4 MEETONZEKERHEID

Een belangrijk onderdeel van het onderzoek door Universiteit Twente is de validatie van de meetonzekerheid. De resultaten hiervan zijn beschreven in dit hoofdstuk. De validatie bestaat uit verschillende delen. Allereerst zijn de kalibratierapporten van de gebruikte meetapparatuur geanalyseerd. Daarnaast heeft Universiteit Twente de methodiek en uitkomsten van de door Agentschap Telecom gehanteerde meetonzekerheid van het totale systeem in dit hoofdstuk geanalyseerd. Het hoofdstuk sluit af met een alternatieve methode om de onzekerheid te bepalen. Deze methode maakt onderscheid tussen statische en willekeurige ruis tijdens een meetsessie, waardoor de meetonzekerheid nauwkeuriger kan worden in geschat.

4.1 KALIBRATIERAPPORTEN MEETAPPARATUUR

De meetopstelling van het agentschap bevat twee componenten die periodiek door externe partijen worden gekalibreerd. Het betreft de meetantenne en de meetontvanger. Hieronder is de eerste pagina getoond van deze rapporten uit 2012 tijdens de laatste FM meetcampagne[32]. Uit de rapporten blijkt dat de meetontvanger voldoet aan de specificaties. Op veel punten presteert de ontvanger beter dan de opgegeven waarde in de datasheet. De kalibratie van de meetantenne (antennediagram) heeft als doel om te verifiëren dat het antennediagram van de meetantenne onveranderd is gebleven ten opzichte van het oorspronkelijke antennediagram.

[32] Dit is dus een ander kalibratierapport dan getoond in sectie 3.3.

ROHDE&SCHWARZ
Messgerätebau GmbH

akkreditiert durch die / *accredited by the*

Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH

DAkkS Deutsche Akkreditierungsstelle D-K-15195-01-00

als Kalibrierlaboratorium im / *as calibration laboratory in the*

Deutschen Kalibrierdienst DKD

0196
D-K-15195-01-00
2012-08

Kalibrierschein
Calibration certificate

Kalibrierzeichen
Calibration mark

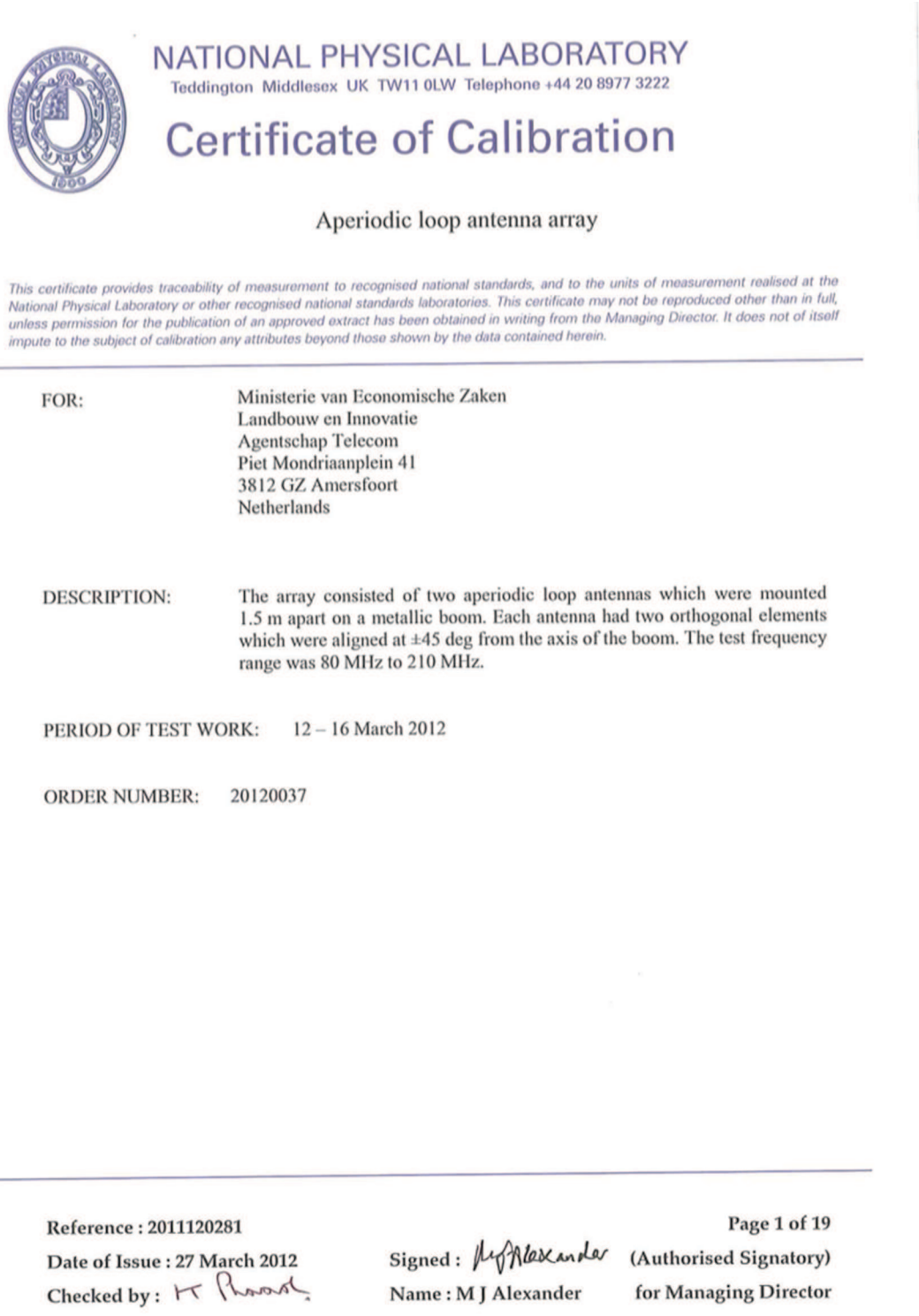
Gegenstand *Object*	Measuring Receiver
Hersteller *Manufacturer*	Rohde & Schwarz
Typ *Type*	FSMR3
Fabrikat/Serien-Nr. *Serial number*	200011
Auftraggeber *Customer*	Ministerie van Economische Zaken Landbouw en Innovatie Piet Mondriaanplein 41 NL-3812 GV Amersfoort Netherlands
Auftragsnummer *Order No.*	55157
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines *Number of pages of the certificate*	13 + 1
Datum der Kalibrierung *Date of calibration*	2012-08-10

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).
Die DAkkS ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.
Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.
This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
The DAkkS is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.
The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift haben keine Gültigkeit.
This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature are not valid.

Datum *Date*	Stellv. Leiter des Kalibrierlaboratoriums *Vice Head of the calibration laboratory*	Bearbeiter *Person in charge*
2012-09-07	Andreas Guserle	Wolfgang Immerz

Figuur 4.1.1: Kalibratierapport Rohde & Schwarz meetontvanger uit 2012



NATIONAL PHYSICAL LABORATORY
Teddington Middlesex UK TW11 0LW Telephone +44 20 8977 3222

Certificate of Calibration

Aperiodic loop antenna array

This certificate provides traceability of measurement to recognised national standards, and to the units of measurement realised at the National Physical Laboratory or other recognised national standards laboratories. This certificate may not be reproduced other than in full, unless permission for the publication of an approved extract has been obtained in writing from the Managing Director. It does not of itself impute to the subject of calibration any attributes beyond those shown by the data contained herein.

FOR: Ministerie van Economische Zaken
Landbouw en Innovatie
Agentschap Telecom
Piet Mondriaanplein 41
3812 GZ Amersfoort
Netherlands

DESCRIPTION: The array consisted of two aperiodic loop antennas which were mounted 1.5 m apart on a metallic boom. Each antenna had two orthogonal elements which were aligned at ±45 deg from the axis of the boom. The test frequency range was 80 MHz to 210 MHz.

PERIOD OF TEST WORK: 12 – 16 March 2012

ORDER NUMBER: 20120037

Reference : 2011120281
Date of Issue : 27 March 2012
Checked by :

Page 1 of 19
Signed : (Authorised Signatory)
Name : M J Alexander
for Managing Director

Figuur 4.1.2: Kalibratierapport van de meetantenne door NPL.

4.2 MEETONZEKERHEIDSANALYSE

Agentschap Telecom heeft een meetonzekerheidsanalyse uitgevoerd. Hieronder wordt een *voorbeeld* van een samengestelde meetonzekerheid getoond voor een fictieve

omroepzender op 97.75 MHz. Deze FM-omroepzender zendt uit vanaf een 8-laags multipattern antennesysteem, op een antennehoogte van 177 meter. De hoogte van de meetantenne onder de helikopter is 171 meter en de meetafstand tussen beide antennes bedraagt 801 meter.

Samengestelde meetonzekerheid

Symbool	Bron van de onzekerheid	Onzekerheid		Kans-verdeling	Deeltal	Sensitivity coefficient	Standaard-onzekerheid van de bron	Vrijheids-graden
		± dB	%			c_i	$u_i(A_x)$ %	v_i of v_{eff}
Lichtsnelheid								
c	Lichtsnelheid in lucht	nihil						
Frequentie								
f	Zendfrequentie		0,1	uniform	1,7321	2	0,1	∞
Afstand								
R	Afstand zendantenne tot meetantenne		0,7	normaal	2	2	0,7	∞
Antennegain								
$G_{M\text{-}CAL}$	Kalibratie van de antennegain	0,7	17	normaal	2	1	8,7	∞
A_{KAB}	Kabeldemping	0,1	2	normaal	2	1	1,2	∞
A_{HOR}	Horizontale richtfout	0,06	1,4	uniform	1,7321	1	0,8	∞
A_{VERT}	Verticale richtfout	0,22	5,2	uniform	1,7321	1	3,0	∞
A_{POL}	Polarisatiefout	0,25	5,9	uniform	1,7321	1	3,4	∞
Vermogen								
$P_{RX\text{-}CAL}$	Kalibratie meetontvanger	0,1	2	normaal	2	1	1,2	∞
A_{MIS}	Misaanpassing	0,1	2,1	u-vormig	1,4142	1	1,5	∞
A_{NABU}	Nabuurkanaalstoring	0,2	3,5	uniform	1,7321	1	2,0	∞
A_{FILT}	Filterverliezen	nihil						
Reflecties								
A_{REF}	Invloed reflecties	0,01	0,3	uniform	1,7321	1	0,2	∞
Invloed vlieghoogtefout								
A_H	Invloed vlieghoogtefout	0,2	4,7	normaal	2	1	2,4	∞
Vertekening meetantenne								
A_{MA}	Vertekening door diagram meetantenne	0,03	0,7	uniform	1,7321	1	0,4	∞
$U(P_{ERP})$	Gecombineerde standaard onzekerheid			normaal			10,6	∞
U	Expanded standaard onzekerheid (95%)			normaal (k=2)			21,3	∞

Tabel 4.2.1: Samengestelde meetonzekerheid voor een fictieve omroepzender

4.2.1 ANALYSE

De samengestelde meetonzekerheid bestaat uit een aantal onzekerheden. In het algemeen vindt de Universiteit Twente dat de onzekerheden van de individuele onderdelen realistisch zijn in geschat. Ook kan worden gesteld dat de meetonzekerheidsanalyse een goede indicatie geeft van de onzekerheid in het meetsysteem. Wel zijn er een aantal onderwerpen die extra toelichting nodig hebben.

Dit zijn:

- de meetonzekerheid bij zwakkere FM signalen
- de invloed van reflecties
- de middeling van meetwaarden
- het onderscheid tussen variabelen met een vaste realisatie per meetsessie en per meetwaarde
- de distributie van ruwe meetwaarden

Deze punten worden hieronder toegelicht:

Meetonzekerheid bij zwakkere FM signalen

Uit metingen in het vorige hoofdstuk (sectie 3.2.1) blijkt dat de meetontvanger bij zwakke FM signalen zwakker dan 10 dB boven de ruisvloer van de meetontvanger een grotere afwijking heeft. Dit heeft tot gevolg dat bij zwakkere FM zenders de meetonzekerheid toeneemt. Wel blijkt uit deze metingen dat deze afwijking grotendeels constant is per signaalniveau. Deze niet-lineariteit kan worden gecorrigeerd in een verdere ontwikkeling van het meetsysteem om de meetonzekerheid van het systeem in deze gevallen te verkleinen. Hiervoor zijn wel aanvullende metingen nodig, omdat dit specifieke punt niet in de kalibratie van Rohde & Schwarz, onder accreditatie van de DKD (Deutscher Kalibrierdienst), is meegenomen.

Invloed van reflecties

De invloed van reflecties op de samengestelde meetonzekerheid wordt bepaald door uit te gaan van onbebouwd terrein[33]. In stedelijke omgevingen zullen de reflecties sterker zijn door hoge objecten maar ook door objecten nabij de antenne-installatie op de zendertoren. Hoge objecten ontvangen een veel groter deel van het uitgestraalde vermogen (hoofdbundel FM zendantenne), wat ook weer deels gereflecteerd wordt. Dit blijkt ook uit de verificatiemetingen in het volgende hoofdstuk. Echter, door de ruwe meetwaarden te middelen (volgende punt) heeft dit uiteindelijk geen invloed.

Middeling van meetwaarden

In de huidige opzet van het meetsysteem worden meetwaarden gemiddeld over een hoek van 6 graden. Reflecties welke minima en maxima veroorzaken in de meetwaarden zijn erg lokaal. Middeling zal de invloed van reflecties en daarmee de meetonzekerheid reduceren. In de samengestelde meetonzekerheidsanalyse wordt deze middeling van meetwaarden door het agentschap niet meegenomen. Hiermee wordt in feite de invloed van reflecties overschat. Uit het voorgaande punt -de invloed van reflecties- blijkt dat reflecties in de praktijk groter kunnen zijn dat aangenomen is. De middeling van de meetwaarden zal deze vergrote invloed teniet doen. Bijvoorbeeld bij een middeling van 100 meetwaarden zal de standaarddeviatie (meetonzekerheid veroorzaakt door de reflecties) met een factor 10 afnemen. Uiteindelijk is de Universiteit Twente van mening dat de meetonzekerheid veroorzaakt door reflecties realistisch is in geschat als het aspect van middeling wordt meegenomen.

Onderscheid tussen variabelen met een vaste realisatie per meetsessie en per meetwaarde

In de samengestelde meetonzekerheid maakt het agentschap geen onderscheid gemaakt tussen parameters die constant zijn gedurende een meetsessie (1 realisatie) en parameters die per meetwaarde een andere realisatie hebben. Een voorbeeld maakt dit duidelijk. Reflecties zullen gedurende de vlucht/meetsessie continue veranderen. Deze parameter verandert dus per meetwaarde. Aan de andere kant zal de meetfout die ontstaat doordat de

[33] Wel wordt hierbij een worst case scenario aangenomen (zout water) die een radiosignaal maximaal reflecteert.

kabelverliezen afwijken ten opzichte van de kalibratiemeting identiek zijn gedurende de gehele meetsessie. Dit is een parameter welke constant is gedurende een meetsessie. Het is belangrijk om dit onderscheid te maken, omdat bij middeling alleen de invloed van parameters die per meetwaarde een andere realisatie hebben worden gereduceerd. Door deze splitsing te maken, kan de meetonzekerheid beter worden bepaald. In de volgende sectie (sectie 4.3) wordt dit punt uitgewerkt.

