

VALIDATIE MEETMETHODIEK EN
VERWERKEN MEETDATA VAN
ANTENNEDIAGRAMMETINGEN IN
DE FM-OMROEPBAND

24 NOVEMBER 2017

DR. IR. MARK BENTUM

DR. IR. ROEL SCHIPHORST

Opdrachtgever:



Agentschap Telecom
*Ministerie van Economische Zaken
en Klimaat*

SAMENVATTING

Dit rapport beschrijft de uitkomsten van het validatieonderzoek over de FM-omroep antennediagrammetingen en is uitgevoerd door de Universiteit Twente. Agentschap Telecom voert dergelijke metingen uit in het kader van toezicht op naleving van FM-omroepvergunningen. De algemene conclusie uit dit onderzoek is dat de gehanteerde methodiek valide en reproduceerbaar is. Wel zijn er aandachtspunten die gericht zijn op het verbeteren van de nauwkeurigheid.

Allereerst is in het onderzoek de gebruikte methodiek vergeleken met andere methodes om antennediagrammen te meten. De gevalideerde meetmethode is gebaseerd op het ITU-R SM2056 rapport en wordt als zodanig toegepast door het agentschap. Het antennediagram wordt gemeten door een antennesysteem welke gemonteerd is onder een helikopter. Alternatieve methodes zijn metingen vanaf de grond met een meetauto of in de lucht door middel van een drone. Voordeel van de huidige meetmethode is de hogere nauwkeurigheid ten opzichte van andere methodes. Ook kan met de huidige meetmethode snel een antennediagram worden gemeten. De meetmethode is een bewezen methode die 15 jaar geleden is ontwikkeld. De technologie ontwikkelt zich gedurende deze jaren natuurlijk verder. Vooral de opkomst van drones biedt nieuwe mogelijkheden.

Naast vergelijking met andere meetmethodes zijn ook de individuele componenten van het meetsysteem onderzocht. Dit betreft het RF meetsysteem, de analyse door de RadiMation software en Matlab scripts. De algemene uitkomst is dat het meetsysteem correct is geïmplementeerd. Wel zijn er verbeterpunten om de nauwkeurigheid te verhogen. Allereerst sluit het ingestelde meetbereik van de Rohde & Schwarz meetontvanger niet optimaal aan op de verwachte signaalniveaus; dit geldt voor relatief zwakke omroepsignalen. Ook vertoont de meetontvanger bij signalen minder dan 10 dB vanaf de ruisvloer een lichte niet-lineariteit, waardoor het uitgestraalde vermogen van zwakkere omroepsignalen ongeveer tot 1 dB hoger kan worden ingeschat dan het daadwerkelijk is. Een aanbeveling is om te kiezen voor minder verzwakking zodat signalen sterker door de meetontvanger worden ontvangen. Een tweede verbeterpunt is de middeling van de ruwe meetwaarden. In de huidige implementatie worden ruwe meetwaarden in het lineaire domein gemiddeld. Uit dit onderzoek blijkt dat de distributie van de ruwe meetwaarden niet kan worden beschouwd als een (log-)normale distributie. Om deze reden is het beter om te kiezen voor de mediane waarde als middelingsmethode. De huidige keuze voor middeling bevoordeelt licht sterke meetwaarden. Ten slotte is een derde verbeterpunt de meetnauwkeurigheid. In dit rapport wordt een alternatieve methode gepresenteerd voor het bepalen van de meetnauwkeurigheid. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen foutbronnen die één waarde hebben gedurende een vlucht versus foutbronnen die elke meetwaarde veranderen. De onzekerheid veroorzaakt door de laatste categorie kunnen met behulp van middeling worden gereduceerd.

In september 2017 heeft een verificatievlucht plaatsgevonden om het 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. Voor de hoofdbundel is deze kleiner dan 1 dB, aan de achterkant neemt deze toe tot 1,5 dB met een betrouwbaarheidsinterval van 95%.

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.

SUMMARY

This report describes the results of the validation research about the FM broadcasting antenna pattern measurements which have been carried out by the University of Twente. The Radiocommunications Agency of the Netherlands executes this type of measurements for supervision on compliance with the FM broadcast licenses. The general conclusion from this research is that the used measurement methodology is valid. However, a number of topics have been identified which can improve in particular the accuracy. Also in a number of situations, the specified accuracy of the measurement system is exceeded.

First of all, in this study, the used methodology is compared to other methods for measuring antenna diagrams. The used measurement method is based on the ITU-R SM2056 report and is applied by the agency as such. The antenna diagram is measured by a helicopter on which a measuring system has been mounted. Alternative methods are ground measurements with a measuring car or airborne by means of a drone. Advantages of the current measurement design are the higher accuracy over other methods. Also the antenna diagram can be measured fast with the current set up. The measurement method is a proven method developed 15 years ago. The technology naturally evolves during these years. Especially the rise of drones offers new possibilities.

In addition to the comparison with other measurement methods, the individual components of the measurement system have also been investigated. This concerns the RF measurement system, the analysis of the RadiMation software and Matlab scripts. The overall outcome is that the measurement system has been properly implemented. However, there are a number of improvement points to increase accuracy. First of all, the specified measurement range of the Rohde & Schwarz receiver does not fully match the expected signal levels; this is especially true for weaker broadcast signals. Also, it turned out that the receiver has a weak nonlinearity for signals less than 10 dB from the noise floor, which overestimates the power of weaker signals up to 1 dB. One recommendation is to choose less attenuation, so that signals are received more strongly by the receiver. A second improvement point is the averaging of the raw measurements. In the current implementation, raw measurements are averaged in the linear domain. This research shows that the distribution of raw measurements cannot be considered as a (log) normal distribution. For this reason, it is better to choose the median value as an averaging method. The current implementation for averaging favors large measurements values. Finally, a third improvement point is the measurement accuracy. This report presents an alternative method for determining measurement accuracy. It distinguishes between uncertainty sources that have one realization during a flight versus uncertainty sources that change each measurement value. Uncertainty due the last category can be reduced by means of averaging.

In September 2017 a verification flight took place to validate the general system, but also to carry out a number of experiments. The measurements took place in Rotterdam. The Waalhaven Tower has been chosen because this can be regarded as a worst-case location - due to surrounding high-rise buildings and therefore larger reflections. The measurements show that the measurement method is reciprocal (repeatable); independent measurements of the same antenna diagram yield the same measured values. In addition, it appears that the signal variations on the back of the antenna are larger than in the main beam. In these cases, measurement uncertainty increases. For the main beam, this is less than 1 dB, at the back of the antenna it increases to 1.5 dB with an accuracy of 95%.

For antenna diagram measurements performed in the past, the results of this report have the following effect. For measurements in the main beam of the antenna, the results are unchanged. For measurements at the back of an antenna, the power is measured too high. The exact deviation depends on a number of factors. In this report, individual measurements

from the past have not been specifically investigated. The university estimates that the actual deviation at the 'back' of the directional antenna diagrams is in most cases less than 1 dB.

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting	2
Summary	4
1. Inleiding	8
1.1 Achtergrond	8
1.2 Onderzoeksvragen	9
1.3 Onderzoeksmethodiek	10
1.4 Team	10
1.5 Indeling rapport	11
2. ITU-R SM20156 meetprocedure	12
2.1 Beschrijving meetprocedure	12
2.2 Implementatie door Agentschap Telecom	16
2.3 Vergelijking met andere meetmethodes	17
2.4 Commerciële oplossingen	21
3. Validatie	23
3.1 Analyse meetsysteem	23
3.2 Controlemetingen	29
3.3 Kalibratierapporten meetapparatuur	35
3.4 Verwerking RadiMation	38
3.5 Verwerking Matlab	39
4. Meetonzekerheid	41
4.1 Kalibratierapporten meetapparatuur	41
4.2 Meetonzekerheidsanalyse	43
4.3 Alternatieve samengestelde meetonzekerheidsanalyse	46
5. Verificatievlucht	50
5.1 Doelen	50
5.2 Validatie en reciprociteit van het gehele systeem	51
5.3 Beoordeling procedure gedurende meetvluchten	59
5.4 Bepalen optimale afstandsmetingen uit verschillende aanvliegeroutes	59
5.5 Antennediagram meten op verschillende afstanden	62

5.6 Meten van zwakke uitgestraalde FM vermogens van 1 kW of minder.....	65
5.7 Meten van het antennediagram van de meetantenne	68
5.8 Invloed verschillende middelingsmethodes op het antennediagram.....	69
5.9 Invloed middelingsventer op antennediagram.....	72
6. Conclusies en aanbevelingen.....	78
6.1 Conclusies.....	78
6.2 Aanbevelingen.....	79
7. Geraadpleegde bronnen.....	81
8. Begrippenlijst.....	82

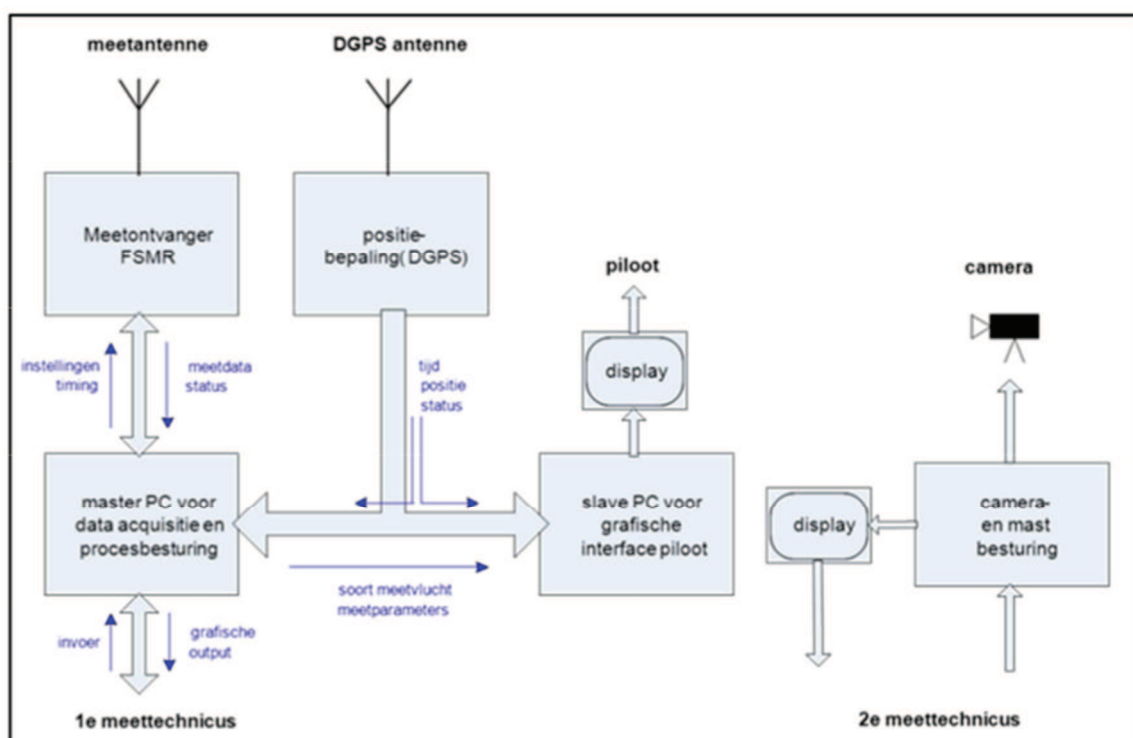
1 INLEIDING

1.1 ACHTERGROND

In het vierde kwartaal van 2012 zijn antennediagrammetingen uitgevoerd door Agentschap Telecom in het kader van toezicht op FM-omroepvergunningen. Naar aanleiding van de resultaten is er een discussie ontstaan. De minister van Economische Zaken heeft tijdens het Algemeen Overleg Telecommunicatie op 24 mei 2016 toegezegd om de meetmethode door een onafhankelijke partij te laten valideren. In dit rapport wordt het onafhankelijk onderzoek over de meetmethode en de verwerking van de meetdata van antennediagrammetingen in de FM-omroepband gepresenteerd. Het onderzoek is uitgevoerd door de Universiteit Twente¹.

De antennediagrammetingen worden uitgevoerd door middel van een meetmethodiek die Agentschap Telecom ontwikkeld heeft. Het antennediagram van FM omroepzenders op zendertorens en andere hoge antennemasten wordt door middel van een onder een helikopter gemonteerd meetsysteem gemeten. De gebruikte methodiek is beschreven in het ITU-R² SM2056 rapport en wordt als zodanig toegepast door het agentschap. Het schema van het meetsysteem dat door Agentschap Telecom is ontwikkeld, staat in figuur 1.1.1 weergegeven.

In de volgende sectie wordt een leeswijzer gepresenteerd waarin de specifieke onderzoeksvragen en de desbetreffende antwoorden uit de offerteaanvraag zijn beschreven.



Figuur 1.1.1: Schema van het antennediagrammeetsysteem

¹ Dit betreft een consortium bestaande uit de Universiteit Twente en BlueMark Holding BV
² ITU is de afkorting voor International Telecommunication Union, een internationaal orgaan op het gebied van telecommunicatie. Het onderdeel ITU-R houdt zich bezig met communicatie via de ether (radio).

1.2 ONDERZOEKSVRAGEN

In de offerteaanvraag van 26 oktober 2016 met de titel “Validatie meetmethodiek en verwerken meetdata van antennediagrammetingen in de FM-omroepband” worden de onderstaande hoofdvragen en bijbehorende subvragen beschreven. Het doel van deze paragraaf is tweeledig. Allereerst wordt een leeswijzer gegeven waarin te zien is waar elke onderzoeksvraag wordt beantwoord in het rapport. Daarnaast geeft dit overzicht aan of alle vragen uit de offerteaanvraag volledig zijn beantwoord.

- 1) Is de keuze om de ITU-R SM2056 “Airborne verification of antenna patterns of broadcasting stations” voor de antennediagrammetingen te gebruiken valide?
 - a) In hoeverre is deze methodiek geschikt als methode om antennediagrammetingen uit te voeren?
 - b) Hoe verhoudt deze methodiek zich tot andere methodes om antennediagrammen te meten?

Deze vraag en subvragen worden beantwoord in hoofdstuk 2 – ITU-R SM2056 meetprocedure.

