

Doelpuntendetectie met behulp van radartechnologie

Vooronderzoek, ontwerp en prototype van een radarsysteem

TU Delft - Elektrotechniek

Marcos Meibergen | Harold van Zandbrink



maxradar
een onderdeel van
maxad

juni 2008,
TU Delft | EWI | Elektrotechniek

Begeleider: Dr. Ioan E. Lager

Basiseenheid: IRCTR (International Research Centre for Telecommunications-transmission and Radar)

Bachelor *Afstudeerproject*

Doelpuntendetectie met behulp van **radartechnologie**

Marcos Meibergen 1282469, Harold van Zandbrink 1279955

Voorwoord

Het bachelor afstudeerproject wordt doorgaans gezien als het hoogtepunt van de bachelor opleiding. Voor onze - uit zes personen bestaande - groep, was het werken aan dit project letterlijk een hoogtepunt; op de 23^e verdieping van het EWI-gebouw werkten wij gedurende zeven weken intensief met elkaar samen. Gezamenlijk hebben we het fictieve bedrijf genaamd 'Maxad' opgezet. Maxad ontwikkelt een systeem voor doelpuntendetectie bij voetbalwedstrijden.

Teneinde de problemen effectief op te kunnen lossen hebben we de groep opgedeeld in drie subgroepen, ieder bestaande uit twee personen. Zodoende vormt iedere subgroep als het ware een adviesbureau voor het bedrijf. De drie adviesbureaus met bijbehorende functies luiden als volgt:

- MaxRadar: verantwoordelijk voor het radarsysteem
- MaxSoft: verantwoordelijk voor de software van het radarsysteem
- MaxImage: verantwoordelijk voor het beeldverwerkingssysteem

In dit rapport staan de bevindingen van MaxRadar. De leden van MaxRadar zijn veel dank verschuldigd aan de medewerkers van IRCTR (International Research Centre for Telecommunications and Radar) voor hun waardevolle inbreng en dan met name de volgende personen:

- Dr. Ioan Lager (TU Delft), voor de creatie van dit project, zijn begeleiding, adviezen en het regelen van een uitstekende werkplek;
- Prof. dr. Piet van Genderen, voor beschikbaar maken van de radar voor het prototype en voor zijn adviezen op het gebied van radar;
- Dr. Massimiliano Simeoni, voor zijn adviezen op het gebied van microstrip patch-antennes;
- Ir. Pascal Aubry en Ir. Jordi Figueras i Ventura, voor hun adviezen;
- Drs. Josje Kuenen, voor het doorlezen en verbeteren van dit rapport;
- Wilfred Boelhouwer, voor het verwijderen van talloze spelfouten.

Inhoudsopgave

Voorwoord	I
Samenvatting	V
1 Inleiding	1
 <i>Deel I: Vooronderzoek</i>	
2 Programma van eisen	4
3 Radaropstelling	6
3.1 Eisen aan de radaropstelling	6
3.1.1 Eisen vanuit het beoogde gebruik	6
3.1.2 Eisen die volgen uit de beperkingen in de omgeving	7
3.2 Analyse van verschillende radaropstellingen	8
3.2.1 Opstelling met één radar	8
3.2.2 Opstelling met twee radars	10
3.2.3 Opstelling met drie radars	12
3.2.4 Opstelling met meerdere radars parallel	13
3.2.5 Opstelling met scannende radar	14
3.3 Conclusie	15
4 Radars	16
4.1 De te kiezen typen radars	16
4.1.1 Pulsradar	16
4.1.2 Doppler radar	19
4.1.3 (FM)CW radar	21
4.2 Conclusie	23
5 Antennes	24
5.1 De te kiezen typen antennes	24
5.1.1 Paraboolantenne	25
5.1.2 Dipoolantenne	25
5.1.3 Monopoolantenne	26
5.1.4 Microstrip patch-antenne	27
5.2 Gebruik van een phased array	27
5.3 Conclusie	28
6 Baldetectie	29
6.1 Geometrie	29
6.2 Reflectieverhogende materialen	31
6.3 RFID	31
6.4 Polarisatie	32

Deel II: Antenne-ontwerp

7	Ontwerp van een microstrip patch-antenne	35
7.1	Eisen aan de antenne	36
7.1.1	Radiatiepatroon	36
7.1.2	Werkfrequentie en bandbreedte	37
7.1.3	Maximale vermogensoverdracht.....	39
7.1.4	Afmetingen en vermogen.....	41
7.2	Analyse	41
7.2.1	Stralingsmechanisme van een patch-antenne.....	42
7.2.2	Analyse afmetingen patch-antenne	44
7.2.3	Voedingsmethodes	46
7.3	Synthese	48
7.3.1	Substraat	48
7.3.2	Afmetingen patch.....	48
7.3.3	Voedingsmethode.....	49
7.4	Simulatie	50
7.4.1	Softwarepakketten	50
7.4.2	Simulatieresultaten	50
7.4.3	Evaluatie	51
7.5	Prototype.....	51

Deel III: Het prototype

8	Het prototype	53
8.1	Het gebruikte prototype	53
8.1.1	De radar.....	53
8.1.2	De antenne	53
8.1.3	De bal	54
8.2	Verschillen tussen het prototype en het ontworpen systeem	55
8.2.1	Mogelijkheden prototype.....	55
8.2.2	Beperkingen prototype.....	55
8.3	Conclusie	55
9	Conclusies en aanbevelingen	56
9.1	Conclusies.....	56
9.2	Aanbevelingen	57
9.2.1	Verder onderzoek aan het systeem.....	57
9.2.2	Nieuwe ideeën	57

Bibliografie.....	58
--------------------------	-----------

Figuren Index.....	61
---------------------------	-----------

Bijlage I: Specificaties FMCW radar prototype.....	63
---	-----------

Samenvatting

Maxad is een onlangs opgericht bedrijf dat begin 2009 op de markt zal komen met een systeem dat de reclameopbrengsten bij voetbalwedstrijden aanzienlijk zal verhogen. Het systeem is in staat om accuraat en snel doelpunten te detecteren. Bij de detectie van een doelpunt, worden alle elektronische reclameborden op elkaar afgestemd. Het op dat moment vertoonde item geniet dan exclusief alle aandacht. Derhalve wordt voor adverteerders een meerwaarde gecreëerd, met alle voordelen van dien.

Het systeem combineert radartechnologie met beeldverwerking. De radars worden gebruikt om de positie van de bal te bepalen. Zodra de bal zich dicht bij het doel bevindt, zal een signaal worden afgegeven aan het beeldverwerkingsysteem. Dit systeem zal bepalen of de bal de doellijn is gepasseerd.

Maxad heeft onder andere het adviesbureau MaxRadar in het leven geroepen, dat als specialist in radartechnologie het radarsysteem zal ontwerpen. Overige adviesbureaus aangesteld door Maxad zijn MaxSoft en MaxImage, verantwoordelijk voor respectievelijk de software van het radarsysteem en het beeldverwerkingsysteem.

In dit rapport zijn de verrichtingen weergegeven van MaxRadar. Er wordt beschreven hoe het ontwerp van de radaropstelling tot stand is gekomen. Tevens zijn de overwegingen weergegeven voor de bepalende onderdelen van een dergelijke opstelling. Het ontwerp van de verschillende onderdelen neemt veel tijd in beslag. Gezien de korte looptijd van het project, is de keuze gemaakt het ontwerpproces van één onderdeel specifiek uit te werken: de microstrip patch-antenne. In dit rapport wordt kort gekeken naar de verschillende methodes die beschikbaar zijn om de bal beter zichtbaar te maken voor de radar. Vervolgens wordt de evaluatie van het gebouwde prototype behandeld. Tot slot wordt een conclusie getrokken over het eindontwerp en er worden aanbevelingen gegeven voor verder onderzoek naar doelpuntendetectiesystemen met radartechnologie.

Verschillende radaropstellingen zijn bedacht en geëvalueerd aan de hand van het programma van eisen. Uit de bestudering van de verscheidene opstellingen, is bepaald dat per doel drie radars nodig zijn, hetgeen het totaal aantal radars per stadion op zes brengt. Het hoge aantal radars brengt de nodige nadelen met zich mee, wat zich uit in hogere kosten. Deze opstelling kan echter het foutloos functioneren van het systeem garanderen.

Er bestaan vele soorten radars. Gekozen is voor de frequency modulated continuous wave (FMCW) radar. FMCW wordt hedendaags veel gebruikt en leent zich uitstekend voor afstandsbeoordeling met hoge resolutie. Bovendien is de productie van FMCW relatief goedkoop, omdat het ook volop wordt gebruikt in de auto-industrie.

Ook voor de antenne zijn verschillende alternatieven beschikbaar. Deze antennes zijn beoordeeld aan de hand van een aantal specifieke eisen. De conclusie luidt dat microstrip patch-antennes het meest bruikbaar zijn. Deze antenne heeft de vereiste brede bundel. Bovendien zijn patch-antennes goedkoop, robuust en onderhoudsarm.

Er zijn een aantal mogelijkheden om de bal beter zichtbaar te maken voor de radar. Een eerste mogelijkheid is om de bal inwendig te bekleden met reflectieverhogende materialen, zoals een laag aluminiumfolie. Uit metingen is gebleken dat deze methode de reflecties van de bal aanzienlijk vergroot. Door het materiaal een bepaald profiel te geven, kan de reflectiviteit nog verder worden verhoogd. Ook kan gebruik worden gemaakt van een verborgen eigenschap van golven, te weten de polarisatie. Tevens bestaat de optie om RFID technologie toe te passen.

Het ontwerpproces van een microstrip patch-antenne bestaat uit verschillende stappen. De verschillende stappen van het proces worden doorlopen en de aanpak ervan wordt beschreven.

Aanbevolen wordt om nader onderzoek te verrichten wat betreft de mogelijkheden op betere baldetectie. Voorts is het noodzakelijk om de ontworpen microstrip patch-antenne aan uitvoerige simulaties en proeven te onderwerpen, om onder anderen het stralingspatroon gedetailleerd in beeld te krijgen. In een latere stage moet het volledige systeem in een stadion worden gemonteerd en uitgebreid onder diverse omstandigheden worden getest alvorens het product op de markt te brengen.

1 Inleiding

Maxad is een onlangs opgericht bedrijf dat begin 2009 met zijn producten op de markt zal verschijnen. Maxad ontwikkelt een systeem waarmee snel en accuraat kan worden vastgesteld wanneer een doelpunt is gemaakt tijdens een voetbalwedstrijd.

Al gedurende lange tijd proberen bedrijven en instellingen een dergelijk systeem te realiseren. Voetbal is immers wereldwijd een zeer populaire sport, waar dagelijks miljoenen mensen van genieten. Het spel draait om de doelpunten. Het moment waarop de voetbal de doellijn passeert is erg waardevol: alle ogen zijn dan op het veld gericht. Hier wil Maxad slim op inspelen. Waar instanties in het verleden systemen ontwikkelden om de arbiter te assisteren bij het al dan niet toekennen van een doelpunt, werkt Maxad vanuit een commercieel oogpunt.

Het idee werkt als volgt. Op het moment dat een doelpunt wordt gescoord, wordt een signaal uitgestuurd naar de elektronische borden rond het veld; alle borden worden dan op elkaar afgestemd om één bepaalde adverteerder te vertonen. Een grafische voorstelling hiervan is gegeven in figuur 1.1.

De intentie van Maxad is om de adverteerders rondom het veld een nieuwe vorm van adverteren aan te bieden. De adverteerder die op het moment van het doelpunt zijn product op de borden vertoont, zal dan diverse voordelen genieten: omdat alle belangstelling op het veld is gericht zal zijn merk zonder twijfel onder de aandacht van het publiek vallen. Bovendien zal het product worden geassocieerd met succes. Een ander voordeel is dat de doelpunten altijd worden vertoond in de samenvattingen op televisie en daarmee dus ook de reclame rondom het veld. Veel mensen bekijken deze samenvattingen, wat betekent dat de adverteerder meer zendtijd krijgt.

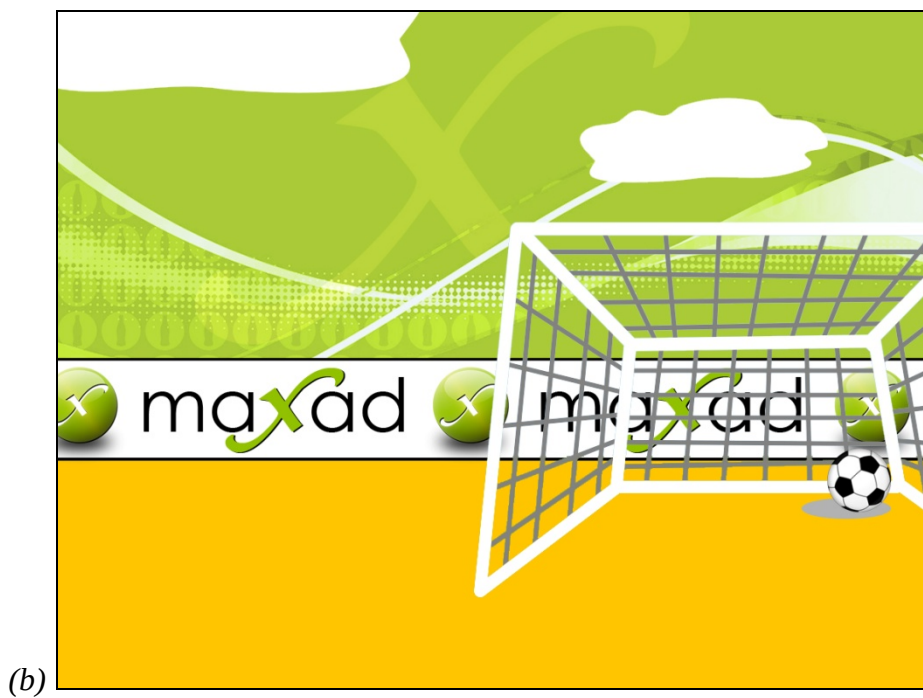
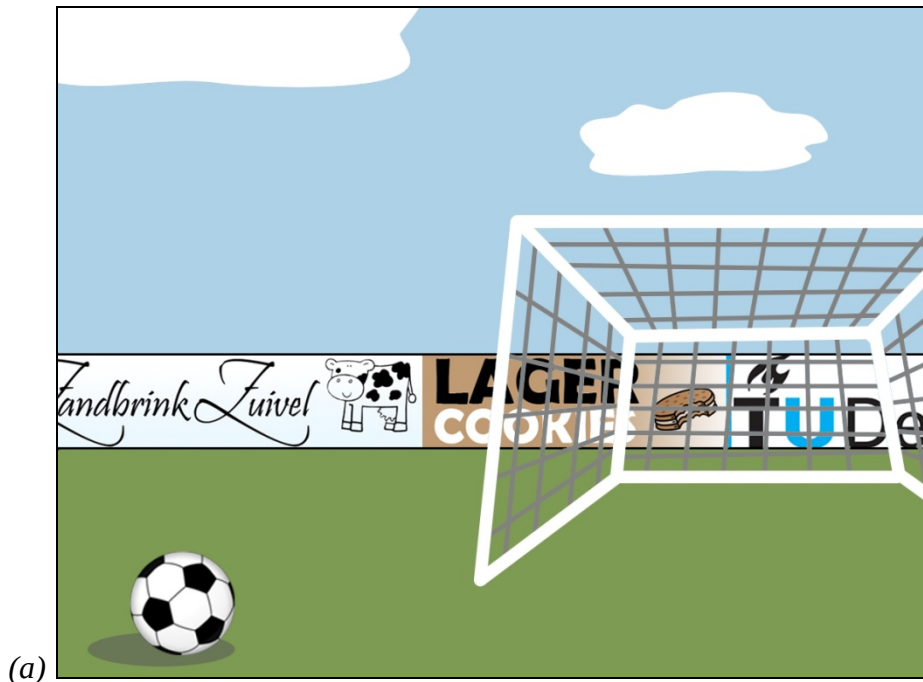
In dit rapport worden verschillende technieken besproken om een radarinstallatie te realiseren. Het radarsysteem bestaat uit hard- en software. De hoofdvraag voor het hardware gedeelte luidt: 'hoe kunnen we met behulp van radartechnologie bepalen wanneer de bal zich in de buurt van het doel bevindt?'.

Om de kosten van het systeem te beperken is uitsluitend gekeken naar bestaande technieken om gebruik te kunnen maken van kant-en-klare bouwstenen voor het systeem.

Voorts wordt het ontwerp van een zogeheten microstrip patch-antenne voorgesteld. Hiervoor is niet alleen gebruik gemaakt van de zeer omvangrijke literatuur op dit gebied, maar is tevens aanspraak gemaakt op de aanwezige expertise op de IRCTR afdeling van de TU Delft.

Het principe van het systeem wordt bewezen met het prototype. Ten slotte worden aanbevelingen gegeven met betrekking tot verdere ontwikkelingen van het systeem.

Verscheidene deelproblemen kunnen uit de hoofdvraag worden afgeleid. In verschillende hoofdstukken worden de deelproblemen behandeld. De opbouw is als volgt. In Hoofdstuk 2 worden de eisen en beperkingen aan het systeem beschreven. Hoofdstuk 3 beschrijft verschillende mogelijke opstellingen van de radars. Er bestaan vele typen radars en antennes. In de hoofdstukken 4 en 5 volgt een korte beschrijving van een aantal respectievelijk radars en antennes die in aanmerking komen voor het product, met de daarbij behorende voor- en nadelen. Hieruit wordt geconcludeerd welk type radar en welke antenne zullen worden benut. In hoofdstuk 6 is te lezen hoe de bal beter zichtbaar kan worden gemaakt door een aantal slimme technieken toe te passen. Het theoretische ontwerp van een zogenoemde microstrip patch-antenne wordt behandeld in hoofdstuk 7. Gezien de korte looptijd van het project wordt in dit rapport alleen het ontwerp van een antenne behandeld. In hoofdstuk 8 wordt het gebruikte prototype besproken. Dit prototype maakt duidelijk dat het concept in de realiteit werkzaam is. Tot slot bevat hoofdstuk 9 de afsluiting met de conclusies en aanbevelingen betreffende het complete radarsysteem.



Figuur 1.1 Grafische voorstelling van het principe van Maxad: de bal ligt buiten het doel, (b) bal ligt in het doel

Deel I:

Vooronderzoek

2 Programma van eisen

MaxRadar heeft als opdracht een radarhardwaresysteem te ontwerpen, opdat het voor MaxSoft mogelijk wordt om (softwarematig) te bepalen of een voetbal het doel nadert. Dit klinkt wellicht eenvoudig, het tegendeel is het geval. Het systeem moet aan tal van eisen voldoen. Deze eisen volgen vanuit verschillende oogpunten. Er moet niet alleen gekeken worden naar de technische eigenschappen van het eindproduct, maar er moet ook rekening worden gehouden met de omgeving waarin het systeem geplaatst wordt, het productie- en liquidatieproces en marketingtechnische aspecten. In dit hoofdstuk worden al deze eisen behandeld en overzichtelijk gerangschikt.

Eisen vanuit MaxSoft

- Het radarsysteem dient voldoende ver te kunnen 'zien' (in zowel horizontale als verticale richting), opdat er voor MaxSoft voldoende tijd is om te bepalen of de bal het doel nadert. Het bereik van de radar is vastgesteld op 25 meter.
- De bal dient voldoende zichtbaar gemaakt te worden voor de radar, opdat deze softwarematig te onderscheiden is van andere objecten.
- De radaropstelling dient zo te worden ontworpen dat de bal niet voortdurend afgeschermd wordt door spelers.
- De output van de radar dient verenigbaar te zijn met het verwerkingssysteem. Het gemixte beatsignaal uit de radar dient hiertoe binnen het frequentiebereik van 0 tot 22 kHz te vallen¹.

Eisen vanuit het stadion

- Het radarsysteem dient zo min mogelijk zichtbaar te zijn in het stadion. Grote antennes of dikke kabels achter de doelen zijn ongewenst.
- De onderdelen van het systeem mogen het spel niet verstoren en de spelers niet belemmeren.
- De onderdelen van het radarsysteem moeten robuust zijn. Als er een bal hard tegenaan komt, mag dit geen invloed hebben op de werking van het systeem. Tevens moet het systeem bestand zijn tegen alle gangbare weersomstandigheden.
- Het radarsysteem moet gemakkelijk verwijderd kunnen worden. Bij verwijdering van het systeem mogen er geen sporen van het systeem achterblijven.
- Het radarsysteem mag andere systemen in en rond het stadion niet verstoren.

Eisen vanuit commerciële motieven

- De prijs van het systeem moet binnen de perken blijven.
- Het systeem moet snel leverbaar zijn. Derhalve moet gezorgd worden voor een snellopend productieproces.
- Het systeem moet onderhoudsarm zijn.
- Voor zover het systeem op zal vallen in het stadion, moet er geprobeerd worden dit aantrekkelijk te laten zijn voor de klant.

¹ Voor meer informatie over het verwerkingssysteem, zie van de Bovenkamp & Steenwijk (2008)

Eisen vanuit regelgeving

- De spelers mogen niet blootgesteld worden aan een vermogensdichtheid van meer dan 50 Wm^{-2} .¹
- Het systeem dient in staat te zijn een CE-certificering te ontvangen.²
- Het systeem dient toestemming te hebben om in het frequentiegebied in kwestie te opereren.³

Eisen vanuit de ontwikkelingskosten

- Het systeem moet zoveel mogelijk bestaan uit bestaande onderdelen en concepten. Het ontwerp en ontwikkeling van volledig nieuwe systemen brengt hoge kosten met zich mee.
- Indien er onderdelen ontworpen dienen te worden, dan zal daarbij gezocht moeten worden naar de goedkoopste alternatieven.

¹ Dit is volgens de richtlijnen van het ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Het document met de richtlijnen is te vinden op: www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf.

² CE-markering is een merkteken dat op een groot aantal industriële producten moet worden aangebracht. Met het teken geeft de fabrikant of de importeur (bij invoer van buiten de Europese Unie) aan dat het product voldoet aan de essentiële vereisten op het gebied van veiligheid, gezondheid en milieu van de betreffende richtlijn(en).

³ De gezaghebber op het gebied van het spectrumbeheer in Nederland is het Agentschap Telecom. Het Agentschap Telecom is verantwoordelijk voor het toekennen van de noodzakelijke vergunningen. Uitgebreide documentatie is te vinden op: <http://www.agentschap-telecom.nl>.

3 Radaropstelling

De radaropstelling is een essentieel onderdeel van het doelpuntendetectiesysteem: zonder een goede opstelling is het voor de software van MaxSoft onmogelijk om te bepalen of de bal het doel nadert. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe de opstelling van de radar(s) is bepaald. Uiteindelijk zal het systeem bestaan uit twee opstellingen, één voor elk doel. Deze beide systemen zullen equivalent zijn aan elkaar en daarom zal er verder in dit hoofdstuk gesproken worden over één enkele radaropstelling.

De opbouw van het hoofdstuk is als volgt. In paragraaf 3.1 is er een overzicht van de eisen die aan een radaropstelling voor doelpuntendetectie worden gesteld. In paragraaf 3.2 is een beschrijving gegeven van verschillende opstellingen, met daarbij een afweging van de voor- en nadelen van de betreffende opstelling. In paragraaf 3.3 wordt ten slotte beschreven wat de definitieve radaropstelling zal zijn.

3.1 Eisen aan de radaropstelling

De eisen voor de radaropstelling volgen vanuit twee oogpunten. Ten eerste zijn er de eisen die volgen uit het beoogde gebruik. De opstelling moet voldoende informatie verschaffen voor de software van MaxSoft om te kunnen bepalen of de bal het doel nadert. Daarnaast zijn er nog eisen die volgen uit de omgevingsaspecten. De radars kunnen niet willekeurig geplaatst worden in het stadion. De mogelijke posities waar radars geplaatst kunnen worden zijn beperkt.