Distributie van ruwe meetwaarden

In de analyse van de meetonzekerheid wordt aangenomen dat de variabelen in de meetonzekerheid een (log)-normale verdeling hebben. Dit is een gebruikelijke aanname. Om te valideren dat deze aanname inderdaad geldig is, heeft Universiteit Twente twee verschillende wiskundige tests uitgevoerd op de ruwe meetdata. Dit zijn de *Kolmogorov-Smirnov*[34] test en de *Jarque–Bera*[35] test. In sectie 3.5.1.1 zijn deze testen toegepast op de meetdata van twee metingen. Hieruit komt naar voren dat de ruwe meetdata *niet* kan worden gezien als normale of log-normale variabele. Hiermee kunnen ook niet de standaardmethodes worden gebruikt voor het bepalen van de meetonzekerheid. Bijvoorbeeld zoals de 95%-grens op plus of min twee keer de standaarddeviatie van een variabele. Wel kan de *Chebyshev's* ongelijkheid worden gebruikt die wij in de volgende sectie beschrijven.

4.2.1.1 CHEBYSHEV'S ONGELIJKHEID

Voor variabelen met een onbekende distributie geldt de *Chebyshev's ongelijkheid*[36]. Hiermee kan ook de meetnauwkeurigheid worden bepaald. Deze ongelijkheid is toepasbaar voor een brede groep van waarschijnlijkheidsverdelingen. De regel stelt dat niet meer dan $1/k^2$ van de realisaties meer dan k-standaard deviaties weg van het gemiddelde kunnen zijn. Een voorbeeld is de 96% meetonzekerheidsgrens op vijf keer plus of min de standaard deviatie (± 5σ). Dit is dus een lossere regel dan de grens van plus of min twee keer de standaard deviatie (± 2σ) die bij (log)-normale verdelingen wordt toegepast.

Universiteit Twente heeft een viertal metingen geanalyseerd om na te gaan of de 1-dB nauwkeurigheid wordt gehaald als de *Chebyshev's ongelijkheid* wordt toegepast. Op de optimale afstand kan de standaarddeviatie worden bepaald uit de meetwaarden op iedere hoek. Door vervolgens de *Chebyshev's ongelijkheid* toe te passen op de meetdata blijkt dat voor deze metingen inderdaad de 1-dB grens wordt gehaald. In deze meetonzekerheid wordt nog niet de statische meetfout meegenomen. Dit bespreken we in de volgende sectie.

4.3 ALTERNATIEVE SAMENGESTELDE MEETONZEKERHEIDSANALYSE

Uit de voorgaande sectie blijkt dat de samengestelde meetonzekerheidsanalyse verder kan worden verbeterd. De resultaten hiervan worden in dit onderdeel besproken. Als basis is de meetonzekerheidsberekening uit de CEPT ECC Recommendation (12)03 "Determination of

[34] https://en.wikipedia.org/wiki/Kolmogorov%E2%80%93Smirnov_test
[35] https://en.wikipedia.org/wiki/Jarque%E2%80%93Bera_test
[36] https://en.wikipedia.org/wiki/Chebyshev's_inequality

the radiated power through field strength measurements in the frequency range from 400 MHz to 6000 MHz" over genomen[37]. Deze lijkt sterk op de berekening door Agentschap Telecom. Het verschil is dat deze methode direct rekent in onzekerheden in dB-waarden. Vervolgens zijn alle waarden overgenomen uit de tabel 4.2.1 en is er onderscheid gemaakt tussen statische foutbronnen en foutbronnen die bij elke meetwaarde een andere realisatie hebben.

Symbol	Source of uncertainty (i.e. contributions for the uncertainty calculations)	Measured value	Uncertainty		Distribution	Divisor	Sensitivity coefficient	Standard uncertainty of the source	Notes
			%	± dB			c_i	$u_i(A_i)$ dB	
Frequency									
f	Transmit frequency		0.100						
Distance									
R	Distance to the base station tower (m)	800.000							
X	Uncertainty in distance to the base station tower (m)	6.000	0.750						
	Effect of the uncertainty on R, taking into account the free-space propagation model used			0.065	rectangular	1.732	1	0.037	random ruis gedurende meting
Antenna gain									
G_{RX-CAL}	Antenna gain calibration			0.700	normal	2	1	0.350	statische ruis gedurende meting
A_{CABLE}	Cable attenuation			0.100	normal	2	1	0.050	statische ruis gedurende meting
A_{HOR}	Horizontal alignment error			0.060	rectangular	1.732	1	0.035	random ruis gedurende meting
A_{VERT}	Vertical alignment error			0.220	rectangular	1.732	1	0.127	random ruis gedurende meting
A_{POL}	Polarisation error			0.250	rectangular	1.732	1	0.144	random ruis gedurende meting
Power									
P_{RX-CAL}	Calibration test receiver			0.100	normal	2	1	0.050	random ruis gedurende meting
A_{MIS}	Mismatch			0.090	u-shape	1.414	1	0.064	statische ruis gedurende meting
A_{FILT}	Filter losses			0.000	rectangular	1.732	1	0.000	statische ruis gedurende meting
A_{BASE}	Adjacent channel interference			negligible					statische ruis gedurende meting
Reflections									
A_{REF}	Reflections			0.5	unknown	1.000	1	0.500	random ruis gedurende meting
Helikopter heigth									
A_H	Influence height of helikopter			0.2	normal	2.000	2	0.200	random ruis gedurende meting
Distortion measurment antenna									
A_H	Distortion by diagram measurment antenna			0.03	rectangular	1.732	1	0.017	random ruis gedurende meting
Summary									
Static noise								0.359	gecombineerde statische fout
Random noise								0.577	gecombineerde random ruis
Averging random noise (100 samples)								0.058	random ruis na middeling
$U(P_{RAS})$	Combined standard uncertainty							0.364	
U	Expanded standard uncertainty (95% conf.)				normal			1.007	statische ruis is vooral normaal; 2x sigma; random noise via chebychev 5x sigma

Expanded measurement uncertainty: 1.007 dB

Tabel 4.3.1: Alternatieve samengestelde meetonzekerheid voor een fictieve omroepzender[38]

4.3.1 ANALYSE

Uit tabel 4.3.1 blijkt dat de totale meetonzekerheid 1 dB is met een nauwkeurigheid van 95%. Dit geldt als de standaarddeviatie in de ruwe meetdata (veroorzaakt wordt door met name reflecties) kleiner is dan 0,5 dB. De standaarddeviatie hangt af van het antennediagram. Voor omnidirectionele antennediagrammen is deze waarde correct gekozen[39]. Voor directionele antennediagrammen is deze waarde te laag. Dit is te zien in

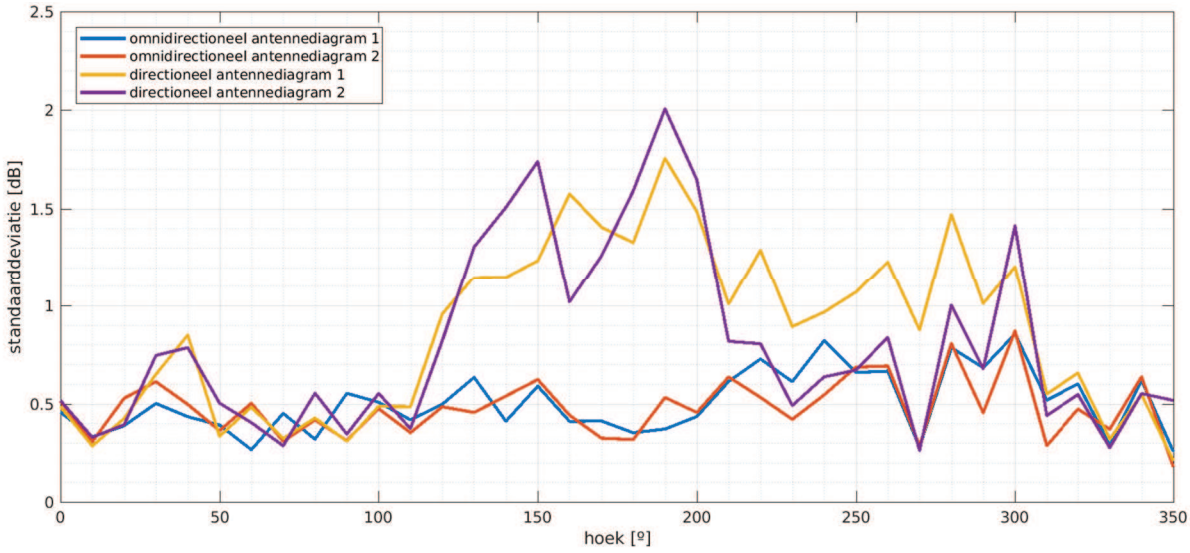
[37] Deze methode is ook toepasbaar voor frequenties in de FM omroepband. De CEPT ECC Recommendation (16)04 (sectie 2.3) is een aanpassing van recommendation (12)03 voor toepassing in de FM band.

[38] Overgenomen en aangepast uit CEPT ECC Recommendation (12)03 "Determination of the radiated power through field strength measurements in the frequency range from 400 MHz to 6000 MHz"

[39] Uit figuur 4.3.2 is te zien dat de 0,5 dB een gemiddelde waarde is voor omnidirectionele antennediagrammen. Het maximum voor deze antennediagrammen is 0,75 dB. De verificatiemetingen hebben plaatsgevonden op een worst-case locatie. Op andere locaties

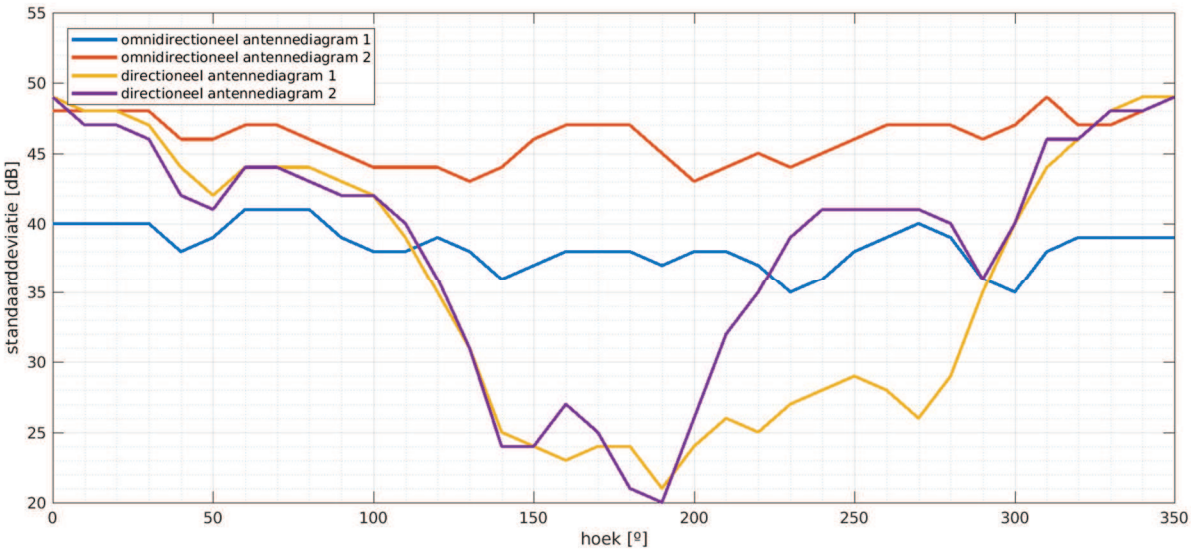
figuur 4.3.2. Hierin wordt de standaarddeviatie getoond voor de antennediagrammen van de verificatievlucht. In figuur 4.3.3 wordt het bijbehorende vermogen van deze antennediagrammen weergegeven. De maximale standaarddeviatie in figuur 4.3.2 is 2 dB voor een directioneel antennediagram. Echter, het agentschap stelt een minimum uitgestraald vermogen van 1 kW als voorwaarde voor een meting. Indien deze lagere vermogens niet worden meegenomen, is de maximale standaarddeviatie 1,5 dB. Deze waarde kan ingevuld worden in tabel 4.3.1. De totale samengestelde meetonzekerheid wordt dan 1,5 dB. Deze 1,5 dB waarde kan gezien worden als bovengrens voor directionele antennediagrammen waarbij het uitgestraalde vermogen hoger is dan 1 kW.

Resumerend kan gesteld worden dat de meetonzekerheid maximaal 1,5 dB is. Bij antennediagrammen die lijken op een omnidirectioneel patroon wordt 1 dB gehaald. In sectie 5.4 wordt dieper ingegaan op de achterliggende oorzaak. Het komt er op neer dat bij directionele antennediagrammen reflecties een dominantere rol spelen aan de 'achterkant' van de antenne. Dit veroorzaakt een groter verschil in lokale maxima en minima. De meetonzekerheid zal dus toenemen in deze gebieden van het antennediagram. Een aanbeveling is daarom om de gemeten standaarddeviatie mee te nemen bij de berekening van de samengestelde meetonzekerheid voor ieder antennediagram.



Figuur 4.3.2: Standaarddeviatie van de ruwe meetdata voor de antennediagrammen uit de verificatievlucht versus de antennehoek.

zullen de standaarddeviaties voor dergelijke antennediagrammen lager zijn. Dit is handmatig gecontroleerd voor een aantal metingen uit 2012.



Figuur 4.3.3: Gemeten uitgestraald vermogen van de antennediagrammen uit de verificatievlucht versus de antennehoek.

5 VERIFICATIEVLUCHT

Op 28 en 29 september 2017 heeft een verificatievlucht plaatsgevonden in Rotterdam om een aantal onderdelen in het meetsysteem te valideren. Deze helikoptervlucht is op dezelfde wijze uitgevoerd door het agentschap als de metingen in 2012. De Waalhaventoren in Rotterdam is uitgekozen, omdat dit als een worst-case locatie kan worden beschouwd. Door de omringende hoogbouw zullen reflecties een sterkere invloed hebben op de metingen dan bij andere zendertorens. Ook de havenomgeving met vele metalen objecten (schepen, kranen, containers) zal dit effect versterken.

Figuur 5.0.1: Helikopter tijdens testvlucht

5.1 DOELEN

De verificatiemetingen hadden de volgende doelen.