- 2) Is de keuze van verwerking van de ruwe meetdata in meetresultaten valide?
 - a) De ruwe meetdata uit de meetontvanger, wordt tijdens de meetvlucht verwerkt door de RadiMation³ software. Vindt deze verwerking op de juiste wijze plaats? Indien verwerking niet op de juiste wijze plaatsvindt, op welke punten zijn verbeteringen mogelijk?
 - b) De verwerkte meetdata wordt naderhand middels Matlab⁴ bewerkt tot het uiteindelijke meetresultaat. Hierbij wordt een middeling uitgevoerd op de meetdata om het uiteindelijke resultaat per tien graden weer te geven. Doet de gekozen methode van middelen voldoende recht aan de fluctuatie van de gemeten veldsterkte en de nauwkeurigheid van de helikopter positie? Vindt de bewerking van de meetdata door Matlab op de juiste wijze plaats? Indien bewerking niet op de juiste wijze plaatsvindt, op welke punten zijn verbeteringen mogelijk?

Deze vraag en subvragen worden beantwoord in hoofdstuk 3, sectie 3.4 en 3.5.

- 3) Is de vaststelling van de totale meetonzekerheid valide?
 - a) Is de meetonzekerheid, zoals deze nu bepaald is, valide voor elke richting waarin gemeten wordt? Indien dit niet het geval is, geef aan wat de beste methode is om de totale meetonzekerheid te bepalen. Geef ook aan wat het juiste waarschijnlijkheidspercentage is bij dit type metingen.
 - b) Geef ook aan in hoeverre de uitvoering van de meting (meetmethodiek) consequenties heeft voor de meetonzekerheid. Kan of moet er een onderscheid gemaakt worden in toegestane meetonzekerheid, afhankelijk van de gemeten fluctuaties in onderlinge metingen van de FM signalen? Moet rekening gehouden worden met het aantal ronden dat gevolgen is?

Deze vraag en subvragen worden beantwoord in hoofdstuk 4 - Meetonzekerheid

- 4) Leiden de antwoorden op bovenstaande vragen tot de conclusie dat de meetmethodiek als geheel valide en reproduceerbaar is?

³RadiMation® is EMC software van Dare!! Instruments

⁴ Matlab® is een technische softwareomgeving van the Mathworks

- a) Licht per onderdeel toe wat de bevindingen zijn, wat mogelijke alternatieven zijn om te berekenen, wat de alternatieve resultaten zouden zijn en in hoeverre deze afwijken van de oorspronkelijke meetmethodiek.
- b) Geef zo nodig aan of er aanvullende zaken zijn waar geen rekening mee is gehouden maar die wel van wezenlijk belang zijn ter verbetering van de meetmethodiek.

Deze vraag en subvragen worden door het gehele rapport beantwoord, met name in hoofdstuk 2, 3, 4 en 5. In hoofdstuk 6 - Conclusies worden de belangrijkste bevindingen gepresenteerd.

- 5) Is beantwoording van bovenstaande vragen mogelijk aan de hand van een analyse van de bestaande ruwe meetdata of moet nog een “dummy”vlucht worden uitgevoerd?
 - a) Als de analyse daar aanleiding voor geeft kan een “dummy”vlucht uitgevoerd worden, waarbij vooraf duidelijk moet zijn wat het doel van deze vlucht is en welke invloed dit kan hebben op het meetresultaat.

Bij de start van het onderzoek is naar voren gekomen dat een verificatievlucht noodzakelijk was. De uitkomsten van deze vlucht worden beschreven in hoofdstuk 5 - Verificatievlucht.

1.3 ONDERZOEKSMETHODIEK

De onderzoeksvragen en de daaraan gerelateerde deelvragen zijn via onderstaande methodes beantwoord:

- Toepassing van eigen kennis
- Literatuuronderzoek in relevante bronnen, zoals internationale telecommunicatie-organisaties (ITU, CEPT⁵), maar ook wetenschappelijke bronnen (IEEE⁶, Google Scholar)
- Bestuderen van de broncode voor verwerking en acquisitie meetgegevens
- Interactieve teamsessies
- Interviews met technische experts van het agentschap
- Verificatievlucht voor validatie en het uitvoeren van aanvullende experimenten

1.4 TEAM

Dit project is uitgevoerd door stafleden van de Telecommunication Engineering (TE) leerstoel verbonden aan de faculteit Electrotechniek, Wiskunde en Informatica van de Universiteit Twente. De groep wordt geleid door dr. ir. Mark Bentum⁷. De Universiteit Twente heeft in het verleden meerdere projecten uitgevoerd voor Agentschap Telecom o.a. een T-DAB pilot in Amsterdam waar verschillende zendertopologieën zijn onderzocht. Daarnaast

⁵ 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.

⁶ IEEE staat voor Institute of Electrical and Electronics Engineers. Binnen de IEEE gemeenschap worden onder andere allerlei wetenschappelijke tijdschriften uitgegeven. Het IEEE marktaandeel van publicaties op het gebied van draadloze communicatie is erg groot. De meeste relevante artikelen worden via dit platform gepubliceerd.

⁷ Per 1 september 2017 is dhr. Bentum verbonden aan de Technische Universiteit Eindhoven (TUE) als professor Radio Science.

heeft de universiteit meegewerkt aan het digitaal dividend (“kabelstoring”) onderzoek waarin de storing door LTE/4G signalen op kabel TV is onderzocht.

De onderzoekers zijn:

Dr. ir. Roel Schiphorst (projectleider)

Dhr. Schiphorst is senior onderzoeker. Hij was projectleider van verschillende projecten voor de nationale overheid met de nadruk op onderzoek om technische randvoorwaarden te bepalen in beleidsvraagstukken. Belangrijke projecten waren de T-DAB pilot (digitale etherradio) [9], technologieneutraal gebruik van de 800, 900 & 1800 MHz frequentieband en het Digitaal Dividend onderzoek waarin een model is ontwikkeld om het aantal stoorgevallen te bepalen op kabel TV veroorzaakt door LTE/4G signalen. Tevens is hij adviseur in het kabinet van de Vlaamse minister van Cultuur, Media en Jeugd voor de transitie van FM naar digitale radio.

Dr.ir. Mark Bentum

Dhr. Bentum is associate professor (universitair hoofddocent) op de UT en tevens vakgroepvoorzitter van de Telecommunication Engineering leerstoel verbonden aan de faculteit EWI (Electrotechniek, Wiskunde en Informatica). Hij heeft ruime ervaring op het gebied van kanaalmoduleringen en metingen, RF techniek, communicatie, etc. Dhr. Bentum is een senior lid van de IEEE, voorzitter van de Nederlandse URSI-commissie, vicevoorzitter van de IEEE Benelux-sectie, initiator en voorzitter van het IEEE Benelux AES / GRSS-hoofdstuk, en heeft opgetreden als een recensent voor verschillende conferenties en tijdschriften.

1.5 INDELING RAPPORT

Het rapport is als volgt ingedeeld. In hoofdstuk 2 wordt de meetprocedure beschreven en vergeleken met andere meetmethodes. Hoofdstuk 3 beschrijft validatiemetingen aan het systeem. Naast validatiemetingen is de meetonzekerheid een belangrijk onderdeel in de antennediagrammetingen. De analyse van de gehanteerde meetonzekerheid is beschreven in hoofdstuk 4. Voor de beantwoording van een aantal vragen was het uitvoeren van een verificatievlucht noodzakelijk. De uitkomsten van de verschillende metingen gedurende deze vlucht zijn beschreven in hoofdstuk 5. Het rapport sluit af met hoofdstuk 6 waarin de belangrijkste conclusies en aanbevelingen van dit validatieonderzoek worden gepresenteerd.

2 ITU-R SM2056 MEETPROCEDURE

De antennediagrammetingen verricht door Agentschap Telecom zijn gebaseerd op een meetprocedure die is beschreven in rapport ITU-R SM2056 – “Airborne verification of antenna patterns of broadcasting stations”. Dit ITU rapport en de hierin beschreven procedure is destijds opgesteld door het agentschap en daarna ingebracht bij het internationale telecommunicatieorgaan ITU. Vervolgens is de procedure door andere landen/ITU als een valide meetprocedure vastgesteld.

De oorspronkelijke aanleiding voor het meten van de antennediagrammen van FM omroepzenders in 2012 was meerledig: ten eerste de herverdeling van FM-omroepfrequenties in 2003, ten tweede een groot aantal wijzigingen van antenneopstellingen op de zendertorens van de publieke omroep in 2010 en ten derde de branden in de zendertorens van Smilde en IJsselstein in 2011. Het doel van de metingen is het controleren van de antennediagrammen zoals deze in FM-omroepvergunningen zijn opgenomen. Dit geeft een beeld van de naleving door vergunninghouders van de vergunningsparameters in de verleende vergunning.

In dit validatierapport worden de metingen, zoals omschreven in het ITU rapport ‘ITU-R SM2056’ gevalideerd. In dit hoofdstuk volgt een korte omschrijving van de meetprocedure en de implementatie hiervan door Agentschap Telecom. Ook wordt de meetmethode vergeleken met alternatieve methodes.

2.1 BESCHRIJVING MEETPROCEDURE

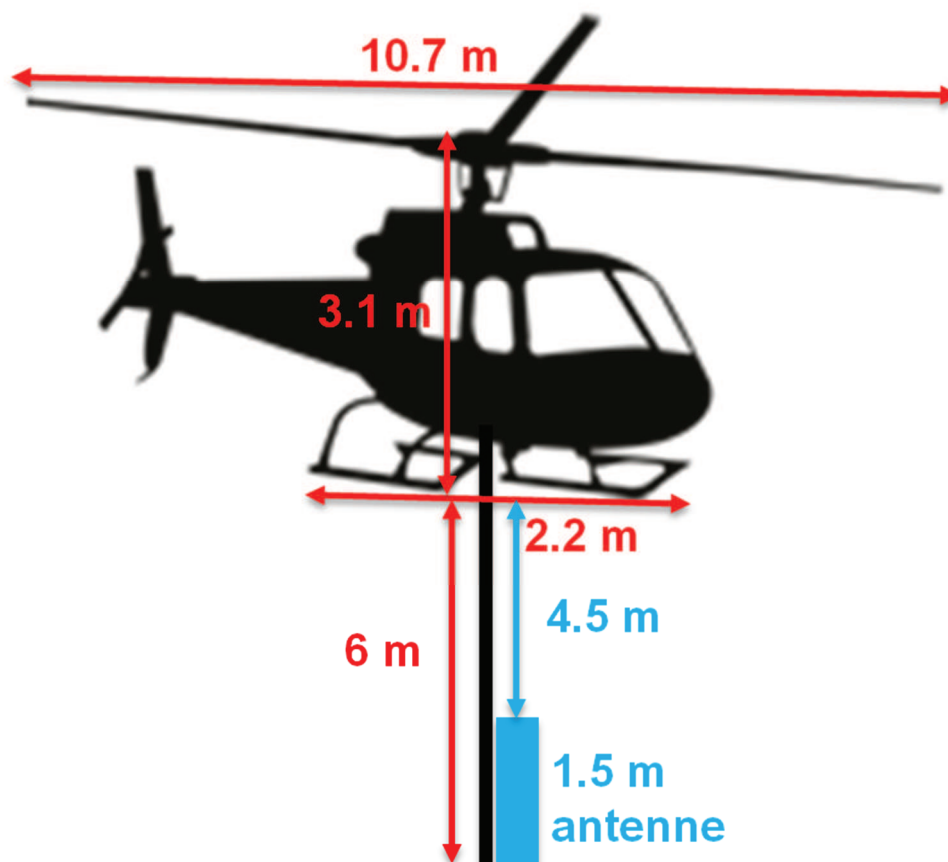
De antennediagrammetingen worden uitgevoerd door een meetsysteem te plaatsen in een helikopter. Eerst wordt een aantal metingen gedaan om de juiste parameters te bepalen voorafgaand aan de daadwerkelijke metingen van het antennediagram. Met behulp van een propagatievlucht wordt de optimale afstand (binnen bepaalde marges) van de helikopter tot de antennemast bepaald. Voor de optimale hoogte (binnen bepaalde marges) van de helikopter wordt een stijgvlucht uitgevoerd. Als eenmaal deze waarden bekend zijn, kan de cirkelvlucht gedaan worden om het antennediagram te meten. Op deze wijze kan een nauwkeurige weergave van het antennediagram verkregen worden. De verschillende soorten metingen worden hieronder uitgewerkt. Eerst volgt een toelichting op het meetsysteem.

2.1.1 MEETSYSTEEM

Het meetsysteem bestaat uit de volgende onderdelen (zie ook figuur 1.1.1):

- *Meetantennes*. Een periodic loop antenna array. De antenne is gebouwd door Agentschap Telecom. Kalibratie van de antenne is gedaan door NPL in het Verenigd Koninkrijk.
- *Meetontvanger*. Rohde & Schwarz FSMR 3.6. Het instrument wordt jaarlijks gekalibreerd.
- *DGPS systeem*. Trimble AgGPS 162
- *PCs*. HP Probook 6555B laptop
- *Een piloot display*. Sunit VGA
- *Software*. RadiMation
- *Camera/monitor*. Jentronics

De helikopter is een Eurocopter AS355⁸ / SNIAS AS 355 F2 en heeft een rotordiameter van 10.69 meter. In figuur 2.1.1 wordt de helikopter met uitgeklapte antenne schematisch weergegeven.



Figuur 2.1.1: Schematische voorstelling van de helikopter met uitgeklapte meetantenne

Tijdens de cirkelvlucht wordt door de meetontvanger in combinatie met de meetantenne de veldsterkte van het signaal gemeten. Vanuit deze meting kan het e.r.p. (Effective Radiated Power) in een bepaalde richting van de antennemast (zendertoren) bepaald worden. Daarvoor is het nodig om de exacte meetpositie te weten, maar ook alle verliezen in het meetsysteem. Voor plaatsbepaling wordt een DGPS (Differential Global Positioning System) ontvanger gebruikt, zodat de afstand van de helikopter tot de zendantenne nauwkeurig berekend kan worden. De verliezen in het meetsysteem zijn van te voren nauwkeurig in kaart gebracht.

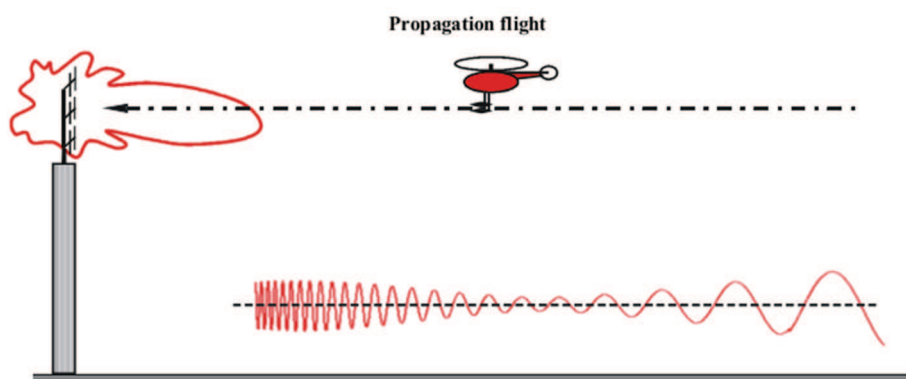
De berekeningen -van ruwe meetdata naar uitgestraalde FM vermogen- worden in de RadiMation software verricht door de master-PC. Een slave-PC stuurt het display aan voor de piloot; een scherm waarop een virtuele box is te zien waarbinnen gevlogen moet worden. In de metingen beschreven in dit rapport is een virtuele box van 20 meter aangehouden. Dezelfde marges zijn ook gehanteerd bij eerdere metingen door het agentschap.

