenties. De volgende functies zijn bijgevolg orthogonaal:

$$A_1 \cdot \sin(2\pi n \cdot f_0 t + \alpha) \quad \text{en} \quad A_2 \cdot \sin(2\pi m \cdot f_0 t + \alpha)$$

Een voorbeeld van orthogonale functies zijn $\sin(x)$ en $\cos(x)$.

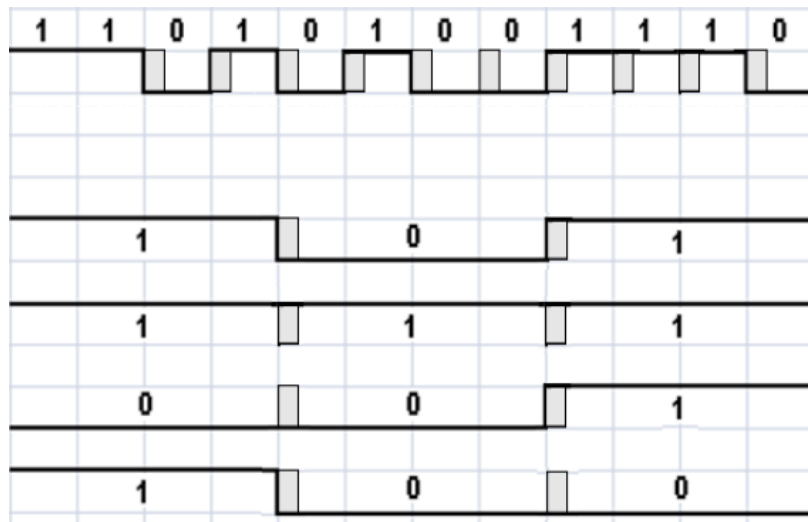
De frequenties $n \cdot f_0$ en $m \cdot f_0$ zijn orthogonale frequenties. Twee dergelijke frequenties zijn onafhankelijk van elkaar en er is geen interferentie tussen beide. Bij OFDM worden meerdere orthogonale frequenties gebruikt.

Voor de codering wordt de te communiceren bit string eerst opgesplitst in N bit strings. Hierbij is N gelijk aan het aantal kanalen met orthogonale frequenties (vier in ons voorbeeld). Deze N bits worden tegelijk doorgestuurd door de N kanalen.



Figuur 4-17. Principe splitsen van bit string bij OFDM

Het voordeel wordt zichtbaar als de digitale doorstroming in het tijdsdomein bekeken wordt.



Figuur 4-18. Invloed op BER

Door reflecties en multi-path effecten kan het signaal vervormd worden. Bij hoge datasnelheden kan dit leiden tot een hoge bit error rate (BER). Door OFDM toe te passen, wordt de snelheid verlaagd, maar wel parallel uitgevoerd, zodat de snelheid van de datadoorstroming gelijk blijft. Hierdoor is de BER veel lager en wordt een robuustere communicatie verkregen. Voor het halen van 10 Mbps, zijn 4 kanalen nodig met elk een snelheid van 2,5 Mbps.

IEEE802.11a, wat besproken wordt in het volgende hoofdstuk, voorziet in de 5 GHz-band 8 niet-overlappende kanalen van 20 MHz breed. De OFDM technologie verdeelt ieder kanaal in 52 subdragers, elk 312,5KHz breed. Iedere subdrager wordt tegelijkertijd, parallel verstuurd. Per draaggolf wordt de symbooldichtheid klein gehouden.

4.10.Referenties

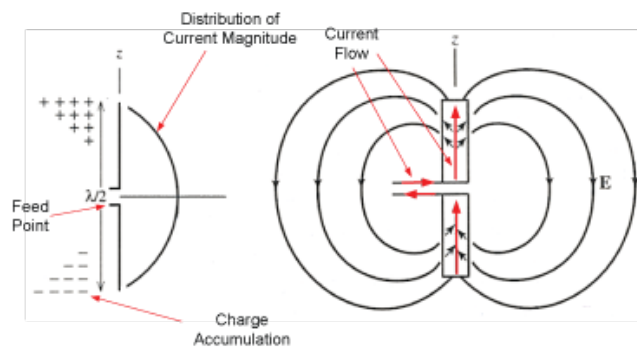
- [1] Spread spectrum and Wi-Fi basics, S. M. Mahmud
- [2] Principles of Modulation in Wireless Communication, P. Coulon
- [3] Wireless Short-Range Devices: Designing a Global License-Free System for Frequencies <1 GHz, A. Harney, 2006.

5. Connecteren van antennes

Een draadloos communicatiesysteem bestaat uit een radio die werkt als zender (transmitter) of ontvanger (receiver) en een antenne. In de meeste gevallen kan een radio beide functies uitvoeren en spreekt men van een transceiver of zendontvanger. In de meeste gevallen is de transceiver verbonden met de antenne door middel van een coaxiale kabel. Antennes zijn omvormers die het signaal op kabel omzetten naar elektromagnetische straling of omgekeerd. De vorm en afmetingen van de antenne zijn bepalend voor zijn stralingseigenschappen en kennis hiervan laat dan ook toe om een geschikte antenne te kiezen en die correct te installeren. Een belangrijke eigenschap is dat de zend- en ontvangsteigenschappen van antennes identiek zijn. Bovendien zal de omgeving waarin de antenne zich bevindt een invloed uitoefenen op de stralingseigenschappen. Een verkeerde antenne keuze of slechte installatie kan leiden tot een vermindering in datasnelheid of in het slechtste geval een onderbreking van de communicatielink. Bij hoge frequenties zijn de kabels die het signaal van en naar de antenne brengen geen perfecte doorverbindingen, maar treden er verschillende hoogfrequente effecten op waardoor een coaxiale kabel zich gedraagt als een transmissielijn.

5.1. Werkingsprincipe van antennes

De werking van antennes kan eenvoudig geïllustreerd worden aan de hand van de halve-golflengte ($\lambda/2$) antenne (dipool) zoals afgebeeld in Figuur 5-15. Een dipool antenne werkt het best bij een frequentie waarvan de halve golflengte gelijk is aan de lengte van de dipoolarmen. Deze frequentie wordt de resonantiefrequentie of werkingfrequentie van de antenne genoemd. De oscillatie van de elektrische ladingen in de geleidende armen is verantwoordelijk voor de elektromagnetische straling. Het E-veld van de antenne is in lijn met de dipoolarmen en staat loodrecht op het H-veld. Het vlak waarin de veldlijnen van het E-veld en het H-veld lopen worden respectievelijk het E-vlak en het H-vlak genoemd.



Figuur 5-1: Werkingsmechanisme van een dipool

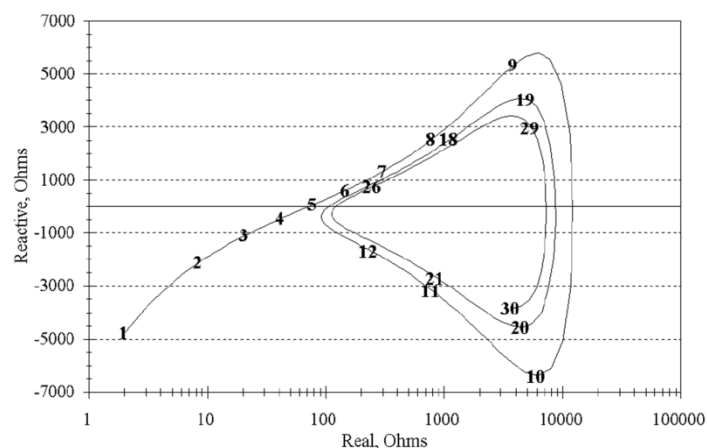
Merk op dat het E- en H-veld enkel loodrecht op elkaar staan indien we ons in het verre veld van de antenne bevinden. Deze conditie is voldaan indien we op een afstand van $\lambda/2\pi$ verwijderd zijn van de dipool antenne. Bij elektrisch grote antennes zoals de parabool reflector is deze afstand $2D^2/\lambda$ waarbij D de grootste dimensie van de antenne is. Objecten dichterbij bevinden zich in het nabije veld en gaan de stralingseigenschappen van de antenne beïnvloeden [1].

5.2. Eigenschappen van antennes

5.2.1. Ingangsimpedantie en resonantiefrequentie

De ingangsimpedantie van een antenne is een belangrijke parameter en geeft aan hoe goed een antenne bij een bepaalde frequentie is aangepast aan de karakteristieke impedantie van het systeem. In bijna alle RF systemen is dit 50Ω . Wijkt de ingangsimpedantie van de antenne af van 50Ω dan ontstaan er reflecties met vermogensverlies als gevolg. Bekijkt men de ingangsimpedantie van de antenne in functie van de frequentie dan kan men hieruit de resonantiefrequentie en de impedantiebandbreedte van de antenne afleiden.

Dit wordt aangetoond aan de hand van een dipool met een totale lengte $l = 3$ cm die geëxciteerd werd met opeenvolgende frequenties van 1 GHz-30 GHz. Figuur 5-2 toont de ingangsimpedantie van de antenne in het frequentiebereik van 1 GHz tot 30 GHz. Op de X-as wordt de reële component van de ingangsimpedantie voorgesteld. De Y-as stelt op zijn beurt de reactieve of imaginaire component van de ingangsimpedantie voor. Punten die boven de X-as liggen stellen een inductieve impedantie voor. Onder de X-as is de impedantie capacitief. Zoals te zien is, heeft de frequentie van het signaal een grote invloed op de ingangsimpedantie van de antenne. Deze figuur toont ook aan dat de karakteristiek verschillende keren de X-as snijdt. Op die snijpunten is de impedantie louter resistief en de frequenties waarbij dit gebeurt zijn de resonantiefrequenties van de antenne. De grafiek snijdt de X-as een eerste maal bij een frequentie van 5 GHz. Deze frequentie komt overeen met een golflengte van 6 cm. Dit is precies het dubbele van de lengte van de dipool. De andere frequenties waar de ingangsimpedantie louter reëel is noemt men de hoger orde mode resonantiefrequenties.

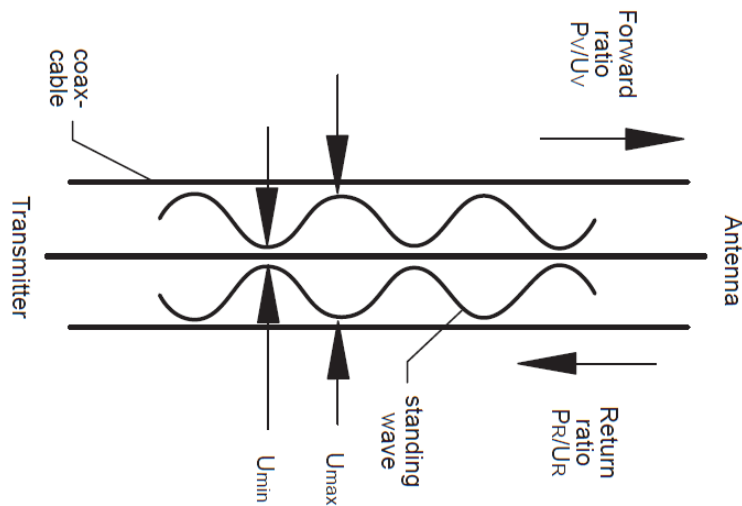


Figuur 5-2: Ingangsimpedantie van een dipoolantenne in het frequentiebereik van 1 GHz tot 30 GHz

De ingangsimpedantie bij de eerste resonantiefrequentie is niet gelijk aan 50Ω maar ongeveer gelijk aan 72Ω . Om dit op te lossen maakt men gebruik van aanpassingsnetwerken die de impedantie van de antenne omzetten naar 50Ω . Een ingangsimpedantie van 50Ω kan men enkel realiseren op één frequentie. Bovendien is er bij een dipool antenne ook een balun nodig die verantwoordelijk is voor de omzetting van het gebalanceerd signaal afkomstig van de coaxkabel naar een differentieel signaal of niet-gebalanceerd signaal.

5.2.2. Reflectiecoëfficiënt, Return Loss en VSWR

In Figuur 5-3 staat een coax kabel afgebeeld met aan de linkerzijde een zender en aan de rechterzijde de antenne. De zender stuurt een vermogensgolf (P_v)/spanningsgolf (U_v) uit dat propageert langsheen de kabel tot aan de antenne. Een misaanpassing aan de antenneklemmen veroorzaakt reflecties waardoor een gereflecteerde spanningsgolf (U_r)/vermogensgolf (P_r) ontstaat. Deze spanningsgolven gaan interfereren met elkaar waardoor er een staand golfpatroon met een maximum spanning (U_{max}) en een minimum spanning (U_{min}) ontstaat.



Figuur 5-3: Ontstaan van een staande golfpatroon in een transmissielijn ten gevolge van reflectie [2]

De ingangsimpedantie van een antenne kan men opmeten door ofwel de heengaan- en gereflecteerde vermogensgolven, spanninggolven of het staande golfpatroon te gaan opmeten. Deze drie verschillende grootheden worden gebruikt om de ingangsimpedantie van antennes op te meten en staan hieronder kort beschreven:

5.2.2.1. Reflectiecoëfficiënt (spanning - en vermogens reflectiecoëfficiënt.)

De spannings-reflectiecoëfficiënt Γ is een complex factor grootheid en is gedefinieerd als de ratio van de gereflecteerde spanning V_r op de invallende spanning V_i :

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Met Z_0 de referentie impedantie (50Ω) en Z_L de antenne ingangsimpedantie. Indien de spannings-reflectiecoëfficiënt gekend is kan men aan de hand van de bovenstaande vergelijking de ingangsimpedantie van de antenne Z_L berekenen.

De vermogens-reflectiecoëfficiënt of Return Loss (RL) drukt uit hoeveel van het vermogen afgeleverd aan de antenneklemmen effectief in de antenne gekoppeld wordt. Hoe groter deze verhouding hoe beter de antenne is aangepast aan de bron. Uitgedrukt in een logaritmische schaal wordt dit:

$$RL = 10 \log_{10} \left(\frac{P_v}{P_r} \right) = -20 \log_{10} |\Gamma| [dB]$$

5.2.2.2. Voltage standing wave ratio (VSWR)

De voltage standing wave ratio of VSWR is een andere manier om de misaanpassing kwantitatief uit te drukken en wordt gedefinieerd als

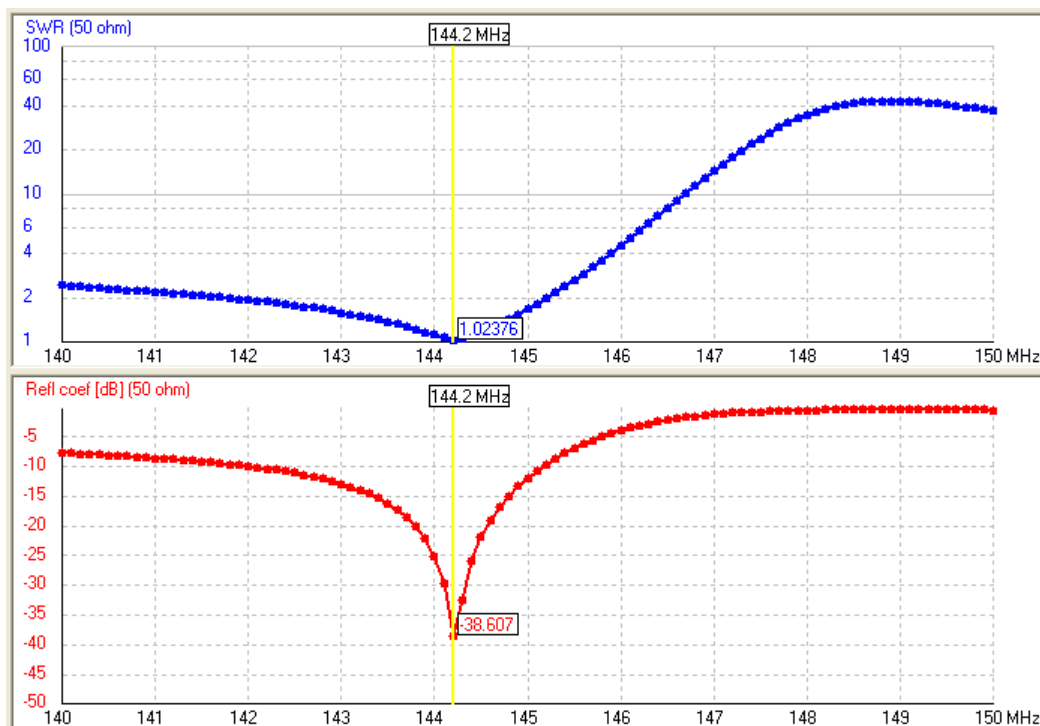
$$VSWR = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

VSWR wordt altijd weergegeven als een verhouding (vb. 1:1, 2:1, 10:1) waarbij 1 altijd in de noemer staat. Voor antennes wordt de bandbreedte gedefinieerd als het frequentiebereik waar $VSWR < 2:1$. De grenzen voor impedantieaanpassing van de 4 parameters staan vermeld in Tabel 5. Deze grenzen komen overeen met een gereflecteerd vermogen van ongeveer 10%. Dit houdt in dat 90% van het aangelegde vermogen in de antenne wordt gekoppeld.

Tabel 5 : Belangrijke waarden van de 3 verschillende parameters die impedantie-aanpassing kwantificeren

	Perfecte aanpassing	Grens voor bepaling bandbreedte	Volledige reflectie
$ \Gamma $	0	< 0.33	1
RL	∞ dB	> 9.54 dB \approx 10 dB	0 dB
$ S_{11} $	$-\infty$ dB	< -9.54dB \approx -10 dB	0 dB
VSWR	1	< 2:1	∞

Deze karakteristieken worden ook vaak in functie van frequentie weergegeven zoals afgebeeld in Figuur 5-4.



Figuur 5-4 : SWR en S_{11} meting in functie van frequentie van een antenne met een resonantie frequentie van 144.2 MHz.

Sommige antennefabrikanten specificeren de impedantiebandbreedte bij een grens van 3:1 of 6dB.

5.2.3. Antennewinst, directiviteit en antenne-efficiëntie

Een isotrope straler is een theoretische antenne die in de praktijk niet voorkomt. Deze antenne wordt gebruikt als referentie voor de stralingseigenschappen van praktische antennes. Het is een ideale straler die in alle richtingen evenveel vermogen uitstraalt of een zelfde gevoeligheid heeft voor het ontvangen van signalen komende vanuit alle richtingen.

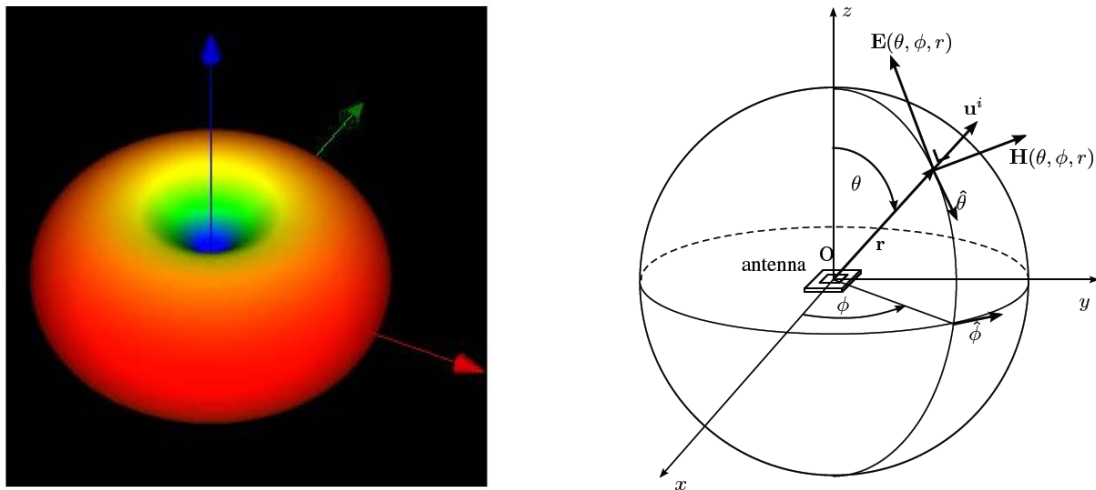
Bij een praktische antenne zullen er bepaalde richtingen zijn waarin de antenne meer vermogen concentreert of gevoeliger is voor het opvangen van signalen ten opzichte van een andere richting. Dit noemt men de directiviteit van een antenne. Een isotrope straler heeft een directiviteit gelijk aan 1. Indien men nu ohmse verliezen van de antenne in rekening gaat brengen dan spreekt men van gain of antennewinst. Antennewinst kan aanzien worden als de vermogen output van de antenne in een bepaalde richting in vergelijking met het vermogen dat uitgestraald wordt in eender

welke richting door een isotrope straler. Met een isotrope straler als referentie is de eenheid van antennewinst dBi, waarbij de index i verwijst naar isotroop. De antennewinst van de isotrope straler zelf is 0dBi.

De antenne stralingsefficiëntie wordt bepaald als de verhouding van de antennewinst op de directiviteit. Geeft de fabrikant enkel de antennewinst als één getal dan is dit de antennewinst in de hoofdrichting van de antenne.

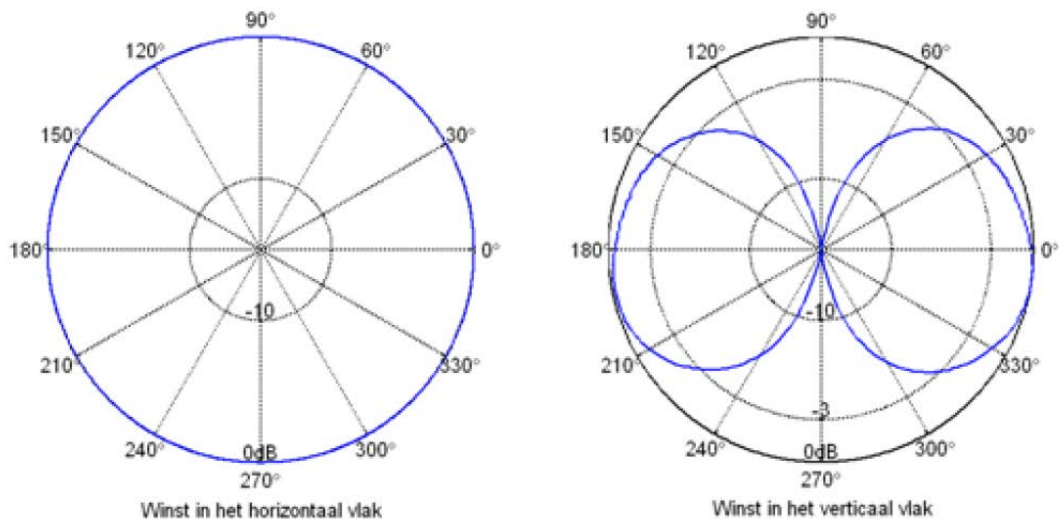
5.2.4. Stralingspatroon

Het stralingspatroon van een antenne is een grafische voorstelling van de antennewinst in functie van de ruimte. Een compleet antennestralingspatroon is 3 dimensionaal zoals te zien in Figuur 5-5. Een veel gebruikt coördinatensysteem geeft het stralingspatroon weer in functie van de azimuthhoek Φ en elevatiehoek θ . De antenne bevindt zich in de oorsprong van het coördinatensysteem. Praktisch gaat men de antenne oriënteren in het coördinatensysteem zodat het azimuthvlak en elevatievlak de hoofdvlakken zijn van het stralingspatroon. Het azimuthvlak is het horizontale vlak (XY-vlak) en het elevatievlak verwijst naar het verticale vlak (YZ-vlak).



Figuur 5-5: 3 Dimensionaal stralingspatroon van een dipool antenne (links) en het basis coördinatensysteem voor de weergave van het stralingspatroon (rechts)

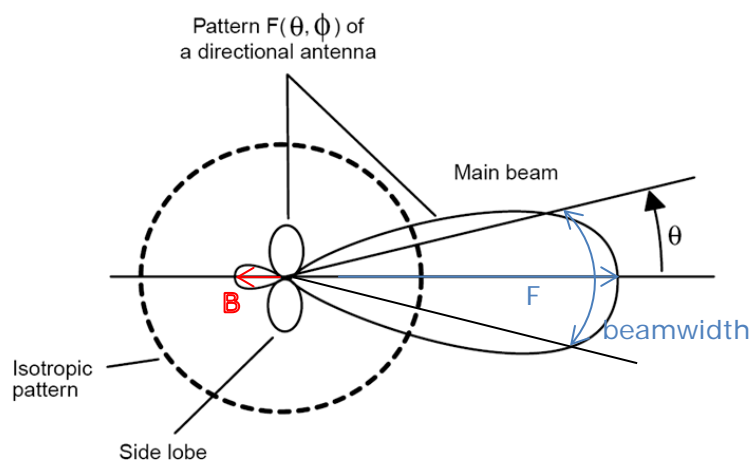
Soms gebruikt men de notatie E-vlak en H-vlak. Bij een verticaal georiënteerde dipoolantenne is het E-vlak het verticale vlak terwijl het H-vlak het horizontale vlak is. Meestal geeft men het stralingspatroon van een antenne weer in twee hoofdvlakken zoals afgebeeld in Figuur 5-6.



Figuur 5-6: Antennestralingspatroon van een dipool antenne in het horizontaal vlak en het verticale vlak

Belangrijke antenne kenmerken die men kan aflezen op het stralingspatroon zijn weergegeven in Figuur 5-7 en worden hieronder verduidelijkt:

- **Main beam (hoofdlobe):** De hoofdrichting waarin de antenne het best uitstraalt of signalen ontvangt. Het maximum van deze lobe is de maximale antenne winst en de richting waarin de antennestraling maximaal is wordt de broadside richting genoemd.
- **Side lobe (zijlobes):** Alle zijlobes van het stralingspatroon. Bij een directionele antenne wordt niet alle energie gekoppeld in één hoofdrichting maar zijn er ook enkele zijlobes aanwezig waarlangs energie weglekt. Deze zijn meestal niet gewenst en dienen zo klein mogelijk te zijn.
- **3-dB beamwidth (3dB bundelbreedte):** Deze parameter geeft weer hoe breed de hoofdlobe is en wordt gedefinieerd als het aantal graden waarbij de antenne winst niet kleiner wordt dan maximale antenne winst – 3dB. Dit wordt ook nog de half-power-beamwidth genoemd.
- **Front-to-Back ratio:** De Front-to-Back verhouding (F/B) is een eigenschap die het stralingsniveau aan de achterkant van een directionele antenne weergeeft in vergelijking met het stralingsniveau van de broadside richting. Het wordt berekend als de verhouding van de maximale winst in de hoofdrichting tot de antenne winst in de tegengestelde richting.



Figuur 5-7: Stralingspatroon van een antenne met zijn hoofdkenmerken

5.2.5. EIRP: Effective Isotropic Radiated power.

Het effectief of equivalent isotroop uitgestraald vermogen is de combinatie van het werkelijke zendvermogen en de antennewinst. Men kan EIRP aanzien als de hoeveelheid vermogen dat moet uitgestraald worden door een isotrope straler om in de hoofdrichting van de beschouwde antenne hetzelfde vermogen te krijgen.

$$EIRP [dBm/dBW] = P_T [dBm/dBW] + G [dBi]$$

Een antenne met een gain van 15dBi en een zendvermogen van 50dBm heeft een EIRP van 65dBm. Met andere woorden wenst men een isotrope antenne te gebruiken dan moet het zendvermogen 65dBm zijn om hetzelfde vermogen te ontvangen in de hoofdrichting van de antenne die beschouwd wordt.

5.2.6. Antennepolarisatie

Elektromagnetische golven uitgestraald door een antenne hebben een zekere polarisatie. Dit is een belangrijke parameter en moet zeker in rekening worden gebracht tijdens de antenne-installatie. Om een maximale vermogensoverdracht te realiseren tussen de zend en ontvangst antenne is het van cruciaal belang dat beide antennes dezelfde polarisatie hebben en goed zijn uitgelijnd ten opzichte van elkaar. Bij lineaire polarisatie spreekt men van verticale of horizontale polarisatie. Bij circulaire polarisatie moet men weten of de polarisatie linkshandig (LHCP) of rechtshandig (RHCP) is. Vooral bij Line-of-Sight communicatie, is deze uitlijning belangrijk. Het vermogensverlies ten gevolge van een verkeerde oriëntatie van de antennes ten opzichte van elkaar wordt polarization loss of polarisatieverlies genoemd. Een overzicht van polarisatieverliezen bij verschillende oriëntaties tussen de zend en ontvangstantennes staan afgebeeld in Figuur 5-8. Indien er een misalignatie is van 90° dan is er een oneindig groot polarisatieverlies en de ontvangstantenne zal niets ontvangen. In de praktijk zal een lineair gepolariseerde antenne nog steeds iets ontvangen omdat een antenne nooit perfect lineair gepolariseerd is. Cross-polarisation of kruis-polarisatie geeft aan hoe sterk een antenne elektromagnetische golven uitstraalt of kan ontvangen met een polarisatie waarvoor de antenne niet gemaakt is. Een misalignatie van 45° tussen twee lineair gepolariseerde antennes introduceert een extra vermogensverlies van 3dB of anders gezegd, de helft van het vermogen wordt verloren.

