

Evaluatie van de elektromagnetische blootstelling van de mens in een netwerk van drones

Thomas Detemmerman

Promotoren: Prof. dr. ir. Wout Joseph, Prof. dr. ir. Luc Martens

Abstract—

De hedendaagse samenleving vertrouwt meer dan ooit op de aanwezigheid van draadloze netwerken. Dankzij de mobiliteit van drones kan een drone-gestuurd netwerk de nodige mobiele data voorzien indien het bestaande netwerk beschadigd is. Elke drone wordt daarom uitgerust met een femtocell base station. Er is echter een groeiende vrees voor mogelijke gezondheidseffecten veroorzaakt door deze mobiele netwerken. De overheid stelt strikte wetgevingen op waaraan deze mobiele netwerken dienen te voldoen.

Dit onderzoek bekijkt hoe verschillende scenario's het energieverbruik, elektromagnetische blootstelling en specifieke absorptietempo kunnen beïnvloeden. Drie verschillende scenario's zijn gedefinieerd waarbij verschillende vlieghoogtes, aantal drones en populatiegroottes onderzocht worden. Verder is er ook een microstrip patch antenne gedefinieerd en bevestigd op een drone. De antenne zal de communicatie tussen de drone en de gebruikers verzorgen. De performantie van deze antenne zal vergeleken worden met een isotrope antenne. Vervolgens zal het netwerk geoptimaliseerd worden naar elektromagnetische straling van het individu of naar het energieverbruik van het gehele netwerk. Deze twee doelstellingen resulteren in tegenstrijdige vereisten.

Om dit doel te bereiken is de capacity based deployment tool van de onderzoeksgroep WAVES op de Universiteit Gent verder uitgebreid zodoende dat elektromagnetische straling berekend kan worden. Verder is de tool nu ook in staat om te optimaliseren naar elektromagnetische straling of energieverbruik.

Uit de resultaten blijkt dat een microstrip patch antenne met een openingshoek van 90° een geschikt startpunt is voor een antenne. Deze directionele antenne focust de elektromagnetische straling daar waar het nodig is. Ongewenste zijwaartse straling wordt gereduceerd door het design. Het wordt aangeraden om de antenne toe te passen in een netwerk dat energieverbruik minimaliseert omdat hierbij minder drones nodig zijn en daardoor goedkoper is. De optimale vlieghoogte voor het stadscentrum in Gent bevindt zich rond 80 meter. Lagere vlieghoogtes vereisen veel meer drones terwijl hogere vlieghoogtes de elektromagnetische straling laten toenemen. Wanneer deze configuratie toegepast wordt op een netwerk met 224 gebruikers zal de gewogen gemiddelde gebruiker een SAR ondervinden van $0.2 \mu W/kg$ en een downlink elektromagnetische straling van $114 mV/m$. Het netwerk zal hiervoor gemiddeld 96 drones vereisen met een totaal energieverbruik van 69.5 W. Dat is 7.24 W per drone.

Sleutelwoorden—LTE, elektromagnetische blootstelling, Energieverbruik, Drone, Femtocell, Microstrip patch antenne, Stralingspatronen, Specifiek absorptietempo (SAT).

I. Introductie

DE samenleving is meer dan ooit afhankelijk van draadloze communicatie. Een elektronisch apparaat kan op elk gegeven moment in elke willekeurige plaats beroep doen op het draadloze netwerk, gaande van kleine Internet of Things (IoT) apparaten tot volwaardige zelf-rijdende auto's.

Ook in uitzonderlijke en zelfs mogelijks levensbedreigende situaties verwacht de samenleving de aanwezigheid van het mobiele netwerk. Desondanks het feit dat dit netwerk zelf mogelijk beschadigd kan zijn door de situatie. Een mogelijk tijdelijke oplossing om een beschadigd net-

werk bij te staan is met behulp van onbemande vliegtuigen zoals drones. Een base station kan geplaatst worden op een drone en zo efficiënt verplaatst worden naar de nodige locatie.

Deze aanpak is niet alleen handig als het bestaande netwerk beschadigd is maar ook voor een onverwachte toename aan gebruikers. Bijvoorbeeld tijdens de aanslagen op de Brusselse luchthaven zagen alle mobiele operatoren een toename in data verkeer. Sommige operatoren raakten zodanig verzadigd dat ze beslisten om de elektromagnetische straling te laten toenemen boven de opgelegde limieten zodat toch iedereen behandeld kon worden [1].

De elektromagnetische straling die vrijkomt bij netwerken kan echter niet met onachtzaamheid behandeld worden. Onderzoek toont aan dat buitensporige elektromagnetische straling verscheidene biologische neveneffecten kan veroorzaken [2], [3]. Het is dus duidelijk dat elektromagnetische straling een sleutelrol speelt bij het ontwikkelen van een met drones geholpen netwerk waarbij de wetgeving nauwkeurig nageleefd dient te worden.

Drone-gestuurde netwerken kunnen dankzij hun mobiliteit eenvoudig verplaatst worden. Verschillende onderzoeken tonen aan hoe deze netwerken geoptimaliseerd kunnen worden zodat bepaalde doelstellingen zoals minimaal energieverbruik bereikt kunnen worden.

Niettemin is er zeer beperkt onderzoek gedaan waarbij een drone-gestuurd netwerk wordt geoptimaliseerd naar elektromagnetische straling. Verscheidene publicaties bespreken hoe elektromagnetische straling berekend kan worden maar overwegen zelden alle verschillende bronnen van straling.

Dit onderzoek stelt een methode voor waarbij rekening gehouden wordt met elektromagnetische straling en energieverbruik voor alle bronnen in een mobiel netwerk, zijnde: de gebruiker zijn eigen mobiel apparaat, de base station dat deze gebruiker aan het behandelen is, alle andere mobiele apparaten en alle andere base stations die andere gebruikers behandelen. Op deze manier kan de bijdrage in elektromagnetische straling van elke bron duidelijk geïdentificeerd worden.

Het gedrag van de elektromagnetische straling en het energieverbruik zullen geanalyseerd worden door de tool toe te passen op verschillende scenario's door gebruik te maken van verschillende soorten antennes, vlieghoogtes en populatiegroottes. Waarden zoals Specific Absorptietempo (SAT), elektromagnetische straling en energieverbruik zullen inzicht geven in hoe het netwerk reageert op deze veranderende scenario's en hoe het netwerk ernaar geoptima-

liseerd kan worden.

Om dit onderzoek mogelijk te maken zal een bestaande deployment tool, ontwikkeld door de onderzoeksgroep WAVES van de universiteit van Gent, uitgebreid worden. Deze tool beschrijft een volledig geconfigureerd netwerk van drones wat een geschikt startpunt is voor dit onderzoek.

II. State of the Art

A. Elektromagnetische Straling

Personen in een mobiel netwerk worden blootgesteld aan verscheidene bronnen van elektromagnetische straling, uitgedrukt in V/m . Eenmaal deze elektromagnetische straling geabsorbeerd wordt door het menselijk lichaam spreken we van het specifieke absorptietempo (SAT) (dat uitgedrukt wordt in W/kg). De International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) heeft geconcludeerd dat het drempeleffectwaarde voor SAR_{10g}^{wb} zich bevindt op 4 W/kg wat inhoudt dat elk hoger absorptietempo de thermoregulerende capaciteit van de mens zou overstijgen [4], [5]. Al deze waarden zijn onderworpen aan limieten opgelegd door de overheid. Dit onderzoek vindt plaats in Gent, een Vlaamse stad in België, waarbij voor het 2.6 GHz spectrum een individuele zendmast is gelimiteerd tot 4.5 V/m en de totale elektrische veldsterkte voor elk punt niet meer dan 31 V/m mag bedragen. [4], [6]. De maximale SAT voor het volledige lichaam komende van een mobiel apparaat verspreid over een 10 g tissue (SAR_{10g}) is beperkt tot 0.08 W/kg [7], [4], [8]. De Federal Communications Commission (FCC) bepaalt de limieten voor de Verenigde Staten (VS) en deze zijn gebaseerd op de Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Std C95.1-1999 [9], [10] dewelke gebruik maken van een 1 g tissue. De SAR_{1g}^{wb} van het mobiele apparaat mag de 1.6 W/kg niet overschrijden. Een overzicht wordt gegeven in tabel I.

Instelling	Description	Value	Units
ICNIRP	SAR_{10g}^{wb}	4	W/kg
BE	SAR_{10g}^{wb} van base stations	0.08	W/kg
BE	SAR_{10g}^{hoofd} for UE	2	W/kg
VS	SAR_{1g}^{hoofd} for UE	1.6	W/kg

TABEL I: Overview of the different SAT limitations.

Verschillende onderzoeken berekenen de elektromagnetische veldsterkte van verschillende bronnen [11], [12], [13], [14] waarbij sommigen de uplink (UL) elektromagnetische veldsterkte converteren naar lokale SAT voor het hoofd en torso [13], [14]. Met de naderende 5G technologie werd [15] gepubliceerd waarbij beschreven wordt hoe deze lokale SAT-waarden van alle verschillende bronnen berekend kunnen worden en bij elkaar opgeteld worden. Uiteindelijk beschrijft [16] hoe de elektromagnetische veldsterkte omgezet kan worden naar SAT-waarden voor het volledige lichaam.

In een realistisch netwerk kunnen sommige gebruikers telefoneren terwijl anderen andere vormen van telecommunicatie gebruiken zoals surfen op het internet. Aangezien

de positie van het mobiel apparaat tegenover zijn gebruiker niet gekend is, is het belangrijk dat de SAT-waarden berekend worden in functie van het volledige lichaam.

B. Geoptimaliseerde drone-gestuurde netwerken

Drones kennen verschillende toepassingen. Ze werden oorspronkelijk voornamelijk gebruikt door het leger waarbij ze dienst doen als camera ondersteuning of om aanvalen uit te voeren zonder piloten in gevaar te brengen [17]. Deze drones zijn de laatste jaren in prijs gedaald waardoor ze beter toegankelijk worden voor het algemene publiek. Hierdoor is het onderzoek naar nieuwe toepassingen ervan sterk toegenomen.

Een drone uitgerust met een femtocell base station wordt een Unmanned Aerial Base Station (UABS) genoemd en geniet verschillende voordelen zoals mobiliteit en snelle inzetbaarheid. Desondanks zijn er ook verschillende nadelen zoals het beperkte gewicht dat een drone kan dragen en de schaarse energievoorziening.

Kawamoto et al. introduceert in [18] een WiFi netwerk met behulp van drones waarbij rekening gehouden wordt met de richting van de geplaatste antennes op de drone. Gangula et al. illustreert in [19] hoe drones gebruikt kunnen worden voor Long-Term Evolution (LTE) en Zeng et al. presenteert in [17] een handleiding waarbij uitdagingen zoals energieverbruik, mobiliteit en de richting van de antenne voor een 5G netwerk besproken worden. In [20] ontwikkelt Deruyck et al. een deployment tool voor een drone gestuurd netwerk voor rampsituaties waarbij een ideale vlieghoogte van 100 meter aangeraden wordt. Dit wordt verder uitgebreid in [21] waarbij ook rekening gehouden wordt met direct-link backhaul connecties waarbij een ietwat lagere vlieghoogte van 80 meter bekomen wordt.