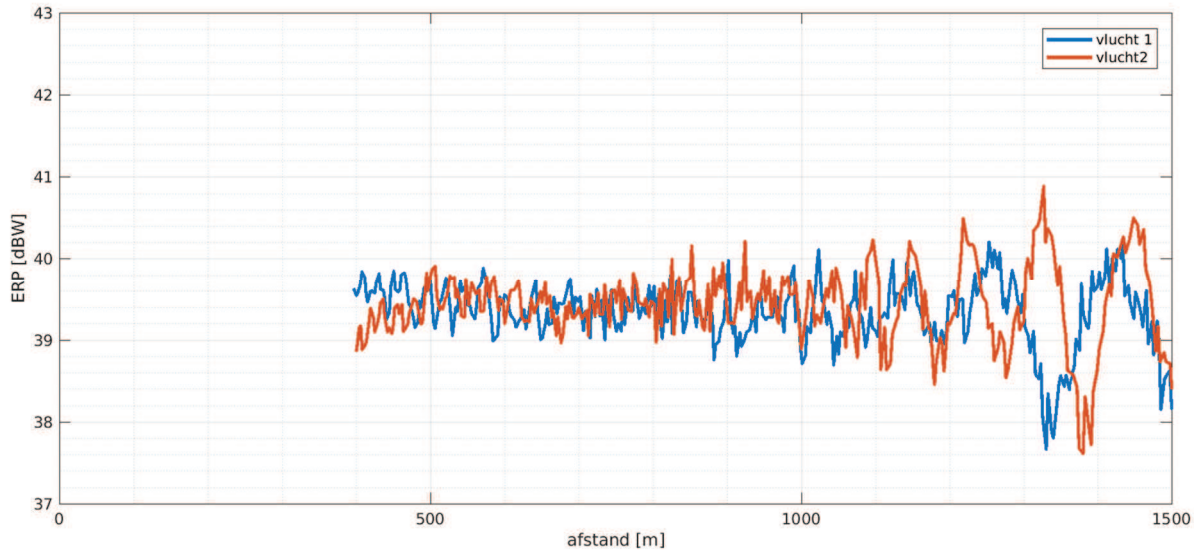
- Validatie en reciprociteit van het gehele meetsysteem. (sectie 5.2)
- Beoordeling procedure tijdens meetvluchten (sectie 5.3).
- Bepalen optimale afstand metingen uit verschillende aanvliegroutes (sectie 5.4)
- Antennediagram meten op verschillende afstanden (sectie 5.5)
- Meten van zwakke uitgestraalde FM vermogens van 1 kW of minder (sectie 5.6)
- Meten van het antennediagram van de meetantenne (sectie 5.7)
- Invloed verschillende middelingmethodes op antennediagram (sectie 5.8)
- Invloed middelingsvenster op antennediagram (sectie 5.9)

5.2 VALIDATIE EN REPRODUCEERBAARHEID VAN HET GEHELE MEETSYSTEEM

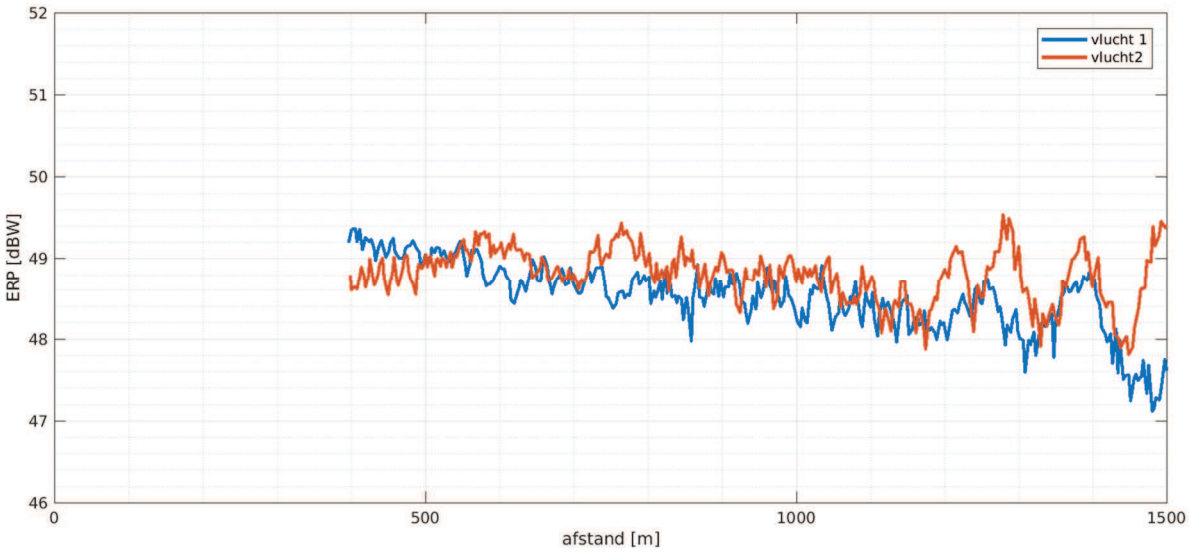
Om validatie en reproduceerbaarheid van het gehele meetsysteem te analyseren, zijn er twee onafhankelijke verificatiemetingen uitgevoerd. Met onafhankelijk wordt bedoeld dat het gaat om twee identieke vluchten (propagatie-, stijg- en cirkelvlucht) die op verschillende tijdstippen zijn uitgevoerd. Hierbij is per vlucht een omnidirectioneel en een directioneel antennediagram onderzocht. De resultaten zijn weergegeven in de figuren 5.2.1 tot en met 5.2.8 en tabel 5.2.9 en 5.2.10. De resultaten zijn opgedeeld volgens de verschillende onderdelen in de meetprocedure (propagatie-, stijg- en cirkelvlucht).

Propagatievlucht

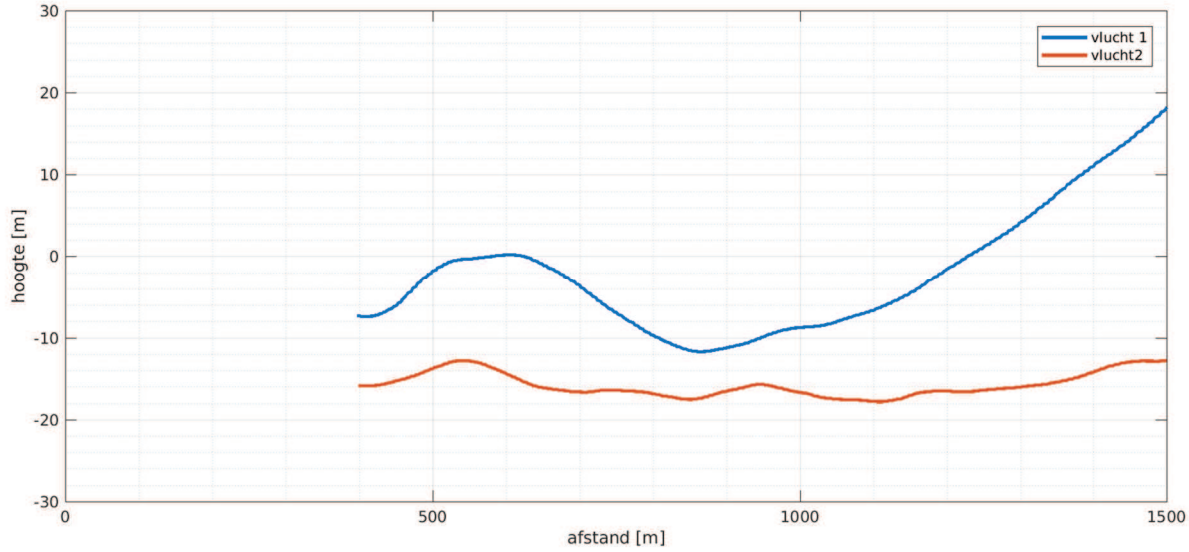
In dit onderdeel wordt naar de zendmast toegevlogen om een optimale meetafstand tot de mast te bepalen. In figuur 5.2.1 (omnidirectionele antennediagram) en 5.2.2 (directionele antennediagram) worden de resultaten van deze vlucht weergegeven: het ontvangen uitgestraalde e.r.p. vermogen versus de afstand. In elke grafiek worden twee lijnen weergegeven voor de eerste en respectievelijk tweede vlucht. Figuur 5.2.1 toont de metingen voor de omnidirectionele antennediagram en figuur 5.2.2 een directioneel antennediagram. De optimale afstand is berekend door te bepalen wanneer de lokale variaties –veroorzaakt door (grond)reflecties van het signaal– minimaal zijn. Dit betreft een globaal optimum dat wordt bepaald over alle te meten frequenties gedurende een vlucht. In dit geval is het globale optimum 800 meter. In figuur 5.2.3 wordt de hoogtevariatie getoond ten opzichte van de ideale hoogte. In figuur 5.2.4 wordt de azimut-variatie getoond ten opzichte van de ideale aanvlieghoek.



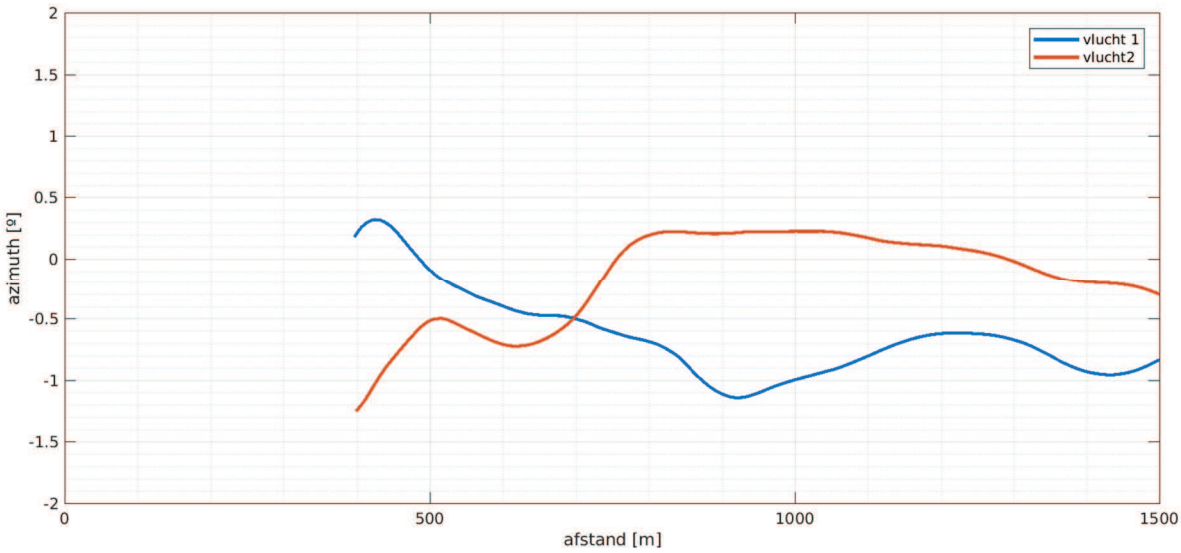
Figuur 5.2.1: Ontvangen uitgestraalde vermogen (e.r.p.) voor beide propagatievluchten versus de afstand voor het omnidirectionele antennediagram



Figuur 5.2.2: Ontvangen uitgestraalde vermogen (e.r.p.) voor beide propagatievluchten versus de afstand voor het directionele antennediagram



Figuur 5.2.3: Hoogtevariatie ten opzichte van de ideale hoogte voor beide propagatievluchten



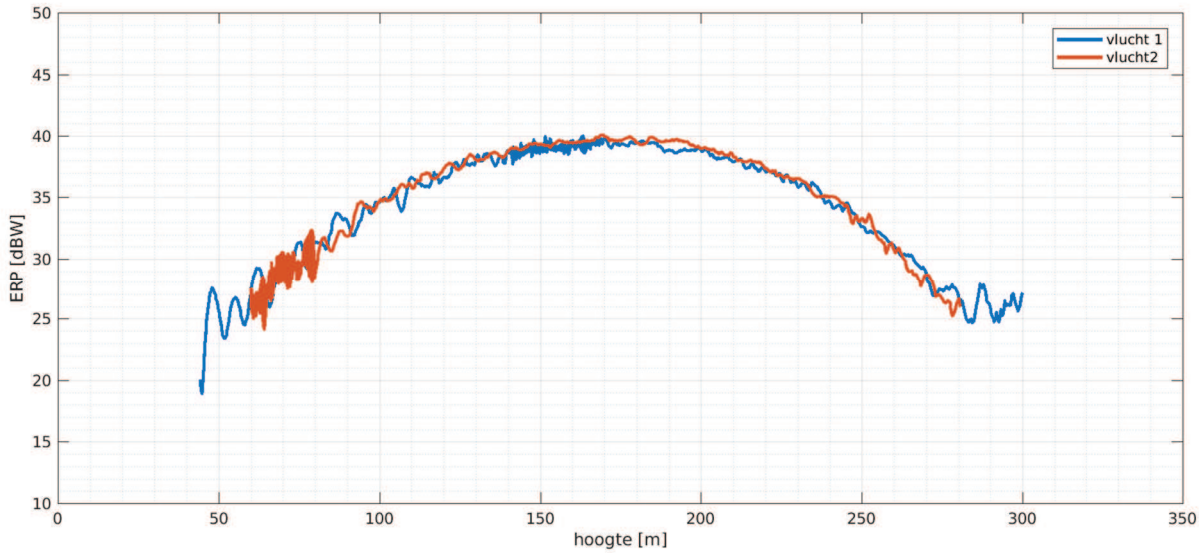
Figuur 5.2.4: Azimut-variatie variatie ten opzichte van de ideale aanvlieghoek (azimut) voor beide propagatievluchten

Analyse

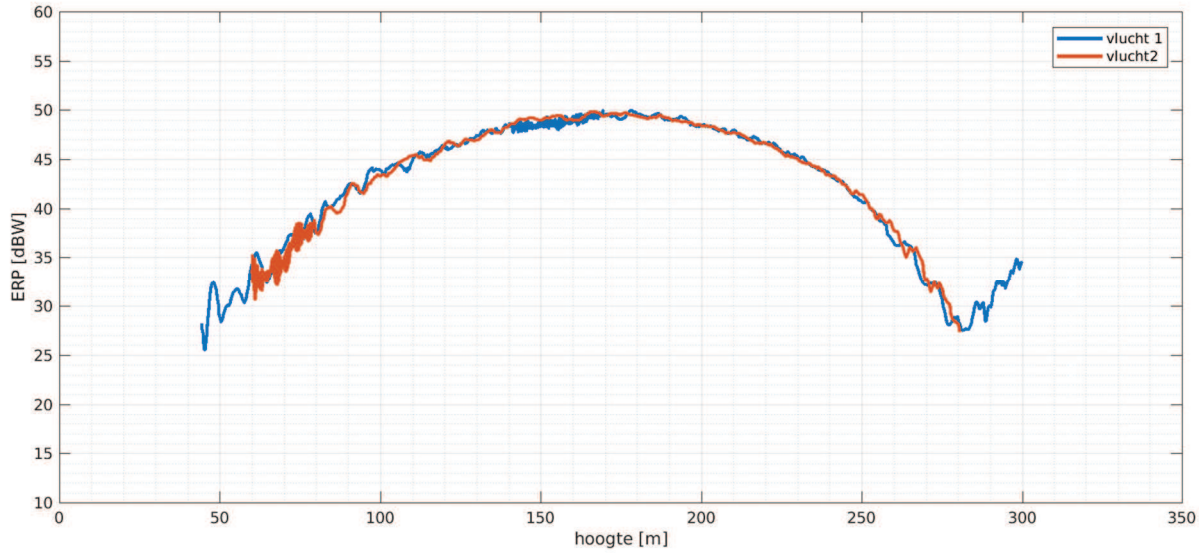
Uit de twee propagatievluchten blijkt dat beide vluchten min of meer gelijkwaardig zijn voor de afstand kleiner dan 1 km (figuur 5.2.3 en 5.2.4). Ook is te zien dat de optimale afstand niet erg kritisch is. In het gebied tussen de 500 en 1000 meter zijn de lokale variaties van het uitgestraalde vermogen laag. Verschillen tussen beide vluchten worden veroorzaakt doordat de piloot geen perfecte aanvliegroute heeft. Op de optimale meetafstand mag de maximale variatie in hoogte $\pm$ 20 meter zijn voor deze meetvlucht. Dit blijkt uit de resultaten van de stijgvlucht, die in de volgende paragraaf worden besproken. In dit gebied meet het agentschap de hoofdbundel van het antennediagram. Voor de azimutfout (de variatie ten opzichte van de ideale aanvlieghoek) geldt een 2-graden afwijking als pragmatische maximum variatie. In de zendvergunning wordt per 10-graden een maximum uitgestraalde vermogen gegeven. Daarnaast is het fysisch niet mogelijk om antennediagrammen te implementeren die sterk veranderen per hoek. Hiervoor zijn 10-graden of meer nodig om een sterke reductie dan wel versterking te realiseren. Om deze redenen is 2-graden een pragmatische toegestane variatie.