3.1.1 Eisen vanuit het beoogde gebruik

Het is belangrijk dat er voldoende informatie verschaft wordt aan de software. Daarbij zijn twee eisen van belang:

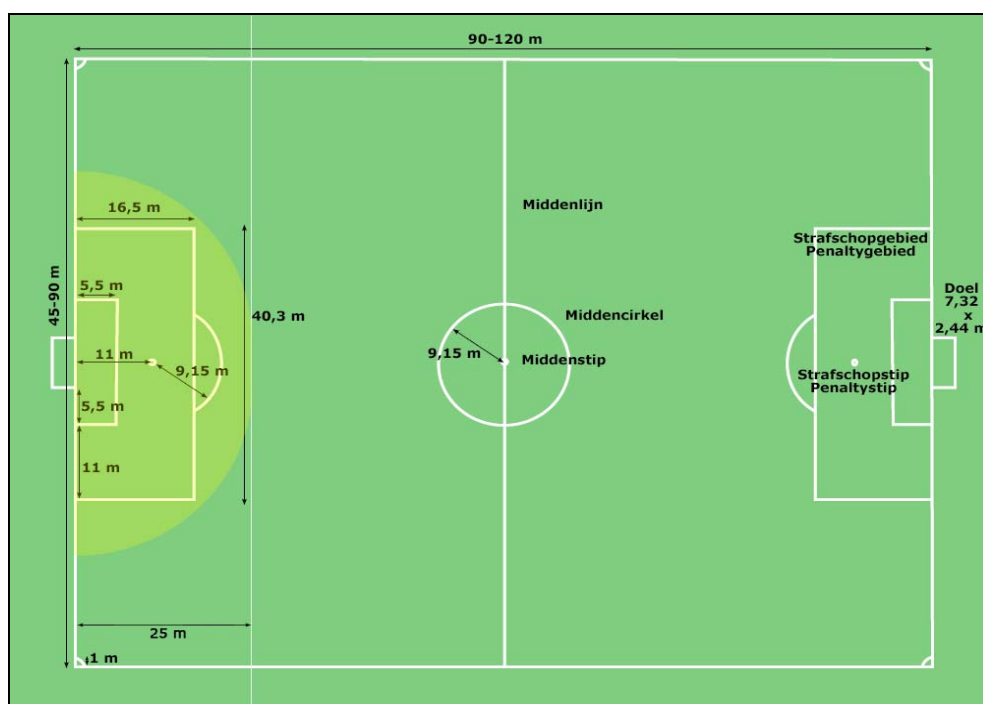
- De bal dient tijdig zichtbaar te zijn. Als er te weinig tijd zit tussen de eerste keer dat de bal zichtbaar is op de radar en het moment dat de bal in het doel ligt, dan zal het voor MaxSoft onmogelijk zijn de bal te herkennen. De software voor herkenning van de bal maakt namelijk gebruik van meerdere radaropnames¹.
- De bal dient zoveel mogelijk continu zichtbaar voor de radar. De software maakt gebruik van een zogeheten 'trackingalgoritme'. Dit is een algoritme die het mogelijk maakt de bal te volgen. Het is lastig om de bal te volgen, als hij te vaak wegvalt op de radar.

Om er zeker van te zijn dat de bal vroeg genoeg zichtbaar is voor de radar, dient de radaropstelling een voldoende groot bereik te hebben. Met het bereik wordt het gebied binnen het veld bedoeld, waarbinnen de bal zichtbaar is voor de radar. Dit bereik wordt bepaald door de snelheid waarmee radaropnames verwerkt worden door de software, het aantal opnames dat nodig is om een bal te herkennen en de maximale snelheid van de bal.

De software van MaxSoft heeft vijf samples nodig om te bepalen of een object een bal is. Tevens heeft MaxSoft te kennen gegeven dat de software bij benadering 150 opnames per seconde kan verwerken en dat de snelheid van de bal maximaal 30 m/s bedraagt [20]. Uitgaande van deze gegevens, kan berekend worden dat er per meter vijf opnames genomen worden. Met een bereik van 25 meter zijn er dus minimaal 125 opnames waarin de bal zichtbaar is. De theoretische vijf samples die MaxSoft nodig heeft om de bal te

¹ Voor meer informatie over de software, zie van de Bovenkamp & Steenwijk (2008)

detecteren, zullen in de praktijk hoger liggen. Dit is te wijten aan het feit dat de bal niet op alle opnames zichtbaar zal zijn; constant bevinden zich spelers tussen de bal en de radar. De 125 opnames zijn dus geen overbodige luxe. Dit moet voor de software ruim voldoende zijn om te bepalen of de bal het doel nadert. Daarom moet vanaf de gehele doellijn, de radar minstens 25 meter ver reiken. In figuur 3.1 is een weergave te zien van het bereik waaraan de opstelling moet voldoen.



Figuur 3.1 Vereiste bereik van de radar: het bereik van 25 meter die de radaropstelling moet belichten is geel gemarkeerd

Om de bal continu zichtbaar te houden voor de radar is het belangrijk dat er zo min mogelijk obstakels tussen de radar en de bal staan. Deze obstakels kunnen de vaste elementen op en rond het veld zijn, zoals het doel. Maar deze obstakels zullen vaker de spelers zijn die zich voortdurend in de nabijheid van de bal bevinden. Als er zich een obstakel tussen de bal en de radar bevindt, dan zal de bal volledig wegvallen voor deze radar. De elektromagnetische golven zullen geabsorbeerd en gereflecteerd worden door het obstakel, waardoor er geen golven bij de bal zullen komen. De bal zal dus geen golven reflecteren.

De mate waarin de bal afgeschermd wordt door obstakels is afhankelijk van de opstelling die gebruikt wordt. Daarom zal er voor elke opstelling bepaald moeten worden of de kans op afscherming van de bal aanvaardbaar is.

3.1.2 Eisen die volgen uit de beperkingen in de omgeving

De omgeving waarin het systeem zal functioneren brengt bepaalde beperkingen met zich mee. De radars kunnen niet willekeurig geplaatst worden binnen een stadion. Het spreekt voor zich dat de radars zich niet op het speelveld mogen bevinden. Maar ook buiten het speelveld is de ruimte zeer beperkt. Al op korte afstand van de achter- en zijlijnen zijn de reclameborden opgesteld. Er is voor de verschillende opstellingen de aanname gemaakt dat de radars zich op maximaal vier meter afstand van de lijnen mogen bevinden. Dit is een schatting gemaakt uit de analyse van verscheidene foto's van internationale stadions.

3.2 Analyse van verschillende radaropstellingen

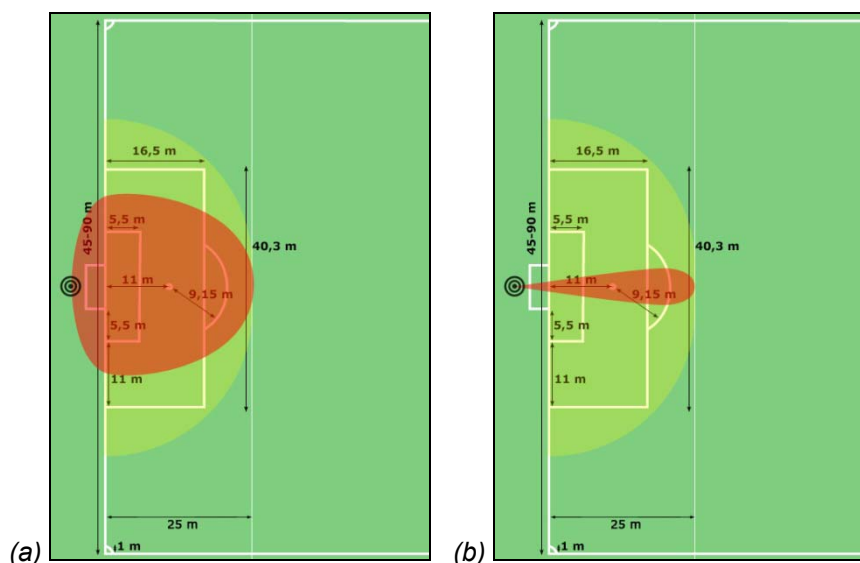
Nadat de randvoorwaarden aan het systeem zijn gesteld, zijn er verschillende radaropstellingen bedacht. Vervolgens is voor de verschillende opties een analyse gemaakt op basis van de volgende criteria:

- Het aantal benodigde radars. Een groter aantal radars zorgt ook voor meer complexiteit in de software voor interpretatie van de reflecties. Bovendien zorgt een groter aantal radars ook voor hogere kosten. Niet alleen zullen er meer radarsystemen moeten worden aangeschaft, ook zullen de kosten oplopen voor de hardware die gebruikt wordt door MaxSoft.
- De mate waarin het - in de vorige paragraaf bepaalde - bereik gedekt wordt door de opstelling. Het zal moeilijk zijn om het volledige bereik te dekken, maar eventuele 'gaten' in het bereik, mogen niet leiden tot fouten in de detectie.
- De kans op afscherming van de bal moet beperkt blijven tot een minimum.

Er zal bij de verschillende opstellingen gebruik worden gemaakt van verschillende radiatiepatronen. De vorm van de bundels is afhankelijk van de gebruikte antenne. In hoofdstuk 5 is beschreven hoe de verschillende bundels gerelateerd zijn aan de verschillende antennes.

3.2.1 Opstelling met één radar

De meest eenvoudige opstelling is degene waar slechts gebruik gemaakt wordt van één enkele radar. Dit is de opstelling met het minimaal aantal radars die voor het systeem noodzakelijk zijn. Naast het feit dat de kosten voor de radars worden beperkt, kost een dergelijke opstelling ook weinig rekenkracht hetgeen ook besparingen met zich meebrengt. Om een inzicht te geven in een opstelling met één radar zijn in figuur 3.2 twee opstellingen weergegeven. In figuur 3.2a is een opstelling te zien waarin gebruik wordt gemaakt van een zeer brede bundel. In figuur 3.2b is een opstelling weergegeven waarin gebruik wordt gemaakt van een smalle bundel.



Figuur 3.2 Opstellingen met één radar:
(a) radar met brede bundel, (b) radar met smalle bundel

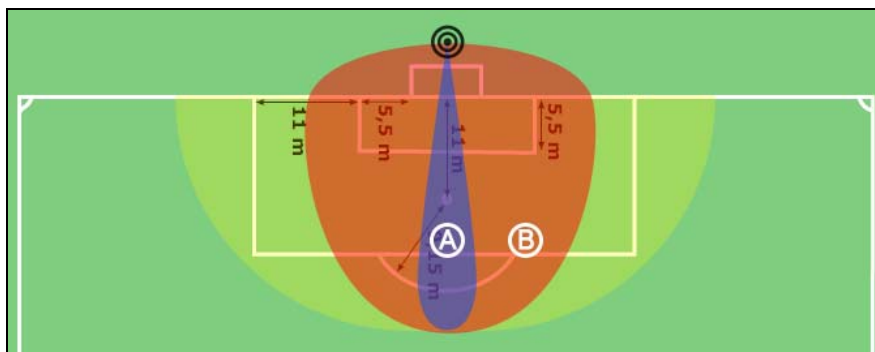
In figuur 3.2b is te zien dat een smalle bundel maar een heel klein gebied afdekt van het gewenste bereik, terwijl in figuur 3.2a te zien is dat een radar met een brede bundel al een groot deel van het gewenste gebied afdekt. Het is duidelijk dat een smalle bundel dus niet gebruikt kan worden in een dergelijke opstelling waarin de bundel statisch is; alleen een bal die recht van voren komt, kan gedetecteerd worden. In paragraaf 3.2.5 wordt de mogelijkheid behandeld waarin de bundel beweegt. Hier is een smalle bundel wel bruikbaar.

Een brede bundel biedt meer mogelijkheden en daarom wordt bij verdere analyse van opstellingen met één radar alleen nog gekeken naar een brede bundel. Overigens wordt vooralsnog de veronderstelling gemaakt dat het verticale stralingspatroon nagenoeg gelijk is aan het horizontale stralingspatroon.

Omdat een brede bundel een groter gebied belicht, heeft deze meer vermogen nodig dan een smalle bundel. In figuur 3.3 zijn de punten A en B gemarkeerd. Voor de smalle bundel is de vermogensdichtheid in B veel kleiner dan in A. Voor de brede bundel zijn de vermogensdichtheden in A en B nagenoeg gelijk aan elkaar. Het gebruik van een bredere bundel wil zeggen dat meer spelers worden blootgesteld aan de straling. De doelman wordt vrijwel de gehele wedstrijd bestraald. Het spreekt voor zich dat de straling op geen enkele wijze schadelijk mag zijn voor de gezondheid van de omstanders.

Hoewel het bereik naar voren voldoende is met een brede bundel, ontstaat er aan de zijkanten een groot gebied waar geen dekking is. Vooral bij hoekschoppen kan dit problemen opleveren, gezien de bal dan met grote snelheid aankomt langs de achterlijn. De tijd die de software heeft is mogelijkwerwijs te kort om de bal te herkennen.

De kans op afscherming bij het gebruik van een enkele radar is tamelijk groot. Het is vrij aannemelijk dat spelers met grote regelmaat tussen de bal en de radar staan. De radar staat precies achter het doel opgesteld en de verdedigers zullen immers proberen de weg van de bal naar het doel te blokkeren. Tevens zal ook de keeper constant het zicht van de radar belemmeren.



Figuur 3.3 **Vergelijking van vermogensdichtheden tussen bundelbreedtes**

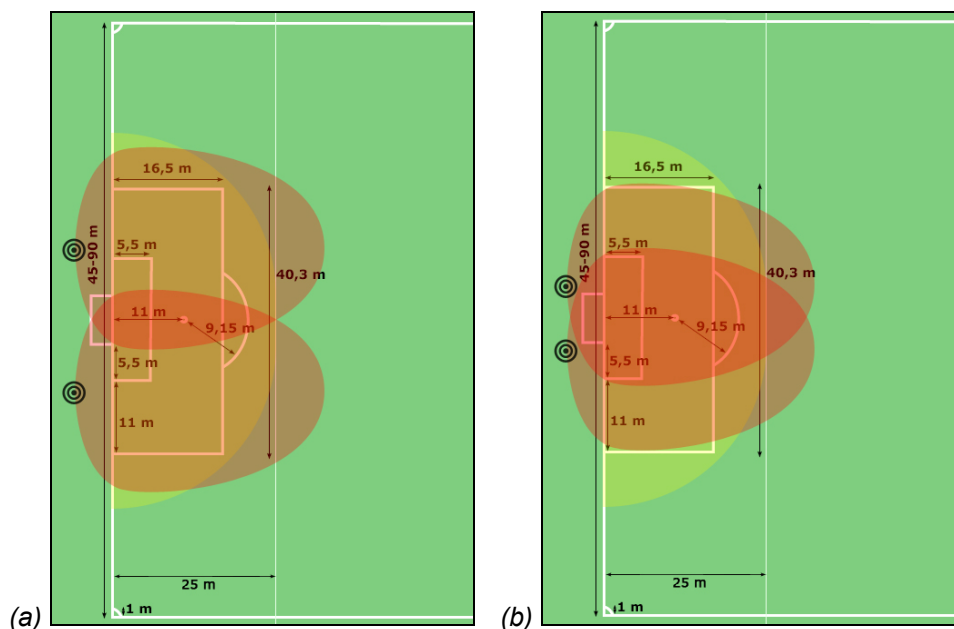
3.2.2 Opstelling met twee radars

Een opstelling met twee radars kan het gebied dat door de radar wordt bereikt voor een groot deel uitbreiden. Er moet een extra radar per doel worden aangeschaft, hetgeen extra kosten met zich meebrengt. Ook de benodigde rekenkracht zal toenemen, omdat er meer dan twee keer zoveel berekeningen uitgevoerd moeten worden; niet alleen wordt twee keer zoveel informatie verwerkt, tevens moeten de gegevens van beide radars worden gecombineerd tot één geheel.

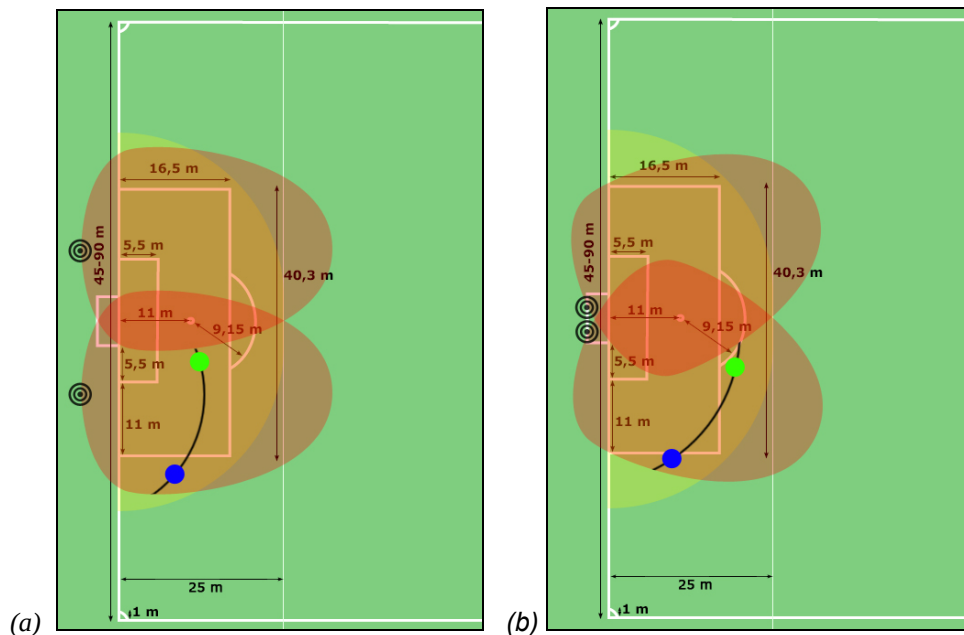
Figuur 3.4 geeft het bereik van twee radars weer. Er is besloten om de radars zodanig te plaatsen dat het snijpunt van de bundels precies in het midden van het doel ligt. Het gebied tussen de doelpalen wordt door beide radars belicht. Als de radars dicht naast elkaar liggen (zie figuur 3.4b) wordt deze overlap groter, maar het totale bereik kleiner. Als de radars te ver uit elkaar komen te staan, zal een deel net voor de doellijn ongedekt blijven. In figuur 3.4 is tevens te zien dat het gebied dat niet belicht wordt drastisch is afgenomen ten opzichte van de opstelling met één radar.

Een nadeel van deze opstelling is dat de positiebepaling niet optimaal is. Een bal die zich op een bepaalde afstand van een van de radars bevindt en buiten het bereik van de andere radar, kan dicht bij het doel zijn, maar ook helemaal aan de buitenkant. Dit is te zien in figuur 3.5a. De groene en de blauwe bal hebben dezelfde afstand tot de radar. De radar kan dus niet weten, of de bal al dan niet dichtbij het doel is. Als de bal zich in het overlappinggebied bevindt, is dit probleem verholpen; de informatie van beide radars kan worden gecombineerd en de positie van de bal kan worden bepaald. Een groot overlappinggebied dichtbij het doel is dus wenselijk.

Een andere oplossing is het roteren van de radars, zoals afgebeeld in figuur 3.5b. Door deze rotatie kunnen de radars dichterbij het midden van het doel staan. Het verschil in afstand tot het doel van de groene en de blauwe bal is dan aanvaardbaar. Het nadeel van deze opstelling is dat het belichte gebied aan de zijkanten is afgenomen.



Figuur 3.4 Het bereik van een opstelling met twee radars: radars verder uit elkaar (a), radars dichterbij elkaar (b)



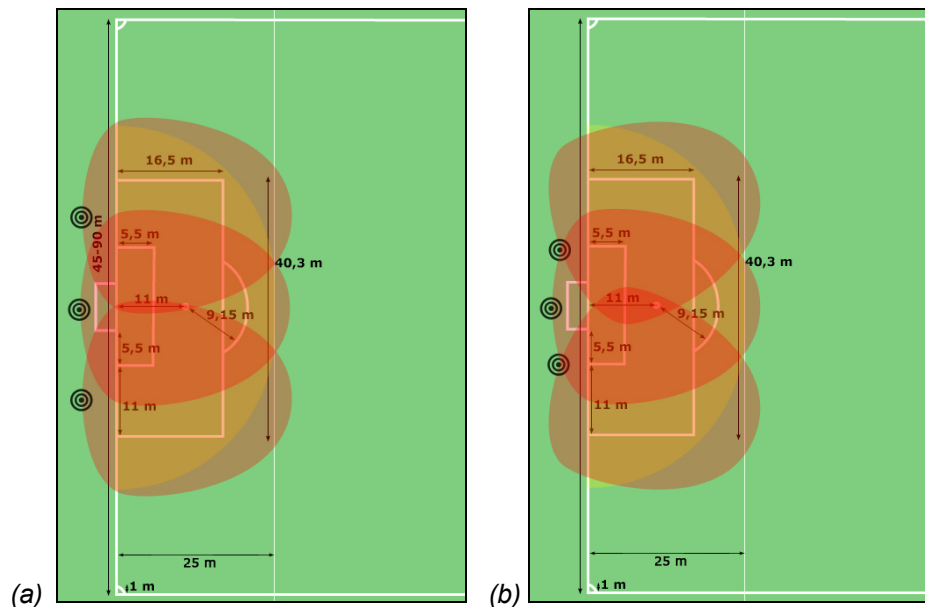
Figuur 3.5 Bevordering afstandsbeoordeling door rotatie van de radars: voor de radar bevinden beide ballen zich op dezelfde afstand, terwijl de groene bal veel dichterbij het doel is (a). Dit probleem wordt verminderd door de radars te roteren en dichterbij elkaar te plaatsen (b)

Bij gebruik van de opstelling met twee naar voren gerichte radars, is de kans op afscherming door spelers sterk afgenomen. Ten eerste staat de radar niet meer recht achter het doel. Als spelers de weg van de bal naar het doel blokkeren, dan zal dit bij deze opstelling geen afscherming van de bal tot gevolg hebben. Bovendien is er een overlappinggebied, dus wanneer de bal door toedoen van spelers wordt afgeschermd van de ene radar, kan de bal nog wel zichtbaar zijn voor de andere radar.

Bovengenoemde geldt in mindere mate voor de opstelling met gedraaide radars, zoals afgebeeld in figuur 3.5b. In dit geval bevinden de radars zich - weliswaar iets minder dan bij de opstelling met één radar - dichtbij het midden van het doel. Dit doet de kans op afscherming door toedoen van spelers weer toenemen.

3.2.3 Opstelling met drie radars

De beperkingen op de eerder genoemde opstellingen kunnen deels worden verholpen met behulp van een derde radar. Uiteraard zal het gebruik van drie radars nog meer kosten met zich meebrengen. Ook de benodigde rekenkracht zal verder worden verhoogd. In figuur 3.6 is te zien hoe de drie radars geplaatst kunnen worden.



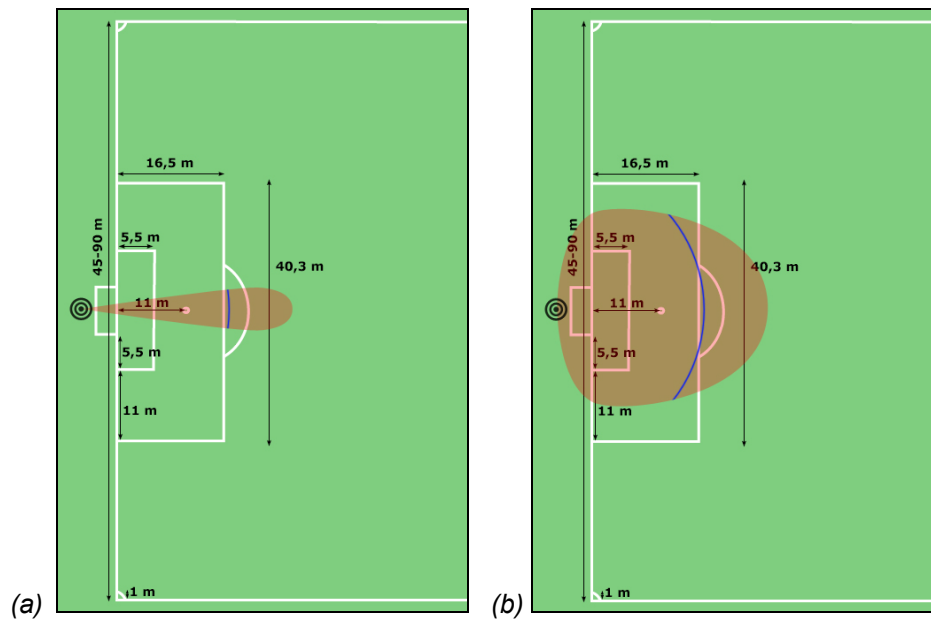
Figuur 3.6 Opstelling met drie radars: alle radars dezelfde kant op wijzend (a), buitenste twee radars geroteerd (b)

Het voordeel van deze opstelling is dat niet alleen het beschreven gebied groter is geworden, maar ook dat een groot deel van dit gebied dubbel of zelfs driedubbel wordt belicht. Hierdoor is positiebepaling in een groot gebied te realiseren. Slechts langs de buitenkant is deze positiebepaling niet mogelijk, maar op die plaatsen is nauwkeurige positiebepaling ook minder belangrijk.

Ook bij deze opstelling geldt dat de kans op afscherming sterk afneemt, door dezelfde eigenschappen die ook beschreven zijn bij de opstelling met het gebruik van twee radars. Het roteren van de buitenste radars heeft als voordeel dat het probleem geïllustreerd in figuur 3.5 wordt beperkt. Omdat de radars minder richting het midden van het doel zijn geplaatst dan in figuur 3.5b, is het afschermingprobleem in mindere mate aanwezig.