⁸ Voor de volledige specificaties zie <http://airbushelicoptersinc.com/products/AS355-specifications.asp>

Een meettechnicus bestuurt de mast met de meetantennes. Bij aanvang van de meting wordt de mast met de meetantennes naar beneden geklapt en uitgeschoven. Vervolgens wordt de mast met de meetantennes 180 graden gedraaid. Ter controle van dit proces is in de mast een camera aangebracht. Met deze camera kan tijdens de meting de richting van de meetantennes in de gaten gehouden worden en waar nodig worden bijgestuurd. De meetantenne moet te allen tijde richting de zendmast worden gericht binnen een marge van ± 15 graden. De meetdata wordt vervolgens opgeslagen in de master-PC zodat deze beschikbaar is voor latere verwerking via Matlab scripts.

2.1.2 PROPAGATIEVLUCHT

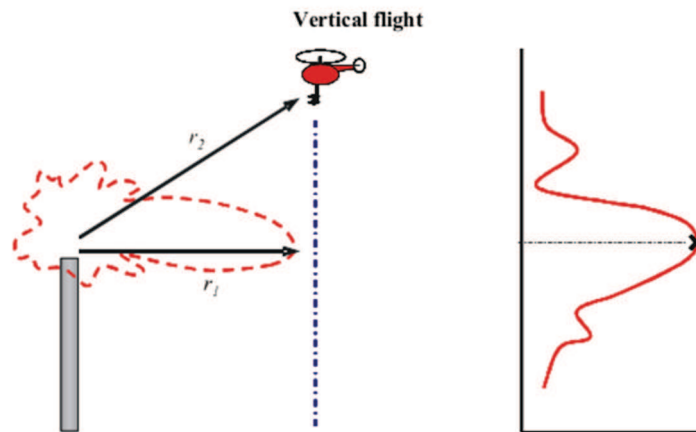
Nadat de juiste voorbereidingen getroffen zijn (invoeren van de gegevens over de te meten FM zenders (frequentie, locatie) in de RadiMation software, opstellen van het meetplan, check van de apparatuur), kan begonnen worden met het bepalen van de afstand en de hoogte van de cirkelvlucht(en). De afstand tot de zendertoren wordt bepaald door een zogeheten propagatievlucht. In de propagatievlucht wordt gevlogen op de hoogte van het antennesysteem in de hoofdbundel. Tussen 2,5 kilometer en 400 meter afstand van de zendertoren wordt het signaalniveau (e.r.p.) gemeten. Het punt van de minste (grond) reflectie wordt gekozen als optimale afstand voor de cirkelvlucht. Op dit punt zijn de lokale variaties in het ontvangen signaal minimaal. De propagatievlucht wordt alleen uitgevoerd in de hoofdbundel. Het zou kunnen dat daardoor de metingen in andere richtingen niet optimaal zijn. Dit wordt verder onderzocht in hoofdstuk 5, Verificatievlucht.



Figuur 2.1.2: Schematische voorstelling van de propagatievlucht

2.1.3 STIJGVLUCHT

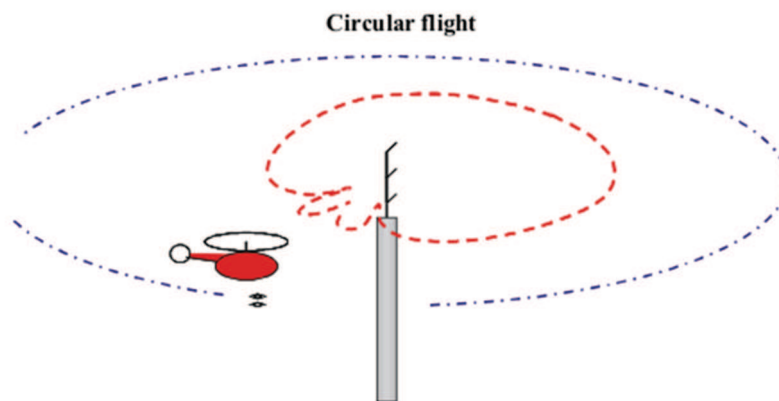
Nadat de optimale vliegafstand bepaald is, wordt de optimale vlieghoogte bepaald. In een stijgvlucht wordt eveneens het signaalniveau gemeten (e.r.p.). Vervolgens wordt de optimale hoogte bepaald door te kijken naar het maximaal ontvangen uitgestraald vermogen in de cirkelvlucht. Op deze hoogte wordt de cirkelvlucht uitgevoerd.



Figuur 2.1.3: Schematische voorstelling van de stijgvlucht

2.1.4 CIRKELVLUCHT

Nadat de optimale vlieghoogte en vliegafstand zijn bepaald, wordt de daadwerkelijke meting van het antennediagram uitgevoerd: de cirkelvlucht. Met behulp van een virtuele box krijgt de piloot aanwijzingen op welke afstand en hoogte hij moet vliegen. Mogelijke afstandsvariaties tijdens de vlucht worden gecorrigeerd in de RadiMation software. Per meting worden er meerdere (2 tot 3) cirkelvluchten uitgevoerd.



Figuur 2.1.4: Schematische voorstelling van de cirkelvlucht

2.1.5 DATA VERWERKING

De RadiMation software slaat de ruwe meetdata van de metingen op in meetbestanden. Met de data kan direct na de meting al een eerste indicatie van het antennediagram gemaakt worden om te analyseren of de data alle noodzakelijke gegevens heeft opgeslagen en er geen grote fouten zijn gemaakt. Na afloop van de metingen worden de gegevens offline verwerkt in Matlab.

2.1.6 STERKE/ZWAKKE PUNTEN

De meetprocedure is een goede manier om antennediagrammen te meten van antenne-installaties op hoge opstelpunten met hoog uitgestraald vermogens. De procedure houdt goed rekening gehouden met eventuele beïnvloeding van het hoofdsignaal, zoals veroorzaakt door reflecties.

Sterke punten van de meetprocedure zijn:

- De uitgevoerde meetmethode is nauwkeurig (zie ook het hoofdstuk 4 over de meetonzekerheid). Deze methode is dan ook nauwkeuriger dan andere meetmethodes (sectie 2.3).
- De meetmethode is relatief ongevoelig voor invloed van objecten in omgeving (reflecties, shadowing⁹). Dat komt omdat op hoogte wordt gemeten waardoor de reflecties minder aanwezig zijn en shadowing in zijn geheel niet voorkomt. Hiermee is de methode betrouwbaar en reproduceerbaar zolang er natuurlijk geen aanpassingen zijn doorgevoerd aan de antenne-installatie. De onzekerheden in het ontvangen signaal (*small scale fading*¹⁰) zijn ordes kleiner dan het *direct-line-of-sight* signaal (direct zicht).
- Het is een snelle methode om het antennediagram te meten van alle zenders op een toren.

Zwakke punten van de meetprocedure zijn:

- De meetprocedure is gericht op het meten van het uitgestraalde vermogen in de hoofdbundel. Bij niet-rondstralende antennediagrammen is het uitgestraalde vermogen buiten de hoofdbundel ook belangrijk. Uit hoofdstuk 5 (Verificatievlucht) blijkt dat onder andere dat de meetonzekerheid toeneemt buiten de hoofdbundel.
- De meetprocedure vergt voorbereidingstijd in verband met de inhuur van de helikopter. De procedure is voor het agentschap daarmee afhankelijk van een externe partij. Vanwege de langere voorbereidingstijd kunnen weersomstandigheden (vooral harde wind) extra vertraging van de metingen teweeg brengen.

2.2 IMPLEMENTATIE DOOR AGENTSCHAP TELECOM

De ITU-R SM2056 meetprocedure is een meetprotocol. Dat betekent dat iedere partij die antennediagrammen vanuit de lucht wil meten een meetopstelling moet implementeren die voldoet aan deze procedure. De meetprocedure schrijft geen type meetapparatuur of helikopter voor. Het meetprotocol zou om die reden ook door middel van een drone kunnen worden uitgevoerd.

Het agentschap heeft documentatie aan de Universiteit Twente aangeleverd, waarin zij beschrijft op welke wijze het ITU-R SM2056 meetprocedure is geïmplementeerd. Tevens heeft de universiteit metingen bijgewoond om de antennediagrammeetmethode te beoordelen. Dit zijn de zogenaamde verificatiemetingen welke in het kader van dit

⁹ Shadowing betekent schaduwwerking door grote objecten. Dit is eenzelfde soort effect als de schaduw bij zichtbaar licht.

¹⁰ Naast het directe pad (direct-line-of-sight) worden ook andere paden (reflecties tegen object, de grond) ontvangen. Deze kunnen constructief of destructief optellen op het signaal van het directe pad. Hierdoor ontstaan er variaties in het signaal. Dit type variatie wordt *small scale fading* genoemd.

validatieonderzoek zijn uitgevoerd. Als de implementatie door het agentschap wordt vergeleken met de ITU-R SM2056 procedure dan worden de volgende punten geconstateerd:

- Meetprotocol
 - Er is veel aandacht voor kwaliteitsborging van apparatuur en correcte werking van de meetopstelling.
 - Er zijn randvoorwaarden opgesteld waaraan een meting moet voldoen.
 - Antennehoogte > 80 meter
 - Uitgestraald vermogen > 1 kW e.r.p.
 - Er zijn meer randvoorwaarden opgesteld, maar deze zijn niet van belang voor deze validatie.
- Meetnauwkeurigheid
 - Nauwkeuriger dan beschreven in de ITU-R SM2056 procedure.
 - Periodieke kalibratie van meetapparatuur en andere componenten (antenne).

Hieruit kan worden geconcludeerd dat de implementatie door het agentschap op een aantal punten beter is dan de ITU-R SM2056 procedure voorschrijft. In aanvulling hierop zou het agentschap meer criteria op kunnen stellen waaraan een meting moet voldoen. Naast antennehoogte en uitgestraalde vermogen is het zinvol om nog meer randvoorwaarden op te stellen, zoals de aanwezigheid van hoge gebouwen die de meting nadelig kunnen beïnvloeden (reflecties) en hoogvermogen FM zenders op dezelfde mast (vooral in de dicht in de buurt van de te meten FM frequentie).

2.3 VERGELIJKING MET ANDERE MEETMETHODES

Het meten van antennediagrammen van grote zendinstallaties kan op verschillende manieren gedaan worden, met elk zijn voordelen en nadelen. Een mogelijke tweedeling van meetmogelijkheden is het meten in de lucht en meten op de grond.

Uit het literatuuronderzoek zijn het ITU report en de volgende CEPT recommendations voor het meten van omroepantenne-installaties naar voren gekomen:

- ITU Report ITU-R SM2056 “Airborne verification of antenna patterns of broadcasting stations”
- 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”¹¹
- 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”

De ITU-R SM2056 is het enige rapport voor metingen in de lucht. Dit is ook de methode die Agentschap Telecom heeft gekozen om antennediagrammetingen uit te voeren. De twee andere methodes zijn metingen op de grond met behulp van een meetauto. Ze zijn sterk aan

¹¹ Deze recommendation is een aanpassing van de CEPT ECC Recommendation (12)03 “Determination of the radiated power through field strength measurements in the frequency range from 400 MHz to 6000 MHz” voor de FM band.

elkaar gerelateerd. Alleen implementeren ze de verwerking van de grondreflectie op een andere wijze.

Om de drie meetmethodes met elkaar te vergelijken, heeft de universiteit een aantal beoordelingscriteria opgesteld. De gekozen criteria zijn:

- **Nauwkeurigheid:**
 - *Onderdrukking reflecties* – reflecties zullen impact hebben op de metingen en daarmee in de nauwkeurigheid van het uiteindelijk gemeten en gepresenteerde antennediagram. Criterium is welke mate van reflecties is te verwachten binnen de meetmethode.
 - *Onderdrukking omgevingsinvloeden* – welke impact heeft de omgeving op de metingen? Dat is naast de eerdergenoemde reflecties ook shadowing: schaduwwerking door hoge gebouwen.
 - *Kwaliteit van de te gebruiken apparatuur* – wordt hoogwaardige apparatuur ingezet of zijn er beperkingen met betrekking tot afmetingen en beschikbaar elektrische vermogen, waardoor andere keuzes gemaakt moet worden.
- *Vorbereidingstijd* - welke tijd is nodig om daadwerkelijk met de metingen te beginnen? In de beoordeling nemen we niet de ontwikkeltijd mee van de meetprocedure.
- *Snelheid/doorlooptijd meting* – na de voorbereidingstijd: wat is vervolgens de snelheid van de meting van het antennediagram?
- *TCO (Total Cost of Ownership)/kosten per meting* – wat zijn de kosten per meting?
- *Statische fout van de directe omgeving* – wat is de invloed van de helikopter/de drone/het voertuig op de meting?
- *Geschiktheid voor niet-standaard antennediagrammen*
 - *lage opstelpunten* – wat is de geschiktheid van de meetprocedure voor lage opstelpunten?
 - *laagvermogen zenders* – wat is de geschiktheid van de meetprocedure voor zenders met een laag uitgestraald vermogen (e.r.p.).
- *Geschiktheid voor andere frequenties/modulaties* – wat is de geschiktheid van de meetprocedure voor andere metingen dan die van antennediagrammen van FM-zenders? Bijvoorbeeld voor 2G/3G/4G en straks 5G cellulaire systemen, maar ook DAB+ en DVB-T.

Bovenstaande criteria worden hieronder nader uitgewerkt:

Onderdrukking reflecties

Metten in de lucht heeft een aantal voordelen ten opzichte van het meten op de grond. Het belangrijkste verschil is het reflectiepatroon. Op de grond is de kans op meerdere reflecties veel groter dan in de lucht. De meeste reflectiepaden worden onderdrukt of zijn niet aanwezig bij het meten in de lucht. Dat heeft als directe gevolg dat de meetonzekerheid van metingen in de lucht kleiner is dan die van op de grond (1,5 dB ten opzichte van 2 tot 3 dB). Een nadere analyse van de meetonzekerheid in de antennediagrammetingen wordt gedaan in hoofdstuk 4.

