

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

Thomas Detemmerman

Supervisor(s): Wout Joseph, Luc Martens, Luc Martens, German Dario Castellanos Tache

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. 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.

Sleutelwoorden— LTE, elektromagnetische blootstelling, energieverbruik, drone, femtocell, microstrip patch antenne, stralingspatroon, specifieke 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 mogelijks levensbedreigende situaties verwacht de samenleving de aanwezigheid van het mobiele netwerk. Desondanks het feit dat dit netwerk zelf mogelijks beschadigd kan zijn door de situatie. Een mogelijk tijdelijke oplossing om een beschadigd netwerk 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 onverwachte toename

aan gebruikers. Bijvoorbeeld tijdens de aanslagen op de Brusselse Luchthaven zagen alle mobiele operatoren een toename in data verkeer. Sommige operatoren raakten zodoende verzadigd dat ze beslisten om de elektromagnetische straling te laten toenemen boven de opgelegde limieten zodoende dat 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 kunnen veroorzaken [2], [3]. Het is dus duidelijk dat elektromagnetische straling een sleutelrol speelt bij het ontwikkelen van een met drones beholpen 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 zodoende dat bepaalde doelstellingen zoals minimaal energieverbruik bereikt kunnen worden.

Desondanks is er zeer beperkt onderzoek gedaan waarbij een drone-gestuurd netwerk wordt geoptimaliseerd naar elektromagnetische straling. Verscheidene publicaties bespreken hoe elektromagnetische straling berekend kunnen 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 duidelijk 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 veranderde scenario's en hoe het netwerk ernaar geoptimaliseerd kan worden.

Om dit onderzoek mogelijk te maken zal een bestaande deployment tool, ontwikkeld door de onderzoeksgroep WAVES van de universiteit van Ghent, 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 network 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) (uitgedrukt wordt in W/kg). De International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) heeft geconcludeerd dat het drempleffectwaarde 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].

Verschillende onderzoeken berekenen de elektromagnetische veldsterkte van verschillende bronnen [9], [10], [11], [12] waarbij sommigen de uplink (UL) elektromagnetische veldsterkte converteren naar lokale SAT voor het hoofd en torso [11], [12]. Met de naderende 5G technologie werd [13] gepubliceerd waarbij beschreven wordt hoe deze lokale SAT-waarden van alle verschillende bronnen berekend kunnen worden en bij elkaar opgeteld worden. Uiteindelijk beschrijft [14] hoe de elektromagnetische veldsterkte omgezet kan worden naar SAT-waarden voor het volledige lichaam.

In een realistisch network kunnen sommige gebruikers telefoneren terwijl anderen andere vormen van telecommunicatie gebruiken zoals surfen op het internet. Aangezien de positie van het mobiel apparaat t.o.v. 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 aanvallen zonder piloten in gevaar te brengen [15]. 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 [16] een WiFi network met behulp van drones waarbij rekening gehouden wordt met de richting van de geplaatste antennes op de drone. Gangula et al. illustreert in [17] hoe drones gebruikt kun-

nen worden voor Long-Term Evolution (LTE) en Zeng et al. presenteert in [15] een handleiding waarbij uitdagingen zoals energieverbruik, mobiliteit en de richting van de antenne voor een 5G network besproken worden. In [18] ontwikkeld Deruyck et al. een deployment tool voor een drone gestuurd network voor rampsituaties waarbij een ideale vlieghoogte van 100 meter aangeraden wordt. Dit wordt verder uitgebreid in [19] 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 [20] richtlijnen hoe een drone-gestuurd network geoptimaliseerd en geanalyseerd kan worden. Eén onderzoekgebied 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 [21], [22], [23], [24]. Deze optimalisatie kan gebeuren door verschillende implementaties waaronder exacte algoritmen of machinaal leren [20], [25].

Onderzoek waarbij de elektromagnetische straling gelimiteerd wordt is echter beperkt. Deruyck et al. bespreekt in [10] hoe een conventioneel mobiel network geoptimaliseerd kan worden zodoende dat het energieverbruik van het volledige network minimaal wordt of de elektromagnetische blootstelling van een individu geminimaliseerd wordt. Echter, onderzoek waarbij een drone-gestuurd network geoptimaliseerd wordt naar elektromagnetische straling is door de auteur niet gekend.

C. Technologieën

Voor het ontwikkelen van het network zullen de meer robuuste drones uit [18] gebruikt worden (details in tabel II). 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 network. 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 [26]. 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 veresite vormen [15].