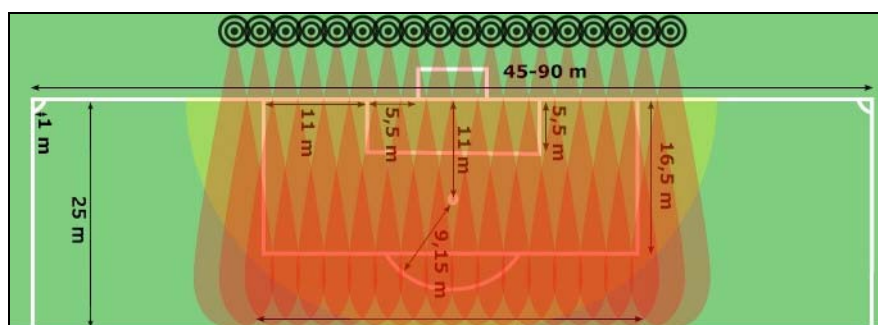
3.2.4 Opstelling met meerdere radars parallel

Bij opstellingen met weinig statische radars zijn smalle bundels niet erg bruikbaar, zoals al beschreven in paragraaf 3.2.1. Als er gebruik wordt gemaakt van meerdere radars, dan kunnen smallere bundels al beter gebruikt worden. Smallere bundels kunnen preciezere informatie geven. Een smallere bundel geeft informatie over de richting waarin de bal zich bevindt. Bij een brede bundel kan de bal zich in alle richtingen bevinden, terwijl het bij een smalle bundel binnen een bepaalde hoek blijft. Dit is in figuur 3.7 afgebeeld.



Figuur 3.7 Vergelijking nauwkeurigheid informatie tussen bundelbreedtes: de blauwe lijn laat de mogelijke posities van de bal zien gegeven een bepaalde afstand; met een smalle bundel is de informatie nauwkeuriger (a) dan met een brede bundel (b)

In figuur 3.8 is een opstelling te zien waarbij meerdere smalle bundels parallel naast elkaar zijn geplaatst. Hoewel op deze manier ogenschijnlijk het gehele gewenste gebied gemakkelijk wordt belicht, brengt deze opstelling veel complicaties met zich mee. Zo zijn er veel radars voor nodig, wat de nodige nadelen met zich meebrengt en wordt het softwarematig erg complex om de bal te volgen. Tevens is de kans op afscherming van de bal redelijk groot; indien een speler voor de bal staat, zal het systeem al niet in staat zijn de bal te zien, ongeacht de positie waarin de bal zich bevindt.



Figuur 3.8 Opstelling met achttien parallel geplaatste radars

3.2.5 Opstelling met scannende radar

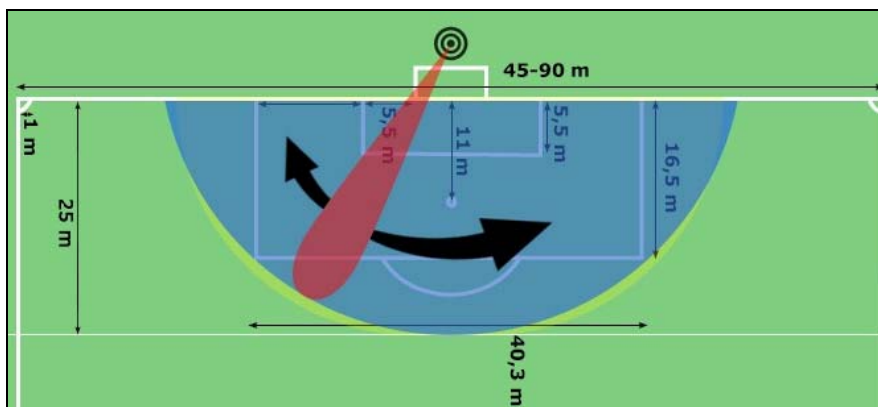
Het idee van de scannende radar is dat een radar met een smalle bundel gebruikt kan worden die het hele gebied 'scant'. Met scannen wordt bedoeld dat de bundel heen en weer gestuurd wordt over het veld. In figuur 3.9 is dit gevisualiseerd. Met de kleur blauw is het gebied weergegeven waarover de radar kan scannen.

Het scannen kan op twee manieren plaatsvinden. De bundel kan mechanisch worden gestuurd. Dat wil zeggen dat de antenne heen en weer gedraaid wordt in zijn geheel. Een andere mogelijkheid is om de bundel elektrisch te sturen. De antenne blijft op zijn plek, maar de bundel draait doordat de antenne op een speciale manier wordt gevoed [2].

Een voordeel is dat er één radar gebruikt om het volledige gebied te beschijnen. Het is echter niet zo dat de kosten van dit systeem laag zullen zijn. Bij gebruik van mechanische scanning moet een systeem worden ontwikkeld om de antenne te laten roteren. Dit moet zeer nauwkeurig gebeuren, want anders wordt de verkregen informatie onbruikbaar voor de software. Daarnaast zijn de onderhoudskosten van een mechanisch draaiend systeem aanzienlijk hoog. In het geval van elektrische scanning zal een ingewikkelde antenne ontwikkeld moeten worden die het mogelijk maakt om de bundel te roteren.

Een nadeel van de antenne is dat er snelle software nodig is om de verkregen informatie te verwerken. Er mogen geen gedeeltes ongescand blijven en een gehele scan mag ook niet te lang duren. De afgelegde afstand van de bal is dan zo groot, dat het volgen van de bal erg lastig wordt.

Een ander nadeel is hetzelfde nadeel als bij het gebruik van de opstelling met één antenne, zoals beschreven in paragraaf 3.2.1: de kans op afscherming van de bal zal significant zijn. In combinatie met het feit dat de bal niet continu gescand kan worden, kan dit ertoe leiden dat de bal te lang onzichtbaar is voor de radar. Dit zal goede detectie nagenoeg onmogelijk maken. Wellicht dat een systeem met meerdere draaiende radars deze problemen kunnen verhelpen. De complexiteit van een dergelijk systeem ligt echter te hoog voor toepassing bij MaxRadar.



Figuur 3.9 Opstelling met een enkele scannende radar

3.3 Conclusie

Voor MaxSoft is het belangrijk dat de radaropstelling de relevante informatie accuraat en constant levert. Omdat er gebruik wordt gemaakt van software die meerdere radaropnames vergelijkt om een object te herkennen is het belangrijk dat de bal zoveel mogelijk continu zichtbaar is voor de radar. Een opstelling die gebruik maakt van één radar, zowel statisch als scannend, zal te vaak de bal niet kunnen detecteren door tussenkomst van spelers. Bij een opstelling met twee radars is de kans hierop al een stuk kleiner, maar dit heeft weer als groot nadeel dat de positie van de bal ten opzichte van het doel niet nauwkeurig genoeg te bepalen is. Een opstelling met drie radars verkleint de kans op afscherming van de bal en zorgt er bovendien voor dat in een groot gebied nauwkeurige positiebepaling mogelijk is. Hoewel deze opstelling duurder zal zijn dan degenen met één of twee radars, biedt de opstelling veel meer mogelijkheden. De opstelling met meerdere smalle radars biedt geen extra informatie ten opzichte van de opstelling met drie radars, terwijl deze opstelling wel aanmerkelijk duurder en ingewikkelder is.

De voor- en nadelen tegen elkaar afwegend is daarom besloten gebruik te maken van een opstelling met drie radars, waarbij de buitenste twee radars geroteerd worden zoals afgebeeld in figuur 3.6b. Deze opstelling is niet de goedkoopste oplossing en daarom zal bij de keuze en het eventuele ontwerp van de radar en de antenne ook nauwlettend worden gelet op de kosten. Wellicht dat de uitgaven op die manier toch beperkt kunnen blijven.

4 Radars

De term *radar* is een acroniem van het Engelstalige '**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging'. Een beknopt verhaal over de geschiedenis van de radar is te lezen in [15]. Tegenwoordig is het woord radar een begrip op zich, aangezien de radar hedendaags een belangrijke rol speelt in onze maatschappij. De radar kent dan ook veel toepassingsgebieden waaronder de meteorologie, lucht- en ruimtevaart, defensie en zo meer [6].

Een radar is een elektronische installatie die gemaakt is om de omgeving af te zoeken naar objecten. De radar zendt via een antenne radiogolven uit en ontvangt de door de objecten gereflecteerde radiostraling weer via een antenne. Deze gereflecteerde golven worden ook wel echo genoemd. Uit de echo, die door de radar weer wordt ontvangen, kan een aantal gegevens van het object bepaald worden ten opzichte van die radar, zoals richting, afstand, hoogte.

Tegenwoordig gebruikt men veelal één antenne voor zowel het zenden als het ontvangen van de elektromagnetische golven (zie 5.1).

4.1 De te kiezen typen radars

MaxRadar ontwerpt een systeem waarmee met behulp van de radar een voetbal 'zichtbaar' kan worden gemaakt. In het voorgaande hoofdstuk is duidelijk gemaakt over welk gebied van het voetbalveld dit mogelijk moet zijn.

Er bestaan vele soorten radars die - ondanks het feit dat ze allen berusten op hetzelfde principe, namelijk de interpretatie van ontvangen echo's - veel van elkaar kunnen verschillen. Een aantal typen radars kunnen bij voorbaat al worden uitgesloten van gebruik voor het ontwerp van MaxRadar, zoals de Synthetic Aperture Radar (SAR) [14]. In dit hoofdstuk wordt dan ook slechts een analyse getoond van de typen radars die geschikt worden geacht voor het systeem, zijnde de puls-, puls doppler- en de (frequency modulated) continuous wave radar. In de conclusie wordt de uiteindelijke keuze onderbouwd op grond van de technische voor- en nadelen en tevens de kosten en realiseerbaarheid van het systeem.

4.1.1 Pulsradar

De meest voorkomende radar is de pulsradar [7]. Men kan een pulsradar vergelijken met iemand die hard roept in de richting van een object en daarna luistert naar de echo die terugkomt. Probleem is dat het weerkaatste geluid vaak te zwak is om te horen. Het weerkaatste geluid kan worden versterkt door natuurlijk harder te gaan roepen. Bij de pulsradar komt het harder roepen overeen met het uitzenden van meer vermogen. Ook kan de echo sterker worden gemaakt door het geluid te bundelen. Een andere mogelijkheid om de ontvangst te verbeteren kan worden gerealiseerd door ervoor te zorgen dat meer van het weerkaatste geluid wordt opvangen. Het bundelen en ontvangst van de golven is gemoeid met het ontwerp van de antenne die bij de radar wordt gebruikt en wordt verder behandeld in hoofdstuk 5.

In figuur 4.1 wordt een blokdiagram weergegeven van een simpele pulsradar. De componenten in dit blokdiagram worden kort uitgelegd.

De *oscillator* genereert een continu sinusoidaal signaal. Het vermogen van het signaal varieert per applicatie en is meestal een functie van het bereik dat de radar moet hebben. De frequentie is ook afhankelijk van de toepassing, maar de meeste radars opereren op frequenties tussen de 1 Ghz en 40 Ghz [14]. Voorbeelden van instrumenten die

kunnen dienen als generator van RF-signalen, zijn magnetrons, klystrons of (zoals toegepast in de radar van het prototype) solid state. Uitgebreide uiteenzettingen betreffende dit onderwerp zijn te vinden in [8], [27].

De *pulse modulator* zorgt ervoor dat het - continue - signaal afkomstig van de oscillator aan- en uit wordt gezet, opdat een pulstrein wordt gevormd.

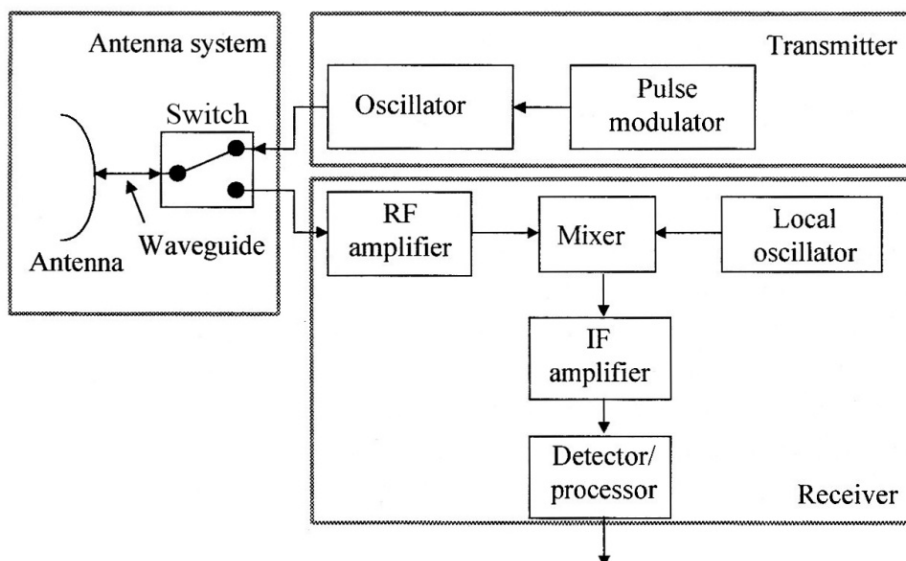
De *waveguide* (golfgeleider) zorgt dat het te verzenden signaal de antenne bereikt. De dimensie van de golfgeleider is van belang om de propagatie van de signalen zo efficiënt mogelijk te laten plaatsvinden. Golfgeleiders kunnen erg heet worden, door de absorptie van de RF energie. Daarom dient erop te worden gelet waar en hoe deze worden geplaatst, zodat geen risico wordt gevormd voor omstanders.

De *switch* is een schakelaar die ervoor zorgt dat dezelfde antenne kan worden gebruikt voor zowel het ontvangen als het verzenden van de signalen (zie 5.1). Het is van belang dat deze schakelaar het ontvangst- en verzendsysteem van elkaar gescheiden houdt om de volgende reden: het ontvangen signaal is (meestal) erg klein. De apparatuur om signalen te ontvangen is daarom heel gevoelig. Signalen afkomstig van de verzendmodule mogen daarom in geen geval direct in contact staan met het ontvangststelsel.

De *RF amplifier* versterkt het (veelal zwakke) ontvangen signaal. Deze versterker versterkt echter niet alleen het gewenste signaal, maar ook ongewenste signalen zoals ruis.

De *mixer* zorgt ervoor dat het ontvangen signaal naar een gewenste frequentie wordt gebracht. Hiertoe wordt het ontvangen signaal vermenigvuldigd met het signaal uit de *local oscillator*. Het resultaat is een signaal met als frequentie de verschilfrequentie van de twee ingangssignalen.

De *intermediate frequency (IF) amplifier* wordt gebruikt om het signaal uit de mixer te versterken en te brengen naar de detector/processor. Een brede analyse aangaande het verwerken van signalen is te vinden in [3].



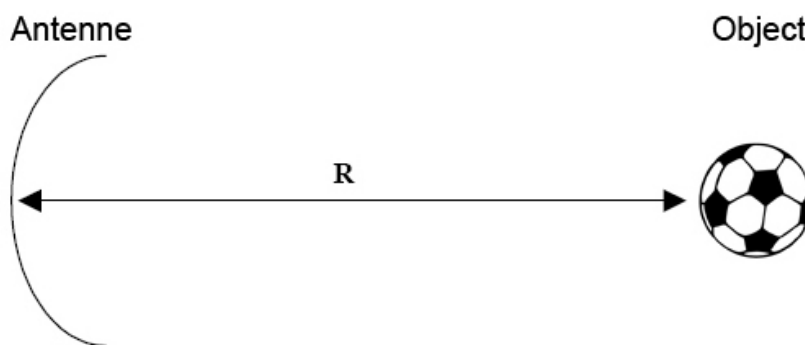
Figuur 4.1 Blokdigram van een simpele pulsradar (bron: [14])

Door het tijdsverschil tussen het uitzenden van een puls en het ontvangen van een echo te registreren, kan de afstand tot objecten worden bepaald. In figuur 4.2 is het principe van afstandsbepaling met een pulsradar schematisch weergegeven. De snelheid waarmee elektromagnetische golven door de lucht propageren is gelijk aan de lichtsnelheid, c [30]. De tijd die een puls nodig heeft om heen en weer te reizen is dus gelijk aan:

$$T_R = \frac{2R}{c}, \quad (4.1)$$

waarbij R de afstand tot het object is (aangegeven in figuur 4.2). De factor twee treedt op omdat de puls deze afstand twee maal moet overbruggen (heen- en terugweg). De afstand tot een object kan dus met een pulsradar met de volgende formule eenvoudig worden berekend:

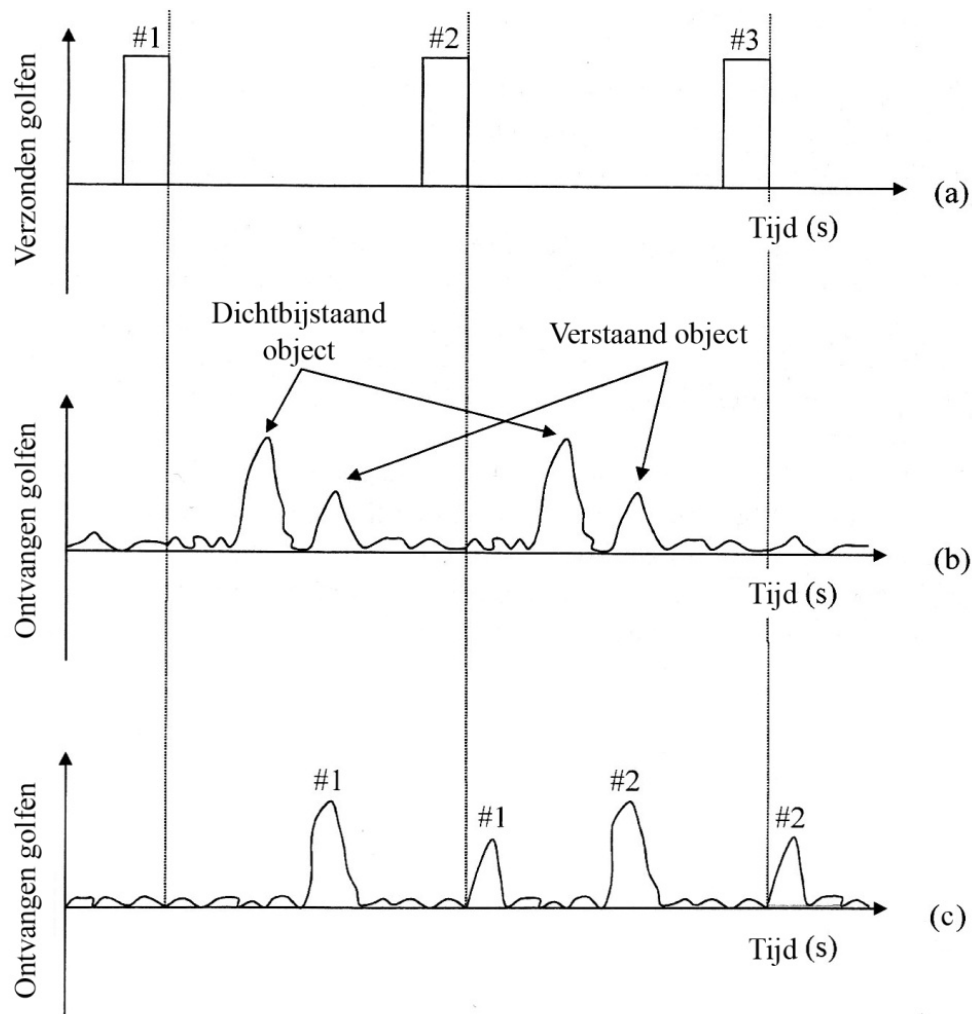
$$R = \frac{1}{2} T_R c. \quad (4.2)$$



Figuur 4.2 Afstandsbepaling tot een object met de pulsradar

In figuur 4.3 is een voorbeeld gegeven van verzonden en ontvangen golven door de pulsradar. Uit figuur 4.3 blijkt tevens hoe onderscheid kan worden gemaakt tussen objecten op verschillende afstanden. De breedte van de verzonden puls bepaalt het minimale bereik van de radar. Als de radar nog steeds aan het zenden is, terwijl de echo's al terug komen, zullen deze reflecties niet worden waargenomen. De puls radar heeft dus een minimaal bereik die in het Engels ook wel 'blind range' wordt genoemd, omdat de radar tijdens het verzenden van een puls geen golven kan ontvangen en dus als het ware blind is. Om objecten op korte afstand te detecteren, zullen dus korte pulsen moeten worden gebruikt. De pulsbreedte is ook van belang voor het onderscheiden van twee objecten, die zich dichtbij elkaar bevinden. Dit wordt ook wel de resolutie van de radar genoemd. Korte pulsen bevatten echter ook weinig energie, waardoor het bereik van de radar wordt beperkt. Tevens vereisen kortere pulsen een grotere bandbreedte. Bredere pulsen komen dus ten goede aan het bereik van de radar. De ontwerper zal dus een afweging moeten maken tussen bereik en precisie. Om het bereik te verhogen zullen ofwel bredere pulsen, ofwel krachtigere pulsen moeten worden verzonden.

Bij het gebruik van een pulsradar moet er tevens voor worden gewaakt dat er geen verwarring ontstaat over welke echo bij welke puls behoort. Dit is geïllustreerd in figuur 4.3c. De reflectie van het verstaande object wordt pas ontvangen nadat de tweede puls al is verzonden. Hierdoor lijkt het alsof het object juist heel dichtbij staat, omdat het (onjuist) als een reflectie van de tweede puls kan worden geïnterpreteerd.



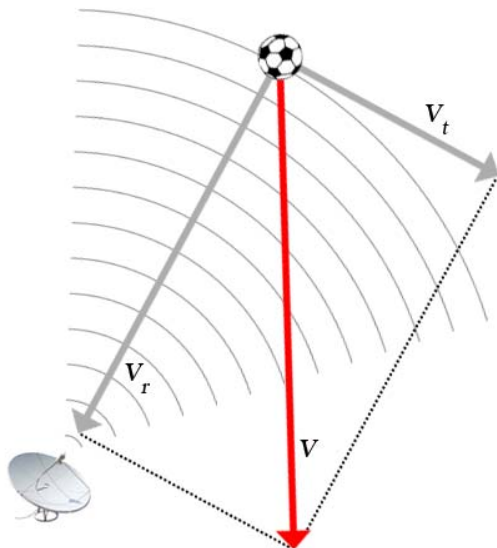
Figuur 4.3 Ontvangen en verzonden pulsen. In (c) worden reflecties afkomstig van de eerst verzonden puls nog ontvangen terwijl de tweede puls al is verzonden, hetgeen storingen brengt (bron: [14])

4.1.2 Doppler radar

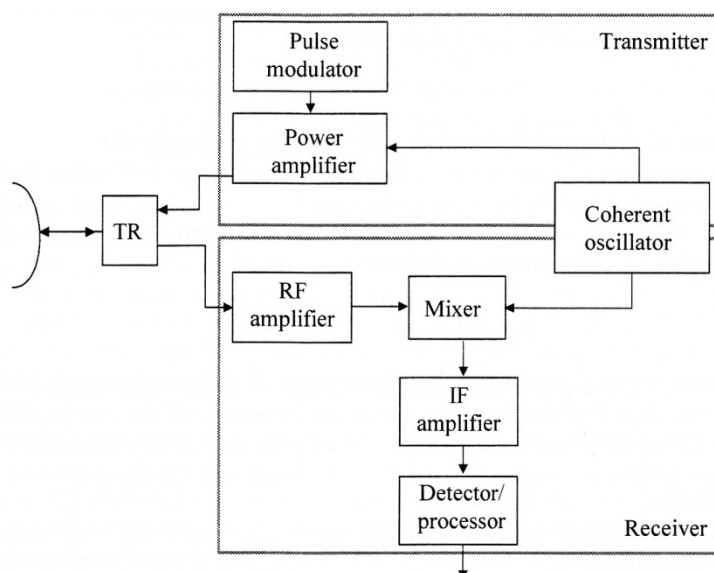
De pulsradar kan, zoals in 4.1.1 is uitgelegd, de afstand tot een object bepalen. De snelheid waarmee het object zich voortbeweegt is echter onbekend. Om ook deze te kunnen achterhalen, kan gebruik worden gemaakt van het Doppler effect. Radars die dit doen worden daarom ook wel Doppler radars genoemd.

Het Doppler effect is de verandering van golflengte en frequentie van geluid of licht (of andere golfverschijnselen) door een snelheidsverschil tussen de zender en de ontvanger. Met behulp van de frequentieverandering tussen het verzonden en het ontvangen signaal, kan de radiale snelheid van een object worden berekend. Dit is geïllustreerd in figuur 4.4. Het Doppler effect komt in vrijwel elk natuurkundeboek, zoals in het boek van Tipler [30], ruimschoots aan bod.

Een radar die gebruik maakt van het Doppler effect, is de puls Doppler (PD) radar. In figuur 4.5 wordt een blokdiagram weergegeven van een PD radar.



