

Radar en schaduwwerking veroorzaakt door grote windturbines

Lucas J. van Ewijk
TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium
Postbus 96864 2509 JG 's-Gravenhage
e-mail: vanewijk@fel.tno.nl



Inleiding

Het toenemend maatschappelijk milieubewustzijn van de afgelopen decennia heeft geleid tot een toenemende vraag naar milieuvriendelijke energiebronnen. Met name de toepassing van windenergie – een in het windrijke Nederland een voor de hand liggende keuze – heeft een enorme vlucht genomen. Op vele locaties worden windturbines geplaatst die per turbine 500 kW tot 700 kW elektrische energie opwekken. Deze turbines worden op hoge,

conische masten geplaatst, een mashoogte van 60 m is een typische waarde.

Windrijke gebieden worden in het algemeen gevonden op grote open vlakten en langs de kust. Vooral deze laatste locatie is in Nederland ruim voorhanden. Als een windrijk gebied is bestemd voor het opwekken van windenergie worden de windturbines meestal in groepen geplaatst. Een windturbinepark bevat tussen de 4 en 20 windturbines.

Hoewel een windturbine er imposant uitziet voor een menselijke waarnemer die aan de voet van de mast staat, is deze zelfde windturbine slechts een



fragiel en klein voorwerp voor een waarnemer die er op niet al te grote hoogte overheen vliegt. Een radar neemt echter niet op een dergelijke subjectieve wijze waar. Voor een op aarde geplaatste radar heeft een windturbine altijd dezelfde invloed.

Een deel van de door een radar uitgestraalde energie kan door de windturbine(mast) worden tegengehouden, waardoor er een schaduw achter de windturbine ontstaat. De plaatsing van parken van windtur-

bines in de nabijheid van een radar kan daarom een negatieve invloed hebben op de werking van de radar.

Buiten deze schaduwwerking heeft de mast van de windturbine nog meer invloed op de werking van een radar, zoals het veroorzaken van schijndoelen, maar deze beïnvloeding kan in de regel door het radarsysteem zelf worden ondervangen.

Om de invloed van windturbines op een radar te kwantificeren, liefst vóór plaatsing van de windturbines, zijn rekenmodellen ontwikkeld die als resultaat de reductie in afstands bereik van de radar geven ten gevolge van de schaduwwerking.

Het onderzoek dat heeft geleid tot de nu bestaande rekenmodellen is in drie stappen uitgevoerd:

- Globale methode:
De berekening van de reductie in afstandsbereik is verricht aan de hand van een equivalente geleidende cilinder als obstakel;
- Nauwkeurige methode:
De berekening van de reductie in afstandsbereik is verricht aan de hand van een obstakel met het silhouet van een windturbine;
- Schaalmodelmetingen:
Metingen aan een schaalmodel (zowel in afmetingen als frequentie) zijn verricht in een elektromagnetisch afgeschermd (dode) ruimte of anechoïsche kamer om de schaduwwerking van een metalen cilinder te bepalen onder gecontroleerde omstandigheden;
- Veldmetingen:
Om de rekenmodellen te toetsen zijn metingen verricht met een bestaande radar aan een reeds gebouwd windturbinepark.

Met de laatste drie stappen is aangetoond dat de eerste methode voldoende nauwkeurig is om de reductie in afstandsbereik van een radar, ten gevolge van het plaatsen van een windturbine, te kunnen analyseren. In deze eerste methode wordt de invloed van gondel en wieken verwaarloosd. Deze aanname blijkt gerechtvaardigd te zijn. Slechts wanneer metalen in plaats van de tot nu toe gebruikelijke kunststof wieken worden toegepast zal het model sterk gaan afwijken van de werkelijkheid.

Schaduwwerking, zichtbaar licht

Een elektromagnetisch veld kan door een obstakel worden tegengehouden. De meest eenvoudige vorm hiervan is een ieder wel bekend, dat is namelijk de schaduw die ontstaat als zichtbaar licht wordt tegengehouden door een niet-transparant object. In het dagelijkse leven verbaast niemand zich hierover.