Het eenvoudigste stralingspatroon is een hypothetische isotrope antenne dewelke straalt met gelijke hoeveelheid in elke richting. Een antenne die gelijkwaardig straalt over een specifiek vlak wordt een omnidirectionele antenne genoemd [15]. Hiervan bestaan verschillende soorten voor te bevestigen op drones zoals monopoolantennes, dipoolantennes en vleugel antennes [27], [28], [29], [30]. Een andere vorm van antenne is directionele antennes dewelke energie besparen door de elektromagnetische straling te focussen

daar waar het nodig is. Eén soort hiervan dat uitgebreid onderzocht is in verscheidene antenne-arrays zijn de microstrip antennes [31], [32], [33]. Deze voorzien verschillende voordelen ten opzichte van meer traditionele antennes zoals het beperkte gewicht, lage productiekosten en aerodynamica [34], [35].

Een microstrip antennes is opgebouwd uit een grondplaat en een stralingsplaat met daartussen een diëlectrisch substraat. Verscheidene variaties bestaan zoals microstrip patch antennes, microstrip slot antennes and geprinte dipool antennes dewelke allemaal gelijkende karakteristieken hebben [34], [35]. Ze zijn allemaal dun, ondersteunen dubbele frequenties and hebben allemaal het nadeel dat ze interferentie kunnen veroorzaken op frequenties buiten het bedoelde spectrum. De microstrip patch en slot antenne ondersteunen beide circulaire en lineaire polarisatie terwijl de geprinte dipool antenne enkel lineaire polarisatie ondersteund. Verder is de microstrip patch antenne het eenvoudigste te produceren ten opzichte van de andere overwogen antennes [34].

Fig. 1 toont een microstrip patch antenne dewelke bestaat uit aluminium die bevestigd is op een substraat van teflon. De microstrip patch antenne wijst naar de grond aangezien de drone boven de mensen zal vliegen.

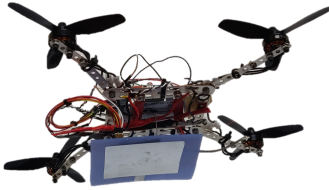


Fig. 1: Afbeelding van een microstrip patch antenne bevestigd aan de onderkant van een drone.

III. Methodologie

A. Elektromagnetische Straling

A.1 Totale Electromagnetische 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 [13] dewelke 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 incorrecte 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 of-
tewel het volledige lichaam en *UE* voor User Equipment

oftewel het mobiele apparaat op de grond. De eerste parameter, $SAT_{10g}^{wb,myUE}$, duidt de geabsorbeerde elektromagnetische straling aan komende van de gebruik zijn eigen apparaat. Ondanks het feit dat de UL straling bedoeld is voor de UABS die deze gebruiker behandelt, een deel van deze straling wordt ook geabsorbeerd door de gebruiker zelf. Dit komt vanwege het omnidirectionele karakter van de mobiele apparaat zijn antenne. Een tweede parameter is $SAT_{10g}^{wb,myUABS}$ dewelke de straling aanduidt veroorzaakt door downlink (DL) dataverkeer, komende van de UABS die deze gebruiker behandelt. Als derde parameter hebben we $SAT_{10g}^{wb,otherUE}$ dewelke 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.

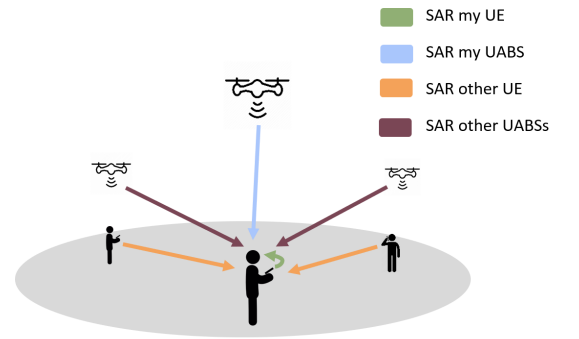


Fig. 2: Deze illustratie toont hoe de gemiddelde gebruiker (hier getoond in het midden) beïnvloed wordt door verschillende bronnen van elektromagnetische straling.

A.2 Electromagnetische straling van een individuele bron

Om de totale elektromagnetische straling te vinden waaraan 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 apparaten die niet tot de gebruiker behoren. De elektromagnetische veldsterkte E voor het individu u komende van een bron i wordt als volgt berekend.

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

Het berekenen van de effectieve straling (ES) voor een gebruiker u vereist eerst om de equivalent isotropic radiation power (EIRP) te hebben berekend [9], [10]. Dit kan bekomen worden door de 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 die komt met verschillende stralingspatronen. Deze waarde hangt af van de hoek tussen de gebruiken 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 deze goed presteert voor femtocell netwerken in stedelijke gebieden [18].