Bij het meten op de grond wordt met behulp van een meetauto met pompmast ook het directe pad gemeten. De hoogte is enigszins beperkt en hoeft niet gelijk te zijn aan de optimale hoogte van het antennediagram in verticale richting. Binnen de metingen in de lucht wordt deze optimale hoogte in voorbereidende metingen bepaald en vervolgens gebruikt in de antennediagrammetingen. De meetonzekerheden die genoemd worden in beide methodes zijn respectievelijk 3 en 2 dB.

Onderdrukking omgevingsinvloeden

Gedeeltelijke of gehele shadowing komt bij meten in de lucht (zowel door een helikopter als een drone) niet voor. Dit is anders bij het meten vanaf de grond. Bomen, hoge gebouwen etc. zijn aanwezig en beperken door shadowing de grondmetingen.

Kwaliteit van de te gebruiken apparatuur

Binnen de gehanteerde meetmethode door het agentschap, wordt gebruik gemaakt van hoogwaardige meetapparatuur. Maar dit is niet voor alle implementaties mogelijk. Bijvoorbeeld als bij luchtmetingen een drone wordt ingezet, levert dat een beperkingen op voor het totale gewicht en stroomverbruik van de meetapparatuur. Deze beperkingen zijn niet aanwezig bij metingen in een helikopter of bij metingen op de grond (waarbij een auto/busje kan worden ingezet).

Vorbereidingstijd

De voorbereidingstijd is afhankelijk van de gekozen implementatie. Bij metingen in de lucht kan gekozen worden uit een systeem onder een helikopter of aan een drone. Bij gebruik van een helikopter moet deze gehuurd bij een externe partij om vervolgens het meetsysteem in te bouwen. Daarna moeten testmetingen uitgevoerd worden. Dit neemt gemiddeld een dag in beslag. Ook moeten antennediagrammetingen met behulp van een helikopter gemeld worden aan de luchtverkeersleiding Nederland¹². Deze afstemming is meestal binnen een dag gerealiseerd.

Bij een meetsysteem onder een eigen drone is deze voorbereidingstijd veelal beperkt tot het doen van een aantal testmetingen. Wel is vliegen met een drone op grotere hoogte dan 120 meter binnen het huidige wettelijke kader niet *mogelijk*¹³. Aangezien de meeste antenne-opstelpunten hoger zijn dan deze maximale hoogte, kan een drone momenteel niet worden ingezet.

Bij metingen op de grond is het ook de vraag welke implementatie gekozen wordt. Is er altijd een meetsysteem en vervoermiddel aanwezig? Of moet er telkens een auto gehuurd worden en daarin het systeem worden ingebouwd? In beide gevallen zal de voorbereidingstijd minder zijn dan het geval van de metingen in de lucht met een helikopter.

Snelheid/doorlooptijd meting

Als eenmaal de voorbereidingen getroffen zijn, is het meten in de lucht met de helikopter snel te doen. Er zijn geen obstakels en er kan continue gemeten worden. Bij metingen op de grond moet telkens het systeem worden opgebouwd bij iedere meting. Dat wil zeggen dat de antennemast moet worden uitgeschoven (pompmast). Vervolgens moet een optimale hoogte worden bepaald. Deze procedure moet op relatief veel locaties worden uitgevoerd.

Wel is het meten in de lucht veel afhankelijker van het weer (harde wind). Meten op de grond kan praktisch altijd plaatsvinden.

TCO (Total Cost of Ownership)/kosten per meting

De kosten van het systeem zijn voor alle type metingen hetzelfde (ook voor de metingen met een drone is het niet te verwachten dat deze lager zullen uitkomen). Bij metingen met behulp van een helikopter zal een helikopter met piloot gehuurd moeten worden. Hoewel deze

¹² <https://www.lvnl.nl/>

¹³ <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/drone/vraag-en-antwoord/vergunning-drone>

kosten hoog zijn, kunnen de metingen zelf snel worden uitgevoerd. Daarmee zullen de kosten per meting niet veel verschillen dan die van de veel complexere metingen op de grond.

Ook moet men niet vergeten dat een groot deel van de kosten die gemoeid zijn met een meetsysteem voor antennediagrammetingen vooral in de ontwikkelingsfase worden gemaakt. Aangezien het aantal metingen beperkt zal zijn, zal de ontwikkelingsfase voor een belangrijk deel de kostprijs bepalen. Er zijn geen aanwijzingen dat een andere meetprocedure of opzet leidt tot lagere ontwikkelingskosten.

Statische fout van de directe omgeving

De directe omgeving kan de metingen beïnvloeden. Dat kan bij metingen in de lucht bijvoorbeeld het geval zijn door de helikopter of de drone. Metingen op de grond hebben dit minder als er gebruik gemaakt wordt van een lange antennemast (pompmast) bij het meten.

Wat de invloed is van de helikopter op de ITU-R SM2056 meetprocedure analyseren we in hoofdstuk 5 van dit rapport.

Geschiktheid voor lage opstelpunten

Bij lagere opstelpunten zijn metingen met een helikopter lastiger uitvoerbaar vanwege de beperking in het vliegen op lage hoogte. Met drones en met metingen op de grond is deze beperking er nauwelijks.

Geschiktheid laagvermogen zenders

Bij lagere uitgestraalde vermogens verandert er aan de genoemde meetprocedures niets. Wel moet de apparatuur goed worden ingesteld (en/of geschikt zijn) om deze lagere uitgestraalde vermogens nauwkeurig te kunnen meten.

Geschiktheid voor andere frequenties/modulaties

De besproken meetprocedures kunnen ook worden ingezet voor metingen van andere frequenties/toepassingen op hoge opstelpunten en grote uitgestraalde vermogens. Voor het meten van cellulaire systemen (mobiele communicatiesystemen) is de gekozen methode (ITU-R SM2056) minder geschikt, gezien de lagere opstelpunten, kleinere stralingsomgeving én (daardoor) lagere uitgestraalde vermogens. Ook is laag vliegen vlak boven de bebouwing door een helikopter niet toegestaan.

2.3.1 OVERZICHT

Op basis van bovenstaande criteria kan de volgende vergelijkingstabel worden opgesteld:

Criteria	ITU-R SM2056		CEPT ECC REC(16)04	CEPT ECC FM22 (16)14
	Helikopter	Drone		
Onderdrukking reflecties	++	++	+/-	+/-
Onderdrukking omgevingsinvloeden	++	++	+/-	+/-
Kwaliteit te gebruiken apparatuur	++	+/-	++	++
Statische fout directe omgeving	+	+/-	++	++
Overall nauwkeurigheid van de metingen	+	+/-	-	-
Snelheid/doorlooptijd van de metingen	++	+	-	-
Vorbereidingstijd	--	+/-	+	+
Kosten per meting	+/-	+/-	+/-	+/-
Geschiktheid voor lage vermogens	+	+	+	+
Geschiktheid voor lage opstelpunten	--	+	+	+
Geschiktheid voor andere frequenties/modulaties	+/-	++	++	++

Tabel 2.3.1: Vergelijking van de verschillende meetprocedures om antennediagrammen te meten.

Uit deze tabel blijkt dat de ITU-R meetprocedure de nauwkeurigste methode is om een antennediagram te meten. De procedure kan zowel door een helikopter of drone worden uitgevoerd en is in beide gevallen nauwkeuriger dan metingen met behulp van een meetauto.

2.4 COMMERCIELE OPLOSSINGEN

Het agentschap heeft zelf een meetprocedure ontwikkeld om antennediagrammetingen uit te voeren. Het is ook mogelijk om deze metingen door een externe partij uit te laten voeren. De laatste jaren zijn er commerciële partijen opgekomen die complete meetsystemen kunnen leveren dan wel een complete meting kunnen uitvoeren. Ook indien het agentschap kiest voor een externe partij, zal er nog een uitgebreide accreditatie moeten plaatsvinden waarbij het huidige systeem voor het agentschap als referentie dient. Op dit moment is de keuze beperkt tot drone oplossingen. Drones zijn inmiddels gemeengoed geworden. En er is bovendien een trend zichtbaar naar drones met een groter draagvermogen.

Het grootste technische nadeel van een drone-oplossing is het beperkte draagvermogen en de beperkte stroomvoorziening, waardoor de vliegduur beperkt is. De beperkte stroomvoorziening en het beperkte draagvermogen levert een beperking op van de te gebruiken meetapparatuur. Ook heeft de meettechnicus minder controle over de meetapparatuur gedurende de meting. De volgende commerciële partijen bieden drone-oplossingen aan:

- Sixarms (Australië) - <http://www.sixarms.com>
- Colibrex (Duitsland) - <http://www.colibrex.com>
- ELTI (Slovenië) - <http://www.elti.com/s/89/airborne-rf-measurement-system.html>

De verwachting is dat internationaal dergelijke metingen zich de komende jaren verder zullen uitbreiden. In Nederland heeft ASTRON¹⁴ enkele jaren geleden aangetoond dat antennediagrammetingen met drones inderdaad mogelijk zijn¹⁵. De LOFAR¹⁶ antennes van ASTRON zijn echter lage antennes die zijn geplaatst op de grond. FM-omroepantennes zijn vaak op 120 meter of hoger geplaatst. Er is momenteel geen wettelijk kader om een drone te gebruiken boven deze hoogte.

¹⁴ ASTRON is Nederlandse instituut voor radioastronomie.

¹⁵ Zie http://www.astron.nl/midaa2014/documents/7_MidPrep2014_UAV_Pupillo.pdf

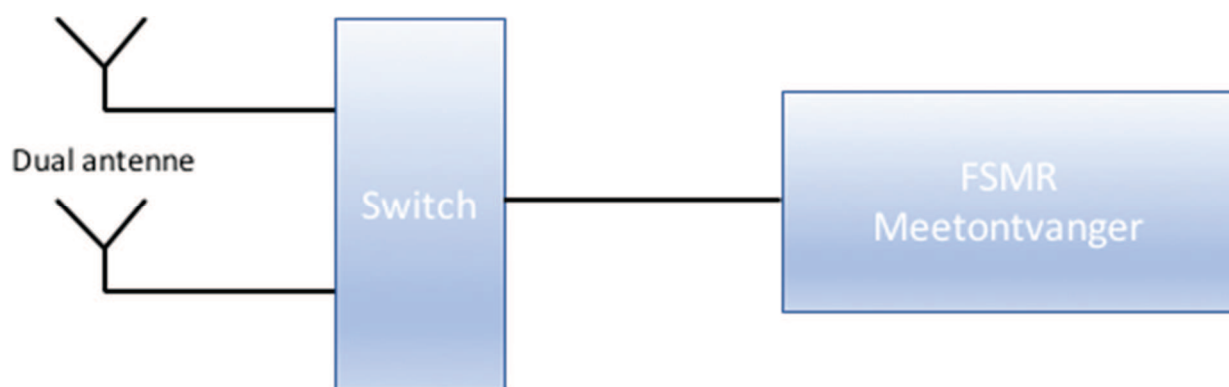
¹⁶ <http://www.lofar.org/>

3 VALIDATIE

In dit hoofdstuk wordt het antennediagrammeetsysteem gevalideerd. De validatie is op meerdere niveaus uitgevoerd. Allereerst zijn de RF onderdelen van het meetsysteem geanalyseerd. Ook zijn er controlemetingen aan het systeem uitgevoerd door FM signalen van een geijkte generator aan te bieden. Verder zijn kalibratierapporten van de gebruikte apparatuur gebruikt om de nauwkeurigheid van deze metingen te kunnen bepalen. Ten slotte is ook de verwerking van de ruwe meetgegevens door zowel de RadiMation software als de Matlab scripts geanalyseerd.

3.1 ANALYSE MEETSYSTEEM

In het door Agentschap Telecom ontworpen antennediagrammeetsysteem is het aantal componenten minimaal gehouden. Naast de antenne is er een RF antennekabel, RF schakelaar en een Rohde & Schwarz FSMR meetontvanger. De RF schakelaar schakelt continue tussen beide meetantennes. In figuur 3.1.1 is een versimpeld blokdiagram weergegeven.



Figuur 3.1.1: Blokdiagram van het antennediagrammeetsysteem

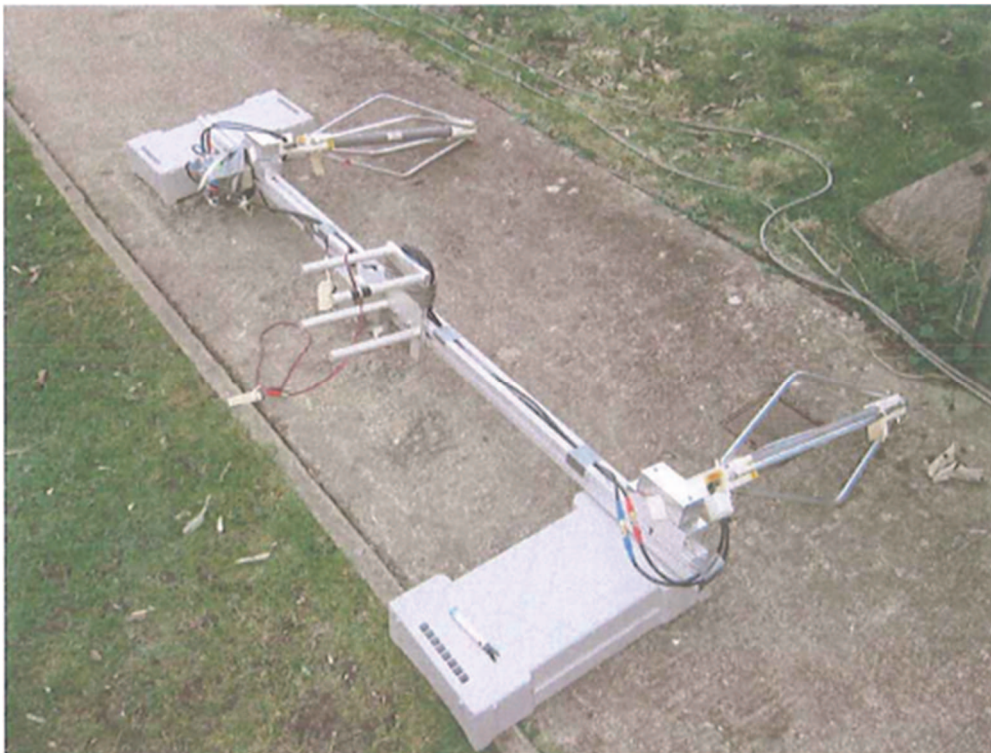
De antenneschakelaar ("Switch") is een actieve component; de andere componenten zijn passief. Oversturing van de ontvanger en intermodulatieproducten in de ontvanger kunnen niet ontstaan door passieve componenten¹⁷. Een uitzondering is de antenneschakelaar. Deze schakelt met een 1 kHz frequentie tussen beide antennes. De invloed van de schakelaar is onderzocht in sectie 3.2.3.