Mozaffari et al. voorziet in [22] richtlijnen hoe een drone-gestuurd netwerk geoptimaliseerd en geanalyseerd kan worden. Eén onderzoeksgebied dat uitgebreid onderzocht wordt, is het optimaliseren van de locaties waar drones zich moeten positioneren. Deze algoritmen trachten bepaalde doelstellingen zoals minimaal energieverbruik of kortste vliegafstand te bereiken [23], [24], [25], [26]. Deze optimalisatie kan gebeuren door verschillende implementaties waaronder exacte algoritmen of machinaal leren [22], [27].

Onderzoek waarbij de elektromagnetische straling gelimiteerd wordt is echter beperkt. Deruyck et al. bespreekt in [12] hoe een conventioneel mobiel netwerk geoptimaliseerd kan worden zodoende dat het energieverbruik van het volledige netwerk minimaal wordt of de elektromagnetische blootstelling van een individu geminimaliseerd wordt. Echter, onderzoek waarbij een drone-gestuurd netwerk geoptimaliseerd wordt naar elektromagnetische straling is door de auteur niet gekend.

C. Technologieën

Voor het ontwikkelen van het netwerk zullen de meer robuuste drones uit [20] gebruikt worden (details in tabel III). De gekoppelde antennes zullen opereren in het 2.6 GHz spectrum. Aangezien het aangenomen wordt dat

de gebruikers een voortdurende blootstelling van elektromagnetische straling ondervinden, zonder onderbrekingen, wordt frequency division duplexing gebruikt.

De antenne op de drone zal dienst doen als gateway tussen de mobiele apparaten op de grond en het backbone netwerk. Bepalen welke antenne gebruikt moet worden en hoe deze vervolgens het beste gepositioneerd kan worden brengt verschillende uitdagingen met zich mee. Het stralingspatroon van de antenne kan beïnvloed worden door de drone [28]. Maar ook het feit dat deze drones boven de gebruikers zullen vliegen zorgt er voor dat 2D modellering onvoldoende is. Een 3D model waarbij rekening gehouden wordt met zowel horizontale als verticale richting zal een vereiste vormen [17].

Het eenvoudigste stralingspatroon is een hypothetische isotrope antenne die straalt met gelijke hoeveelheid in elke richting. Een antenne die gelijkwaardig straalt over een specifiek vlak wordt een omnidirectionele antenne genoemd [17]. Hiervan bestaan verschillende soorten voor te bevestigen op drones zoals monopoolantennes, dipoolantennes en vleugel antennes [29], [30], [31], [32]. Een andere vorm van antenne zijn directionele antennes die energie besparen door de elektromagnetische straling te focussen daar waar het nodig is. Eén soort hiervan die uitgebreid onderzocht is in verscheidene antenne-arrays zijn de microstrip antennes [33], [34], [35]. Deze bieden verschillende voordelen ten opzichte van meer traditionele antennes zoals het beperkte gewicht, lage productiekosten en aerodynamica [36], [37].

Een microstrip antenne is opgebouwd uit een grondplaat en een stralingsplaat met daartussen een diëlectrisch substraat. Verscheidene variaties bestaan zoals microstrip patch antennes, microstrip slot antennes en geprinte dipool antennes die allemaal gelijken karakteristieken hebben [36], [37]. Ze zijn allemaal dun, ondersteunen dubbele frequenties en hebben allemaal het nadeel dat ze interferentie kunnen veroorzaken op frequenties buiten het bedoelde spectrum. De microstrip patch en slot antenne ondersteunen beiden circulaire en lineaire polarisatie terwijl de geprinte dipool antenne enkel lineaire polarisatie ondersteunt. Verder is de microstrip patch antenne het eenvoudigste te produceren ten opzichte van de andere overwogen antennes [36]. Een voorbeeld wordt gegeven in fig. 1.

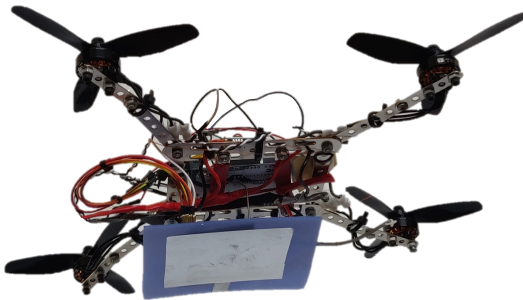


Fig. 1: Afbeelding van een microstrip patch antenne bevestigd aan de onderkant van een drone.

Deze foto toont een microstrip patch antenne die bestaat uit aluminium en bevestigd is op een substraat van Teflon. De microstrip patch antenne wijst naar de grond aangezien de drone boven de mensen zal vliegen.

III. Methodologie

De eerste subsectie legt uit hoe elektromagnetische straling berekend kan worden voor elke bron en hoe deze om te zetten naar SAT. De tweede subsectie geeft een overzicht van hoe een microstrip patch antenne ontwikkeld kan worden. De derde subsectie bespreekt hoe het netwerk geoptimaliseerd kan worden en als laatste wordt het algoritme uitgelegd.

A. Elektromagnetische Straling

A.1 Totale elektromagnetische Straling

De totale SAT voor het volledige lichaam ($SAT_{10g}^{wb,totaal}$) van een individu kan berekend worden als een eenvoudige som van de SAT-waarden van de individuele bronnen. Dit is gebaseerd op de formule uit [15] die aanneemt dat het mobiele apparaat tegen het oor van zijn gebruiker gehouden wordt. Hierdoor worden alle waarden in locale SAT-waarden voor het hoofd uitgedrukt. In dit netwerk is de plaats van het mobiele apparaat echter niet gekend wat zou leiden tot onjuiste conclusies. Bijgevolg zal alles uitgedrukt worden in functie van het volledige lichaam.

$$SAT_{10g}^{wb,totaal} = SAT_{10g}^{wb,myUE} + SAT_{10g}^{wb,myUABS} + SAT_{10g}^{wb,otherUE} + SAT_{10g}^{wb,otherUABSs} \quad (1)$$

In bovenstaande formule staat *wb* voor whole body ofwel het volledige lichaam en *UE* voor User Equipment ofwel het mobiele apparaat op de grond. De eerste parameter, $SAT_{10g}^{wb,myUE}$, duidt de geabsorbeerde elektromagnetische straling aan komende van de gebruiker zijn eigen apparaat. Ondanks het feit dat de UL straling bedoeld is voor de UABS die deze gebruiker behandelt, wordt een deel van deze straling ook geabsorbeerd door de gebruiker zelf. Dit komt door de omnidirectionele antenne die door het mobiele apparaat gebruikt wordt. Een tweede parameter is $SAT_{10g}^{wb,myUABS}$ die de straling aanduidt veroorzaakt door downlink (DL) dataverkeer, komende van de UABS die deze gebruiker behandelt. Als derde parameter hebben we $SAT_{10g}^{wb,otherUE}$ die de straling aanduidt veroorzaakt door andere gebruikers hun mobiel apparaat. Als laatste stelt $SAT_{10g}^{wb,otherUABSs}$ de DL straling voor komende van alle UABSs die andere gebruikers behandelen. Een illustratie is te vinden in fig. 2 waarbij de groene pijl straling in het nabije veld voorstelt en alle andere pijlen straling in het verre veld voorstellen.

A.2 elektromagnetische straling van een individuele bron

Om de totale elektromagnetische straling te vinden waarvan de gebruiker is blootgesteld, dient eerst de straling van elke individuele bron berekend te worden. Dit wordt gedaan met formule 2 en is van toepassing voor alle bronnen in het verre veld. Dit houdt in: alle UABS's en alle mobiele

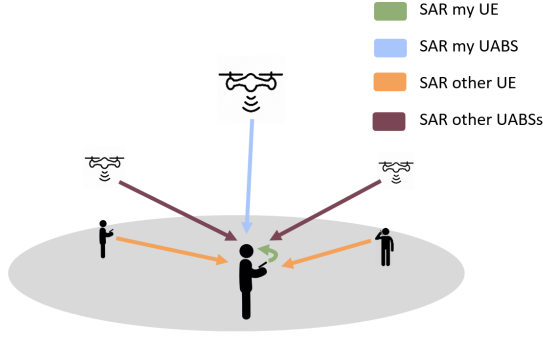


Fig. 2: Deze illustratie toont hoe de gemiddelde gebruiker (hier getoond in het midden) beïnvloed wordt door verschillende bronnen van elektromagnetische straling.

apparaten die niet tot de gebruiker behoren. De elektromagnetische veldsterkte E voor het individu u komende van een bron i wordt berekend met formule 2.

$$E_i(u)[V/m] = 10^{\frac{ES(u)[dBm] - 43.15 + 20 \cdot \log(f[MHz]) - PL(u)[dB]}{20}} \quad (2)$$

Het berekenen van de effectieve straling (ES) voor een gebruiker u vereist eerst om de equivalent isotropic radiation power (EIRP) te hebben berekend [11], [12]. Dit kan bekomen worden door het zendvermogen P_t op te tellen met de zendversterking G_t en het kabelverlies L_t ervan af te trekken. Deze formule dient echter uitgebreid te worden zodoende dat er rekening gehouden wordt met signaalverzwakking wat afhankelijk is van het gebruikte stralingspatronen. Deze waarde hangt af van de hoek tussen de gebruiker en de richting waarnaar de antenne wijst. De signaalverzwakking bij een isotrope antenne is altijd nul ongeacht de hoek. Dit leidt tot de volgende formule:

$$RRP[dBm] = P_t[dBm] + G_t[dBi] - L_t[dB] - \text{attenuation}(u)[dB] \quad (3)$$

De gebruikte frequentie f in formule 2 is uitgedrukt in MHz. Aangezien LTE gebruikt wordt, zal deze waarde 2600 MHz bevatten.

Als laatste dient formule 2 ook het padverlies PL te kennen. Een geschikt propagatie model dient gekozen te worden. Hier wordt geopteerd voor het Walfish-Ikegami model aangezien die goed presteert voor femtocell netwerken in stedelijke gebieden [20].

A.3 Samenvoegen van meerdere bronnen

De totale elektromagnetische straling E_{tot} in een bepaald punt, komende van alle verschillende bronnen, kan berekend worden door formule 4. Hierin staat E_i voor de elektromagnetische veldsterkte voor dat punt komende van bron i en n staat voor alle bronnen in het verre veld van een bepaalde categorie wat hier ofwel UABS's of mobiele apparaten van andere personen zijn. E_{tot} zal berekend worden

in elk punt waar er zich een gebruiker bevindt.

$$E_{tot}[V/m] = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i[V/m])^2} \quad (4)$$

A.4 Omzetten van elektromagnetische veldsterkte naar SAT

Formule 1 verwacht dat de SAT waarden in functie van het volledige lichaam uitgedrukt zijn. Om de elektromagnetische veldsterkte te kunnen omzetten naar deze SAT-waarden dient er een onderscheid gemaakt te worden tussen bronnen in het nabije veld ($SAR^{wb,nf}$) en het verre veld ($SAR^{wb,ff}$). $SAR_{10g}^{wb,myUE}$ is een bron waarbij de gebruiker zich in het nabije veld bevindt terwijl de gebruiker zich voor alle andere bronnen in het verre veld bevindt.