Figuur 4.4 **Decompositie snelheidsvector: de richting waarin de bal zich voortbeweegt wordt gedecomposeerd in een tangentiële en radiale component**



Figuur 4.5 **Blokdiagram van een puls Doppler radar (bron: [14])**

De puls Doppler radar is in grote mate gelijk aan de 'simpele' puls radar (zie figuur 4.5). Het verschil is dat de oscillator van het verzendmodule en de locale oscillator van het ontvangstmodule nu zijn vervangen door één *coherente oscillator*. De coherentie is belangrijk, want dat zorgt ervoor dat elke puls niet alleen consistent is in frequentie en amplitude, maar ook in fase.

De echo van objecten die in de richting van de antenne komen (dus het doelgebied approximeren) zullen een hogere frequentie hebben dan het uitgezonden signaal. De echo van objecten die zich van de antenne af bewegen, zullen een lagere frequentie hebben. De radiale snelheid van het object kan vervolgens worden geschat door de gemiddelde verschuiving van de frequentie van iedere afzonderlijke ontvangen puls te meten. Dit wordt gedaan met behulp van fast Fourier transformaties (FFT) [11] of door middel van autocorrelatietechnieken [42].

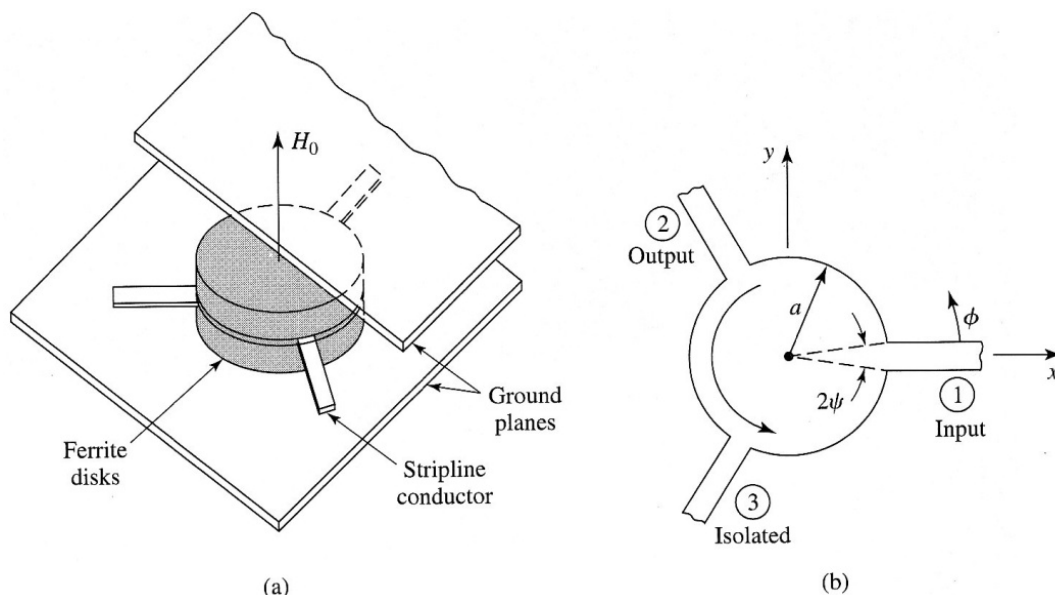
4.1.3 (FM)CW radar

De werking van de continuous wave (CW) radar berust volledig op het Doppler effect. De CW radar zendt continu een sinusoïdaal signaal uit. Vervolgens wordt de frequentieverschuiving van het ontvangen signaal gemeten en hieruit kan de (radiale) snelheid van objecten worden bepaald.

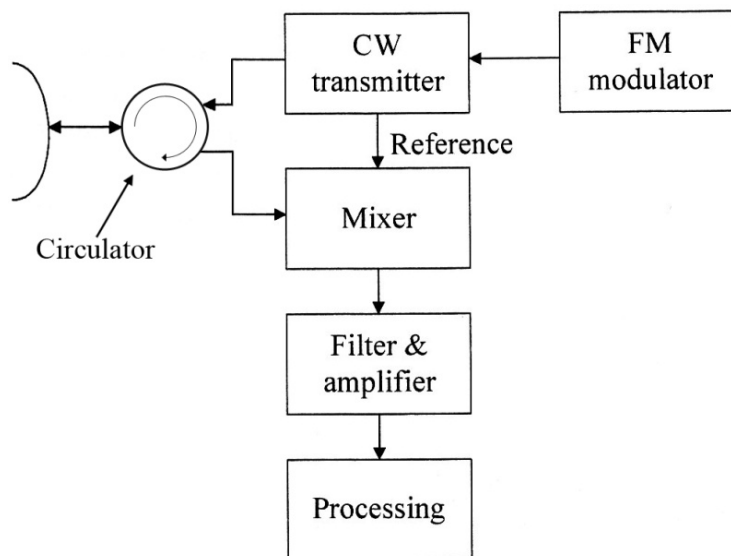
Het continu uitzenden - en dus ook continu ontvangen - van signalen doet vermoeden dat men twee afzonderlijke antennes nodig heeft. Een component genaamd *circulator* biedt echter de oplossing. De circulator is een passief elektronische component van meestal drie poorten. Dit kunnen er echter ook meer zijn. In figuur 4.6 is een circulator afgebeeld. De circulator zorgt ervoor dat energie van het verzendmodule, wordt gepoort naar de antenne. Opgevangen energie van de antenne wordt op zijn beurt gepoort naar het ontvangstmodule. Meer informatie over de circulator is te vinden in het boek van Pozar [21].

De CW radar biedt een aantal voordelen ten opzichte van de PD radar (zie 4.1.2). Allereerst is de CW radar betrekkelijk eenvoudig te vervaardigen, onder anderen wegens het ontbreken van gepulseerde signalen. Voorts wordt bij een CW radar optimaal gebruik gemaakt van het gegeven dat objecten elektromagnetische golven reflecteren, omdat de radar continu golven uitzendt en het object derhalve constant belicht. Tevens kent de CW radar geen minimaal bereik en is het maximale bereik slechts afhankelijk van het uitgezonden vermogen en demping van het medium.

Het grote nadeel van de CW radar, is dat de afstand tot objecten niet kan worden bepaald, gezien het feit dat continu een signaal wordt verzonden met constante amplitude en frequentie. Dit heeft tot gevolg dat er geen vertraging kan worden gemeten bij ontvangst van het signaal. De oplossing voor dit probleem ligt voor handen: het moduleren van de frequentie, waarmee de zogeheten frequency modulated continuous wave (FMCW) radar wordt verkregen. Het blokdiagram van de FMCW radar is afgebeeld in figuur 4.7.

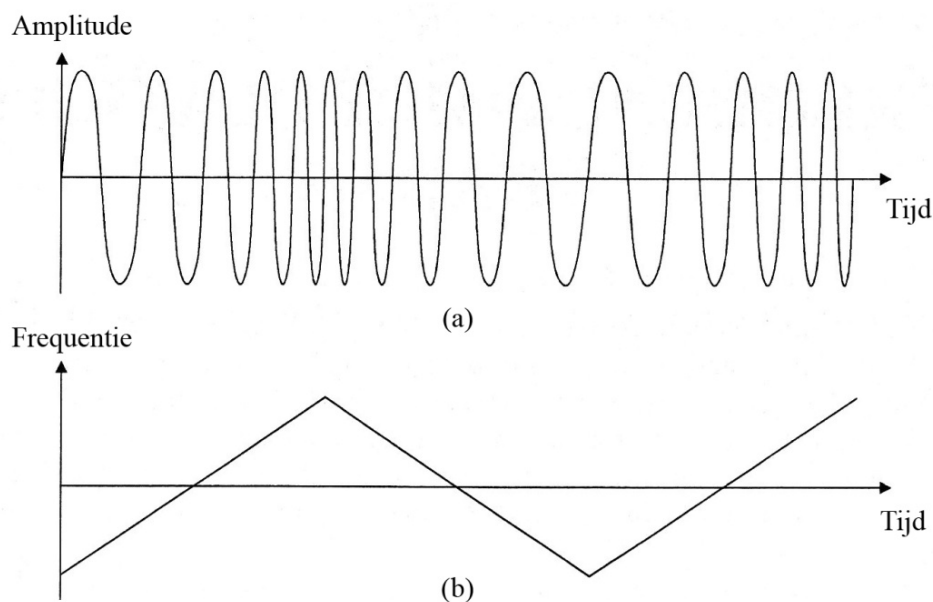


Figuur 4.6 Een stripline circulator: grafische weergave (a), geometrische weergave (b) (bron: [21])



Figuur 4.7 Blokdiagram van een FMCW radar (bron: [14])

De frequentie van de sinusgolf kan op meerdere manieren worden gemoduleerd. Een aantal voorbeelden hiervan zijn FSK (frequency shift keying) en sinusoidale modulatie. De meest voor de hand liggende methode is echter om de frequentie lineair te moduleren [28]. Een frequentiegemoduleerde sinusgolf is weergegeven in figuur 4.8a. Door de frequentie uit te zetten tegen de tijd, zoals in figuur 4.8b, wordt duidelijk dat de modulatie in lineaire stappen gebeurt.



Figuur 4.8 Een lineair frequentie gemodeleerde sinusoïde: amplitude versus tijd (a) en frequentie versus tijd (b) (bron: [14])

Door de FMCW radar te gebruiken is het mogelijk om met een laag piekvermogen de afstand, snelheid [12] en zelfs versnelling [28] van objecten nauwkeurig te bepalen. De bepaling van snelheid en versnelling met de FMCW radar, kan echter alleen als gebruik wordt gemaakt van complexe modeleermethodes voor het modeleren van de frequentie.

Afstandsbepaling met de FMCW radar geschiedt als volgt. Door het frequentieverschil te meten tussen de verzonden en het ontvangen signaal, kan de afstand tot het object worden berekend. De *mixer* in het blok diagram in figuur 4.7 geeft dit frequentieverschil, die ook wel de 'beat frequentie' wordt genoemd, als output. Indien het object beweegt, zal het beat signaal twee componenten krijgen: een component door de afstand tot het object en een component door het Doppler effect, veroorzaakt door de beweging van het object. In [14] staat in betrekkelijk simpele termen beschreven hoe uit het beat signaal de benodigde informatie wordt verkregen.

Net als alle andere radars, kent ook de FMCW radar zijn beperkingen. Zo is er uiteraard een resolutiebeperking. Het hangt af van het verwerkingssysteem (het *processing* blokje in figuur 4.7), of de radar in staat is tussen bepaalde (beat) frequenties te discrimineren. De resolutie van het systeem kan dus worden beïnvloed door de gebruikte modulatiesnelheid, omdat deze op zijn beurt weer van invloed is op de beat frequentie. Tevens heeft de FMCW radar - net als de puls radar - een blind bereik. Indien objecten dicht bij elkaar staan, zal de beat frequentie ook klein zijn. Afhankelijk van de *filter* na de mixer, is het namelijk mogelijk dat deze frequentie wordt weggefilterd.

Aangezien de FMCW radar continu straalt, zullen veel ongewenste reflecties optreden. Reflecties van statische objecten kunnen worden onderdrukt door middel van digitale bewerkingen [18]. Tevens bestaan er methodes om fase ruis te verminderen [16].

4.2 Conclusie

Het gebruik van FMCW radars is de afgelopen decennia aanzienlijk toegenomen. De snelle ontwikkelingen op het gebied van digitale signaalbewerkingen hebben hier een belangrijke rol in gespeeld. Dit heeft ervoor gezorgd dat de techniek breed wordt toegepast in de industrie, waaronder de auto-industrie. Naar verwachting zal deze markt de komende jaren sterk groeien. Wellicht kan Maxad meeliften in deze trend en profiteren van de massaproductie van FMCW radars. Dit past bovendien binnen de strategie van Maxad om zoveel mogelijk gebruik te maken van kant-en-klare technologieën.

De toepassing in auto's lijkt veel op die van Maxad. Afgezien van de smalle bundels die hier worden gebruikt, is ook in auto's snelle nauwkeurige respons van groot belang. Gelet op de eisen wat betreft bereik en nauwkeurigheid kan de FMCW radar dus zeker voldoen.

Afsluitend moet worden vermeld dat de radars die door IRCTR ter beschikking zijn gesteld aan Maxad, FMCW radars betreffen. Dit gegeven geeft de doorslag in de definitieve keuze voor de radar: alles overziend is besloten om gebruik te maken van de technologie van de FMCW radar.

5 Antennes

Een antenne is een omvormer die een radiofrequent (RF) veld omzet in een wisselstroom of omgekeerd. In de van Dale [4] wordt het woord antenne als volgt gedefinieerd: “draad, dradenstelsel, stang of stangenstelsel voor het ontvangen resp. uitzenden van elektromagnetische golven bij de draadloze telegrafie en telefonie, bij televisie en radar”.

Antennes kunnen op de volgende manieren worden gebruikt [35]:

- Als ontvangstantenne, die RF energie ontvangt en omzet in een wisselstroom (AC) om die af te geven aan een elektronisch toestel.
- Als zendantenne, die gevoed wordt met een wisselstroom en deze omzet in een RF veld.

In principe zijn er geen verschillen tussen een zend- en ontvangstantenne (de zend- en ontvangstantenne zijn reciproque). Zowel voor het zenden als ontvangen kan dus dezelfde antenne worden benut.

Bij de keuze voor een bepaalde antenne moet gekeken worden naar een aantal belangrijke eigenschappen van de antenne.

Ten eerste is het stralingspatroon van belang. In hoofdstuk 3 zijn de mogelijke opstellingen besproken. Hier kwam naar voren dat het aantal te gebruiken radars tot een minimum moet worden beperkt, opdat de complexiteit van de software binnen de perken blijft. Hier staat tegenover dat er genoeg informatie moet worden vergaard. Indien de stralingsbundels statisch zijn (dus niet bewegen over het veld), mogen deze bundels niet te smal zijn. Er zouden dan immers teveel radars nodig zijn. De stralingsbundel van een radar wordt bepaald door het type antenne en kan worden beïnvloedt door configuraties te gebruiken met meerdere antennes (zogenoemde phased array configuraties).

Een tweede eigenschap waarop gelet dient te worden is de antenneversterking. Een antenne met een grotere versterking heeft minder vermogen nodig om in een bepaald gebied een even sterk signaal te zenden. Een grotere antenneversterking leidt wel tot een smallere bundelbreedte en daarom zal er bij het ontwerp van de antenne een afweging gemaakt moeten worden tussen antenneversterking en bundelbreedte.

Als laatste moet gelet worden op de polarisatie van de antenne. Polarisation kan worden gebruikt om de bal beter te onderscheiden van andere objecten op het veld. Om hiervan gebruik te maken, dient een lineair gepolariseerde golf te worden uitgezonden. In hoofdstuk 8 wordt dit verder behandeld.

5.1 De te kiezen typen antennes

Er bestaan talloze soorten antennes. Met het einddoel voor ogen, zijn in dit rapport een beperkt aantal mogelijkheden onderzocht. Voor de keuze van een antenne is gekeken naar vier soorten antennes: de paraboolantenne, de monopoolantenne, de dipoolantenne en ten slotte de microstrip patch-antenne. Tevens is gekeken naar de mogelijkheid om gebruik te maken van de hiervoor genoemde phased array configuratie. Wat phased array configuraties betreft, worden twee soorten antennes nader bekeken: de Yagi-Uda antenne en microstrip patch array antenne.

Bij elk van deze antennes is gelet op de hierboven beschreven eigenschappen waaraan de antenne moet voldoen. Daarnaast is een analyse gemaakt aan de hand van de kosten van de antennes, de beschikbaarheid van bepaalde antennes en de mogelijkheden tot het ontwerpen van de desbetreffende antenne in korte tijd. Ook worden praktische zaken zoals robuustheid, onderhoud en esthetiek kort besproken.

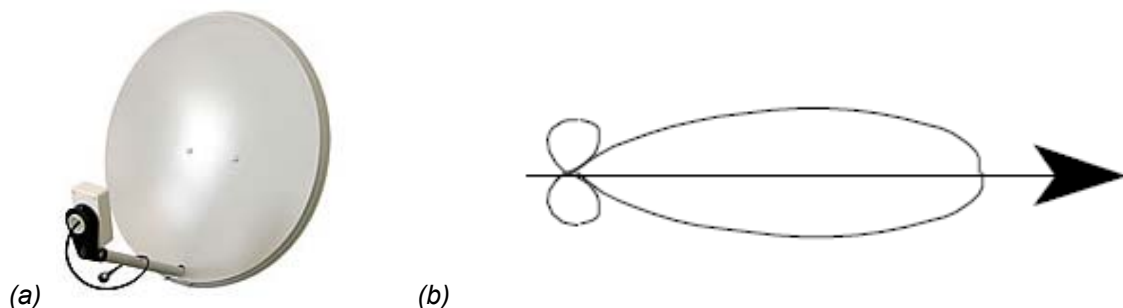
5.1.1 Paraboolantenne

De paraboolantenne is bij veel mensen bekend als de antenne die wordt gebruikt om satelliettelevisiesignalen te ontvangen. Deze antenne bestaat uit twee belangrijke onderdelen; een feedhorn en een parabolische schotel. De feedhorn is de eigenlijke antenne, die het signaal omzet van een elektrisch signaal naar een elektromagnetisch signaal en vice versa. De schotel dient als een reflector. Door de parabolische vorm van de reflector en de plaatsing van de feedhorn in het brandpunt van de reflector kunnen deze antennes een sterk gerichte bundel uitzenden. Een voorbeeld van een paraboolantenne is te zien in figuur 5.1a.

Het stralingpatroon van een paraboolantenne is afhankelijk van de toegepaste feedhorn en in grotere mate van de gebruikte reflector. Een voorbeeld van het stralingspatroon van een paraboolantenne is weergegeven in figuur 5.1b. De bundel is rotatie-invariant in de richting van de straling, die aangegeven wordt met de pijl. Omdat paraboolantennes gebruikt worden om gericht te zenden of te ontvangen, is een smalle, gerichte bundel het meest effectief. Dit is ook terug te zien in figuur 5.1b. Doordat de bundel zo geconcentreerd is, heeft deze antenne ook een grote antenneversterking. De bundel is te vergroten door een vlakkere reflector te gebruiken, waardoor de straling meer verspreid zal worden. Tevens is het mogelijk de bundel te vergroten door de feedhorn buiten het brandpunt te positioneren [19]. Het directe gevolg van het vergroten van de bundel, is dat de antenneversterking af zal nemen.

De polarisatie van de paraboolantenne is enkel afhankelijk van de gebruikte feedhorn. Deze kan zowel horizontaal, verticaal als circulair gepolariseerde golven uitzenden.

De kosten van een paraboolantenne zijn relatief laag in vergelijking met andere antennes met gerichte bundels. De (vlakkere) reflector voor een bredere bundel is eenvoudig om te ontwerpen. De productie ervan is echter lastiger, gezien de reflector geen oneffenheden in het oppervlak mag bevatten.



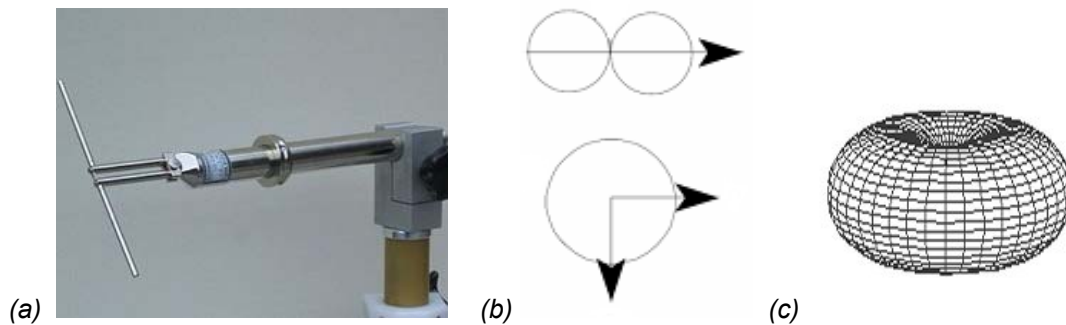
Figuur 5.1 Een paraboolantenne met bijbehorend stralingspatroon (bron: [29], [40])

5.1.2 Dipoolantenne

Er zijn verschillende soorten dipoolantennes. Een van de meest gebruikte dipoolantennes is de halve golf dipoolantenne [1]. Deze antenne bestaat uit een metalen draad, die - zoals de naam al aanduidt - de lengte heeft van een halve golflengte van het te ontvangen signaal. Daardoor treedt er bij de juiste frequentie resonantie op, waardoor alleen deze frequentie wordt ontvangen. Een voorbeeld van een dipoolantenne is te zien in figuur 5.2a.

Het stralingpatroon van een dipoolantenne is weergegeven in figuur 5.2b. Bovenin 5.2b is een doorsnede van de straling afgebeeld, van voren gezien met de antenne als middelpunt. Onderin is een weergave van bovenaf gezien. Het patroon heeft de vorm van een donut (zie figuur 5.2c). Een dipoolantenne straalt dus in alle richtingen, waardoor de antenneversterking laag is. De polarisatie van een dipoolantenne is lineair.

De kosten voor een dipoolantenne zijn laag, omdat het in feite gewoon een metalen draad is. Het ontwerp ervan is daarom ook ongecompliceerd. In korte tijd kan een werkende dipoolantenne worden ontworpen.



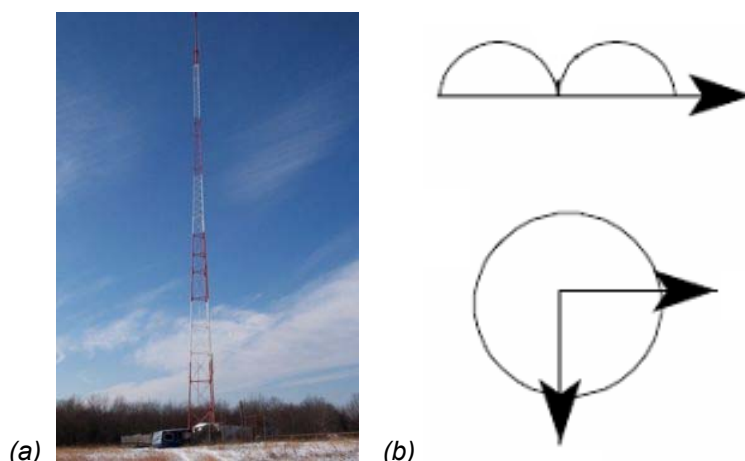
Figuur 5.2 Een dipoolantenne met bijbehorend stralingspatronen (bron: [29], [37])

5.1.3 Monopoolantenne

Een monopoolantenne is een soort dipoolantenne, waarbij een van de polen is vervangen door een grondvlak. Monopoolantennes kennen we vooral van automobielen, waar het wordt gebruikt om radio te ontvangen. Een voorbeeld van deze antenne wordt weergegeven in figuur 5.3a.

Het stralingspatroon van een monopoolantenne lijkt erg op dat van een dipoolantenne. Het enige verschil is dat een monopool niet naar beneden straalt, omdat de straling wordt geabsorbeerd door het grondvlak. Hierdoor ontstaat als het ware de vorm van een donut, waar de onderste helft vanaf is, zoals wordt weergegeven in figuur 5.3b. De weergave heeft dezelfde indeling als bij de dipoolantenne. In de praktijk kan het patroon niet zo vlak zijn aan de onderkant, en dus is er altijd een kleine hoek waaronder de straling zich boven de grondplaat voortplant. De antenneversterking van een monopool is groter dan die van een dipool, aangezien de straling maar de helft van de ruimte bestrijkt. Een monopool heeft wel net als een dipoolantenne een lineaire polarisering.

Een monopoolantenne is tevens goedkoop te produceren, omdat het slechts uit een draad en een metalen plaatje hoeft te bestaan. Het ontwerp ervan is ook eenvoudig en kan snel gerealiseerd worden.



Figuur 5.3 Een monopoolantenne met bijbehorend stralingspatroon. De in (a) afgebeelde monopoolantenne wordt gebruikt voor het zenden van radiosignalen (bron: [29], [38])

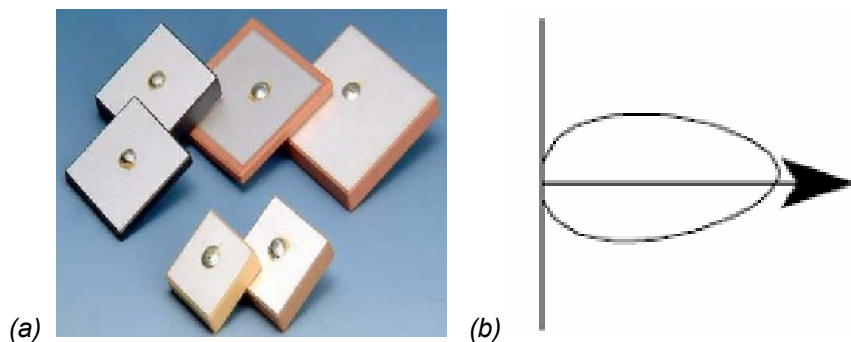
5.1.4 Microstrip patch-antenne

Een microstrip patch-antenne bestaat uit een metalen patch, die geplaatst wordt op een diëlectrisch substraat, dat zich op zijn beurt boven een metalen grondvlak bevindt. De metalen patch is het stralende element van de antenne. De patch kan verschillende vormen hebben, maar meestal is dit een rechthoek. In figuur 5.4a zijn een aantal microstrip patch-antennes weergegeven.