3.1.1 ONDERDELEN RF MEETSYSTEEM

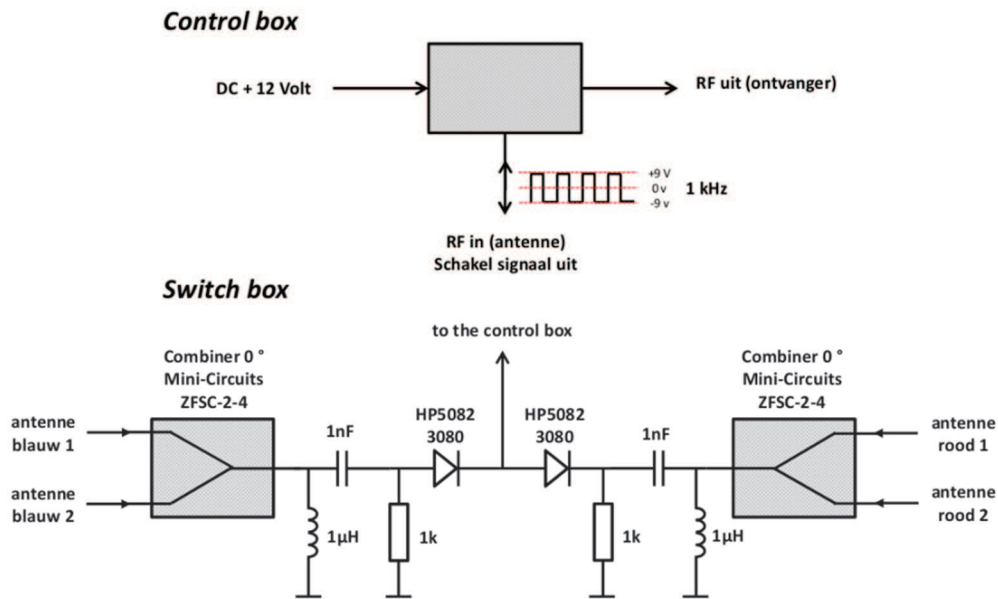
Het systeem bestaat uit:

¹⁷ Intermodulatie kan wel ontstaan bij grote signaalniveaus in passieve componenten (PIM (Passive Inter Modulation)). Gezien de signaalniveaus in de meetopstelling is dit fenomeen niet aan de orde.

- RF antenne
 - Dit is een zelfontworpen “Aperiodic loop array” antenne met een antennefactor van gemiddeld -17 dBi in de FM band. Deze antenne verzwakt FM signalen en is daarom zeer geschikt om op relatief korte afstand van een zendertoren te worden gebruikt. Een foto van de antenne is te zien in figuur 3.1.2. De antenne is gekalibreerd door het Britse National Physical Laboratory (NPL).
- RF kabel met antenneschakelaar (“Switch”)
 - Dit betreft een dubbel afgeschermd RG223 coaxkabel met SMA connectoren. De antenneschakelaar is door Agentschap Telecom zelf ontworpen en bestaat uit een klein aantal RF componenten. Het schema van deze schakelaar wordt in figuur 3.1.3 weergegeven. In sectie 3.2.3 is de invloed van deze schakelaar op de metingen bepaald.
- Rohde & Schwarz FSMR meetontvanger
 - Dit is een meetontvanger van het merk Rohde & Schwarz. De meetontvanger wordt aangestuurd vanuit een laptop door middel van de RadiMation software. De meetontvanger is gekalibreerd. De kalibratie wordt uitgevoerd door Rohde & Schwarz, onder accreditatie van de DKD (Deutscher Kalibrierdienst).
- Matlab scripts
 - De RadiMation software schrijft de meetresultaten weg in bestanden. Na afloop van de meting worden Matlab scripts gebruikt voor verdere verwerking van de meetdata en weergave van de resultaten.



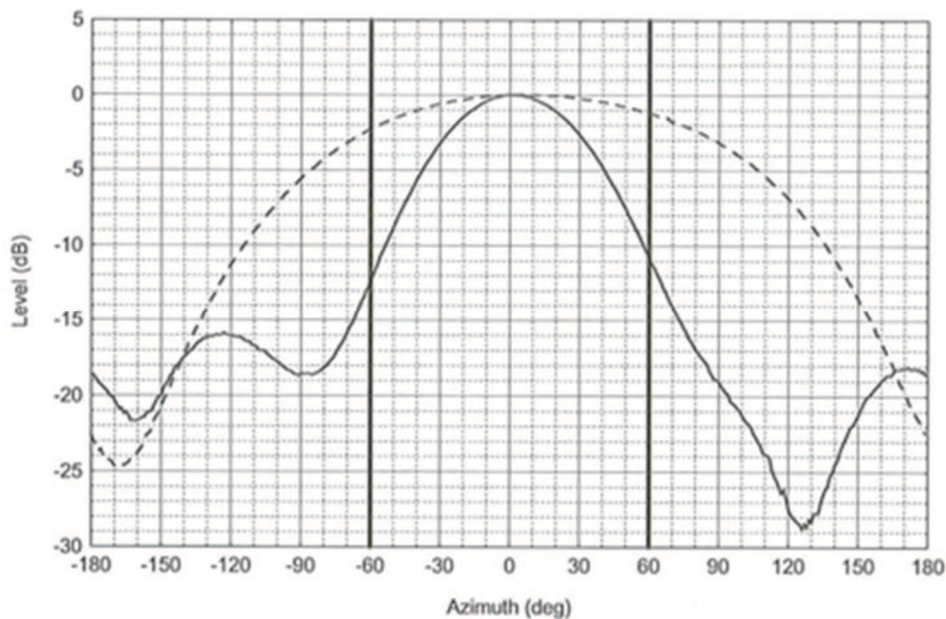
Figuur 3.1.2: De meetantenne



Figuur 3.1.3: RF schema van de antenneschakelaar

3.1.1.1 ANTENNEDIAGRAM

Het antennediagram van de meetantenne is een belangrijk aandachtspunt in het meetsysteem. Een antenne met een directioneel antennediagram onderdrukt reflecties zoals de grondgolf sterk. Dit verhoogt de nauwkeurigheid van het systeem. Anderzijds is een directionele antenne gevoeliger voor richtfouten wat nadelig is voor de nauwkeurigheid. Agentschap Telecom heeft een antenneontwerp gekozen dat rekening houdt met beide zaken. Het antennediagram, dat is weergegeven in figuur 3.1.4, toont het diagram in de dimensie van het richten van de antenne naar de bron. Voor de andere dimensies (verticaal, horizontaal) zijn geen antennediagrammen beschikbaar, maar deze zullen een vergelijkbaar diagram tonen. In de dimensie van het richten van de antenne naar de bron (zendertoren) kan de antennemast verticaal worden geplaatst zoals bij een daadwerkelijke meting of horizontaal. In figuur 3.1.4 worden de antennediagrammen getoond voor beide posities. De grafiek voor de verticale plaatsing is alleen relevant voor de antennediagrammetingen (stippellijn).



Figuur 3.1.4: Antennediagram van de meetantenne in de dimensie van het richten van de antenne naar de bron (zendertoren). De gestippelde lijn toont het antennediagram als de antennemast verticaal is geplaatst zoals bij een daadwerkelijke meting. De doorgetrokken lijn is de horizontale plaatsing welke niet relevant is voor de antennediagrammetingen. Dit betreft een genormaliseerd antennediagram, waarbij de hoofdrichting op 0 dB is gesteld.

3.1.2 VERWACHTE SIGNAALNIVEAUS

In deze sectie worden verwachte signaalniveaus (boven- en ondergrens) op de ingang van de meetontvanger bepaald en vergeleken met de specificaties van de Rohde & Schwarz meetontvanger.

Een meetontvanger heeft een beperkt meetbereik voor signalen. Te sterke signalen zullen leiden tot oversturing van de ontvanger. Te zwakke signalen zullen door de ontvanger niet meer kunnen worden weergegeven, omdat ze onder het eigen ruisniveau van de ontvanger komen. Om die reden is het zinvol om na te gaan of de verwachte signaalniveaus binnen het bereik van deze ontvanger vallen. Daarnaast speelt selectiviteit een rol. Is de meetontvanger in staat om een relatief zwak FM signaal goed te kunnen meten in de buurt van een sterk (FM) signaal? Ook dit wordt in deze sectie uitgewerkt.

3.1.2.1 BOVENGRENS

Het onderstaande scenario schetst een praktijksituatie waarbij een maximaal FM signaal wordt gemeten:

- FM uitgestraald vermogen $P_{tx} = 200 \text{ kW}$ (53 dBW)
- Afstand tot de zender 500 meter¹⁸

¹⁸ Deze minimale afstand wordt vanwege veiligheidsredenen aangehouden. Daarboven is de veldsterkte te hoog, om een goede werking van apparatuur en helikopter te waarborgen.

- Free-space padverlies $R_{\text{propagatie}}$: 66,3 dB
- Frequentie 97,75 MHz (midden FM band¹⁹)
 - Antenneversterking G_{antenne} : -17,4 dBd (kalibratiegegevens NPL)
- Verlies kabel R_{kabel} : 2,2 dB (kalibratiegegevens kabel)
- Verzwakker in de meetontvanger (standaardinstelling) $R_{\text{RF verzwakker}}$: 30 dB

Het gemeten signaal zal in dit geval zijn (in het dB-domein):

$$P_{\text{rx}} = P_{\text{tx}} - R_{\text{propagatie}} + G_{\text{antenne}} - R_{\text{kabel}} - R_{\text{RF verzwakker}}$$

$$P_{\text{rx}} = 53 - 66,3 + -17,4 - 2,2 - 30 = -62,9 \text{ dBW} = -32,9 \text{ dBm}$$

De bovengrens is dus -32,9 dBm.

3.1.2.2 ONDERGRENS

Net als voor de bovengrens kan een praktijkscenario worden geschetst, waarbij een minimaal signaal wordt gemeten:

- FM uitgestraald vermogen $P_{\text{tx}} = 1 \text{ kW}$ (30 dBW)
 - Agentschap Telecom stelt dat minimaal 1 kW FM zenders kunnen worden gemeten met deze methode.
- Afstand tot de zender 2500 meter
 - Free-space padverlies $R_{\text{propagatie}}$: 80,2 dB
- Frequentie 97.75 MHz (midden FM band)
 - Antenneversterking G_{antenne} : -17,4 dBd (kalibratiegegevens NPL)
- Verlies kabel R_{kabel} : 2,2 dB (kalibratiegegevens kabel)
- Verzwakker in de meetontvanger (standaardinstelling) $R_{\text{RF verzwakker}}$: 30 dB (NB: in de gebruikte setting van het meetsysteem staat de verzwakker van de meetontvanger altijd op 30 dB).

Het gemeten signaal zal in dit geval zijn (in dB-domein):

$$P_{\text{rx}} = P_{\text{tx}} - R_{\text{propagatie}} + G_{\text{antenne}} - R_{\text{kabel}} - R_{\text{RF verzwakker}}$$

$$P_{\text{rx}} = 30 - 80,2 + -17,4 - 2,2 - 30 = -99,8 \text{ dBW} = -69,8 \text{ dBm}$$

De ondergrens is dus -69,8 dBm. Dit is een worst-case (theoretisch) scenario, omdat in de meeste gevallen de optimale meetafstand tot de te meten zender kleiner is dan 1 km. Hiermee zal het padverlies veel kleiner zijn dan hiervoor is weergegeven. Bij een meetafstand van 1 km is het gemeten signaal (free-space loss 72.2 dB):

$$P_{\text{rx}} = 30 - 72,2 + -17,4 - 2,2 - 30 = -91,8 \text{ dBW} = -61,8 \text{ dBm}$$

Het ontvangen signaal kan wel zwakker zijn als buiten de hoofdbundel wordt gemeten. Bij een voor-achterverhouding van 20 dB, wat zeer gebruikelijk is bij dit soort

Naast veiligheidsredenen is er ook de zogenaamde Fraunhofer afstand. Bij afstanden groter dan de Fraunhofer afstand is sprake van het verre veld van de zender. Metingen kunnen alleen in het verre veld worden uitgevoerd. Bij een omvang van de antenne (op de zendertoren) van 30 meter is deze afstand 555 meter. Uit praktijkmetingen blijkt dat de optimale meetafstand altijd veel groter is dan deze Fraunhofer-afstand.

¹⁹ Het midden van de FM band is gekozen, omdat weliswaar bij hogere frequenties de antenne een hogere versterking heeft, maar dit gecompenseerd wordt door het hogere free-space padverlies.

antenneopstellingen, zou het ontvangen vermogen aan de achterkant van de antenne 10 W zijn. Doordat het agentschap echter een voorwaarde heeft opgenomen van 1 kW uitgestraald vermogen (in een bepaalde richting) voor een meting, wordt dit aspect niet meegenomen in deze analyse. In praktische situaties komen lagere vermogens beneden de 1 kW voor bij directionele antennediagrammen.

3.1.2.3 SPECIFICATIE MEETONTVANGER

De Rohde & Schwarz meetontvanger heeft de volgende specificaties²⁰:

- Gevoeligheid/ruisvloer -150 dBW/Hz (-120 dBm/Hz)²¹
 - Voor 200 kHz bandbreedte²² is dat -67 dBm
- Maximale ingangssignaal
 - 1 dB compressiepunt -17 dBW (13 dBm), hierboven is de ontvanger niet meer lineair.
- Immuniteit voor sterke signalen
 - Out-of-band > 90 dB
 - In-band > 80 dB
- Meetnauwkeurigheid
 - 0,5 dB volgens de datasheet van Rohde & Schwarz
 - 0,1 dB volgens het kalibratierapport (sectie 4.1)
 - Beide waarden gelden alleen wanneer een signaal in het lineaire meetbereik wordt gemeten.

3.1.2.4 ANALYSE

Uit de analyse van de verwachte signaalniveaus blijkt dat de specificaties van de meetontvanger voldoende zijn om sterke signalen te ontvangen. De meetontvanger is wel ongevoelig voor zwakke signalen. De ondergrens hiervan hangt af van onder andere de meetafstand. In een typische meting zal de ondergrens rond de 1 kW uitgestraald vermogen in een bepaalde richting zijn. Daaronder zal de meetontvanger minder nauwkeurig meten. De selectiviteit van de meetontvanger is ruim voldoende om sterke signalen in de FM band of daarbuiten (bijvoorbeeld DAB+ of DVB-T) te kunnen onderdrukken.