Het omzetten van deze waarden gebeurt door middel van een conversie constante die gebaseerd is op Duke van de Virtual Family. Duke is een 34 jarige man met een gewicht van 72 kg, een lengte van 1.74 m en een BMI van 23.1 kg/m [16]. Onderzoek toont aan dat de conversie constante voor WiFi in het verre veld $0.0028 \frac{W/kg}{W/m^2}$ bedraagt en $0.0070 \frac{W/kg}{W}$ in het nabije veld [16]. WiFi maakt gebruik van het 2400 MHz spectrum wat heel dicht bij LTE is met 2600 MHz. Daarom wordt in [16] aangenomen dat de conversie constante ook van toepassing is voor LTE. Het berekenen van SAT in het verre veld wordt als volgt gedaan:

$$S[W/m^2] = \frac{(E_{tot}[V/m])^2}{337} \quad (5)$$

$$SAR_{10g}^{wb,ff}[W/kg] = S[W/m^2] * 0.0028 \left[\frac{W/kg}{W/m^2} \right] \quad (6)$$

De constante in vergelijking 6 zet de vermogensdichtheid S om naar de verwachte $SAR_{10g}^{ff,wb}$. Om dit mogelijk te maken moet het resultaat van formule 4 eerst nog omgezet worden naar vermogensdichtheid met behulp van formule 5.

De SAT die veroorzaakt wordt door het mobiel apparaat in het nabije veld kan gevonden worden door het zendvermogen P_{tx} van het apparaat te vermenigvuldigen met de conversie constante voor het nabije veld en is berekend als volgt:

$$SAR_{10g}^{wb,nf}[W/kg] = 0.0070 \left[\frac{W/kg}{W} \right] * P_{tx}[W] \quad (7)$$

De energie die door het mobiele apparaat wordt gebruikt kan berekend worden met formule 8 [16].

$$P_{tx}^{UE} = \min\{P_{max}[dBm], P_{push}[dBm] + \alpha * PL[dB] + 10\log(M) + \sigma\} \quad (8)$$

Hierbij staat P_{max} voor het maximaal toegestane zendvermogen van het mobiele apparaat wat voor LTE 23 dBm bedraagt. Dit is echter in het slechtste geval. De effectieve waarde ligt dankzij power control doorgaans lager. P_{push} is de minimale energie vereist door de UABS en bedraagt

hier -120 dBm. α is de compensatiefactor voor het pad-verlies en is gelijk aan één wat hier volledige compensatie betekent [38], [39]. Voor het 20 MHz kanaal in deze paper zal M gelijk zijn aan 100 en zal σ , als correctiefactor, nul bedragen [16], [38].

B. Microstrip Patch Antenne

Een microstrip patch antenne is gekozen vanwege zijn eenvoudige productieproces maar voornamelijk vanwege het lage gewicht en aerodynamica wat heel voordelig is wanneer het aan een drone gekoppeld wordt [36].

De dimensies van de antenne hangen af van de gebruikte frequentie en de eigenschappen van het diëlectrisch substraat. De antenne zal opereren met een frequentie f_0 van 2.6 GHz. Elk substraat heeft een diëlectrische constante ϵ_r die de doorlaatbaarheid van het substraat aanduidt en hangt af van het gebruikte materiaal. Substraten met een hoge diëlectrische constante en kleine hoogte zullen de dimensies van de antenne reduceren terwijl een lager diëlectrische constante met een hogere hoogte de prestatie van de antenne zullen bevorderen [37], [40]. Voor dit onderzoek is glas gekozen vanwege zijn hogere diëlectrische constante $\epsilon_r = 4.4$ ten opzichte van andere materialen zoals Teflon met een diëlectrische constante van $\epsilon_r = 2.2$ [37]. Glas met een hoogte van 2.87 mm zal de dimensies van de volledige antenne oppervlakte verminderen wat voordelig is bij de beperkte ruimte die beschikbaar is op een drone.

Beschrijving	Symbool	Waarde
Middenfrequentie	f_0	2600 MHz
Diëlectrische constante	ϵ_r	4.4
Hoogte van het substraat	h	0.00287 m

TABEL II: Overzicht van de configuratie parameters

De dimensies van de stralingsplaat kunnen berekend worden met de formules uit [37], [40]. Dit leidt tot een stralingsplaat van 35.09 mm bij 26.55 mm en een grondplaat van minstens 52.40 mm bij 43.80 mm. De resulterende microstrip patch antenne is geïllustreerd in fig. 3 en zal resulteren in het stralingspatroon getekend in fig. 4.

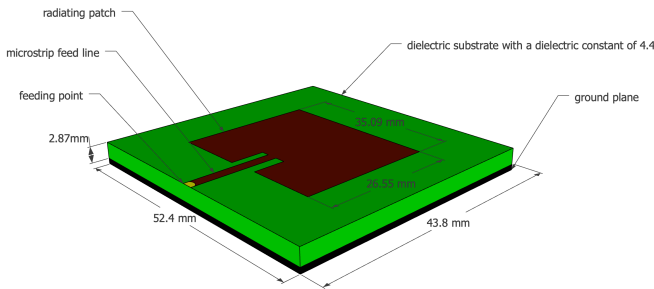


Fig. 3: Schema van de microstrip patch antenne.

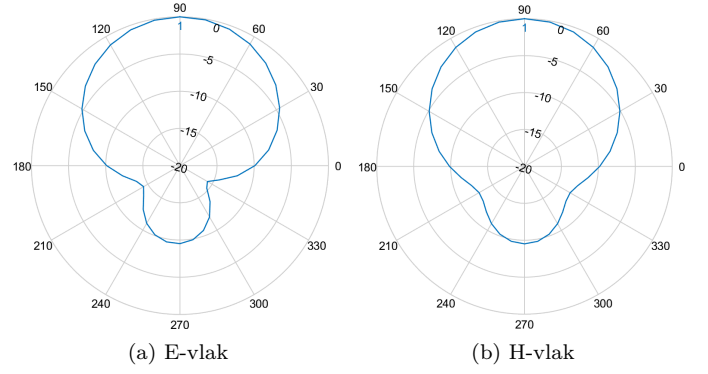


Fig. 4: Stralingspatroon gegenereerd door de microstrip patch antenne.

C. Optimaliseren van het netwerk

Deruyck et al. bespreekt in [12] hoe een traditioneel mobiel netwerk geoptimaliseerd kan worden naar elektromagnetische straling of energieconsumptie. Hoewel een toenemend zendvermogen wel degelijk resulteert in hogere elektromagnetische veldsterkte is deze regel niet van toepassing indien we het energieverbruik bekijken over het hele netwerk heen. De auteurs van [12] tonen een omgekeerd equivalente relatie aan. De reden hierachter is dat het vaak minder energie kost om de elektromagnetische straling van een reeds actieve base station verder te laten toenemen in plaats van een nieuwe base station te activeren. Dit leidt tot de fitness functie in vergelijking 9 en is gebaseerd op [12].

$$f = w * \left(1 - \frac{E_m}{E_{max}}\right) + (1 - w) * \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right) * 100 \quad (9)$$

Formule 9 geeft een score terug dat aanduidt hoe goed het netwerk preseteert. w is de belangrijkheidsfactor die loopt van 0 tot 1, grenzen inbegrepen. Een w gelijk aan 0 betekent dat elektromagnetische straling niet belangrijk is. Een dergelijk netwerk wordt een power consumption optimized (PwrC. Opt.) netwerk genoemd. Aan de andere kant, een w gelijk aan 1 impliceert dat het minimaliseren van elektromagnetische blootstelling top prioriteit is en zal bijgevolg resulteren in een exposure optimized (Exp. Opt.) netwerk. P_{max} is het energieverbruik van alle UABS's op maximaal zendvermogen, ongeacht of ze op non-actief staan of niet. P stelt de effectieve verbruikte energie van het huidig ontwikkelde netwerk voor. E_m is de elektromagnetische straling van de gewogen gemiddelde gebruiker van het huidig ontwikkelde netwerk en E_{max} is dezelfde waarde maar met alle UABS's op maximaal zendvermogen.

Bij het optimaliseren van het netwerk is het niet enkel belangrijk om de gemiddelde gebruiker te overwegen maar ook het limiteren van extrema [12]. Daarom wordt er gebruik gemaakt van het gewogen gemiddelde waarbij niet enkel rekening gehouden wordt met de mediaan maar ook met het 95^{ste} percentiel. Dit leidt tot formule 10 waarbij

w_1 en w_2 de gewichten zijn van respectievelijk de mediaan en het 95^{ste} percentiel. Aangezien verondersteld wordt dat beide waarden een gelijkwaardige rol spelen zullen beiden een gewicht van 0.5 krijgen.

$$E_m = \frac{w_1 * E_{50} + w_2 * E_{95}}{w_1 + w_2} \quad (10)$$

D. Simulatie Tool

D.1 Hoofdalgoritme

In eerste instantie dient een beschrijving van het gebied voorzien te worden. Dit wordt verwezenlijkt met behulp van zogenaamde shape-bestanden. Deze bestanden bevatten een volledige beschrijving van de vorm van elk gebouw. Vervolgens worden gebruikers uniform verdeeld over het gebied en zal er een tijdelijke UABS geplaatst worden boven elke gebruiker. Nu is het aan het beslissingsalgoritme om te bepalen welke UABS's effectief zullen blijven en hoe hoog het zendvermogen van elke UABS zal zijn. Eens het beslissingsalgoritme voltooid is zal de tool controleren of het nummer van online drones niet meer is dan de capaciteit van de stockageruimte toelaat. Indien dit wel het geval is zullen drones offline gehaald worden, beginnend bij drones die het minste personen behandelen.

D.2 Beslissingsalgoritme

Het oplossen van het netwerk is de verantwoordelijkheid van het beslissingsalgoritme en start met het berekenen van het padverlies tussen alle gebruikers en tussen gebruikers en drones. Hierna doorloopt het algoritme elke gebruiker waarbij getracht wordt deze te verbinden met elke mogelijke UABS. Deze verbinding is niet altijd mogelijk omdat een UABS al reeds verzadigd kan zijn met andere gebruikers of de UABS is zo ver verwijderd van deze gebruiker dat de UABS de maximale toegestane zendvermogen zou overschreiden. Indien een verbinding toch mogelijk is, zal de gebruiker met deze UABS verbonden worden en zal een score toegekend worden met behulp van de fitness functie uit vergelijking 9. Dit proces wordt herhaald voor elke UABS. Uitsluitend de verbinding die resulteert in de beste score voor het volledige netwerk zal gebruikt worden. Op deze manier zal elke gebruiker de beste oplossing krijgen vanuit de huidige toestand van het netwerk. Met andere woorden, elke gebruiker wordt geoptimaliseerd en niet het netwerk zelf. Er wordt echter wel aangenomen dat op deze manier het gemiddelde netwerk zelf ook optimaal zal zijn. Wanneer de laatste gebruiker behandeld is geweest, bekomen we een volledig netwerk voor een ongelimiteerd aantal drones. Het netwerk wordt vervolgens terug aan het hoofdalgoritme gegeven voor eventuele verdere afhandeling. Een stroomdiagram van dit algoritme is gegeven in fig. 5.

IV. Scenario's

De standaard configuratie is gegeven in tabel III en is van toepassing in elk scenario tenzij anders vermeld door de restricties van dat specifieke scenario.