		WAVE POLARIZATION						POLARIZATION LOSS
		VERTICAL	HORIZONTAL	RIGHT HAND CIRCULAR	LEFT HAND CIRCULAR	45° RIGHT LINEAR	45° LEFT LINEAR	
WAVE POLARIZATION	VERTICAL	0 dB	∞	3 dB	3 dB	3 dB	3 dB	
	HORIZONTAL	∞	0 dB	3 dB	3 dB	3 dB	3 dB	
	RIGHT HAND CIRCULAR	3 dB	3 dB	0 dB	∞	3 dB	3 dB	
	LEFT HAND CIRCULAR	3 dB	3 dB	∞	0 dB	3 dB	3 dB	
	45° RIGHT LINEAR	3 dB	3 dB	3 dB	3 dB	0 dB	∞	
	45° LEFT LINEAR	3 dB	3 dB	3 dB	3 dB	∞	0 dB	

Figuur 5-8: Overzicht van polarisatieverliezen tussen twee antennes

Bemerk ook dat de combinatie van een lineair gepolariseerde antenne met een circulair gepolariseerde antenne werkt maar er is een polarisatieverlies van 3dB.

In non Line-of-Sight communicatie is polarisatie minder van belang omdat de omgeving zelf verantwoordelijk is voor depolarisatie van de elektromagnetische golven. Zo wordt een RHCP golf na reflectie tegen een wand een LHCP golf. Ook de willekeurigheid van de oriëntatie van objecten in de omgeving zorgen voor een willekeurige oriëntatie van oorspronkelijk lineair gepolariseerde elektromagnetische golven.

Sommige antennes zijn zo ontworpen dat ze beide polarisaties simultaan uitzenden of kunnen ontvangen. De antenne zal voorzien zijn van twee connectoren, elk met hun eigen polarisatie. Bij een duale lineaire gepolariseerde antenne zal er dus een verticale en een horizontale polarisatie voorzien worden. Een duale circulair gepolariseerde antenne zal RCHP en LHCP aanbieden. Beide polarisaties zijn geïsoleerd ten opzichte van elkaar waardoor het mogelijk wordt om twee verschillende signalen te versturen op dezelfde frequentie zonder dat er interferentie optreedt. Een antenne met duale polarisatie (lineaire) herken je aan het feit dat er zowel verticale als horizontale antenne-elementen aanwezig zijn zoals afgebeeld in Figuur 5-9.



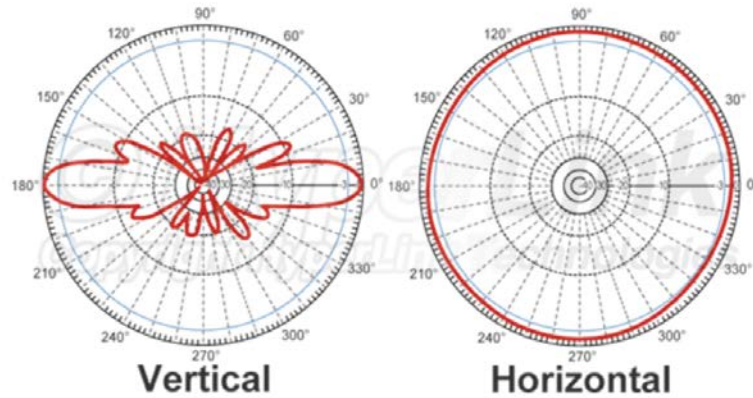
Figuur 5-9: Voorbeeld van een antenne met duale lineaire polarisatie

5.3. Basis antennetypes

Afhankelijk van de toepassing zijn er verschillende antennetypes die men kan gebruiken. Er kan een onderscheid gemaakt worden tussen omnidirectionele antennes en directionele antennes.

5.3.1. Omnidirectionele antennes

Het stralingspatroon van een omnidirectionele antenne wordt gekenmerkt door zijn cirkelvorm in één van de hoofdvlakken van de antenne. Deze antennes bieden een dekking over 360°. In het andere hoofdvlak kan de directiviteit groot of klein zijn. Typisch worden zulke antennes gebruikt voor non Line-of-Sight communicatie waarbij men niet weet van welke richting het signaal komt. Ook TV-zendmasten gebruiken zulke antennes daar een groot gebied moet gedekt worden. Dit noemt men point-to-multipoint communicatie. Deze antennes kennen een kleine tot middelmatige grote antennewinst.



Figuur 5-10: Stralingspatroon van een omnidirectionele antenne

Enkele veel gebruikte omnidirectionele antennes zijn monopool antennes en dipoolantennes. Dipoolantennes kennen een winst van maximaal 2.16dBi en worden soms ook gebruikt als referentie antenne net als de isotrope straler. In dit geval wordt de antennewinst van de antenne in beschouwing uitgedrukt in dBd (d=dipool). Een monopool antenne is in feite een dipoolantenne waarbij één van de dipoolarmen is vervangen door een geleidend grondvlak of geleidende draden die verbonden zijn met massa van de voedingskabel. Hierdoor is de lengte van de antenne slechts een kwart golflengte ($\lambda/4$). Een monopool antenne kent een typische antennewinst van 5dBi of 2 maal de winst van een dipool antenne (+3dB). Een dipool en monopool antenne staan afgebeeld in Figuur 5-11.

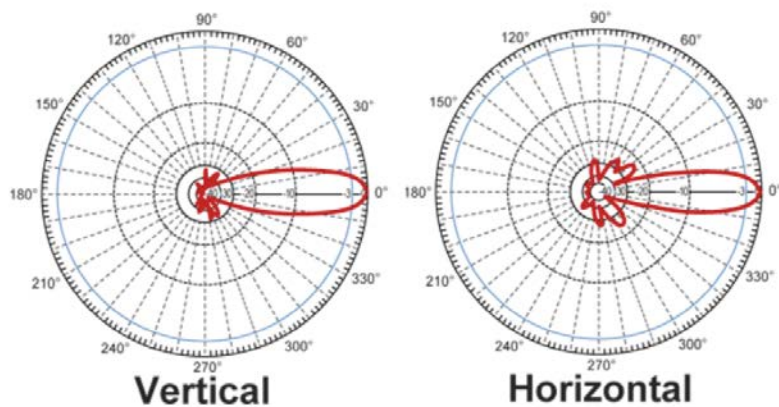


Figuur 5-11: Dipool antenne (links), monopool antenne (rechts)

Om een hogere winst te krijgen in het verticale vlak worden meerdere omnidirectionele antennes op een verticale lineaire wijze boven elkaar geplaatst. Op die manier wordt het omnidirectionele stralingspatroon in het horizontaal vlak behouden maar wordt de bundel in het verticale vlak meer gefocust waardoor een hogere antennewinst wordt gerealiseerd in één hoofdvlak. Zulke antennes worden ook nog collineaire antenne roosters genoemd en naarmate het aantal antenne elementen toeneemt stijgt de antennewinst.

5.3.2. Directionele antennes

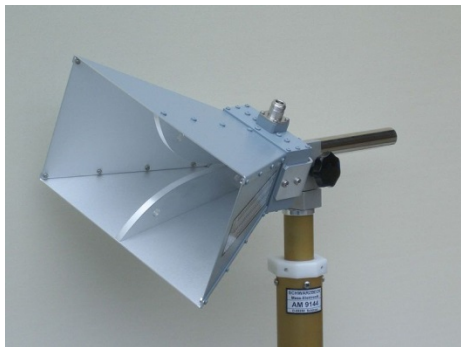
Directionele antennes richten hun energie in één specifieke richting. Het stralingspatroon van zulke antennes is een smalle bundel in zowel het horizontale als het verticale vlak zoals afgebeeld in Figuur 5-12. Zulke antennes hebben een grote antennewinst en worden gebruikt bij point-to-point communicatie of multipoint-to-point communicatie waarbij de te overbruggen afstand al snel enkele km kan bedragen bij grote zendvermogens. Een Line-of-Sight conditie bij zulke antennes is van groot belang om de kwaliteit van link te verzekeren. Bij zulke antennes is het van groot belang ze in de correcte richting wijzen omwille van de smalle stralingsbundel. Een kleine misalignatie zal verantwoordelijk zijn voor een sterke afname van de antennewinsten in de Friss formule. Het verlies dat ontstaat ten gevolge van misalignatie wordt ook nog pointing loss genoemd.



Figuur 5-12: Stralingspatroon van een directionele antenne

Typische directionele antennes zijn hoorn antennes, paneel antennes, parabool of dish antennes en Yagi Uda antennes. Deze antennes staan afgebeeld in Figuur 5-13.

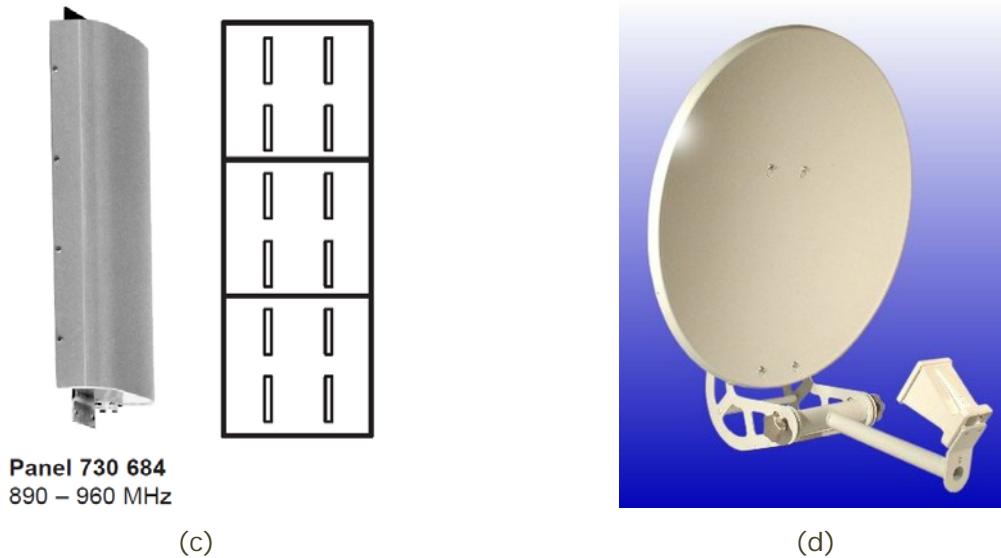
- Hoorn antennes worden voornamelijk gebruikt in labo's voor het opmeten van de stralingseigenschappen van andere antennes. In commerciële applicaties worden ze ingezet als voedingsantenne voor een paraboolreflector.
- Parabool antennes worden toegepast voor satellietcommunicatie. De parabolische vorm zorgt ervoor dat de energie geconcentreerd wordt in het punt waar de voedingsantenne zich bevindt.
- Paneel antennes zijn in feite collineaire antenneroosters met een reflector aan de achterkant van de antenne. Deze reflector zorgt ervoor dat het stralingspatroon ook in het horizontale vlak gebundeld wordt. Ze worden voornamelijk gebruikt als sector antennes in GSM-netwerken.
- Yagi Uda antennes bestaan uit een dipool antenne met aan de achterkant een reflector. De andere geleidende elementen voor de dipool antenne zijn de directors en zorgen voor het richten van het stralingspatroon in de gewenste richting.



(a)



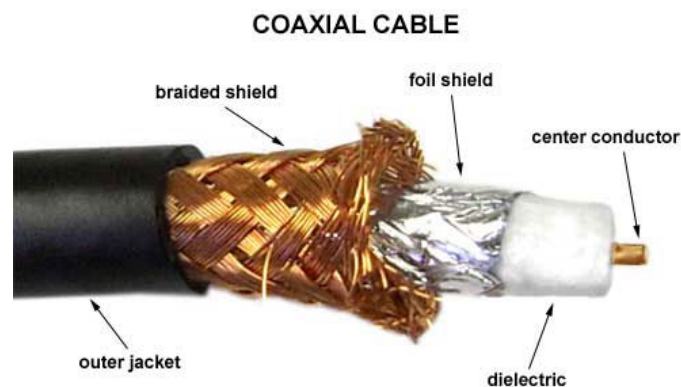
(b)



Figuur 5-13: (a) hoornantenne, (b) Yagi Uda antenne, (c) Paneel antenne, (d) Parabool antenne

5.4. RF kabels en connectoren

De meest gebruikte kabels om antennes te verbinden met een transceiver zijn coaxiale kabels (coax). De configuratie van een coaxiale kabel staat afgebeeld in Figuur 5-14. Ze zijn opgebouwd uit een midden geleider met daarrond een diëlektrische isolerende mantel. Deze isolerende mantel is op zijn beurt omhuld door een geleidende mantel. Deze geleidende mantel bestaat meestal uit een folie met daarrond een fijn geweven mantel van koperen draadjes. Verder wordt de coaxiale kabel beschermd door een PVC omhulsel. Het elektromagnetische veld zit gevangen tussen de midden geleider en de geleidende mantel waardoor coaxiale kabels populair zijn voor het overbrengen van RF signalen. Zelf stralen ze weinig uit en vertonen ze een sterke immuniteit tegen stoorsignalen van buitenaf (shielding). Een connector maakt het mogelijk om de coaxiale kabel te verbinden met andere componenten van het draadloze communicatie systeem.

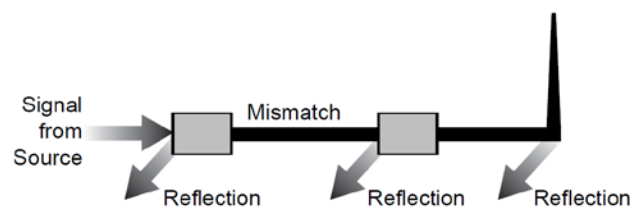


Figuur 5-14: Configuratie van een coaxiale kabel

5.4.1. De coaxiale kabel als transmissielijn

Wanneer de frequentie van een signaal stijgt, dan verkleint de golflengte. Indien de golflengte van het signaal 10 keer kleiner wordt dan de fysische lengte van de geleider dan ontstaan er transmissielijn effecten en gedraagt de coaxkabel zich als transmissielijn. Transmissielijnen worden gekenmerkt door hun karakteristieke impedantie en attenuatie.

- **De karakteristieke impedantie** van een transmissielijn is afhankelijk van de dwarsdoorsnede van de transmissielijn en de gebruikte materialen. Voor verliesloze transmissielijnen is de impedantie zuiver resistief. Bij praktische lijnen is dit bij benadering als resistief te beschouwen. In communicatiesystemen is de karakteristieke impedantie van een coaxiale kabel bijna altijd 50Ω . Coaxiale kabels voor televisie hebben een karakteristieke impedantie van 75Ω . Telkens een RF signaal een verandering in karakteristieke impedantie ondervindt spreekt men van misaanpassing (bv. aan de connector of aan de antenne-ingang) en ontstaan er reflecties.
- **Attenuatie** is de verzwakking dat het signaal ondervindt bij propagatie doorheen de transmissielijn en wordt meestal uitgedrukt in [dB/m]. Om extra verliezen te vermijden is het cruciaal om de kabellengte zo kort mogelijk te houden en een low loss kabel te gebruiken.
- **Insertion loss** is het extra verlies dat ontstaat door het inbrengen van de transmissielijn in de RF keten. Insertion loss kan men berekenen door de kabellengte te vermenigvuldigen met de attenuatiefactor



Figuur 5-15: Reflecties door verandering van karakteristieke impedantie [4].

De hierboven beschreven eigenschappen zijn de meest belangrijke. Bijkomend is er ook nog de maximale vermogen dissipatie dat de kabel aankan. Dit is enkel belangrijk bij zendsystemen die grote vermogens gebruiken. Warmtedissipatie in het diëlektricum kan zorgen voor beschadiging van de kabel indien de afvoer van warmte niet voldoende snel gebeurt. Algemeen kan men aannemen dat een kabel met minder attenuatie hogere vermogens aankan. Een vijfde factor is de velocity factor en geeft aan hoe snel de signalen propageren doorheen de kabel in vergelijking met de lichtsnelheid. Een snelheidsfactor van 0.8 of 88% geeft aan dat de signaalsnelheid 0.8 maal de lichtsnelheid is. Deze factor is belangrijk bij toepassingen waar de fase van het signaal belangrijk is of bij het opmeten van transmissielijnen zoals verder wordt besproken in Sectie 5.5.2. Ook de maximale spanning van een kabel kan een rol gaan spelen. Bij grote vermogens en een belasting met hoge VSWR kunnen staande golfpatronen resulteren in hoge spanningen waardoor de kabel eventueel beschadigd wordt (break down van het diëlektricum). Coaxiale kabels worden ook nog gekenmerkt door een maximale frequentie (cut-off frequency) waarbij ze mogen gebruikt worden. Indien ze boven die frequentie gebruikt worden zullen de propagatie-eigenschappen van de kabel veranderen.

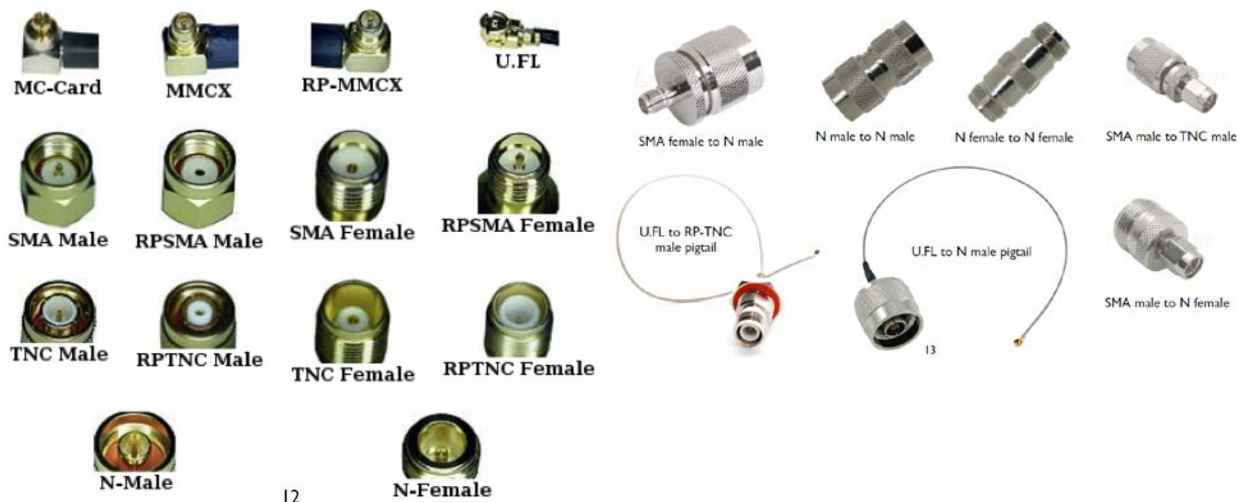
De diameter van de kabel heeft een invloed op de attenuatie factor. Hoe groter de diameter van een kabel hoe kleiner de attenuatie factor, indien men twee coaxen vervaardigt uit dezelfde materialen met elkaar vergelijkt. Mechanisch wordt er ook steeds een minimale buigstraal vermeld. Indien deze overschreden wordt zal de kabel beschadigd worden met extra verliezen door reflecties als gevolg. Voor microgolffrequenties gaat men vaak semi-rigide coaxiale kabels gebruiken waarbij de buitenste mantel een koperen buis is in plaats van een geweven mantel. Deze kabels worden gekenmerkt door een zeer lage attenuatie factor. In Figuur 5-16 vind je een overzicht van de attenuatie factor bij verschillende frequenties van verschillende types van coaxiale kabels.

Cable type	Finish	Outer Diameter	Loss @ 450MHz	Loss @ 900MHz	Loss @ 1600MHz	Loss @ 1900MHz	Loss @ 2100MHz	Loss @ 2400MHz
		[mm]	[dB/100m]	[dB/100m]	[dB/100m]	[dB/100m]	[dB/100m]	[dB/100m]
RG174/U	Plastic	2.6	67	95	145	162	170	180
RG316/U	Teflon	2.5	60	85	120	135	142	150
RG316D	Teflon	3.0	60	85	120	135	142	150
RG58C/U	Plastic	5.0	38	55	80	88	93	100
RG223	Plastic	5.5	35	52	74	80	84	90
LTR195	Plastic	5.0	23	35	51	56	60	64
LTR240	Plastic	6.1	17	25	34	37	40	43
RG213/U	Plastic	10.3	16	22	32	34	35	38
LTR400	Plastic	10.3	8	12.5	18	19	20	22

Figuur 5-16: Attenuatieverlies van enkele veelgebruikte coaxiale kabels [5].

5.4.2. Connectoren en adapters

Connectoren komen voor in verschillende afmetingen en vormen, de meest voorkomende types staan afgebeeld in Figuur 5-17. Belangrijk is dat elke connector een zeker geslacht heeft en ofwel van een buitendraad of binnendraad voorzien is. Zo spreekt men van een female of male connector. De adapters afgebeeld in Figuur 5-17 laten het toe om verschillende types van connectoren met elkaar te verbinden. Pigtail adapters worden voornamelijk gebruikt om de mechanische stress die een zware coaxiale kabel op een kleinere connector uitoefent te vermijden.



Figuur 5-17: Verschillende types van connectoren en adapters.

5.5. Antenne metingen

Objecten in de nabijheid van de antenne hebben een invloed op de stralingseigenschappen en de ingangsimpedantie van de antenne. Zo spreekt men van een driving-point impedance (werkingspunt impedantie) en een self-impedance (eigen impedantie). De eerste term is de ingangsimpedantie indien de antenne geplaatst is in de omgeving waar ze zal werken. De laatste term is de ingangsimpedantie van de antenne in de vrije ruimte. Een antenne element dat onderdeel uitmaakt van een

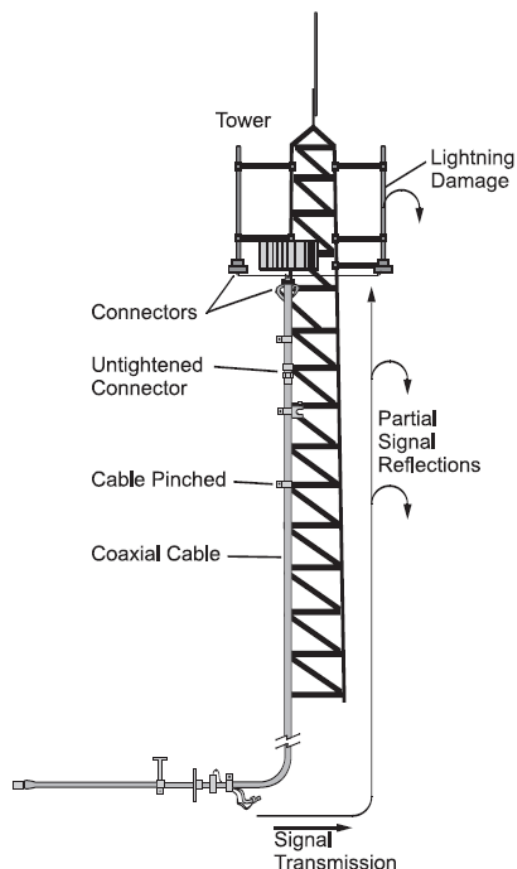
antennerooster is elektromagnetisch gekoppeld met de andere antenne-elementen van het rooster. De driving-point impedance is hierdoor niet gelijk aan de self-impedance. Om een accurate ingangsimpedantie meting uit te voeren moet de antenne gemonteerd staan in de omgeving waar ze gebruikt wordt. Indien dit ontoegankelijk is kan men de omgeving zo goed mogelijk proberen te reconstrueren.

5.5.1. Vector Network Analyzer

In een labo omgeving maakt men gebruik van een Vector Network Analyzer (VNA) voor het opmeten van de ingangsimpedantie van een antenne. De meting op zich is relatief eenvoudig maar de meetapparatuur is complex en relatief duur. Het meettoestel zelf stuurt een vermogensgolf uit en detecteert vervolgens de gereflecteerde vermogensgolf. Dit laat toe om de reflectiecoëfficiënt, VSWR of RL op te meten binnen een gespecificeerd frequentiebereik. Belangrijk bij de meting is dat men steeds het meettoestel moet kalibreren om de invloed van de meetkabels en het meettoestel te verwijderen uit de meting.

5.5.2. Distance-to-fault meting

Distance to fault (DTF) is een meettechniek die gebruikt wordt om fouten en degradatie van transmissielijnen en antenne systemen op te sporen [4]. Deze methode wordt gebruikt bij toren antennes die moeilijk toegankelijk zijn. Verschillende problemen die kunnen optreden bij toren antennes zijn:



Figuur 5-18. Toren antenne

1. Bliksem kan de antenne en de bliksem beschermer mogelijks beschadigen.
2. Zonlicht verandert de diëlektrische eigenschappen van de antennebehuizing waardoor de antenne bandbreedte wijzigt en eventueel buiten de band valt.

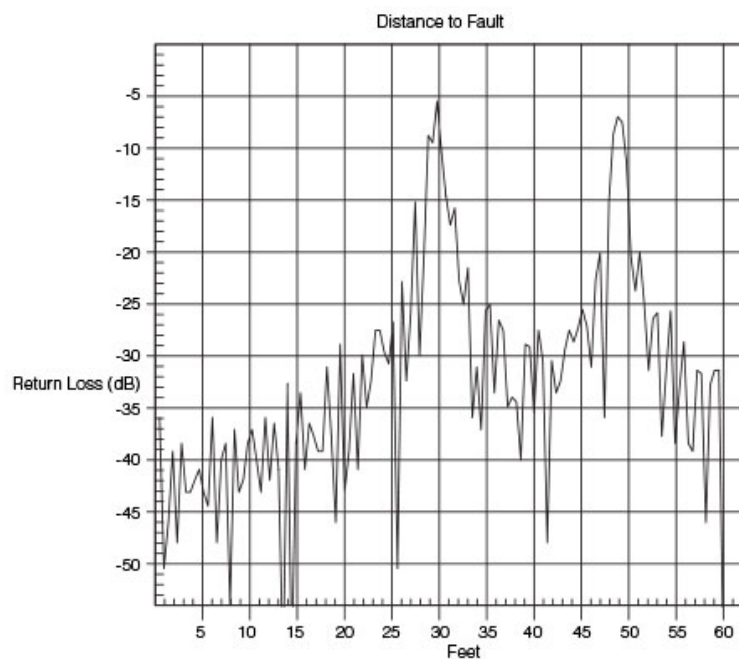
3. Transmissielijnen en antennes zijn blootgesteld aan het weer en degraderen over tijd omwille van corrosie en vocht.
4. Slechte connectie tussen antenne massa en transmissielijn.
5. Te hard aangespannen kabelklemmen.
6. Slechte connectoren.

Al deze problemen zijn verantwoordelijk voor ongewenste reflecties. Met de DTF meettechniek kan men lokaliseren waar de reflecties optreden en op een efficiënte manier fouten opsporen en herstellingen uitvoeren.

Distance-to-fault metingen zijn gebaseerd op twee technieken:

- TDR of Time Domain Reflectometry
- FDR of Frequency Domain Reflectometry

Bij Frequency Domain Reflectometry (FDR) wordt een smalband signaal aangelegd aan de kabel/antenne opstelling. Het signaal wordt stapsgewijs in frequentie vermeerderd (frequency sweep) binnen de frequentieband van interesse. De gereflecteerde signalen worden door een inverse FFT (Fast Fourier Transform) omgezet van het frequentiedomein naar het tijdsdomein. Met kennis van de velocity factor en de attenuatie van de transmissielijn wordt de werkelijke Return Loss in functie van de afstand weergegeven zoals afgebeeld in Figuur 5-20. Op die figuur is te zien dat er reflecties aanwezig zijn op een afstand van ongeveer 9m (=29,5 Feet) en 15m (= 49,2 Feet).



Figuur 5-20 : Voorbeeld van een DTF meting gebaseerd op FDR

Bij Time Domain Reflectometry wordt een korte DC puls (enkele ps), DC stap of halve sinus puls gekoppeld in de kabel/antenne installatie. De pulsbreedte is veel kleiner dan de totale transmissietijd die de puls nodig heeft om over de lijn te propageren. Bij elke verandering van karakteristieke impedantie wordt een deel van de puls gereflecteerd en vervolgens terug ontvangen. Met kennis van de velocity factor van de transmissielijn kan men de afstand berekenen waar de puls werd gereflecteerd. Bij een TDR meting wordt de verandering van de karakteristieke impedantie weergegeven in functie van de tijd.