Als met een zaklantaarn op een object wordt geschenen kunnen we zien dat achter dat object minder licht invalt dan in de situatie waarin het object niet is geplaatst, zie figuur 1. (We beschouwen hierbij, gemakshalve, de zaklantaarn als een puntbron). De schaduw is dus aanwezig achter het obstakel, gezien vanuit de lichtbron. Wat ook iedereen weet is dat de schaduw niet oneindig diep is, hetgeen inhoudt dat er altijd wel wat licht

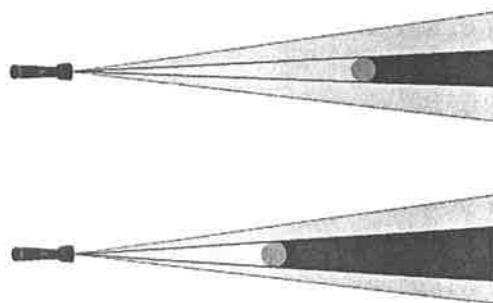


Fig. 1: Het optreden van schaduw achter een object

aanwezig is achter het object. Dit heeft meerdere oorzaken, de belangrijkste hiervan is dat er vrijwel altijd meer dan één lichtbron aanwezig is in het dagelijkse leven. De breedte van de schaduw is ook afhankelijk van de afstand tussen lichtbron en obstakel, zoals ook in de figuur is te zien.

Schaduwwerking, radarstraling

In de vorige paragraaf is de schaduwwerking voor licht besproken. Radarstraling en licht zijn beide elektromagnetisch van aard, alleen de golflengte is zeer verschillend. Alvorens hier verder op in te gaan is het noodzakelijk in het kort weer te geven hoe een radar objecten, ook wel doelen genoemd, kan detecteren.

Om een object, zoals een vliegtuig, schip of een gebouw, te kunnen waarnemen zendt een radar elektromagnetische energie uit, gebundeld in een nauwkeurig bepaalde richting. In het vervolg gaan we er van uit dat we te maken hebben met een radar welke vliegtuigen detecteert. Als de elektromagnetische straling invalt op het vliegtuig wordt een deel van de invallende straling gereflecteerd. Een deel van deze gereflecteerde straling kan dan ontvangen worden door de radar waardoor het betreffende vliegtuig kan worden gedetecteerd. Deze detectie vindt plaats als de ontvangen energie boven een ingesteld drempelniveau komt. De sterkte van de ontvangen weerkaatste signalen, de echo's, is van cruciaal belang omdat deze in competitie is met een onvermijdelijke achtergrondruis. Wordt de echo te zwak, dan is die niet meer te onderscheiden van de ruis.

Afstand en richting van het vliegtuig worden afgeleid uit respectievelijk looptijd van het heen en weergaande signaal en de stand van de antenne op het moment van de uitzending. Om een groot gebied af te zoeken op de aanwezigheid van vliegtuigen is een radar meestal uitgerust met een ronddraaiende antenne die de bundel in elke gewenste richting kan sturen.

We keren nu terug naar het probleem van de vliegtuigdetectie waarbij zich een obstakel (windturbine) tussen radar en vliegtuig bevindt. Als we de vergelijking met (zichtbaar) licht weer ter hand nemen dan is het ontstaan van een schaduw ten gevolge van een obstakel tussen de radar en het te detecteren doel niet moeilijk in te zien. Net als in het geval van de zaklantaarn zal er achter het obstakel minder energie zijn dan in de ongestoorde situatie. Hiermee houdt echter de vergelijking bijna op. Hoewel, fysisch gezien, hetzelfde effect optreedt als in de situatie van het zichtbaar licht, dienen we goed rekening te houden met de verhoudingen van obstakelafmetingen en golflengten. We zullen dit trachten te verduidelijken aan de hand van een rekenvoorbeeld:

De golflengte van zichtbaar licht ligt tussen 400 nm en 700 nm. De golflengte van een typische radar voor vliegtuigdetectie ligt tussen de 3 cm en 10 cm. Een typische windturbine heeft een conische mast van 60 m hoog, aan de voet een diameter van 3 m en aan de top een diameter van 1,8 m. Als we de gondel en de wieken achterwege laten en dit obstakel willen schalen naar het geval van zichtbaar licht komen we uit op een lengte van 0,3 mm en een diameter tussen 9 μm en 15 μm . Het is moeilijk voor te stellen dat een dergelijk obstakel nog een schaduw oplevert. Echter, de breedte van de bundel van de invallende radarstraling is ook beperkt, deze bedraagt enkele tientallen meters (stel voor de vergelijking een breedte van 100 m). Terug naar de schaal van licht hebben we het dan over een lichtbundel van 0,5 mm breed. Het aanstralen van een object als een windturbine met radar of met licht heeft dus nogal wat consequenties.