Stijgvlucht

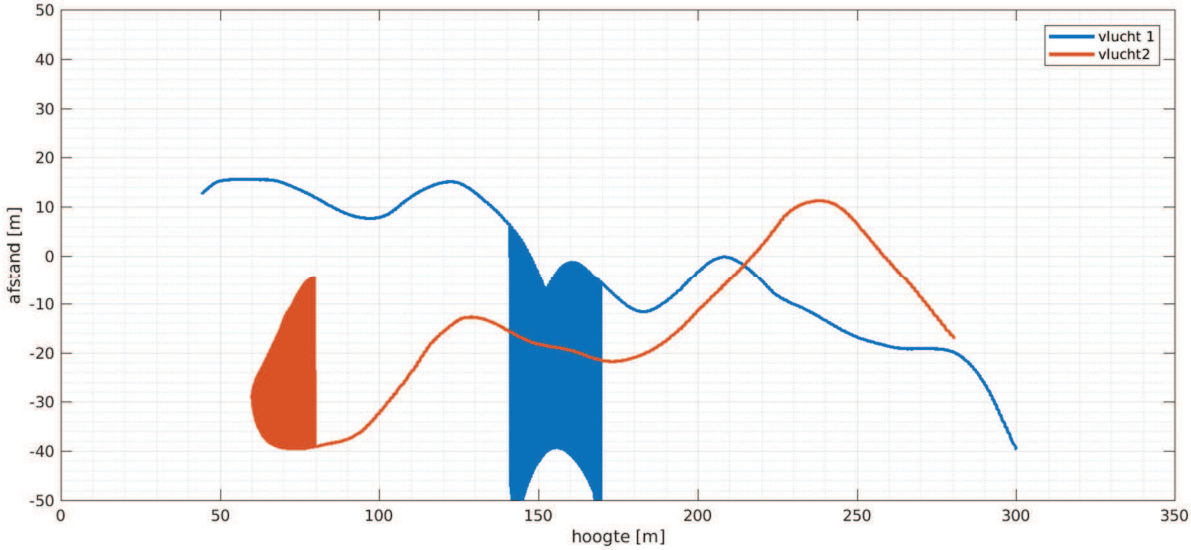
In dit onderdeel maakt de helikoper een stijgvlucht op de ideale afstand tot de zendmast. Het doel van deze meting is om de ideale meethoogte te bepalen. Voor een helikopterpiloot is dit het lastigste onderdeel in de meting. In figuur 5.2.5 en 5.2.6 worden de resultaten van deze vlucht weergegeven: het ontvangen uitgestraalde e.r.p. vermogen versus de hoogte. Daarnaast wordt in figuur 5.2.7 de afstandsvariatie getoond ten opzichte van de ideale afstand en in figuur 5.2.8 de azimutvariatie ten opzichte van de ideale aanvlieghoek.



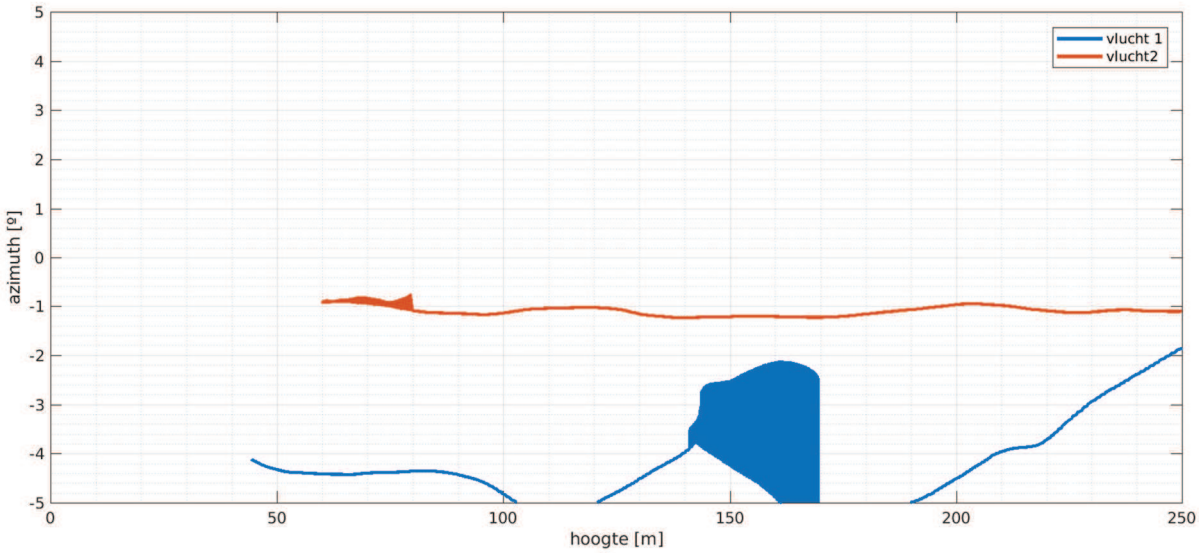
Figuur 5.2.5: Ontvangen uitgestraalde vermogen (e.r.p.) voor beide stijgvluchten versus de hoogte voor het omnidirectionele antennediagram



Figuur 5.2.6: Ontvangen uitgestraalde vermogen (e.r.p.) voor beide stijgvluchten versus de hoogte voor het directionele antennediagram



Figuur 5.2.7: Afstandsvariatie ten opzichte van de ideale afstand voor beide stijgvluchten



Figuur 5.2.8: Azimutvariatie variatie ten opzichte van de ideale aanvlieghoek (azimut) voor beide stijgvluchten

Analyse

Ook uit de stijgvlucht blijkt dat beide vluchten gelijkwaardig zijn. Het antennepatroon verandert weinig rondom de ideale meethoogte. Een afwijking van ± 20 meter is toegestaan, zonder dat dit de resultaten (uitgestraalde e.r.p. vermogen van de FM zender) beïnvloed. Daarnaast is een “blauw vlak” te zien in figuur 5.2.7, net onder de ideale meethoogte. Dit wordt veroorzaakt doordat deze stijgvlucht niet in een ideale lijn naar boven is verlopen. In dit hoogtegebied heeft de helikopter stilgestaan (en iets gezakt in hoogte) waardoor op meerdere afstanden tot de zendmast op dezelfde hoogte is gemeten. Uit de propagatievlucht bleek ook al dat de ideale afstand geen kritische factor is. In de verwerking van de meetdata wordt de afstand tot de zendmast meegenomen in de berekeningen. In dit

opzicht zal een afwijking geen invloed hebben op de resultaten, behalve een toenemende signaalvariatie. Daarnaast is te zien in figuur 5.2.8 dat de afwijking ten opzichte van de ideale aanvlieghoek voor vlucht 1 te groot is. In een echte meting zou deze stijgvlucht opnieuw worden uitgevoerd. Doordat het antennediagram voor beide FM zenders in deze hoeken (hoofdbundel) niet variëren, is er desondanks weinig verschil te zien in figuur 5.2.6 en 5.2.7.

Cirkelvlucht

Het laatste onderdeel in een meetsessie is de cirkelvlucht. Hier vliegt de helikopter rondom de mast in een cirkel op de ideale afstand en hoogte. Per 10 graden wordt het uitgestraalde vermogen van de FM zender bepaald. Dit is gelijk aan het antennediagram in de FM-omroepvergunning. In tabel 5.29 en tabel 5.2.10 worden de resultaten van beide cirkelvluchten getoond.

Omnidirectioneel antennediagram			
graden	vlucht 1 (dBW)	vlucht 2 (dBW)	verschil (dB)
0	39.5	38.7	-0.8
10	40.3	39.8	-0.5
20	40.4	40.5	0.1
30	39.5	38.9	-0.6
40	38.5	37.9	-0.6
50	39.2	38.9	-0.3
60	40.8	40.2	-0.6
70	41.1	40.7	-0.4
80	40.7	40.6	-0.1
90	39.1	38.9	-0.2
100	38	37.4	-0.6
110	38.4	38.5	0.1
120	38.8	38.8	0
130	37.6	37.4	-0.2
140	35.8	36.2	0.4
150	36.5	37	0.5
160	37.8	37.6	-0.2
170	38.4	38.2	-0.2
180	37.9	38.3	0.4
190	37.4	37.7	0.3
200	37.4	37.5	0.1
210	37.9	38	0.1
220	37	37.4	0.4
230	34.9	34.6	-0.3
240	36	36.2	0.2
250	38.1	38.9	0.8
260	39.4	39.1	-0.3
270	40	39.4	-0.6
280	38.5	38.7	0.2
290	36.4	36.1	-0.3
300	35.5	35.6	0.1
310	38.5	37.8	-0.7
320	39.1	39	-0.1
330	39.5	39.2	-0.3
340	39	39.2	0.2
350	39.3	38.9	-0.4
		gemiddeld	-0.1 dB

Tabel 5.2.9: Antennediagram van een omnidirectioneel antennediagram voor verschillende vluchten

Directioneel antennediagram			
graden	vlucht 1 (dBW)	vlucht 2 (dBW)	verschil (dB)
0	48.5	47.6	-0.9
10	47.9	47.5	-0.4
20	48	47.7	-0.3
30	47.1	46.3	-0.8
40	43.9	43.2	-0.7
50	42	42.2	0.2
60	44	43.8	-0.2
70	44.4	44.2	-0.2
80	43.5	43.8	0.3
90	42.5	42.4	-0.1
100	41.6	40.9	-0.7
110	39.3	39.6	0.3
120	35.4	36	0.6
130	31	31.8	0.8
140	25.6	26.7	1.1
150	24.7	25.8	1.1
160	24.1	24.5	0.4
170	24.4	25	0.6
180	24.4	24.5	0.1
190	21.5	22.2	0.7
200	23.6	23.9	0.3
210	26.2	25.5	-0.7
220	25	24.2	-0.8
230	26.8	26.3	-0.5
240	28.4	28.3	-0.1
250	29.3	29.5	0.2
260	27.9	27.9	0
270	26.4	26.5	0.1
280	29.2	29.7	0.5
290	35.5	35.1	-0.4
300	40	39.9	-0.1
310	44	42.8	-1.2
320	45.6	45.3	-0.3
330	47.7	46.9	-0.8
340	48.3	48.2	-0.1
350	48.8	48.2	-0.6
		gemiddeld	-0.1 dB

Tabel 5.2.10: Antennediagram van een directioneel antennediagram voor verschillende vluchten

Analyse

De waarden in bovenstaande tabellen zijn overgenomen uit de Matlab analyse van de Radimation software. De afronding is veranderd naar 0,1 dB (in plaats van 1 dB) om beter de verschillen inzichtelijk te hebben. Gemiddeld is het verschil 0,1 dB tussen beide metingen wat een klein verschil is. Per meting (hoek) zijn er verschillen gemeten tot 1,1 dB. De achterliggende oorzaak voor de verschillen in de gemeten antennediagrammen is de variatie van hoogte en azimut (aanvlieghoek) ten opzichte van de ideale lijn. Deze zijn per vlucht anders en resulteren in variaties in het gemeten antennediagram. Geconcludeerd kan worden dat op basis van deze twee verificatievluchten van dezelfde antennediagrammen de meetprocedure reproduceerbaar is: dezelfde antennediagrammen worden gemeten. Eventuele verschillen vallen binnen de meetonzekerheid van het systeem (hoofdstuk 4).

5.3 BEOORDELING PROCEDURE TIJDENS MEETVLUCHTEN

Voordat er een meetvlucht wordt uitgevoerd, voert het agentschap een aantal controlemetingen uit:

- Controlemeting demping antenne RF kabel. De demping van de RF kabel wordt gemeten en moet vergelijkbaar zijn met de gekalibreerde demping.
- Controlemeting reflectiecoëfficiënt van beide antennes. De reflectiecoëfficiënt moet vergelijkbaar zijn met eerdere metingen. (Voor en na de metingen.)
- Controlemeting van een bestaande referentie FM zender. Deze testvlucht moet dezelfde meetresultaten geven als voorgaande metingen.

Deze controlemetingen zijn afdoende om een correcte werking van het systeem te waarborgen. Naast deze metingen wordt ook de meetontvanger periodiek gekalibreerd, zodat hiermee een correcte werking wordt gegarandeerd.

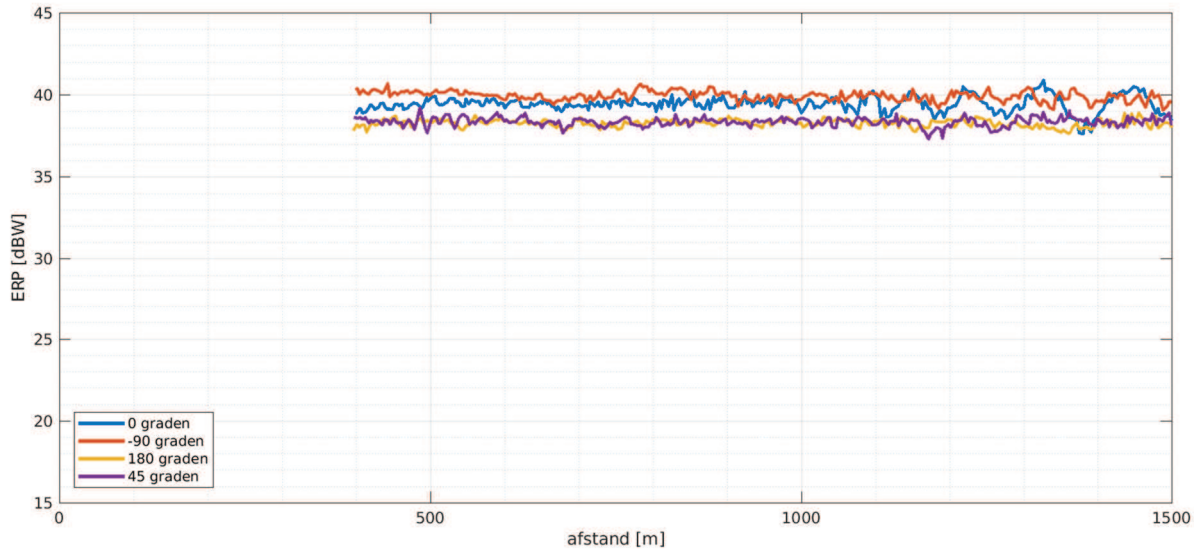
In het algemeen hebben weersinvloeden geen invloed op het gemeten antennediagram. Wel heeft (harde) wind en ook de ervaring van de helikopterpiloot een relatief grote invloed op de kwaliteit van de metingen. Beide oorzaken kunnen er voor zorgen dat de afwijking ten opzichte van de ideale afstand, hoogte en azimut te groot worden. In de RadiMation software wordt dit weliswaar gecorrigeerd. De meetonzekerheid neemt hierdoor wel toe.