A.3 Samenvoegen van meerdere bronnen

De totale elektromagnetische straling E_{tot} in een bepaald punt, komende van alle verschillende bronnen kan berekend worden m.b.v. 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 dewelke gebaseerd is op Duke van de Virtual Family. Duke is een 34 jarige man met een gewicht van 72 kg, een hoogte van 1.74 en een BMI van 23.1 kg/m [14]. 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 [14]. WiFi maakt gebruik van het 2400 MHz spectrum wat heel dichtbij LTE valt (2600 MHz). Daarom wordt in [14] 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 is vergelijking 6 zet de vermogensdichtheid S om naar de verwachte $SAR_{10g}^{ff,wb}$. Om dit mogelijk te

maken moet de uitkomst 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:

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

De energie die door het mobiele apparaat wordt gebruikt kan berekend worden met formule 8 [14].

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

Hierbij staat P_{max} voor het maximale toegestane zendvermogen van het mobiele apparaat wat voor LTE 23 dBm bedraagt. Dit is echter in het slechste geval. De effectieve waarde ligt dankzij power control doorgaans lager. P_{pusch} is de minimale energie vereist door de UABS en bedraagt hier -120 dBm. α is de compensatiefactor voor het padverlies en is gelijk aan één wat hier volledige compensatie betekent [36], [37]. Voor het 20 MHz kanaal in deze paper zal M gelijk zijn aan 100 en zal σ , als correctiefactor, nul bedragen [14], [36].

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 [34].

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 dat 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 performantie van de antenne zullen bevorderen [35], [38]. 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 $\epsilon_r = 2.2$ [35]. Glas met een hoogte van 2.87 mm zal de dimensies van het volledige antenne oppervlak 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 I: Overzicht van de configuratie parameters

De dimensies van de stralingsplaat kunnen berekend worden met de formules uit [35], [38]. 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.

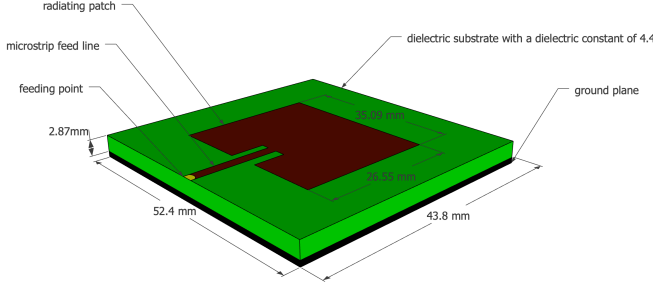


Fig. 3: Schema van een microstrip patch antenne.

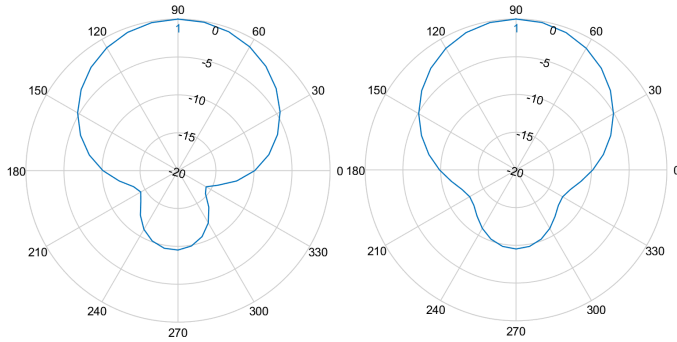


Fig. 4: Links is het stralingspatroon voor het E-vlak en rechts voor het H-vlak.

C. Optimaliseren van het netwerk

Deruyck et al. bespreekt in [10] 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 [10] 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 i.p.v. een nieuwe base station te activeren. Dit leidt tot de volgende fitness functie dewelke gebaseerd is op [10].