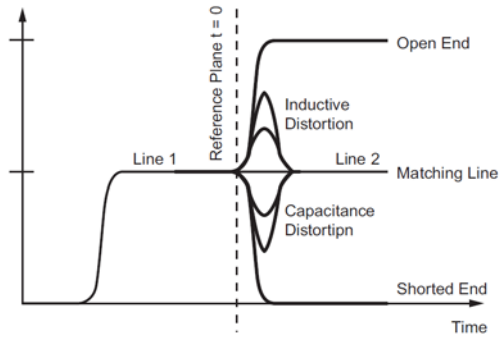


Figure 1-2. DTF with impedance

Figuur 5-21: voorbeeld van een TDR [4]

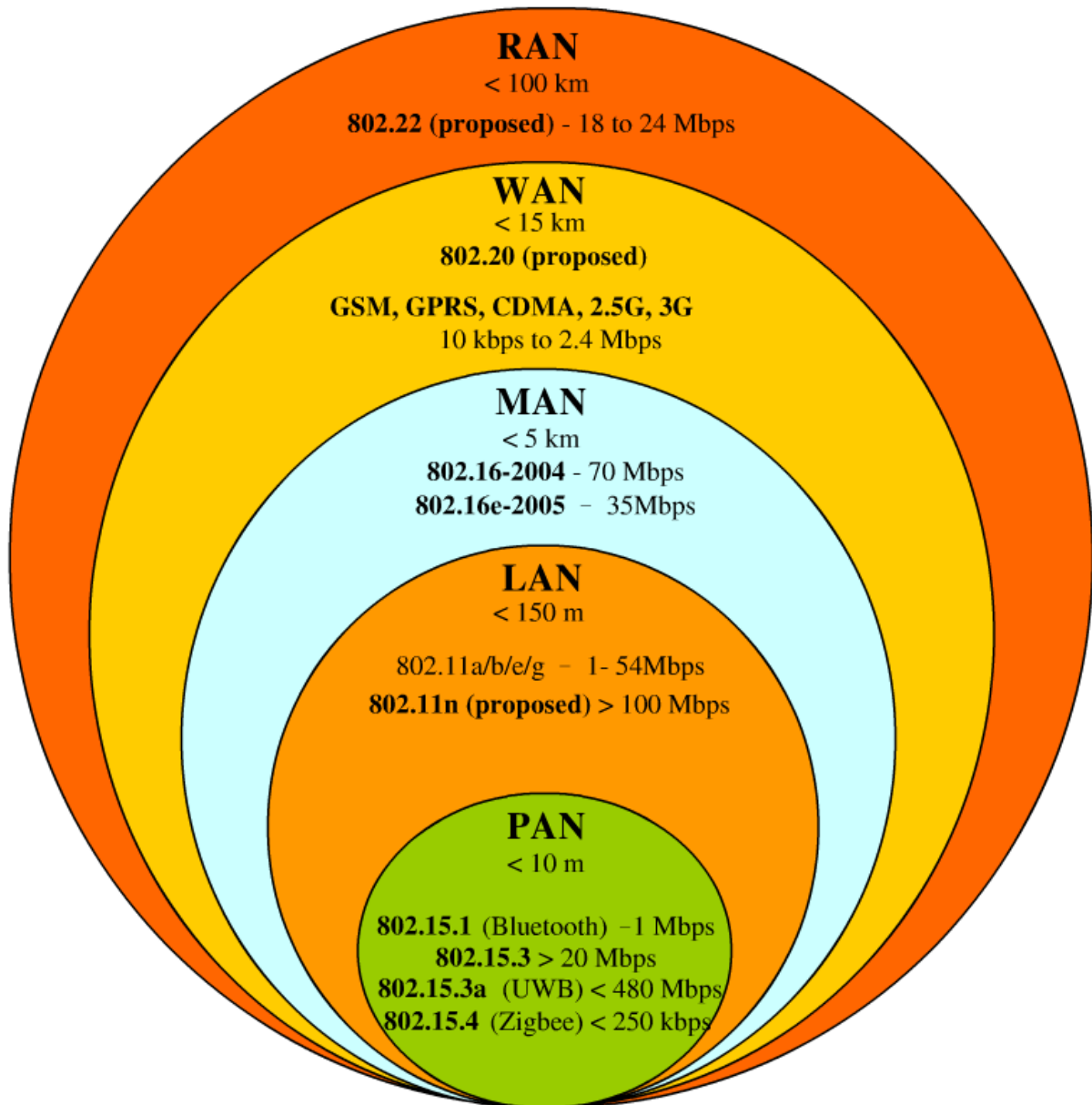
5.6. Referenties

- [1] The institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., "IEEE Std 149TM-1979(R2008): IEEE Standard Test Procedures for Antennas," 2008.
- [2] P. Scholz, "Basic antenne principles for mobile communication," [Online]. Available: <http://www.kathrein.com/en/mcs/techn-infos/download/basicantenna.pdf>.
- [3] S. T. Bird, "Definition and misuse of return loss," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 51, no. 2, pp. 166-167, April 2009.
- [4] Anritsu, "Site Master, Distance to fault application note: Antenna and Cable Installation and Maintenance Tool.," [Online]. Available: http://www.doverts.com/References/Antenna%20Resources/Anritsu%20Application%20Notes/SITEMASTER_DTF.pdf.
- [5] Scan antenna, "www.scan-antenna.com," Scan antenna, [Online]. Available: <http://www.scan-antenna.com/cables-2>.

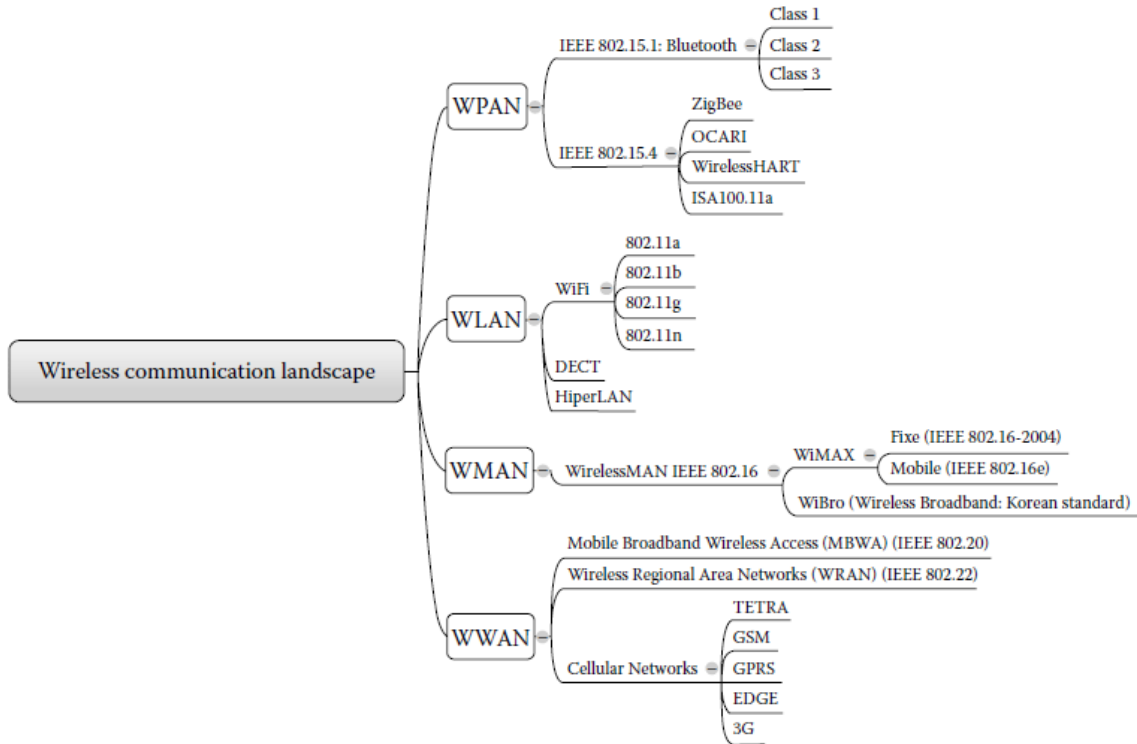
6. Standaard draadloze technieken

6.1. Inleiding

IEEE 802 is een familie van standaarden, die draadloze communicatie definiëren en standaardiseren in verschillende omgevingen. De draadloze standaarden kunnen in vier groepen verdeeld worden, afhankelijk van het bereik van het netwerk.

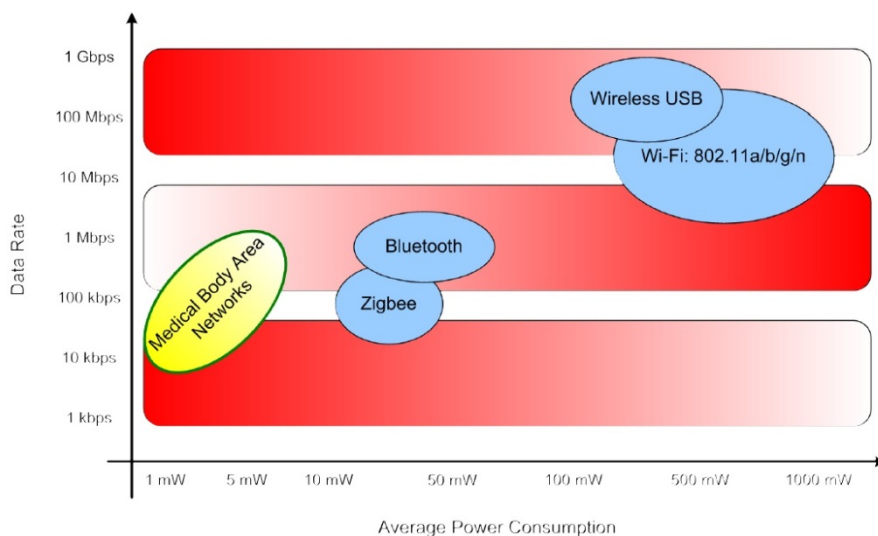


Figuur 6-1. Onderverdeling draadloze netwerken volgens bereik



Figuur 6-2. Onderverdeling van draadloze netwerken volgens technologie

Wireless personal area networks (WPAN) hebben een beperkt bereik van maximaal ongeveer 10 meter. Afhankelijk van de omstandigheden kan dit bereik groter zijn. De bekendste technologieën die onder deze groep vallen zijn Bluetooth, Zigbee en IRDA (Infrared Data Association). Toepassingen zijn voornamelijk communicatie tussen toestellen onderling, zoals tussen een tablet en hifi of tussen sensoren en een laptop. Een specifieke groep binnen WPAN zijn de zogenaamde Wireless body area networks (WBAN). Deze netwerken gebruiken ook protocollen volgens de norm IEEE 802.15. Toepassingen zijn vnl. medisch, zoals sensoren verwerkt in textiel of gekleefd op het lichaam. Het bereik is zeer beperkt, wat een laag energieverbruik mogelijk maakt.



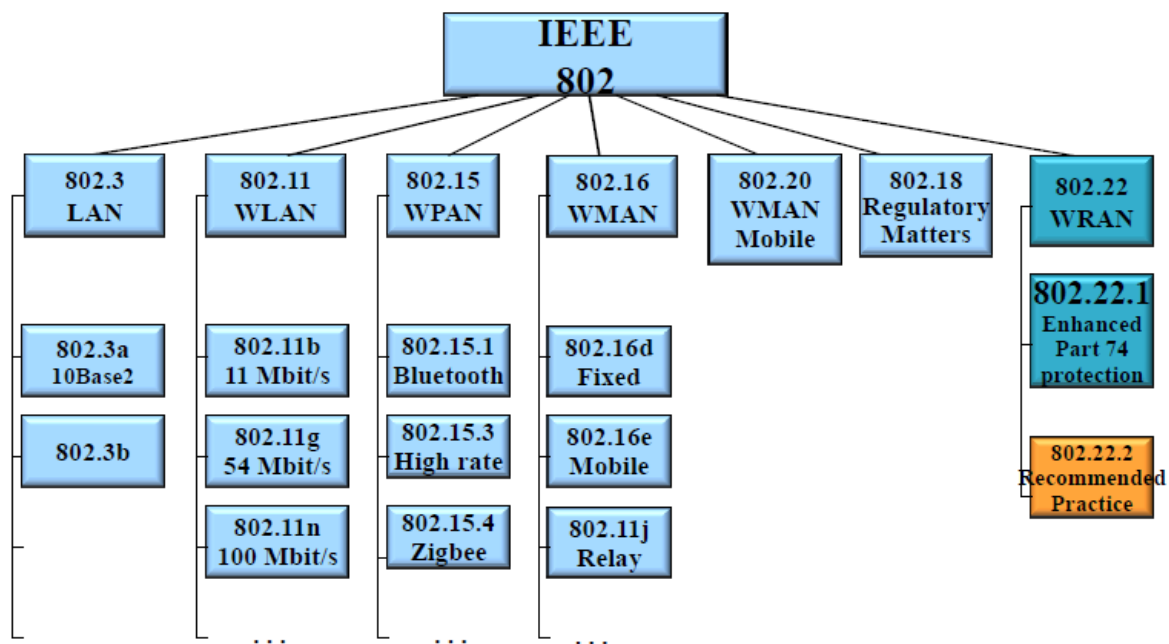
Figuur 6-3. WPAN en WBAN (Texas Instruments)

Wireless local area networks (WLAN) hebben een iets groter bereik tot 30 m. De belangrijkste sub-standaarden zijn de 802.11 reeks, beter gekend als Wi-Fi. Belangrijkste toepassingen zijn huis- en officenetwerken, alsook de automatiseringsindustrie.

Wireless metropolitan area networks (WMAN) verbinden meerdere WLANs. Dit type network is gecommercialiseerd onder de naam WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access).

Wireless wide area network (WWAN) hebben een bereik tot 15 km. Gekende technologieën zijn GPRS (General Packet Radio Service), GSM (Global System for Mobile Communication) en UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Er bestaat hierin nog een subcategorie, nl. Wireless regional area networks (WRAN). Deze netwerken hebben het grootste bereik (> 100 km).

De volledige standaard bestaat uit een hele reeks sub-standaarden.



Figuur 6-4. IEEE802

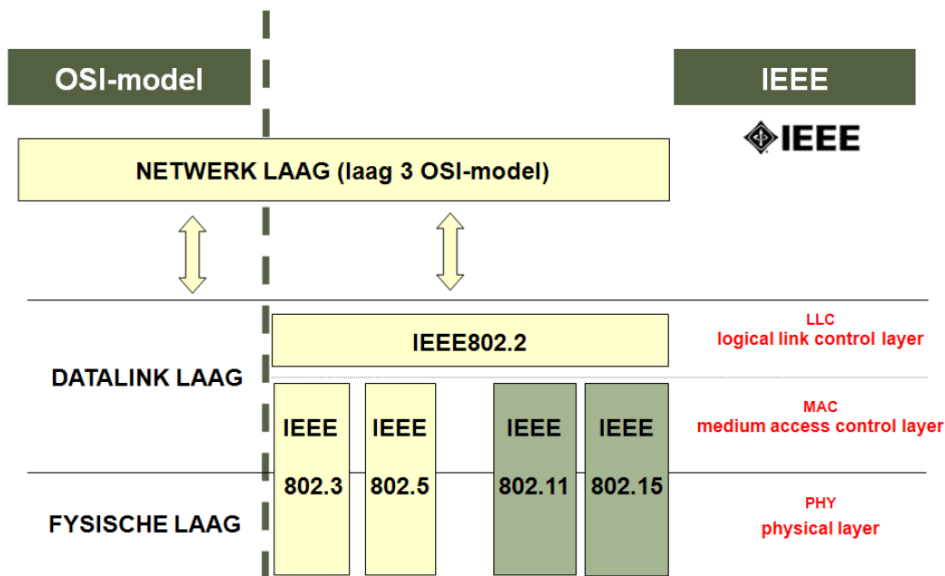
6.2. Data

6.2.1. WLAN

6.2.1.1. Inleiding

WLAN, ook wel gekend als Wi-Fi, wordt gebruikt om draadloze verbindingen over een beperkte afstand op te zetten. Meestal gaat dit over afstanden van 10 tot 100 meter maar door gebruik te maken van directionele antennes kunnen verbindingen tot enkele kilometers opgezet worden. De standaard die het meest gevolgd wordt om een draadloze WLAN verbinding op te zetten is de IEEE802.11 standaard.

De 802.11 standaard beschrijft in het OSI-model de fysieke laag en een deel van de datalink laag, het medium access control (mac) gedeelte. In de MAC laag wordt beschreven welke node op welk moment toegang mag krijgen tot het netwerk.



Figuur 6-5. IEEE802 beschrijft de onderste twee OSI-lagen

Een tweede deel van de datalink laag, de logical link control (LLC) layer is beschreven in de IEEE802.2 standaard.

Boven de datalink laag kunnen de standaard protocollen gebruikt worden, zoals het IP protocol voor de netwerklaag, het TCP protocol voor de transportlaag, enz...

Bovenop al deze vormen van datatransport komt de applicatielaag met de welbekende toepassingen zoals http, ftp, dns, ...

6.2.1.2. IEEE802.11

WLAN is oorspronkelijk ontworpen als de draadloze uitbreiding van Ethernet. IEEE802.11 heeft als doelstelling het ontwerpen van een eenvoudig en robuust draadloos LAN dat zowel tijdskritische als asymmetrische diensten aanbiedt. Asymmetrisch betekent dat de upload- en downloadsnelheid verschillend zijn. Een ander voorbeeld van een asymmetrisch netwerk is ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line). 802.11 was de eerste standaard in de 802-familie en werd ontwikkeld in 1997.

De IEEE 802.11 beschrijft algemeen de mogelijke architecturen. Er is de infrastructuur configuratie en de Ad Hoc. Verder beschrijft de IEEE802.11 enkele specificaties voor de PHY layer m.a.w de manier waarop de RF golven verzonden moeten worden. Zaken zoals de modulatie, de sterkte van het vermogen, de bandbreedte e.a. worden hierin beschreven.

Binnen de IEEE802.11 werden verschillende standaarden gedefinieerd. Deze standaarden hebben elk een letter van het alfabet gekregen om ze gemakkelijk van elkaar te kunnen onderscheiden. De belangrijkste WLAN standaarden zijn de IEEE802.11b, IEEE802.11a, IEEE802.11g en de IEEE802.11n. De 802.11b/g beheersen momenteel de Europese markt, 802.11a werkt aan een doorbraak in Europa en is vooral in gebruik in Amerika. Tenslotte is de 802.11n de laatste standaard waarbij hogere snelheden gehaald kunnen worden door met meerdere antennes te werken. Verschillende amendementen werden toegevoegd. De 802.11h is een aanvulling van 802.11a met specificaties uit de HiperLAN /2 protocollen (van ETSI), voor de Europese markt. 802.11e definieert een set aanvullingen om de QoS te verbeteren. 802.11i beschrijft de encryptie (WPA2) en authenticatie.

Volgende fysische technologieën worden ondersteund:

- IR (Infra Red pulse position modulation), bij een golflengte van 850-950 nm (is niet uitgewerkt in een standaard)

- FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) (is niet uitgewerkt in een standaard)
- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) tot 11 Mbps (gebruikt in de 802.11b standaard)
- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) tot 54 Mbps (gebruikt in de 802.11a en 802.11g standaarden)

Verder beschrijft de IEEE802.11 de specificaties voor de MAC layer. Hieronder bevinden zich ondermeer de opbouw van de dataframes en de toegang tot het medium, CSMA/CA.

De originele versie van de standaard 802.11 specificeert 2 snelheden: 1 en 2 Mbps op 2,4 GHz. De 802.11a-standaard gebruikt hetzelfde kernprotocol als de originele standaard, gebruikt de 5.0 GHz-band en gebruikt 52-subcarrier OFDM. De maximale data rate is 54 Mbit/s. De 802.11n standaard maakt dataverkeer tot 100 Mbps mogelijk.

6.2.1.3. IEEE802.11b

De 802.11b was de eerste WLAN standaard. Deze standaard liet oorspronkelijk een draadloze verbinding toe met een snelheid van 2Mbps. Deze standaard werd later uitgebreid en laat nu snelheden toe tot 11Mbps. Als fysische laag gebruikt de 802.11b standaard het Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS). De reden om een spread spectrum techniek te gebruiken is de ongevoeligheid van deze techniek tegenover storingen. Spread spectrum werkt met een breedbandig signaal. Breedbandigheid is hier op basis van het coderen van data i.p.v. frequentie. Een smalbandige storing heeft geen invloed op een breedbandig signaal.

6.2.1.4. IEEE802.11a

De IEEE802.11a standaard bestaat sinds 1999 en maakt gebruik van de 5GHz band om data te verzenden. Omdat er op een andere frequentie gewerkt wordt, is deze standaard niet compatibel met de 802.11b. Er zijn echter veel WLAN kaarten die beide standaarden ondersteunen.

Door gebruik te maken van orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) kan de 802.11a standaard een throughput van 54 Mbps bekomen. In de 5GHz band worden kanalen gedefinieerd van elk 20 MHz breed. De OFDM technologie verdeelt ieder kanaal in 52 subdragers, elk 312,5KHz breed. Iedere subdrager wordt tegelijkertijd, parallel verstuurd. Deze draaggolven zijn zodanig gekozen/gepolariseerd dat ze niet interfereren. Per draaggolf wordt de symbool dichtheid klein gehouden. Door tegelijkertijd informatie te verspreiden over de parallelle kanalen wordt dusdanig een grote data throughput bekomen.

De informatie wordt verdeeld over de verschillende subcarriers met redundante bits omwille van FEC (Forward Error Correction). OFDM is sterk bestand tegen multipath propagatie en smalband interferentie.

6.2.1.5. IEEE802.11g

De 802.11g is een nieuwere WLAN standaard dan de 802.11b standaard. De standaard laat hogere throughputs toe door gebruik te maken van OFDM i.p.v. DSSS. De 802.11g werkt op dezelfde frequentie als de 802.11b standaard. Hiermee moet rekening gehouden worden als men een netwerk opzet. Twee draadloze netwerken op hetzelfde kanaal in elkaars directe omgeving kunnen elkaar namelijk verstoren. De 802.11g standaard is volledig *backwards compatible* met de 802.11b. Dit wil zeggen dat een WLAN kaart die de 802.11g standaard ondersteunt, ook gebruik kan maken van 802.11b netwerken.

6.2.1.6. IEEE802.11n

De meest recente WLAN standaard die hogere snelheden mogelijk maakt door gebruik te maken van MIMO. MIMO staat voor Multiple In Multiple Out. Hierbij wordt gebruik gemaakt van meerdere zend- en ontvangstantennes in één systeem. Een snelle data-

overdracht wordt op deze manier opgesplitst in meerdere tragere streams. Deze nieuwe technologie zorgt voor verbeterde toegangsmechanismen in draadloze communicatie wat resulteert in de IEEE 802.11n standaard maar wordt ook belangrijk voor de efficiëntieverhoging binnen draadloze mobiele communicatie zoals LTE (Long Term Evolution).

Hoe vreemd het ook mag lijken, MIMO komt het best tot zijn recht door diversiteit in de signaalvoortplanting, zijnde diffractie, verstrooiing en reflectie. NLOS (Non Line Of Sight) draagt bij tot de algemene efficiëntie van deze technologie.

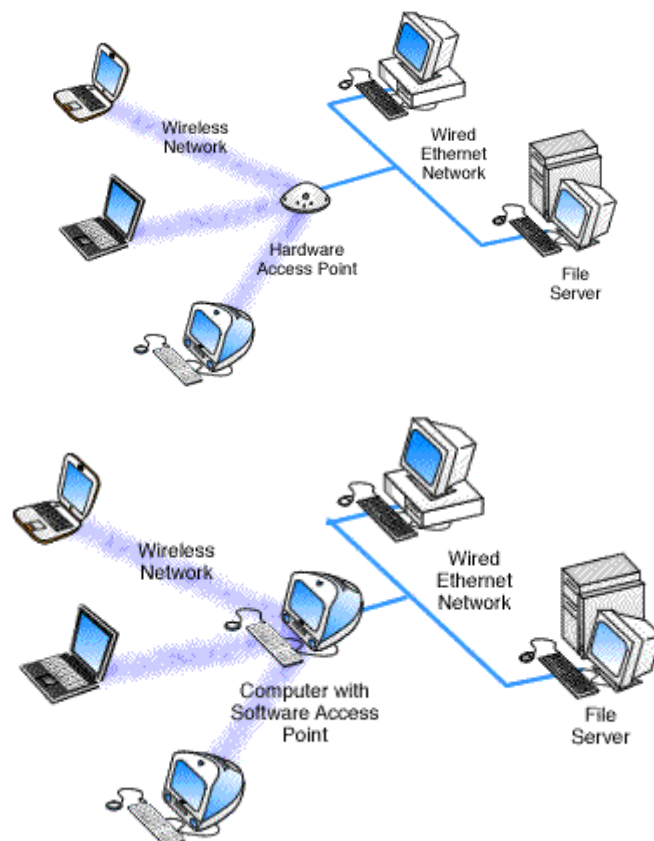
6.2.1.7. IEEE802.11 versie 2012

De huidige versie van de standaard, nl. 802.11:2012 bevat alle amendementen in één document. Maar de ontwikkelingen staan niet stil. Op deze standaard zijn ondertussen nieuwe amendementen verschenen, zoals 802.11ad.

6.2.1.8. BSS, IBSS, infrastructuur BSS en ESS

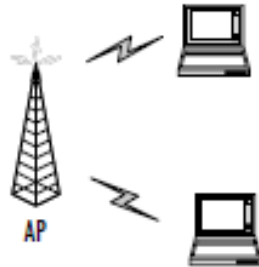
De 802.11 architectuur kan het best beschreven worden als een serie van aaneengekoppelde cellen en bestaat uit een draadloos toestel of station, een access point (AP), het distribution system (DS), de basic service set (BSS) en de extended service set (ESS). Dit geheel maakt dat een WLAN zich voordoet als een bedraad netwerk, terwijl het volledig mobiel is.

Een access point is het toegangspunt voor de gebruiker op een lokaal netwerk. De meeste commerciële access points bevatten ook een router. Het Access Point zorgt voor de verspreiding van de service set identifier (SSID), bepaalt de encryptie en bepaalt welke deelnemer op welk moment data mag verzenden. Een Access Point wordt meestal gebruikt om een draadloze extensie te geven aan een bedraad netwerk. Meestal is het dan ook gekoppeld aan een LAN. Er zijn twee types APs. Hardware APs zijn fysieke toestellen, software APs bestaan uit een computer met ingebouwde draadloze netwerkkaart.



Figuur 6-6. Access points (Vicomsoft)

De kern van de 802.11 architectuur is de basic service set. In de BSS communiceren meerdere toestellen (maximaal 64) met een AP. Elke BSS heeft een identificatienummer (BSSID), wat het MAC address van de AP is.



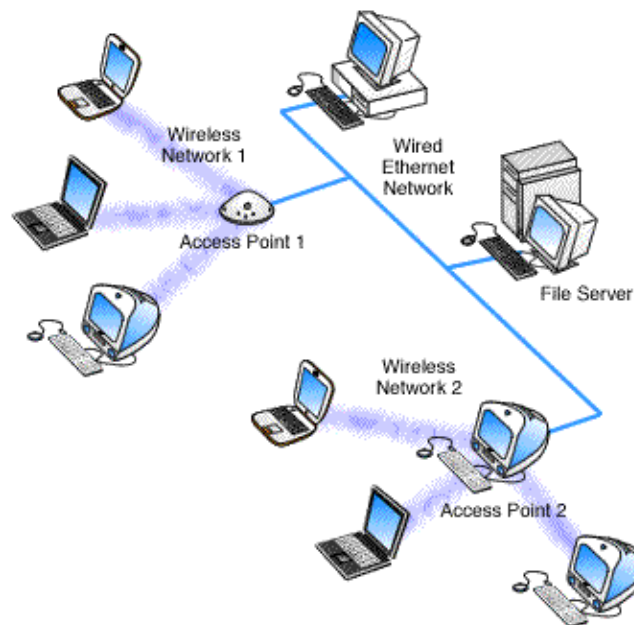
Figuur 6-7. BSS netwerk

Een WLAN kan volgens verschillende architecturen opgebouwd zijn: infrastructuur en ad-hoc. Een Ad Hoc netwerk staat los van een LAN en gebruikt ook geen Access Points. Bij een ad-hoc netwerk communiceren de deelnemers rechtstreeks met elkaar op basis van een Independent Basic Service Set (IBSS). Een voordeel van een ad-hoc netwerk is dat er geen single point of failure is, waarmee bedoeld wordt, dat bij het wegvallen van één node, de andere blijven verder werken. Bij een ad-hoc netwerk wordt ook van peer-to-peer communicatie gesproken.



Figuur 6-8. IBSS netwerk

Bij een infrastructuur BSS kunnen de deelnemers een verbinding maken met een bedraad netwerk via en AP. Een dergelijk netwerk kan meerdere Access Points bevatten. De deelnemers die onderling willen communiceren, moeten dit via het Access Point doen.



Figuur 6-9 Infrastructuur BSS en twee APs

Er dient opgemerkt te worden dat bepaalde toestellen alleen maar infrastructuur mode ondersteunen en dus geen ad hoc communicatie toelaten.

Het distribution system (DS) is het bedrade netwerk waarop een draadloos segment gekoppeld wordt. Dit DS verbindt meerdere BSS onderling.

Een Extended Service Set (ESS) bestaat uit meerdere BSS. Deelnemers van een ESS communiceren via hun AP en het DS met elkaar. Een ESS heeft een ID bestaande uit 32 bytes. Dit is de Service Set Identifier of SSID.

ESS maakt dat WLAN bijzonder flexibel bruikbaar is. Door gebruik te maken van één identifier moeten de toestellen niet telkens opnieuw aanmelden bij een andere AP, op het moment dat de gebruiker buiten het bereik van de zender komt.