	Theoretische waarde (worst case)	Specificatie meetontvanger
Ondergrens	-69,8 dBm	-67 dBm (200 kHz bandbreedte)
Bovengrens	-32,9 dBm	-13 dBm

Tabel 3.1.5: Theoretisch meetbereik versus specificaties meetontvanger

Op basis van de analyse van het meetsysteem concludeert de Universiteit Twente dat het bereik van de te verwachten signalen niet optimaal is gekozen. Bij zwakke signalen zal de meetontvanger nabij de ruisvloer van het instrument meten. Sterke signalen vallen ruimschoots binnen het lineaire bereik van de ontvanger. Bij sterke signalen dient ook

²⁰ https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/F_SMR_dat-sw_en.pdf

²¹ De technische term is hiervoor DANL (Displayed Average Noise Level).

²² De bandbreedte van een FM kanaal is 200 kHz.

rekening gehouden te worden met andere sterke bronnen buiten de FM-band, zoals DAB+ of DVB-T zenders. De universiteit beveelt daarom aan om de gebruikte RF verzwakking kleiner te kiezen, zodat de verwachte signaalniveaus beter aansluiten bij het meetbereik van de meetontvanger.

3.2 CONTROLEMETINGEN

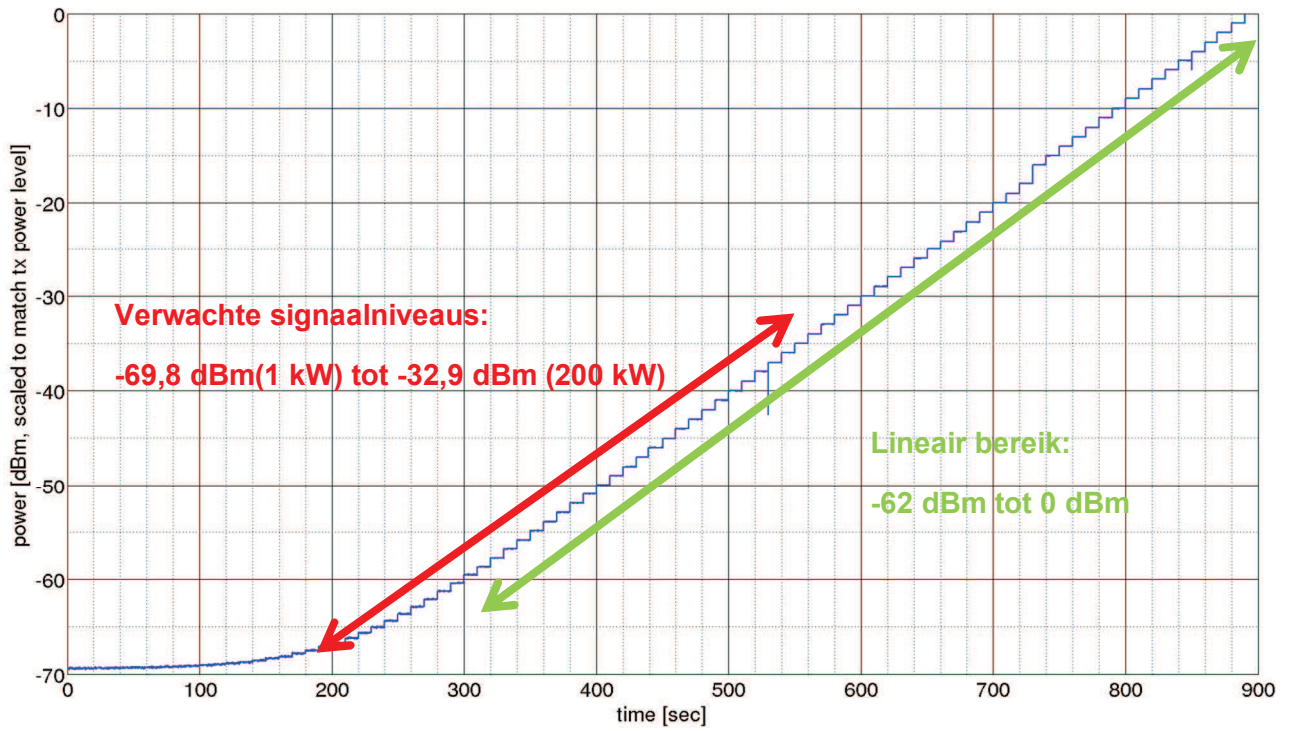
Om het meetbereik van de meetontvanger in de praktijk vast te stellen, zijn controlemetingen uitgevoerd met een gekalibreerde Aeroflex Inc IFR2026B signaalgenerator. De meetopstelling bestond uit een signaalgenerator, een korte RF kabel (RG-223) en de meetontvanger. De metingen zijn uitgevoerd op 17 mei 2017 en 5 juli 2017.

3.2.1 MEETBEREIK

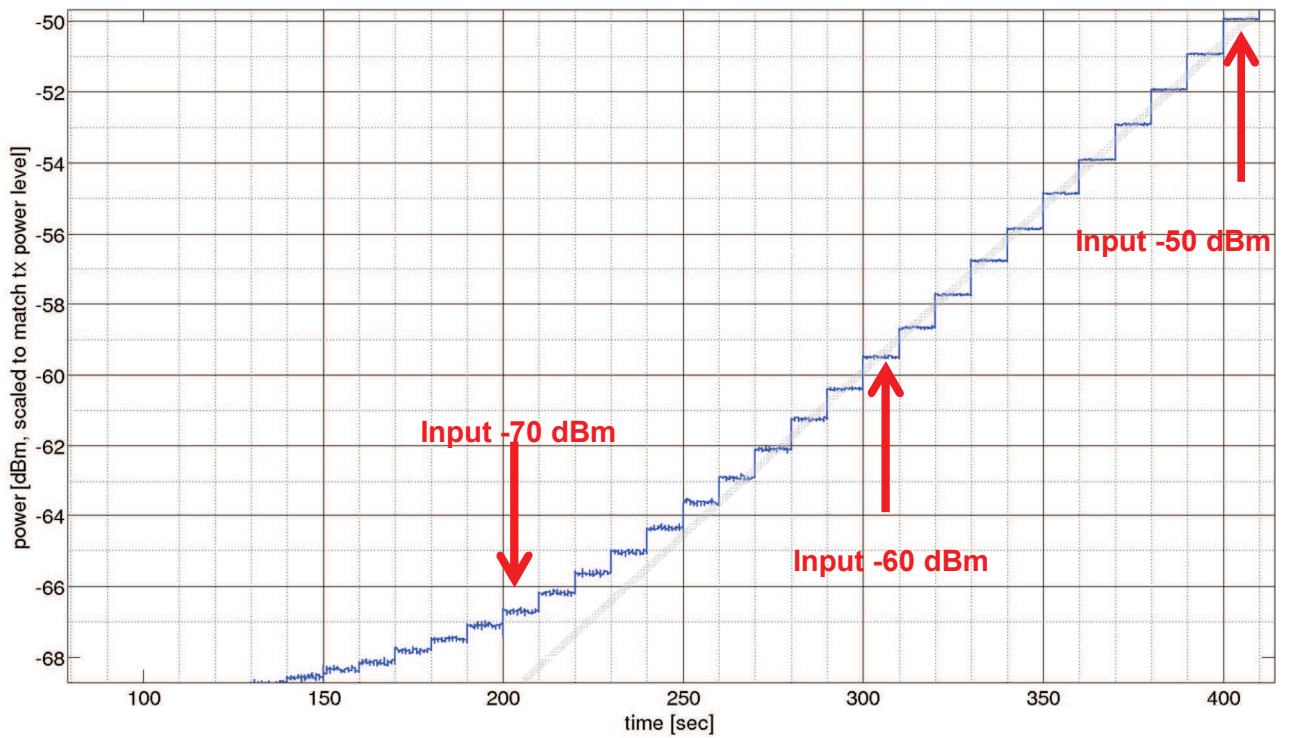
In deze meting is de generator ingesteld op een vermogen van -90 dBm en iedere 10 seconde is de generator handmatig met 1 dB verhoogd tot 0 dBm. Binnen dit bereik wordt het te ontvangen signaalniveau verwacht en is aan de bovenkant een extra signaal van 30 dB meegenomen. In figuur 3.2.1 is het ontvangen signaal versus tijd door de meetontvanger gedurende het experiment weergegeven. Er is een klein verlies in de RF kabel (0.3 dB), die is gecompenseerd in de weergave van de grafiek. Dit verlies wordt veroorzaakt doordat een andere RF kabel is gebruikt dan tijdens de reguliere metingen. In de ideale situatie zou de uitkomst een rechte lijn (trapje) zijn.

3.2.1.1 DETAILS EXPERIMENT

- Generator
 - Signaal met FM modulatie
 - Spectrummasker volgens ITU-R SM.1268-3 Annex 1
 - FM deviation: 75 kHz
 - FM audio input: 10 kHz sine
 - Zendfrequentie: 97,75 MHz (midden FM band)
 - Signaalniveau -90 tot 0 dBm
 - Iedere 10 seconden naar een 1 dB hoger niveau
- Meetontvanger
 - Ontvangstfrequentie: 97,75 MHz
 - RBW filter: 200 kHz
- Weergave (Matlab)
 - Compensatie voor verliezen door RF kabel (0,3 dB)



Figuur 3.2.1: Meetbereik van de meetontvanger



Figuur 3.2.2: Ingezoomd meetbereik van de meetontvanger

Tijdens de meting is er 1 stap overgeslagen, waardoor in plaats van 1 dB een 2 dB stap is gemaakt (rond de -17 dBm). Daarnaast is er heel kort (< 1 seconde) een lager vermogen ingesteld rond de -37 dBm, waardoor er een korte piek naar onderen zichtbaar is.

3.2.1.2 ANALYSE

Uit deze metingen blijkt dat het grootste deel van de verwachte signaalniveaus in het lineaire bereik van de meetontvanger liggen. De verwachte signaalniveaus komen niet volledig overeen met het lineaire bereik van de meetontvanger. Bij lage FM uitgestraalde vermogens en grote afstanden tot de mast kan het meetsysteem het FM vermogen niet meer (goed) meten. Er zal een meetfout ontstaan. De achterliggende oorzaak hiervoor is dat het signaal bij de systeemruis wordt opgeteld. Bij een steeds zwakker signaal zal de systeemruis dominant worden, waardoor de afwijking groter zal zijn. Bij het signaalniveau van -63 dBm is er een afwijking van 1 dB (dat wil zeggen dat de meetontvanger -62 dBm meet). Als deze waarde als ondergrens wordt genomen dan gelden de volgende afstanden:

- Op 2500 meter afstand kan het meetsysteem uitgestraalde FM vermogens vanaf 6 kW meten²³.
- Bij een afstand van 1 kilometer is dit een FM signaal van 1 kW²⁴.

De Universiteit Twente beveelt aan om het ontvangen RF signaal bij nieuwe metingen niet met 30 dB te verzwakken, maar met een kleinere waarde; 20 dB of minder. De optimale RF verzwakking hangt onder andere af van de uitgestraalde vermogens van de te meten FM omroepzenders en andere FM omroepzenders op dezelfde mast. Een kleinere waarde sluit beter aan bij het lineaire bereik van de meetontvanger. In dat geval valt het maximaal te verwachten signaalniveau op de ontvanger nog binnen het lineaire bereik.

3.2.2 SELECTIVITEIT

In deze meting is de generator ingesteld op een vermogen van -60 dBm. Iedere 30 seconde is de generator handmatig ingesteld op verschillende frequenties rondom de FM frequentie die de meetontvanger meet. In het ideale geval zal in al deze gevallen de ruisvloer worden gemeten. Vanwege de beperkte selectiviteit in reguliere meetontvangers zal bij frequenties rondom het gewenste kanaal een deel van een sterk nabuursignaal lekken in het gewenste kanaal. In figuur 3.2.3 wordt het ontvangen signaal versus de tijd door de meetontvanger gedurende het experiment weergegeven.

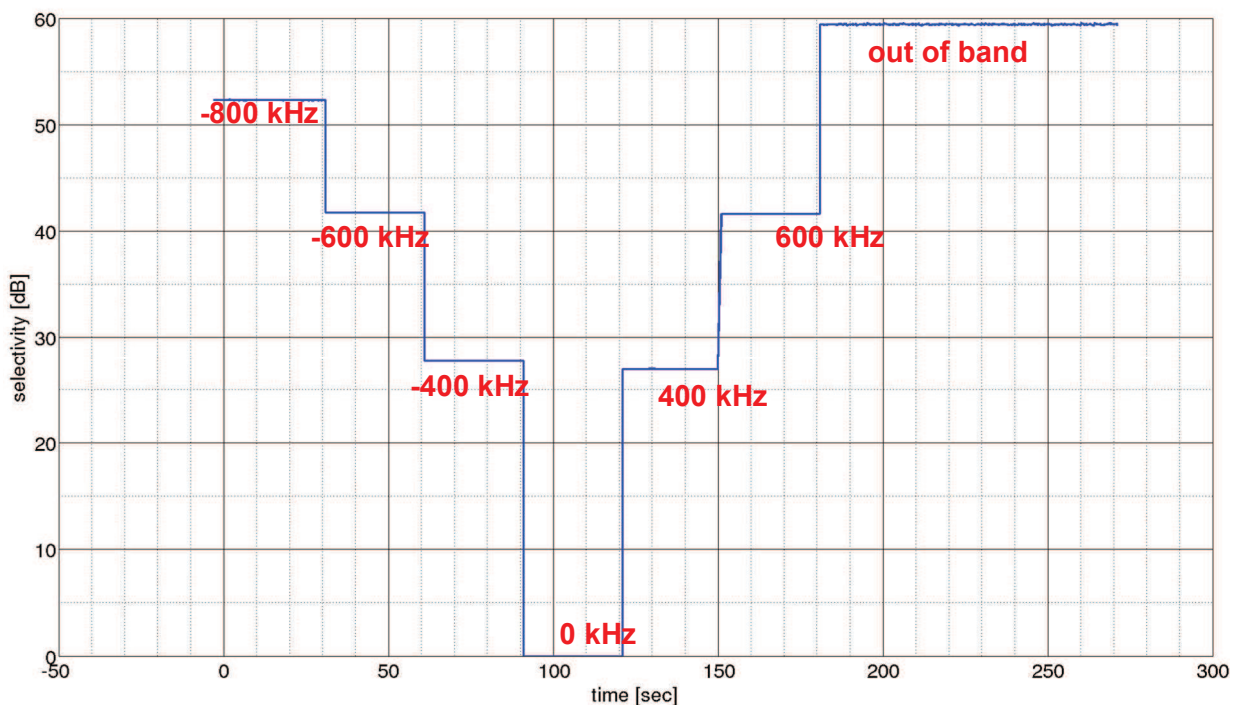
Er is een klein verlies in de RF kabel (0.3 dB), dat is gecompenseerd in de weergave van de grafiek. Zowel frequenties in de FM band als daarbuiten zijn gemeten, zoals in de volgende sectie is weergegeven.