Bovenstaande vergelijking naar de schaal van lichtgolven draagt niet bij aan de verduidelijking van de berekening van het schaduwprobleem, maar geeft wel de verhoudingen weer waar het hierbij om gaat.

In het vervolg wordt nader ingegaan op de wijze waarop deze beïnvloeding kan worden gekwantificeerd.

Als zich tussen de radar en het waar te nemen vliegtuig een obstakel bevindt, bijvoorbeeld een windturbine, dan kan ter plaatste van het vliegtuig aangenomen worden dat er twee elektrische velden bestaan. Behalve

het veld dat heerst in afwezigheid van het obstakel zal er een tweede bestaan dat in tegenfase is met het eerste veld.

De sterkte van dit secundaire veld is, in vermogen uitgedrukt, evenredig met het kwadraat van het onderscheppend oppervlak van het obstakel en is maximaal gelijk aan het oorspronkelijke veld. Het totale, resulterende veld is de coherente optelling van deze twee velden en kan zodoende aanzienlijk zwakker zijn dan het oorspronkelijke veld. Deze wijze van beschrijving volgt uit de EM rekenwijze en is in feite de beschrijving van het ontstaan van schaduw.

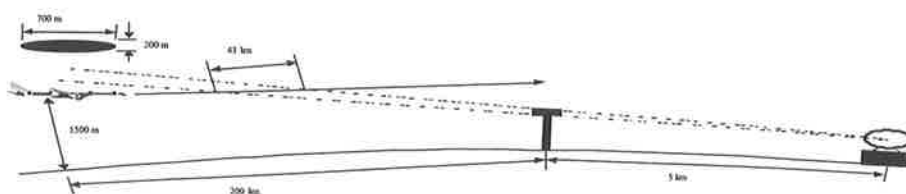
Het globale effect is dat er achter een obstakel een schaduwkegel ontstaat waarin het vermogen van de radar verzwakt doordringt. Het vliegtuig wordt daardoor met minder energie aangestraald door de radar. De reflectie van het vliegtuig zal op de terugweg naar de radarantenne opnieuw een verzwakking ondergaan, volgens dezelfde redenering als geldt voor het heengaande signaal: Het obstakel veroorzaakt namelijk ook een schaduwkegel voor energie die oorspronkelijk ongehinderd het traject van doel naar antenne kon afleggen.

Het effect van de verzwakking op de heen- en terugweg over het pad tussen radar en vliegtuig kan vertaald worden in een reductie van het detectiebereik van de radar. Een doel dat tot 200 km detecteerbaar is in onbelemmerde omstandigheden, is in de schaduwkegel nog maar detecteerbaar tot bijvoorbeeld 150 km; een reductie van 25 %.

Gelukkig is de schaduwkegel in het algemeen in omvang beperkt waardoor de kans dat een willekeurig vliegtuig zich erin zal bevinden klein is. Een schaduwkegel van een 50 m hoge metalen cilinder geplaatst op 5 km van een representatieve radar, heeft op 200 km vanaf de radar een ellipsvormige doorsnede van 700 m bij 200 m (zie figuur 2).

Toch is het operationele effect van windturbines een punt van grote zorg en wel om de volgende redenen:

Fig. 2: Schematische weergave van de schaduwkegel voor een radar die een vliegtuig aanstraalt.



Niet alle radarvolgsystemen zijn bestand tegen het verlies van een doel gedurende enkele ogenblikken en gelet op het drukke vliegverkeer is een goede werking van volgsystemen van groot belang.

Bij het radiaal vliegen naar een radar, dat wil zeggen dat de vliegrichting naar de radar toe is in plaats van er langs, zal een vliegtuig dat een route heeft langs de lijn radar-windturbine gedurende langere tijd in de schaduwkegel belanden, aangezien de as van de schaduwkegel slechts een geringe elevatie heeft;

Bij een groot aantal windturbines, zoals in een windturbinepark, zijn er ook veel schaduwkegels.

De globale berekening van het schaduw effect veroorzaakt door een equivalente geleidende cilinder is in de appendix van dit artikel gegeven.