Universiteit Twente beveelt aan om de eisen aan de piloot contractueel vast te leggen, zodat de vlucht optimaal wordt uitgevoerd.

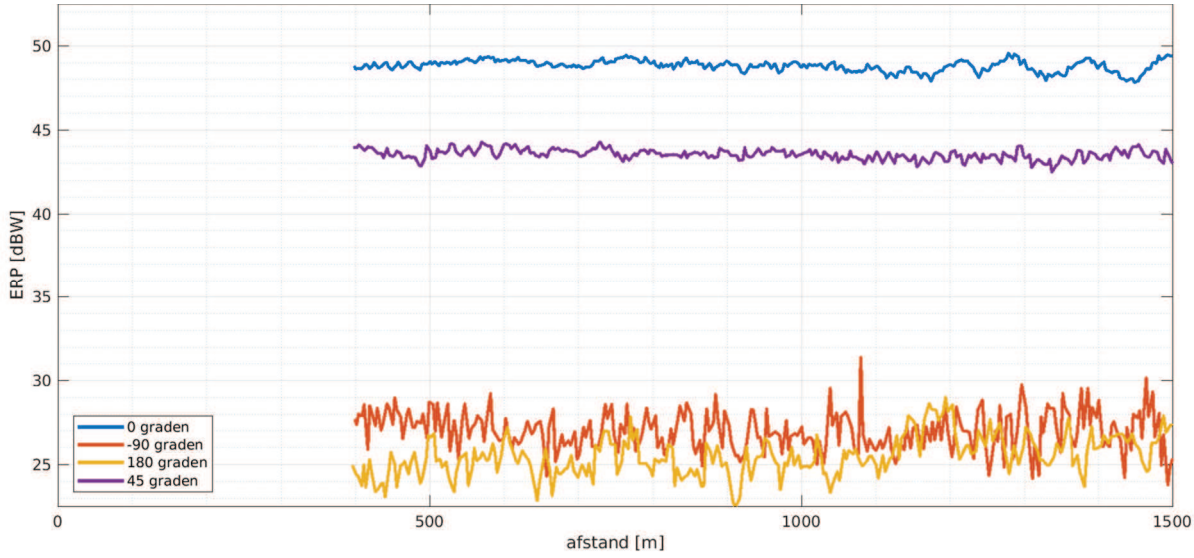
5.4 BEPALEN OPTIMALE AFSTANDSMETINGEN UIT VERSCHILLENDE AANVLIEGROUTES

In figuur 5.4.1 en 5.4.2 worden de resultaten van deze meting weergegeven: het ontvangen uitgestraalde e.r.p. vermogen versus de afstand voor de verschillende aanvlieghoeken. De hoofdstraalrichting van de antenne is op 355 graden (0 graden is het noorden). Daarnaast zijn er propagatievluchten gemaakt op andere aanvlieghoeken. Deze aanvlieghoeken worden beschreven ten opzichte van de hoofdstraalrichting. Vluchten zijn gemaakt op -90 graden, 180 graden en op 45 graden. Huidige FM zendantennes zijn vaak zogenaamde multipattern antennes welke bestaan uit meerdere panelen. Bij de keuze van aanvlieghoeken is om die reden gekozen om niet altijd loodrecht op een paneel te vliegen, maar ook tussen de panelen. Figuur 5.4.1 toont de meting voor het omnidirectionele antennediagram en figuur 5.4.2 d e meting door een directioneel antennediagram.

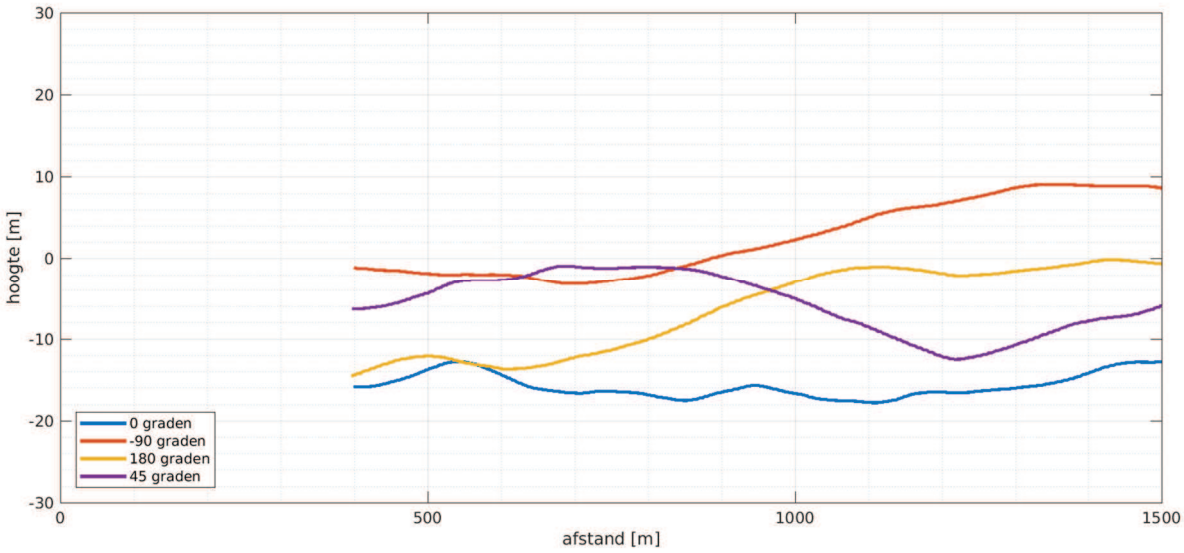
Daarnaast toont figuur 5.4.3 de hoogtevariatie ten opzichte van de ideale hoogte en figuur 5.4.4 laat de azimut-variatie zien ten opzichte van de ideale aanvlieghoek.



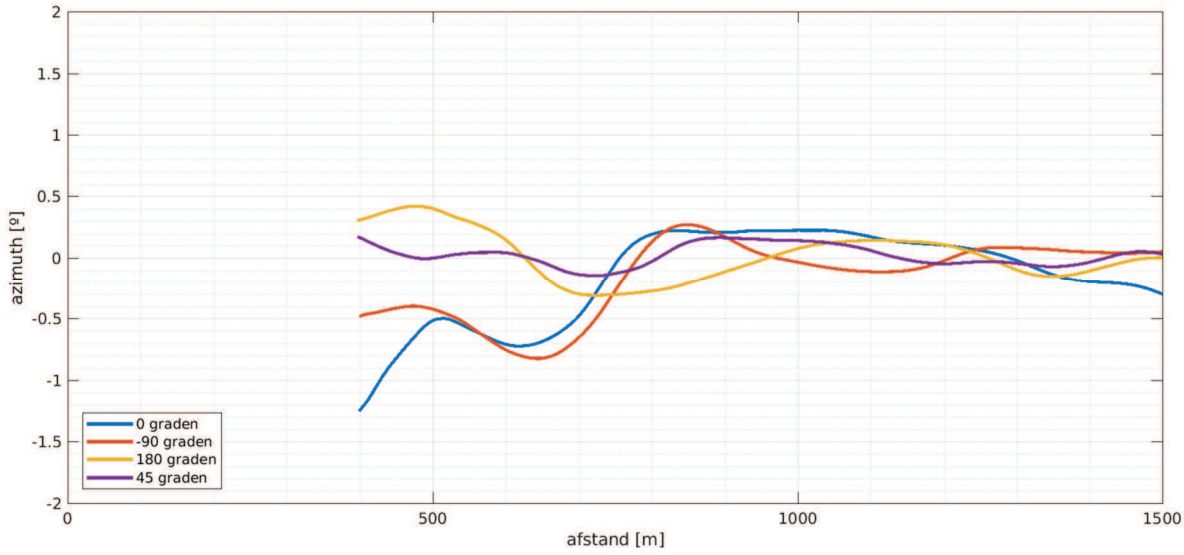
Figuur 5.4.1: Ontvangen uitgestraalde vermogen (e.r.p.) versus de afstand voor het omnidirectionele antennediagram voor verschillende aanvlieghoeken



Figuur 5.4.2: Ontvangen uitgestraalde vermogen (e.r.p.) versus de afstand voor het directionele antennediagram voor verschillende aanvlieghoeken



Figuur 5.4.3: Hoogtevariatie ten opzichte van de ideale hoogte voor de verschillende propagatievluchten



Figuur 5.4.4: Azimutvariatie ten opzichte van de ideale aanvlieghoek voor de verschillende propagatievluchten

Analyse

Bij het bepalen van een optimale afstand tot de zendmast wordt gekeken naar de optimale afstand voor alle frequenties die op hetzelfde moment worden gemeten. Bovenstaande figuren tonen de propagatievlucht voor 2 frequenties/antennediagrammen. Ten opzichte van de grafieken in sectie 5.2 is een groter bereik gekozen voor de y-as, om ook lagere signaalwaarden van het directionele antennediagram te kunnen tonen. Voor een goede vergelijking is voor het directionele antennepatroon dezelfde schaal toegepast. Hierdoor lijken signaalvariaties kleiner dan getoond in sectie 5.2.

Over het algemeen kan worden gesteld dat de optimale afstand gelijk is voor de verschillende hoeken van de propagatievlucht. Boven de 1 km wijken de vluchten van elkaar af doordat hoge bebouwing (reflecties) een rol spelen op grotere afstanden. Ook zal de grondreflectie dominanter zijn, omdat het padverschil tussen het directe pad en de grondreflectie kleiner is geworden.

Ook in het geval van een directioneel antennediagram zijn de propagatievluchten uit hoeken waarbij het signaal veel zwakker is (> 10 dB) dan uit de hoofdstraalrichting ongeschikt om de optimale afstand te bepalen. In deze gevallen spelen de reflecties uit de hoofdstraalrichting (en/of andere hoeken waar het signaal veel sterker is) een grote rol in het gemeten signaal.

Daarnaast blijkt uit de metingen dat de variaties tussen minima en maxima kleiner zijn voor een directionele antennediagram dan een omnidirectionele antennediagram Dit effect is sterker gezien in de metingen van 2012. Bovenstaand punt versterkt de stelling dat naast de grondreflectie ook reflecties door hoge gebouwen of objecten nabij de zendantenne een significante invloed hebben op de gemeten signaalvariaties in de propagatievlucht. Uit de analyse van de metingen van 2012 blijkt bijvoorbeeld dat de variaties tussen minima en maxima ongeveer 50% kleiner zijn voor een directioneel antennediagram[40].

5.5 ANTENNEDIAGRAM METEN OP VERSCHILLENDE AFSTANDEN

Voor dit onderdeel zijn de antennediagrammen van het omnidirectioneel en directioneel antennediagram op verschillende afstanden tot de zendmast gemeten: op 600 meter, op 800 meter (optimale afstand) en op 1200 meter. De resultaten worden in de tabellen 5.5.1 en 5.5.2 weergegeven.

[40] Dit geldt voor dezelfde antennediagrammen die zijn gemeten in 2017 tijdens de verificatievlucht.

Omnidirectioneel antennediagram					
graden	800 meter (dBW)	600 meter (dBW)	1200 meter (dBW)	Verschil 600 met 800 meter	Verschil 1200 met 800 meter
0	39.5	39.3	39.7	-0.2	0.2
10	40.3	40	40.4	-0.3	0.1
20	40.4	40.3	40.5	-0.1	0.1
30	39.5	39.7	39.6	0.2	0.1
40	38.5	38.2	38.4	-0.3	-0.1
50	39.2	39.4	39.5	0.2	0.3
60	40.8	40.9	40.6	0.1	-0.2
70	41.1	41.2	41.3	0.1	0.2
80	40.7	40.6	40.2	-0.1	-0.5
90	39.1	39.2	39.3	0.1	0.2
100	38	37.7	37.5	-0.3	-0.5
110	38.4	38	38.2	-0.4	-0.2
120	38.8	39.1	39	0.3	0.2
130	37.6	37.9	37.5	0.3	-0.1
140	35.8	35.8	35.8	0.0	0.0
150	36.5	36.7	36.5	0.2	0.0
160	37.8	37.6	37.7	-0.2	-0.1
170	38.4	38.3	38	-0.1	-0.4
180	37.9	38.1	37.8	0.2	-0.1
190	37.4	37.4	37.3	0.0	-0.1
200	37.4	37.2	37.2	-0.2	-0.2
210	37.9	37.9	38.1	0.0	0.2
220	37	37.1	37	0.1	0.0
230	34.9	35.1	35.3	0.2	0.4
240	36	36.1	35.7	0.1	-0.3
250	38.1	38.2	38.5	0.1	0.4
260	39.4	39.3	39.5	-0.1	0.1
270	40	39.5	39.5	-0.5	-0.5
280	38.5	38.3	38.6	-0.2	0.1
290	36.4	35.8	36.4	-0.6	0.0
300	35.5	35.6	35.6	0.1	0.1
310	38.5	37.9	38.4	-0.6	-0.1
320	39.1	39.2	39.3	0.1	0.2
330	39.5	39	39.6	-0.5	0.1
340	39	39.1	39.6	0.1	0.6
350	39.3	39	39.1	-0.3	-0.2
		Gemiddeld		-0.1 dB	0.0 dB

Tabel 5.5.1: Cirkelvlucht omnidirectioneel antennediagram voor verschillende afstanden tot de zendertoren

Directioneel antennediagram					
graden	800 meter (dBW)	600 meter (dBW)	1200 meter (dBW)	Verschil 600 met 800 meter	Verschil 1200 met 800 meter
0	48.5	48.1	48.6	-0.4	0.1
10	47.9	47.5	47.8	-0.4	-0.1
20	48	47.5	47.6	-0.5	-0.4
30	47.1	47	47.1	-0.1	0.0
40	43.9	43.4	43.5	-0.5	-0.4
50	42	42.3	42.5	0.3	0.5
60	44	44.1	43.9	0.1	-0.1
70	44.4	44.7	44.7	0.3	0.3
80	43.5	43.8	43.3	0.3	-0.2
90	42.5	42.6	42.7	0.1	0.2
100	41.6	41.4	41.4	-0.2	-0.2
110	39.3	39.3	39.2	0.0	-0.1
120	35.4	36.3	35.9	0.9	0.5
130	31	31.9	31.5	0.9	0.5
140	25.6	26.3	26.2	0.7	0.6
150	24.7	25.1	25.1	0.4	0.4
160	24.1	24.6	24.3	0.5	0.2
170	24.4	24.6	24.3	0.2	-0.1
180	24.4	24.2	24.9	-0.2	0.5
190	21.5	21.5	23.2	0.0	1.7
200	23.6	22.9	24.5	-0.7	0.9
210	26.2	25	27	-1.2	0.8
220	25	24	25.6	-1.0	0.6
230	26.8	26.4	26.7	-0.4	-0.1
240	28.4	28	28.4	-0.4	0.0
250	29.3	28.7	29.3	-0.6	0.0
260	27.9	28	28.8	0.1	0.9
270	26.4	26.6	27.9	0.2	1.5
280	29.2	29.8	31.1	0.6	1.9
290	35.5	35.3	35.7	-0.2	0.2
300	40	40.2	40.2	0.2	0.2
310	44	43.6	43.7	-0.4	-0.3
320	45.6	45.8	45.7	0.2	0.1
330	47.7	46.8	47.6	-0.9	-0.1
340	48.3	48.1	48.4	-0.2	0.1
350	48.8	48.5	48.6	-0.3	-0.2
			gemiddeld	-0.1 dB	0.3 dB

Tabel 5.5.2: Cirkelvlucht directioneel antennediagram voor verschillende afstanden tot de zendertoren

Analyse

Uit de metingen op verschillende afstanden blijkt dat de optimale afstand niet een kritische factor is. Dit versterkt het feit dat de meetprocedure reproduceerbaar is. Verschillen zijn in dezelfde ordegrootte als voor twee onafhankelijke metingen op de optimale afstand. Wel is te zien dat voor het directioneel antennediagram de afwijking iets groter is op 1200 meter en dan met name in de hoeken waarbij het uitgestraalde vermogen veel lager is ten opzichte van het uitgestraalde vermogen in de hoofdstraalrichting. In deze gevallen spelen reflecties een dominantere rol zoals ook uit de propagatievlucht blijkt. Hierdoor neemt de meetonzekerheid toe. Daarnaast speelt ook mee dat de meetontvanger een lichte niet-lineariteit heeft voor zwakke signalen dicht bij de ruisvloer van de meetontvanger. Dit fenomeen is beschreven in sectie 3.2.1. Op 1200 meter afstand en bij lage uitgestraalde vermogens zal men in dit niet-lineaire meetgebied meten. Voor het bepalen van het antennediagrammen in deze sectie wordt op 800 meter gevlogen en treedt deze niet-lineariteit dus niet op.