²³ Hiervoor is de formule uit sectie 3.1.2.2 toegepast. Een 6 kW zender is in decibel 7.8 dB sterker ten opzichte van 1 kW. Hiermee zal het gemeten vermogen niet -69.7 dBm zijn, maar 61.9 dBm.

²⁴ De uitkomst uit sectie 3.1.2.2 is een ontvangen vermogen van -61.7 dBm wat afgerond -62 dBm is.

3.2.2.1 DETAILS EXPERIMENT

- Generator
 - Signaal met FM modulatie
 - Spectrummasker volgens ITU-R SM.1268-3 Annex 1
 - FM deviation: 75 kHz
 - FM audio input: 10 kHz sine
 - Ontvangstfrequentie: 97,75 MHz (midden FM band)
 - Zendfrequentie (in volgorde van de tijd 30s per frequentie)²⁵:
 - 96,95 MHz (-4 FM kanalen)
 - 97,15 MHz (-3 FM kanalen)
 - 97,35 MHz (-2 FM kanalen)
 - 97,75 MHz (ontvangstfrequentie)
 - 98,15 MHz (+2 FM kanalen)
 - 98,35 MHz (+3 FM kanalen)
 - 227,36 MHz (DAB+ frequentie, kanaal 12C, NPO multiplex)
 - 470 MHz (frequentie in DVB-T band)
 - 293,25 MHz (3^e harmonische van ontvangstfrequentie)
 - Signaalniveau: -60 dBm
- Meetontvanger
 - Ontvangstfrequentie: 97,75 MHz
 - RBW filter: 200 kHz
- Weergave (Matlab)
 - Compensatie voor verliezen door RF kabel (0,3 dB)



Figuur 3.2.3: Selectiviteit van de meetontvanger

²⁵ In de planning voor FM zenders wordt altijd een minimale frequentieafstand van 2 FM kanalen aangehouden (400 kHz). Hierdoor heeft het geen nut om de selectiviteit van ± 1 FM kanaal te meten.

3.2.2.2 ANALYSE

Uit de metingen blijkt dat de selectiviteit van de ontvanger voor signalen buiten de FM band maximaal is (> 60 dB). De metingen tonen de ruisvloer van het systeem. In de FM band is de selectiviteit minder, vooral in de buurt van het ontvangen FM kanaal. Het meest kritisch is de ontvanger voor ± 2 FM kanalen afstand, 27 dB. Dat wil zeggen dat een sterk signaal op deze frequenties 27 dB zwakker wordt gemeten op het gewenste kanaal. Om een goede meting uit te kunnen voeren aan het uitgestraalde vermogen van de FM zender, moet ook nog een extra marge worden gebruikt aan sterke nabuursignalen. Als deze gesteld wordt op 6 dB²⁶, dan mag het FM signaal in een buurkanaal maximaal 21 dB sterker zijn. Deze grens geldt per zendrichting. Een FM zender op ± 1 FM kanaal op dezelfde locatie komt in Nederland niet voor. Dit is zo gepland door het agentschap. Voor ± 3 FM kanalen geldt een vermogen van maximaal 36 dB sterker en voor ± 4 kanalen 46 dB. Uit bovenstaande blijkt dat er vooral aandacht moet zijn of voor de aanwezigheid van sterke zenders op ± 2 FM kanalen die een antennediagrammeting van het gewenste FM kanaal kunnen beïnvloeden.

Naast de antenne kunnen sterke signalen ook inkoppelen via de RF kabel of antenneschakelaar. Doordat de RF kabel een veel grotere afscherming heeft dan de (negatieve) antenneversterking van de antenne is deze invloed verwaarloosbaar. Hetzelfde geldt voor de RF schakelaar die is ingebouwd in een metalen behuizing. Hierdoor ontstaat er een goede afscherming tegen ongewenste signalen.

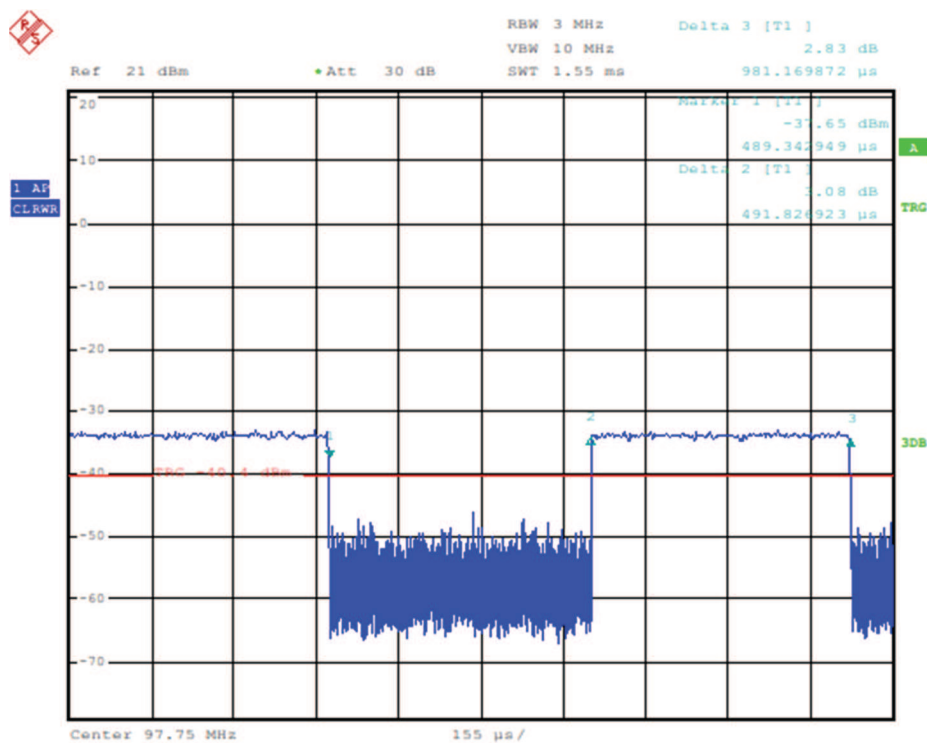
3.2.3 ANTENNESCHAKELAAR

In het meetsysteem schakelt de antenneschakelaar continu tussen de twee antennes. Dit schakelen heeft mogelijk een negatieve invloed op de metingen. Ten eerste wordt een deel van het FM signaal *niet* gemeten gedurende het schakelen tussen de twee antennes. Ten tweede zorgt het schakelen²⁷ ervoor dat een deel van het signaal lekt naar naburige FM kanalen. Hierdoor kunnen sterke naburige FM signalen de meting beïnvloeden. Vanwege de lage schakelfrequentie van 1 kHz is de verwachting dat de invloed hiervan beperkt zal zijn op de meetresultaten. Zeker omdat er altijd 400 kHz (2 kanalen) tussen twee naburige FM zenders is gepland.

In het eerste experiment is op een ingang van de schakelaar een signaal aangeboden en is de andere ingang van de schakelaar afgesloten met een weerstand van 50 Ohm. Het uitgangssignaal wordt aangesloten op de meetontvanger. In figuur 3.2.4 wordt de signaalsterkte versus de tijd getoond op de meetontvanger. Uit dit figuur kan de schakelfrequentie worden bepaald; een frequentie van 1019 Hz. Deze schakelfrequentie komt vrij dicht in de buurt van de verwachte frequentie. (Deze verwachte frequentie wordt bepaald door het ontwerp van de antenneschakelaar.)

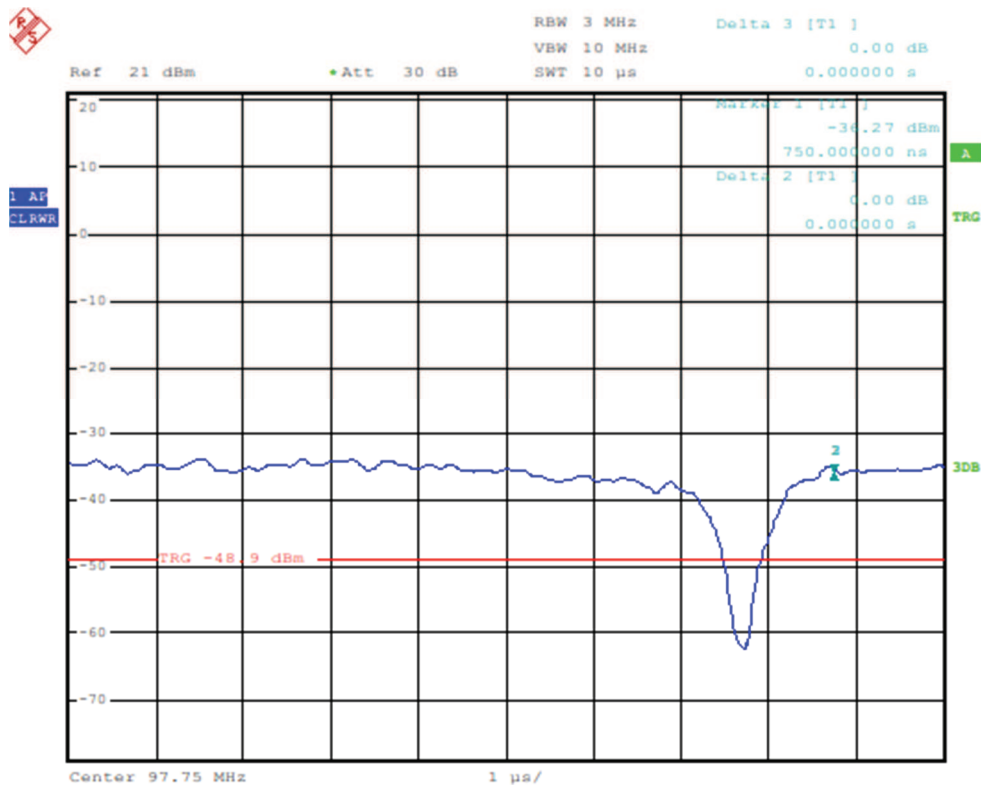
²⁶ De gekozen 6 dB is een praktische waarde. Stoorsignalen lager dan 6 dB zullen geen significante invloed hebben op het bepalen van het uitgezonden signaal van het hoofdsignaal.

²⁷ Het bronsignaal wordt vermenigvuldigd met een blok golf (schakelsignaal) waardoor naast het bronsignaal ook mengproducten op hogere (en lagere) frequenties zullen ontstaan. Een blok golf is namelijk opgebouwd uit meerdere frequenties. Vanwege de lage schakelfrequentie ten opzichte van het bronsignaal zullen deze producten alleen zichtbaar zijn in de naburige FM kanalen.



Figuur 3.2.4: Schakelfrequentie van de antenneschakelaar

In het tweede experiment is de invloed van het schakelen (“meetgat”) op de meting bepaald. Voor deze meting is op beide antenne-ingangen een signaal aangeboden. Figuur 3.2.5, toont de signaalsterkte versus de tijd op de meetontvanger. Uit het experiment blijkt dat tijdens het schakelen het signaal een korte periode inzakt, gedurende ongeveer 1 µs. Er wordt twee keer geschakeld in een periode, dus 2 / 1000 van het FM signaal gaat verloren. Dit heeft een verwaarloosbare invloed op de meting (< 0.1 %).



Figuur 3.2.5: Meetgat door het schakelen van de antenneschakelaar

De invloed van de schakelfrequentie (vermenigvuldiging met een blokgolf) is niet onderzocht. Vanwege de lage schakelfrequentie (1 kHz) gaat de Universiteit Twente ervan uit dat de invloed hiervan nihil zal zijn op de meetresultaten; aangezien er altijd 400 kHz (2 kanalen) tussen twee naburige FM zenders op dezelfde mast is gepland door Agentschap Telecom. De belangrijkste componenten van de schakelblokgolf zullen 1, 3 en 5 kHz zijn. Deze frequenties zijn ten opzichte van de bandbreedte van een FM kanaal (200 kHz) veel kleiner. Dit betekent dat er alleen signalen in de buurt van een FM signaal zullen lekken (± 10 kHz).

Hieruit kan worden geconcludeerd dat de invloed van de schakelaar op de metingen verwaarloosbaar is.

3.3 KALIBRATIERAPPORTEN MEETAPPARATUUR

In deze validatiemetingen is naast de Rohde & Schwarz meetontvanger ook een Aeroflex Inc. IFR2026B signaalgenerator gebruikt. Van beide meetapparaten zijn recente kalibratierapporten beschikbaar die een correcte werking van de apparaten waarborgen. De eerste pagina van ieder rapport zijn in figuur 3.3.1 en figuur 3.3.2 getoond. De kalibratierapporten laten zien dat de meetapparatuur functioneert binnen de opgegeven specificaties tijdens de validatiemetingen.