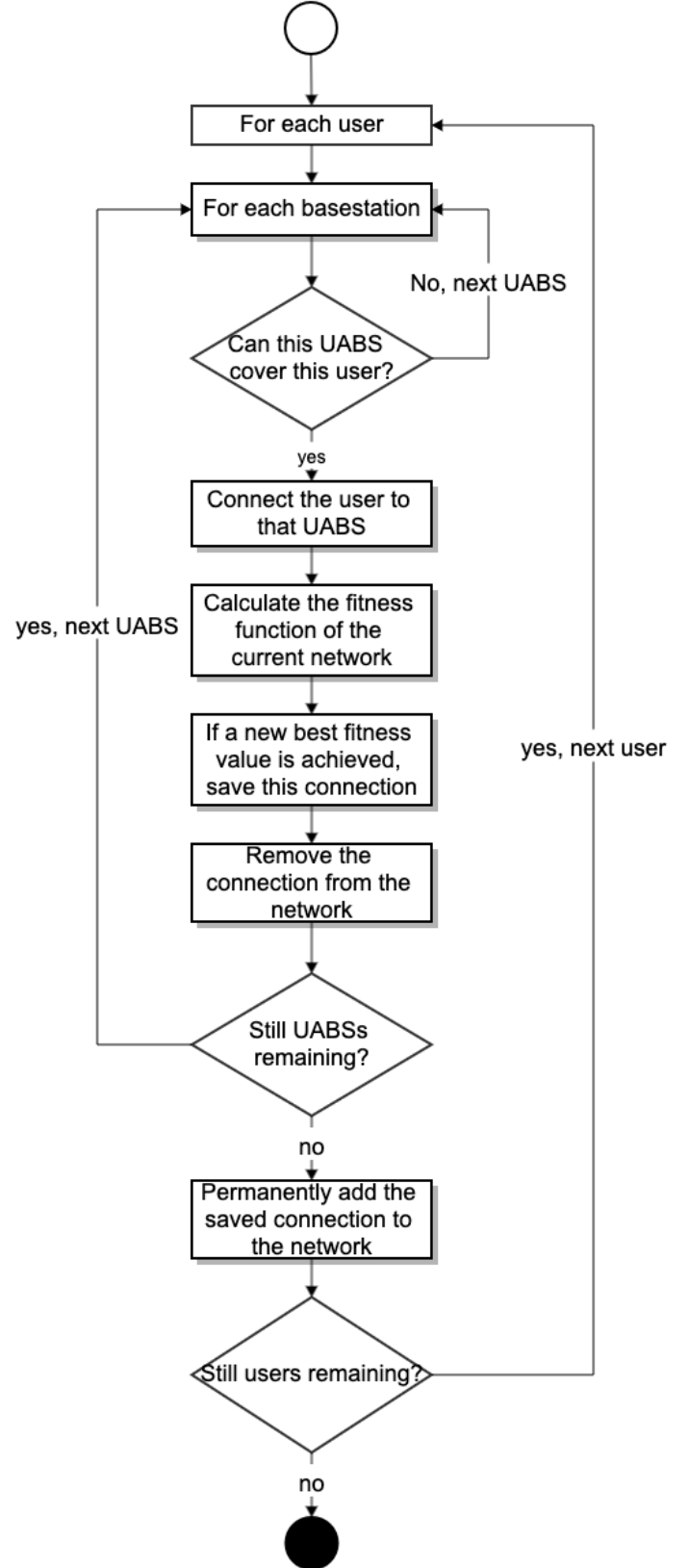


Fig. 5: Flowchart of the decision algorithm.

Mobiel netwerk	
Technologie	LTE
Frequentie	2.6 GHz
Power offset (P_{pusch})	-120 dBm
Compensatie voor padverlies (α)	1
Correctie waarde	0 dBm
Aantal resource blokken	100
Drone	
Energie van de drone	13.0 A
Gemiddelde snelheid	12.0 m/s
Gemiddeld energieverbruik	17.33 Ah
Voltage batterij	22.2 V
Femtocell antenna	
Maximum P_{tx}	33 dBm
Richting van de antenne	neerwaarts
Zendversterking	4 dBm
Kabelverlies	2 dBm
Implementatieverlies	0 dBm
Stralingspatroon	EIRP or microstrip patch
Vlieghoogte	100m
UE Antenna	
Hoogte	1.5m vanaf de vloer
Zendversterking	0 dBm
Kabelverlies	0 dBm
Stralingspatroon	EIRP
Aantal aanwezig in het netwerk	224

TABEL III: Overzicht van de waarden voor een standaard configuratie.

Drie scenario's zullen onderzocht worden. Het eerste zal één enkele gebruiker en één enkele drone overwegen voor het gehele netwerk. De SAT, elektromagnetische straling, energieverbruik en het nodige zendvermogen van de antenne zullen onderzocht worden voor verschillende vlieghoogtes.

Bij het tweede scenario zal het netwerk uitgebreid worden met meerdere gebruikers maar er zal nog steeds uitsluitend één drone aanwezig zijn. De eerste onderzochte parameter is een variërende vlieghoogte gaande van 20 meter tot 200 meter. Hierbij zullen 224 gebruikers uniform verdeeld worden over het centrum van Gent. Dit is de gemiddelde populatiegrootte op een werkdag om 17 uur in Gent [20]. De tweede parameter is een variërende populatie lopend van 50 tot 600 gebruikers. Hierbij zal de vlieghoogte vastgezet worden op 100 meter [20]. Het energieverbruik, elektromagnetische straling en SAT zullen onderzocht worden.

Een derde scenario is sterk gelijkend aan het vorige. Dezelfde twee parameters zullen onderzocht worden maar nu voor een onbeperkt aantal UABS's.

Vier configuraties zijn mogelijk voor elke onderzochte parameter in elk scenario. Er zijn namelijk twee antennes, een isotrope antenne en een microstrip patch antenne die beide kunnen opereren in een PwrC. Opt. netwerk en een Exp. Opt. netwerk. Dit maakt een totaal van 4 configuraties.

Een overzicht is gegeven in fig. 6.

Het is belangrijk om op te merken dat alle meetwaarden strikt gelimiteerd zijn tot de hiervoor vernoemde bronnen en bijgevolg enkel dataverkeer overwegen tussen de gebruiker zijn apparaat en de UABS. Andere bronnen zoals connecties naar het backhaul netwerk of andere technologieën zullen niet overwogen worden.

		Optimization strategy	
		Exposure optimized	Power consumption optimized
Antenna type	Equivalent isotropic radiator	EIRP Exp Opt	EIRP PwrC Opt
	Microstrip patch antenna	Microstrip Exp Opt	Microstrip PwrC Opt

Fig. 6: Matrix met de vier mogelijke configuraties.

V. Resultaten

Vier configuraties zullen overwogen worden tijdens het evalueren van twee parameters, zijnde populatiegrootte en vlieghoogte. Deze parameters zullen onderzocht worden in drie scenario's door het gedrag van het energieverbruik, elektromagnetische straling en SAT-waarden te monitoren. De elektromagnetische straling en SAT zullen genomen worden van de gewogen gemiddelde gebruiker met behulp van vergelijking 10 waarbij w_1 en w_2 gelijk gesteld zijn aan 50%. Elk resultaat wordt uitgemiddeld over 20 simulaties.

A. Eén gebruiker en één UABS

Fig. 7 toont aan dat voor een variabele vlieghoogte, een logaritmische relatie bestaat tussen de P_{tx} en de vlieghoogte. Dit komt door de logaritmische schaal waarin de decibels van de P_{tx} in zijn uitgedrukt. Elke keer dat de vlieghoogte te hoog wordt, neemt de P_{tx} met één dBm toe. Voor een standaard configuratie met een maximum P_{tx} van 33 dBm en een line of sight (LoS) verbinding kan een UABS tot 387 m hoogte vliegen zonder het verliezen van deze verbinding.

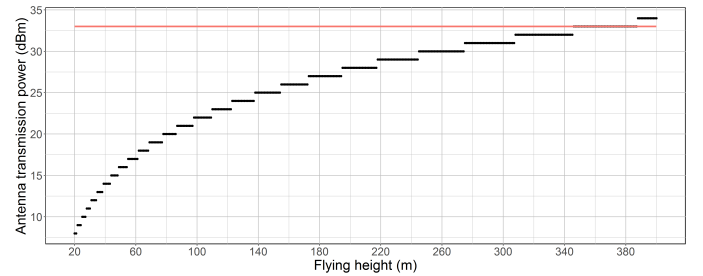


Fig. 7: Het vereiste zendvermogen om de gebruiker op de grond te bereiken. Gemeten op verschillende vlieghoogtes.

Dit scenario is onderzocht voor een microstrip patch antenne die energieverbruik minimaliseert. De gekozen optimalisatie maakt echter niet uit aangezien er uitsluitend

één UABS beschikbaar is. Het beslissingsalgoritme bepaalt welke gebruiker met welke UABS verbonden wordt. Aangezien er maar een UABS beschikbaar is, zullen beide optimalisatie technieken gelijkaardig werken. Verder zal de gebruikte antenne ook geen verschil maken. De gebruiker zal zich namelijk boor beide antennes in de hoofdstraal van het stralingspatroon bevinden waar voor beide antennes geen verzwakking van het signaal is.

Tijdens het onderzoeken van verschillende vlieghoogtes stellen de resultaten vast dat UL straling exponentieel toeneemt terwijl de DL straling constant blijft rond 10 nW/kg zoals te zien is in fig. 8. De reden dat de DL straling constant blijft is vanwege power control die ervoor zorgt dat niet meer energie gebruikt wordt dan strikt noodzakelijk. Daardoor kan bevestigd worden dat de elektromagnetische straling een constante fractie is van energie en afstand. De UL straling start laag met 1 nW/kg maar steekt de DL straling voorbij rond de 80 meter.

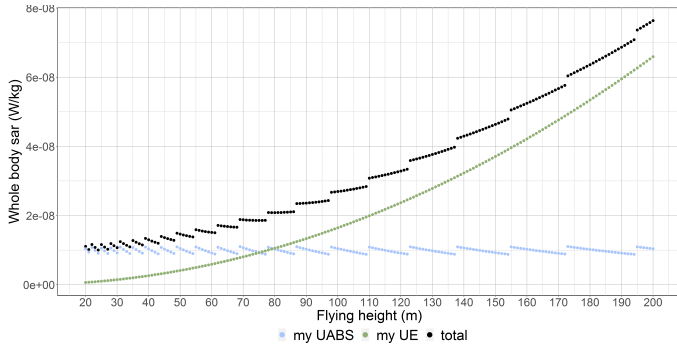


Fig. 8: Deze figuur toont hoe SAT-waarden van verschillende bronnen beïnvloed worden door een variabele vlieghoogte.