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

Formule 9 geeft een gewicht terug dat aanduidt hoe goed het netwerk preset is. w is de belangrijkheidsfactor die loopt van 0 tot 1, grenzen inbegrepen. Een w gelijk aan 0 betekend 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 representeert de effectieve verbruikte energie van het huidig ontwikkelde netwerk. E_m is de elektromagnetische straling van de gewogen gemiddelde gebruiken 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 [10]. 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 beiden 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 dat 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 het de maximale toegestane zendvermogen zou overschreden. 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 dat resulteert in de beste

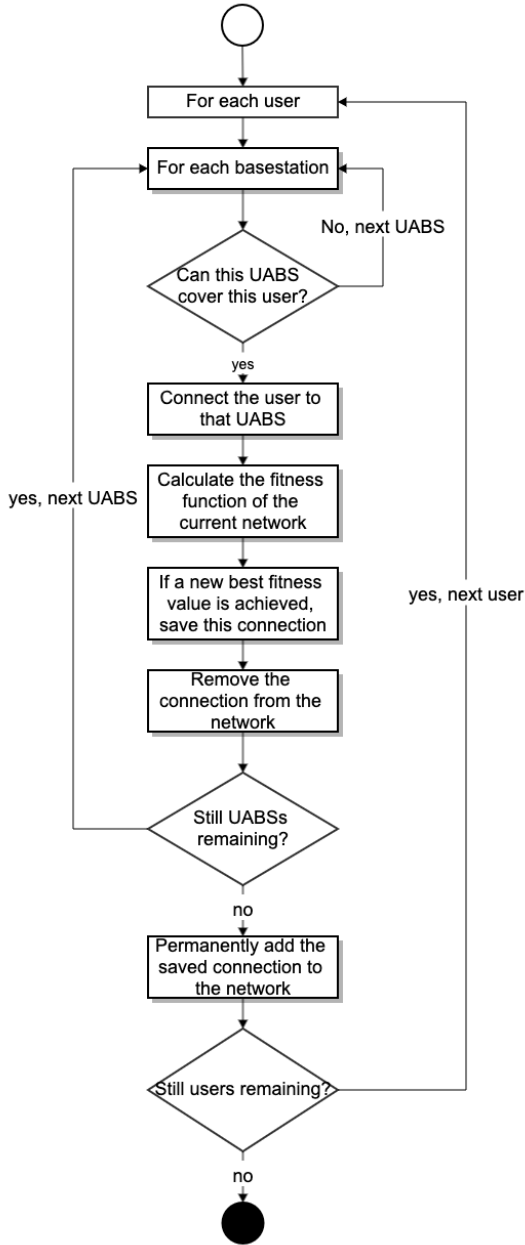


Fig. 5: Flowchart of the decision algorithm.

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. In 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, be komen we een volledig netwerk voor een ongelimiteerd aantal drones. Het netwerk wordt vervolgens terug aan het hoofd-algoritme 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 II en is altijd van toepassing tenzij anders vermeld.

Mobiel netwerk	
technologie	LTE
frequentie	2.6 GHz
Power offset (P_{pusch})	-120 dBm
Compenstatie voor padverlies (α)	1
Correctie waarde	0 dBm
Aantal resource blokken	100
Drone	
energie 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	neerwaards
zendversterking	4 dBm
kabelverlies	2 dBm
implementation loss	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 II: 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 vlieg-hoogtes.

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 [18]. De tweede parameter is een variërende population lopend van 50 tot 600 gebruikers. Hierbij zal de vlieghoogte vastgezet worden op 100 meter [18]. Het energieverbruik, elektromagnetische straling en SAT zullen onderzocht worden onderzochte parameter.

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 vermoende bronnen en bijgevolg enkel dataverkeer overwegen tussen de gebruiker zijn apparaat en de UABS. Andere bronnen zoals connecties naar het backhaul network zullen niet overwogen worden.

Antenna type	Optimization strategy	
	Exposure optimized	Power consumption optimized
	Equivalent isotropic radiator	Microstrip patch antenna
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. Results

Vier configuraties zullen overwogen worden tijdens het evalueren van twee parameters, zijnde populatiegrootte en vlieghoogte. Deze parameters zullen onderzocht worden in drie scenarios 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 m.b.v. 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

De resultaten tonen 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.

Dit scenario is onderzocht voor een microstrip patch antenne die energieverbruik minimaliseerd. De gekozen optimalisatie maakt echter niet uit aangezien er uitsluitend één UABS beschikbaar is. Het beslissing's algoritme bepaalt welke gebruiker met welke UABS verbonden wordt. Aangezien er maar een UABS beschikbaar is 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. 7. De reden dat de DL straling constant blijft is vanwege power control die ervoor zorgt dat

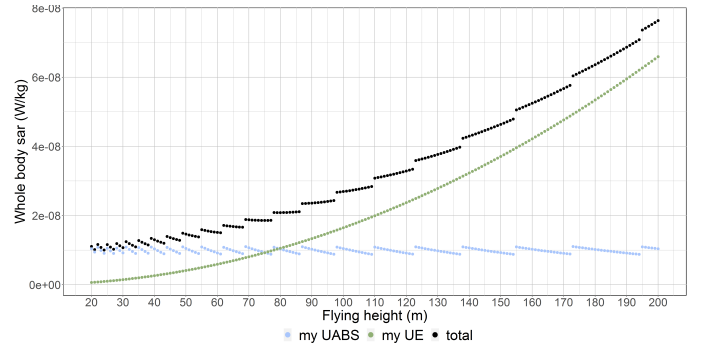


Fig. 7: This figure shows how SAR values from different sources are influenced by different flying altitudes.