Unit Data

Item / Gegenstand: **Measuring Receiver**

Manufacturer / Hersteller: **ROHDE & SCHWARZ**

Type / Typ: **FSMR3**

Material Number / Materialnummer: **1165.3311K03** Serial Number / Seriennummer: **200011**

Asset Number / Inventarnummer: **35070**

This calibration certificate documents that the named item is tested and measured against defined specifications. Measurement results are located usually in the corresponding interval with a probability of approx. 95% (coverage factor $k = 2$). Calibration is performed with test equipment and standards directly or indirectly traceable by means of approved calibration techniques to the PTB/DKD or other national / international standards, which realize the physical units of measurement according to the International System of Units (SI). In all cases where no standards are available, measurements are referenced to standards of the R&S laboratories. Principles and methods of calibration correspond and are conformant with EN ISO/IEC 17025, ANSI/NCSL Z540.1-1994 and ANSI/NCSL Z540.3-2006. The applied quality system is certified to EN ISO 9001. This calibration certificate may not be reproduced other than in full. Calibration certificates without signatures are not valid. The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Order Data

Customer / Auftraggeber: **Ministerie van Economische Zaken Agentschap Telecom**

**Plot Mondriaanplein 41
3812 GZ Amersfoort
NL**

Order Number / Bestelnummer: **60194**

Date of Receipt / Eingangsdatum: **2016-10-31**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert, dass der genannte Gegenstand nach festgelegten Vorgaben geprüft und gemessen wurde. Die Messwerte liegen im Regelfall mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95% im zugeordneten Wertebereich (Erweiterte Messunsicherheit mit $k = 2$). Die Kalibrierung erfolgte mit Messteilen und Normen, die direkt oder indirekt durch Ableitung mittels anerkannter Kalibrertechniken rückgeführt sind auf Normale der PTB/DKD oder anderer nationaler/internationaler Standards zur Darstellung der physikalischen Einheiten in Übereinstimmung mit dem internationalen Einheitensystem (SI). Wenn keine Normale existieren, erfolgt die Rückführung auf Bezugnormale der R&S-Laboratorien. Grundsätze und Verfahren der Kalibrierung beziehen sich auf und entsprechen EN ISO/IEC 17025, ANSI/NCSL Z540.1-1994 und ANSI/NCSL Z540.3-2006. Das angewandte Qualitätsmanagementsystem ist zertifiziert nach EN ISO 9001. Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Kalibrierscheine ohne Signifizierungen sind unglültig. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

Performance

Place and Date of Calibration / Ort und Datum der Kalibrierung:

Werk Memmingen, 2016-11-02

Scope of Calibration / Umfang der Kalibrierung:

Standard Calibration

Statement of Compliance (Incoming) / Konformitätsaussage (Anlieferung):

One or more measured values are within the uncertainty guard band marked as UGB1. However, all are within the data sheet specifications.

Statement of Compliance (Outgoing) / Konformitätsaussage (Auslieferung):

All measured values are within the data sheet specifications.

Extent of Calibration Documents / Umfang des Kalibrierdokuments:

**2 Pages Calibration Certificate
24 Pages Outgoing Results
24 Pages Incoming Results**
Rohde & Schwarz Messgerätebau GmbH

Date of Issue / Auslieferungdatum:

Head of Laboratory / Laborleitung:

Person Responsible / Bearbeiter:

2016-11-02

Steigmüller

Daniel Gust

Page 1/2
ver0816MB0707

Figur 3.3.1: Kalibratierreport Rohde & Schwarz FSMR meetontvanger

Calibration Certificate
 Certificado de Calibración

Certificate No. 1250-307074469
 Número

Unit Data

Item SIGNAL GENERATOR
 Instrumento
Manufacturer Aeroflex Inc.
 Fabricante
Type IFR2026B
 Tipo
Material No. IFR 2026B **Serial No.** 202601891
 Nº del Material Nº de Serie
Asset No. 37290
 Número
 Inventario

This calibration certificate documents that the named item is tested and measured against defined specifications. Measurement results are located usually in the corresponding interval with a probability of approx. 95% (coverage factor k=2). Calibration is performed with test equipment and standards directly or indirectly traceable by means of approved calibration techniques to the ENAC or other national/international standards, which realize the physical units of measurement according to the International System of Units (SI). In all cases where no national standards are available, measurements are referenced to standards of the R&S laboratories. Principles and methods of calibration correspond with ISO/IEC 17025. This calibration certificate may not be reproduced other than in full. Calibration certificates without signatures are not valid. The contents of the present certificate are not covered under ENAC accreditation nor under its international recognition agreements. The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Order Data

Customer Ministerie van Economische Zaken
 Cliente Agentschap Telecom
 Piet Mondriaanplein 41
 3812 GZ AMERSFOORT
 NETHERLANDS

Order No. 59208
 Número de Pedido
Date of Receipt 2016-04-06
 Fecha de Rec.

Performance

Place and Date of Calibration R & S MADRID, RSES,
 Lugar y Fecha(s) de Calibración From 2016-04-08 to 2016-04-11

Scope of Calibration Standard Calibration
 Tipo de Calibración

Statement of Compliance (Incoming) All measured values are within the data sheet specifications.
 Estado en la Recepción

Statement of Compliance (Outgoing) All measured values are within the data sheet specifications.
 Resultado de la Calibración

Extent of Calibration 40 Pages Calibration Certificate
 Páginas del Certificado

Este certificado de calibración muestra que el equipo mencionado ha sido comprobado y calibrado de acuerdo con especificaciones definidas. Los resultados de las medidas están dentro del correspondiente intervalo con una probabilidad del 95% (factor de cobertura K=2). La calibración se ha realizado con equipos y patrones directa o indirectamente trazables, mediante técnicas aprobadas, a ENAC u otros patrones nacionales / internacionales que materializan las unidades físicas de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades SI. En todos los casos en los que no sean posibles patrones nacionales, las medidas están referidas a patrones de los laboratorios de R&S. Los principios y métodos de calibración están de acuerdo con la norma EN ISO/IEC 17025. El sistema de calidad utilizado está certificado por la EN ISO 9001. Este certificado de calibración no puede ser reproducido más que en su totalidad. Certificados de calibración sin firmas, no son válidos. El contenido del presente certificado no está cubierto por la acreditación ENAC ni por sus acuerdos internacionales de reconocimiento. El usuario está obligado a mantener el equipo recalibrado dentro de los intervalos apropiados.

Rohde & Schwarz España, S.A. (Office Madrid)

Date of Issue
 (YYYY-MM-DD)
 Fecha de Emisión

2016-04-11

Calibration Manager
 Director de Calibración



Carlos Salazar

Person Responsible
 Técnico



Luis-Miguel Bravo

Page 1/40
 PT 3583.9833.00

Figuur 3.3.2: Kalibratierrapport Aeroflex Inc IFR2026B signaalgenerator

3.4 VERWERKING RADIMATION

De RadiMation software rekent de ruwe meetdata van de meetontvanger om naar het uitgestraalde vermogen van de FM antenne. Het resultaat wordt in tekstbestanden weggeschreven. Om te valideren of deze software correct functioneert, heeft Universiteit Twente een tweetal handmatige berekeningen uitgevoerd en deze vergeleken met de uitkomst van de RadiMation software:

- Afstand zendertoren en helikopter
- Uitgestraalde e.r.p. vermogen van de FM zender

Zowel de locatie van de zendertoren als de helikopterpositie worden weergegeven in GPS coördinaten. Deze coördinaten moeten omgezet worden naar een afstand tussen deze punten. De aarde kan gezien worden als een (afgeplat) bolvormig object. Om de afstand tussen twee punten op deze bol te bepalen, moet een complexe driedimensionale berekening worden uitgevoerd. Als de afstand relatief klein is ten opzichte van de kromming van de aarde, kunnen ook benaderingsformules worden gebruikt. De RadiMation software gebruikt een dergelijke benaderingsformule [6].

Om te verifiëren of deze benaderingsformule voldoende nauwkeurig is, heeft Universiteit Twente voor een tweetal metingen²⁸ de afstanden tussen de helikopter en zendtoren via een andere methode berekend²⁹. Uit deze berekeningen blijkt dat de afwijkingen tussen beide rekenmethodes kleiner zijn dan 0.1%. Dat wil zeggen dat op 1000 meter afstand de fout kleiner dan 1 meter is. Dit is voldoende nauwkeurig voor deze metingen. De variaties in het gemeten signaal, veroorzaakt door een meetfout in de afstand, zijn verwaarloosbaar.

Naast het narekenen van de afstand heeft Universiteit Twente ook het uitgestraalde vermogen van de FM zender handmatig nagerekend. Het ingangssignaal van de meetontvanger is een spanning (dB μ V) en de RadiMation software zet deze aan de hand van de afstand tussen zendertoren en meetantennes om tot de zendantenne (dBW e.r.p.). Daarnaast is er bij direct zicht op de zendantenne sprake van een free-space padverlies van radiosignalen. De gebruikte formule in de RadiMation software is:

$$P_{TX}[dBW] = V [dB\mu V] + C_{dBW} + PL_{free\ space} + R_{cable} + G_{antenne} + C_{dBd}$$

Hierbij is

- $P_{TX}[dBW]$ het zendvermogen
- $V [dB\mu V]$ de ingangsspanning van de meetontvanger in dB μ V
- C_{dBW} een constante welke de spanning omzet naar een vermogen in dBW. Deze constante heeft een waarde van -136.99 dB bij 50-ohm systemen.
- $PL_{free\ space}$ het padverlies volgens het free-space model. Deze is als volgt gedefinieerd: $PL_{free\ space} = -20\log_{10}\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)$ waarbij r de afstand is tussen zendmast en helikopter en λ de golflengte van het FM signaal.
- R_{cable} het kabelverlies tussen de antenne en meetontvanger. Deze verliezen zijn voor verschillende frequenties gemeten en beschikbaar in bestandsvorm.
- $G_{antenne}$ de antennefactor van de antenne. Deze antennefactor is door het Britse NPL voor verschillende frequenties gemeten en beschikbaar in bestandsvorm.
- C_{dBd} de constante welke de antennefactor van een isotrope ontvanger omzet naar een dipoolontvanger. In het omroepdomein is het gebruikelijk om zendvermogens te

²⁸ Dat wil zeggen dat ruwe meetdata uit vorige meetcampagnes hiervoor zijn gebruikt.

²⁹ <https://nl.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/5256-pos2dist>

relateren aan een dipoolzendvermogen. Deze constante heeft een waarde van -2.15 dB

Voor een tweetal metingen van een vorige meetcampagne heeft Universiteit Twente het uitgestraalde vermogen volgens bovenstaande formule nagerekend en de uitkomsten vergeleken met de RadiMation software. Uit deze berekeningen zijn geen verschillen naar voren gekomen. Conclusie is dat de RadiMation software de ruwe meetdata correct omzet naar het uitgestraalde vermogen.

3.5 VERWERKING MATLAB

Nadat RadiMation het zendvermogen heeft berekend, volgt de laatste stap in het meetsysteem, namelijk de verwerking van de ruwe meetdata in Matlab. De belangrijkste functies in Matlab zijn:

- Visualisatie van de data
 - Selecteren van een meting
 - Bekijken van een antennediagram
- Middelen van de ruwe meetdata per 10 graden
 - In de FM-omroepvergunning wordt het uitgestraalde vermogen per 10 graden weergegeven.

In de visualisatiestap worden meetgegevens gepresenteerd en om die reden heeft validatie van dit onderdeel geen meerwaarde. In onderstaande sectie zoomen we in op de middeling van ruwe meetdata.

3.5.1 MIDDELING VAN RUWE MEETDATA

De Matlab scripts middelen de ruwe meetdata van het uitgestraalde vermogen per 10 graden. Hierbij gelden de volgende parameters:

- Middeling ± 3 graden. Dat wil zeggen dat het uitgestraalde vermogen op bijvoorbeeld 60 graden bepaald wordt door de ruwe meetdata tussen 57 en 63 graden te middelen.
- Middeling in het lineaire domein.
- Het gemiddelde van de ruwe data wordt gebruikt.
- Afronding op hele decibels (dB's)

Het gebruik van een 6-gradenvenster voor middeling van de ruwe meetdata over 10 graden is een goede keuze. Een kleiner venster gaat ten koste van de meetnauwkeurigheid en een groter venster zorgt ervoor dat snelle veranderingen/wijzigingen in het antennediagram niet meer zichtbaar zijn of door de middeling vertekend worden weergegeven.

In radiocommunicatie worden signalen standaard gezien als log-normale variabelen. Middeling van dergelijke variabelen moet daarom ook plaats vinden in het log-domein en niet in het lineaire domein. In de volgende sectie onderzoekt Universiteit Twente of de ruwe meetdata als log-normale variabelen kunnen worden beschouwd. De Universiteit Twente vindt dat -ongeacht de distributie van de ruwe meetdata- het beter is om de mediane waarde te nemen uit de geselecteerde meetset en niet het gemiddelde. Het gemiddelde is gevoeliger voor beïnvloeding door extreme meetwaarden dan de mediaan. Dit geeft een beter resultaat als de verdeling van de meetdata niet (log-)normaal is.

In de allerlaatste stap van het berekende uitgestraalde vermogen wordt de meetwaarde afgerond op hele dB's, omdat de meetnauwkeurigheid 1 dB is. Een hogere precisie zou een hogere nauwkeurigheid van het meetsysteem suggereren.

Om de middeling van Matlab te verifiëren is een normale ingangsvariabele aangeboden (experiment). De middeling voor dit testsignaal was correct (uitkomst); het uitgangsvermogen is de verwachtingswaarde van deze variabele.

3.5.1.1 DISTRIBUTIE VAN DE RUWE MEETDATA

Om de middeling goed te kunnen uitvoeren, is het belangrijk om de distributie van de ruwe meetdata te onderzoeken. De distributie van de data bepaalt de meetnauwkeurigheid van het systeem. Voor een (log-)normale variabele geldt bijvoorbeeld dat met 95% waarschijnlijkheid de berekende verwachtingswaarde binnen de grens van plus of min twee keer de standaardafwijking is. Als de variabele niet (log-)normaal kan worden beschouwd gelden deze grenzen niet! In de wiskunde bestaat een aantal testen om te controleren of een variabele kan worden gezien als normaal of log-normaal. In dit onderzoek zijn de volgende testen gebruikt:

- Kolmogorov-Smirnov test³⁰
- Jarque–Bera test³¹

Deze testen zijn door Universiteit Twente uitgevoerd op de ruwe meetdata van twee metingen. Hieruit bleek dat de ruwe meetdata *niet* kan worden gezien als een normale of log-normale variabele. Dit betekent dat het beter is om de mediane waarde te gebruiken in plaats van het gemiddelde. De mediane variabele is niet alleen ongevoeliger voor extreme meetwaarden, maar ook voor asymmetrische verdelingen.

3.5.1.2 ANALYSE

Uit de bovenstaande experimenten blijkt dat de middeling in de huidige verwerking door Matlab niet correct is uitgevoerd, aangezien de meetdata geen normale verdeling heeft. Doordat de signaalvariaties van de meetdata klein is, zal de uiteindelijke invloed op het berekende antennediagram echter beperkt zijn. De Universiteit Twente beveelt aan om de middeling aan te passen en verder onderzoek te doen naar de optimale middelingsmethode. In sectie 5.8 wordt op dit aspect verder ingegaan.

Doordat de meetdata geen (log-)normale verdeling heeft, kunnen ook de standaardregels voor meetnauwkeurigheid niet worden toegepast. In het hoofdstuk meetnauwkeurigheid wordt hier verder op ingegaan.

³⁰ https://en.wikipedia.org/wiki/Kolmogorov%E2%80%93Smirnov_test

³¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Jarque%E2%80%93Bera_test