B. Toenemende populatie met één UABS

B.1 Variabel vlieghoogte

Een PwrC. Opt. heeft een hogere elektromagnetische blootstelling in vergelijking met een Exp. Opt. netwerk; een fenomeen dat reeds werd vastgesteld bij [12]. Uit de resultaten van dit scenario blijkt echter dat een PwrC. Opt. niet noodzakelijk resulteert in een lager energieverbruik. Zo blijkt dat bij 100 m in een EIRP Exp. Opt. netwerk de elektromagnetische straling van de gewogen gemiddelde gebruiker 1.5 mV/m minder zal zijn maar dat het energieverbruik met 20 mW zal toenemen. Om dit te verstaan dient het algoritme eerst uitgelegd te worden. Een PwrC. Opt. netwerk zal resulteren in enkele UABS's met een hoog energieverbruik omdat het toenemen van de P_{tx} van de antenne minder energie kost dan het activeren van een nieuwe UABS. Op dezelfde manier zal een Exp. Opt. netwerk meer UABS's gebruiken met een laag energie verbruik waardoor ook de elektromagnetische straling minder zal zijn. Wanneer slechts een beperkt aantal UABS's beschikbaar is, zoals maar één in dit netwerk, zullen enkel de UABS's gebruikt worden die de meeste mensen behandelen. Aangezien het energieverbruik van een individuele

UABS hoger is in een PwrC. Opt. netwerk en er uitsluitend één UABS beschikbaar is in elke configuratie, zal het energieverbruik in een PwrC. Opt. netwerk vaak hoger liggen.

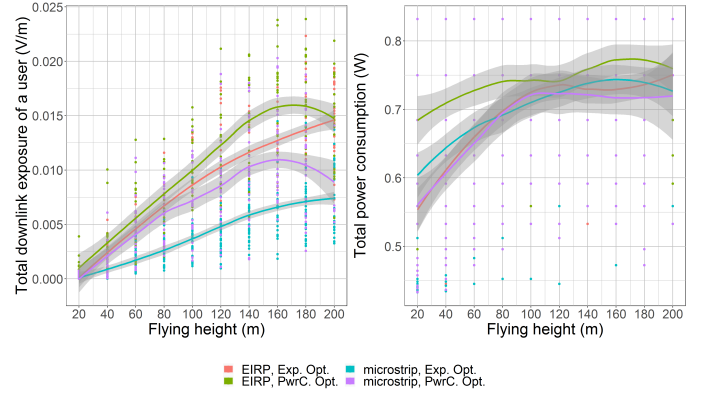


Fig. 9: Fig. (a) toont hoe de vlieghoogte beïnvloed wordt door DL elektromagnetische straling van de gewogen gemiddelde gebruiker en fig. (b) toont het En energieverbruik van het volledige netwerk wanneer een enkele drone beschikbaar is.

Verder toont fig. 9 hoe de elektromagnetische blootstelling toeneemt wanneer de vlieghoogte hoger wordt. Dit komt omdat de waarschijnlijkheid op een non line of sight (NLoS) afneemt. Dit leidt eveneens ook tot een hogere dekkingsgraad. Wanneer de vlieghoogte toeneemt van 20 tot 100 m zal de dekkingsgraad met 1% tot 2% voor alle configuraties toenemen. Deze toename in elektromagnetische straling is echter niet ongelimiteerd. Een microstrip PwrC. Opt. is op zijn hoogste punt rond 162 m en een EIRP PwrC. Opt. is op zijn hoogste punt rond 195 m. De wederafname van elektromagnetische straling start later voor Exp. Opt. netwerken en bevindt zich buiten de onderzochte vlieghoogtes. Deze wederafname is niet veroorzaakt door gebouwen maar door de grotere afstand in het algemeen.

Fig. 10 toont de SAR_{10g}^{wb} van de gewogen gemiddelde gebruiker voor elke individuele bron. De resultaten stellen vast dat de SAR_{myUABS}^{wb} dezelfde curve toont als deze van de elektromagnetische straling in fig. 9.a. Dit komt omdat vergelijking 6 de elektromagnetische straling converteert naar SAT door het te vermenigvuldigen met een constante. Gedurende de gehele tijd is de SAR_{myUABS}^{wb} de meest dominante factor gevolgd door de straling van de gebruiker zijn eigen mobiel apparaat. Straling komende van andere personen hun mobiel apparaat heeft amper invloed. Als voorbeeld, bij een vlieghoogte van 140 m en een EIRP PwrC. Opt. netwerk zal de gewogen gemiddelde gebruiker een SAT van 2.1 nW/kg ondervinden van de UABS en rond 0.2 nW/kg van zijn eigen apparaat. De blootstelling van andere mobiele apparaten kan verwaarloosd worden met een elektromagnetische straling van slecht 0.03 pW/kg . Dit is een lage maar plausibele waarde aangezien de meeste mensen niet gedekt zijn en daardoor zelf geen straling veroorzaken.

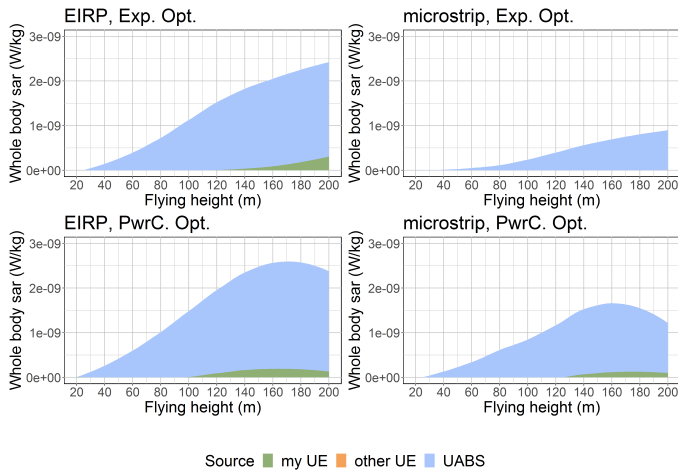


Fig. 10: Elke grafiek komt overeen met een specifieke configuratie en toont hoe de SAT van verschillende bronnen beïnvloed wordt door een toenemende vlieghoogte.

B.2 Variabel aantal gebruikers

Het onderzochte bereik loopt van 50 tot 600 gebruikers. Het blijkt dat het aantal gedekte gebruikers lineair toeneemt met het aantal personen aanwezig in het netwerk zoals getoond wordt in fig. 11.b. Het toont hoe een isotrope antenne in staat is om meer personen te behandelen in vergelijking tot een eenvoudige microstrip patch antenne. Eveneens is een energiezuinig netwerk in staat om meer mensen te behandelen dan een netwerk dat elektromagnetische straling minimaliseert. Bijvoorbeeld met 600 gebruikers zullen 5 tot 7 personen extra behandeld kunnen worden wanneer een microstrip patch antenne vervangen wordt door een isotrope antenne. Door van een Exp. Opt. netwerk naar een PwrC. Opt. netwerk te gaan, kan er één extra persoon behandeld worden.

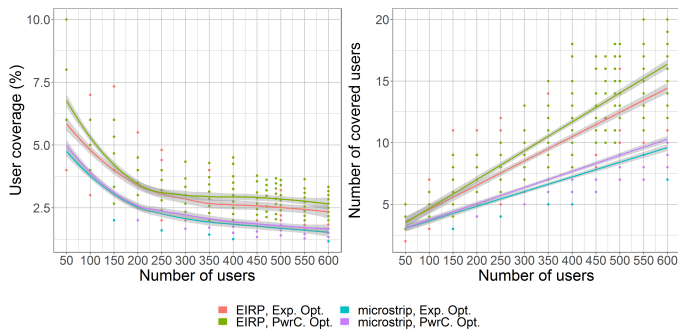


Fig. 11: De invloed van de populatiegrootte op de dekingsgraad.

Fig. 12.a geeft de elektromagnetische blootstelling van de gewogen gemiddelde gebruiker weer bij verschillende populatiegroottes terwijl 12.b het energieverbruik weergeeft voor al deze populatiegroottes. Fig. 12.a is beïnvloed door fig. 11.a. De elektromagnetische straling neemt af wanneer minder gebruikers behandeld worden. Bijvoor-

beeld, in een EIRP PwrC. Opt. netwerk met 50 gebruikers heeft 6,75% dekking wat overeenkomt met een gewogen gemiddelde blootstelling van 18 mV/m . Dit terwijl 600 gebruikers met een dekking van 2,75% maar 9 mV/m heeft. Verder is fig. 12.b rechtstreeks beïnvloed door fig. 11.b. Wanneer de UABS meer mensen behandelt, neemt de kans op gebruikers met een ietwat slechter padverlies toe. De UABS zal dit probleem oplossen door het energieverbruik toe te laten nemen. Een toenemende populatie van 50 naar 600 gebruikers zal het energieverbruik tussen 0,05 en 0,1 W verhogen. Voor dit scenario is geen duidelijk verschil te merken tussen energieverbruik van de vier verschillende configuraties.

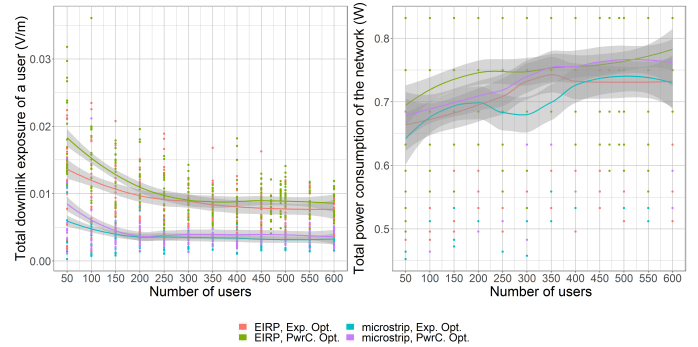


Fig. 12: Deze twee figuren tonen hoe de verschillende populatiegroottes invloed hebben op de DL elektromagnetische straling (fig. a) en het energieverbruik (fig. b).

De SAT komende van de gebruiker zijn eigen apparaat is gemiddeld nul aangezien de meeste gebruikers niet behandeld worden. Fig. 13 toont de elektromagnetische blootstelling van de gedekte gebruiker die zich onmiddellijk onder de UABS bevindt. Het eerste scenario toont hoe de SAT van de gebruiker zijn eigen mobiel apparaat enkel beïnvloed wordt door de vlieghoogte. Dit wordt ook bevestigd door de resultaten in fig. 13 waar een constante SAR^{myUE} van $0.15 \mu W/kg$ gemeten wordt. De SAT van de UABS ondervindt een kleine toename van $0,005 \mu W/kg$.

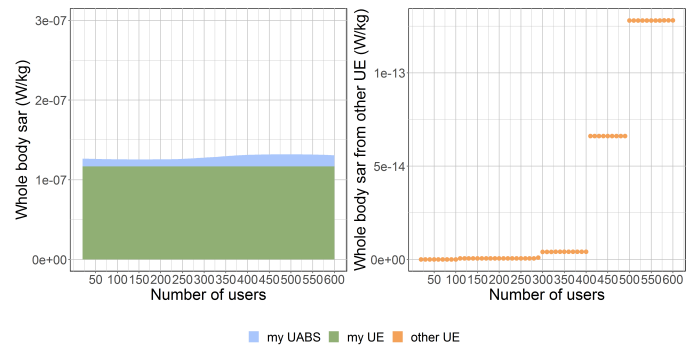


Fig. 13: SAR-waarden voor de gebruiker die zich onder de UABS bevindt.

Wanneer de populatie toeneemt, zullen meer gebruikers dichtbij de UABS terecht komen. De UABS zal waarschijnlijk beslissen om deze gebruiker ook te behandelen zoals zichtbaar is in fig. 14. Het is mogelijk dat deze gebruiker een slechter padverlies heeft door gebouwen of een ietwat grotere afstand. Hierdoor zal de DL SAT van de gebruiker onder de drone toenemen. De elektromagnetische straling van andere personen hun mobiel apparaat is heel laag zoals reeds vermeld en is daarom apart toegevoegd in fig. 13.b. De figuur toont hoe de SAT van andere mobiele apparaten toeneemt van nul tot $0,15 \text{ pW/kg}$.