6.2.1.9. MAC

Taken van de MAC layer zijn:

- Toegang tot het medium
- Ondersteuning voor roaming, authenticatie, energiebesparing

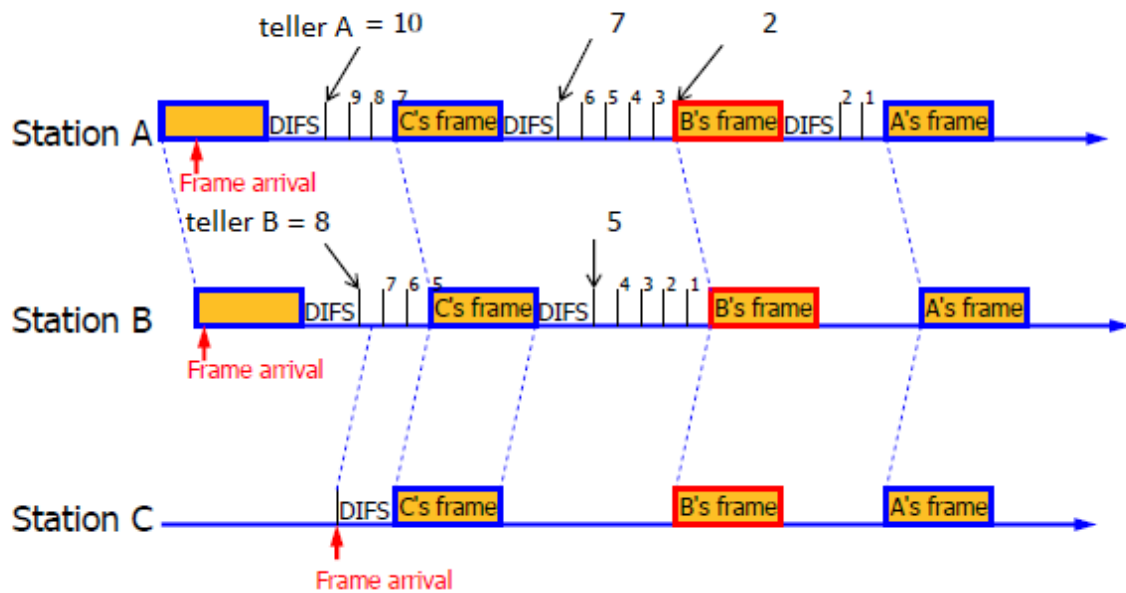
Het IEEE802.11 MAC protocol definieert verschillende toegangsmechanismen:

- DCF (distributed coordination function, verplicht)
- PCF (point coordination function, optioneel)

Een antenne kan ofwel RF signalen uitzenden ofwel RF signalen ontvangen. Collisions (botsingen) zijn niet te detecteren op een draadloos netwerk. Eens een station aan het zenden is, dan kan het geen andere nodes meer horen. De standaard definieert half en full duplex. Half duplex wil zeggen dat het systeem op een moment enkel kan werken als zender of ontvanger, maar nooit tegelijk. Bij full duplex kan een systeem tegelijk zenden en ontvangen. DCF is gebaseerd op Carrier Sense Multiple Access, Collision Avoidance (CSMA/CA). In plaats van het detecteren van botsingen zullen botsingen vermeden worden. Bij bedraad Ethernet wordt een collision detection (CD) techniek gebruikt. Om te weten of een bericht goed aangekomen is, wordt gebruik gemaakt van een positieve acknowledge. Als een ontvanger een pakket goed ontvangen heeft dan zal een ACK-bericht naar de zender gestuurd worden.

Bij de CA techniek luistert de node naar het kanaal gedurende een bepaalde tijd (DIFS, Distributed Interface Frame Space). Deze tijd bestaat uit de nodige tijd om andere

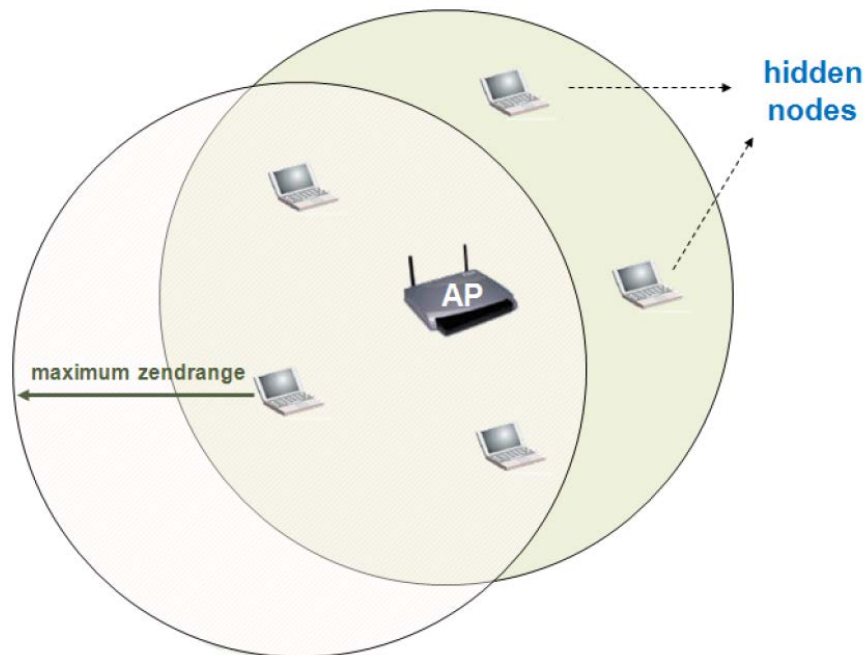
frames te ontvangen en om zelf transmissies op te starten (SIFS, short interface space frame) en twee bijkomende tijdsintervallen. Om te vermijden dat alle wachtende zenders tegelijk het kanaal gebruiken, starten daarna alle zenders een random timer. Als het kanaal niet meer vrij is voordat de timer op nul komt, dan wacht de zender opnieuw totdat het kanaal terug vrij komt en telt na de DIFS verder af. Als het kanaal wel vrij is, dan start de transmissie.



Figuur 6-10. Principe CSMA/CA

De PCF methode gebruikt 'polling' om te bepalen welk station het kanaal mag gebruiken.

6.2.1.10. *Hidden node probleem*



Figuur 6-11. Hidden nodes

Verborgen nodes in een draadloos netwerk verwijzen naar nodes die zich buiten het bereik van de andere nodes bevinden. Beschouw een ster-topologie met een AP met veel knooppunten eromheen. Elk knooppunt is binnen communicatiebereik van de AP, maar de nodes kunnen niet met elkaar communiceren, omdat er geen fysieke verbinding is. In een draadloos netwerk, is het waarschijnlijk dat de node aan de uiterste rand het AP kan zien, maar het is onwaarschijnlijk dat dezelfde node een node aan de andere kant kan zien. Deze nodes zijn dan zeggend verborgen (hidden nodes). Het probleem is wanneer beide nodes tegelijk pakketten sturen naar het AP. Aangezien de node de carrier niet kan voelen, werkt het CSMA/CA mechanisme niet. Om dit probleem te overwinnen, wordt handshaking uitgevoerd in samenhang met de CSMA / CA regeling.

Het hidden node probleem komt voornamelijk voor bij grote WLAN netwerken (> 50 m) met veel nodes. Daarom is IEEE 802.11 voornamelijk geschikt voor de eindgebruiker. WiMAX (zie WMAN) wijst timeslots toe aan de individuele stations, waardoor collisions vermeden worden.

IEEE 802.11 gebruikt Request To Send / Clear To Send (RTS / CTS) om dit probleem op te lossen. Hierdoor kan de snelheid wel sterk dalen. Hierbij spreken de AP en de node (station) een timeframe af waarbinnen de data verstuurd zal worden en waarbinnen alle andere communicatie stilgelegd wordt. Alle andere nodes leggen ook hun communicatie stil binnen dit timeframe.

6.2.1.12. *Uitbouwen van een WLAN*

Het uitbouwen van een WLAN kan volgens twee basismethodes gebeuren, nl. dekkingsgericht of capaciteitsgericht. Bij een dekkingsgerichte planning wordt gestreefd naar een maximale dekking van het oppervlak. Dit wil zeggen dat in het gebouw op zoveel mogelijk plaatsen communicatie mogelijk is. Er wordt gestreefd naar een verhouding van 25 tot 30 gebruikers per AP. Capaciteitsgericht wil zeggen dat er gestreefd wordt naar een maximale datatransfert voor alle gebruikers. Om dit mogelijk te maken, is de dichtheid van het AP netwerk groter. Er wordt in dit geval gestreefd naar 15 gebruikers per AP. Er kan ook gekozen worden voor een gedeeltelijke dekkingsgraad, waarbij in bepaalde lokalen geen communicatie mogelijk is. Echter, door de uitbreiding

van gebruikers, toepassingen en mobiele apparaten, is het interessant om de mogelijkheid tot uitbreiding te voorzien. Bij het uitbouwen van een systeem dienen heel wat factoren in acht genomen te worden, zoals zendvermogen, directiviteit van de antennes, aantal gebruikers, dempingsfactoren en veel meer. Een volledige bespreking hiervan valt buiten het doel van deze cursus.

6.2.2. WMAN

6.2.2.1. IEEE802.16

WiMAX (Worldwide interoperability for microwave access) is de commerciële naam voor producten die gebaseerd zijn op de IEEE802.16 standaard, die WMAN definieert. Op dit moment bestaan twee commerciële versies van WiMAX, nl. Fixed WiMAX en Mobile WiMAX. Mobile WiMAX is geschikt voor zowel vaste als mobiele toepassingen, terwijl Fixed WiMAX niet geschikt is voor mobiele toepassingen.

De standaard definieert breedbandige draadloze toegang in het gebied 2 GHz tot 60 GHz. Voor vaste opstelling is het bereik maximaal 50 km, maar in praktische toepassingen beperkt zich dit tot minder dan 20 km. Voor mobiele (cellulaire) toepassingen is de gebruikte frequentie lager en is het bereik minder dan 10 km. Breedbandige draadloze internettoegang maakt het mogelijk om grote hoeveelheden data over te zetten, wat nodig is voor het mobiel internet van vandaag.

6.2.2.2. 4G, WiMAX en LTE

4G is eigenlijk de vierde generatie draadloze communicatie standaard, maar is zelf geen standaard. De kandidaat-normen voor 4G zijn Long Term Evolution (LTE) en WiMAX. De International Telecommunications Union (ITU) hebben een aantal eisen vastgelegd voor 4G normen. 100 Mbps is nodig voor aansluitingen met een hoge mobiliteit en 1 Gbps voor toepassingen met een lage mobiliteit. Hoge mobiliteit betekent dat de gebruiker zich verplaatst op een aanzienlijk hoge snelheid, zoals in een trein, auto of bus terwijl lage mobiliteit betekent dat de gebruikers niet bewegen of traag bewegen. In de praktijk worden deze waarden niet gehaald. Vooral bij deze zeer hoge frequenties zijn de installatie en de omgevingsfactoren zeer bepalend, waardoor de gemiddelde gebruiker een veel lagere performantie haalt. Ondertussen zijn ook deze technologieën geëvolueerd tot LTE Advanced en WiMAX 2, die hogere snelheden mogelijk maken.

WiMAX is gebaseerd en verder ontwikkeld op basis van WLAN. Echter, WLAN wordt beschouwd als de 'last mile', waarbij de distributie gebeurt door middel van glasvezel of coax. Bij WiMAX wordt ook dit deel draadloos geleverd. Dit is van belang voor smartphones en andere mobiele toepassingen die een grote datatransfert vereisen. Zowel LTE als WiMAX gebruiken MIMO (Multiple Input Multiple Output) om de prestaties van draadloze communicatie te verbeteren door het gebruik van meerdere antennes. Beide gebruiken OFDM. Zender en ontvanger werken op verschillende frequenties.

Doordat LTE echter een aantal niet te verwaarlozen voordelen heeft t.o.v. WiMAX, lijkt de toekomst van het 4G netwerk voornamelijk gebaseerd te worden op de LTE-norm. Door de overschakeling naar LTE zullen in de toekomst alle toestellen een IP-adres krijgen. Men spreekt hierdoor over 'all-IP'.

Deze topic wordt verder besproken in het item Telecom.

6.3. Personal area

6.3.1. WPAN

Wireless Personal Area Networks (WPAN) worden gebruikt om communicatie op een korte afstand mogelijk te maken. De deelnemers aan een dergelijk netwerk zijn toestellen zoals een iPad of een Smartphone, die bijv. muziek willen streamen naar een smartTV of een multimedia toestel in de wagen. WPAN is bijgevolg op zeer korte afstand

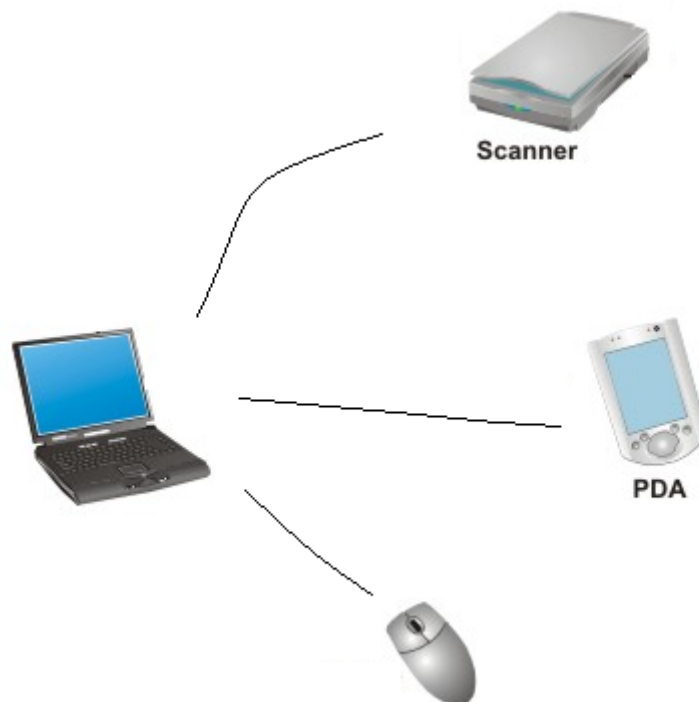
en tussen toestellen onderling. Hierbij is het van belang dat verbinding eenvoudig en zonder bijkomende infrastructuur kan gebeuren. Hierdoor wordt een relatief goedkoop systeem met beperkt verbruik verkregen. WPAN wordt gedefinieerd door IEEE802.15. Deze standaard bestaat uit groepen. De bekendste hierbij is IEEE802.15.1, nl. Bluetooth. In feite is de IEEE802.15.1 ontwikkeld op basis van de eerder ontwikkelde Bluetooth technologie.

IEEE802.15.4 definieert de zogenaamde 'low rate WPAN'. Dit omvat technologieën die beperkte data doorsturen, maar daardoor zeer weinig energie verbruiken. Netwerken die hierop gebaseerd zijn, zijn Zigbee en WirelessHART.

IEEE802.15.6 definieert de WBAN technologie. Hierbij wordt communicatie gedefinieerd tussen componenten die zich rond lichamen bevinden. Toepassingen zijn vnl. medisch en voor hulpdiensten.

6.3.2. Bluetooth

Bluetooth is in 1994 ontwikkeld door Ericsson en gecommmercialiseerd in 1998 door de Bluetooth Special Interest Group. De technologie werd overgenomen in de IEEE802.15.1 standaard, die de fysieke laag en de MAC-laag definiëren. De gebruikte frequentieband is 2,45 GHz. Bluetooth werkt volgens het point to multipoint principe, waardoor één bron meerdere ontvangers kan hebben. Een Bluetooth-PAN wordt ook een piconet genoemd. Een dergelijke cel heeft een bereik van 10m. Een piconet vormt een ad hoc netwerk zoals gedefinieerd bij WLAN. De Bluetooth-standaard is een open standaard. De ontwikkeling van goedkope zenders en ontvangers maakt het mogelijk om Bluetooth verbindingen te zien als de vervanger van kabels.

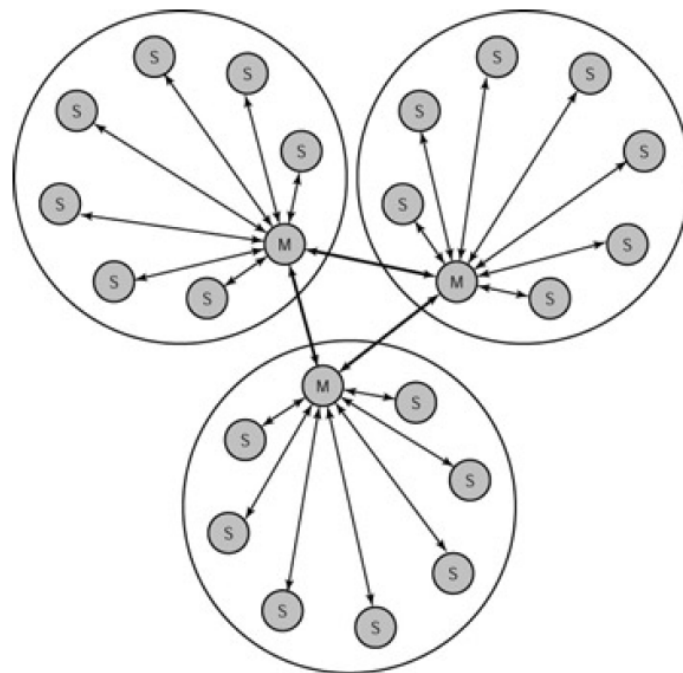


Figuur 6-12. Bluetooth toepassing

Bluetooth gebruikt de FHSS techniek. Dit beperkt de stoorgevoeligheid, aangezien een ander kanaal gekozen wordt afhankelijk van error rate. Om communicatie mogelijk te maken tussen verschillende toestellen, moeten alle toestellen synchroniseren op dezelfde variërende frequentie. Om dit correct te laten verlopen wordt gewerkt met een master-slave systeem. Er is binnen een piconet één master, die de frequentie-sequentie bepaalt, en die gevolgd wordt door de verschillende slaves. Het aantal slaves per master is

beperkt tot zeven. Deze kunnen enkel communiceren met de master, maar niet onderling. Verschillende piconetwerken kunnen met elkaar verbonden worden. Hierdoor kan een Bluetooth-toestel dynamisch veranderen van de ene naar de ander cel en bijgevolg zeer flexibel ingezet worden. Binnen een piconet wordt de master willekeurig bepaald. Het is niet zo dat de master altijd hetzelfde toestel is. Het eerste toestel bepaalt de frequentie en is bijgevolg de master. Dit vereenvoudigt sterk de nodige infrastructuur omdat niet met een basisstation gewerkt wordt.

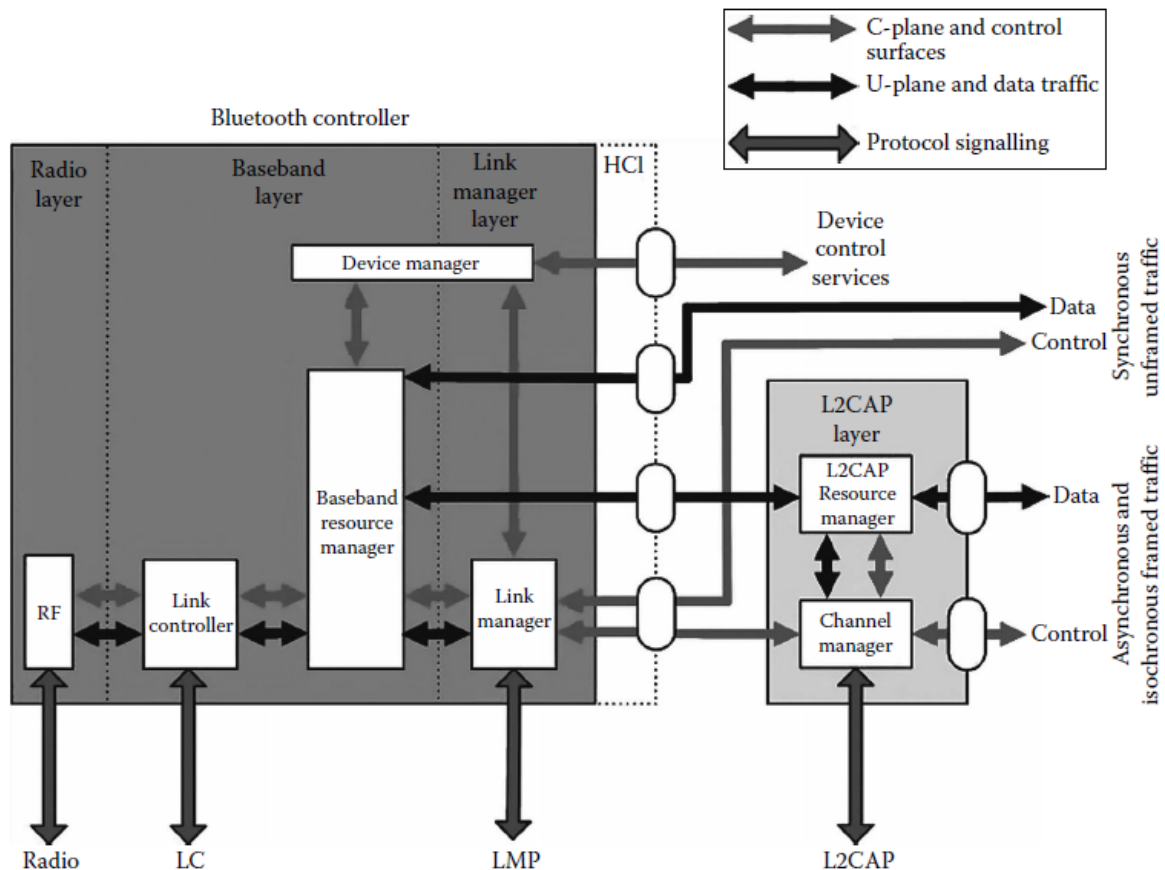
Om het aantal toestellen op het netwerk uit te breiden, kunnen meerdere piconetwerken gecombineerd worden. Men spreekt in dit geval over een scatternet. De communicatie gebeurt via de verschillende masters. Aangezien Bluetooth in het totaal 79 verschillende frequenties in het totaal kan gebruiken, kunnen maximaal 10 piconetwerken gevormd worden met samen 80 deelnemers.



Figuur 6-13. Scatternet bestaande uit drie piconetwerken

Het FHSS mechanisme zorgt er voor dat een Bluetooth verbinding veilig is. Het is moeilijk voor een toestel, dat niet opgenomen is in het netwerk, om te synchroniseren op de juiste, continu wijzigende frequentie. Om de data te beveiligen ondersteunt Bluetooth een 128 bit authenticatie en encryptie.

Om het toepassingsgebied van Bluetooth uit te breiden werd Bluetooth LE (Low Energy) ontwikkeld. Deze technologie beperkt het energieverbruik. De technologie is op de markt gebruikt als Bluetooth SMART. De SMART technologie is niet compatibel met de klassieke Bluetooth. Toestellen die het label Bluetooth SMART Ready dragen zijn compatibel met beide technologieën. De performantie van Bluetooth LE is iets beperkter voor wat betreft het bereik, maar daartegenover staat een verbruik wat half zo groot is of zelfs minder. Precieze cijfers zijn afhankelijk van de applicatie.



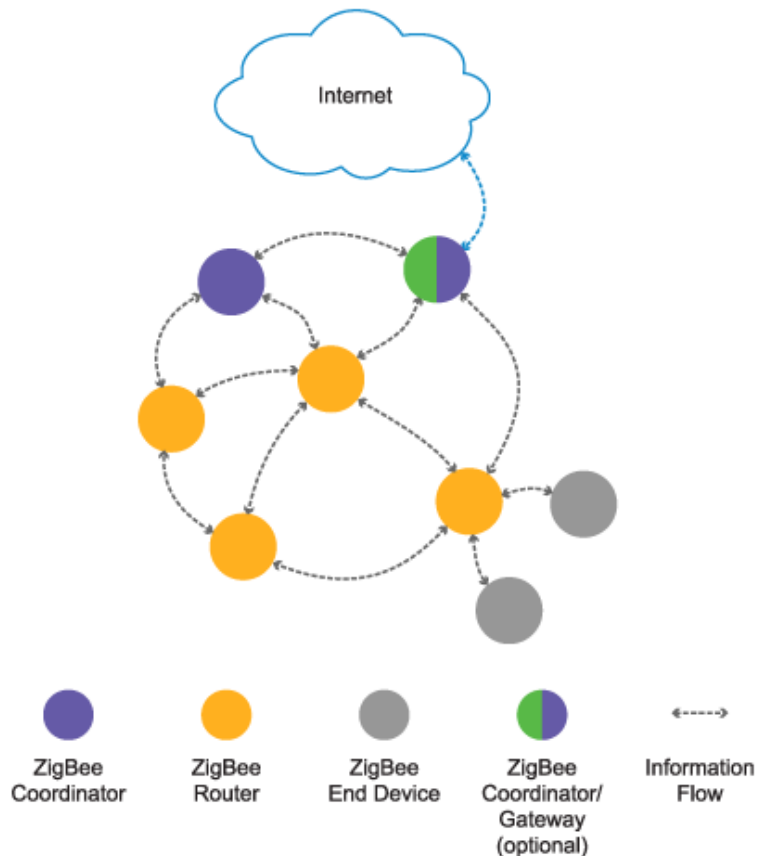
Figuur 6-14. Bluetooth architectuur

De basisuitvoering van een Bluetooth systeem bestaat uit meerdere lagen. De Bluetooth controller bestaat uit drie lagen, nl. de zender/ontvanger, het BB-blok (Base band) en de link manager. Deze drie bevinden zich op één IC. De zender/ontvanger (RF) verstuurt en ontvangt de datapakketten. Het BB-blok staat in voor de timing en de frequentiehoping. De link manager staat in voor de codering en decodering van de data. De link manager is verantwoordelijk voor het maken en beheren van de verbinding. Dit onderdeel garandeert ook de QoS van de verbinding. De volgende laag is de host controller interface (HCI). Deze maakt de verbinding mogelijk tussen de Bluetooth interface en het eigenlijke toestel (laptop, PDA). Het transport (transportlaag) gebeurt via USB of UART. Voor een verdere bespreking van deze en de andere lagen wordt naar de referenties verwezen.

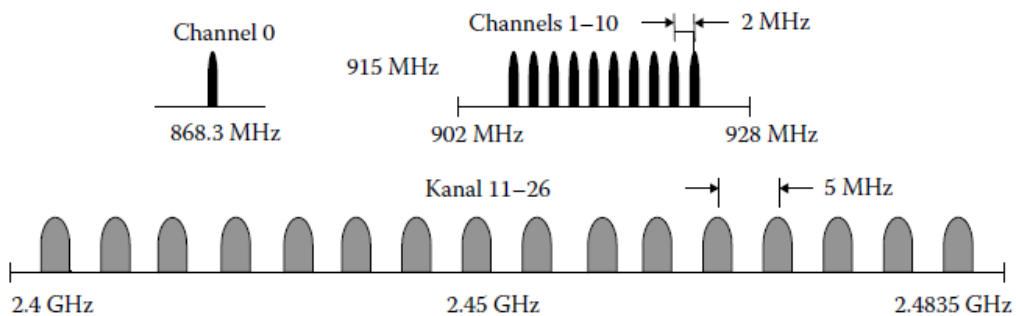
6.3.3. Zigbee en Zigbee Pro

Zigbee is net als Bluetooth een WPAN-technologie. Bij de ontwikkeling van Zigbee was echter het energieverbruik en de kostprijs belangrijk. Hierdoor is deze technologie zeer geschikt voor gebruik in de industrie, bijv. bij draadloze sensornetwerken en voor gebruik bij domotica. De fysische laag en de MAC-laag zijn gedefinieerd in de IEEE802.15.4 standaard. De bovenliggende lagen volgen het eigen ZigBee protocol. IEEE802.15.4 specificeert 'low data rate WPAN'. Daar vallen ook andere technologieën, zoals WirelessHART onder.

ZigBee Pro is een verdere ontwikkeling van ZigBee Alliance. Het aantal deelnemers aan het Pro netwerk is hoger en ZigBee Pro is ook in staat om met ZigBee Pro Green Power devices te communiceren. Deze laatste systemen werken zonder batterij en steunen op het zelf genereren van energie uit bijv. beweging of het collecteren van energie uit de omgeving.



Figuur 6-15. Zigbee netwerk topologie



Figuur 6-16. Zigbee is mogelijk in drie frequentiebanden

De topologie van het ZigBee netwerk is een vermaasd netwerk (mesh network). Dit wil zeggen dat alle deelnemers onderling data kunnen uitwisselen. Een netwerk kan tot 64.000 deelnemers bevatten. Een typisch netwerk bestaat uit één coördinator, meerdere eindgebruikers en meerdere routers. De coördinator is verantwoordelijk voor de interne werking van het netwerk. De router scant naar een netwerk om aan deel te nemen, maar kan zelf de coördinator worden. De gebruikers zenden, ontvangen en gebruiken de data. De routers (en coördinatoren) hebben een volledige functionaliteit (FFD of full function devices). De routers kunnen zelf eindgebruikers zijn, maar gewone eindgebruikers kunnen ook een beperkte functionaliteit hebben om het verbruik te verminderen (RFD of reduced function devices). De sterkte van het netwerk zit in het feit dat alle routers onderling communiceren. Het netwerk zelf wordt ad hoc georganiseerd. Aangezien er in

een vermaasde structuur meerdere paden mogelijk zijn voor eenzelfde doel, is het systeem zelfhelend. Indien de verbinding uitvalt langs één weg, dan wordt direct een ander pad gezocht.

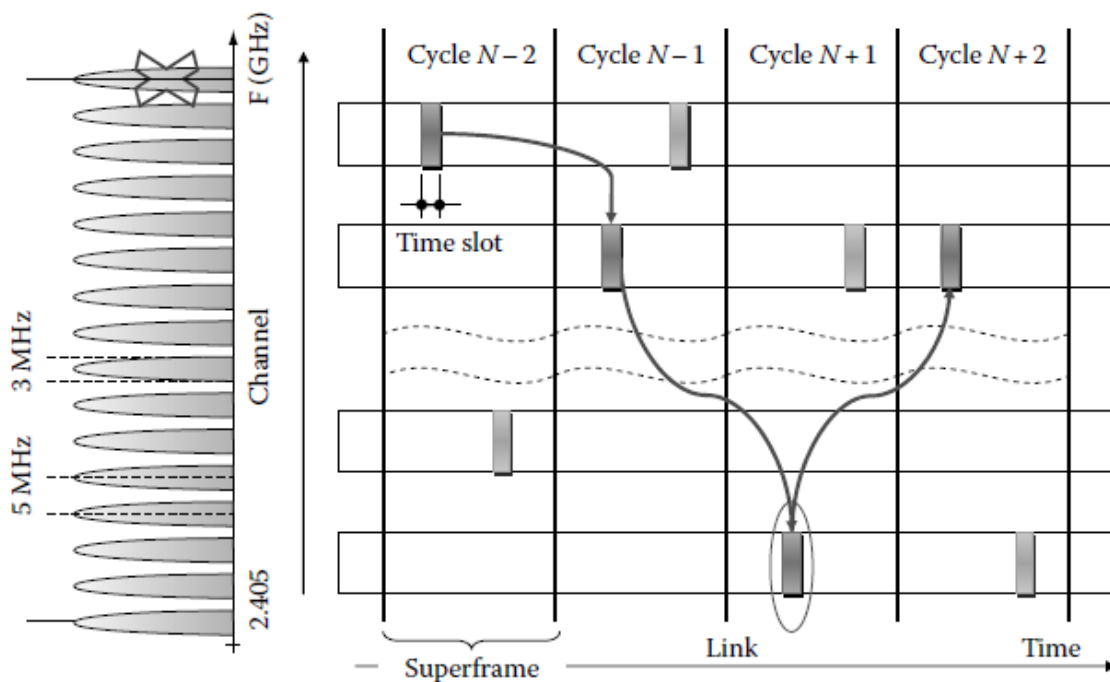
Er zijn drie frequentiebanden voorzien, waarbij de 2,45 GHz band de meest gebruikte is. Het bereik is ongeveer 10 m, maar grotere bereiken zijn mogelijk. De datasnelheid is met 250 kbps beperkt t.o.v. Bluetooth, maar is voor veel toepassingen voldoende. De kostprijs van een Zigbee module t.o.v. een Bluetooth-module is ongeveer 20%. De gebruikte modulatietechnieken zijn DSSS en QPSK.