5.6 METEN VAN ZWAKKE UITGESTRAALDE FM VERMOGENS VAN 1 KW OF MINDER

Uit de validatiemetingen van de meetontvanger bleek dat de meetontvanger bij signalen minder dan 10 dB van de ruisvloer niet meer volledig lineair is. In dit meetgebied zal een grotere meetfout ontstaan. Dit is vooral voor het meten van zwakkere uitgestraalde FM vermogens (< 1 kW) van belang. Om dit punt te onderzoeken is een drietal cirkelvluchten uitgevoerd op de optimale afstand tot de zendmast waarbij de verzwakking in de meetontvanger is gevarieerd, namelijk 30 dB (standaardinstelling), 20 dB en 10 dB verzwakking. Daarnaast zijn de resultaten uit een andere meting gebruikt van een cirkelvlucht op 1200 meter met 30 dB verzwakking (sectie 5.5). Deze vlucht is toegevoegd in dit onderdeel, omdat het padverlies van het RF signaal lager zal zijn, waardoor genoemde niet-lineariteit zich sterker zal openbaren. De resultaten van twee directionele antennediagrammen zijn in onderstaande tabellen weergegeven; tabel 5.6.1 en tabel 5.6.2. De uitgestraalde vermogens van de omnidirectionele antennediagrammen zijn niet toegevoegd, omdat deze te hoog liggen voor dit onderdeel. De blauw gearceerde gebieden zijn gemeten uitgestraalde vermogens lager dan 1 kW. Daarnaast worden aan de rechterkant de verschillen getoond ten opzichte van de 20 dB RF verzwakking. Deze referentie is gekozen, omdat bij 10 dB de meetontvanger eventueel kan worden overstuurd, waardoor deze ook niet-lineariteit kan vertonen.

Directioneel antennediagram nr 1							
graden	30 dB verzwakking 800 meter (dBW)	20 dB verzwakking 800 meter (dBW)	10 dB verzwakking 800 meter (dBW)	30 dB verzwakking 1200 meter (dBW)	verschil 30 dB met 20 dB verzw.	verschil 10 dB met 20 dB verzw.	verschil 30 dB 1200 m met 20 dB verzw.
0	48.5	48.2	48.3	48.6	0.3	0.1	0.4
10	47.9	47.4	47.2	47.8	0.5	-0.2	0.4
20	48	48	47.9	47.6	0	-0.1	-0.4
30	47.1	46.6	46.5	47.1	0.5	-0.1	0.5
40	43.9	43.6	43.4	43.5	0.3	-0.2	-0.1
50	42	42.2	42.2	42.5	-0.2	0	0.3
60	44	43.8	43.8	43.9	0.2	0	0.1
70	44.4	44.1	44.2	44.7	0.3	0.1	0.6
80	43.5	43.6	43.5	43.4	-0.1	-0.1	-0.2
90	42.5	42.7	42.5	42.7	-0.2	-0.2	0
100	41.6	41.6	41.5	41.4	0	-0.1	-0.2
110	39.3	39.1	39	39.2	0.2	-0.1	0.1
120	35.4	36	35.9	35.9	-0.6	-0.1	-0.1
130	31	31.7	31.5	31.5	-0.7	-0.2	-0.2
140	25.6	26.1	26.2	26.2	-0.5	0.1	0.1
150	24.7	25.1	25.6	25.1	-0.4	0.5	0
160	24.1	23.9	24.5	24.3	0.2	0.6	0.4
170	24.4	24.2	24.2	24.3	0.2	0	0.1
180	24.4	23.8	23.8	24.9	0.6	0	1.1
190	21.5	22.5	22.4	23.2	-1	-0.1	0.7
200	23.6	24.9	24.2	24.5	-1.3	-0.7	-0.4
210	26.2	26.1	26.4	27	0.1	0.3	0.9
220	25	25.4	24	25.6	-0.4	-1.4	0.2
230	26.8	26.5	26	26.7	0.3	-0.5	0.2
240	28.4	28.5	28.4	28.4	-0.1	-0.1	-0.1
250	29.3	29.1	29.3	29.3	0.2	0.2	0.2
260	27.9	28.6	28.5	28.8	-0.7	-0.1	0.2
270	26.4	26.7	26.9	27.9	-0.3	0.2	1.2
280	29.2	30.2	30.2	31.1	-1	0	0.9
290	35.5	35.6	35.7	35.7	-0.1	0.1	0.1
300	40	40.1	40.2	40.2	-0.1	0.1	0.1
310	44	43.8	43.9	43.7	0.2	0.1	-0.1
320	45.6	46	45.8	45.7	-0.4	-0.2	-0.3
330	47.7	47.1	47.5	47.6	0.6	0.4	0.5
340	48.3	48.2	48.1	48.4	0.1	-0.1	0.2
350	48.8	48.7	48.4	48.6	0.1	-0.3	-0.1
			gemiddeld		-0.1 dB	-0.1 dB	0.2 dB
		Gemiddeld (blauwe regels)			-0.3 dB	-0.1 dB	0.4 dB

Tabel 5.6.1: Directioneel antennediagram 1 voor verschillende RF verzwakkingen

Directioneel antennediagram nr 2							
graden	30 dB verzwakking 800 meter (dBW)	20 dB verzwakking 800 meter (dBW)	10 dB verzwakking 800 meter (dBW)	30 dB verzwakking 1200 meter (dBW)	verschil 30 dB met 20 dB verzw.	verschil 10 dB met 20 dB verzw.	verschil 30 dB 1200 m met 20 dB verzw.
0	48.4	48.4	48.3	48.4	0	-0.1	0
10	47.4	47	46.9	47.5	0.4	-0.1	0.5
20	46.9	47.3	47.1	46.9	-0.4	-0.2	-0.4
30	45.6	45.4	45.3	45.8	0.2	-0.1	0.4
40	42	42.1	41.9	42	-0.1	-0.2	-0.1
50	41.5	41.4	41.3	41.6	0.1	-0.1	0.2
60	43.7	43.2	43	43.3	0.5	-0.2	0.1
70	43.9	43.4	43.6	44	0.5	0.2	0.6
80	43.2	43	43	42.9	0.2	0	-0.1
90	42.4	42.6	42.3	42.6	-0.2	-0.3	0
100	41.7	41.7	41.3	41.3	0	-0.4	-0.4
110	39.7	39.2	39	39.4	0.5	-0.2	0.2
120	36.1	36.2	35.9	36.3	-0.1	-0.3	0.1
130	31.3	31	31	31.2	0.3	0	0.2
140	24	23.3	23.4	24.3	0.7	0.1	1
150	24.1	22.9	23.7	24.2	1.2	0.8	1.3
160	26.7	26.6	26.2	26.8	0.1	-0.4	0.2
170	25.8	25.9	25.5	25.6	-0.1	-0.4	-0.3
180	21	20.7	21.6	22.2	0.3	0.9	1.5
190	19.9	19.9	20.4	21.8	0	0.5	1.9
200	26.2	26.5	26.9	26.4	-0.3	0.4	-0.1
210	32	31.8	32.2	32.3	0.2	0.4	0.5
220	35.7	36.3	35.7	35.9	-0.6	-0.6	-0.4
230	38.7	39.2	38.9	39.4	-0.5	-0.3	0.2
240	40.8	40.8	41.3	40.8	0	0.5	0
250	41.2	41.8	41.4	42	-0.6	-0.4	0.2
260	40.9	41.5	41.2	41.6	-0.6	-0.3	0.1
270	41.1	41.2	41.3	41.1	-0.1	0.1	-0.1
280	39.5	40.1	39.9	40	-0.6	-0.2	-0.1
290	36	35.6	35.5	35.8	0.4	-0.1	0.2
300	40.4	40.6	40.8	40.8	-0.2	0.2	0.2
310	45.5	45.4	45.3	45.6	0.1	-0.1	0.2
320	46.5	47	46.8	46.8	-0.5	-0.2	-0.2
330	47.5	47.2	47.4	47.6	0.3	0.2	0.4
340	48.2	48.1	48.2	48.6	0.1	0.1	0.5
350	48.9	48.8	48.7	48.6	0.1	-0.1	-0.2
			Gemiddeld		0.0 dB	0.0 dB	0.2 dB
		Gemiddeld (blauwe regels)			0.3 dB	0.3 dB	0.8 dB

Tabel 5.6.2: Directioneel antennediagram 2 voor verschillende RF verzwakkingen

Analyse

Uit de verschillende metingen blijkt dat de meetontvanger inderdaad niet-lineair is bij zwakke signalen. Dit verschil is het duidelijkst te zien bij de cirkelvlucht met 30 dB RF verzwakking op 1200 meter ten opzichte van de 30 dB vlucht op de optimale afstand. Gemiddeld is het uitgestraalde vermogen 0.2 dB sterker bij de vlucht op 1200 meter; bij de blauwe cellen is dit gemiddeld 0.8 dB. Daarnaast is bij directioneel antennediagram 2 op 140, 150, 180 en 190 graden het verschil groter dan 1 dB. Op deze hoeken is de signaalsterkte het zwakst van beide antennediagrammen. Hier lijkt duidelijk de niet-lineariteit zichtbaar zoals we die beschreven in het validatiehoofdstuk (sectie 3.2). Uit sectie 5.4 blijkt dat bij zwakkere uitgestraalde vermogens ook de signaalvariaties toenemen. Hierdoor neemt de meetonzekerheid toe tot 1,5 dB. Niet-lineariteit en meetonzekerheid zijn in dezelfde ordegrootte, hierdoor zal de niet-lineariteit niet altijd zichtbaar zijn in de resultaten van de tabellen 5.6.1 en 5.6.2.

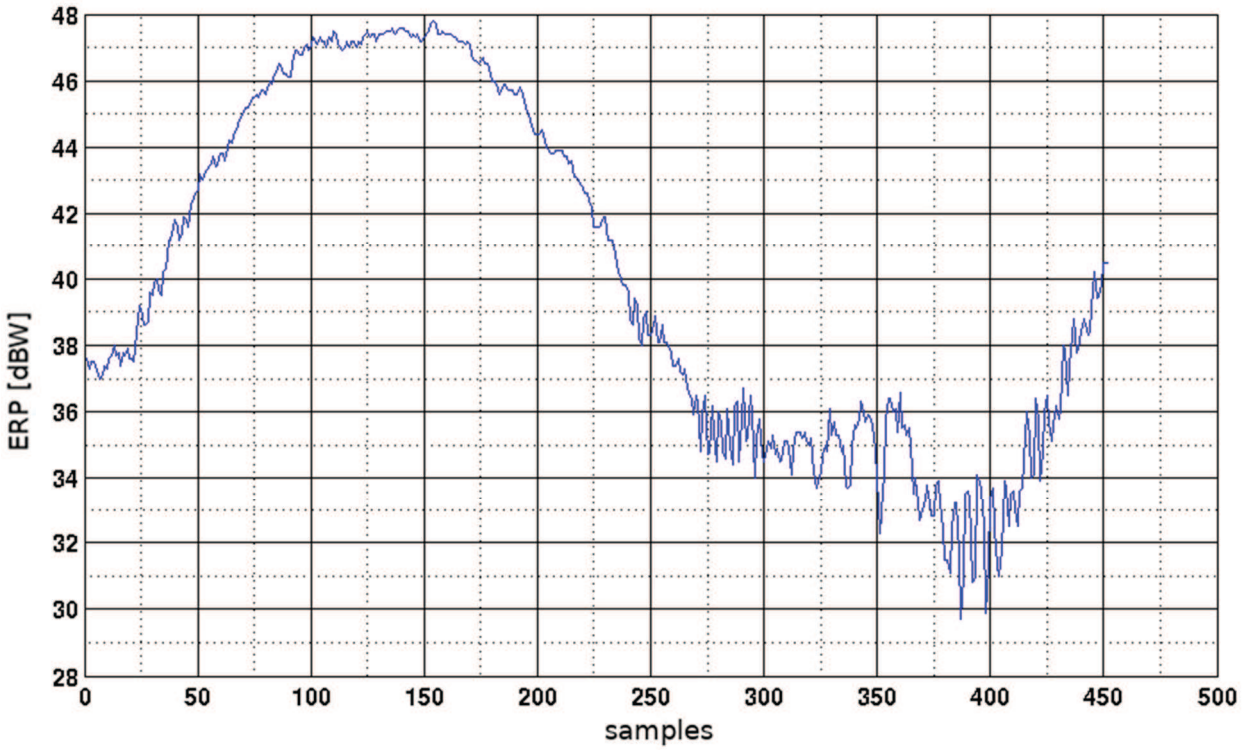
Deze resultaten moeten wel in perspectief worden gezien. Voor reguliere meetafstanden tot 1 km en uitgestraalde vermogens boven de 1 kW blijkt de ontvanger lineair te werken. Bij grotere afstanden zal deze minimale vermogensgrens wel hoger gaan liggen vanwege het grotere padverlies[41] en het daarmee zwakker RF signaal. Uit sectie 5.4 komt naar voren dat de verschillen in signaal tussen de maxima en minima tijdens de propagatievlucht veel groter zijn in gebieden van het directionele antennediagram waar het RF signaal zwak wordt uitgezonden: ‘de achterkant van de antenne’. Doordat de gekozen middeling sterke signalen relatief bevoordeelt, wordt daardoor het gemeten uitgestraalde vermogen aan de ‘achterkant van de antenne’ te hoog gemeten. In hoofdstuk 4 meetonzekerheid is verder ingegaan op de gekozen implementatie van de middeling van signalen.