Enkele resultaten

In deze paragraaf worden enkele voorbeelden getoond die berekend zijn met gebruikmaking van typische waarden voor alle parameters. We veronderstellen tevens dat de windturbines alleen bestaan uit een mast. De gondel en de wieken worden hierbij dus buiten beschouwing gelaten. Als rekenvoorbeeld is gekozen voor een radar die werkt op 3 GHz of 10 GHz, overeenkomend met een golflengte van respectievelijk 10 cm en 3 cm, en met azimut- en elevatiebundelbreedtes van, respectievelijk $\alpha_z = 0,5^\circ$ en $\alpha_e = 1,5^\circ$. In het eerste voorbeeld plaatsen we een conische mast van 60 m hoog, met een diameter van 3 m aan de voet en 1,8 m aan de top op 3 km van de radar. Het resul-

taat van deze berekening is getoond in figuur 3 voor de beide frequenties.

In figuur 4 is een zelfde berekening gedaan, nu echter met de windturbine op 2 km afstand van de radar.

In figuur 3 en 4 staat op de horizontale as de afstand tussen radar en doel weergegeven en op de verticale as wat de procentuele afstandsreductie is voor dat doel. Uit deze resultaten zijn al direct een aantal conclusies duidelijk:

- Naarmate de afstand tussen de radar en het obstakel kleiner wordt zal de reductie in detectieafstand groter worden;
- Als de golflengte van de radarstraling kleiner wordt zal de reductie in detectieafstand groter worden.

Beide conclusies zijn ook uit fysische overwegingen te verklaren. Als een windturbine dicht bij de radar geplaatst wordt zal het onderschepte deel van de bundel groter zijn, waardoor ook een grotere reductie in detectieafstand wordt veroorzaakt.

Voor een kleinere golflengte is de windturbine groter, in termen van de golflengte, hetgeen ook resulteert in een grotere reductie. In deze beide conclusies helpt overigens de vergelijking met een lichtbron weer.

Als derde voorbeeld wordt gekeken hoe de reductie in detectieafstand verandert als functie van de hoek β welke de lijn radar-vliegtuig maakt

Fig. 3: Reductie in het bereik voor een doel op de as van de schaduwkegel van een windturbine als functie van de afstand tussen radar en doel (zie tekst voor parameters).

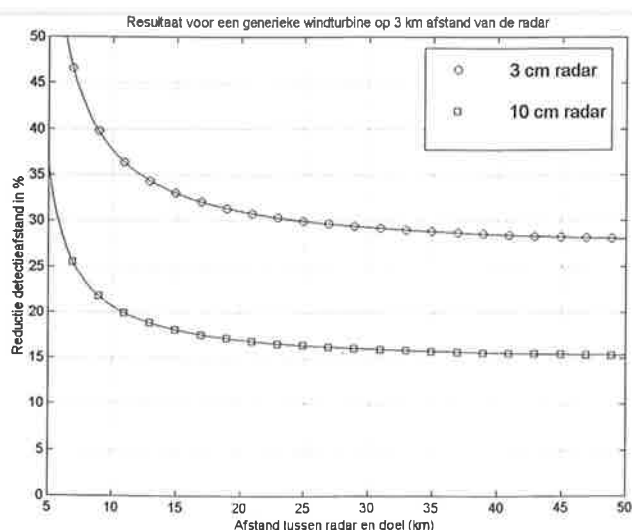
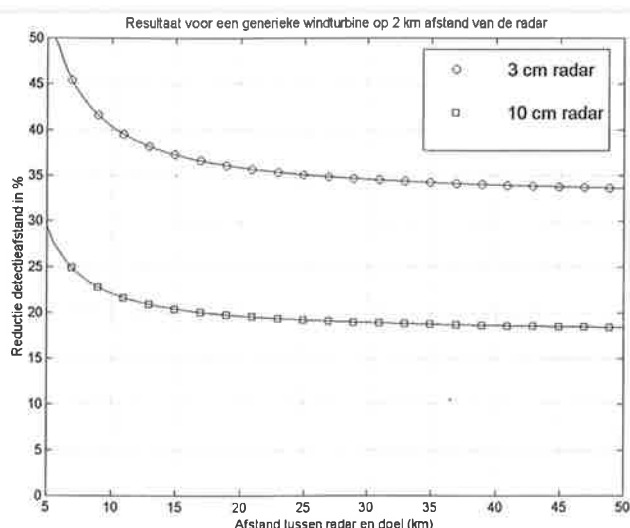


Fig. 4: Een zelfde resultaat als in figuur 3, nu echter met de windturbine op 2 km afstand van de radar.