6.3.4. 6LoWPAN

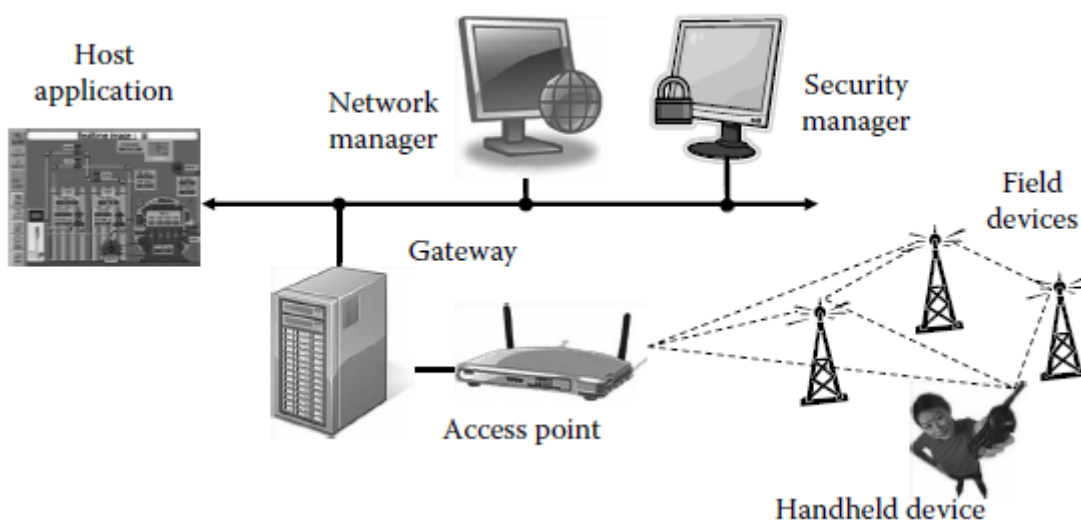
Het aantal draadloze nodes zullen in de toekomst verder toenemen. Daarbij is er een trend naar het connecteren van zowat alles met het internet (alles IP). Dit omvat ook kleine sensoren met beperkte rekencapaciteit en beperkte datatransfert, maar die direct geconnecteerd worden met het internet. In dit opzicht spreekt men van het 'Internet of Things' (IoT). 6LoWPAN staat voor 'IPv6 over Low Power WPAN'. De werkgroep 6LoWPAN moet het mogelijk maken om de huidige WPAN standaard (IEEE802.15.4) te combineren met IPv6 communicatie protocol.

6.3.5. WirelessHART

De industriële wereld toont een stijgende interesse naar draadloze veldbussen, om sensoren, actuatoren en controllers met elkaar te verbinden. De fysische laag die ontwikkeld werd binnen IEEE802.15.4 zorgt voor een robuuste communicatie wat belangrijk is in een sterk vervuild elektromagnetisch spectrum. Voor een industriële toepassing moet het systeem ook voldoende eenvoudig zijn en vooral goedkoop om te kunnen wedijveren met bedrade systemen. Het gebruik van DSSS zorgt voor een robuuste communicatie. Echter door het aannemen van CSMA/CA binnen deze standaard ontstaan er problemen voor applicaties die een real time communicatie verwachten. Real time communicatie verwacht een afhandeling van de communicatie binnen een exacte tijd om de gewenste performantie te behouden. Aangezien het vermijden van botsingen gebeurt door het luisteren en uitstellen van transmissie is de exacte transmissietijd onbepaald. Om te kunnen voldoen werden WirelessHART, ISA (International Society of Automation) en OCARI (Optimization of Ad Hoc Communications in Industrial Networks) ontwikkeld.



Figuur 6-17. Frequency hopping en TDMA mechanisme



Figuur 6-18. WirelessHART netwerk topologie

Het HART (Highway Addressable Remote Transducer) communicatie protocol werd oorspronkelijk ontwikkeld om compatibel te zijn met 4-20 mA apparatuur, waarbij dezelfde twee draden gebruikt werden. WirelessHART is de draadloze variant, die communicatie mogelijk maakt over een afstand van 100 m. De communicatie gebeurt op de 2,4 GHz band. Voor een deterministische communicatie, waarbij tijdslijmieten en deadlines gerespecteerd moeten worden en voor een hoge betrouwbaarheid, gebruikt WirelessHART TDMA en frequentiehopping.

Een typisch netwerk bevat de volgende onderdelen:

- Eén security manager dat zich bezig houdt met de encryptie
- Eén netwerk manager dat het netwerk vormt, de paden uitzet en de tijdschema's controleert
- Minstens één gateway die de link vormt tussen het netwerk en de verschillende draadloze toestellen

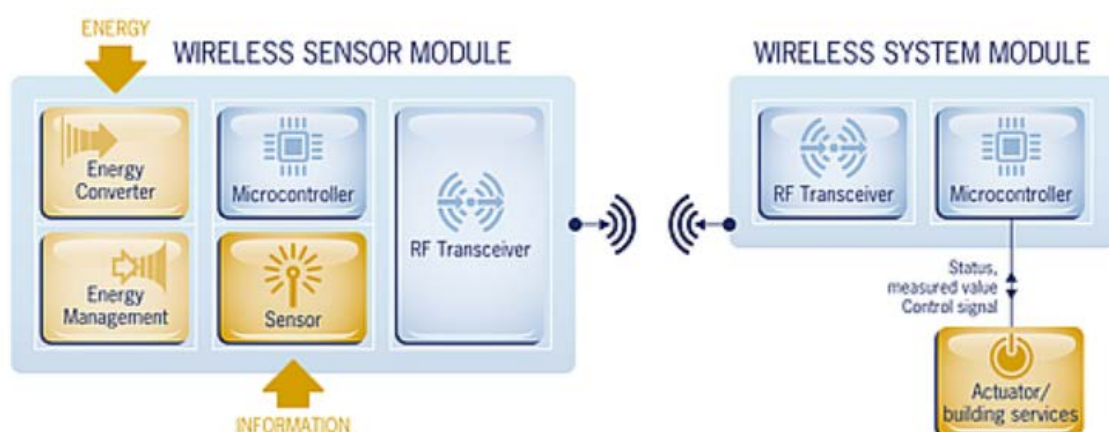
- Meerdere draadloze toestellen, zoals sensoren en actuatoren

Het bestaan van verschillende systemen heeft als nadeel dat deze enkel kunnen communiceren met elkaar via een gateway. Om te streven naar een universeel netwerk wordt binnen ISA gewerkt aan een convergentie tussen WirelessHART en ISA.

6.3.6. Andere

Naast de vermelde standaarden zijn nog andere ontwikkelingen aan de gang. De bovenstaande zijn echter de meest gebruikte. Naast de trend om alles draadloos te laten communiceren via low power devices is er ook een trend naar systemen die gevoed worden door het ophalen van energie uit de omgeving. Dit vermijdt het gebruik van voedingsdraden of batterijen.

De technologie en het protocol van dergelijke systemen zijn beschreven in de IEC 14543-3-10 standaard. Een voorbeeld hiervan is EnOcean. EnOcean modules combineren kleine energieconverters met zeer laag vermogen electronica en draadloze communicatie. Hierdoor is het mogelijk om volledig draadloze systemen te ontwikkelen. Voorbeelden zijn drukschakelaars, waarbij de mechanische energie omgezet wordt in elektrische energie. Deze energie is voldoende om de data te versturen. EnOcean modules worden vooral ingezet in domoticasystemen voor energiezuinige woningen. De EnOcean modules gebruiken de frequentiebanden 868 MHz (Europa) en 315 MHz.



Figuur 6-19. EnOcean basisprincipe

Z-Wave is een draadloos communicatie protocol, specifiek ontwikkeld voor domotica. Het protocol is geoptimaliseerd voor communicatie tot 100 kbps. De gebruikte frequentieband is rond 868 MHz.

6.4. Mobiele Telecommunicatie

Eind 2012 waren er volgens het ITU 6.8 miljard mobiele gebruikers wereldwijd wat een equivalent is van 96% van de totale wereldbevolking. In de ontwikkelde landen zijn er meer mobiele abonnementen dan er effectief inwoners zijn. In ontwikkelingslanden is de verhouding mobiele abonnees/bevolking ongeveer 89%. Er wordt verwacht dat er tegen het eind van 2016 ongeveer 8.5 miljard mobiele gebruikers zullen zijn [1].

De meest gekende standaard voor mobiele telefonie is Global System for Mobile communications (GSM) en wordt beschouwd als de tweede generatie mobiele telefonie (2G). Men spreekt van de tweede generatie omdat de communicatie gebaseerd is op digitale dataoverdracht. De eerste generatie mobiele telefonie netwerken (1G)

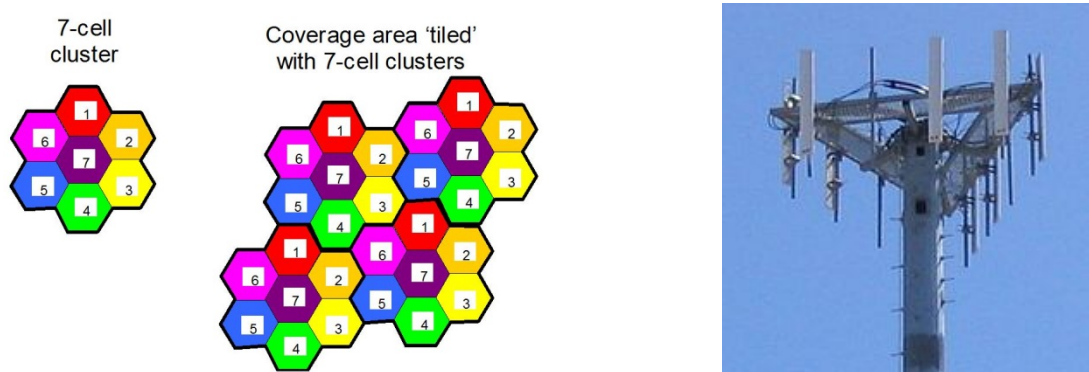
daarentegen zijn analoog. Een tweede verbetering ten opzichte van de vorige generatie was het gebruik van cellulaire netwerken.

6.4.1. Cellulaire netwerken

De eerste generatie mobiele netwerken gebruikten één zender met een hoog vermogen waardoor er een groot dekkinggebied was. Beschikbaarheid van bandbreedte in het radiospectrum was nog geen probleem omwille van het lage aantal mobiele gebruikers. Meerdere gebruikers konden simultaan bediend worden doordat men Frequency Division Multiple Acces (FDMA) toepaste. Elke gebruiker kreeg een verschillend frequentiekanal toegewezen binnen de beschikbare bandbreedte. Hierdoor was er geen interferentie tussen de verschillende gebruikers. Wenste men het dekkinggebied te vergroten dan moest men enkel het zendvermogen verhogen. Het feit dat er slechts één basisstation gebruikt werd was een groot commercieel voordeel maar door toename van het aantal gebruikers en de datasnelheid, waardoor ook de vereiste bandbreedte per gebruiker toenam, werd het snel duidelijk dat zulke systemen inefficiënt waren. Dit probleem werd aangepakt door de uitzetting van cellulaire netwerken waardoor een groot aantal gebruikers in dichtbevolkte gebieden simultaan konden bediend worden. De cellulaire aanpak is als volgt [2]:

Een bepaald gebied wordt opgedeeld in verschillende cellen die een hexagonale vorm hebben zoals afgebeeld in Figuur 6-20. Aan elk van deze cellen wordt een bepaalde frequentie toegekend (f_1-f_7). Een gebruiker binnen een bepaalde cel communiceert met het basisstation op één frequentie die verschillend is van de frequentie van een naburige cel waardoor er geen interferentie meer kan zijn tussen gebruikers die zich in naburige cellen bevinden. Ook het zendvermogen van de antennes is kleiner wat de kans op interferentie doet afnemen. Verschillende clusters worden naast elkaar geplaatst en vormen een dekkinggebied. Naburige cellen gaan nooit dezelfde frequentie gebruiken en de mobiele gebruiker gaat steeds afstemmen op het station met het sterkste signaal.

Om deze cellen te bedienen worden typisch sector antennes gebruikt zoals afgebeeld in Figuur 6-20. Typisch wordt een sector antenne geplaatst op het kruispunt van drie cellen. Elke antenne dekt een gebied van 120° . Andersom kan men in het centrum van elke cel een antenne plaatsen met een omnidirectioneel stralingspatroon. Het opdelen van het dekkinggebied in verschillende cellen wordt ook nog Space Division Multiple Acces genoemd (SDMA).



Figuur 6-20: Topologie van een cellulair netwerk en een sector antenne

In de praktijk zijn deze cellen niet perfect hexagonaal maar omwille van de propagatiemechanismen beschreven in Hoofdstuk 3 is de werkelijke vorm van een cel willekeurig en sterk afhankelijk van de omgeving waar het basisstation zich bevindt.

De cellulaire aanpak is nog steeds onvoldoende om een groot aantal gebruikers simultaan te kunnen bedienen. Naast SDMA en FDMA maakt men ook nog gebruik van Time Division Multiple Access (TDMA) en Code Division Multiple Access (CDMA).

Afhankelijk van welk telecommunicatiesysteem wordt TDMA in combinatie gebruikt met CDMA of wordt FDMA gecombineerd met CDMA.

6.4.1.1. FDMA

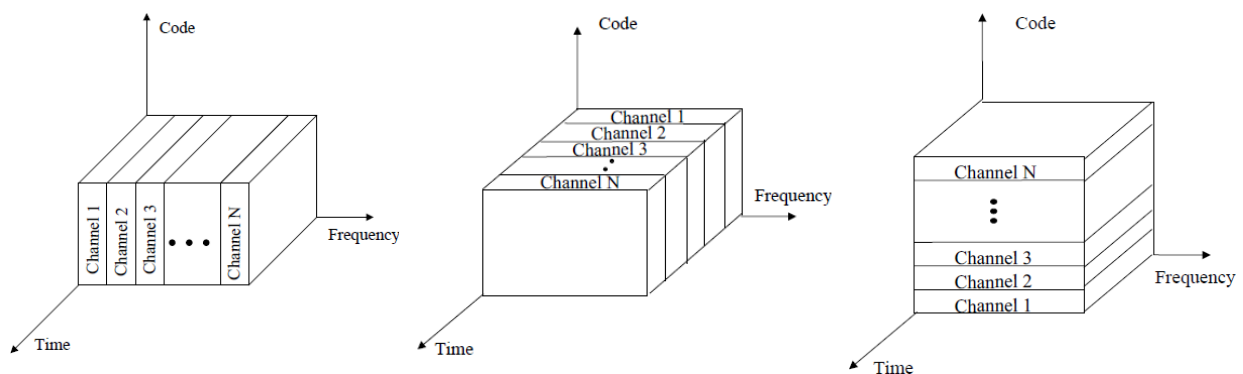
Binnen één cel wordt de beschikbare bandbreedte onderverdeeld in meerdere frequentiekanalen zodat elke gebruiker binnen één cel een ander frequentiekanaal krijgt toegewezen. Een FDMA schema staat afgebeeld in Figuur 6-21.

6.4.1.2. TDMA

Bij TDMA wordt elk frequentiekanaal gedeeld in tijd door verschillende gebruikers zoals afgebeeld in Figuur 6-21. Meerdere gebruikers zenden op verschillende tijdstippen gedurende een bepaald tijdslot. Indien een gebruiker toegang heeft tot het kanaal moeten de andere gebruikers wachten.

6.4.1.3. CDMA

Bij CDMA gebruiken alle gebruikers dezelfde frequentie en hetzelfde tijdsframe. Hier wordt er gebruik gemaakt van speciale codes die onderling orthogonaal zijn ten opzichte van elkaar. CDMA steunt op hetzelfde principe als DSSS. Elke gebruiker krijgt een andere code toegewezen en hierdoor is er geen interferentie tussen de verschillende gebruikers. Deze Multiple Access Methode (MAC) staat ook schematisch afgebeeld in Figuur 6-21.



Figuur 6-21 : FDMA (links), TDMA (midden), CDMA (rechts) [2]

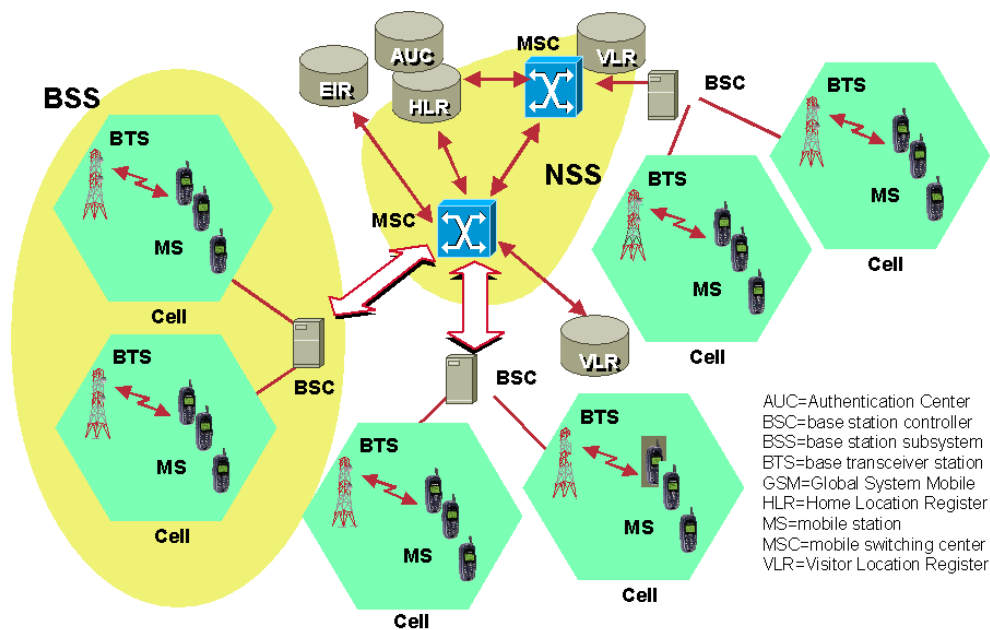
6.4.2. GSM

6.4.2.1. GSM Netwerk infrastructuur

Een GSM netwerk zoals afgebeeld in Figuur 6-22 bestaat uit verschillende systemen met elk hun specifieke taak. Een complete beschrijving van de infrastructuur en al zijn entiteiten valt buiten het bestek van dit document. De bespreking van de GSM netwerk-infrastructuur beperkt zich tot het radio subsysteem en het netwerk switching subsysteem [3]:

Het radio subsysteem bestaat uit verschillende Base Station Subsystems (BSS) en elke wordt gecontroleerd door een Base station controller (BSC). Verder is er een opdeling in verschillende radiocellen met elk zijn eigen GSM-mast. Een Mobile Station (MS) of mobiele telefoon staat in verbinding met de GSM-mast of de Base Transceiver Station (BTS) met het sterkste signaal. In de meeste gevallen is dit het dichtstbijzijnde station. Vanaf deze mast gaat het gesprek naar de BSC. Dit centraal punt verbindt meerdere BTSen binnen hetzelfde gebied en controleert de handover indien een MS van de ene cel naar de andere cel binnen een BSS overgaat. Een cel kan afhankelijk van de omgeving 100 m tot maximaal 35 km groot zijn.

Hogerop in de infrastructuur is er het Network Switching Subsystem (NSS) en vormt het hart van de GSM infrastructuur. Dit systeem is verantwoordelijk voor de verbinding van het draadloze GSM netwerk met standaard publieke bedrade netwerken zoals het telefonienetwerk en internet. Bovendien is het NSS verantwoordelijk voor het regelen van de handover tussen verschillende Basis Station Subsystemen en bevat het verschillende functies voor lokalisatie van gebruikers, facturering en roaming tussen verschillende providers in verschillende landen. De belangrijkste component binnen NSS is het Mobile Service switching Center (MSC) of de mobiele diensten centrale. Dit zijn ISDN (Integrated Services Digital Network) switches die connecties opzetten naar andere MSCs en BSCs.

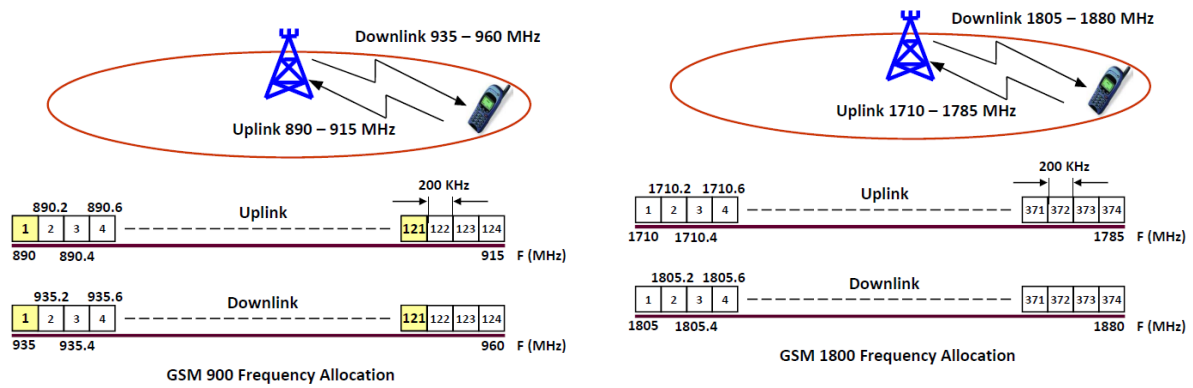


Figuur 6-22: GSM netwerk infrastructuur

6.4.2.2. Radio interface van de GSM infrastructuur

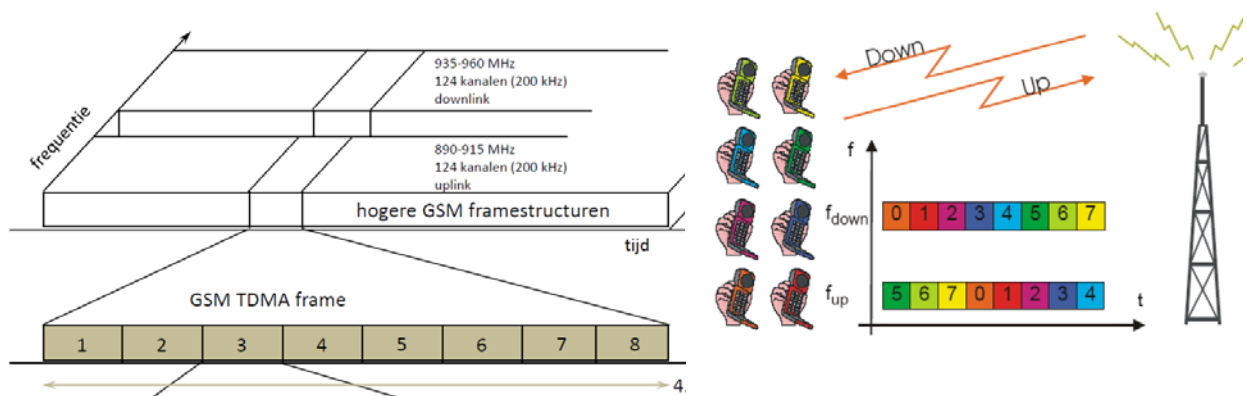
In Europa zijn de GSM frequentiebanden de 900 MHz en 1800 MHz band. Afhankelijk van het continent waar men zich bevindt kunnen de GSM frequentiebanden verschillen van elkaar. In Noord-Amerika bijvoorbeeld zijn de frequentiebanden 850 MHz en 1900 MHz. Sommige landen gebruiken de Amerikaanse en Europese frequentiebanden door elkaar of gebruiken ze alle vier. De huidige generatie van mobiele telefoons zijn multiband (quad-band) zodat er geen frequentie incompatibiliteit is indien men een mobiele telefoon gebruikt in andere landen.

Binnen één frequentieband implementeert GSM, SDMA door te steunen op cellulaire netwerken. In één frequentieband wordt het communicatiekanaal opgesplitst in een uplink (van de mobiele gebruiker naar het basisstation) en een downlink (van het basisstation naar de mobiele gebruiker). In de 900 MHz band gebruiken de uplink en downlink respectievelijk de frequentiebanden 890-915 MHz en 935-960 MHz zoals afgebeeld in Figuur 6-23. Voor toegang tot het communicatiekanaal wordt een combinatie van FDMA en TDMA gebruikt. De 900 MHz band wordt verder opgesplitst in 124 kanalen en de 1800 MHz band wordt opgesplitst in 374 verschillende frequentiekanalen. Elk kanaal heeft een bandbreedte van 200 kHz.



Figuur 6-23 : De uplink en downlink in de 900 MHz en 1800 MHz band en de opsplitsing van frequentiebanden in verschillende frequentiekanalen (FDMA).

Elk van de frequentiekanalen wordt met TDMA opgesplitst in frames waarvan elk frame 4.165ms duurt. Dit frame wordt onderverdeeld in 8 tijdssloten waarbij elk tijdsslot wordt toegekend aan één gebruiker. Deze combinatie van FDMA en TDMA maakt het mogelijk om 124 x 8 gebruikers simultaan te bedienen in de 900 MHz band. In de 1800 MHz band worden dit 374 x 8 gebruikers. Het wettelijk toegelaten zendvermogen in de 850/900 MHz band is 2W en 1W in de 1800 MHz band. Deze waarden zijn beperkt om de opwarming van het menselijk weefsel in de buurt van de antenne beneden de limieten te houden. Het fysische kanaal tussen het basisstation en de mobiele gebruiker bestaat slechts 1/8 van de totale verbindingstijd. Dit impliceert dat het maximaal gemiddeld zendvermogen van een mobiele telefoon respectievelijk 2/8W en 1/8W in de 900 MHz en 1800MHz band bedraagt.



Figuur 6-24: TDMA in GSM

6.4.3. Evolutie van de GSM standaarden

6.4.3.1. 2G

Een evolutie van de GSM standaarden en de bijhorende datasnelheid in de uplink en downlink is te zien in Figuur 6-25: Evolutie van de GSM netwerken.. De eerste evolutie van de GSM standaard is de General Packet Radio Service(GPRS) techniek. GSM is gebaseerd op een circuit geschakelde verbinding terwijl GPRS een pakket geschakelde verbinding is tussen twee GSM's of tussen een GSM en het internet. Deze technologie vormt een uitbreiding van het bestaande GSM netwerk en laat toe om op een efficiëntere en snellere manier data te verzenden of te ontvangen. De GSM infrastructuur werd uitgebreid met een Serving GPRS Support Node. GPRS gebruikers zijn altijd online en staan in constante verbinding met het internet. Er wordt niet gefactureerd op de tijd dat men in verbinding is maar op de hoeveelheid data dat men download of upload. De gebruiker houdt de verbinding ook enkel bezet indien er data transport is waardoor de

capaciteit van het netwerk beter benut wordt. Omdat pakketten kunnen verloren gaan of verschillende routes volgen, is QoS (Quality of Service) belangrijk. GPRS kan datasnelheden tot 115kbit/s aanbieden.

Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE) is een uitbreiding van GPRS dat gebruik maakt van verbeterde modulatieschema's waardoor er een grotere data rate tot 384 kbit/s mogelijk is. Deze technologie werd nog verder verbeterd tot Evolved EDGE of E-EDGE. EDGE wordt aanzien als 2.5 G, de brug tussen 2G en 3G mobiele netwerken [4].