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.

B. Toenemende populatie met één UABS

B.1 Variabele vlieghoogte

Een PwrC. Opt. heeft een hogere elektromagnetische blootstelling in vergelijking met een Exp. Opt. netwerk; een fenomeen dat reeds werd vastgesteld bij [10]. 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. Daardoor is het energieverbruik en een PwrC. Opt. netwerk vaak hoger.

Verder toont fig. 8 hoe de elektromagnetische blootstelling toeneemt wanneer de vlieghoogte hoger wordt. Dit komt omdat de waarschijnlijk 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 ver-

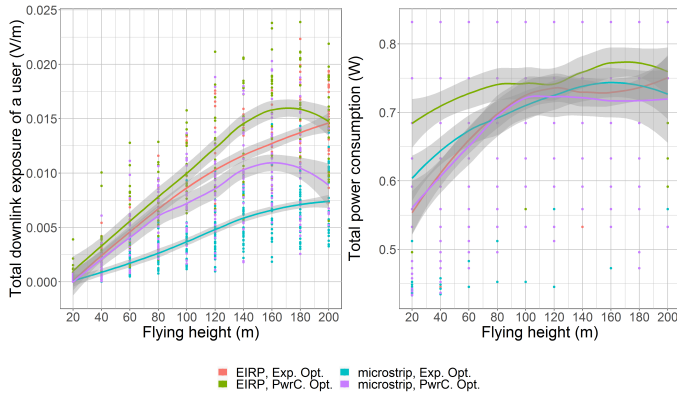


Fig. 8: Fig. (a) toont hoe de vlieghoogte beïnvloedt wordt door DL elektromagnetische straling van de gewogen gemiddelde gebruiker en fig. (b) toont het En energieverbruik van het volledige netwerk wanneer een enkele drone beschikbaar is.

oorzaakt door gebouwen maar door de grotere afstand in het algemeen.

Fig. 9 toont de SAR_{10g}^{wb} van de gewogen gemiddelde gebruiker voor elke individuele bron. De resultaten stellen vast dat de SAR_{myUABS} dezelfde curve toont als deze van de elektromagnetische straling in fig. 8.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} 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 laag maar plausibele waarde aangezien de meeste mensen niet gedekt zijn en daardoor zelf geen straling veroorzaken.

B.2 Variabele aantal gebruikers

Het aantal gedekte gebruikers neemt lineair toe met het aantal personen aanwezig in het netwerk zoals getoond wordt op fig. 10.b. Het toont hoe een isotrope antenne in staat is om meer personen te behandelen in vergelijking met een eenvoudige microstrip patch antenne. Eveneens is een energiezuinig netwerk in staat om meer mensen te behandelen dan een netwerk die 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.a is beïnvloed door fig. 10.a. De elektromagnetische straling neemt af wanneer minder gebruikers be-

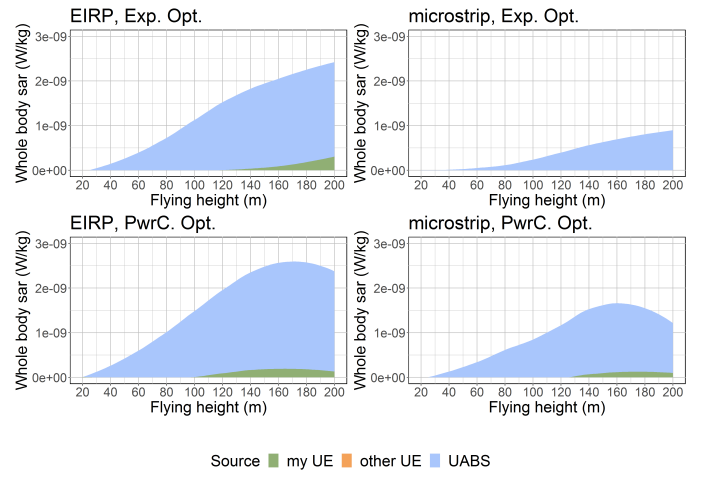


Fig. 9: Elke grafiek komt overeen met een specifieke configuratie en toont hoe de SAT van verschillende bronnen beïnvloed wordt door een toenemende vlieghoogte.