Het stralingspatroon van een microstrip patch-antenne is schematisch weergegeven in figuur 5.4b. Dit patroon is evenals bij de paraboolantenne rotatie-invariant in de richting van de straling, oftewel loodrecht op de patch. Omdat er verschillende soorten patches bestaan, kan dit patroon per ontwerp nogal afwijken. De polarisatie van deze antennes verschilt ook per ontwerp.

Microstrip patch-antennes kunnen eenvoudig geproduceerd worden, doordat de patch geëtst wordt uit een printplaat. Hierdoor zijn ook de kosten voor deze antennes erg laag. Het ontwerp van een patch-antenne is relatief eenvoudig en kan ook binnen afzienbare tijd worden gerealiseerd. Een bijkomend voordeel bij microstrip patch-antennes is dat ze heel eenvoudig in een array gebruikt kunnen worden.

Een van de nadelen van microstrip patch-antennes, is de smalle bandbreedte [13]. Omdat de FMCW de beoogde radar is voor het systeem, vormt dit geen probleem, aangezien laatstgenoemde radar een kleine bandbreedte behoeft [14]. Een ander nadeel is dat het radiatiepatroon van microstrip patch-antennes vaak zogenoemde 'sidelobes' vertonen. Dit betekent dat zich naast de gewenste bundel ook andere bundeltjes bevinden. Dit probleem kan gedeeltelijk worden ondervangen door middel van diverse technieken [25], [32].



Figuur 5.4 Microstrip patch-antennes met bijbehorend stralingspatroon
(bron: [29], [39])

5.2 Gebruik van een phased array

Een antenne-array is een samenstel van een aantal zend- of ontvangstantennes, om voor een bepaalde frequentie een optimale energieoverdracht in een of meer richtingen te bewerkstelligen. Het effect van het opnemen van een aantal antennes in een array is dat de uitgezonden straling wordt gebundeld in een bepaalde richting [33]. Omdat alle antennes in de array op dezelfde bron worden aangesloten, moet wel gebruik worden gemaakt van een vermogensverdeler.

Het gebruik van een phased array voor het ontwerp is vooralsnog geen optie, aangezien we een brede bundel wensen te gebruiken (zie 3.2). Bovendien verhoogt het gebruik van een phased array de complexiteit van het systeem aanzienlijk.

5.3 Conclusie

Aangezien een paraboolantenne een zeer smalle bundel heeft, is deze per definitie niet bruikbaar voor het detectiesysteem. Daarnaast kennen paraboolantennes andere nadelen. Zo liggen de kosten voor deze antenne hoger dan voor de alternatieven. Tevens dient het systeem niet teveel op te vallen in het stadion, wat met paraboolantennes wordt bemoeilijkt.

Een dipoolantenne is erg goedkoop en daardoor erg aantrekkelijk om te gebruiken in het ontwerp. Ook heeft een dipoolantenne een brede bundel, waardoor deze antenne bruikbaar zou kunnen zijn voor het ontwerp. Het nadeel is dat deze bundel ook gebieden belicht waar ongewenste objecten gedetecteerd kunnen worden, bijvoorbeeld het gebied achter het doel. Een mogelijkheid om dit te ondervangen is het plaatsen van een metalen plaat achter de antenne. Hierdoor wordt er geen waarneming aan de achterkant van de plaat gedaan, maar tegelijkertijd zorgt de plaat weer voor ongewenste reflecties. Bovendien wordt de antenneversterking op de manier kleiner, doordat de helft van het vermogen door de plaat geabsorbeerd zal worden. Zoals beschreven in paragraaf 5.2 kan de bundel beter worden gericht met behulp van een phased array. Een voorbeeld van een phased array constructie met dipool antennes is de alom bekende Yagi-Uda antenne [1], beter bekend als de harkantenne. Omdat echter bij de radar wordt gewerkt met zeer hoge frequenties (boven de 10 Ghz), wordt de nauwkeurigheid bij een dergelijk ontwerp met meerdere antennes heel belangrijk. Bij een kleine afwijking in de afmetingen van de antennes en de onderlinge afstand zal de array niet meer werken. De productie van zo'n type antenne zou dus dermate arbeidsintensief zijn, waardoor de kosten zouden oplopen.

Hetzelfde verhaal gaat ook op voor de monopoolantenne. Ook bij deze antenne wordt een groot deel van de bundel naar achteren gestraald. Ook dit zou met een metalen plaat kunnen worden opgelost, maar dan gelden dezelfde nadelen als voor de dipoolantenne.

Microstrip patch-antennes kennen veel voordelen. Zo is de productie ervan goedkoop en zijn deze type antennes onderhoudsarm. Bovendien zijn ze erg robuust, wat absoluut een vereiste is voor toepassing bij het systeem van Maxad (zie hoofdstuk 2). Daarnaast zijn microstrip patch-antennes erg klein, waardoor het systeem onopvallend kan worden geplaatst. Microstrip patch-antennes zijn erg flexibel wat betreft werkfrequentie, polarisatie, stralingspatroon en impedantie. Het ontwerp kan dus zodanig worden gemaakt dat de stralingsbundel breed genoeg is. Tevens stralen microstrip patch-antennes enkel naar één kant, waardoor vermogensverlies wordt beperkt. Doordat de technieken om een microstrip antenne te produceren grote nauwkeurigheid toestaan in het ontwerp, zijn deze antennes ook zeer geschikt om te gebruiken binnen een array. De nadelen van microstrip antennes, zijn onder anderen het lage rendement en de beperkte hantering van hoge vermogens. Verder is de bandbreedte erg smal. De benodigde bandbreedte zal echter niet erg hoog zijn, aangezien de FMCW radar wordt gebruikt (zoals opgemerkt in 5.1.4, heeft de FMCW radar een kleine bandbreedte). Indien noodzakelijk bestaan er overigens verscheidene manieren om de bandbreedte te verhogen. Hoofdstuk 7 is volledig gewijd aan het ontwerp van microstrip patch-antennes. Hierin wordt met meer diepgang de eigenschappen van deze antenne behandeld.

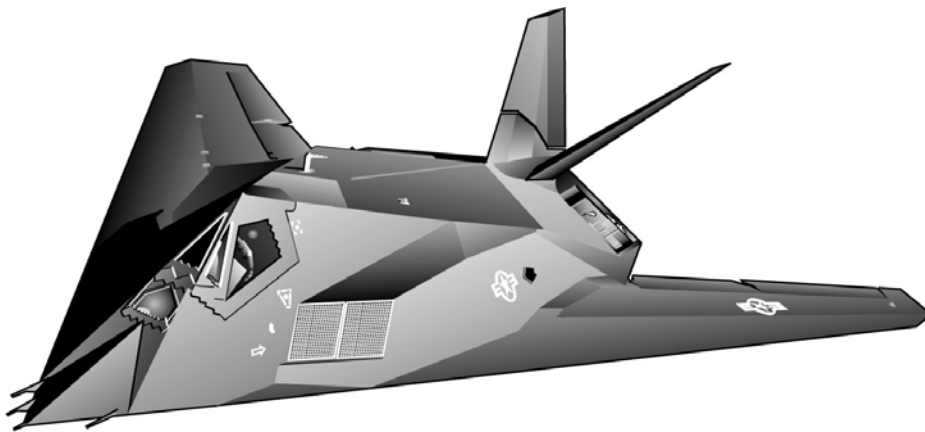
Door de grote voordelen die de microstrip patch-antenne heeft ten aanzien van andere antennes is besloten voor het systeem gebruik te maken van deze antenne in het ontwerp. Bovendien is er op de TU Delft veel kennis aanwezig over het ontwerpen van dit soort antennes, waardoor goede begeleiding bij het ontwerp mogelijk is.

6 Baldetectie

In voorgaande hoofdstukken is besproken welke instrumenten het meest geschikt zijn om een object binnen een bepaalde bereik te detecteren. In feite is echter niet gekeken naar het te detecteren object zelf: de voetbal. In dit hoofdstuk zal worden behandeld hoe de bal beter zichtbaar kan worden gemaakt door een aantal technieken toe te passen.

Sommige objecten zijn beter zichtbaar voor radars dan andere objecten. De F-117 Nighthawk - een gevechtsvliegtuig van Lockheed Martin - is een bekend voorbeeld hiervan: dit toestel is bijna onzichtbaar voor de radar. In figuur 6.1 is de F-117 afgebeeld. De eenheid voor de mate van zichtbaarheid is de Radar Cross Section (RCS). De RCS van de F-117 is dus erg laag. Dit wordt bereikt door onder anderen de vorm, geluidsreductie, kleur, infrarood-emissie, elektronica en de toepassing van Radar Absorberende Materialen (RAM).

Voor MaxRadar is het van belang dat de RCS van de voetbal juist groter wordt. De technieken die zijn toegepast bij toestellen zoals de F-117 dienen ertoe de RCS te verlagen. Toch kunnen een aantal van deze technieken als voorbeeld dienen om het tegengestelde te bereiken en de zichtbaarheid van de bal juist te vergroten.

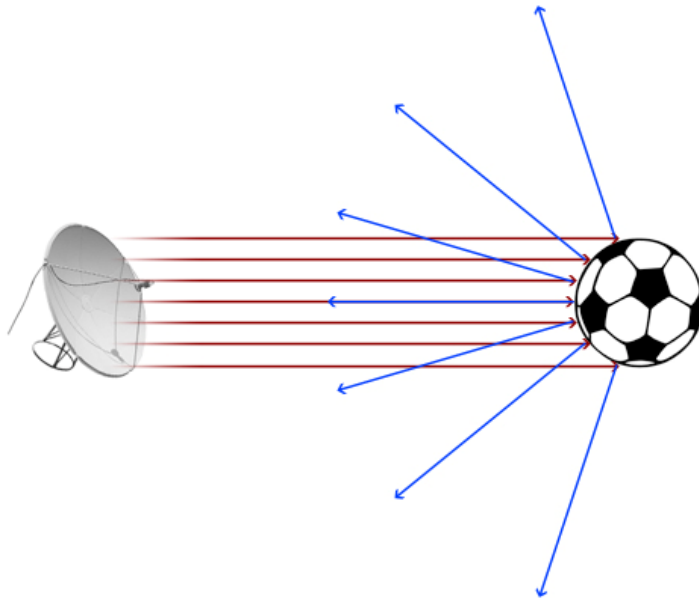


Figuur 6.1 De Lockheed Martin F-117 Nighthawk (bron: [17])

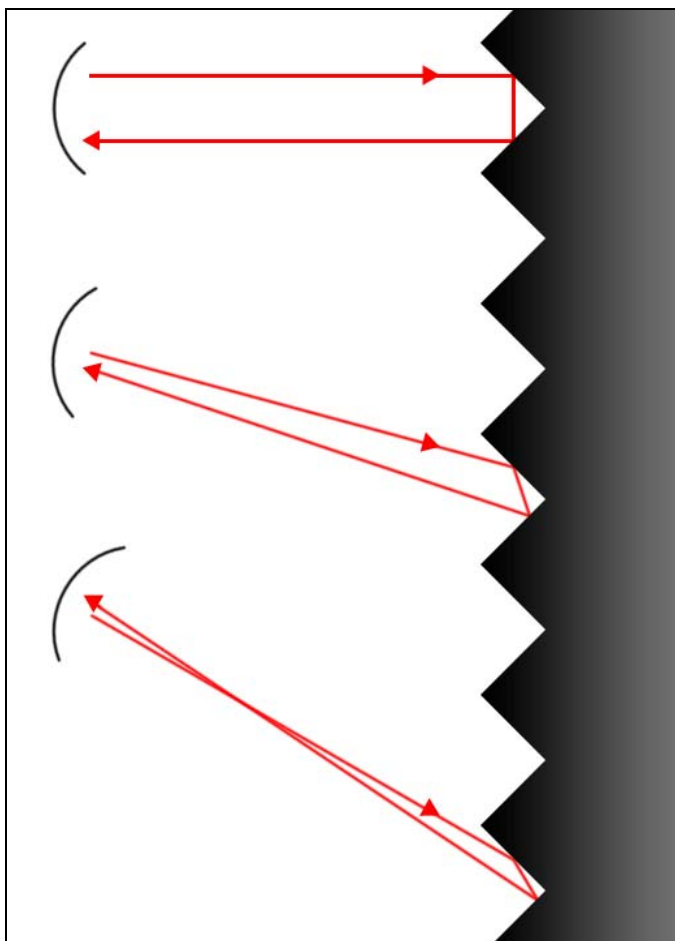
6.1 Geometrie

Aan het feit dat de bal rond is, kan weinig worden veranderd. De ronde vorm van een voetbal is echter nadelig voor de RCS. Dit is geïllustreerd in figuur 6.2. Te zien is dat slechts een klein deel van de verzonden golven richting de radar worden terug gereflecteerd. De overige energie wordt niet door de radar opgevangen en kan als verloren worden beschouwd.

In de vormgeving van de F-117 is goed te zien dat er geen rechte hoeken zijn. Uit de meetkunde is namelijk bekend dat met behulp van rechte hoeken golven naar de bron kunnen worden teruggekaatst. Een voorbeeld van een voorwerp dat dankbaar gebruik maakt van dit principe is de fietsreflector. Door de bal (inwendig) te bekleden met materiaal dat microscopisch is voorzien van een profiel met rechte hoeken, wordt een reflector gecreëerd. Zodoende kan een groter gedeelte van de invallende golven weer richting de radar worden gereflecteerd. In figuur 6.3 wordt dit afgebeeld: ook schuin invallende golven worden dankzij het profiel met rechte hoeken richting de bron teruggekaatst. Daarmee wordt de RCS vergroot.



Figuur 6.2 Weerkaatsing van golven door een voetbal: door zijn ronde vorm, wordt slechts een klein deel van de golven richting de bron teruggekaatst

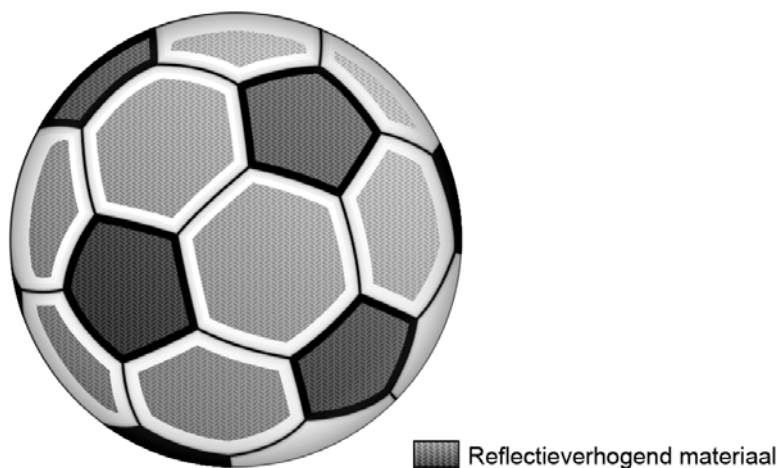


Figuur 6.3 Profiel met rechte hoeken: ook schuin invallende golven worden richting de bron terug gereflecteerd

6.2 Reflectieverhogende materialen

De “huid” van de F-117 is voorzien van Radar Absorberende Materialen (RAM). Enkele eigenschappen van RAM berusten op de permeabiliteit en de dielektrische constante van het materiaal. De exacte samenstelling is geheim. Er bestaan ook materialen die het omgekeerde effect bewerkstelligen, namelijk het zoveel mogelijk reflecteren van de inkomende golven. Bij het gebruik van deze materialen is het van belang dat de fysische eigenschappen van de bal niet worden beïnvloed. In hoofdstuk 8 is te lezen dat voor het prototype de bal is bekleed met aluminium. Dit is een eenvoudige en goedkope oplossing, die de zichtbaarheid van de bal significant verhoogd. Er bestaan ook technieken om een nog hogere reflectie te behalen, door het gebruik van meerdere materialen (waaronder aluminium) in lagen [23].

Het reflectieverhogende materiaal kan op verscheidene manieren op de bal worden aangebracht. De eerste optie is om de bal geheel met het materiaal te bekleden, waardoor de reflectiviteit wordt gemaximaliseerd. Het reflectieverhogende materiaal kan echter ook alleen op bepaalde plekken van de bal aangebracht worden, zoals in figuur 6.4. Omdat de bal roteert kan deze wellicht beter zichtbaar worden omdat de reflectie door het patroon karakteristiek zal variëren. Geen ander object op het veld vertoont deze variaties en daarmee kan de bal met bijvoorbeeld autocorrelatie technieken worden gedetecteerd.



Figuur 6.4 Balbekleding met patroon

6.3 RFID

Radio frequency identification (RFID) is een technologie om van een afstand informatie op te slaan en te lezen van zogenaamde RFID-"tags" die op of in objecten zitten. Deze tags kunnen actief of passief zijn. Actieve RFID chips worden gevoed door een batterij. Passieve tags hebben geen eigen energiebron en zenden een antwoord door het omzetten van de energie van de radiogolven.

Door de bal uit te rusten met één of meerdere tags, kan de bal worden herkend door de radar. Een bal die is uitgerust met actieve RFID chips zou beter zichtbaar zijn, omdat deze immers meer vermogen uitzendt wegens het beschikken over een eigen krachtbron. De krachtbron is echter niet onuitputtelijk, waardoor de bal moet worden opgeladen. Bovendien zorgt een eigen krachtbron voor een gewichtstoename. Omdat de massaverdeling van de bal homogeen moet zijn brengt dit complicaties met zich mee.

Passieve RFID chips zenden aanzienlijk minder vermogen uit vergeleken met zijn actieve variant, waardoor de bal minder goed zichtbaar is. Passieve chips brengen echter veel voordelen met zich mee wat de implementatie betreft. Technologieën om RFID circuits te printen op flexibele oppervlakten zoals papier zijn al beschikbaar [41]. In figuur 6.5 is een geprinte RFID chip afgebeeld. Deze afgebeelde chip wordt echter gebruikt voor kort bereik (minder dan één meter). De toepassing voor baldetectie vergt een groter bereik.

Daarnaast is het van belang dat het systeem in de bal uitermate robuust is, aangezien deze constant aan grote krachten wordt blootgesteld. Het ontwerp van een bal met actieve RFID chips is complexer en daarmee gevoeliger voor storingen. Het gebruik van printbare passieve RFID tags is goedkoop en zeer robuust.

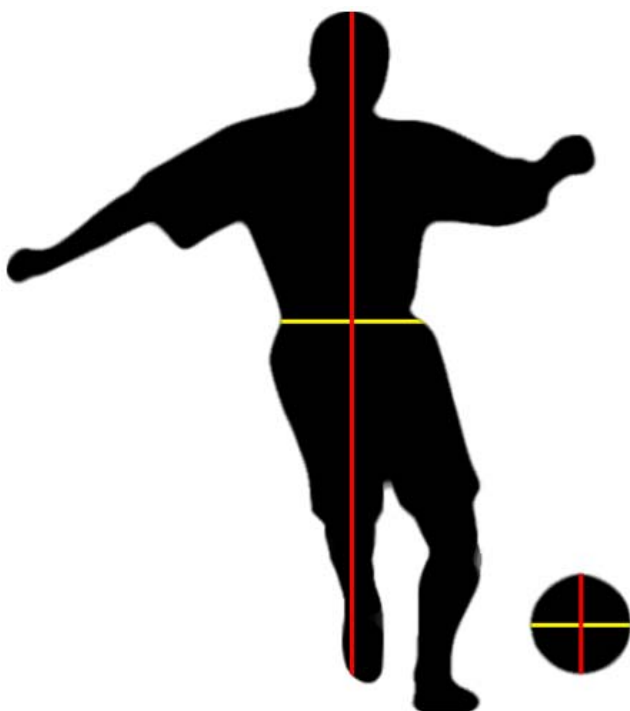


Figuur 6.5 **Geprinte RFID chip (bron: [22])**

6.4 Polarisatie

Elektromagnetische straling gedraagt zich als een transversale golf. Dit betekent dat zowel de elektrische als de magnetische veldcomponent loodrecht op de voortplantingsrichting staan. Wanneer over de polarisatie van een elektromagnetische golf wordt gesproken, wordt de polarisatie van de elektrische veldcomponent bedoeld. De magnetische veldcomponent staat loodrecht hierop. Een elektromagnetische golf kan lineair of circulair gepolariseerd zijn.

Door gebruik te maken van zowel verticaal als horizontaal lineair gepolariseerde golven, kan de bal worden onderscheiden van andere objecten op het veld. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het feit dat de bal puntsymmetrisch is. Verticaal gepolariseerde golven zullen dus constant dezelfde reflecties van de bal geven als horizontaal gepolariseerde golven. Voor spelers is dit uiteraard niet het geval, omdat de lengte van de spelers veel verschilt van de breedte. Bovendien bewegen de spelers, waardoor het verschil tussen de horizontaal- en verticaal gepolariseerde golven erg zal fluctueren. In figuur 6.6 is ter verduidelijking een speler en een bal afgebeeld. De verticale en horizontale lijn op de bal zijn gelijk aan elkaar in lengte. Bij de speler is dit uiteraard niet het geval.



Figuur 6.6 Onderscheid met behulp van gepolariseerde golven

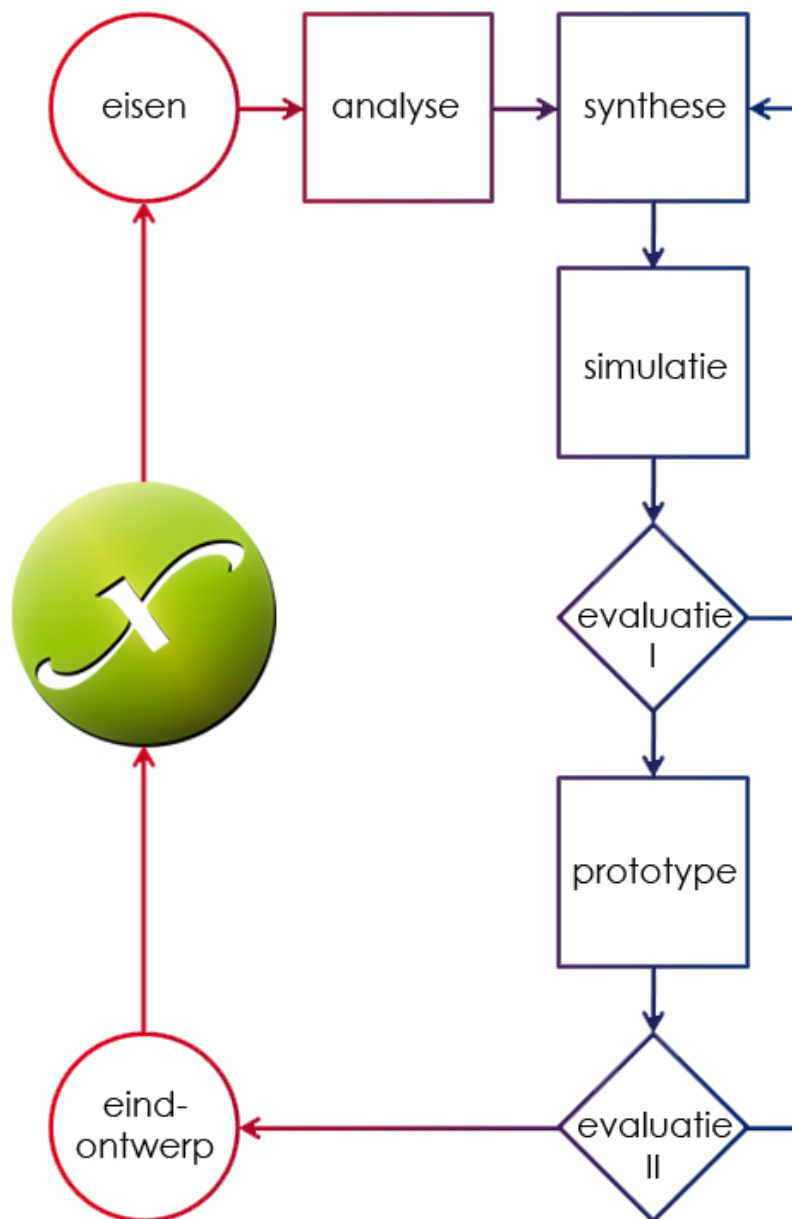
Deel II:

Antenne-ontwerp

7 Ontwerp van een microstrip patch-antenne

De microstrip patch-antenne speelt een belangrijke rol in de uiteindelijke prestaties van het detectiesysteem. Daarom dient het ontwerpproces van de antenne gestructureerd te zijn, opdat het eindproduct naar behoren functioneert. De methodologie van het ontwerpen vindt plaats volgens een vaste globale structuur, zij het voor elk ontwerp enigszins aangepast [10].