5.7 METEN VAN HET ANTENNEDIAGRAM VAN DE MEETANTENNE

Om het antennediagram van de meetantenne te verifiëren is een meting uitgevoerd waarbij de helikopter rond zijn as is gedraaid op een punt in de hoofdstraalrichting van de FM zendantenne. De resultaten zijn in figuur 5.7.1 weergeven. Hier is het uitgestraalde vermogen uitgezet tegen de samples. Doordat de helikopter niet de hoek van de helikopter registreert, kunnen de meetwaarden niet omgezet worden naar hoeken. Uit het figuur kan worden afgeleid dat de meetantenne een relatieve grote openingshoek heeft van ongeveer 135 graden. Daarnaast is de variatie in de hoofdstraalrichting van de antenne laag (< 0,5 dB). Hiermee is de meetantenne ongevoelig voor richtfouten.

Ook kan uit figuur 5.7.1 worden afgeleid dat de lokale variaties op het antennediagram erg klein zijn; minder dan 0,1 dB. Dit betekent dat de helikopter (reflecties) geen significante invloed lijkt te hebben op de metingen. Er zijn ook geen andere aanwijzingen dat de helikopter invloed heeft op de meetresultaten.

[41] Draadloze signalen zoals een FM signaal verzwakken naarmate de afstand groter wordt. Deze verzwakking wordt ook wel padverlies (of paddemping) genoemd.



Figuur 5.7.1: Gemeten antennediagram van de meetantenne

5.8 INVLOED VERSCHILLENDE MIDDELINGSMETHODES OP HET ANTENNEDIAGRAM

Uit het hoofdstuk meetonzekerheid (hoofdstuk 4) blijkt dat de geïmplementeerde middelingsmethode niet optimaal is gekozen. In de door het agentschap gekozen methode worden ruwe meetsamples in het lineaire domein gemiddeld. Het is beter om de mediane waarde te kiezen in het logaritmische domein. De gekozen implementatie van het agentschap bevoordeelt namelijk sterkere meetwaarden licht. Meer informatie hierover is te vinden in het vorige hoofdstuk 4.

De invloed van de middelingsmethode moet wel in perspectief worden gezien. De variatie in ruwe signaalwaarden is laag. De verwachte invloed van de middelingsmethode zal daarom ook een beperkte invloed hebben.

In de volgende tabellen wordt het antennediagram getoond voor respectievelijk een omnidirectioneel (figuur 5.8.1) en directioneel antennediagram (figuur 5.8.2) waarbij de middelingsmethode is gevarieerd.

Omnidirectioneel antennediagram			
graden	AT implementatie (dBW)	mediaan (dBW)	verschil (dB)
0	39.5	39.6	0.1
10	40.3	40.3	0
20	40.4	40.4	0
30	39.5	39.5	0
40	38.5	38.4	-0.1
50	39.2	39.2	0
60	40.8	40.7	-0.1
70	41.1	41.2	0.1
80	40.7	40.8	0.1
90	39.1	39	-0.1
100	38	38	0
110	38.4	38.4	0
120	38.8	38.8	0
130	37.6	37.6	0
140	35.8	35.7	-0.1
150	36.5	36.6	0.1
160	37.8	37.8	0
170	38.4	38.4	0
180	37.9	37.9	0
190	37.4	37.4	0
200	37.4	37.5	0.1
210	37.9	37.9	0
220	37	37	0
230	34.9	35	0.1
240	36	36	0
250	38.1	38.2	0.1
260	39.4	39.5	0.1
270	40	40	0
280	38.5	38.7	0.2
290	36.4	36.3	-0.1
300	35.5	35.5	0
310	38.5	38.4	-0.1
320	39.1	39.2	0.1
330	39.5	39.5	0
340	39	39	0
350	39.3	39.3	0
		gemiddeld	0.0 dB

Tabel 5.8.1: Omnidirectioneel antennediagram 2 voor verschillende middelingsmethodes

Directioneel antennediagram			
graden	AT implementatie (dBW)	mediaan (dBW)	verschil (dB)
0	48.5	48.6	0.1
10	47.9	47.9	0
20	48	48.1	0.1
30	47.1	47.1	0
40	43.9	44	0.1
50	42	42	0
60	44	44.1	0.1
70	44.4	44.3	-0.1
80	43.5	43.5	0
90	42.5	42.5	0
100	41.6	41.7	0.1
110	39.3	39.3	0
120	35.4	35.3	-0.1
130	31	31	0
140	25.6	25.4	-0.2
150	24.7	24.4	-0.3
160	24.1	23.4	-0.7
170	24.4	24.1	-0.3
180	24.4	24.1	-0.3
190	21.5	21.4	-0.1
200	23.6	23.6	0
210	26.2	26.3	0.1
220	25	24.9	-0.1
230	26.8	26.8	0
240	28.4	28.3	-0.1
250	29.3	29.2	-0.1
260	27.9	27.8	-0.1
270	26.4	26.3	-0.1
280	29.2	29.4	0.2
290	35.5	35.4	-0.1
300	40	39.7	-0.3
310	44	44	0
320	45.6	45.6	0
330	47.7	47.7	0
340	48.3	48.5	0.2
350	48.8	48.9	0.1
		gemiddeld	-0.05 dB
	Gemiddeld (blauwe regels)		-0.14 dB

Tabel 5.8.2: Directioneel antennediagram 2 voor verschillende middelingsmethodes

Analyse

Uit de tabellen 5.8.1 en 5.8.2 blijkt dat er over het algemeen weinig verschil is tussen beide middelingsmethoden. Wel is er een groter verschil bij lagere uitgestraalde vermogens onder de 1 kW. Dit is ook te zien in tabel 5.8.2 (blauw gearceerd). De gekozen middelingsmethode door Agentschap Telecom geeft typisch 0.1 tot 0.3 dB te hoge waarden[42] met een enkele uitschieter. Bij afronding naar hele dB waarden zoals in de implementatie van het agentschap wordt toegepast, zou dit kunnen resulteren in een 1 dB lager uitgestraalde vermogen in het gemeten antennediagram.

De oorzaak waarom de verschillen in middelingsmethoden groter zijn bij lagere uitgestraalde vermogens is dat de verschillen tussen minima en maxima toenemen als aan de 'achterkant' van een directionele antenne wordt gemeten (zie sectie 5.4). Bij grotere lokale signaalvariaties zal de bevoordeling van sterkere signalen meer zijn bij lineair middelen van de meetwaarden dan als voorde mediane waarde wordt gekozen.

5.9 INVLOED MIDDELINGSVENSTER OP ANTENNEDIAGRAM

In de huidige opzet van de metingen wordt een middelingsvenster van 6 graden gebruikt per 10-graden hoek. De keuze voor 6-graden is pragmatisch. Bij een grotere hoek kunnen sterkere veranderingen in het antennediagram niet goed worden weergegeven, doordat de middeling deze verandering onderdrukt. Bij kleinere hoeken neemt het aantal meetwaarden af, waardoor ook de meetnauwkeurigheid afneemt.

In onderstaande tabel is het middelingsvenster gevarieerd met 6 graden (± 3 graden, standaardinstelling) met 2 graden (± 1 graden) en met 10 graden (± 5 graden) voor een directioneel antennediagram. Dit is herhaald voor de tweede vlucht.

[42] Hierbij wordt als "ground truth" de nieuwe middelingsmethode uit het vorige hoofdstuk gebruikt.

Directioneel antennediagram vlucht 1					
graden	2 graden venster (dBW)	6 graden venster (dBW)	10 graden venster (dBW)	verschil 6 en 2 graden (dB)	verschil 10 en 2 graden (dB)
0	48.5	48.5	48.5	0	0
10	47.9	47.9	47.9	0	0
20	48	48	48	0	0
30	47	47.1	47	0.1	0
40	43.9	43.9	44	0	0.1
50	41.8	42	42.2	0.2	0.4
60	44.2	44	43.9	-0.2	-0.3
70	44.3	44.4	44.4	0.1	0.1
80	43.5	43.5	43.6	0	0.1
90	42.4	42.5	42.6	0.1	0.2
100	41.7	41.6	41.5	-0.1	-0.2
110	39.3	39.3	39.3	0	0
120	35.3	35.4	35.6	0.1	0.3
130	31.1	31	31.1	-0.1	0
140	25.5	25.6	25.8	0.1	0.3
150	24.8	24.7	24.6	-0.1	-0.2
160	23.5	24.1	23.9	0.6	0.4
170	24	24.4	24.3	0.4	0.3
180	24.4	24.4	24.4	0	0
190	21.6	21.5	21.6	-0.1	0
200	23.4	23.6	23.7	0.2	0.3
210	26.2	26.2	26	0	-0.2
220	25	25	25.1	0	0.1
230	26.9	26.8	26.7	-0.1	-0.2
240	28.3	28.4	28.5	0.1	0.2
250	28.9	29.3	29.4	0.4	0.5
260	27.9	27.9	27.9	0	0
270	26.1	26.4	26.7	0.3	0.6
280	29.2	29.2	29.6	0	0.4
290	35.4	35.5	35.6	0.1	0.2
300	39.7	40	40.1	0.3	0.4
310	44.1	44	44	-0.1	-0.1
320	45.4	45.6	45.9	0.2	0.5
330	47.6	47.7	47.6	0.1	0
340	48.3	48.3	48.4	0	0.1
350	48.9	48.8	48.9	-0.1	0
			gemiddeld	0.1 dB	0.2 dB

Tabel 5.10.1: Directioneel antennediagram 1 met verschillende middelingsvensters

Directioneel antennediagram vlucht 2					
graden	2 graden venster (dBW)	6 graden venster (dBW)	10 graden venster (dBW)	verschil 6 en 2 graden (dB)	verschil 10 en 2 graden (dB)
0	47.6	47.6	47.6	0	0
10	47.6	47.5	47.6	-0.1	0
20	47.8	47.7	47.7	-0.1	-0.1
30	46.2	46.3	46.3	0.1	0.1
40	43.1	43.2	43.3	0.1	0.2
50	42.1	42.2	42.2	0.1	0.1
60	43.6	43.8	43.7	0.2	0.1
70	44.3	44.2	44.2	-0.1	-0.1
80	43.8	43.8	43.8	0	0
90	42.3	42.4	42.4	0.1	0.1
100	40.9	40.9	41	0	0.1
110	39.5	39.6	39.6	0.1	0.1
120	36	36	36	0	0
130	31.7	31.8	31.8	0.1	0.1
140	26.7	26.7	27	0	0.3
150	25.9	25.8	25.6	-0.1	-0.3
160	24.4	24.5	24.6	0.1	0.2
170	24.8	25	24.9	0.2	0.1
180	24.6	24.5	24.4	-0.1	-0.2
190	22	22.2	22.4	0.2	0.4
200	24.2	23.9	23.9	-0.3	-0.3
210	25.4	25.5	25.6	0.1	0.2
220	24.2	24.2	24.6	0	0.4
230	26.1	26.3	26.5	0.2	0.4
240	28.4	28.3	28.5	-0.1	0.1
250	29.4	29.5	29.5	0.1	0.1
260	27.9	27.9	27.9	0	0
270	26.1	26.5	26.6	0.4	0.5
280	29.4	29.7	29.9	0.3	0.5
290	35.2	35.1	35.3	-0.1	0.1
300	39.7	39.9	39.9	0.2	0.2
310	42.6	42.8	43	0.2	0.4
320	45.3	45.3	45.2	0	-0.1
330	47	46.9	46.9	-0.1	-0.1
340	48.2	48.2	48.1	0	-0.1
350	48.2	48.2	48.2	0	0
			gemiddeld	0.0 dB	0.1 dB

Tabel 5.10.2: Directioneel antennediagram 2 met verschillende middelingsvensters

Directioneel antennepatroon vlucht 1					
graden	2 graden venster (dBW)	6 graden venster (dBW)	10 graden venster (dBW)	verschil 2 en 6 graden (dB)	verschil 10 en 6 graden (dB)
0	48.7	48.6	48.6	-0.1	-0.1
10	47.3	47.9	47.9	0.6	0.6
20	48.1	48.1	48.1	0	0
30	47.1	47.1	47.1	0	0
40	44	44	44	0	0
50	41.8	42	42.2	0.2	0.4
60	44.2	44.1	43.9	-0.1	-0.3
70	44.3	44.3	44.4	0	0.1
80	43.5	43.5	43.5	0	0
90	42.4	42.5	42.6	0.1	0.2
100	41.8	41.7	41.7	-0.1	-0.1
110	39.3	39.3	39.3	0	0
120	35.3	35.3	35.4	0	0.1
130	31	31	31	0	0
140	25.4	25.4	25.5	0	0.1
150	24.3	24.4	24.4	0.1	0.1
160	23.1	23.4	23.4	0.3	0.3
170	23.6	24.1	24.1	0.5	0.5
180	24.3	24.1	24.1	-0.2	-0.2
190	21	21.4	21.3	0.4	0.3
200	23.1	23.6	23.6	0.5	0.5
210	26.1	26.3	26	0.2	-0.1
220	24.9	24.9	25	0	0.1
230	27	26.8	26.6	-0.2	-0.4
240	28.1	28.3	28.4	0.2	0.3
250	28.5	29.2	29.4	0.7	0.9
260	27.7	27.8	27.8	0.1	0.1
270	26.2	26.3	26.5	0.1	0.3
280	29.4	29.4	29.4	0	0
290	35.4	35.4	35.4	0	0
300	39.6	39.7	39.6	0.1	0
310	44	44	44	0	0
320	45.3	45.6	45.6	0.3	0.3
330	47.4	47.7	47.6	0.3	0.2
340	48.6	48.5	48.5	-0.1	-0.1
350	48.9	48.9	48.9	0	0
			gemiddeld	0.1 dB	0.1 dB

Tabel 5.10.3: Directioneel antennediagram 1 met verschillende middelingsvensters met alternatieve middelingsmethode

Directioneel antennepatroon vlucht 2					
graden	2 graden venster (dBW)	6 graden venster (dBW)	10 graden venster (dBW)	verschil 6 en 2 graden (dB)	verschil 10 en 2 graden (dB)
0	48.5	48.5	48.5	0	0
10	47.5	47.4	47.3	-0.1	-0.2
20	46.9	47	47	0.1	0.1
30	45.8	45.7	45.7	-0.1	-0.1
40	42.1	42	42	-0.1	-0.1
50	41.3	41.4	41.6	0.1	0.3
60	43.9	43.7	43.5	-0.2	-0.4
70	43.9	43.9	43.9	0	0
80	43.4	43.2	43.2	-0.2	-0.2
90	42.4	42.4	42.4	0	0
100	41.9	41.8	41.8	-0.1	-0.1
110	39.7	39.7	39.7	0	0
120	36.2	36.1	36.1	-0.1	-0.1
130	31.3	31.3	31.3	0	0
140	23.1	23.5	23.8	0.4	0.7
150	24.1	23.8	24	-0.3	-0.1
160	27	26.7	26.3	-0.3	-0.7
170	25.8	25.5	25.4	-0.3	-0.4
180	20.7	20.9	21.2	0.2	0.5
190	19.6	19.6	19.6	0	0
200	25.9	26	25.9	0.1	0
210	32.2	32.1	32.1	-0.1	-0.1
220	35.8	35.4	35.4	-0.4	-0.4
230	38.6	38.6	38.6	0	0
240	41.3	40.8	40.7	-0.5	-0.6
250	41.2	41.1	41.2	-0.1	0
260	41.1	41.1	41.1	0	0
270	41.1	41.1	41.1	0	0
280	39.7	39.6	39.6	-0.1	-0.1
290	35.7	36	36.2	0.3	0.5
300	40.3	40	39.9	-0.3	-0.4
310	45.6	45.6	45.5	0	-0.1
320	46.2	46.4	46.5	0.2	0.3
330	47.3	47.5	47.5	0.2	0.2
340	48.4	48.3	48.2	-0.1	-0.2
350	49	49	48.9	0	-0.1
			gemiddeld	0.0 dB	0.0 dB

Tabel 5.10.4: Directioneel antennediagram 2 met verschillende middelingsvensters met alternatieve middelingsmethode

Analyse

Uit de meetresultaten blijkt dat er weinig verschil is in antennediagrammen tussen de verschillende venstergroottes. De venstergrootte heeft geen sterke invloed op het gemeten antennediagram. Wel is een kleine offset waarneembaar tussen de 0,1 en 0,2 dB ten opzichte van het 2-graden venster. Deze offset neemt toe bij een groter venster (10 graden). Ook zijn de verschillen groter aan de 'achterkant' van de antenne of bij sterke veranderingen in het antennediagram. In zo'n geval zijn de verschillen typisch 0,2. tot 0,3 dB. De verklaring hiervoor is dat in deze gebieden de verschillen tussen minima en maxima groter zijn (zie sectie 5.4). Bij een grotere venstergrootte is de kans op sterkere signalen groter en de gekozen middelingsmethode bevoordeelt dan (licht) sterkere meetwaarden.