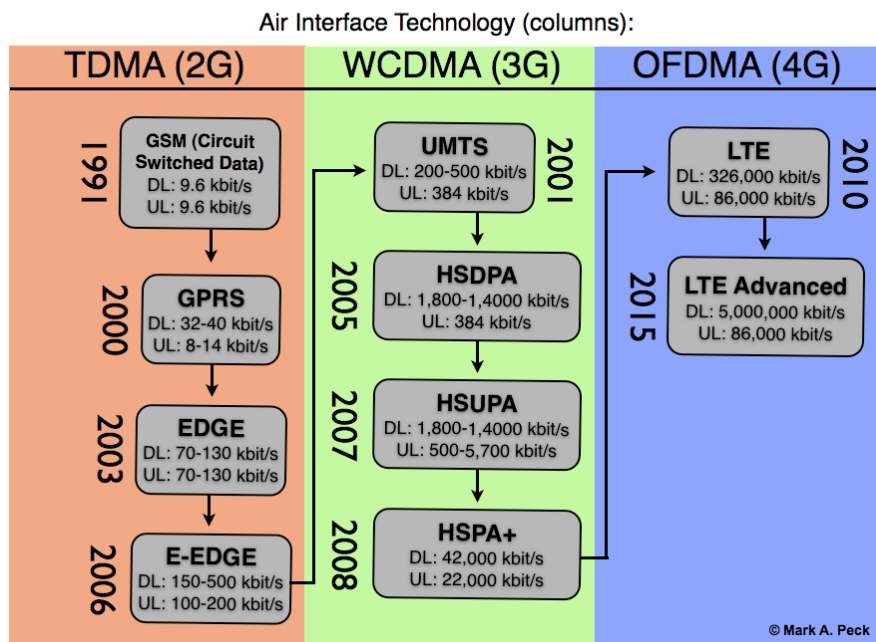
6.4.3.2. 3G

UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) is een nieuwe netwerktechniek voor de derde generatie mobiele diensten en biedt net zoals zijn voorgangers circuit-geschakelde en pakket-geschakelde communicatiediensten aan. Aanvankelijk was de frequentieband voor UMTS 2.0-2.15 GHz, maar om de uitrol te versnellen in Europa werden ook de 900 MHz en 1800 MHz banden toegekend aan UMTS. UMTS maakt gebruik van Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA) om een grotere bandbreedte en spectrale efficiëntie te bezorgen aan operatoren waardoor hoge datasnelheden mogelijk zijn en er toch nog veel gebruikers simultaan kunnen bediend worden. W-CDMA is een Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) methode. UMTS kan datasnelheden aanbieden tot 384kbit/s voor gebruikers met lage mobiliteit en tot 2Mbps voor stationaire gebruikers. Een verdere uitbreiding van UMTS is HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) en wordt ook wel 3.5G genoemd. Het is een pakket-geschakelde communicatiedienst met datasnelheden tot 10 keer de UMTS snelheid van 384 kbit/s. HSDPA heeft als doel het mobiel internet breedbandig te maken.

6.4.3.3. 4G

De laatste generatie van mobiele netwerken valt onder de naam 4G. De snelheid van 4G is 100 Mbit/s als de mobiele gebruiker in een trein of auto zit of 1000Mbit/s indien de mobiele gebruiker stilstaat of aan het wandelen is. LTE (Long Term Evolution) is de enige standaard die momenteel aan deze specificaties voldoet en werd ontwikkeld door het 3rd Generation Partnership Project (3GPP). De gebruikte frequenties voor 4G in Europa zijn de 800/1800 MHz en 2600 MHz frequentiebanden. LTE maakt gebruik van de OFDMA voor de downlink en een FDMA techniek voor de uplink. Een andere techniek wordt gebruikt bij de uplink om het vermogenverbruik in de smartphone te beperken maar heeft een lagere datasnelheid als gevolg.

Evolution of GSM Standards:



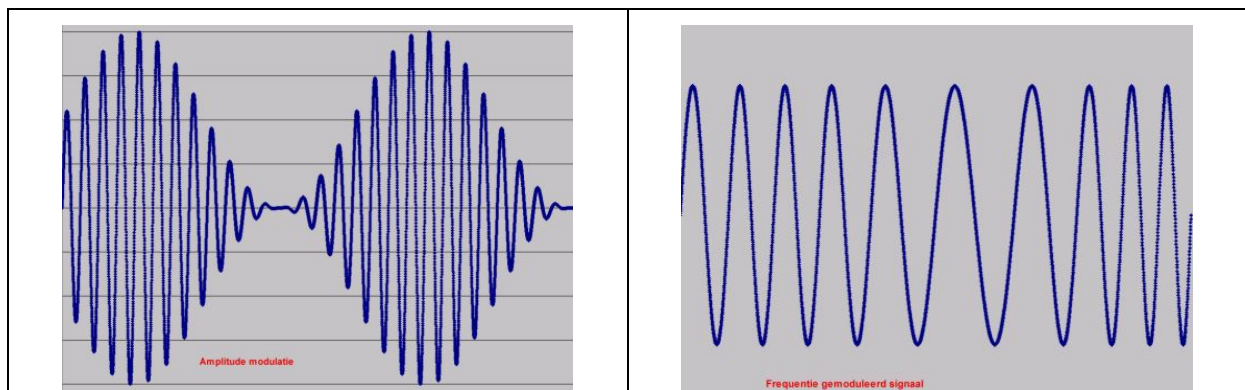
Figuur 6-25: Evolutie van de GSM netwerken.

6.5. Broadcasting

6.5.1. Audio broadcasting

6.5.1.1. Analooq

De meest gekende toepassing van audio broadcasting is de FM omroep. Dit is een analoge radiotechniek in het VHF frequentiebereik dat gebruik maakt van frequentiemodulatie (FM) waardoor HiFi (High Fidelity) audio kwaliteit kan geleverd worden. Met het gebruik van FM kan men een grotere bandbreedte gebruiken en is de kwaliteit van de uitzending kwalitatiever in vergelijking met amplitude modulatie (AM). Deze laatste modulatietechniek wordt nog steeds gebruikt voor radio broadcasting in de lange golf, korte golf en middengolf frequentiebanden. Bij AM wordt de amplitude van de draaggolf gemoduleerd terwijl bij FM de frequentie van de draaggolf gemoduleerd wordt.



Figuur 6-26: Amplitude modulatie (links)/ Frequentie modulatie (rechts)

De FM frequentieband reikt van 87.50 MHz tot 108 MHz en is onderverdeeld in verschillende frequentiekanalen waarbij elke omroep een kanaal krijgt toegekend.

In het FM radiosignaal wordt er ook digitale informatie meegestuurd via het RDS (Radio Data Systeem) signaal. In dit signaal zit bijvoorbeeld de naam van het station, de frequentie en het soort programma. Op sommige radiozenders wordt er ook verkeersinformatie via het TMC (Traffic Message Channel) op het RDS signaal mee verzonden. Een andere mogelijkheid om verkeersinformatie te bezorgen is via het RDS TA/TP-signaal. Indien dit signaal ontvangen wordt zal de ontvanger overschakelen van bijvoorbeeld de cd-speler naar de radiozender dat de verkeersinformatie verspreidt. Als het bericht voorbij is schakelt de radio terug over naar de cd-speler.

6.5.1.2. Digitaal

De transmissiekwaliteit van analoge radio kan sterk variëren omwille van multipad propagatie verschijnselen en interferentie. Digital Audio Broadcasting (DAB) is praktisch immuun tegen deze verschijnselen en biedt een glasheldere geluidskwaliteit aan. Bovendien kunnen DAB systemen gebruik maken van Single Frequency Networks (SFN) waarbij alle zenders die hetzelfde radioprogramma uitzenden op dezelfde frequentie werken. Bij analoge broadcasting gebruikt hetzelfde radiostation verschillende frequenties om hetzelfde radioprogramma uit te zenden en dit om interferentie te vermijden. Met SFN kan één omroep dezelfde frequentie gebruiken doorheen het volledige land. Dit is mogelijk omdat DAB gebruik maakt van Orthogonal Frequency Division Multiplexing als modulatietechniek. Een ander voordeel van DAB in vergelijking met analoge audio broadcasting is het lager zendvermogen dat nodig is. DAB maakt gebruik van de UHF (174–240 MHz) en VHF (1452–1492 MHz) frequentiebanden.

6.5.2. Digital video broadcasting

Digital Video Broadcasting (DVB) is de huidige internationaal aanvaarde open standaard voor digitale televisie. Er bestaan verschillende vormen van digitale video broadcasting met elk hun eigen toepassingen en standaarden. Een samenvatting van de belangrijkste standaarden is te vinden in Tabel 6. In dit document beperken we ons tot een bespreking van de DVB-T en DVB-S standaard.

Tabel 6: Overzicht van de belangrijkste DVB standaarden

DVB standaard	Gebruik	Beschrijving
DVB-C	Cable	DVB over kabel
DVB-H	Handheld	DVB diensten voor mobiele toestellen
DVB-RSC	Return Satellite Channel	DVB voor video afkomstig van satelliet met bi-directionele communicatie
DVB-S DVB-S2	Satellite	DVB standaard voor video afkomstig van satellieten (S2: 2 ^{de} generatie)
DVB-SH	Satellite handheld	DVB voor video verzonden door satellieten en bedoeld voor draagbare toestellen
DVB-T	Terrestrial	De standaard voor Digital Terrestrial (aardse) Broadcasting

De voordelen van DVB zijn:

- Beeld en geluid zijn storingsvrij
- Meerdere tv-programma's en een aantal radioprogramma's kunnen worden uitgezonden in één kanaal. (Analoog laat enkel één programma/kanaal toe)
- Extra diensten kunnen aangeboden worden: Elektronische Programma Gids (EPG), Home banking en shopping, internet ...
- DVB-signalen zijn digitaal waardoor men ze kan encrypteren wat betaal-tv mogelijk maakt
- High-Definition (HD) video en sterke geluidskwaliteit.

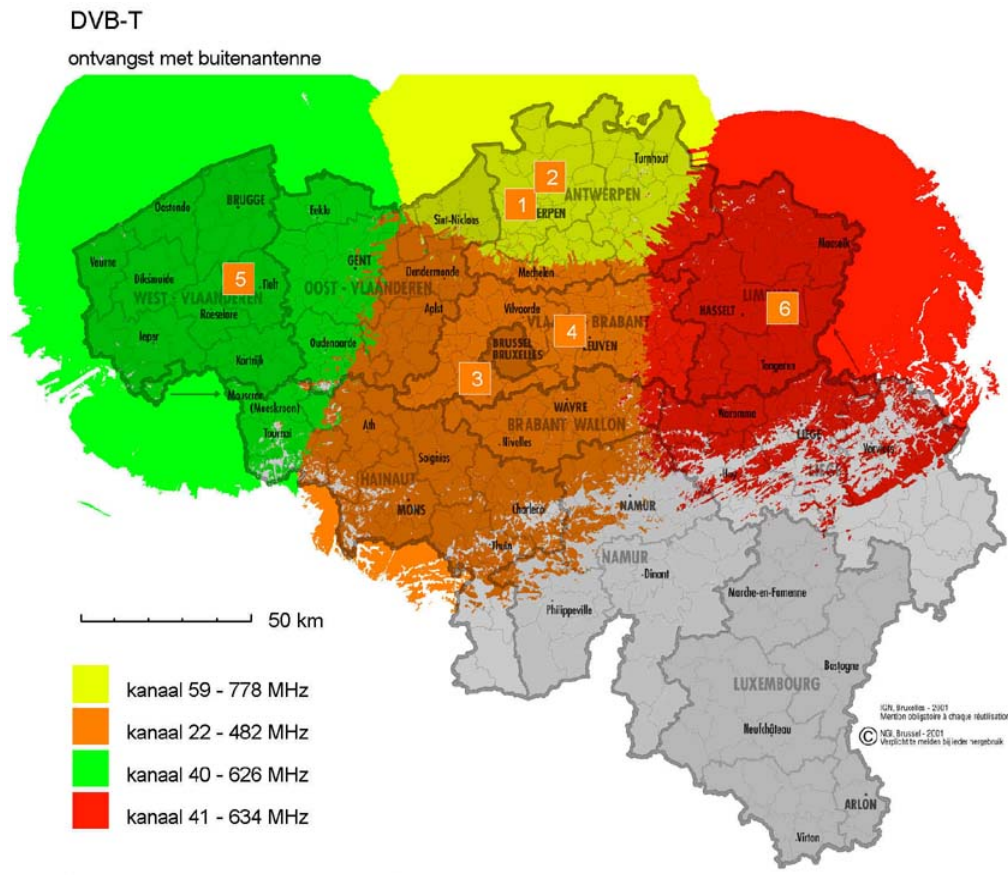
Het grootste nadeel is het alles of niets principe. Bij analoge ontvangst werd bij een vermindering van de signaalsterkte het beeld langzaam slechter en onduidelijker tot het volledig vervangen was door sneeuw. Bij DVB-T zal, indien het systeem op de rand van ontvangst werkt, een kleine vermindering in signaalsterkte resulteren in het compleet wegvallen van de ontvangst (geen beeld).

6.5.3. DVB-T

DVB-T staat voor Digital Video Broadcast Terrestrial en omvat de digitale TV uitzending via aardse zenders. Het DVB-T systeem zorgt voor de broadcasting van HD (High Definition) TV signalen. En maakt hierbij gebruik van de OFDM modulatie techniek [5]. Dit resulteert net zoals bij DAB in een robuust signaal dat bestand is tegen multipad propagatieverschijnselen en interferentie. Ook hier kan men gebruik maken van Single Frequency Networks waardoor één station via verschillende zendmasten hetzelfde programma kan uitzenden op dezelfde frequentie en dit zonder interferentie. De upgrade van DVB-T wordt DVB-T2 (2^{de} generatie) genoemd.

De plaats van waar DVB-T wordt uitgezonden in Vlaanderen staat afgebeeld in Figuur 6-27. Belangrijk om te weten is dat sommige zendmasten uitstralen met een verticale polarisatie en sommige met een horizontale polarisatie [6]:

- De zendstations van Sint-Pieters-Leeuw, Egem, Veltem, in het centrum van Gent en in het centrum van Brussel zenden uit op 482 MHz of kanaal 22 in verticale polarisatie.
- De zendstations Schoten, Genk en in het centrum van Antwerpen zenden uit op 506 MHz of kanaal 25 in verticale polarisatie.



Figuur 6-27: Locatie van de DVB-T zendmasten en hun dekkingsgebied in Vlaanderen [6]

In Vlaanderen is het VRT-aanbod in digitale kwaliteit gratis te ontvangen. Het enige wat nodig is, is een buitenantenne of binnenantenne en een decoder. In de nieuwe televisietoestellen is de decoder meestal geïntegreerd. Indien niet dan moet men een decoder aankopen. Als buitenantenne gebruikt men meestal Yagi-Uda antennes bij een goede uitlijning met de zendtoren is een goede ontvangstkwaliteit verzekerd. Gebruikt men een binnenantenne dan is de ontvangst niet altijd gegarandeerd en sterk afhankelijk van de positie van de antenne in de woning en de afstand tot de zendmast. Telenet zendt ook Digitale televisie via DVB-T maar gecodeerd en vereist aldus een abonnement. Telenet maakt gebruik van zes kanalen:

- Westen van Vlaanderen: kanalen 40 (626 MHz), 43 (650 MHz) en 46 (674 MHz)
- Oosten van Vlaanderen: kanalen 41 (634 MHz), 44 (658 MHz) en 47 (682 MHz)

6.5.4. DVB-S

DVB-S is een digitaal satelliet transmissie systeem voor video ontwikkeld binnen het DVB project. DVB-S2 is de 2^{de} generatie van het systeem en zal uiteindelijk DVB-S vervangen. DVB-S maakte oorspronkelijk gebruik van de QPSK modulatietechniek maar werd uitgebreid met andere modulatietechnieken zoals 8PSK en 16QAM modulatie. Een overzicht van enkele technische specificaties van DVB-S en DVB-S2 staan weergegeven

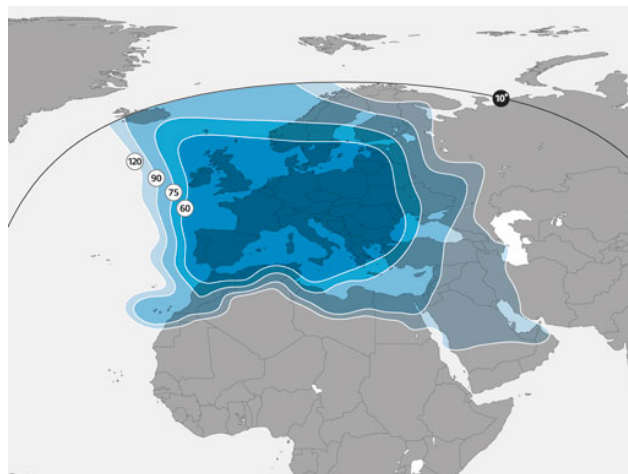
in Figuur 6-28. In tegenstelling met terrestrial video broadcasting is er wel nog steeds analoge broadcasting via satelliet.

Satellite EIRP (dBW)	51		53.7	
System	DVB-S	DVB-S2	DVB-S	DVB-S2
Modulation & Coding	QPSK 2/3	QPSK 3/4	QPSK 7/8	8PSK 2/3
Symbol Rate (Mbaud)	27.5 ($\alpha = 0.35$)	30.9 ($\alpha = 0.2$)	27.5 ($\alpha = 0.35$)	29.7 ($\alpha = 0.25$)
C/N (in 27.5MHz) (dB)	5.1	5.1	7.8	7.8
Useful Bitrate (Mbit/s)	33.8	46 (gain = 36%)	44.4	58.8 (gain = 32%)
Number of SDTV Programmes	7 MPEG-2 15 AVC	10 MPEG-2 21 AVC	10 MPEG-2 20 AVC	13 MPEG-2 26 AVC
Number of HDTV Programmes	1-2 MPEG-2 3-4 AVC	2 MPEG-2 5 AVC	2 MPEG-2 5 AVC	3 MPEG-2 6 AVC

Figure 1. Example comparison between DVB-S and DVB-S2 for TV broadcasting (Source: EBU Technical Review 10/04)

Figuur 6-28: Technische karakteristieken van DVB-S en DVB-S2 [7].

Het dekkingsgebied van één enkele satelliet is een volledig continent omdat de satellieten zich in een geostationaire baan bevinden. Een geostationaire satelliet bevindt zich op een afstand van ongeveer 36.000 km boven het aardoppervlak en heeft een omlooptijd die exact gelijk is aan de omwentelingstijd van de aarde. Hierdoor blijft de satelliet ten opzichte van een locatie op aarde altijd op dezelfde plaats staan. Het dekkingsgebied van een satelliet wordt ook nog de footprint genoemd. De footprint van een ASTRA 1 satelliet staat afgebeeld in Figuur 6-29.



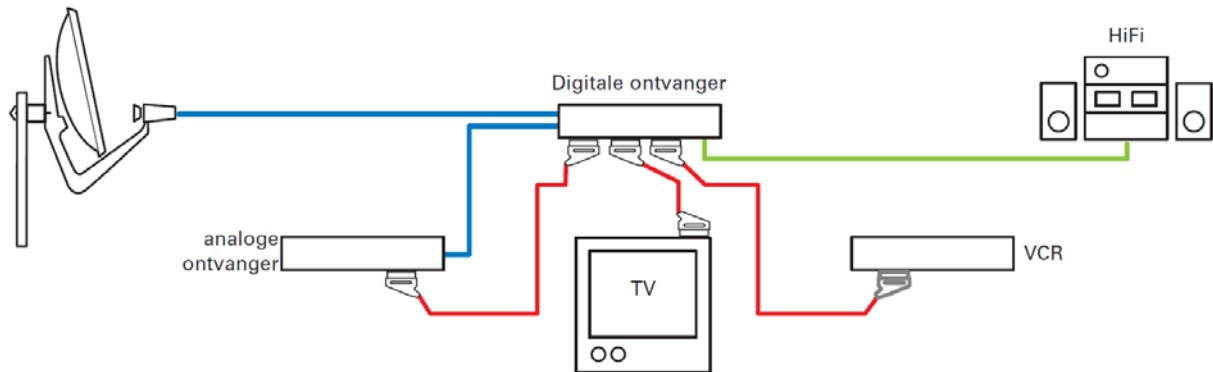
Figuur 6-29: Footprint van de ASTRA 1 satelliet [8].

TV VLAANDEREN is de aanbieder van digitale satelliettelevisie (DVB-S2) in Vlaanderen. Er wordt uitgezonden via de Astra 19,2°O satellieten (Astra 1): Dit zijn meerdere satellieten (5) die gepositioneerd zijn op 19,2° oosterlengte, elk op ongeveer een kilometer afstand boven elkaar. Hierdoor kunnen meerdere kanalen in Europa aangeboden worden. Een ander deel van het aanbod wordt uitgezonden via 2 Astra 23,5°O satellieten (Astra 3).

Voor satellietontvangst gebruikt men schotelantennes en is een Line-of-Sight verbinding tussen schotelantenne en satelliet cruciaal. Bovendien is de foutmarge op de antenne uitlijning met de satelliet slechts enkele graden. Omwille van deze cruciale installatie gaan we in de volgende sectie dieper in op de installatie van schotelantennes.

6.5.4.1. Installatie van een schotelantenne

Een volledige installatie van een satelliet ontvangstelsysteem staat afgebeeld in Figuur 6-30.



Figuur 6-30: Volledige installatie van een satelliet ontvangstelsysteem [9].

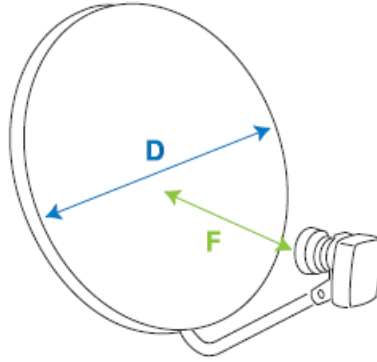
Hier beperken we ons tot de installatie van het buitensysteem dat bestaat uit 3 delen:

De schotel: De schotel weerkaatst het signaal dat het oppervlak raakt en focust de straling in het focuspunt van de schotel waar zich de feedhorn van de LNB bevindt. Een perfect schoteloppervlak is daarom van cruciaal belang. Bij een verbogen, gedeukte of misvormde schotel zullen niet alle signalen naar de feedhorn gestuurd worden. Bovendien is de kans groot dat er stoorsignalen van andere satellieten ontvangen zullen worden.

Het bevestigingsmateriaal: Met het bevestigingsmateriaal wordt de buiteninstallatie gemonteerd en kan men de antenne uitlijnen met de satelliet. Typische installatieplaatsen zijn aan de muur, op het dak of bevestiging aan een paal. Vanzelfsprekend moet de installatie gebeuren zodat dat de schotel een vrij zicht heeft. Praktisch wordt het aangeraden om deze te monteren op een makkelijk toegankelijke plaats zodat sneeuw en ijs gemakkelijk verwijderd kunnen worden.

De Low Noise Block-converter (LNB), inclusief feedhorn: De LNB versterkt de binnenkomende RF signalen en zet deze om naar het satelliet-intermediaire frequentiebereik (satelliet IF) gelegen tussen de 950 en 2150 MHz. Dit signaal gaat dan via een coax kabel naar de ontvanger (die binnenshuis staat). De omzetting en de versterking van het signaal gebeurt met minimale toevoeging van ruis aan het signaal. Een typische ruiswaarde van de LNB is 1dB en de versterkingsfactor mag ook niet te groot zijn zodat de satellietontvanger niet overstuurd wordt wat leidt tot intermodulatie (vervorming van signalen). Een Duo LNB laat toe om zowel signalen te ontvangen van Astra 1 als van Astra 3. Belangrijk om te weten is dat men met een duo LNB een triax schotelantenne moet gebruiken.

De schotel en de LNB moeten goed op elkaar afgestemd zijn wat inhoudt dat beide onderdelen eenzelfde F/D verhouding moeten hebben. Dit is de verhouding van de focuslengte tot de diameter van de schotel zoals afgebeeld staat in Figuur 6-31.

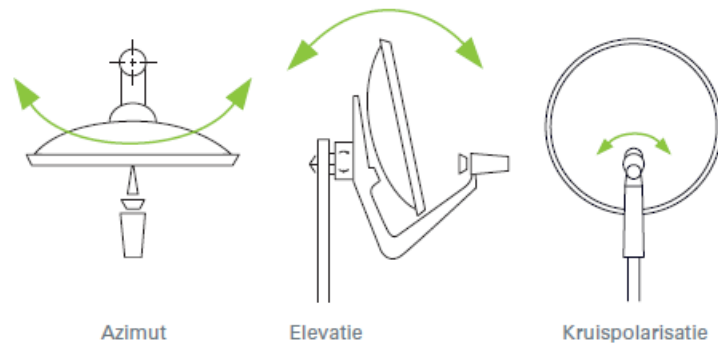


Figuur 6-31: Schotelantenne met LNB en de F/D verhouding [9]

Bij het uitrichten van de schotel is elevatiehoek en azimuthhoek belangrijk.

- De azimuthhoek geeft aan hoe de schotel is gericht in horizontale richting. Voor elke satellietpositie moet een andere azimuthhoek worden ingesteld en deze is daarnaast ook afhankelijk van de locatie van de schotel op aarde. De Azimuthhoek geeft aan in welke horizontale richting de satelliet staat op jouw locatie. In Vlaanderen is dit voor de Astra 1 satellieten (19.2° Oost) gelegen tussen de 163 en 159 graden ten opzichte van het noorden.
- De elevatiehoek geeft aan hoe de schotel gericht is in de verticale richting. In Vlaanderen is de elevatie van de Astra 1 satellieten ongeveer 30° en komt overeen met het aantal graden dat de schotel achterover helt.
- Kruispolarisatie en skew van de LNB: Astra 1 satellieten zenden uit met een verticale en horizontale polarisatie. Omdat enkel schotelantennes op de evenaar de verticale en horizontale signalen als exact horizontaal en verticaal ontvangen moet men op andere locaties de LNB roteren zodat beide polarisaties optimaal worden ontvangen. Dit wordt de Skew genoemd en een positieve Skew houdt in dat de LNB rechtsom gedraaid moet worden (kijkende in de richting van de LNB naar de schotel).

Men kan verschillende methoden gebruiken om een schotelantenne uit te richten. Met een satellite alignment calculator kan men een goed beeld krijgen uit welke richting het signaal komt in jouw situatie. Dit wordt meestal aangegeven door een lijn op Google Maps., nuttige links zijn te vinden op <http://www.sat-direction.com/satellite/> en geven bovendien aan hoe men de Skew moet instellen van de LNB. In een eerste stap kan men een kompas gebruiken om de schotel vervolgens correct te richten. Professionele installateurs gaan gebruik maken van signaalsterktemeters om de oriëntatie te optimaliseren. Voor de elevatiehoek kan men soms gebruik maken van de gradenboog die vaak af te lezen is op de zijkant van de bevestiging waar de schotel in gemonteerd wordt.



Figuur 6-32: Instellen van de azimuthhoek, elevatiehoek van de schotelantenne en de kruispolarisatie van de LNB [9].

6.6. Referenties

- [1] mobiThinking, "Global mobile statistics 2013 Part A: Mobile subscribers; handset market share; mobile operators," [Online]. Available: <http://mobithinking.com/mobile-marketing-tools/latest-mobile-stats/a#subscribers>. [Accessed 07/09/2013 Sept 2013].
- [2] H. Rogier, *Course on Antennas and Propagation*, Ghent : Ghent University -INTEC, 2012.
- [3] J. Schiller, *Mobile Communications*, second ed., Edinburgh: Pearson Education Limited, 2003.
- [4] ETSI, "www.etsi.org," [Online]. Available: <http://www.etsi.org/index.php/technologies-clusters/technologies/mobile/edge>.
- [5] DVB, "DVB-T factsheet: Digital Terrestrial Communication," 2012.
- [6] VRT, "ontvangst via DVB-T," [Online]. Available: <http://www.vrt.be/ontvangst-dvb-t>.
- [7] DVB, "DVB-S2 Fact Sheet: 2nd Generation Sattelite".
- [8] SES, "<http://www.ses.com>," [Online]. Available: <http://www.ses.com/fleet-coverage>.
- [9] Astra, "Installatie van een ASTRA ontvangssystemen: Praktische gids voor de installateur".
- [10] <http://www.vicomsoft.com/learning-center/wireless-networking/>
- [11] *Discovering Bluetooth*, S. Goray (Ed.), Sybex, 2001.

7. Europese en Vlaamse regelgeving

In eerste instantie is het zeer belangrijk te beseffen dat elke elektromagnetische golf straling impliceert. Als bij het algemene publiek de term straling wordt gebruikt, denkt men al heel snel aan radio-actieve straling en is de link naar kanker, misvormde baby's en dalende levensverwachting al snel gelegd. Radio-actieve straling is inderdaad een vorm van elektromagnetische straling. Wat vormt dan het voornaamste onderscheid tussen de elektromagnetische straling van een smartphone, een laser, een computerterminal of de straling binnen een kernreactor?

Het antwoord op deze vraag is de frequentie van de betreffende elektromagnetische golf. Elke elektromagnetische golf kan, zonder de zaken te ingewikkeld te maken, gekarakteriseerd worden door een welbepaalde frequentie. Elk elementair deeltje straling (foton genoemd) heeft een hoeveelheid energie die evenredig is met de frequentie van die straling. De impact die straling heeft op een welbepaald midden wordt bepaald door de interactie tussen dat foton en de deeltjes waaruit dit midden is opgebouwd. Op basis hiervan wordt er onderscheid gemaakt tussen ioniserende en niet-ioniserende straling. Voor ioniserende straling is het zo dat de frequentie in die mate hoog is, dat een foton in staat is moleculaire bindingen te breken, ook in menselijk weefsel. Dit type van straling is zondermeer zeer schadelijk voor de gezondheid gezien ze een bron vormen van celbeschadiging. Over welk type straling gaat het dan? Als voorbeelden zijn er radio-actieve straling (X-rays, gamma-straling, ...) en ook UV straling. Hoe hoger de frequentie, hoe meer energie het foton heeft en hoe groter de potentiële celbeschadiging. Nu is het wel zo dat als u in een dagdagelijkse omgeving bijvoorbeeld de hoeveelheid radio-actieve straling zult meten, u een waarde die hoger dan nul is zult waarnemen. Is dat dan schadelijk? Deze vraag wordt beantwoord door het begrip intensiteit. De intensiteit van elektromagnetische straling wordt bepaald door het aantal deeltjes (fotonen) dat per tijdseenheid invalt op een oppervlak. Bij normale omstandigheden is dit voor ioniserende straling zeer laag. Als u X-rays laat nemen in het ziekenhuis is dit gedurende zeer korte tijd significant hoger.