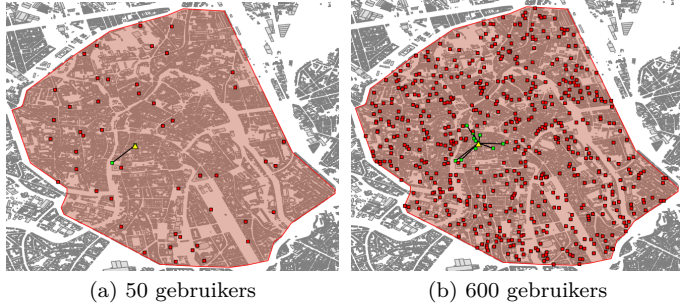


Fig. 14: Overzicht van welke gebruikers die verbonden zijn met de UABS.

C. Ongelimeerd aantal UABS's

C.1 Variabel vlieghoogte

Hetzelfde scenario als in de voorgaande sectie wordt hier onderzocht. Enkel is er hier een ongelimeerd aantal UABS's beschikbaar. De resultaten bewijzen dat de verschillende optimalisatiestrategieën werken zoals bedoeld. Een PwrC. Opt. netwerk heeft inderdaad een lager energieverbruik maar dit komt ten koste van een hogere elektromagnetische straling. Aan de andere kant zal een Exp. Opt. netwerk de elektromagnetische blootstelling reduceren door meer drones te gebruiken waardoor tevens het energieverbruik zal toenemen. Deze conclusie werd reeds gemaakt in [12] en is bevestigd door deze resultaten. Bijvoorbeeld bij het vergelijken van beide optimalisatiestrategieën zal, voor dezelfde isotrope antenne en dezelfde standaard vlieghoogte, een energiezuinig netwerk 51 W verbruiken en de gebruikers blootstellen aan 15 mV/m . Terwijl optimaliseren naar elektromagnetische straling de blootstelling zal laten zakken naar 11.5 mV/m ten koste van een hoger energieverbruik van 54 W .

De elektromagnetische blootstelling in fig. 15 toont een logaritmische toename bij een Exp. Opt. netwerk terwijl een PwrC. Opt. netwerk eerder een concaaf verband met de vlieghoogte weergeeft waarbij het laagste punt zich op 70 meter bevindt.

Fig. 16.a toont aan dat een optimale dekking van 90% bereikt wordt bij een lagere vlieghoogte van 40 m. Hier is echter een nadeel aan verbonden. Fig. 16.b toont dat het aantal vereiste drones toeneemt wanneer de vlieghoogte lager wordt; een vaststelling die reeds gemaakt is in [20].

Bijvoorbeeld, een microstrip Exp. Opt. netwerk en een EIRP PwrC. Opt. netwerk vereisen respectievelijk 84 en 64 drones op een vlieghoogte van 200 m wat respectievelijk toeneemt naar 211 en 162 drones bij een lagere vlieghoogte van 20 m.

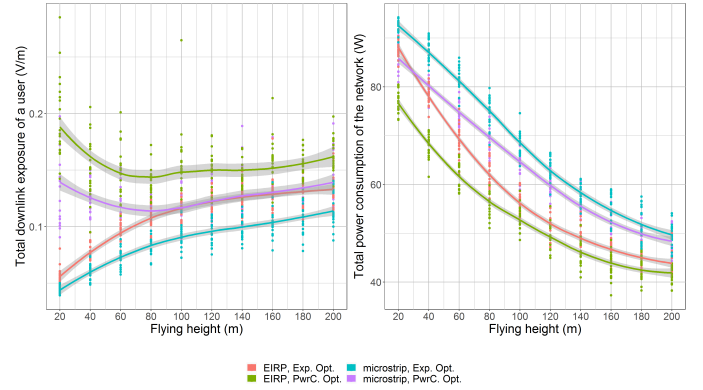


Fig. 15: Deze twee figuren tonen hoe de vlieghoogte invloed heeft op de DL elektromagnetische straling (fig. a) en het energieverbruik (fig. b).

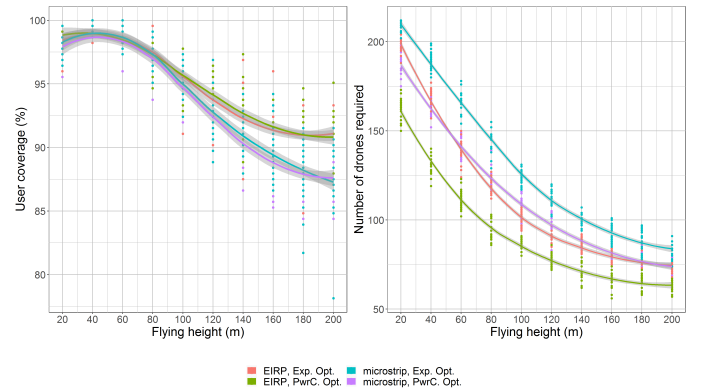


Fig. 16: Deze grafiek toont hoeveel drones vereist zijn op verschillende vlieghoogtes terwijl er getracht wordt om 100% dekking te bereiken.

Fig. 17 toont de bijdrage van elke bron aan de totale SAT. Het eerste gevolg van de vlieghoogte te laten toenemen van 20 naar 200 m is de SAT van de gebruiker zijn eigen apparaat die toeneemt tussen 89 en 141 nW/kg ; een gedrag dat reeds geconstateerd werd in het eerste scenario. Fig. 17 toont aan dat de vlieghoogte hoger wordt dan de NLoS van de gebouwen rond 70 tot 80 meter. Hierna blijft de SAR^{myUABS} min of meer gelijk voor alle configuraties. Voor een microstrip PwrC. Opt. netwerk is dit rond 160 nW/kg . Een microstrip Exp. Opt. en EIRP PwrC. Opt. netwerk is gemiddeld 98 nW/kg en de EIRP Exp. Opt. netwerk bevindt zich rond 47 nW/kg . Deze hogere vlieghoogtes zullen tevens resulteren in een toegenomen elektromagnetische straling van andere UABS's. Wanneer de vlieghoogte toeneemt van 20 tot 200 m zal de

$SAR^{otherUABS}$ tussen 115 en 140 nW/kg voor EIRP antennes bedragen en tussen 54 en 74 nW/kg voor microstrip patch antennes. Dit voor beide optimalisatiestrategieën.

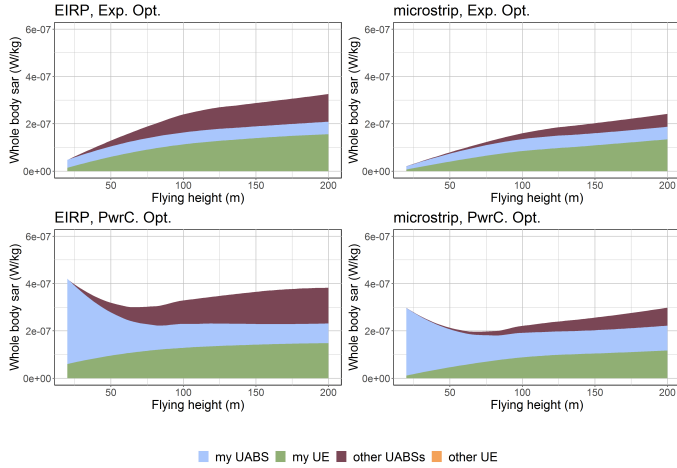


Fig. 17: Elke grafiek komt overeen met één van de vier mogelijke configuraties. De bijdrage van elke bron aan de totale SAT is voor een variërende vlieghoogte.

C.2 Variabel aantal gebruikers

De tweede onderzochte parameter van dit scenario is een variërende populatiegrootte terwijl de vlieghoogte zich op 100 m zal bevinden. Fig. 18.a toont hoe de tool tracht 100% dekking te bereiken. Voor slechts 50 personen zal de gemiddelde dekking rond 93% bevinden terwijl een netwerk van 600 personen een dekking van 97% heeft. Fig. 18.b toont aan dat meer UABS's vereist zijn voor grotere populaties. Het verschil in optimalisatiestrategie is miniem voor kleine netwerken maar neemt snel toe. Wanneer de populatie groeit van 50 tot 600 gebruikers zullen 200 UABS's extra vereist zijn bij een microstrip Exp. Opt. netwerk, rond 130 extra UABS's voor een EIRP Exp. Opt. netwerk of een microstrip PwrC. Opt. netwerk en 110 extra UABS's voor een EIRP PwrC. Opt. netwerk. Dit is een verwacht gedrag wanneer er gekeken wordt naar Scenario II, waarbij het percentage van behandelde gebruikers afnam voor grotere populaties.

Fig. 19 toont aan dat de elektromagnetische straling en het energieverbruik toenemen voor grotere populaties wat normaal is aangezien meer UABS's gebruikt worden. Wanneer de populatie toeneemt van 50 naar 600 gebruikers zal de elektromagnetische straling toenemen tussen 80 en 130 mV/m , afhankelijk van de configuratie. Het energieverbruik bij 50 gebruikers is voor alle configuraties rond 20 W. Eenmaal de populatie is toegenomen naar 600 gebruikers zal dit voor een microstrip Exp. Opt. netwerk 130 W bedragen, 115 W voor een microstrip PwrC. Opt. netwerk, 102 W voor een EIRP Exp. Opt. netwerk en 92 W voor een EIRP PwrC. Opt. netwerk.

Dat het beslissingsalgoritme werkt zoals bedoeld, werd reeds duidelijk in de voorgaande subsectie maar wordt ook hier bevestigd. Wanneer beide optimalisatiestrategieën

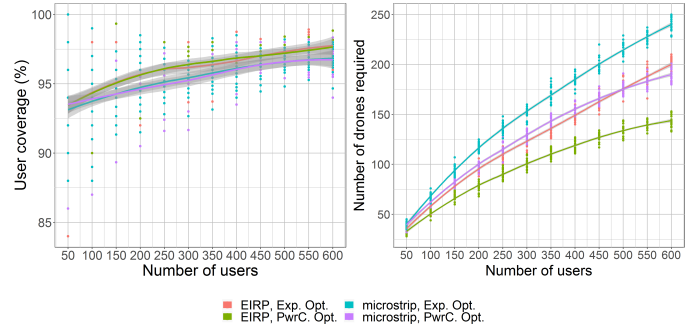


Fig. 18: Deze grafiek toont hoeveel drones vereist zijn op verschillende vlieghoogtes terwijl er getracht wordt een een dekking van 100% te hebben.

vergeleken worden, blijkt dat een energiezuinig netwerk ongeveer 5 W minder energie nodig heeft maar hierdoor de gebruikers wel blootstelt aan 27 mV/m tot 30 mV/m meer ten opzichte van Exp. Opt. netwerk. Verder zal een isotrope antenne ook meer elektromagnetische straling veroorzaken voor minder energie in vergelijking met een microstrip patch antenne. Wanneer beide antennes vergeleken worden voor 224 gebruikers blijkt dat de isotrope antenne de gemiddelde gebruiker tussen 25 mV/m tot 27 mV/m extra zal blootstellen terwijl het gemiddeld 12 W minder zal nodig hebben in vergelijking met de microstrip patch antenne.