Het ontwerpproces die voor het ontwerp van de antenne wordt gehandhaafd is in figuur 7.1 weergegeven. In dit hoofdstuk zal elk onderdeel uit het ontwerpproces worden besproken.



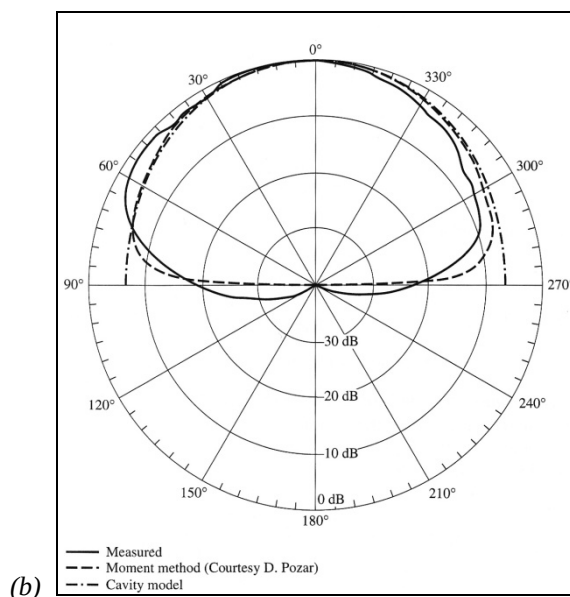
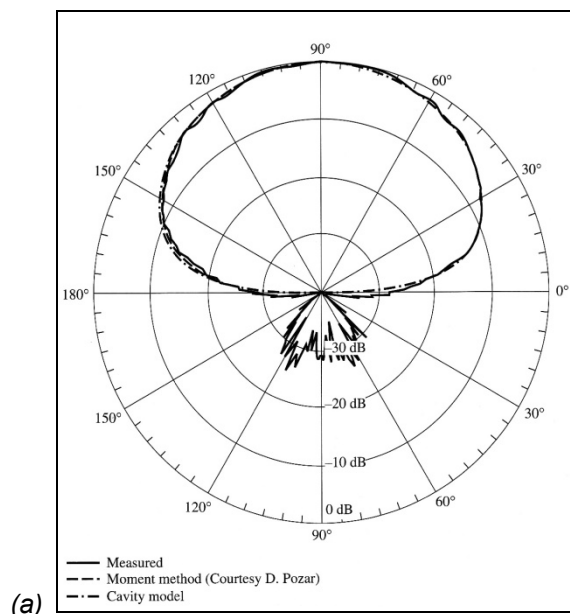
Figuur 7.1 Ontwerpproces van de microstrip patch-antenne

7.1 Eisen aan de antenne

Alvorens met het ontwerp te beginnen, dienen een aantal voorwaarden waar de antenne aan moet voldoen te worden vastgesteld.

7.1.1 Radiatiepatroon

Een van de belangrijke functies van de antenne, is het richten van signalen. Zoals eerder toegelicht in hoofdstuk 3, is het van belang dat de bundelbreedte breed genoeg is. Daarnaast moet de antenne zoveel mogelijk naar één kant stralen. In hoofdstuk 5 is geconcludeerd dat de microstrip patch-antenne uitermate geschikt is voor deze doeleinden. In figuur 7.2 is het stralingspatroon weergegeven van een rechthoekige microstrip patch-antenne. Uit de figuur blijkt dat deze patch inderdaad tegemoet kan komen aan de gestelde eisen wat betreft het stralingspatroon. De patronen weergegeven in figuur 7.2, zijn gemaakt met gemeten waarden en met verschillende simulatietechnieken.



Figuur 7.2

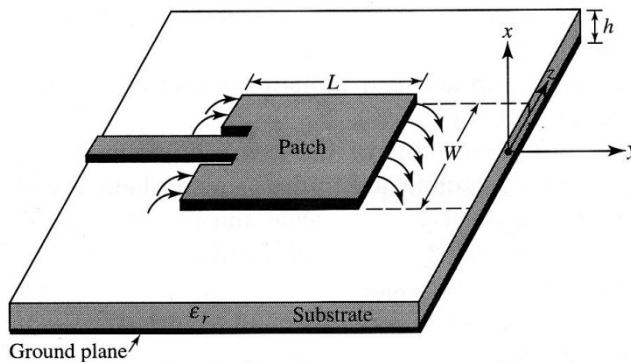
**Voorspelde en gemeten
E- en H-vlakken van een
rechthoekige microstrip
patch-antenne
(a) H-vlak ($\phi = 0^\circ$),
(b) E-vlak ($\theta = 90^\circ$).**

**De gegevens van deze
antenne luiden:**

$L = 0.906 \text{ cm}$
 $W = 1.186 \text{ cm}$
 $h = 0.1588 \text{ cm}$
 $y_0 = 0.3126 \text{ cm}$
 $\epsilon_r = 2.2$
 $f_0 = 10 \text{ GHz}$

(bron: [1])

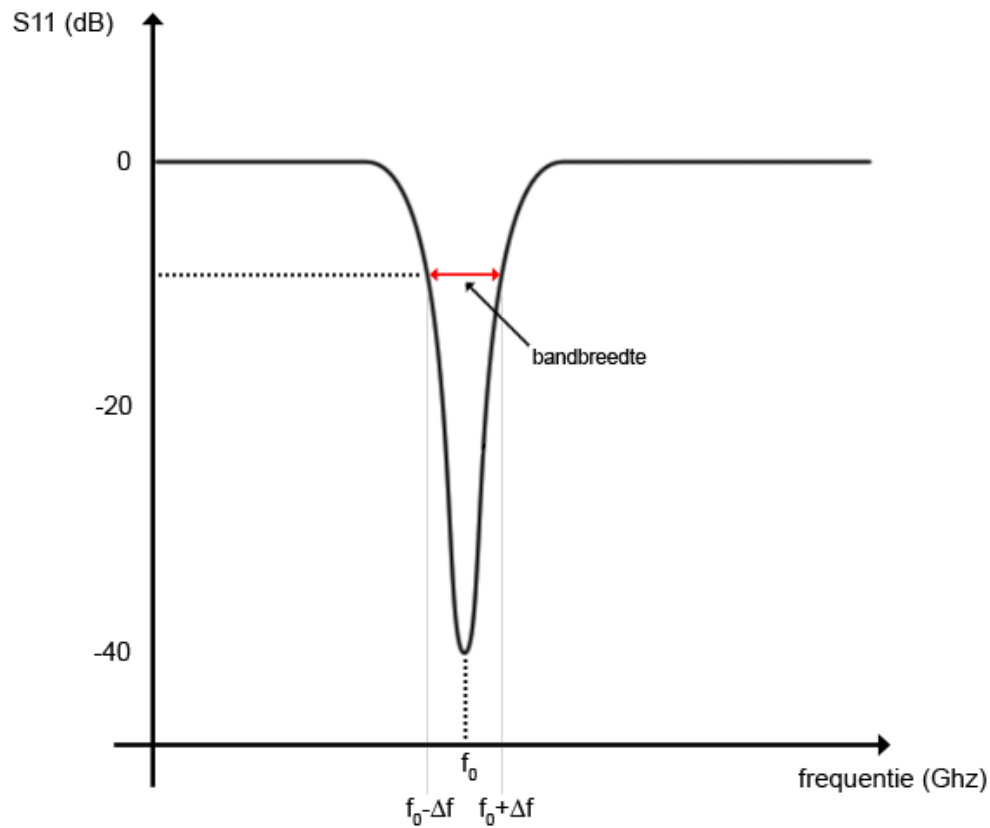
Het is buitengewoon ongewenst dat de toegepaste antenne naar achteren straalt (dat wil zeggen richting het publiek achter het doel). De mate waarin naar achteren wordt gestraald, wordt ook wel aangegeven met het front-to-back ratio. Hoe hoger het front-to-back ratio (meestal aangegeven in decibel), hoe meer richting het voetbalveld wordt gestraald. Een hoge front-to-back ratio beperkt zowel het vermogensverlies als de ongewenste reflecties. In figuur 7.2 is te zien dat de microstrip antenne toch wat straling naar achteren 'lekt'. Dit is te reduceren door de grondplaat van de antenne te vergroten. In figuur 7.3 is een microstrip antenne weergegeven. Hierin is aangegeven waar de grondplaat zich bevindt. Deze kan zonder enige complicatie worden vergroot.



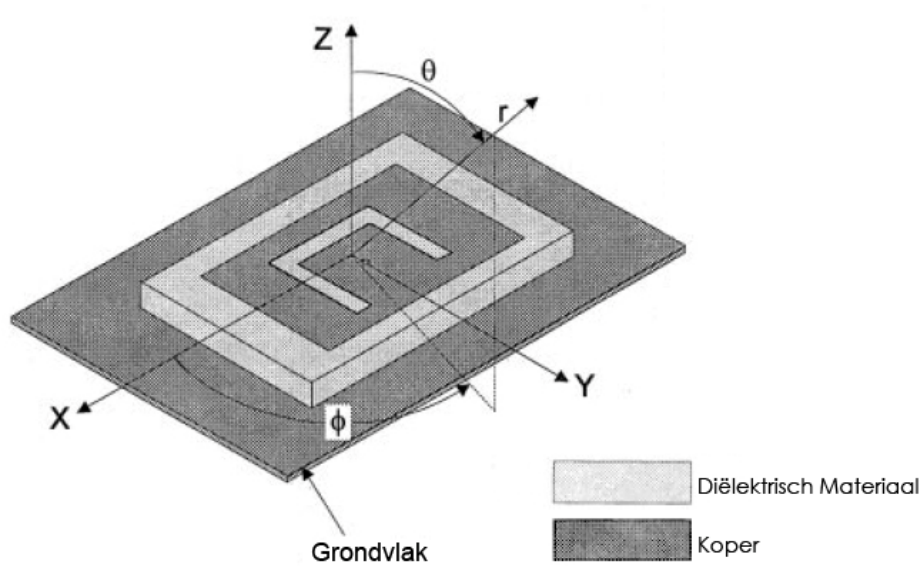
Figuur 7.3 Microstrip patch-antenne (bron: [1])

7.1.2 Werkfrequentie en bandbreedte

De radar zal werken op een bepaalde frequentie (de zogenoemde centrumfrequentie). Zo is in hoofdstuk 8 te lezen dat de werkfrequentie van de gebruikte radar bij het prototype 11 Ghz bedraagt. Omdat de bandbreedte van microstrip antennes erg smal is, dient de antenne nauwkeurig te worden ontworpen voor werking op de centrumfrequentie. In figuur 7.4 is een grafiek weergegeven van de S_{11} parameter, zoals deze typisch is voor deze antennes. Deze geeft aan hoeveel van het signaal wat door de transmissielijn wordt geleverd weer wordt teruggekaatst en dus wordt verloren (dit verschijnsel wordt nader toegelicht in 7.1.3). In de figuur is te zien dat op de centrumfrequentie f_0 de reflectie minimaal en de vermogenstransmissie dus optimaal is. Tevens is in de figuur de bandbreedte aangegeven. Deze frequentieband wordt de impedantie bandbreedte genoemd en is voor microstrip patch-antennes erg smal. De impedantie bandbreedte is afhankelijk van een groot aantal parameters van de patch (bijvoorbeeld de quality factor) en de manier waarop de antenne wordt gevoed (zie 7.2). In figuur 7.4 bedraagt de reflectiecoëfficiënt op de grenzen van de bandbreedte -10 dB. Vaak wordt een reflectiecoëfficiënt van -10 dB of -20 dB voor de bepaling van de impedantie bandbreedte gehanteerd. Voor antennes met een smalle bandbreedte, wordt deze bandbreedte ook wel uitgedrukt in percentages van de centrumfrequentie. De impedantie bandbreedte van microstrip patch-antennes is meestal slechts een aantal procent groot. Een kleine verschuiving van de werkfrequentie kan het systeem dus al onbruikbaar maken. Er bestaan diverse technieken om de impedantie bandbreedte aanzienlijk te vergroten. Een veel gebruikte methode is het etsen van een bepaalde vorm op de patch. In figuur 7.5 is een U-slot patch afgebeeld. De werking van de U-slot patch wordt uitgelegd en aangetoond in [31] en [34].



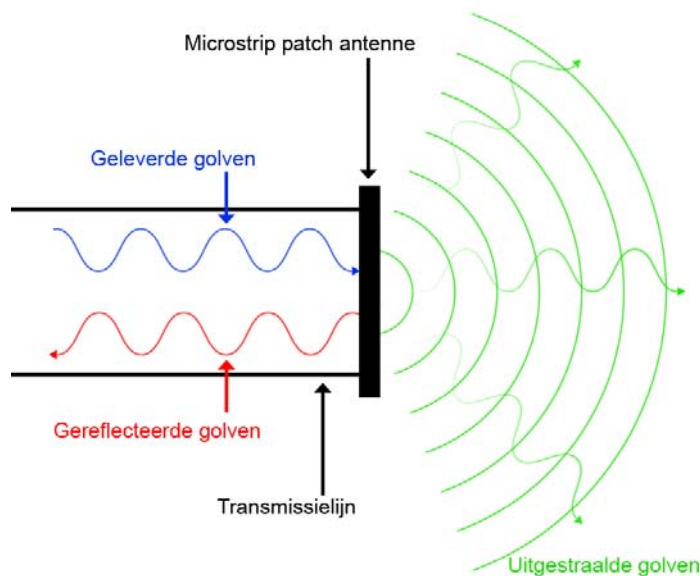
Figuur 7.4 Typische S11 parameter voor een microstrip patch-antenne



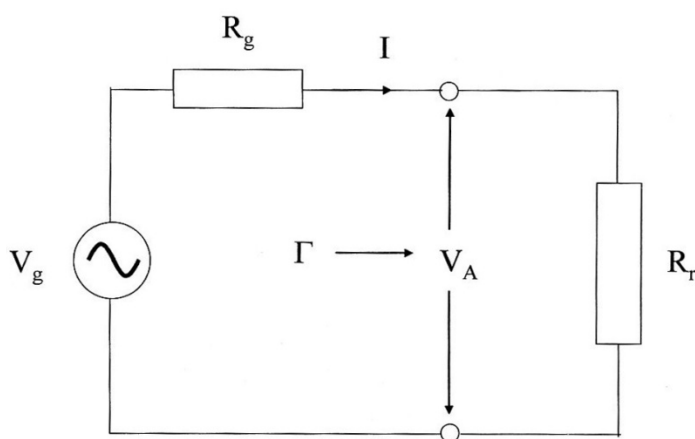
Figuur 7.5 U-slot microstrip patch-antenne. (bron: [31])

7.1.3 Maximale vermogensoverdracht

Het vermogen dat door de bron wordt geleverd dient door de antenne te worden uitgestraald. Een gedeelte van het vermogen dat aan de antenne wordt geleverd wordt echter ook terug gereflecteerd richting de bron. In figuur 7.6 wordt dit schematisch weergegeven. Om vermogensverliezen te beperken moeten de reflecties worden geminimaliseerd. Hiertoe dient de antenne te worden 'gematched' aan de bron die het signaal levert. Het principe van het matchen kan het best worden uitgelegd aan de hand van een gesimplificeerd model, zoals weergegeven in figuur 7.7.



Figuur 7.6 Geleverde, gereflecteerde en uitgestraalde golven



Figuur 7.7 Equivalente circuit voor het matchen van de antenne aan de generator

De antenne kan worden beschouwd als een complexe impedantie Z_A . Deze bestaat uit de resistentie R_A en de reactantie X_A :

$$Z_A = R_A + jX_A, \quad (7.1)$$

waarbij de resistantie R_A de dissipatie van de antenne representeert. De dissipatie wordt bepaald door de ohmse verliezen R_L , en de (gewenste) verliezen door de radiatie R_r (de radiatie weerstand). Bij het model in figuur 7.6 worden de reactantie en de ohmse verliezen verwaarloosd ($Z_A = R_r$) en is de antenne aangesloten aan een generator met (reële) impedantie V_g .

Het over de tijd gemiddelde vermogen dat door de generator wordt geleverd is

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ V_A \cdot I^* \}. \quad (7.2)$$

Door spanningsdeling toe te passen, kan de spanning V_A als volgt worden uitgedrukt:

$$V_A = \frac{R_r}{R_g + R_r} V_g. \quad (7.3)$$

Tevens geldt

$$I^* = I = \frac{V_A}{R_r}. \quad (7.4)$$

Formules 7.3 en 7.4 kunnen worden ingevuld in formule 7.2, waardoor geldt dat

$$P = \frac{1}{2} |V_g|^2 \left| \frac{R_r}{R_g + R_r} \right|^2 \frac{1}{R_r}. \quad (7.5)$$

Voor de antenne impedantie waarmee maximale vermogensoverdracht wordt gehaald, moet gelden dat

$$\frac{\partial P}{\partial R_r} = 0. \quad (7.6)$$

Door formule 7.5 in te vullen in formule 7.6 wordt gevonden dat de conditie voor maximale vermogensoverdracht luidt:

$$R_r = R_g, \quad (7.7)$$

hetgeen betekent dat de radiatie weerstand gelijk moet zijn aan de weerstand van de generator. In de netwerktheorie geldt dat de reflectie coëfficiënt, Γ , bekeken vanuit de poorten van de antenne als volgt luidt:

$$\Gamma = \frac{R_r - R_g}{R_r + R_g}. \quad (7.8)$$

Indien de conditie gegeven in formule 7.7 geldt, is de reflectie coëfficiënt gelijk aan nul, wat wil zeggen dat er geen reflectie is en de antenne dus is gematched. In de werkelijkheid wordt het vermogen van de bron naar de antenne geleverd via transmissielijnen. Deze zijn uiteraard niet verliesvrij en hebben een eigen karakteristieke impedantie. De meeste coax kabels voor netwerken en radiocommunicatie-apparatuur hebben een karakteristieke

impedantie van 50 ohm, [36]. De transmissielijnen zijn dan van invloed bij het matchen van de antenne.

7.1.4 Afmetingen en vermogen

De afmetingen van de microstrip antenne zijn doorgaans klein. Het vergroten van bepaalde afmetingen om de prestaties te verbeteren, zoals de dikte van het substraat of de grootte van de grondplaat, kan met de voorwaarde dat de esthetische normen niet worden aangetast. Hierin is veel flexibiliteit, omdat ruimte geen kritisch punt is in het ontwerp (in tegenstelling tot bijvoorbeeld een mobiele telefoon) en microstrip patch-antennes geen grote vormen aannemen.

Een kanttekening kan worden geplaatst ten aanzien van de beperkte capaciteit van microstrip antennes om hoge vermogens te hanteren. De bovengrens ligt ongeveer rond de 100 Watt [9]. De patch-antennes die ontworpen dienen te worden zullen echter niet in staat zijn zoveel vermogen te verwerken. Deze antenne zal onder dezelfde klasse vallen als de patch-antennes ontworpen op de afdeling van IRCTR. Deze antennes zijn in staat vermogens tot 2 Watt uit te stralen. De radar die bij het prototype wordt gebruikt werkt met een paraboolantenne (zie hoofdstuk 8). Deze heeft een zeer smalle stralingsbundel (zoals uitgelegd in 5.1.1) van ongeveer 5 graden (zowel elevatie als azimuth, zie bijlage 2) en straalt een vermogen uit van 4 mW. Door deze gegevens te extrapoleren, kan worden gevonden dat het uit te stralen vermogen niet meer dan 2 Watt zal bedragen, en daarmee dus binnen de grenzen valt van wat de patch-antenne aan kan.

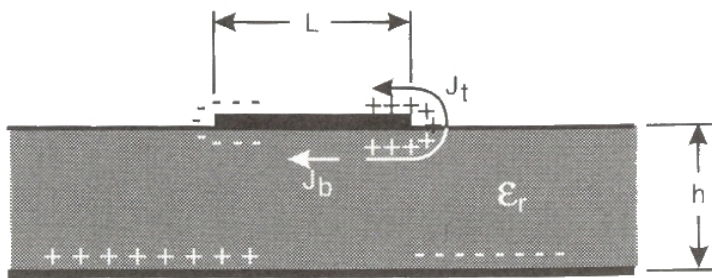
7.2 Analyse

Bij het ontwerp van een antenne moeten een aantal fundamentele parameters bepaald worden, zoals de afmetingen van de patch en de manier waarop de patch gevoed wordt. Bij de bepaling van deze parameters kan gebruik gemaakt worden van verschillende modellen die de werking van een patch-antenne beschrijven. De meest gebruikte modellen zijn het transmissielijnmodel, het cavitymodel en het fullwavemodel [1]. Het transmissielijnmodel is het meest eenvoudige model. Het geeft een goed fysisch inzicht in de werking van de patch, maar het is niet zo nauwkeurig als de andere modellen. Ook het cavitymodel geeft een goed inzicht in de fysische werking. Dit model is nauwkeuriger dan het transmissielijnmodel, maar ook complexer. Het fullwavemodel is het meest accuraat van de drie modellen, maar tevens het meest complexe model. Het voordeel van dit model is dat het zowel goed te gebruiken is voor enkele elementen, als ook voor arrays van antennes. In deze paragraaf worden vooral het transmissielijnmodel en het cavitymodel gebruikt om de werking van de patch te beschrijven. Ook zullen de modellen gebruikt worden om te laten zien hoe de afmetingen van patch op een goede manier bepaald kunnen worden. Ten slotte zullen verschillende voedingsmethoden besproken worden.

7.2.1 Stralingsmechanisme van een patch-antenne

Om te begrijpen hoe verschillende formules met betrekking tot bepaalde parameters tot stand zijn gekomen is het belangrijk dat het stralingsmodel bekend is. De verschillende formules die gebruikt worden in de analyse zijn afkomstig uit [1], [9] en [30].

Als de patch gevoed wordt door een bron, dan zal er een ladingsverdeling plaatsvinden in de patch, zoals weergegeven in figuur 7.8. In deze figuur is te zien dat er een ladingsverdeling is op de patch, maar ook op het grondvlak. De ladingsverdeling wordt beïnvloed door twee krachten; een aantrekkende kracht en een afstotende kracht. De aantrekkende kracht werkt tussen de tegengestelde ladingen aan de onderkant van de patch en boven de grondplaat. Hierdoor zal een elektrische stroomdichtheid J_b ontstaan in het dielektricum. De afstotende kracht ontstaat tussen de gelijke ladingen aan de zijanten van de patch. Door deze afstotende werking zal een deel van de lading om de rand heen gedrukt worden naar de bovenkant van de patch. Hierdoor ontstaat een elektrische stroomdichtheid J_t aan de bovenzijde van de patch.



Figuur 7.8 De ladingsverdelingen binnen een microstrip (Bron: [9])

De stroomdichtheid J_t zal een magnetisch veld veroorzaken dat tangentieel staat op de zijanten patch. In de praktijk zal dit veld echter zeer klein zijn, doordat de stroomdichtheid J_t ook zeer klein is. In het ideale geval is dit veld te verwaarlozen, waardoor er geen magnetisch veld tangentieel staat op de randen. De patch kan dus gemodelleerd worden als een patch met vier magnetische vlakken, aan elke kant van de patch.