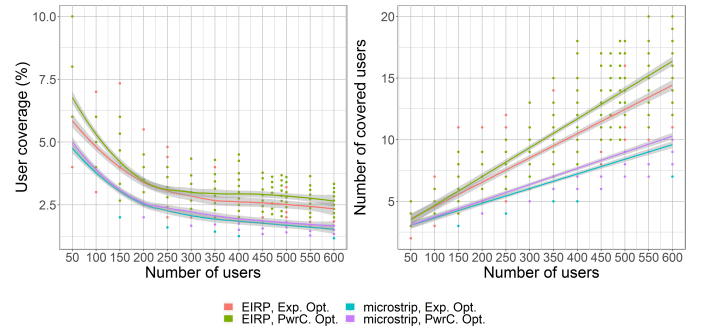


Fig. 10: De invloed van de populatiegrootte op de dekingsgraad.

handeld worden. Bijvoorbeeld, 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 geeft. Verder is fig. 11.b rechtstreeks beïnvloed door fig. 10.b. Wanneer de UABS meer mensen behandeld, 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.

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 $0.15 \text{ } \mu\text{W/kg}$ gemeten wordt. De SAT van de UABS on-

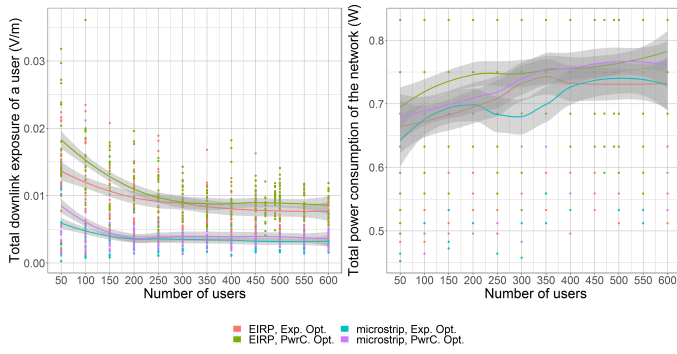


Fig. 11: Deze twee figuren tonen hoe de verschillende populatiegrootte's invloed hebben op de DL elektromagnetische straling (fig. a) en het energieverbruik (fig. b).

dervindt een kleine toename van $0,005 \mu W/kg$. 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 op fig. 12. Het is mogelijk dat deze gebruiker een slechter padverlies geeft door gebouwen of een ietwat grotere afstand. Hierdoor zal de DL SAT van de gebruiker onder de drone toenemen. De elektromagnetische straling's 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 $0,15 pW/kg$.

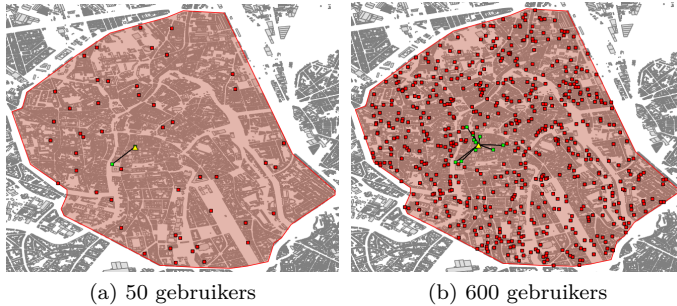


Fig. 12: Overzicht van welke gebruikers die verbonden zijn met de UABS.

C. Ongelimeerd aantal UABS's

C.1 Variabele 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

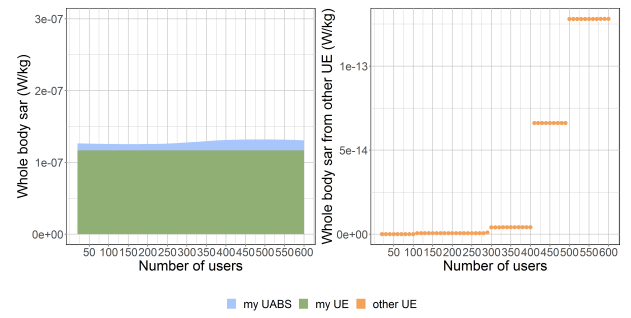


Fig. 13: SAR-waarden voor de gebruiker die zich onder de UABS bevindt.

gemaakt in [10] 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's de blootstelling zal laten zakken naar $11.5 mV/m$ ten koste van een hoger energieverbruik van $54 W$.