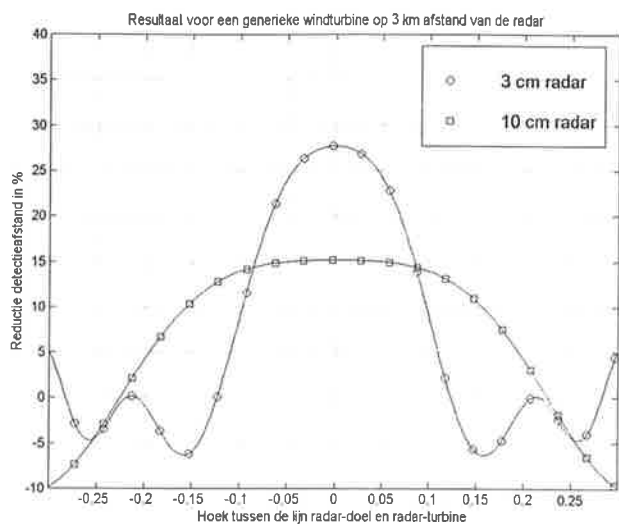


Fig. 5: Reductie in het bereik voor een doel op 100 km afstand van de radar als functie van de afstand tot de schaduwkegel in graden (zie tekst voor parameters).

met de lijn radar-obstakel. Het resultaat van een dergelijke berekening wordt getoond in figuur 5.

Figuur 5 laat zien hoe het verlies in detectieafstand afneemt als een doel dat zich bevindt op 100 km van de radar, andere posities inneemt. De situatie $\beta=0$ stemt overeen met een positie op de as van de schaduwkegel (het verlengde van de lijn die loopt van het hart van de radarantenne naar de turbinekop). De situatie $\beta=0,3$ correspondeert met een richting met dezelfde elevatie als de as en een zijdelingse afwijking van $0,3^\circ$, wat op 100 km overeenkomt met een verplaatsing over ongeveer 520 m. In figuur 6 is nogmaals een zelfde soort berekening getoond, nu echter met de turbine op 2 km afstand van de radar.

Ook uit de resultaten van figuur 5 en figuur 6 zijn een aantal conclusies te trekken:

- Voor bepaalde hoeken treedt in plaats van een reductie een vermeerdering in detectieafstand op;
- Voor een kleinere golflengte fluctueert de reductie in detectieafstand sneller.

Nadere beschouwingen

In het voorgaande zijn enkele voorbeelden getoond van de berekening van de reductie in detectieafstand van een radar in de schaduw van een windturbine. Hoewel in deze voorbeelden de windturbine slechts is voorgesteld als een conische mast zonder gondel en wieken doet dit niets af aan het optreden van dit verschijnsel. In het door

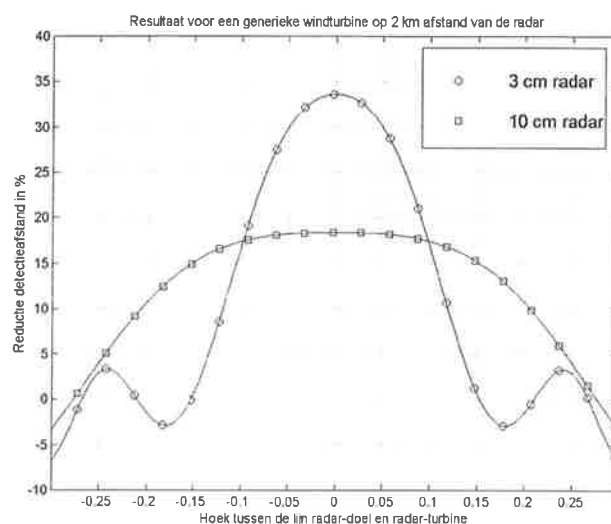


Fig. 6: Een zelfde resultaat als in figuur 5, nu echter met de windturbine op 2 km afstand van de radar.