Een aanbeveling is om de nieuwe middelingsmethode te implementeren (mediane waarde). Deze gebruikt de mediane meetwaarde en is daardoor minder gevoelig voor sterke meetwaarden. In tabel 5.10.3 en tabel 5.10.4 worden dezelfde resultaten getoond met deze alternatieve middelingsmethode. Te zien is dat de gemiddelde offset tussen de verschillende venstergroottes kleiner is geworden en er geen relatie meer is tussen venstergrootte en offset. Ook laten deze tabellen zien dat bij dezelfde antennehoek, maar verschillende venstergrootte de gemeten uitgestraalde vermogensverschillen niet zijn afgenomen ten opzichte van de originele middelingmethode. Dit is een aanwijzing dat inderdaad de verschillen in minima en maxima groter zijn voor deze hoeken. Dit kan opgelost worden door of langer te meten of om de meetonnauwkeurigheid te verhogen in dergelijke gebieden (zie sectie 4.3).

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 CONCLUSIES

In dit validatieonderzoek is de meetprocedure onderzocht die Agentschap Telecom gebruikt om FM-omroep antennediagrammetingen uit te voeren. Agentschap Telecom voert dergelijke metingen uit in het kader van toezicht op de naleving van FM-omroepvergunningen. De algemene conclusie uit dit onderzoek is dat de gehanteerde methodiek valide en reproduceerbaar is.

Allereerst is in hoofdstuk 2 de gehanteerde meetmethodiek vergeleken met andere uit de literatuur bekende methodes om antennediagrammen te meten. De huidige meetmethode is gebaseerd op het ITU-R SM2056 rapport en wordt als zodanig toegepast door het agentschap. In de meetopstelling is gekozen voor inbouw van de meetapparatuur in een helikopter, maar de meetmethode zou ook kunnen worden toegepast voor metingen met een drone. Naast het ITU-R SM2056 rapport zijn nog twee alternatieve methodes gevonden bij de CEPT/ECC, waarbij het antennediagram wordt gemeten door middel van een meetauto. De alternatieve methodes zijn samen met de door het agentschap gehanteerde methode op een aantal criteria beoordeeld. Voordeel van de huidige meetopzet is de hogere nauwkeurigheid ten opzichte van andere methodes. Ook kan met de huidige meetopzet snel een antennediagram worden gemeten. Nadeel is de relatief lange voorbereidingstijd. Daarnaast is de huidige implementatie van het agentschap niet geschikt om een antennediagram te meten van laagvermogen FM zenders (lager dan 1 kW) doordat het meetbereik van de meetontvanger niet optimaal is gekozen. De ITU-R SM2056 methode is op zich wel toepasbaar voor laagvermogen zenders. Doordat het agentschap een criterium van minimaal 1 kW uitgestraald vermogen gebruikt, kan dit niet als nadeel worden aangemerkt.

Een tweede onderdeel van het onderzoek betrof het uitvoeren van metingen aan de meetopstelling in een laboratoriumomgeving. Hier zijn de individuele componenten van het meetsysteem onderzocht. Dit betreft het RF meetsysteem, de verwerking door de RadiMation software en Matlab scripts. De algemene uitkomst is dat het meetsysteem correct is geïmplementeerd. Om de nauwkeurigheid te verhogen zijn wel een aantal aandachtspunten geïdentificeerd. Allereerst sluit het meetbereik van de Rohde & Schwarz meetontvanger niet optimaal aan op de verwachte signaalniveaus. Dit geldt vooral voor zwakkere FM signalen. Ook vertoont de meetontvanger bij signalen minder dan 10 dB vanaf de ruisvloer een lichte niet-lineariteit. Hierdoor zullen de uitgestraalde vermogens van zwakkere FM signalen (licht) worden overschat. Een tweede aandachtspunt is de gekozen middelingsmethode. De huidige implementatie bevoordeelt licht sterke meetwaarden bij de middeling van ruwe meetdata.

In het hoofdstuk meetnauwkeurigheid is de methodiek voor bepaling van de meetnauwkeurigheid onderzocht. In het algemeen kan worden gesteld dat de onzekerheden van de individuele onderdelen aan de hoge kant zijn. Dit is volgens het agentschap een bewuste keuze. In de praktijk zijn deze onzekerheden meestal lager. Ook kan worden geconcludeerd dat de meetonzekerheidsanalyse een goede indicatie geeft van de onzekerheid in het meetsysteem. Op basis van de alternatieve onzekerheidsanalyse die in dit rapport wordt beschreven zal de meetnauwkeurigheid voor omnidirectionele antennediagrammen 1 dB zijn. Voor directionele antennediagrammen zal de meetnauwkeurigheid buiten de hoofdbundel groter zijn, maximaal 1.5 dB. In de alternatieve meetonderzekerheidsanalyse wordt onderscheid gemaakt tussen foutbronnen die één realisatie hebben gedurende een vlucht versus foutbronnen die elke meetwaarde veranderen. De onzekerheid door de laatste categorie kan met behulp van middeling worden gereduceerd.

In september 2017 heeft een verificatievlucht plaatsgevonden om het algemene systeem te valideren, maar ook om een aantal experimenten uit te voeren. De metingen hebben plaatsgevonden in Rotterdam. De Waalhaventoren is uitgekozen, omdat dit – vanwege omringende hoogbouw en daardoor grotere reflecties – als een worst-case locatie kan worden beschouwd. Uit de metingen blijkt dat de meetmethodiek reproduceerbaar is. Onafhankelijke metingen van hetzelfde antennediagram leveren dezelfde meetwaarden op. Daarnaast blijkt dat de signaalvariaties aan de 'achterkant' van de antenne groter zijn dan in de hoofdbundel. In deze gevallen neemt de meetonzekerheid toe, zoals blijkt uit de analyse van de meetonzekerheid.

Voor de antennediagrammetingen die in het verleden zijn uitgevoerd, hebben de uitkomsten van dit rapport de volgende invloed. Voor metingen in de hoofdbundel van de antenne zijn de uitkomsten onveranderd. Voor metingen aan de 'achterkant' van een antenne is het uitgestraalde vermogen te hoog gemeten. De exacte afwijking is afhankelijk van een aantal factoren en in dit rapport zijn individuele metingen uit het verleden niet specifiek onderzocht. De inschatting van de universiteit is dat bij de gemeten directionele antennediagrammen de daadwerkelijke afwijking aan de 'achterkant' van de antenne in de meeste gevallen kleiner is dan 1 dB.

6.2 AANBEVELINGEN

In dit validatieonderzoek heeft Universiteit Twente de meetmethodiek en de verwerking van de ruwe meetdata in meetwaarden onderzocht. De gebruikte meetmethodiek is gebaseerd op een methode die 15 jaar geleden is ontwikkeld en ook internationaal door andere landen/ITU is geaccepteerd. Er zijn een aantal verbeterpunten geïdentificeerd waarmee vooral de nauwkeurigheid van het meetsysteem kan worden verhoogd:

- Lagere RF verzwakking
    - In de huidige meetopstelling is door het agentschap gekozen voor een relatief grote RF verzwakking gekozen. De verwachte signaalniveaus komen niet volledig overeen met het meetbereik van de meetontvanger waardoor het systeem minder goed het vermogen van zwakkere FM zenders kan meten. Het meetbereik van de meetontvanger biedt voldoende ruimte om te kiezen voor een lagere verzwakkerstand. (Zie sectie 3.2.1 voor meer informatie.)
- Andere middelingsmethode
    - In de huidige methode worden sterke signalen licht bevoordeeld. Hierdoor zal het gemeten uitgestraalde vermogen licht worden overschat. Door te kiezen voor de mediane waarde kan dit worden opgelost. (Zie sectie 3.5.1 en sectie 5.8 voor meer informatie.)
- Onzekerheidsanalyse
    - Met de alternatief gepresenteerde meetonzekerheidsanalyse kan de nauwkeurigheid van het systeem beter worden bepaald doordat onderscheid gemaakt wordt tussen foutbronnen die één realisatie hebben gedurende een vlucht versus foutbronnen die elke meetwaarde veranderen. (Zie sectie 4.3 voor meer informatie)
- Meer ronden om de zendtoren bij directionele antennediagrammen
    - Uit de verificatievlucht kan worden geconcludeerd dat bij het bepalen van zwakkere uitgestraalde FM vermogens buiten de hoofdbundel er twee zaken spelen. Door een sterkere invloed van reflecties neemt de meetonzekerheid toe tot 1.5 dB. Daarnaast kunnen zwakke uitgestraalde zendvermogens, lager dan 1 kW, vallen in het niet-lineaire deel van de meetontvanger. Hierdoor worden deze uitgestraalde vermogens licht overschat tot 1 dB. Het laatste punt kan worden opgelost via een lagere RF verzwakking (zie eerste

verbeterpunt). Voor het eerste aangehaalde punt, sterkere invloed van reflecties, zou mogelijk langer meten (meer ronden om de zendtoren) een oplossing kunnen bieden om de meetonzekerheid te reduceren. (Zie sectie 5.4 en sectie 5.6.)

- Aanvullende criteria voor randvoorwaarden meting
    - Het agentschap heeft al een aantal basiscriteria opgesteld voor uitvoeren van de metingen, zoals minimaal uitgestraalde vermogen en minimale antennehoogte. Een aanbeveling is om dit uit te breiden met (concrete) criteria voor sterke nabuurzenders (FM) op dezelfde antennemast en de aanwezigheid van hoge gebouwen die de meting nadelig kunnen beïnvloeden (reflecties). Hiervoor is wel aandacht in de meetmethodiek, maar worden geen concrete waarden genoemd. (Zie sectie 2.2).

Ten slotte heeft de technologie zich gedurende deze jaren natuurlijk verder ontwikkeld. Vooral de opkomst van drones biedt nieuwe mogelijkheden. Inmiddels zijn er een aantal commerciële partijen die dergelijke metingen uit kunnen voeren. De verwachting is dat internationaal dergelijke metingen zich de komende jaren verder zullen uitbreiden. Een aanbeveling is om te onderzoeken in hoeverre metingen met een drone meerwaarde bieden ten opzichte van de huidige methodiek om antennediagrammen met een helikopter te meten. Wel zijn omroepantennes vaak 120 meter of hoger geplaatst. Momenteel is er geen wettelijk kader om een (professionele) drone te gebruiken boven deze hoogte.

7 GERAADPLEEGDE BRONNEN

[1] T.S. Rappaport, “Wireless Communications: Principles and Practice (2nd Edition),” Prentice Hill, 2002

[2] A.F. Molisch, “Wireless Communication,” Wiley – IEEE, 2011

[3] ITU, Report ITU-R SM.2056 “Airborne verification of antenna patterns of broadcasting stations” editie 2012

[4] CEPT, ECC Recommendation (16)04 “Determination of the radiated power from FM sound broadcasting stations through field strength measurements in the frequency band 87.5 to 108 MHz”

[5] CEPT ECC Workgroup FM22, “FM-BC ERP measurements along a route” / FM22(16)14 “Determination of the radiated power of radio station through field strength measurement along a route”

[6] Dare!! Instruments, “Handleiding RadiMation EMC software” en gerelateerde documenten zoals bestandsformaten en helimeetsysteem berekeningen

[7] Agentschap Telecom, “Antennediagrammetingen in de FM-omroepband”, april 2013

[8] Agentschap Telecom, “Matlab-scripts voor verwerking meetgegevens”

[9] Universiteit Twente “A T-DAB field trial using a low-mast infrastructure”, december 2006 https://research.utwente.nl/en/publications/a-t-dab-field-trial-using-a-low-mast-infrastructure-2

[10] ITU, ITU-R SM.1268-3, “SM.1268 : Method of measuring the maximum frequency deviation of FM broadcast emissions at monitoring stations”

8 BEGRIPPENLIJST

2G/3G/4G/5G – Hiermee worden mobiele communicatienetwerken bedoeld. Een 2G netwerk is een GSM netwerk, 3G is UMTS, 4G LTE en 5G is een toekomstige standaard voor mobiele communicatienetwerken.

DAB+ – Digital Radio via de ether, de digitale opvolger van FM.

DVB-T – Digitale TV via de ether, ook bekend als Digitenne (merknaam van KPN).

CEPT - The European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT) is opgericht op 26 juni 1959 als een Europees coördinatielichaam tussen de verschillende nationale overheidsorganisaties op het gebied van telecom en post.

CEPT ECC – Een onderdeel van de CEPT, Electronic Communications Committee welke gericht is op electronische communicatie waaronder communicatie via de ether.

DANL – Displayed Average Noise Level

dBm - uitgestraalde zendvermogens worden bij technische berekeningen naar het logaritmische domein omgerekend. dBm is hiervan de eenheid. Ten opzichte van dBW wordt hier de referentie ten opzichte van 1 mW gebruikt in plaats van 1 W. Hierdoor zijn dBm waarden altijd 30 dB hoger dan dBW waarden. Een 1 kW zender is bijvoorbeeld 60 dBm.

dBW – uitgestraalde vermogens worden bij technische berekeningen naar het logaritmische domein omgerekend. dBW is hiervan de eenheid. Een 1 kW uitgestraald zendvermogen komt overeen met 30 dBW

DGPS – Differential Global Positioning System, een nauwkeuriger manier om een positie te bepalen. Dit is nauwkeuriger dan het reguliere GPS systeem.

e.r.p – effective radiated power, het uitgestraalde vermogen van een FM zender

FM – Frequency Modulation. Het geluid wordt door middel van frequentieverschillen gemoduleerd/overgezonden.

ITU – International Telecommunication Union, een internationaal orgaan op het gebied van telecommunicatie. Het onderdeel ITU-R houdt zich bezig met communicatie via de ether (radio).

Matlab – Matlab® is een technische softwareomgeving van the Mathworks

RadiaMation – RadiMation® is EMC software van Dare!! Instruments

RF – Radio Frequency. Deze afkorting wordt gebruikt om aan te geven dat een onderdeel in de meetopstelling de radio golven verwerkt.