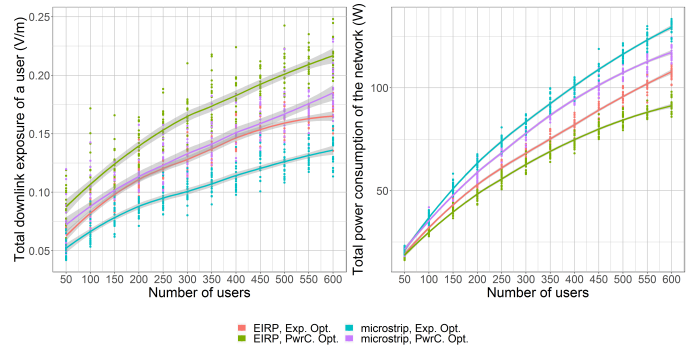


Fig. 19: De invloed van de populatiegrootte op de DL elektromagnetische straling (a) en energieverbruik (b).

Fig. 20 stelt de SAT van de gewogen gemiddelde gebruiker voor en toont aan hoe de SAT van de gebruiker zijn eigen mobiele apparaat zo goed als constant is. De vlieghoogte is namelijk altijd dezelfde waardoor ook de energie die nodig is om de afstand te overbruggen gelijk blijft. Voor beide optimalisatiestrategieën zal de SAR^{myUE} voor netwerken met isotrope antennes variëren rond 1.1 $\mu W/kg$ en rond 0.7 $\mu W/kg$ voor netwerken met een microstrip patch antenne. De SAR^{myUABS} neemt nauwelijks toe in een Exp. Opt. netwerk en bevindt zich rond 0.5 $\mu W/kg$ voor beide antennes. Een energiezuinig netwerk start ook rond 0.5 $\mu W/kg$ maar neemt toe wanneer meer mensen online komen. Dit is normaal aangezien deze UABS's trachten om meer mensen te behandelen. Hierdoor zal de SAR^{myUABS}

voor 600 gebruikers toenemen tot $1 \mu W/kg$ voor een isotrope antenne en tot wel $2 \mu W/kg$ voor een microstrip patch antenne. De SAT-waarde neemt het meeste toe bij $SAR_{otherUABS}$ die heel laag start rond minder dan $0.1 \mu W/kg$ voor 50 gebruikers in alle configuraties. Deze SAT neemt echter snel toe. De grootste toename wordt waargenomen in een EIRP PwrC. Opt. netwerk waarbij $3 \mu W/kg$ gemeten wordt voor 600 gebruikers. De $SAR_{otherUE}$ neemt het minste toe in een microstrip Exp. Opt. met slechts $1 \mu W/kg$ voor 600 gebruikers.

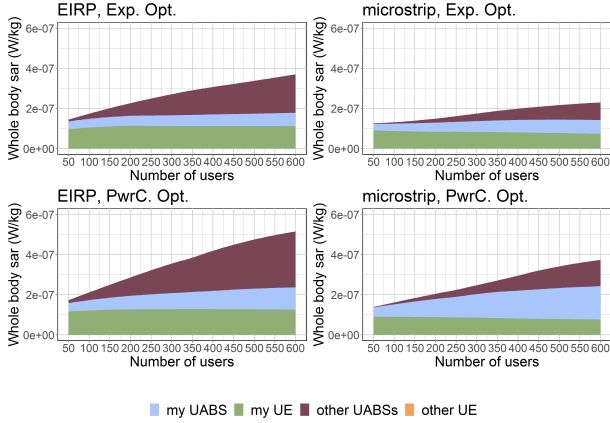


Fig. 20: Elke grafiek komt overeen met een specifieke configuratie en toont aan hoe de SAT van verschillende bronnen beïnvloed wordt door een toenemende populatie.

VI. Conclusie

Een capacity-based deployment tool is gebruikt voor het onderzoeken van de SAT van gebruikers die geoptimaliseerd zijn naar DL elektromagnetische straling en totaal energieverbruik. Dit is onderzocht voor verschillende vlieghoogtes, populatiegroottes en aantal beschikbare UABS's. De resultaten bevestigen de vaststellingen uit [12] waarbij elektromagnetische straling en totaal energieverbruik leiden tot tegenstrijdige vereisten. De voorgestelde fitness functie werkt zoals bedoeld. Voor een netwerk met standaard configuratie kan de elektromagnetische straling in een energiezuinig netwerk kan gereduceerd worden tot wel 23% voor isotrope antennes en 30% voor microstrip patch antennes door te optimaliseren naar elektromagnetische straling. Hierdoor zal het bereik van de UABS afnemen aangezien het energieverbruik van een individuele UABS zakt tussen de 0.07 en $0.12 W$. Hierdoor zullen gemiddeld 18 extra drones nodig zijn die in totaal tot $4 W$ extra energieconsumptie zullen leiden.

Een directionele microstrip patch antenne wordt geïntroduceerd omdat het verschillende voordelen biedt in vergelijking met een omnidirectionele antenne. Directionele antennes zijn in staat om hun energie te richten waar het nodig is, namelijk de grond. Een microstrip patch antenne is verder dun en heeft een licht gewicht. Deze antenne, met een openingshoek van 90° , veroorzaakt minder elektromagnetische blootstelling, een lager bereik en vereist meer

energie. Voor een netwerk met standaard configuratie kan de microstrip patch antenne de elektromagnetische straling van een isotrope antenne tussen 30% en 34% reduceren. Dit zal het energieverbruik met $12 W$ doen toenemen. De vereiste energie per UABS zal toenemen met $0.022 W$ voor een PwrC. Opt. netwerk en met $0.007 W$ voor een Exp. Opt. netwerk.

Antenna type	Optimization strategy		<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: #8B4513; margin-bottom: 5px;"></div> High electromagnetic exposure Low power consumption </div> <div style="width: 10px; height: 10px; background-color: #4682B4; margin-top: 5px;"></div> Low electromagnetic exposure High power consumption (many drones)
--------------	-----------------------	--	--

Fig. 21: Matrix met de vier mogelijke configuraties. Geleurd op basis van de resultaten.

Figuur 21 toont een overzicht gebaseerd op de resultaten van de twee optimalisatiestrategieën en de twee soorten antennes. Opmerkelijk is dat de EIRP Exp. Opt. netwerk zich gelijkaardig gedraagt als een microstrip patch antenne in een PwrC. Opt. netwerk. Hierdoor wordt een microstrip patch antenne in een energiezuinig netwerk aangeraden. De microstrip patch antenne zal minder elektromagnetische straling veroorzaken dankzij het design. Verder zal het optimaliseren naar energieverbruik ervoor zorgen dat minder drones nodig zullen zijn. Een microstrip patch antenne met een openingshoek van 90° is verondersteld een goede oplossing te zijn maar als het budget beperkt is, kan een antenne met een grotere openingshoek een geschikt alternatief vormen om kosten verder te reduceren zonder de limieten opgelegd door de Vlaamse overheid te overschreden. De SAT van de configuratie met de meeste blootstelling is nog steeds een honderdduizendste van de maximale toegestane SAT voor het volledige lichaam ($0.08 W/kg$).

Figuur 22 geeft een overzicht van de SAT-bijdrage in percentages ten opzichte van de totale SAT. De waarden zijn uitgemiddeld over de vier overwogen configuraties. De gebruiker wordt voornamelijk blootgesteld aan zijn eigen mobiel apparaat met 52% van de totale elektromagnetische blootstelling. Deze conclusie werd reeds gemaakt door de auteurs van [15] en [41]. Verder wordt er in [41] ook geconcludeerd dat, dankzij power control, de elektromagnetische straling van het mobiele apparaat heel dicht komt bij de blootstelling van de UABS. Dit wordt ook bevestigd door deze resultaten. Figuur 22 toont aan dat de elektromagnetische straling van alle andere UABS's gezamenlijk de 48% omvat waarvan 15% komt van de UABS die deze gebruiker aan het behandelen is. De elektromagnetische blootstelling van mobiele apparaten die tot andere mensen behoren is verwaarloosbaar in tegenstelling tot de veel grotere blootstelling komende van alle andere bronnen en draagt slechts 0.0001% bij aan de totale blootstelling.

De resultaten tonen verder aan dat energieverbruik en elektromagnetische straling toenemen wanneer meer mensen aanwezig zijn in het netwerk. Wanneer de populatie toeneemt van 50 naar 600 gebruikers zal de elektromagnetische straling tussen 80 en 130 mV/m toenemen afhankelijk van de configuratie. Het energieverbruik neemt toe met 110 W voor alle configuraties. De bron die het meest beïnvloed wordt door het aantal gebruikers is de SAT van andere UABS's en neemt toe tussen de $1\text{e}3 \mu W/kg$. Verder heeft de vlieghoogte een positief effect op het aantal nodige drones die op hun beurt een positief effect hebben op het energieverbruik. Wanneer de vlieghoogte toeneemt van 20 m naar 200 m, neemt het aantal drones af met 59%. Deze afname werd ook vastgesteld in [20]. Ook de auteurs van [15] concludeerden dat elektromagnetische straling afneemt wanneer het padverlies minder wordt. De elektromagnetische straling van de UABS's blijven min of meer gelijk voor alle vlieghoogtes tussen 80 en 200 meter. Meeste UABS's zijn in LoS en dankzij power control zullen deze niet meer energie verbruiken dan strikt noodzakelijk. De elektromagnetische straling van de gebruiker zijn eigen apparaten neemt echter wel toe om de hoog vliegende drones te kunnen bereiken. Rond 80 meter zal de straling van de gebruiker zijn eigen apparaat de straling van de behandelde UABS voorbijsteken. Wanneer meerdere UABS beschikbaar zijn in het netwerk, zal de blootstelling van andere UABS's toenemen naarmate de vlieghoogte toeneemt. Dit komt omdat bij hogere vlieghoogtes steeds meer UABS's in LoS komen. De vlieghoogte laten toenemen van 20 naar 200 m zal de SAT van andere UABS's tussen 46 en 49 keer groter maken voor een isotrope antenne en tussen 70 en 85 keer groter voor een microstrip patch antenne. Wanneer ook de resultaten van [21] overwogen worden waarbij een vlieghoogte van 80 meter voorgesteld wordt als optimale vlieghoogte voor optimaal bereik en backhaul verbindingen zal ook hier de vlieghoogte van 80 meter voorgesteld worden voor het stadscentrum van Gent.

Tot besluit wordt een microstrip patch antenne met een openingshoek van 90° als geschikt startpunt beschouwd. Deze directionele antenne focust de elektromagnetische

straling daar waar het nodig is. en reduceert hierdoor ongewenste zijwaartse straling. Het wordt aangeraden om de antenne toe te passen in een netwerk dat energieverbruik minimaliseert omdat hierbij minder drones nodig zijn en daardoor goedkoper is. De optimale vlieghoogte voor het stadscentrum in Gent bevindt zich rond 80 meter. Lagere vlieghoogtes vereisen veel meer drones terwijl hogere vlieghoogtes de elektromagnetische straling laten toenemen. Wanneer deze configuratie wordt toegepast op een netwerk met 224 gebruikers zal de gemiddelde gebruiker een SAT ondervinden van ongeveer $0.2 \mu W/kg$ en een DL elektromagnetische blootstelling van 69.5 W . Het netwerk vereist gemiddeld 96 UABS's met een totaal energieverbruik van 114 V/m . Dat is 1.19 W per UABS.