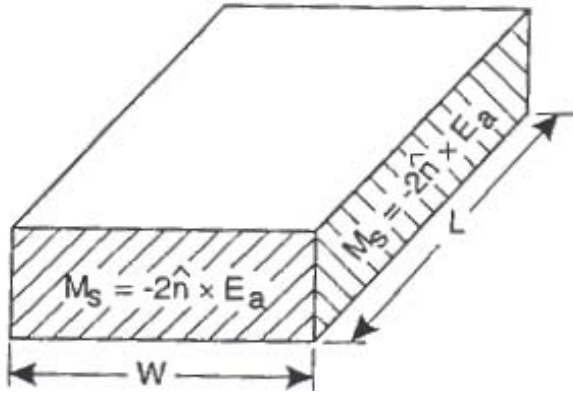
De veldvariaties in de hoogterichting kunnen ook als constant benaderd worden, omdat de hoogte vele malen kleiner is dan de golflengte. Er zal dus alleen een elektrisch veld zijn dat normaal staat op de patch. Daarom kan de patch gemodelleerd worden met een elektrisch vlak aan de boven- en onderkant. Het overgebleven model is een holte met vier magnetische wanden aan elke zijkant en twee elektrische wanden aan de boven- en onderkant. De vlakken kunnen worden beschreven met behulp van de volgende vergelijkingen:

$$\vec{J}_s = \hat{n} \times \vec{H}_a, \quad (7.9)$$

$$\vec{M}_s = -\hat{n} \times \vec{E}_a. \quad (7.10)$$

In [9] wordt beschreven dat de stroomdichtheid J_t aan de bovenkant en de stroomdichtheden J_s aan de zijanten verwaarloosd kunnen worden. Uiteindelijk blijft een model over zoals weergegeven in figuur 7.9. Door de aanwezigheid van de grondplaat verdubbeld de magnetische stroomdichtheid M_s . De nieuwe formule voor M_s is

$$\vec{M}_s = -2\hat{n} \times \vec{E}_a. \quad (7.11)$$



Figuur 7.9 De magnetische stroomdichtheden aan de oppervlakken van de holte onder de patch. (Bron: [9])

Voor de vlakken met de afmetingen W bij h , dus de breedtevlakken, geldt voor E_a

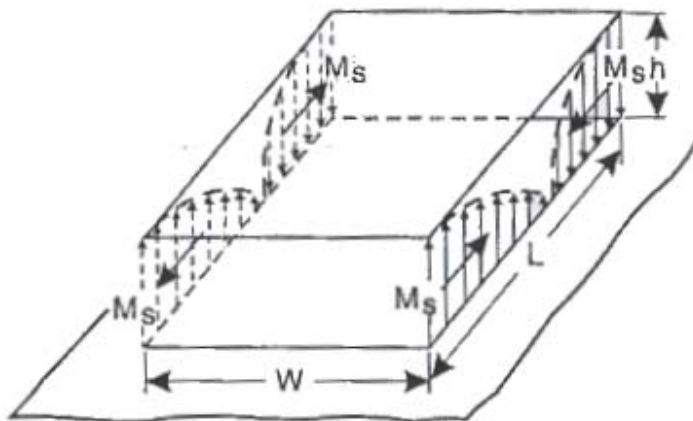
$$\vec{E}_a = \hat{z}E_0. \quad (7.12)$$

Voor de andere vlakken met de afmetingen L bij h , dus de lengtevlakken, geldt dat

$$\vec{E}_a = -\hat{z}E_0 \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right). \quad (7.13)$$

Door de lengte van de patch L zo te bepalen dat het gelijk is aan de halve golflengte van de gewenste centrumfrequentie ontstaat een stroomdichtheid M_s , zoals weergegeven in figuur 7.10. Langs de lengte van de patch zijn twee gelijke magnetische stroomdichtheden met tegengestelde richting. Er is dus geen resulterende magnetische stroomdichtheid en daarom ook geen elektrisch veld in dit oppervlak. Omdat er geen resulterend elektrisch veld is, zal er aan deze vlakken ook geen radiatie plaatsvinden.

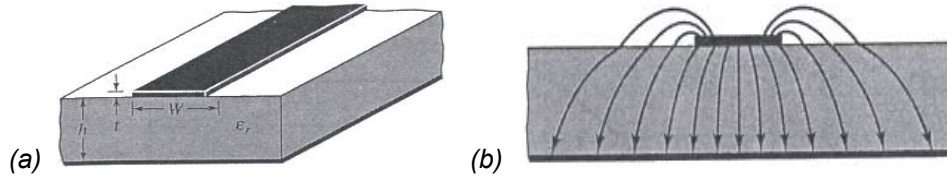
Voor de breedtevlakken geldt juist dat de magnetische stroomdichtheid uniform gericht is naar een zijde. Hierdoor is hier wel een resulterend elektrisch veld en dus vindt er aan deze vlakken wel radiatie plaats. Deze twee vlakken vormen samen het radiatiemechanisme van de patch-antenne.



Figuur 7.10 De richtingen van de magnetische stroomdichtheden en van het elektrisch veld. (Bron: [9])

7.2.2 Analyse afmetingen patch-antenne

Zoals vermeld in 7.2.1 heeft een patch-antenne in feite maar twee stralende vlakken. Daarom kan patch-antenne gezien worden als twee stralende elementen, gescheiden door een transmissielijn van lengte L . Daarom is het transmissielijnmodel ook een goed bruikbaar model voor de bepaling van de afmetingen. In figuur 7.11a is er een weergave gegeven van een microstrip transmissielijn.



Figuur 7.11 Weergave van een microstriplijn (a) en de elektrische veldlijnen in de lucht en het substraat (b). (bron: [1])

De dimensies van de patch zijn niet oneindig en daarom lopen de velden niet geheel zoals beschreven bij het radiatiemechanisme. In de praktijk vindt er in de velden aan de randen fringing plaats. Dit is te zien in figuur 7.11b. Tevens is in dit figuur te zien dat een deel van het elektrische veld door de lucht boven de patch loopt. Dit maakt de analyse van de patch ingewikkelder, omdat er bij de modellering van het elektrische veld rekening gehouden moet worden met de overgang tussen twee verschillende diëlectrica. Om goede analyse mogelijk te maken kan gebruik gemaakt worden van een effectieve diëlectrische constante, ϵ_{reff} . Deze constante is iets kleiner dan de diëlectrische constante van het medium en wordt beschreven door:

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (7.14)$$

De lengte van de patch moet gelijk zijn aan de halve golflengte, zoals vermeld. De golflengte is afhankelijk van de resonantiefrequentie en wordt gegeven door de volgende formule:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (7.15)$$

De lichtsnelheid c_0 en dus de snelheid waarmee een elektromagnetische golf zich voortplant in vacuüm is gelijk aan:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (7.16)$$

In de patch verplaatst de golf zich echter niet in vacuüm maar in een medium. Dus de snelheid van de golf in de patch wordt gegeven door

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}} \epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (7.17)$$

Voor de lengte L van de patch geldt dus

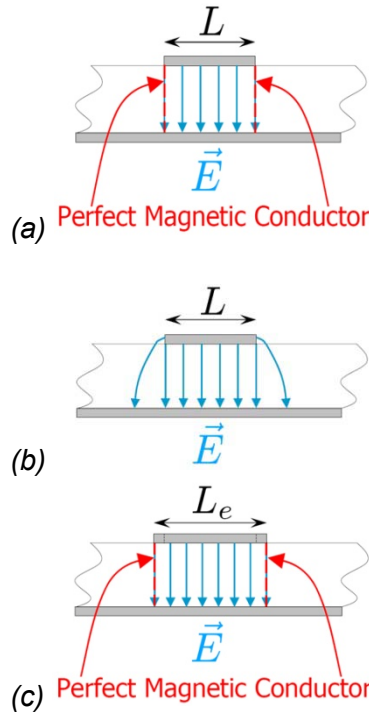
$$L = \frac{1}{2} \lambda = \frac{1}{2} \frac{c_0}{f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (7.18)$$

Het transmissielijnmodel gaat er vanuit dat de stralende elementen aan de uiteinden perfecte magnetische geleiders zijn, zoals te zien in figuur 7.12a. In werkelijkheid staan de elektrische veldlijnen niet alleen normaal op de patch, omdat er ook veldlijnen zijn die ontstaan aan de zijkant van de patch. Dit is weergegeven in figuur 7.12b. Door gebruik van een effectieve lengte kunnen deze veldlijnen toch meegenomen worden in het model. De patch is aan beide einden verlengd met een lengte ΔL . Op deze wijze stemt dit model ook overeen met het model dat is gebruikt om het radiatiemechanisme te verklaren. De formule voor de effectieve lengte, L_{eff} wordt als volgt gegeven door Balanis:

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L \quad (7.19)$$

Figuur 7.12

Modellering effectieve lengte. Het transmissielijnmodel veronderstelt perfecte magnetische geleiders aan beide uiteindes (a). In werkelijkheid lopen de veldlijnen niet alleen recht onder de patch (b), gebruik van een effectieve lengte maakt het transmissielijnmodel toch bruikbaar (c). (bron: [26])



Om ΔL te bepalen kan gebruikt gemaakt worden van formule 7.20

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (7.20)$$

De benodigde lengte voor de patch kan gevonden worden door 7.18 en 7.19 te combineren:

$$L = L_{\text{eff}} - 2\Delta L = \frac{1}{2} \frac{c_0}{f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} - 2\Delta L \quad (7.21)$$

Voor de breedte van patch wordt in Balanis [1] de volgende formule gegeven:

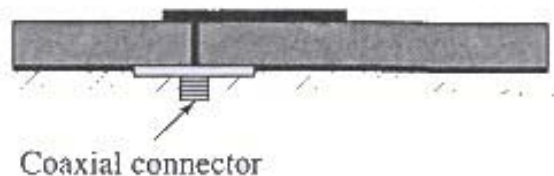
$$W = \frac{c_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (7.22)$$

7.2.3 Voedingsmethodes

Er zijn verschillende manieren waarop patch-antennes gevoed kunnen worden, de voedingsmethodes. In deze paragraaf zullen vier populaire methodes behandeld worden. Allereerst wordt er gekeken naar voeding door middel van een coaxkabel. Vervolgens wordt voeding door middel van een microstriplijn beschreven. Sleufvoeding wordt daarna behandeld. Tot slot zal er gekeken worden naar nabijheidsvoeding.

Voeding met een coaxkabel

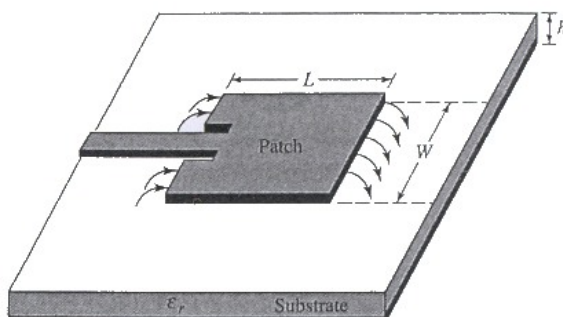
Coaxkabels worden veel gebruikt om hoogfrequente signalen te zenden, zoals televisiesignalen. Ze bestaan uit een metalen kern, met op korte afstand een metalen omhulsel. De kern wordt verbonden met de patch, terwijl het omhulsel vast wordt gesoldeerd aan de grondplaat, dit is te zien in figuur 7.13. De voordelen van deze methode zijn dat het makkelijk is om te produceren en dat het eenvoudig is om impedantie van de patch te matchen met die van de kabel. Nadelen zijn de smalle bandbreedte en de complexiteit die modellering met zich meebrengt. [9]



Figuur 7.13 Coaxiale voeding (bron: [1])

Voeding door een microstriplijn

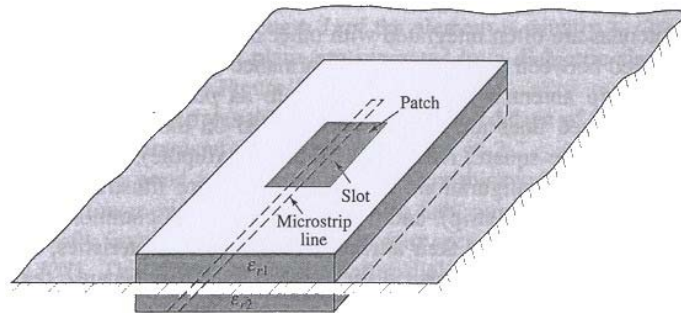
Voeding door middel van een microstriplijn is eenvoudig te realiseren. De strip kan evenals de patch gewoon uit de printplaat geëtst worden. In figuur 7.14 is een weergave gegeven van de feeding door middel van een microstriplijn. Ook met deze methode is het eenvoudig om de ingangsimpedantie te matchen met impedantie van de feedlijn, in dit geval de strip. De afmetingen van de strip zijn eenvoudig aan te passen, opdat de gewenste impedantie wordt bereikt. Evenals de coaxfeed heeft ook deze methode een smalle bandbreedte. Een ander nadeel is het feit dat grote golven zich zullen verplaatsen in het oppervlak van de patch [9].



Figuur 7.14 Voeding met een microstriplijn (bron: [1])

Sleufvoeding

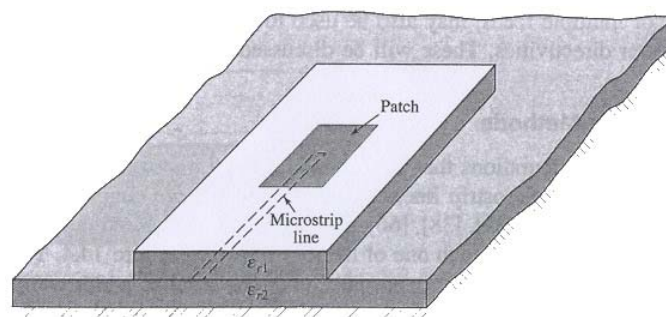
Voor sleufvoeding moet de antenne bestaan uit twee verschillende substraten, die wordt gescheiden door een grondvlak. Het onderste substraat dient als voedingslijn. Door een sleuf in de grondplaat kan koppeling plaatsvinden tussen de feedlijn en de patch bovenop het bovenste substraat. In figuur 7.15 is dit weergegeven. Deze manier van voeden is eenvoudig te modelleren. Het heeft bovendien als voordeel dat de verschillende onderdelen los van elkaar ontworpen kunnen worden. Een ander voordeel is dat ongewenste straling van de voedingslijn beperkt wordt. Een groot nadeel van deze methode is dat het moeilijk is om te produceren. Dit zal dus ook hogere kosten met zich meebrengen. [9]



Figuur 7.15 Sleufvoeding (Bron: [1])

Nabijheidsvoeding

Bij nabijheidsvoeding wordt ook gebruikt van twee verschillende substraten. In dit geval bevindt de voedingslijn zich tussen de substraten, die zich beide boven de grondplaat bevinden. In figuur 7.16 is een weergave gegeven van de nabijheidsvoeding. Ook dit model is eenvoudig te modelleren. Ook het matchen van de impedantie is eenvoudig te doen. Het grote voordeel van dit model is dat de breedte bij deze methode groter is dan bij de andere methodes, tot wel 13%. Het nadeel is net als bij sleuf feeding de complexiteit die komt kijken bij de productie van een dergelijke antenne.



Figuur 7.16 Nabijheidsvoeding (bron: [1])

7.3 Synthese

In de vorige paragraaf zijn verschillende formules naar voren gekomen om de afmetingen van de patch te bepalen. Voor het ontwerp zijn er echter ook een aantal parameters die vrij gekozen kunnen worden, zoals de hoogte van het substraat en het gebruikte substraat. In deze paragraaf zal een ontwerp gemaakt worden van een patch-antenne. Er wordt begonnen met het de keuze voor het gebruikte substraat en de hoogte daarvan. Vervolgens worden de afmetingen van de patch bepaald. Tot slot wordt de keuze voor voedingsmethode gemaakt.

7.3.1 Substraat

Substraten met een lage diëlectrische constante zorgen ervoor dat het uitgestraalde vermogen geoptimaliseerd wordt [9]. Een substraat met een lage diëlectrische constante, dat ook al gebruikt wordt binnen IRCTR is Rogers RO4003C, waarvoor geldt $\epsilon_r = 3,38$ op een frequentie van 10 Ghz. De benodigde werkfrequentie is 11 Ghz en dus zal de diëlectrische constante niet veel verschillen van 3,38 [24]. Aangenomen wordt dat

$$\epsilon_r = 3,38.$$

Ook de hoogte van het substraat dient gespecificeerd te worden. Bij een dikker substraat zal het uitgestraalde vermogen toenemen. Ook de impedantiebandbreedte zal toenemen. Bovendien zorgt een dikker substraat ook voor een sterkere antenne. De toename van het uitgestraalde vermogen is erg gunstig voor het systeem, omdat er vrij veel vermogen uitgestraald moet worden voor een kleine patch. De nadelen zijn de toename van gewicht en grotere oppervlakte verliezen. Voor de antenne in het baldetectie systeem echter is het gewicht niet van belang. Daarom is met het ook op het uitgestraalde vermogen en de impedantiebandbreedte gekozen voor een dik substraat. Voor RO4003C zijn er verschillende standaardhoogten beschikbaar. De dikste standaardhoogte is 1,524 mm en daarom zal deze hoogte gebruikt worden in het ontwerp. Dus voor de hoogte geldt

$$h = 1,524 \text{ mm.}$$

7.3.2 Afmetingen patch

Voor de afmetingen van de patch kunnen de formules gebruikt worden, zoals die zijn afgeleid in 7.2.2.

Allereerst moet de breedte van de patch bepaald worden. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van formule 7.22. Invullen van de hierboven genoemde waarden voor f_r en ϵ_r geeft voor de breedte

$$W = 9.2 \text{ mm.}$$

Om de lengte van de patch te bepalen moet eerst het lengteverschil ΔL bepaald worden zoals beschreven in 7.2.2. Voor het lengteverschil moet eerst de effectieve diëlectrische constante ϵ_{reff} bepaald worden. Door het invullen van formule 7.14 wordt hiervoor de waarde $\epsilon_{\text{reff}} = 2.88$ gevonden. Door deze waarde te gebruiken in formule 7.20 wordt voor het lengteverschil gevonden: $\Delta L = 0,7 \text{ mm}$. Nu kan de werkelijke lengte van de patch bepaald worden met formule 7.21. Invullen geeft:

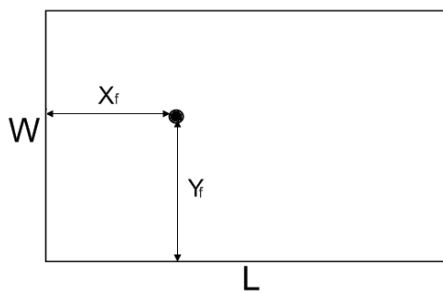
$$L = 6.63 \text{ mm.}$$

Alle afmetingen van de patch zijn nu bekend en kunnen dus gebruikt worden voor simulatie van de uiteindelijke patch.

7.3.3 Voedingsmethode

In paragraaf 7.2.3 zijn de verschillende mogelijkheden om de patch te voeden besproken. Er is besloten om in voor de patch-antenne gebruik te maken van een coaxiale voeding. Deze manier van voeden heeft de voorkeur boven nabijheid- en sleufvoeding, omdat het eenvoudiger is om te produceren. Er kan bij een coaxiale voeding een gaatje geboord worden in de printplaat, terwijl bij de andere twee methoden de verschillende lagen apart behandeld dienen te worden. Bovendien hebben nabijheid- en sleufvoeding geen verdere doorslaggevende eigenschappen. De hogere bandbreedte die een nabijheidvoeding levert, is voor een FMCW radar niet benodigd. Ook voor microstripvoeding is niet gekozen, omdat het eigenlijk voor dit systeem een omslachtige manier is. Er gaat dan een draadje van de radarhardware naar het begin van de microstrip. Microstripvoeding is meer geschikt binnen geïntegreerde systemen, zoals een mobiele telefoon. Coaxiale voeding daarentegen is eenvoudig aan te sluiten op de hardware van de radar. Tevens is het matchen van de impedantie heel eenvoudig met een coaxiale voeding.

Voor het matchen van de impedantie is het van belang op welke punt in de patch de voeding wordt aangebracht. In [9] wordt een eenvoudige manier beschreven om de locatie van het voedingspunt te bepalen. De plaats van het voedingspunt is schematisch weergegeven in figuur 7.17. De afstand in de lengte wordt aangegeven met x_f en de afstand in de breedte met y_f .



Figuur 7.17 Schematische weergave van de plaats van het voedingspunt

De positie van y_f is vrij te bepalen, maar de beste plek is $y_f = 0,5W$, omdat op dit punt de excitatie van golven langs W minimaal is. Voor de bepaling van de plaats van x_f is minder eenvoudig. Een mogelijke oplossing om de positie te bepalen, is door gebruik te maken van de volgende vergelijking:

$$R_{in} = R_r \cos^2\left(\frac{\pi x_f}{L}\right). \quad (7.23)$$

Hiervoor dient wel de radiatieweerstand R_r bepaald te worden. Een eenvoudigere manier is het gebruiken van de directe formule

$$x_f = \frac{L}{2\sqrt{\epsilon_{reff}(L)}}, \quad (7.24)$$

waarbij $\epsilon_{reff}(L)$ gevonden kan worden door W te vervangen door L in vergelijking 7.14. Door de waarden in te vullen in 7.24 wordt voor de lengtepositie, x_f van het voedingspunt gevonden:

$$x_f = 1.98 \text{ mm.}$$

Voor de positie in de breedte y_f geldt:

$$y_f = 4.6 \text{ mm.}$$

7.4 Simulatie

Nu de afmetingen van de patch en de positie van het voedingspunt bekend zijn moet de volgende stap in het ontwerpproces uitgevoerd worden: de simulatie. De functie van de simulatie is om te controleren of de waarden, zoals die zijn bepaald in paragraaf 7.3 ervoor zorgen dat de gewenste eisen ingelost worden. Er zal dus middels de simulatie gekeken moeten worden naar het stralingspatroon, de centrumfrequentie en de bandbreedte van de antenne. Indien de simulatieresultaten overeenkomen met de eisen kan verder gegaan worden met de productie van een prototype. Als de resultaten niet overeenkomen, dan zullen de parameters uit de vorige paragraaf zodanig aangepast worden, dat het wel overeenkomt.

In deze paragraaf zal gekeken worden naar verschillende softwarepakketten die gebruikt kunnen worden voor de simulatie. Daarna zal worden gekeken naar simulatieresultaten. Deze resultaten zullen niet van de patch zijn die in 7.3 is ontworpen, maar van een soortgelijke patch die is ontworpen door IRCTR. Tot slot zal een evaluatie gemaakt worden van de door simulatie verkregen resultaten.

7.4.1 Softwarepakketten

Er zijn verschillende softwarepakketten op de markt die een simulatie kunnen geven van de elektromagnetische effecten, die een patch-antenne met zich meebrengt. De verschillende pakketten berusten niet allemaal op hetzelfde principe. Zoals al vermeld in 7.2 zijn er verschillende analytische modellen. De simulatieprogramma's maken meestal gebruik van het fullwavemodel.

Een programma dat vaak gebruikt wordt voor simulatie is CST Microwave Studio. In dit programma kunnen verschillende methoden gekozen worden om een simulatie te maken. Deze methoden zijn Time Domain Finite Integration, Finite Integration Frequency Domain en The Integral Equation [5].

Een andere programma dat veel gebruikt wordt is FEKO. FEKO maakt gebruik van de Method of Moments, waarbij ook een fullwavemodel gebruikt wordt. De Method of Moments kan gebruikt worden om de differentieële vergelijkingen op te lossen, zodat een voorspelling gemaakt kan worden van de straling in de ruimte.

Een programma dat veel eenvoudiger werkt is PCAAD. Bij dit programma kan gekozen worden voor een patch-antenneconfiguratie en vervolgens kunnen de parameters ingevoerd worden. Er kan keuze gemaakt worden tussen verschillende plots van het stralingspatroon en ook de impedantie.

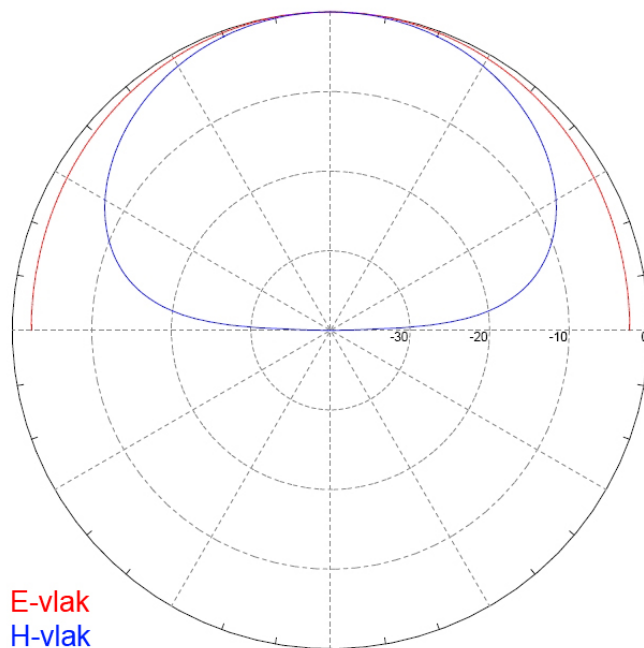
7.4.2 Simulatieresultaten

De eerste twee softwarepakketten zoals hierboven beschreven vergen enige ervaring om mee te kunnen werken. Het is niet eenvoudig om een model op te stellen in deze software. Het kost veel tijd om te leren werken met deze softwarepakketten. Omdat er te weinig tijd beschikbaar is, zal er geen simulatie gemaakt worden van de patch zoals ontworpen in paragraaf 7.3.

Wel is er met PCAAD een korte simulatie gedraaid. Dit programma maakt gebruik van het cavitymodel en is dus niet optimaal. Zo wordt gevonden dat de centrumfrequentie van de antenne ligt op 10.4 GHz. Dit wijkt nogal af van de gewenste centrumfrequentie, maar door slechts een kleine verandering toe te brengen in de lengte van de patch, wordt al een centrumfrequentie bereikt van 11.002 GHz. Voor de lengte van de patch geldt dan

$$L = 6.15 \text{ mm.}$$

De resultaten wat betreft het stralingspatroon zijn niet veelzeggend, omdat deze precies zo zijn als beschreven door het cavitymodel, zoals weergegeven in Balanis. In figuur 7.18 is het E- en H-vlak weergegeven, zoals gesimuleerd met PCAAD.