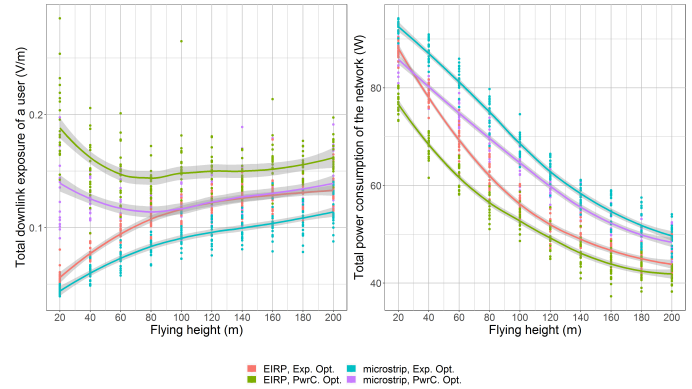


Fig. 14: Deze twee figuren tonen hoe de vlieghoogte invloed heeft op de DL elektromagnetische straling (fig. a) en het energieverbruik (fig. b).

De elektromagnetische blootstelling in fig. 14 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. 15.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. 15.b toont dat het aantal vereiste drones toeneemt wanneer de vlieghoogte lager wordt; een vaststelling die reeds gemaakt is in [18]. 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. 16 toont de bijdrage van elke bron aan de totale SAT. Het eerste gevolg van de vlieghoogte te laten toe-

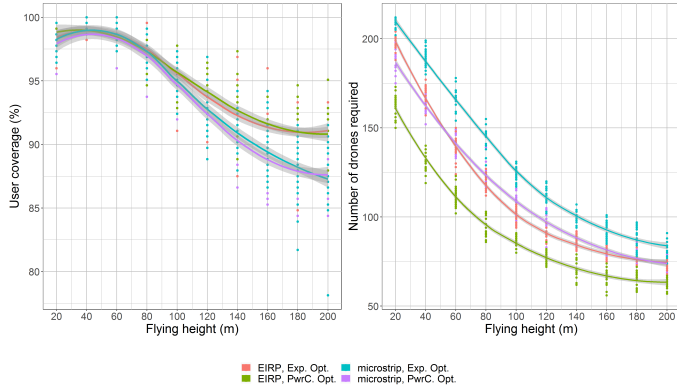


Fig. 15: Deze grafiek toont hoeveel drones vereist zijn op verschillende vlieghoogtes terwijl er getracht wordt om 100% dekking te bereiken.

nemen van 20 naar 200 m is de SAT van de gebruiker zijn eigen apparaat dewelke toeneemt tussen 89 en 141 nW/kg ; een gedraag dat reeds geconstateerd werd in het eerste scenario. Fig. 16 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. De SAR^{myUABS} varieert voor deze hogere vlieghoogtes tussen 160 nW/kg voor een microstrip PwrC. Opt. netwerken en rond 98 nW/kg voor een microstrip Exp. Opt. en EIRP PwrC. Opt. netwerken. De EIRP Exp. Opt. netwerk bevindt zich rond 47 nW/kg . Deze hogere vlieghoogtes zullen tevens resulteren in een toegenomen elektromagnetische straling's 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 de optimalisatiestrategieën.

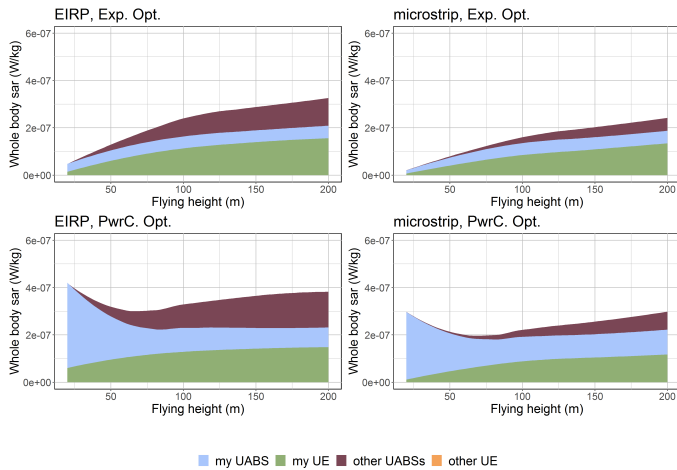


Fig. 16: Elke grafiek komt overeen met één van de vier mogelijke configuraties. De bijdrage van elke bron aan de totale SAT is voor een variërende vlieghoogte.