Geruststellend feit is dat alle elektromagnetische straling die gebruikt wordt voor communicatiesystemen zoals WIFI of mobiele telefonie, binnen de zogenaamde radio-frequentieband (afgekort RF), niet-ioniserend van aard is. De RF band strekt zich uit van 30 kHz tot 300 GHz. Binnen deze ruime band wordt er dan nog onderscheid gemaakt tussen de lagere en hogere frequenties. Zo noemt men de band tussen de 30 en 300 kHz bijvoorbeeld de low frequency (LF) band. Een zeer belangrijke band voor draadloze communicatie is de UHF-band, die loopt van 0.3 tot 30 GHz. De voornaamste toepassingen in deze band zijn o.a. het mobiele telefonie/data netwerk (met bijvoorbeeld ook het 3G netwerk), WIFI, Bluetooth,

In wat volgt in dit hoofdstuk zullen we ons beperken tot de regelgeving betreffende niet-ioniserende RF straling. Wat zijn dan wel de effecten van RF straling op het menselijk weefsel? Er wordt een onderscheid gemaakt tussen de thermische en niet-thermische effecten. De niet-thermische effecten zijn het gevolg van het ontstaan van stromen die vloeien binnen in het elektrische goed-geleidend lichaam als gevolg van de aanwezigheid van een extern elektromagnetisch veld. Bij zeer hoge waarden van deze stromen kunnen ze aanleiding geven tot ongecontroleerde spiersamentrekkingen en hartritme-stoornissen. De thermische effecten zijn eveneens het gevolg van het feit dat er stromen door het weefsel vloeien. Aangezien de geleidbaarheid van het menselijk weefsel groot is (vooral deze met een hoge waterinhoud zoals spieren en huid), zal dit aanleiding geven tot opwarming van dit weefsel. De mate waarin dit gebeurt is evenredig met de intern aanwezige elektrische veldsterkte in het kwadraat. Nu is het op grote schaal meten van de opwarming die plaatsvindt in de mens als gevolg van aanwezige RF-velden uiteraard problematisch. Daarom is er onderscheid gemaakt tussen zogenaamde basisbeperkingen en referentiewaarden. De basisbeperking (ook wel eens basisrestrictie genoemd) is de opwarming van het weefsel. Dit wordt uitgedrukt in W/kg en noemt men de SAR (Engels:

Specific Absorption Rate). Deze is dus moeilijk, zonet onmogelijk te meten aangezien dit verschijnsel zich afspeelt binnen in het menselijk lichaam. De referentiewaarde is in het leven geroepen omdat deze wel eenvoudiger te meten is, het is namelijk de grootte van het elektrisch veld in lucht (eenheid Volt per meter: V/m) in de nabijheid van het menselijk lichaam. De referentiewaarden zijn een hulpmiddel om te bepalen of aan de basisbeperkingen wordt voldaan. Als de referentiewaarden niet worden overschreden, dan wordt ook de basisbeperking niet overschreden. Worden de referentiewaarden wel overschreden, dan moet op andere wijze worden nagegaan of aan de basisbeperking wordt voldaan. Als gesproken wordt van blootstellingslimieten worden eigenlijk de referentiewaarden bedoeld.

Wat zijn nu de precieze basisbeperkingen en referentiewaardes die van toepassing zijn in Europa en meer bepaald in België? In 1998 heeft het ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), een groep van onafhankelijk wetenschappers, internationale richtlijnen vastgesteld voor de blootstelling van de mens aan elektromagnetische velden in het frequentiegebied van 0 Hz tot 300 GHz. Binnen dit gebied vallen ook de frequenties voor mobiele telecommunicatie (100 kHz tot 300 GHz). In 1999 heeft de Raad van de Europese Unie de richtlijnen van ICNIRP aanbevolen aan haar lidstaten. Na enige tijd is men het er in België over eens geraakt dat de wetgeving betreffende deze zaak een gewestelijke aangelegenheid is. In Vlaanderen is het zo dat men de richtlijn van de Europese Raad niet volgt, maar men vier maal strenger is en dit in tegenstelling tot de meeste andere Europese landen. Hieronder vindt u een tabel, die van toepassing is voor Vlaanderen, met de grenswaarden voor de referentiewaarden in functie van de frequentie. Zo is bijvoorbeeld bij 900 MHz de grenswaarde gelijk aan $0,686 \sqrt{900} = 20,58$ V/m. Belangrijk is op te merken dat dit de cumulatieve blootstelling betreft, dus afkomstig van alle zendantennes die een stralingsbijdrage leveren bij een welbepaalde frequentie! Zo is er in Vlaanderen ook een blootstellingslimiet per antenne en per frequentie, en deze bedraagt bijvoorbeeld bij 900 MHz 3 V/m.

Blootstellingslimieten voor Vlaanderen:

Frequentie: f in MHz:	Elektrische veldsterkte E in V/m
10 tot 400	13,7
400 tot 2000	$0,686\sqrt{f}$
2000 tot 10.000	30,7

Waar zijn trouwens die waarden van toepassing? De blootstellingsnorm geldt op alle publiek toegankelijke plaatsen, bijvoorbeeld straten, parken, scholen, ziekenhuizen, huizen, tuinen, ... Operatoren kunnen een zone rond een zendmast afbakenen die ontoegankelijk is voor het publiek, een zogenaamde veiligheidszone (bijvoorbeeld op een dak waar een zendantenne staat). Binnen deze zone moet de norm niet gerespecteerd worden en gelden er andere richtlijnen voor werknemers. Details kunnen eveneens teruggevonden worden in de referenties.

Hoe is de situatie binnen de andere gewesten? Voor het Brussels Hoofdstedelijk Gewest en het Waals Gewest vond men het feit dat men in Vlaanderen vier keer strenger was dan de Europese aanbeveling niet voldoende. Hier was het zo dat bij 900 MHz de waarde van 3 V/m cumulatief niet mocht overschreden worden. Deze richtlijn zorgde ervoor dat het voor de operatoren praktisch en financieel onmogelijk werd om 4G aan te bieden in een wereldstad en zakencentrum zoals Brussel, terwijl dit in bijvoorbeeld Koekelare geen probleem was. Zeer recent (juli 2013) heeft het Brussels Gewest, onder druk van de operatoren, een aantal zaken hieromtrent bijgestuurd. De stralingsnorm van 3 V/m blijft behouden in het Brussels Gewest, maar zal in de toekomst gelden per pakket technologie (2G, 3G, 4G) in plaats van voor alle technologieën samen. Voor het respecteren van de norm zal men de straling van de antennes van de verschillende operatoren bij elkaar

optellen. De telecomoperatoren zullen dus moeten samenwerken, net zoals vandaag al het geval is in het gewest. Huidig Brussels Minister van energie en leefmilieu Huytbroeck beklemtoont dat 3 V/m per technologie het plafond blijft. In Vlaanderen geldt ook die norm maar daar telt men de antennes van de verschillende operatoren niet bij elkaar op.

7.1 Referenties

ICNIRP GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC, MAGNETIC AND ELECTROMAGNETIC FIELDS (UP TO 300 GHz): <http://www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf>

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). *IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz*, IEEE Std C95.1, 2005

WHO: *Electromagnetic fields and public health: mobile phones* Fact sheet N°193 June 2011: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs193/en/index.html>

WHO: *Electromagnetic fields and public health, Base stations and wireless technologies* Backgrounder, May 2006:

<http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs304/en/index.html>

Blootstellingslimieten voor elektromagnetische velden:

<http://www.antennebureau.nl/onderwerpen/gezondheid-veiligheid/blootstellingslimieten-voor-elektromagnetische-velden>

Vlaamse reglementering voor elektromagnetische golven van vast opgestelde zendantennes: <http://www.lne.be/themas/hinder-en-risicos/milieuhinder-en-klachten/vlaamse-reglementering-voor-elektromagnetische-golven-van-vast-opgestelde-zendantennes>

Brussel krijgt eindelijk 4G:

<http://www.demorgen.be/dm/nl/5401/Multimedia/article/detail/1667834/2013/07/12/Brussel-krijgt-eindelijk-4G.dhtml>

8. Beveiliging van draadloze netwerken

8.1. Kwetsbaarheden van een netwerk

Draadloze netwerken bij particulieren en bedrijven zijn tegenwoordig eerder regel dan uitzondering. In veel omgevingen streeft men ernaar om de toegang tot de lokale netwerken en/of bepaalde segmenten ervan uitsluitend te beperken tot het hiervoor geautoriseerde personeel. De configuratie van WLAN netwerken zonder onderliggende kennis van de verschillende beveiligingsmechanismen en encryptiesystemen kan bijdragen tot de introductie van een aantal kwetsbaarheden binnen een netwerksysteem. Een aanval, veelal bestaande uit een combinatie van verschillende hackingtechnieken, kan het systeem en de data zodanig compromitteren dat er schade wordt ervaren door de eigenaars van het netwerk. Zo kunnen drive-by-hackers, niet geëncrypteerde datatransmissie afluisteren of bijvoorbeeld een denial-of-service aanval lanceren die kan leiden tot een tijdelijk niet functionerend computersysteem. Ook de injectie van wormen, virussen en spam kan een gevolg zijn van een slecht geconfigureerd netwerk. De aangerichte schade voor een particulier of bedrijf kan hierdoor zeer groot worden. Denk maar aan het verlies van gevoelige informatie zoals klantgegevens, financiële documenten, personeelsdata, handelsgeheimen,... De veronderstelling dat de beveiligingsrisico's van een netwerk zouden opgelost worden door geen WLAN's te gebruiken of het radiobereik te beperken is natuurlijk erg misleidend gezien de meeste netwerken ook met het internet geconnecteerd zijn. Via deze weg is er dus eveneens een potentieel voor aanvallen van buitenaf. De nodige veiligheidsmaatregelen voor het afschermen van een bedrijfsnetwerk dient dus zowel voor wireless access points als voor kabelconnecties met de nodige kennis van zaken te gebeuren.

8.2. Basismaatregelen bij installatie access points

Een typisch probleem bij 802.11 is dat de beveiliging op access points standaard vaak niet actief staat. Wanneer de access points geïnstalleerd worden en de inbedrijfname gebeurt met de fabrieksinstellingen is het voor hackers heel eenvoudig om zich de toegang tot uw bedrijfsnetwerk te verschaffen. Bij het installeren moeten dus de nodige configuraties gebeuren wil men dit risico beperken.

Een van de eenvoudigste maatregelen die men kan nemen is om de access points en hun transmissieperformantie zodanig in te stellen dat het bereik van het radionetwerk zich binnen het domein van het bedrijf bevindt.

Ook het gebruik van VPN (Virtual Private Network) voor toegang tot een netwerk biedt geavanceerde bescherming tegen het afluisteren en manipuleren van data in een netwerk. Voor netwerktoegang via VPN zijn weliswaar extra configuraties en software nodig. Dit maakt het gebruik ervan iets gecompliceerder en minder praktisch.

8.3. Databeveiliging en data encryptie (IEEE 802.11i / 802.11x)

8.3.1. 802.11i

802.11i bevat een aantal definities rond de veiligheid van data transmissie tussen AP's en clients via WLAN's. Er wordt ondermeer gedefinieerd met welke methodes en volgens welke encryptiealgoritmes de data moet worden versleuteld voor transmissie over het draadloze kanaal.

8.3.2. 802.1X

802.1X legt een aantal regels vast rond de procedure voor het inloggen en het toekennen van toegangsrechten voor clients. Hierin komt ook het RADIUS protocol aan bod en de termen Pre-Shared-Key (PSK/kleine netwerken) en Extensible Authentication Protocol (EAP/grotere netwerken)

8.3.3. Encryptie - Decryptie

Vooraleer men data verstuurt zal men deze eerst coderen (versleutelen/encrypteren) volgens een bepaald wiskundig algoritme. Men genereert uit de originele, niet versleutelde data een onleesbare reeks symbolen. De bedoeling hiervan is om veilig gegevens tussen twee personen te kunnen uitwisselen over een onveilig communicatiekanaal. Deze gegevens moeten onleesbaar zijn voor derden. De geëncrypteerde data is zonder de nodige sleutel zeer moeilijk terug te decoderen (ontsleutelen/decrypteren). Wiskundig gezien kan men bij de meeste encryptiealgoritmes de originele data wel uit de geëncrypteerde data halen zonder dat de key gekend is. Een krachtig encryptiealgoritme betekent echter dat de vereiste rekenkracht en tijd die nodig is om zonder key te decrypteren zodanig groot zijn dat dit moeilijk praktisch te realiseren is.

8.3.4. WEP

WEP of Wired Equivalent Privacy wordt algemeen beschouwd als onvoldoende krachtig voor bescherming van hedendaagse netwerksystemen. Met de juiste software kan een met WEP geëncrypteerd netwerk in enkele minuten worden gekraakt.

8.3.5. WPA

De netwerkstandaard voor beveiligde draadloze netwerken WPA staat voor Wi-Fi Protected Access. WPA is in feite een optimalisatie op vlak van veiligheid gebaseerd op WEP. Enkele belangrijke tekortkomingen van WEP werden echter weggewerkt. Zo zorgt het gebruik van TKIP (Temporal Key Integrity Protocol) ervoor dat de sleutels continu gewijzigd worden. Decryptie wordt hierdoor enorm bemoeilijkt. Ook het MAC adres van de zender die zorgt voor een unieke hardware identificatie wordt opgenomen in de decryptiesleutel. Dit maakt het lastiger om boodschappen van de zender na te bootsen.

8.3.6. WPA2

WPA was in feite een tussenoplossing voor de stap van WEP naar WPA2. WPA had nog enkele zwaktes die bij WPA2 zijn weggewerkt. Het belangrijkste verschil tussen WPA en WPA2 is dat in WPA2 het encryptiealgoritme AES wordt gebruikt. Dit staat voor Advanced Encryption Standard. Op voorwaarde dat de gebruiker sterke paswoorden gebruikt, dan wordt praktisch verondersteld dat AES en TKIP gecodeerde boodschappen niet te kraken zijn met de hedendaagse technologie.

8.3.7. EAP

EAP staat voor Extensible Authentication Protocol. EAP definieert het mechanisme dat beschrijft hoe een cliënt en server kunnen bepalen welke authenticatie methode er zal worden gebruikt. Er bestaan heel veel mogelijke methoden om dit onder het EAP framework te doen. Een voorbeeld van een dergelijk mechanisme is EAP-TLS. Bij EAP-TLS moet iedere netwerk node gecertificeerd worden bij een centrale server vooraleer hij toelating krijgt om over dit netwerk te communiceren.

8.3.8. MAC Filters

MAC staat voor Media Access Control. Een zogenaamd MAC adres is een unieke code die bestaat uit 48 bits. Deze worden meestal hexadecimaal voorgesteld en kunnen meestal op het toestel worden teruggevonden, een voorbeeld: 00:80:77:90:0a:8c. MAC adressen van een netwerktoestel kunnen via het netwerk worden opgevraagd. Met deze code kan hardware wereldwijd uniek worden geïdentificeerd. Iedere computer, netwerkkaart, printer, moederbord,... beschikt over een dergelijk uniek identificatienummer. MAC adressen binnen een netwerk kunnen ondermeer gebruikt worden om bepaalde systemen al of niet toegang te geven tot bepaalde adressen in het netwerk. Zo kan men op een eenvoudige manier een extra veiligheidslaag inbouwen in een netwerk. Helaas kunnen ook MAC adressen gemanipuleerd of nagebootst worden. Men spreekt dan van MAC spoofing. MAC filters zijn dus enkel nuttig in combinatie met andere beveiligingstechnieken.

8.3.9. RADIUS protocol

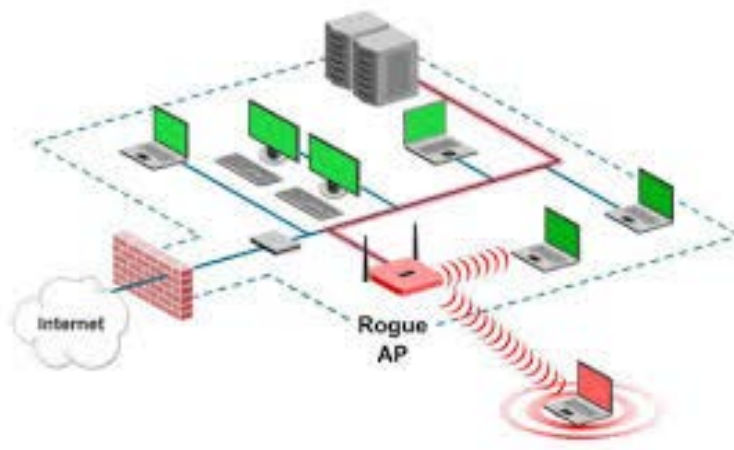
Radius staat voor Remote Authentication Dial In User Service. Authenticatie van een systeem betekent dat er wordt gecontroleerd of dit systeem daadwerkelijk is wie het beweert te zijn. Eenmaal een systeem geauthenticeerd is wordt overgegaan naar autorisatie waarbij wordt bepaald wat de toegangsrechten zijn van de geautoriseerde gebruiker, computer of applicatie. Het RADIUS protocol definieert een authenticatiemethode rond een centrale RADIUS-server. Deze server bevat de toegangs- en autorisatiegegevens van alle nodes in het netwerk. Als een gebruiker, computer of applicatie toegang vraagt om met een bepaald netwerk verbinding te maken wordt deze vraag doorgestuurd naar de RADIUS server. Deze controleert of dit paswoord in zijn lijst staat en verleent al of niet de toegang tot dit netwerk. Het paswoord wordt steeds geëncrypteerd verstuurd en kan nooit onderschept worden door iemand die niet geautoriseerd is. Aangezien alle paswoorden op een centrale server zijn opgeslagen moeten niet alle AP's de toegangsdata van de gebruikers opslaan.

8.3.10. Datasnelheid

Het toevoegen van beveiliging aan netwerken betekent uiteraard dat er meer rekenkracht, werkgeheugen en bandbreedte gevraagd wordt van de systemen in het netwerk. Bijvoorbeeld het encrypteren en het decrypteren van de gegevens via AES is zeer rekenintensief. Bij netwerken waar een zeer hoge performantie vereist is kan het soms nodig zijn om een minder veilige encryptiemethode te gebruiken die minder rekenkracht vergt van het systeem.

8.3.11. Rogue Acces Points

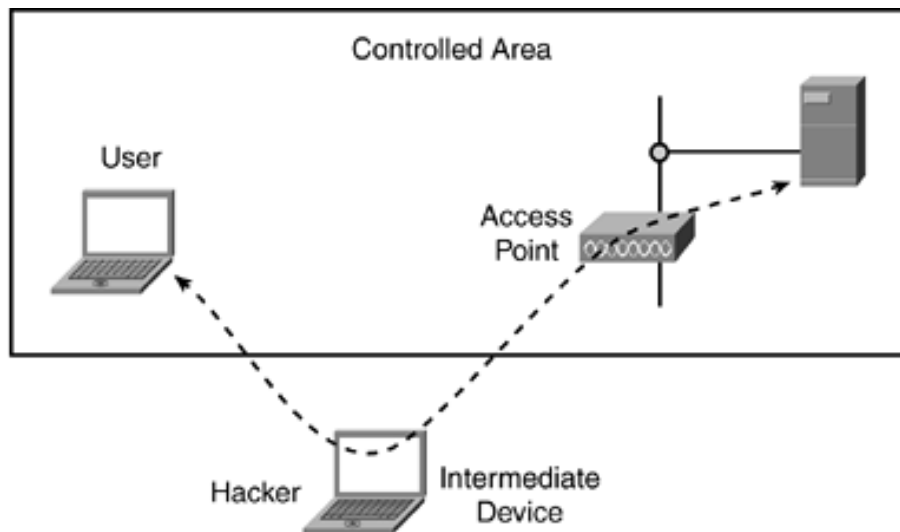
Een niet beveiligde AP die zich binnen de firewall bevindt compromitteert de veiligheid van het ganse draadloze netwerk. Er ontstaat vrije toegang tot het vertrouwde netwerk.



Figuur 8-1. Rogue AP

8.3.12. Man in the Middle Attack

Niet beveiligde data wordt onderschept en de inhoud wordt eventueel onder gewijzigde vorm doorgestuurd naar de ontvanger. De aanvaller doet zich hierbij voor als de zender.



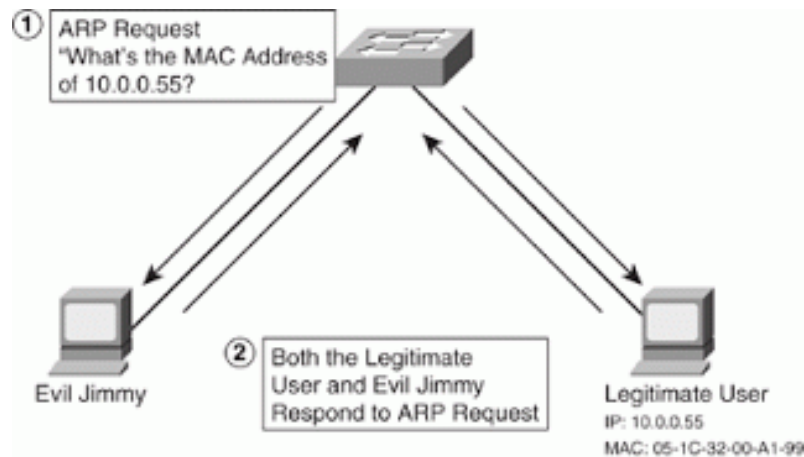
Figuur 8-2. Hacking

8.3.13. Access Point MAC Spoofing

Het MAC adres in een netwerkkaart kan niet worden veranderd. Met de juiste software kan men echter vrij eenvoudig het besturingssysteem waardoor de netwerkkaart wordt gecontroleerd laten geloven dat de kaart een ander MAC adres heeft. Deze techniek heet MAC Spoofing.

Stel: een computer met draadloze connectie wordt geconfigureerd als wireless AP met dezelfde settings als elke AP binnen een bepaald WLAN. Deze AP bevindt zich bovendien binnen het bereik van een bepaalde WLAN. De client kan dan op dit accesspoint

connecteren in de veronderstelling dat dit een officiële AP is. De hacker doet zich dus voor als een legitieme AP en krijgt toegang tot het netwerk.



Figuur 8-3. MAC spoofing

8.3.14. Denial Of Service (DoS)

De bedoeling van een DoS aanval is om het normale gebruik of management van een communicatie inrichting (bvb: netwerk) te verstoren. Een DoS aanval is gebaseerd op het principe dat netwerktoestellen steeds moeten reageren op alle client requests. Hackers kunnen deze eigenschap misbruiken om een netwerk te overspoelen met dergelijke client requests zodat de netwerkinrichting dit niet meer kan afhandelen. Gedistribueerde DoS aanvallen zijn een nog groter probleem aangezien er nu vanop verschillende plaatsen tegelijkertijd DoS aanvallen plaatsvinden. Mogelijke gevolgen zijn dat het netwerk tijdelijk onbruikbaar wordt.

Referenties

[1] Cryptography and Network Security, *Principles and Practice*, William Stallings

9. Applicaties en toepassingen

9.1. Indoor plaatsbepaling

9.1.1. Inleiding

De plaats van voorwerpen en mensen kennen en kunnen volgen (tracking-and-tracing) heeft vele toepassingen. De best gekende is de navigatiehulp in wagens op basis van GPS signalen. Deze technologie wordt ook steeds vaker ingezet om gestolen voertuigen op te sporen, om (landbouw)machines autonoom te laten rijden,...

Ook binnenshuis zijn er heel wat mogelijkheden. In ziekenhuisomgevingen kan men hiermee kritische apparatuur lokaliseren in een noodgeval, verhinderen dat toestellen bepaalde afdelingen verlaten. In rusthuizen kan het weglopen van dementerende ouderen tegengegaan worden. In de transportsector kan hiermee bovenop de just-in-time ook de in-sequence levering ondersteund worden. In de culturele en entertainment sector kan plaats afhankelijke informatie ("location-based") gegeven worden (bijv. uitleg over het standbeeld waar men voor staat). In het algemeen kunnen heel wat processen geoptimaliseerd en geflexibiliseerd worden wanneer de actuele positie van voorwerpen en personen gekend is. Deze binnenshuis plaatsbepalingstechnologie vertegenwoordigt dan ook een miljarden business.

Indoor plaatsbepaling vraagt een andere technologie dan GPS. Hoewel er zeer gevoelige GPS-ontvangers bestaan die ook indoor vaak de satelliet signalen nog kunnen oppikken, werkt deze technologie toch niet binnenshuis. De reden hiervoor is dat er geen obstakels tussen de satelliet en de ontvanger mogen staan die de signalen blokkeren. Zodra de signalen een omweg moeten maken via een reflectie wordt de positie verkeerd bepaald. Dit wordt verder uitgelegd in Figuur 9-7.

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van technieken die kunnen gebruikt worden voor indoor plaatsbepaling en hun beperkingen in praktische toepassingen.

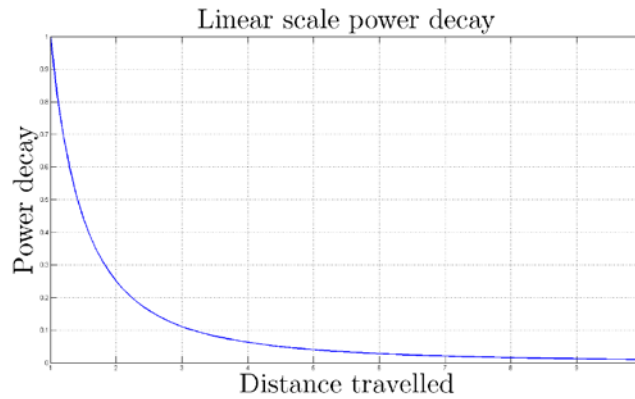
9.1.2. Basistechnieken voor plaatsbepaling

Er bestaan verschillende technieken om indoor plaatsbepaling te doen. De meeste (commerciële) systemen zijn gebaseerd op de fysische eigenschappen van RF-signalen. Hierbij zullen meerdere nodes met een gekende positie (referentie nodes) draadloze signalen uitwisselen met een mobiele node waarvan de positie moet bepaald worden. De plaatsbepaling kan hierbij gebaseerd zijn op de signaalsterkte (RSSI), de tijdsvertraging (TOA) of de richting (DOA) van de RF-signalen.

RSSI

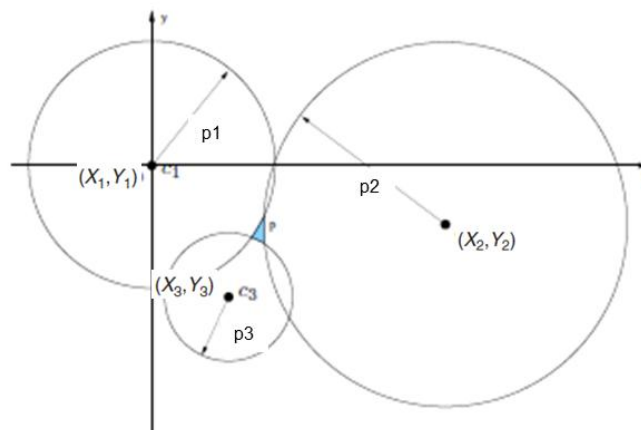
RSSI staat voor Received Signal Strength Indication. Bij draadloze gegevensoverdracht, voert de ontvanger een (al dan niet ruwe) meting uit van het ontvangen vermogen. Dit ontvangen vermogen is voor een groot deel¹ afhankelijk van de afstand tussen zender en ontvanger: naarmate de afstand tussen zender en ontvanger toeneemt, zal het ontvangen vermogen dalen zoals voorgesteld op Figuur 9-1. Op deze manier kan uit het ontvangen vermogen de afstand tussen de zender en ontvanger geschat worden.

¹ Daarnaast spelen ook andere parameters zoals antennewinst een rol.



Figuur 9-1 Verband tussen ontvangen vermogen en afstand zender-ontvanger

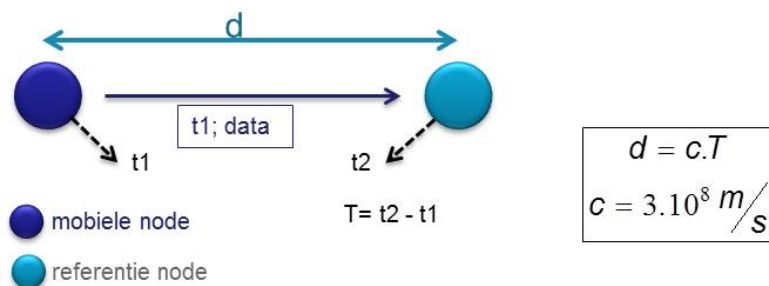
Wanneer men de afstand tussen een mobiele node (waarvan men de plaats wil bepalen) en drie referentienodes (met een gekende positie) heeft bepaald, kan de plaats van de mobiele node worden berekend als het snijpunt van drie cirkels. Deze techniek wordt multi-lateratie genoemd en is geïllustreerd in Figuur 9-2. De afstandsschattingen zijn in de praktijk nooit perfect en de cirkels snijden bijgevolg nooit exact in één punt. De berekening zal dus een zone (blauwe zone op Figuur 9-2) opleveren waarin de mobiele node zich bevindt. Om driedimensionale plaatsbepaling te doen zijn vier afstandsmetingen nodig.



Figuur 9-2 Multi-lateratie

TOA

TOA is de afkorting van Time of Arrival. Hierbij gebeurt de plaatsbepaling op basis van tijd (eigenlijk tijdsverschillen). Men maakt gebruik van de eindige en constante propagatiesnelheid van radiogolven. De tijd die een signaal nodig heeft om zich voort te planten van een zender naar een ontvanger is immers gerelateerd aan de afstand die het signaal aflegt (Figuur 9-3). De RF-golven planten zich voort met de lichtsnelheid, elke microseconde leggen ze ongeveer 300m af.