TNO-FEL uitgevoerde onderzoek naar de schaduwwerking door windturbines wordt de gondel tevens in de analyses meegenomen. De wieken blijven echter buiten beschouwing. Uit metingen en berekeningen is gebleken dat deze wieken volledig transparant verondersteld mogen worden voor de tot nu toe geanalyseerde radarsystemen. Deze aanname blijft gelden mits de wieken van kunststof zijn. Metalen wieken zullen naar verwachting de hier getoonde schaduwwerking zeer nadelig beïnvloeden.

Voor de resultaten die hier zijn gegeven is gebruik gemaakt van de globale rekenmethode. In het voorgaande onderzoek is deze methode vergeleken met een meer nauwkeurige rekenmethode en tevens met metingen in de anechoïsche ruimte en met veldmetingen. Hieruit volgde dat voor de situaties die hier gebruikt zijn de globale rekenmethode voldoende nauwkeurige resultaten oplevert.

Conclusies

Uit onderzoek naar de schaduwwerking door windturbines, dat door TNO-FEL is uitgevoerd, is gebleken dat grote obstakels, zoals windturbines hinder kunnen veroorzaken voor radars omdat zij een schaduw opwekken, waardoor een radar doelen minder goed kan detecteren. Algemene termen voor de beïnvloeding zijn niet te geven omdat te veel parameters een rol spelen in dit proces.

Bij het plaatsen van windturbines in de nabijheid van een radar dienen de volgende overwegingen in beschouwing te worden genomen:

1. De nadelige invloed van een windturbine neemt af bij het vergroten van de afstand tot de radar.
2. De nadelige invloed van een windturbine neemt af met de oppervlakte van het silhouet, dus met de hoogte en breedte van de draagkolom en met de afmetingen van de generatorgondel.

Appendix: Globale berekening van het schaduweffect

Als de afstand tussen radar en obstakel groot genoeg is (in de orde van enkele kilometers), kan het verstrooide veld op de as radar-obstakel aan de schaduwkant van het obstakel en op voldoende afstand van het obstakel worden berekend uit de voorwaartse radardoorsnede (Radar Cross Section, RCS) van het obstakel, σ_π . Dit verstrooide veld is in tegenfase met het oorspronkelijke veld.

Voor de vermogensdichtheid in het verstrooide veld en in het oorspronkelijke veld vinden we, respectievelijk:

$$P_I = \frac{PG \sigma_\pi}{(4\pi)^2 d^2 r^2 L_{ot}} \quad (1)$$

en

$$P_D = \frac{PG}{4\pi R^2 L_{ot}} \quad (2)$$

met

$P(W)$ vermogen van de uitgezonden puls
 G antenne vermogensversterking in de hoofdlus
 $\sigma_\pi (m^2)$ voorwaartse RCS van de cilinder
 $d(m)$ afstand radar – obstakel
 $r(m)$ afstand punt in schaduwgebied tot obstakel
 $R(m)$ afstand punt in schaduwgebied tot radar
 L_o totaal van de verliezen in zender, golfpijpen en koppelingen, antenne en ontvanger, te splitsen in een zend- en een ontvangdeel, respectievelijk L_{ot} en L_{or} .

In het hart van de schaduwkegel zijn de velden behorend bij P_I en P_D in tegenfase. De resulterende vermogensdichtheid zal dus zijn:

$$P_R = (\sqrt{P_D} - \sqrt{P_I})^2 = P_D \left[1 - \sqrt{\frac{P_I}{P_D}} \right]^2 \quad (3)$$

De verhouding tussen de vermogensdichtheden met en zonder obstakel op een afstand R van de radar in het centrum van de schaduwkegel wordt dus:

$$\frac{P_R}{P_D} = \left[1 - \sqrt{\frac{\sigma_\pi}{4\pi}} \frac{R}{d(R-d)} \right]^2 \quad (4)$$

In deze uitdrukking is r vervangen door $(R-d)$ omdat er van uit wordt gegaan dat antenne, obstakel en het beschouwde punt zich op één lijn bevinden.