Voor toekomstig onderzoek kunnen nog extra parameters onderzocht worden. Verschillende Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)-waarden worden verondersteld om een grote invloed te hebben op de UL straling en ook de blootstelling van backhaul verbindingen moeten nog overwogen worden. Verder is de tool klaar om MiMo en massive MiMo te ondersteunen aangezien de tool eenvoudig uitgebreid kan worden om meer complexe stralingspatronen zoals beamforming te ondersteunen. Als laatste is er ook nog ruimte om de tijdscomplexiteit van het programma te verbeteren door het exacte algoritme te vervangen door heuristische methodes.

Dankwoord

Ik wens de onderzoeksgroep WAVES van de Universiteit Gent te bedanken voor het beschikbaar stellen van hun capacity based deployment tool om zo dit onderzoek mogelijk te maken.

Referenties

- [1] "Base overschreed stralingsnormen na aanslagen," De standaard, 2016.
- [2] L. Hardell and C. Sage, "Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards," Biomedicine and Pharmacotherapy, vol. 62, no. 2, pp. 104 – 109, 2008.
- [3] "What are electromagnetic fields," <https://www.who.int/peh-emf/about/WhatIsEMF/en/index1.html>. Accessed: 15-10-2019.
- [4] "Elektromagnetische velden en gezondheid: Uw wegwijzer in het elektromagnetische landschap," Federale overheidsdienst: volksgezondheid, veiligheid van de voedselketen en leefmilieu, vol. 5, 2014.
- [5] A. Ahlbom, U. Bergqvist, J. Bernhardt, J. Cesarini, M. Grandolfo, M. Hietanen, A. Mckinlay, M. Repacholi, D. H. Sliney, J. A. Stolwijk, et al., "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 ghz)," Health physics, vol. 74, no. 4, pp. 494–521, 1998.
- [6] "Normen zendantennes," <https://omgeving.vlaanderen.be/normen-zendantennes>. Accessed: 19-03-2020.
- [7] E. Commission, "Council recommendation of 12 july 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 hz to 300 ghz)," Official Journal of the European Communities, vol. 59, 1999.
- [8] "Wireless devices," <https://www.health.belgium.be/en/wireless-devices>. Accessed: 13-05-2020.
- [9] A.-K. Lee, S.-E. Hong, M. Taki, K. Wake, and H. Do Choi, "Comparison of different sar limits in sam phantom for mobile phone exposure," in 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp. 687–689, IEEE, 2018.
- [10] W. H. Bailey, R. Bodemann, J. Bushberg, C.-K. Chou, R. Cleveland, A. Faraone, K. R. Foster, K. E. Gettman, K. Graf, T. Harrington, et al., "Synopsis of ieee std c95. 1™-2019 "ieee standard for safety levels with respect to human exposure to electric, mag-

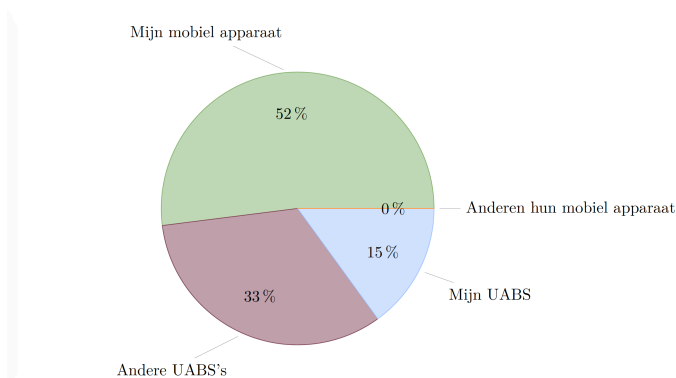


Fig. 22: Bijdrage van elke bron aan de totale SAR waaraan de gemiddelde gebruiker blootgesteld is. De percentages zijn uitgemiddeld over de vier overwogen configuraties.

- netic, and electromagnetic fields, 0 hz to 300 ghz,” IEEE Access, vol. 7, pp. 171346–171356, 2019.
- [11] D. Plets, W. Joseph, K. Vanhecke, and L. Martens, “Exposure optimization in indoor wireless networks by heuristic network planning,” *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 139, pp. 445–478, 01 2013.
 - [12] M. Deruyck, E. Tanghe, D. Plets, L. Martens, and W. Joseph, “Optimizing lte wireless access networks towards power consumption and electromagnetic exposure of human beings,” *Computer Networks*, vol. 94, 12 2015.
 - [13] D. Plets, W. Joseph, S. Aerts, K. Vanhecke, G. Vermeeren, and L. Martens, “Prediction and comparison of downlink electric-field and uplink localised sar values for realistic indoor wireless planning,” *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 162, no. 4, pp. 487–498, 2014.
 - [14] D. Plets, W. Joseph, K. Vanhecke, and L. Martens, “Downlink electric-field and uplink sar prediction algorithm in indoor wireless network planner,” in *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, pp. 2457–2461, IEEE, 2014.
 - [15] S. Kuehn, S. Pfeifer, B. Kochali, and N. Kuster, “Modelling of total exposure in hypothetical 5g mobile networks for varied topologies and user scenarios,” *Final Report of Project CRR-816*, Available on line at: <https://tinyurl.com/r6z2gqn>, 2019.
 - [16] D. Plets, W. Joseph, K. Vanhecke, G. Vermeeren, J. Wiart, S. Aerts, N. Varsier, and L. Martens, “Joint minimization of uplink and downlink whole-body exposure dose in indoor wireless networks,” *BioMed research international*, vol. 2015, 2015.
 - [17] Y. Zeng, Q. Wu, and R. Zhang, “Accessing from the sky: A tutorial on uav communications for 5g and beyond,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 12, pp. 2327–2375, 2019.
 - [18] Y. Kawamoto, H. Nishiyama, N. Kato, F. Ono, and R. Miura, “Toward future unmanned aerial vehicle networks: Architecture, resource allocation and field experiments,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 1, pp. 94–99, 2018.
 - [19] R. Gangula, O. Esrafilian, D. Gesbert, C. Roux, F. Kaltenberger, and R. Knopp, “Flying rebots: First results on an autonomous uav-based lte relay using open airinterface,” in *2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, pp. 1–5, IEEE, 2018.
 - [20] M. Deruyck, J. Wyckmans, W. Joseph, and L. Martens, “Designing uav-aided emergency networks for large-scale disaster scenarios,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2018, 12 2018.
 - [21] G. Castellanos, M. Deruyck, L. Martens, and W. Joseph, “Performance evaluation of direct-link backhaul for uav-aided emergency networks,” *Sensors*, vol. 19, no. 15, p. 3342, 2019.
 - [22] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y.-H. Nam, and M. Debbah, “A tutorial on uavs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems,” *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2334–2360, 2019.
 - [23] Q. Wu, L. Liu, and R. Zhang, “Fundamental trade-offs in communication and trajectory design for uav-enabled wireless network,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 1, pp. 36–44, 2019.
 - [24] M. Deruyck, A. Marri, S. Mignardi, L. Martens, W. Joseph, and R. Verdone, “Performance evaluation of the dynamic trajectory design for an unmanned aerial base station in a single frequency network,” in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1–7, IEEE, 2017.
 - [25] A. V. Savkin and H. Huang, “Deployment of unmanned aerial vehicle base stations for optimal quality of coverage,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 1, pp. 321–324, 2018.
 - [26] H. Huang and A. V. Savkin, “A method for optimized deployment of unmanned aerial vehicles for maximum coverage and minimum interference in cellular networks,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 5, pp. 2638–2647, 2018.
 - [27] C. T. Cicek, H. Gultekin, B. Tavli, and H. Yanikomeroglu, “Uav base station location optimization for next generation wireless networks: Overview and future research directions,” in *2019 1st International Conference on Unmanned Vehicle Systems-Oman (UVS)*, pp. 1–6, IEEE, 2019.
 - [28] A. Rizwan, D. Biswas, and V. Ramachandra, “Impact of uav structure on antenna radiation patterns at different frequencies,” in *2017 IEEE International Conference on Antenna Innovations & Modern Technologies for Ground, Aircraft and Satellite Applications (iAIM)*, pp. 1–5, IEEE, 2017.
 - [29] M. Nosrati, A. Jafargholi, and N. Tavassolian, “A broadband blade dipole antenna for uav applications,” in *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, pp. 1777–1778, IEEE, 2016.
 - [30] M. Nosrati, A. Jafargholi, R. Pazoki, and N. Tavassolian, “Broadband slotted blade dipole antenna for airborne uav applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 8, pp. 3857–3864, 2018.
 - [31] B. A. Arand, R. Shamsaee, and B. Yektakhah, “Design and fabrication of a broadband blade monopole antenna operating in 30 mhz–600 mhz frequency band,” in *2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 1–3, IEEE, 2013.
 - [32] L. Akhoondzadeh-Asl, J. Hill, J.-J. Laurin, and M. Riel, “Novel low profile wideband monopole antenna for avionics applications,” *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 61, no. 11, pp. 5766–5770, 2013.
 - [33] S. S. Siddiq, G. Karthikeya, T. Tanjavur, and N. Agnihotri, “Microstrip dual band millimeter-wave antenna array for uav applications,” in *2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, pp. 1–4, IEEE, 2016.
 - [34] Y. Zheng, J. Zhou, W. Wang, and M. Chen, “A low-profile broadband circularly polarized antenna array for uav ground-to-air communication,” in *2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, pp. 219–220, IEEE, 2018.
 - [35] X. Sun, R. Blázquez-García, A. García-Tejero, J. M. Fernández-González, M. Burgos-García, and M. Sierra-Castañer, “Circular array antenna for uav-uav communications,” in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pp. 2025–2028, IEEE, 2017.
 - [36] I. Singh and V. Tripathi, “Micro strip patch antenna and its applications: a survey,” *Int. J. Comp. Tech. Appl.*, vol. 2, no. 5, pp. 1595–1599, 2011.
 - [37] K. Kashwan, V. Rajeshkumar, T. Gunasekaran, and K. S. Kumar, “Design and characterization of pin fed microstrip patch antennae,” in *2011 Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, vol. 4, pp. 2258–2262, IEEE, 2011.
 - [38] R. Mullner, C. F. Ball, K. Ivanov, J. Lienhart, and P. Hric, “Contrasting open-loop and closed-loop power control performance in utran lte uplink by ue trace analysis,” in *2009 IEEE International Conference on Communications*, pp. 1–6, IEEE, 2009.
 - [39] M. Lauridsen, A. R. Jensen, and P. Mogensen, “Reducing lte uplink transmission energy by allocating resources,” in *2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, pp. 1–5, 2011.
 - [40] A. Sudarsan and A. Prabhu, “Design and development of microstrip patch antenna,” *International Journal of Antennas (JANT) Vol.*, vol. 3, 2017.
 - [41] A. Gati, E. Conil, M.-F. Wong, and J. Wiart, “Duality between uplink local and downlink whole-body exposures in operating networks,” *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, vol. 52, no. 4, pp. 829–836, 2010.