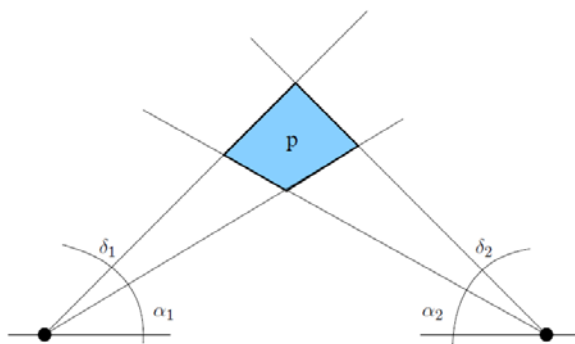


Figuur 9-3 Principe van TOA

Met drie geschatte afstanden kan opnieuw multi-lateratie worden toegepast (Figuur 9-2)

DOA

Wanneer de nodes in een netwerk uitgerust zijn met directieve ontvangstantennes, kan door gebruik te maken van de ontvangsthoek van het signaal (Direction-of-Arrival of Angle-Of-Arrival), een positie van de zendende node bepaald worden. Zoals te zien is in Figuur 9-4 volstaan twee referentienodes om een eenduidig locatiegebied (p) aan te duiden (bij twee-dimensionale plaatsbepaling). Naarmate de ontvangstantenne kleinere hoeken kan onderscheiden, wordt dit gebied (p) kleiner.



Figuur 9-4 Principe van DOA

Andere technieken

Er zijn ook indoor plaatsbepalingstechnieken die geen gebruik maken van RF-signalen. Als alternatief kan infrarood of (ultra)soon gebruikt worden, deze technieken worden momenteel in commerciële systemen minder toegepast.

Daarnaast kunnen extra sensoren gebruikt worden om de plaatsbepaling te verbeteren. Veel gebruikte sensoren zijn elektronische accelerometers, gyroscopen, compassen, odometers, ... Deze extra sensoren op de mobiele node kunnen de nauwkeurigheid van de plaatsbepaling vergroten of er voor zorgen dat de plaatsbepaling blijft doorgaan wanneer het RF-signaal enige tijd wegvalt.

9.1.3. Praktische aspecten en beperkingen

RSSI

Bij de meeste draadloze hardware is een RSSI circuit standaard aanwezig en gebeurt de meting van het ontvangen vermogen dus elke keer wanneer er een boodschap ontvangen wordt. Het voordeel is dat hiervoor geen extra bandbreedte of hardware moet voorzien worden. Het grote nadeel is echter de onnauwkeurigheid van de resultaten. Deze onnauwkeurigheid wordt enerzijds veroorzaakt door het meetsysteem zelf. Dit is namelijk niet expliciet ontwikkeld om accurate vermogensmetingen uit te voeren. Anderzijds zijn er bij indoor radiopropagatie allerlei effecten die het verwachte verband tussen RSS en afstand (zoals aangegeven op Figuur 9-1) grondig verstoren: de signalen reflecteren tegen wanden, worden tegengehouden door allerlei voorwerpen, Hierdoor is de omzetting van het gemeten vermogen in een afstand weinig betrouwbaar, waardoor ook de multi-lateratietechnieken doorgaans slechte resultaten opleveren.

De voor- en nadelen op een rijtje:

- + snel
- + geen overhead
- onnauwkeurig

Omwille van de slechte resultaten van RSSI-gebaseerde multi-lateratie, wordt vaak fingerprinting als alternatieve plaatsbepalingstechniek gebruikt bij RSSI metingen. Fingerprinting maakt gebruik van een databank met signaalwaarden, opgemeten op verschillende plaatsen binnen het netwerk, een zogenaamde radio map van het gebouw. Op verschillende plaatsen in het gebouw (bijv. op een grid van 1 m²) wordt opgemeten hoe sterk het signaal van elke referentienode (bij WiFi zijn dit de Access Points) wordt ontvangen. Al deze gegevens worden tijdens de installatie van het systeem in een database opgeslagen. Om daarna de positie van een mobiele node te bepalen, vergelijkt men de ontvangen signaalwaarden met deze opgeslagen in de databank. De beste overeenkomst (met alle referentienodes) levert de positie. De grootte van de databank houdt rechtstreeks verband met de nauwkeurigheid van de plaatsbepaling en het aantal referentienodes. Het grootste nadeel van deze methode is het arbeidsintensieve opmeten van de signaalwaarden, die bovendien een momentopname zijn van het netwerk en dus geen rekening houden met mogelijke wijzigingen in het netwerk op het moment van de plaatsbepaling. Verschillende commerciële WiFi plaatsbepalingssystemen gebruiken fingerprinting.

Voor- en nadelen op een rijtje:

- + nauwkeurigste werkwijze bij RSS
- setupfase neemt tijd in beslag
- grootte van de database
- regelmatige update database nodig

Naast de toepassing in fingerprinting systemen, wordt RSSI ook vaak gebruikt in lage resolutiesystemen. Voor vele toepassingen volstaat het te kunnen zeggen of personen of objecten zich in een bepaalde kamer bevinden. Waar precies binnen die kamer is minder van belang. Voor deze toepassingen is de RSSI informatie bruikbaar, omdat wanden de eigenschap hebben RF-signalen te verzwakken.

TOA

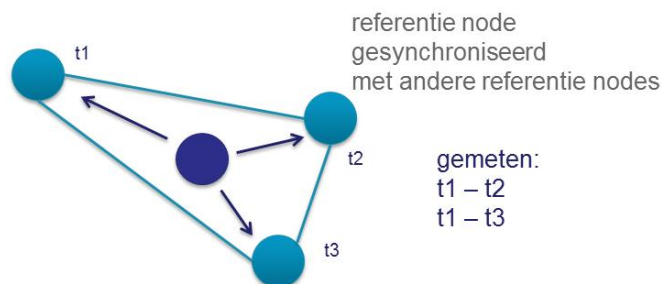
Bij de klassieke TOA (Figuur 9-3) meet men het verschil in tijd tussen zenden en ontvangen van een signaal. Een eerste nadeel van TOA is de hoge snelheid waarmee RF-golven propageren (ongeveer de lichtsnelheid). Een tijd van 1 ns komt overeen met een weglengteverschil van 30 cm. Om een nauwkeurige afstandsbeplating te bekomen, zullen dus klokken met een zeer fijne resolutie moeten gebruikt worden. Bovendien moeten de klokken van zender en ontvanger goed gesynchroniseerd zijn. Wanneer een zender dan de zendtijd doorstuurt, kan de ontvanger het tijdsverschil berekenen op basis van de ontvangsttijd.

Bij Two Way Ranging (TWR) lost men het synchronisatieprobleem tussen zender en ontvanger als volgt op: een node (1) stuurt een bericht naar de ontvanger (2) en de zender slaat de zendtijd (t_1) op. De node 2 stuurt bij ontvangst een antwoord naar node 1. Door de tijd in rekening te brengen, die nodig is om na ontvangst van een bericht een antwoord terug te sturen, kan node 1 dan de afstand tussen beide nodes bepalen. Het is dus belangrijk dat deze "antwoordtijd" nauwkeurig gekend en constant is. Synchronisatie tussen de nodes is niet meer nodig omdat alle tijdsmetingen in één en dezelfde node gebeuren.



Figuur 9-5 Two Way Ranging

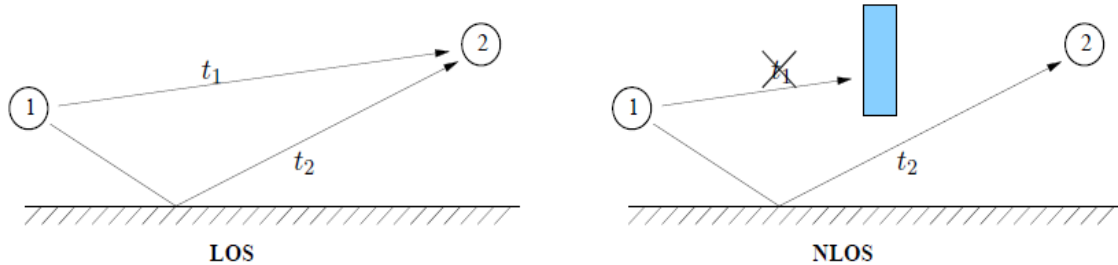
Bij Time Difference of Arrival (TDOA) gaat men iets anders te werk dan bij TOA. Eén node zal een bericht uitsturen. Verschillende referentie nodes ontvangen dit bericht. De TDOA is het verschil in aankomsttijd bij de ontvangende nodes. De zender en de ontvanger(s) moeten nu niet meer gesynchroniseerd zijn. Enkel de ontvangende nodes dienen nu nog gesynchroniseerd te zijn, deze kunnen bijvoorbeeld verbonden zijn met een bedraad netwerk.



Figuur 9-6 Principe van TDOA

Een volgende nadeel van T(D)OA is dat wanneer er geen Line-Of-Sight (LOS) component ontvangen wordt, de afstandsmeting foutief zal zijn (Figuur 9-7). Bij LOS zullen 2 versies van hetzelfde signaal in de ontvanger aankomen. De kleinste aankomsttijd (t_1) wordt genomen voor de afstandsbeplating. Deze komt immers overeen met het directe pad tussen zender en ontvanger. Vaak wordt indoor het rechtstreekse pad tussen zender en ontvanger geblokkeerd door allerlei obstakels (wanden, meubilair, ...).

Dit noemt men NLOS (Non Line-Of-Sight) communicatie. In het NLOS geval is er geen rechtstreekse component en wordt t_2 gebruikt. Dit zal een foutieve afstandsberkening als gevolg hebben.



Figuur 9-7 Probleem bij NLOS voor TOA

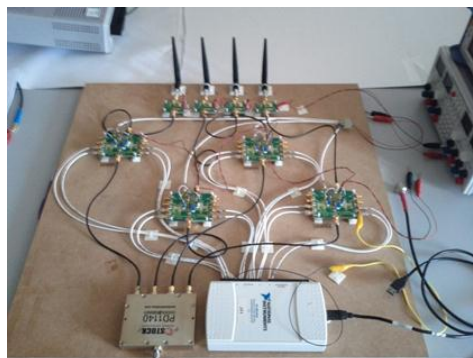
Een laatste nadeel is dat de hardware om nauwkeurig tijden te meten niet standaard aanwezig is bij draadloze technologieën (in tegenstelling tot de RSSI-hardware). Om goede tijdsmetingen te kunnen doen, zijn bovendien geschikte signaaltypes nodig (bijvoorbeeld signalen met scherpe flanken). Dit vraagt vaak heel wat bandbreedte. TOA is momenteel de techniek die gebruikt wordt in commerciële systemen met de grootste nauwkeurigheid.

De voor- en nadelen op een rijtje:

- + nauwkeurig (bij LOS)
- klokken met hoge resolutie nodig
- synchronisatie nodig (TOA)

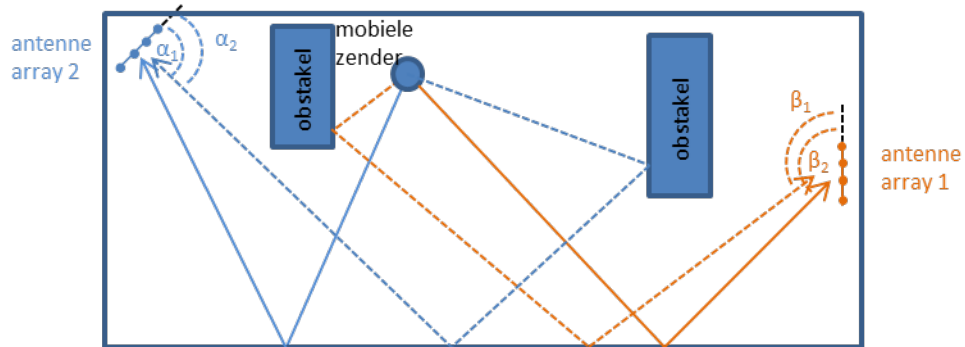
DOA

In de praktijk worden deze Direction of Arrival systemen nog weinig gebruikt voor indoor plaatsbepaling. De voornaamste reden is de technologische complexiteit. Om de richting van de RF-golven te kunnen bepalen zijn antenne-arrays nodig. Hierbij bestaat het antennesysteem niet uit één enkele antenne, maar uit een reeks van antennes die bijvoorbeeld op een rij geplaatst worden zoals op de foto in Figuur 9-8 (tweedimensionale plaatsbepaling) of in een vlak (driedimensionale plaatsbepaling). Daarnaast zijn er dan ook algoritmes nodig om de signalen van de verschillende antennes te verwerken.



Figuur 9-8 Antenne array voor DOA

Hoewel de technologie complex is, heeft ze een belangrijk voordeel: ze heeft de mogelijkheid om ook plaatsbepaling te doen in NLOS situaties. In Figuur 9-9 is te zien hoe twee antenne arrays verschillende reflecties ontvangen, er is maar 1 plaats waar alle stralen snijden nl. de positie van de mobiele node. Deze technologie houdt dus nog een belangrijk potentieel in voor de toekomst.



Figuur 9-9 NLOS plaatsbepaling met DOA

9.2. Draadloze vermogensoverdracht door inductieve koppeling

Meer dan honderd jaar geleden werd er op Long Island in de Verenigde Staten een 60 meter hoge toren gebouwd in opdracht van Nikolas Tesla. De bedoeling: het draadloos versturen van elektrisch vermogen over grote afstanden voor de energievoorziening van vliegtuigen en auto's. Het geduld van de sponsor raakte op en het project kende een roemloos einde. Sinds een aantal jaar is "de draad" opnieuw opgepikt.

De voorbije jaren werden al enkele toestellen op de markt gebracht om draadloos een smartphone op te laden. Het ging dan telkens om een oplaadmat die energie uitzendt en een sleeve voor de smartphone die de energie weer opvangt. Daarnaast werden intussen ook 3 consortia opgericht die elk tot doel hebben om een onafhankelijke standaard te creëren voor het draadloos opladen van mobiele toestellen. De "Qi"-standaard is de bekendste en verst gevorderde tot op heden, met 311 compatibele producten en 156 aangesloten leden in augustus 2013.

Eén van de voordelen van draadloze vermogensoverdracht is zonder meer de gebruiksvriendelijkheid. Het volstaat immers om een toestel op een laadvlak te plaatsen, in plaats van een adapter aan te sluiten. Eventueel kunnen zelfs meerdere toestellen tegelijkertijd op één laadvlak opgeladen worden. De voordelen reiken echter veel verder. Zo resulteert het ontbreken van connectoren in een grotere mechanische robuustheid (denk maar aan oxiderende contacten of afbrekende klepjes). Bovendien wordt het ook mogelijk met deze technologie om toestellen tegelijkertijd waterdicht en oplaadbaar te maken, wat een positieve invloed heeft op de levensduur van de toestellen en het milieu. Vooral op vlak van medische toepassingen opent dit deuren. Denk maar aan oplaadbare pacemakers en andere implantaten, of waterdichte hartslagmeters. Verder kan de technologie ook toegepast worden in omgevingen waar men geconfronteerd wordt met explosieve gassen. Een vonk, die bijvoorbeeld kan ontstaan bij het loskoppelen van een galvanische verbinding, zou hier rampzalige gevolgen kunnen hebben. Nog een sector die baat kan hebben bij de technologie is deze van het speelgoed. Vele toestellen hebben een batterij die omwille van veiligheidsredenen niet herladen mag worden door galvanisch contact.

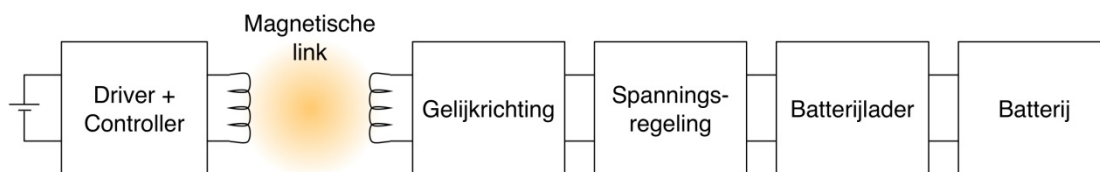
Het principe van draadloze vermogensoverdracht met inductieve koppeling steunt op de inductieve koppeling van twee resonante spoelen. Door een wisselstroom (typische grootteorde 100 kHz) door een primaire spoel te sturen, wordt een wisselend magnetisch veld opgewekt. Wanneer dit veld opgevangen wordt door een secundaire spoel, wordt hierover een secundaire spanning opgewekt. Het principe steunt dus op de gekende transformatorwerking. Het verschil is echter dat de koppeling van de spoelen hier veel slechter is, gezien de vrije uitlijning en het ontbreken van een ijzeren kern. Daarom wordt een secundaire resonantietank gecreëerd. Dit wil zeggen dat de secundaire spoel in serie of parallel met een condensator geplaatst wordt, waardoor de kring op een bepaalde frequentie zal resoneren. Hierdoor kan de vermogensoverdracht toch op een efficiënte manier kan verlopen.

Figuur 9-10 geeft een blokschema weer van een draadloze batterijlader. Links wordt de zender van vermogen weergegeven. Deze wordt met een DC spanning gevoed. Deze DC spanning wordt dan omgezet naar een wisselspanning voor de primaire spoel, met behulp van een driver. De driver bestaat uit één of meerdere schakelelementen (MOSFETS of transistors), die op de gepaste frequentie aangestuurd worden door een controller (vb. een microprocessor). De wisselspanning die men zo bekomt, wordt op de

primaire spoel aangesloten, zodat een magnetisch veld ontstaat.

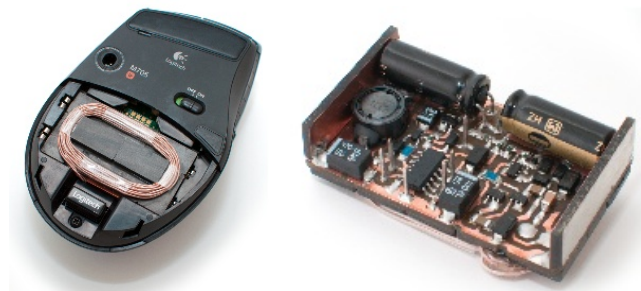
In figuur 1 wordt de ontvanger afgebeeld rechts van de magnetische link. Aangezien de secundaire spoel (en resonantiecondensator) een wisselspanning genereert door het opgevangen wisselend magnetisch veld, moet deze wisselspanning eerst gelijkgericht en afgevlakt worden, zodat een bruikbare DC spanning bekomen wordt. De waarde van deze DC spanning hangt af van de uitlijning van beide spoelen, en is bijgevolg onvoorspelbaar. Daarom is een spanningsregeling noodzakelijk om een stabiele werkspanning te creëren voor de IC's die gevoed zullen worden (batterijlader, microcontroller,...) Een laad-IC en batterij vervolledigen verder het circuit.

Uiteraard is de aanpak in de praktijk in veel gevallen complexer. Zo is het niet ongewoon om ook te communiceren over de magnetische link. De batterijlader kan op deze manier informatie over het benodigde vermogen of de batterijstatus doorsturen naar de vermogenzender. Wanneer de batterij volledig opgeladen is, kan de transmissie van vermogen dan gestopt worden.



Figuur 9-10 blokschema van een draadloze batterijlader

Een praktisch uitgewerkt voorbeeld van deze technologie wordt afgebeeld in Figuur 9-11. Hier is een draadloze muis te zien die uitgerust is met een ontvanger voor draadloos vermogen (a). De ontvangermodule (b) werd ontworpen ter grootte van 2 AA-batterijen, zodat ze ook in andere toestellen geplugd kan worden. Het resultaat is een muis die steeds werkt op een bureau of muismat met geïntegreerde vermogenzender.



Figuur 9-11 (a) Draadloos gevoede muis, (b) ontvanger ter grootte van 2 AA-batterijen

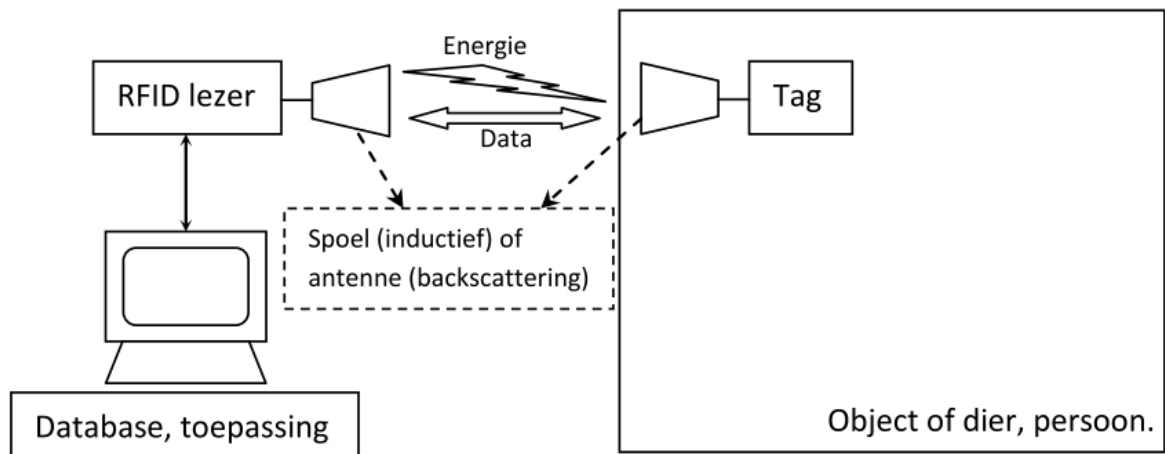
9.3 RFID

Gedurende de laatste jaren zijn automatische identificatie procedures zeer populair geworden binnen vele industriële takken. Daarbij denken we aan logistiek, het track en traceren van producten of zelfs afzonderlijke onderdelen daarvan, kwaliteitsbewaking van dieren en goederen,

Tot een tiental jaar geleden gebeurde dit vooral met behulp van de alomtegenwoordige en zeer goedkope barcode. Er zijn echter een aantal nadelen verbonden aan de barcode. In de eerste plaats is er de lage opslagcapaciteit, die weliswaar verhoogd is met de introductie van de 2D-barcode (beter gekend als de QR-code). Een ander gegeven is dat de tag steeds zichtbaar moet zijn in het visuele spectrum, er wordt namelijk licht gebruikt voor de uitlezing. Een ander struikelblok is het feit dat de barcode niet kan geheerprogrammeerd worden. Technisch gezien kan dit opgelost worden door de data op te slaan in een silicium chip. Dit is dan ook wat er gebeurt, namelijk bij het gebruik van de zogenaamde smart card (bijvoorbeeld uw bankkaart). Hier is het voornaamste nadeel dat er steeds fysisch contact moet zijn tussen de chip en de lezer. Vervuiling of slijtage vormen wel eens een obstakel voor het goed functioneren van deze smart cards.

Het ware mooi indien er een technologie was die geen last had van de nadelen van beide en het beste ervan combineerde, met als het kan nog een bonus erbij. Dat is wat gerealiseerd is met RFID. Zowel de energie als de overdracht van data gebeurt contactloos. Contactloze, automatische identificatiesystemen worden derhalve RFID genoemd. De bonus is dat de tag niet meer zichtbaar hoeft te zijn in het visueel spectrum. Er wordt gebruik gemaakt van RF golven, die een zekere indringdiepte hebben in biologisch weefsel, waardoor subcutane (=onderhuidse) inplanting mogelijk wordt.

In onderstaande figuur vindt u een overzicht van de verschillende componenten van een (passief) RFID systeem.



RFID is steeds voorzien van twee componenten:

- De transponder, die geplaatst is op het te identificeren object
- De lezer.

De lezer bevat typisch een RF module, een controle-element en een koppeling element naar de transponder toe. De transponder, die de eigenlijke data bevat, bestaat uit een koppeling element naar de lezer toe en een chip. Wanneer de transponder, die over het algemeen niet beschikt over een eigen energievoorziening, zich niet bevindt in de uitleeszone van een lezer, dan is deze volledig passief. Hij wordt enkel geactiveerd wanneer hij zich op voldoende kleine afstand van de lezer bevindt. Het vermogen om de chip te activeren wordt draadloos overgedragen vanuit

de lezer, net als de klok en mogelijke data. Als antwoord hierop broadcast de transponder continu zijn identificatie.

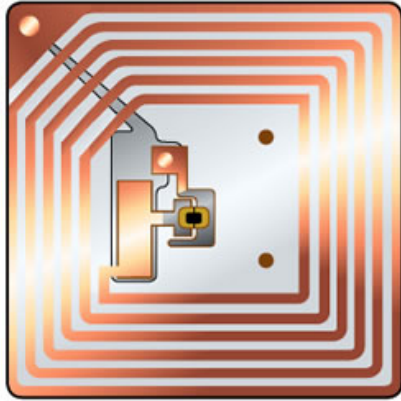
Het voornaamste onderscheid tussen verschillende RFID systemen is te maken op basis van de fysische aard van de draadloze koppeling tussen de lezer en de transponder. Als gevolg hiervan zijn de gekozen frequentie en uitleesafstand eveneens significant verschillend.

Voor kleine uitleesafstanden (orde centimeters tot maximaal één meter), wordt bijna uitsluitend beroep gedaan op het principe van magnetische koppeling. Het koppelingselement is dan een spoel en de werkingsfrequentie ligt eerder laag (tot typisch 30 MHz). Dit is de RFID die u typisch terugvindt bij bibliotheekboeken, toegangscontrole maar ook bij de identificatie van dieren. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van een oorlabel of een transponder die ingekapseld zit in een klein glazen buisje dat vervolgens onderhuids (subcutaan) wordt aangebracht. Ongeveer 90 % van de RFID systemen die hedendaags verkocht worden werken op basis van inductieve koppeling. Er bestaat ook een hele set van standaarden (ISO standaarden, die gekenmerkt worden door een nummer) die de technische parameters van de transponder en lezer beschrijven voor de verschillende toepassingen. De meest gebruikte frequenties bij inductief gekoppelde systemen zijn 135 kHz en 13,56 MHz.

RFID systemen met een bereik dat significant boven 1 m ligt noemt men lange-afstandssystemen. Hierbij wordt er gebruik gemaakt van elektromagnetische straling, de lezer en transponder hebben een antenne als koppelingselement. De frequenties van toepassing zijn 868 MHz in Europa (915 MHz in de VS) en 2.5 en 5.8 GHz. Typische uitleesafstanden tot een drietal meter zijn realiseerbaar, zelfs als de transponder niet over een eigen energievoorziening (batterij) beschikt. Deze systemen noemt men backscatter RFID.

Wat is nu het werkingsprincipe, m.a.w., hoe wordt data overgedragen? Als de transponder zich in het uitleesveld van de lezer bevindt, vloeit er een stroom door de antenne (lange-afstandssystemen) of de spoel (nabije-afstandssystemen). De grootte van die stroom is uiteraard functie van de weerstand die aanwezig is in het circuit. De chip die aanwezig is op de transponder is in staat deze weerstandswaarde te variëren, wat aldus ook een variatie in de stroom teweeg zal brengen. Het is deze variatie in stroom die via de spoel of antenne, kan worden waargenomen door de lezer! Door de belasting (=weerstand) van de elektrische kring op een unieke manier te wijzigen, zendt elke transponder een unieke identificatie uit. Een vergelijking is de volgende: Stel dat u zich 's nachts met een lichtbron op grote afstand van een spiegel bevindt. Als u schijnt naar de spiegel, zal afhankelijk van de stand van die spiegel, al dan niet een grotere hoeveelheid licht weerkaatst worden. Op een gelijkaardige manier werken RFID systemen, afhankelijk van de belastingsweerstand van de transponder wordt meer of minder energie teruggestuurd naar de lezer.

Hieronder ziet u een aantal afbeeldingen van RFID transponders (ook wel eens tags genoemd), bij verschillende toepassingen. Bemerkt trouwens dat de afmetingen van het koppelement dominant zijn voor de totale afmeting van de transponder. De chip zelf heeft typische afmetingen in de orde van mm's en kleiner.



Inductieve transponder



UHF transponder



Externe inductieve RFID tag



Interne inductieve RFID tag



Inductieve RFID tag op flexmateriaal voor de identificatie van boeken



Backscatter RFID tag voor de identificatie van bagage.

9.4 Referenties

- [1] "Alternative positioning technologies to generate over \$ 2.5 billion by 2015" (ABI-research)
- [2] Location-based services: fundamentals and operation, Axel Küpper, Wiley
- [3] RTLS for dummies, Ajay Malik, Wiley
- [4] Wireless Positioning – Technologies and Applications, Alan Bensky, Artech House
- [5] Introduction to Direction-of-Arrival Estimation, Zhizhang Chen, Gopal Gokeda, Yeqianf Yu, Artech House
- [6] "A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks", Yanying Gu, Anthony Lo, Ignas Niemegeers, IEEE Communications surveys&Tutorials Vol. 11, No. 1, 2009
- [7] RFID Handbook, Second Edition door Klaus Finkenzerler, ISBN 0-470-84402-7
- [8] Afbeelding van <http://rfidparadiseofparadises.wordpress.com/2009/10/23/week-1/>
- [9] Afbeelding van <http://www.ringfeart.net/eenvoudig-parkeren-met-rfid-tag/>
- [10] Afbeelding van http://www.wvagriculture.org/images/Animal_Health/WVfeederCattleMarketingPools.htm
- [11] Afbeelding van <http://www.michaeljournal.org/RFID.htm>
- [12] Afbeelding van <http://www.rfid-library.com/en/rfid-transponder.html>
- [13] Afbeelding van <http://www.airport-int.com/suppliers/airport-repairs-and-support.html>