Als er zich op de afstand R een reflecterend object bevindt zal een analoge redenering gelden voor het gereflecteerde vermogen dat in de radarontvanger beschikbaar komt: Na reflectie treedt op de terugweg dezelfde vermogensreductie dus nogmaals op en de verhouding tussen de door de radar ontvangen echovermogens met en zonder obstakel wordt:

$$\frac{P_R}{P_D} = \left[1 - \sqrt{\frac{\sigma_\pi}{4\pi}} \frac{R}{d(R-d)} \right]^4 \quad (5)$$

Vertaald naar een reductie in afstandsbereik betekent dit een verlies van:

$$red = 100 \frac{R}{d(R-d)} \left[\frac{\sigma_\pi}{4\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

op de as van de schaduwkegel, uitgedrukt in procenten.

De voorwaartse RCS van de cilinder kan worden geschreven als:

$$\sigma_\pi = G(\delta, \mu) A_0 = \frac{4\pi A_0^2}{\lambda^2} \text{sinc} \left[\frac{\pi l_e \sin(\delta)}{\lambda} \right] \text{sinc} \left[\frac{2\pi a \sin(\mu)}{\lambda} \right] \quad (7)$$

waarin l_e de effectieve lengte en a de straal van de cilinder met lengte l die als model dient voor het obstakel, de windturbine, en δ en μ de hoeken die respectievelijk de verticale en horizontale afwijkingen aangeven tussen de as van de schaduwkegel en de lijn uit het centrum van de cilinder naar het te detecteren object. Dit is de eerste stap om ook de verzwakking in de schaduwkegel, maar buiten de as ervan, uit te rekenen.

De effectieve lengte van de cilinder hangt af van de belichting door het elevatiepatroon van de radarantenne. Voor een antenne met een bundelbreedte ϵl , geplaatst op een hoogte h , en een bundelas die een opwaartse hoek van ϵ rad maakt met het horizontale vlak wordt deze benaderd met:

$$l_e = l + d \frac{el}{2} - \left[\epsilon d + \frac{d^2}{\frac{4}{3}D} + h \right] \quad (8)$$

Hierin is D de diameter van de aarde die met $4/3$ wordt vermenigvuldigd om rekening te houden met een standaardatmosfeer.

Deze benadering gaat ervan uit dat wordt voldaan aan de verre veldconditie, zodat het faseverloop over l_e beperkt is. Als $(d\lambda)^{1/2} < l_e$ dan gaat dit niet meer op en wordt l_e vervangen door $(d\lambda)^{1/2}$.

De tweede stap om de afstandsreductie naast de kegelas te bepalen is het in rekening brengen van het verschil in fase looptijd tussen het rechtstreekse

pad en het pad via de cilinder, en van het antennepatroon van de radar. Het faseverschil bepaalt immers in welke mate er sprake is van destructieve dan wel constructieve interferentie van de twee velden en ook het verschil in belichting door de antenne van cilinder en object in de schaduwkegel is daarop van invloed. Het antennepatroon wordt daartoe benaderd met:

$$G = G_{\max} \operatorname{sinc} \left[1 - 2 \left[\frac{\text{azimut}}{az} \right] \right] \operatorname{sinc} \left[1 - 2 \left[\frac{\text{elevatie}}{el} \right] \right] \quad (9)$$

waarin az en el de bundelbreedtes in azimut en elevatie voortellen.

CV

Lucas J. van Ewijk is in 1960 geboren te Amsterdam. Na het doorlopen van Gymnasium B heeft hij Technische Natuurkunde gestudeerd aan de toenmalige Technische Hogeschool Delft. De afstudeerrichting was Technische Optica en het afstudeerwerk had betrekking op het berekenen van de voortplanting van licht door geïntegreerde optische structuren. Na het afstuderen en het vervullen van de dienstdienst bij de Koninklijke Marine is hij in dienst getreden bij het Fysisch en Elektronisch Laboratorium TNO te Den Haag, waar hij in de groep "Radar Technologie" werkzaam is. De kern van zijn werkzaamheden heeft te maken met het berekenen van de verstrooiing van elektromagnetische velden aan complexe structuren. De praktische toepassing hiervan is het berekenen van de reflectie van radargolven aan o.a. schepen en vliegtuigen. Zijn professionele interesses gaan uit naar methoden van elektromagnetische berekeningen, met name in vergelijking met metingen.



Stelling

"Niet alle kinderen van de melkboer zijn buitenechtelijk"

proefschrift van Mw. A. A. Bellekom, ORIGINS OF OFFSET IN CONVENTIONAL AND SPINNING-CURRENT HALL PLATES, Delft, 5 oktober 1998