Figuur 7.18 Stralingspatronen microstrip patch-antenne, gesimuleerd met PCAAD

7.4.3 Evaluatie

De waarden zoals die bepaald zijn bij de synthese bleken bij de (weliswaar zeer eenvoudige en onbetrouwbare) simulatie niet te leiden tot de gewenste eigenschappen van de antenne. Door de lengte van de patch enigszins aan te passen is toch de gewenste frequentie bereikt. Uiteindelijk zal voor het ontwerp gekeken moeten worden naar de andere eigenschappen, zoals de impedantie en het stralingspatroon. Als deze ook niet zo zijn als gewenst dan zullen ze aangepast worden.

7.5 Prototype

Zodra het theoretische ontwerpproces is afgerond en de simulaties zijn geëvalueerd wordt alvorens het product in grote aantallen wordt geproduceerd, eerst een aantal prototypen vervaardigd. De productie van de patch-antenne is niet perfect: kleine afwijkingen in afmetingen en materiaaleigenschappen is onvermijdelijk. Bovendien kunnen er effecten optreden waar geen rekening mee is gehouden in de simulaties. Daarom is het gebruikelijk om een ontwerp in veelvoud te produceren, met kleine variaties in afmetingen.

De antennes worden vervolgens onderworpen aan metingen. De metingen worden verricht in speciale kamers. Deze kamers zijn volledig geïsoleerd om invloeden van andere apparaten die stralen te voorkomen. Bovendien zijn de wanden van een dergelijke meetkamer bekleed met radar absorberende materialen. Dit is om de reflectie van de golven via de wanden te minimaliseren, omdat deze de metingen foutief beïnvloeden.

Als de metingen voldoen aan de eisen kan de patch-antenne op grote schaal worden gefabriceerd.

Deel III:

Het prototype

8 Het prototype

Voor verschillende doeleinden is het van belang dat er een prototype van het systeem wordt gemaakt. Vaak wordt bij het ontwerpen van een systeem of product gebruik gemaakt van modellen van de realiteit. In de praktijk zal moeten blijken of de modellen voldoende rekening houden met de verschillende factoren. Daarom is het belangrijk dat er een prototype ontwikkeld wordt, waaraan metingen gedaan kunnen worden om te bepalen of het systeem aan de gewenste eisen voldoet. Een andere reden voor de productie van een prototype is om te bewijzen dat het beoogde concept werkt.

Ook bij het prototype dat is ontwikkeld voor Maxad staan deze twee punten centraal. Ten eerste is het belangrijk voor de software van MaxSoft dat de gebruikte algoritmes kunnen worden getest aan de hand van echte meetwaarden. Daarnaast heeft het prototype als functie te laten zien dat het mogelijk is om een bal te herkennen en te volgen met behulp van radartechnologie.

In paragraaf 8.1 wordt allereerst een beschrijving gegeven van het gebruikte prototype. Daarna wordt in paragraaf 8.2 een vergelijking gemaakt tussen het systeem zoals dat ontworpen is en het prototype dat gebruikt wordt. In paragraaf 8.3 wordt ten slotte een conclusie getrokken over het prototype.

8.1 Het gebruikte prototype

Voor de software was het van belang dat er zo snel mogelijk een prototype van het systeem beschikbaar was, omdat de software getest moet worden aan de hand van echte metingen. Daarom is besloten gebruik te maken van reeds beschikbare onderdelen, ook al verschillen deze van de ideale onderdelen. In deze paragraaf zullen de verschillende onderdelen van het systeem beschreven worden.

8.1.1 De radar

Voor het prototype is gebruik gemaakt van FMCW radars die beschikbaar zijn gesteld door IRCTR. De werking van dit type radar is reeds beschreven in paragraaf 4.1.3. Alle specificaties van de radar worden opgesomd in bijlage I. De sweeptijd wordt ingesteld op 11,7 ms en de frequentiesweep op 1 GHz. Dit geeft de radar een bereik van 38 meter. Dit bereik is meer dan voldoende, omdat de radar gepositioneerd is in een ruimte met een lengte van ongeveer 18 meter. Dit vormt geen probleem, omdat alle objecten buiten een bepaalde afstand eenvoudig weg gefilterd kunnen worden. De resolutie van de radar bij deze instellingen is 20 cm. Ook dit is ruim voldoende om een werkend prototype te produceren.

8.1.2 De antenne

De antenne die gebruikt wordt door de radar in het prototype zijn paraboolantennes, zoals weergegeven in figuur 8.1. In bijlage I worden ook enkele eigenschappen van deze antenne genoemd. Het principe van de antenne is al nader uitgelegd in paragraaf 5.1.1. Zoals vermeld in die paragraaf hebben deze antennes vaak een zeer smalle bundel. Ook voor deze antenne geldt dat met een bundel van 4.9 graden in elevatie en 5.4 graden in azimuth. Het is bij de metingen van belang dat de bal continu zichtbaar is. Om de bal in de smalle bundel te houden, wordt gebruik gemaakt van een gordijnrail waaraan de bal met een touwtje is bevestigd.



Figuur 8.1 De paraboolantenne zoals gebruikt in het prototype

8.1.3 De bal

De bal die wordt gebruikt in het prototype is een plastic bal die is bekleed met aluminiumtape. In hoofdstuk 6 is uitgelegd waarom bekleding met aluminiumtape de bal beter zichtbaar maakt voor de radar. De aluminiumtape is vervolgens wit geverfd om het voor de MaxImage ook nog mogelijk te maken de bal te detecteren op foto's. In figuur 8.2 is te zien hoe de getapete bal bevestigd is aan de gordijnrail.



Figuur 8.2 De bal bekleed met aluminiumtape bevestigd aan een gordijnrail.

8.2 Verschillen tussen het prototype en het ontworpen systeem

Eerder is al vermeld dat niet alle onderdelen van het ontwerp zijn gebruikt in het prototype. In het systeemontwerp wordt gebruik gemaakt van patch-antennes, terwijl de radars in het prototype gebruik maken van paraboolantennes. Van beide antennes worden de eigenschappen beschreven in hoofdstuk 5. Het belangrijkste verschil tussen beide antennes is de bundelbreedte. Een patch-antenne heeft een hele wijde bundel, terwijl een paraboolantenne slechts een smalle bundel heeft. Dit heeft gevolgen voor de mate waarin de software ontwikkeld kan worden.

8.2.1 Mogelijkheden prototype

Een aantal algoritmes die door de software van Maxsoft gebruikt worden, kunnen ook getest worden met een smalle bundel. De herkenning van de bal kan gewoon getest worden. Het algoritme dat de bal herkent vergelijkt verschillende radarreflecties om te bepalen of een object een bal is. Voor het testen van dit algoritme is de breedte van de bundel dus onbelangrijk, het gaat er enkel om dat de bal continu zichtbaar is voor de radar. Voor de ontwikkeling van het werkelijke systeem moet er rekening gehouden worden met het feit dat de antenneversterking van een paraboolantenne groter is dan die van een patch-antenne. De invloed van ruis op de metingen zal dus groter worden.

Ook het testen van het trackingsalgoritme dat wordt gebruikt door MaxSoft is mogelijk met het prototype. Het trackingsalgoritme maakt ook gebruik van meerdere radaropnames om de route van de bal te bepalen. Voor dit algoritme maakt het ook niet uit dat de bundel zeer smal is, omdat een radar met een brede bundel ook alleen maar de loodrechte afstand tot de radar kan bepalen.

8.2.2 Beperkingen prototype

De smalle bundel van de paraboolantenne brengt ook beperkingen mee met betrekking tot het testen van de verschillende algoritmes. Een algoritme om positiebepaling mogelijk te maken is met het gebruikte prototype niet goed te testen. Het idee is dan juist om de informatie van twee of meer radars te combineren om zo een plaatsbepaling uit te kunnen voeren. Maar als je twee smalle bundels samen laat vallen, dan geeft dat nauwelijks extra informatie, omdat de smalle bundel op zichzelf al informatie met betrekking tot de positie met zich meebrengt. Wel is met het prototype aangetoond, dat het software- en hardwarematig mogelijk is om de informatie van meerdere radars te combineren.

8.3 Conclusie

Hoewel het prototype van de radaropstelling niet volledig overeenkomt met het systeem zoals dat is ontworpen, kunnen een aantal concepten toch aangetoond worden met dit prototype. Zo is gebleken dat het goed mogelijk is om met een voetbal zichtbaar te maken voor de radar en vervolgens deze bal te volgen. Het zal dus ook mogelijk zijn om te bepalen of de bal het doel zodanig genaderd is dat er foto's genomen moeten worden.

Door de smalle bundelbreedte van de antenne is het niet mogelijk om plaatsbepaling uit te voeren, maar er is wel aangetoond, dat meerdere radarreflecties gecombineerd kunnen worden. Dit maakt het ook erg aannemelijk dat plaatsbepaling op een snelle manier uitvoerbaar is.

9 Conclusies en aanbevelingen

9.1 Conclusies

In dit rapport zijn verscheidene onderdelen uit het radarsysteem behandeld. In ieder hoofdstuk waar de aparte onderdelen zijn beschreven is een conclusie opgenomen. Hieronder volgt een beknopt overzicht van de gemaakte keuzen met de daarbij behorende voor- en nadelen.

1. Radar opstelling: drie radars per doelgebied, gepositioneerd zoals afgebeeld in figuur 3.6b.

- *Voordelen:*

- Volledig vereiste gebied wordt belicht
- Minimale kans op afscherming van de bal
- Groot overlappinggebied, wat nauwkeurige plaatsbepaling mogelijk maakt

- *Nadelen:*

- Groot aantal radars
- Constante hoge vermogensdichtheid over het belichte gebied

2. Type radar: lineair gemoduleerde FMCW radar.

- *Voordelen:*

- Geen hoge vermogenspieken
- Lage bandbreedte benodigd
- Hoge signaal-ruis-verhouding
- Beperkte productiekosten

- *Nadelen:*

- Constante straling waaraan spelers worden blootgesteld

3. Type Antenne: microstrip patch-antenne.

- *Voordelen:*

- Brede stralingsbundel
- Straling naar één richting
- Robuust en onderhoudsarm
- Kleine afmetingen
- Beperkte productiekosten

- *Nadelen:*

- Lage bandbreedte
- Beperkt hanteerbaar vermogen

9.2 Aanbevelingen

Zoals ook wel blijkt uit dit rapport bevindt het ontwerp van een geschikt systeem zich nog in de beginfase van het ontwerpproces. De belangrijke keuzes binnen het ontwerp zijn gemaakt, maar er moet nog veel onderzoek gedaan worden met betrekking tot de uitwerking van de deelconcepten. Ook zijn er talloze verbeteringen aan het systeem denkbaar, die het waard zijn om te onderzoeken.

9.2.1 Verder onderzoek aan het systeem

Er wordt in dit rapport de keuze gemaakt om gebruik te maken van FMCW radar. De FMCW radar bestaat zelf weer uit meerdere componenten. Er is geen specificatie gemaakt van de exacte hardware die hiervoor gebruikt kan worden. Onderzocht moet worden of er al radars op de markt te verkrijgen zijn die voldoen aan de eisen, of dat een volledig nieuw ontwerp noodzakelijk is.

Ook met betrekking tot de antenne is er nog de behoefte aan vervolgonderzoek. Er moeten simulaties worden uitgevoerd en een prototype moet worden vervaardigd, waar metingen aan moeten worden verricht. Als niet aan alle eisen voldaan kan worden, dan zal gekeken moeten worden naar nieuwe oplossingen. Een voorbeeld hiervan is de bandbreedte van de antenne. Als deze niet voldoende groot is, dan kan er onderzoek gedaan worden naar het gebruik van een U-slot in de antenne.

Concepten met betrekking tot het herkenbaar maken van de bal moeten verder worden onderzocht. Allereerst moet bekeken worden of de reflectie van de bal nog steeds significant vergroot wordt, als de aluminiumbekleding zich aan de binnenkant van de bal bevindt (in tegenstelling tot bij het prototype, waar de bekleding extern is aangebracht). Bovendien kunnen de concepten die in hoofdstuk 6 worden genoemd, zoals polarisatie en variatie in bekleding, worden getest om te bepalen of het dan eenvoudiger kan worden om de bal te herkennen.

Tot slot is het van belang dat er een test wordt verricht met alle componenten gecombineerd tot één systeem, als eerste prototype. Met dit prototype kunnen metingen op het voetbalveld worden gedaan. In een latere fase zullen metingen verricht moeten worden in een stadion tijdens een echte wedstrijd.

9.2.2 Nieuwe ideeën

Een nieuw idee wat zich aan het einde van het project heeft aangediend, is om de patch-antennes van de radar inwendig aan te brengen in de doelpalen. Dit biedt diverse voordelen. Het systeem wordt dan volledig uit het zicht gehouden. Alle componenten van de radar, inclusief bekabeling, kunnen in de palen worden bevestigd. Op deze wijze hoeft er geen systeem achter het doel te worden geplaatst, waardoor geen extra ruimte in het stadion wordt ingenomen. Tevens wordt de installatie van het systeem vereenvoudigd; een volledig nieuw doel wordt aangeleverd. Er moet worden onderzocht welk materiaal het best bruikbaar is om de doelpaal te fabriceren. Geleidende materialen zoals aluminium maken het onmogelijk om de antennes inwendig te plaatsen. Geschikte materialen zijn bijvoorbeeld koolstofvezel-composieten. Deze materialen worden gebruikt in toepassingen waar laag gewicht, grote sterkte en grote stijfheid nodig zijn.

Een ander idee is om in navolging van de bal ook de spelers te voorzien van een RFID tag. Deze kan op eenvoudige wijze worden weggestopt in de scheenbeschermers, die alle spelers tijdens een wedstrijd verplicht moeten dragen. Dit kan het eenvoudiger maken om de spelers en de bal van elkaar te onderscheiden.

Bibliografie

- [1] Balanis C.A. (1997), *Antenna Theory: analysis and design*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Canada.
- [2] Cohen, E.D., *Active electronically scanned arrays*, Telesystems Conference, Conference Proceedings, IEEE National, Page(s): 3 - 6, 26-28 May 1994.
- [3] Couch, L.W. (2007), *Digital and Analog Communication Systems*, 7th ed., Prentice Hall, Florida.
- [4] van Dale (2006), Groot woordenboek van de Nederlandse taal 14, van Dale Lexicografie bv, Utrecht / Antwerpen.
- [5] Demming-Janssen, F., Koch W., *3D Field simulation of sparse arrays using various solver techniques within CST MICROWAVE STUDIO*, Proceedings of the 3rd European Radar Conference, page(s): 80-83, September 2006.
- [6] Encarta Encyclopaedia (2008), <http://encarta.msn.com>, (Geraadpleegd op 7 mei 2008).
- [7] Encyclopaedia Britannica (2008), Encyclopedia Britannica Inc, Verenigd Koninkrijk.
- [8] Gandhi, O.P. (1989), *Microwave Engineering and Applications*, Pergamon Press, New York.
- [9] Garg, R., et al. (2001), *Microstrip Antenna Design Handbook*, Artech House Inc., Norwood.
- [10] van Genderen, P., College Methodologie van Ontwerpen, TU Delft, Vakcode ET3905-D2, gegeven op: 6 maart 2008.
- [11] Girod, B. et al. (2001), *Signals and Systems*, Wiley, Nürnberg.
- [12] Griffiths, H.D., *New ideas in FM radar*, Electronics & Communication Engineering Journal, Volume 2, Issue 5, On page(s): 185-194, Oct 1990.
- [13] Hedley J. Hansen, et al. (2007), *The design of a broadband microstrip patch sensor for high frequency remote sensing operations*, SPIE proceedings series, vol 5274.
- [14] Ian Faulconbridge R. (2002), *Radar Fundamentals*, Argos Press, Canberra.
- [15] James R.J., *A History of radar*, IEE Review, vol 35, Issue 9, Oct. 1989.
- [16] Kulpa, K.S., *Novel method of decreasing influence of phase noise on FMCW radar*, Radar, 2001 CIE International Conference on, Proceedings, page(s): 319 – 323, 15-18 Oct. 2001.

- [17] National Defence University, <http://www.ndu.edu/>, (Geraadpleegd op 4 juni 2008).
- [18] Olver, A.D., Cuthbert, L.G., *FMCW radar for hidden object detection*, Radar and Signal Processing, IEE Proceedings-F, Vol. 135, Issue 4, Aug. 1988.
- [19] Olver, A.D., Syed, J.U.I., *Variable beamwidth reflector antenna by feed defocusing*, Microwaves, Antennas and Propagation IEE Proceedings, Volume 142, Issue 5, Oct. 1995.
- [20] Physicsworld.com, *The physics of Football*, <http://physicsworld.com/cws/article/print/1533>, (Geraadpleegd op 7-5-2008).
- [21] Pozar, D.M. (2005), *Microwave Engineering*, 3rd ed., Wiley, Massachusetts.
- [22] Printronix, <http://www.printronix.it>, (Geraadpleegd op 8 juni 2008).
- [23] Reinhold E. et al., *Reflection enhancement of aluminum strips by EB-PVD in highly productive industrial lines*, Thin Solid Films, Vol. 377-378, page(s): 14-20, 2000.
- [24] Rogers Corporation, http://www.rogerscorporation.com/mwu/pdf/ro4000ds_4.pdf, (Geraadpleegd op 30 mei 2008).
- [25] Schaubert D. H., Yngvesson K. S., *Experimental study of a microstrip array on high permittivity substrate*, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-34, pp. 92-97, Jan. 1986.
- [26] Simeoni, M., College Antenna Systems, TU Delft, Vakcode ET4015, 2007.
- [27] Skolnik, M.I. (1988), *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill, Sydney.
- [28] Stove, A.G., *Linear FMCW radar techniques*, Radar and Signal Processing, IEE Proceedings-F, Vol. 139, Issue 5, page(s): 343-350, Oct 1992.
- [29] Technical Surveillance Counter Measurements, www.tscm.com/radiapat.pdf, (Geraadpleegd op 12 april 2008).
- [30] Tipler, P.A., Mosca G. (2004), *Physics for scientists and engineers*, 5th ed., W.H. Freeman and Company, New York.
- [31] Tong, K.F. et al., *A Broad-Band U-Slot Rectangular Patch Antenna on a Microwave Substrate*, IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol. 48, No. 6, Juni 2000.
- [32] Vaughan M.J., Hur K.Y., Compton R.C., *Improvement of Microstrip Patch Antenna Radiation Patterns*, IEEE Trans. Antennas Propagation, vol 42, No 6, Juni 1994.
- [33] Visser H.J. (2005), *Array and phased array antenna basics*, John Wiley & Sons, Ltd, Chicester.

- [34] Weigand, S. et al., *Analysis and Design of Broad-Band Single-Layer Rectangular U-Slot Microstrip Patch Antennas*, IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol. 51, No. 3, Maart 2003.
- [35] Wikipedia (2008), [http://nl.wikipedia.org/wiki/Antenne_\(straling\)](http://nl.wikipedia.org/wiki/Antenne_(straling)), (Geraadpleegd op 25 april 2008).
- [36] Wikipedia (2008), http://en.wikipedia.org/wiki/Coaxial_cable, (Geraadpleegd op 16 mei 2008).
- [37] Wikipedia (2008), http://en.wikipedia.org/wiki/Dipole_antenna, (Geraadpleegd op 12 april 2008).
- [38] Wikipedia (2008), http://en.wikipedia.org/wiki/Monopole_antenna, (Geraadpleegd op 12 april 2008).
- [39] Wikipedia (2008), http://en.wikipedia.org/wiki/Patch_antenna, (Geraadpleegd op 12 april 2008).
- [40] Wikipedia (2008), <http://nl.wikipedia.org/wiki/Schotelantenne>, (Geraadpleegd op 12 april 2008).
- [41] Yang, L. et al, *RFID Tag and RF Structures on a Paper Substrate Using Inkjet-Printing Technology*, IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol. 55, No. 12, December.
- [42] Yates, R.D. (2005), *Probability and Stochastic Processes*, 2nd ed., Wiley, New Jersey.

Figuren Index

Figuur 1.1	Grafische voorstelling van het principe van Maxad:.....	2
Figuur 3.1	Vereiste bereik van de radar	7
Figuur 3.2	Opstellingen met één radar	8
Figuur 3.3	Vergelijking van vermogensdichtheden tussen bundelbreedtes	9
Figuur 3.4	Het bereik van een opstelling met twee radars	10
Figuur 3.5	Bevordering afstandsbe­paling door rotatie van de radars	11
Figuur 3.6	Opstelling met drie radars: alle radars dezelfde.....	12
Figuur 3.7	Vergelijking nauwkeurigheid informatie tussen bundelbreedtes	13
Figuur 3.8	Opstelling met achttien parallel geplaatste radars	13
Figuur 3.9	Opstelling met een enkele scannende radar.....	14
Figuur 4.1	Blokdiagram van een simpele pulsradar	17
Figuur 4.2	Afstandsbe­paling tot een object met de pulsradar	18
Figuur 4.3	Ontvangen en verzonden pulsen	19
Figuur 4.4	Decompositie snelheidsvectort	20
Figuur 4.5	Blokdiagram van een puls Doppler radar.....	20
Figuur 4.6	Een stripline circulator.....	21
Figuur 4.7	Blokdiagram van een FMCW radar.....	22
Figuur 4.8	Een lineair frequentie gemodelleerde sinusoïde	22
Figuur 5.1	Een parabolantenne met bijbehorend stralingspatroon.....	25
Figuur 5.2	Een dipoolantenne met bijbehorend stralingspatronen	26
Figuur 5.3	Een monopoolantenne met bijbehorend stralingspatroon.....	26
Figuur 5.4	Microstrip patch-antennes met bijbehorend stralingspatroon.....	27
Figuur 6.1	De Lockheed Martin F-117 Nighthawk.....	29
Figuur 6.2	Weerkaatsing van golven door een voetbal	30
Figuur 6.3	Profiel met rechte hoeken	30
Figuur 6.4	Balbekleding met patroon	31
Figuur 6.5	Geprinte RFID chip	32
Figuur 6.6	Onderscheid met behulp van gepolariseerde golven	33
Figuur 7.1	Ontwerp­proces van de microstrip patch-antenne.....	35
Figuur 7.2	Voorspelde en gemeten E- en H-vlakken van een patch.....	36
Figuur 7.3	Microstrip patch-antenne.....	37
Figuur 7.4	Typische S11 parameter voor een microstrip patch-antenne.....	38
Figuur 7.5	U-slot microstrip patch-antenne	38
Figuur 7.6	Geleverde, gereflecteerde en uitgestraalde golven	39
Figuur 7.7	Equivalent circuit voor het matchen van de antenne aan de generator	39
Figuur 7.8	De ladingsverdelingen binnen een microstrip	42
Figuur 7.9	De magnetische stroom­dichtheden onder de patch.....	43
Figuur 7.10	De richtingen van de magnetische stroom­dichtheden	43
Figuur 7.11	Weergave van een microstriplijn	44
Figuur 7.12	Modellering effectieve lengte van een patch	45
Figuur 7.13	Coaxiale voeding.....	46
Figuur 7.14	Voeding met een microstriplijn	46
Figuur 7.15	Sleufvoeding	47
Figuur 7.16	Nabijheidsvoeding.....	47

Figuur 7.17	Schematische weergave van de plaats van het voedingspunt	49
Figuur 7.18	Stralingspatronen microstrip patch-antenne, gesimuleerd met PCAAD...	51
Figuur 8.1	De paraboolantenne zoals gebruikt in het prototype.....	54
Figuur 8.2	De bal bekleed met aluminiumtape bevestigd aan een gordijnrail.....	54

Bijlage I:

Specificaties FMCW radar prototype

In deze bijlage wordt een overzicht gegeven van de eigenschappen van de FMCW radar, zoals die wordt gebruikt in het prototype. Dit overzicht is overgenomen uit de handleiding die geleverd is bij deze radar.

Specificaties

• Principe	:Frequency Modulated Continious Wave
• Werkfrequentie	:11 GHz
• Zendvermogen	:ca. 4 mW
• Antenne gain	:32 dB
• Antenne bundelbreedte (-3dB)	:5.4 graden in azimuth :4.9 graden in elevatie
• Frequentiesweep	:0.5 of 1 GHz (en CW)
• Sweeptijd	:11.7 of 23.4 ms
• Ontvanger ruisgetal	:ca. 14 dB inclusief RF verliezen
• Sensitivity Frequency Control	:60 dB/dec tot 3 kHz
• AD conversie	:16 bits 44 kHz (geluidskaart)
• Processing	:512 / 1024 punts Fast Fourier Transform
• Instrumented range	:38, 76 en 152 m
• Minimum afstand	:< 1 m
• Afstandsresolutie	:20 cm bij 1 GHz sweep