C.2 Variabele aantal gebruikers

De tweede onderzochte parameter van dit scenario is een variërende populatiegrote terwijl de vlieghoogte zich op 100 m zal bevinden. Fig. 17.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 en dekking van 97% heeft. Fig. 17.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 het voorgaande scenario waarbij, met slechts één UABS, het percentage van behandelde gebruikers afnam voor grotere populaties.

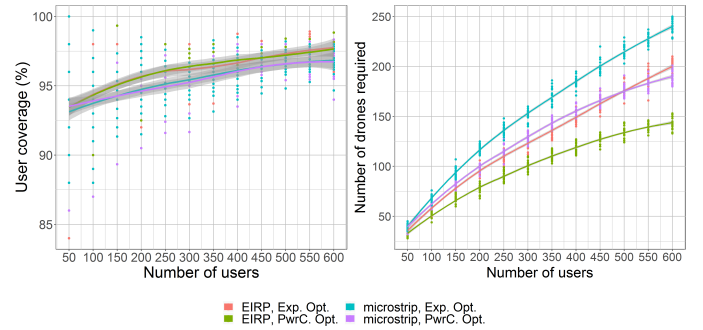


Fig. 17: Deze grafiek toont hoeveel drones vereist zijn op verschillende vlieghoogtes terwijl er getracht wordt een 100% bereikt te hebben.

Fig. 18 toont aan dat de elektromagnetische straling's en het energieverbruik toeneemt 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 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.

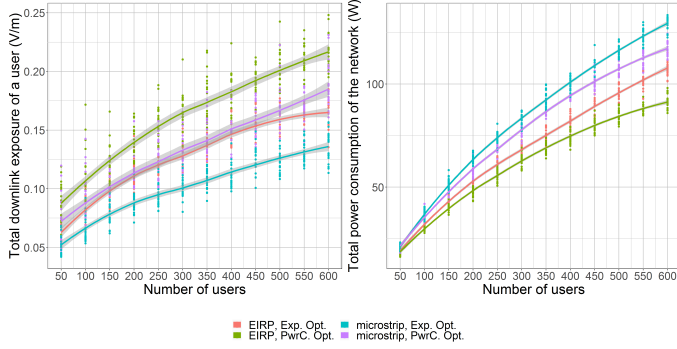


Fig. 18: De invloed van de populatiegrootte op de DL elektromagnetische straling (a) en energieverbruik (b).

Fig. 19 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 een 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 users 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 $SAR^{otherUABS}$ dewelke 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.

VI. Conclusie

Literature showed that a network can be optimized towards either the power consumption of the entire network or the electromagnetic exposure of the average user using a fitness function [10]. However, the fitness function should be used with care considering that UABS's can be placed anywhere as opposed to the transmission towers from [10] who have a predetermined position. In an Exp. Opt. network, this causes a lot of users to get a UABS all by themselves because this is the best approach to minimize exposure. A PwrC. Opt. network on the other hand will try to limit the number of drones in order to save energy. So as a rule of thumb: an Exp. Opt. network will re-

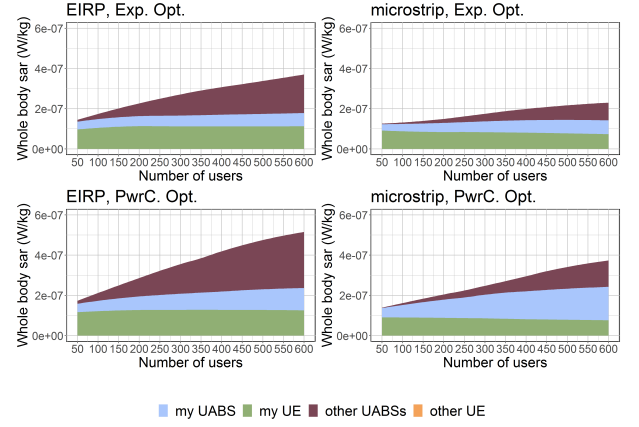


Fig. 19: Elke grafiek komt overeen met een specifieke configuratie en toont aan hoe de SAT van verschillende bronnen beïnvloed wordt door een toenemende populatie.

sult in a lot of low powered devices (increasing the overall power consumption) while a PwrC. Opt. network results in a few high powered devices (increasing the exposure of the average user). If the goal is to remain in the air for a longer period of time, an Exp. Opt. network is recommended because the power consumption of an individual UABS is lower. On the other hand, a PwrC. Opt. network is cheaper because less drones are involved. Moreover, the results show that the electromagnetic radiation in a PwrC. Opt. network (with high powered UABS's) is far below the thresholds enforced by the Flemish government.

The user's main sources of exposure are the user's own device and the UABS who is serving him, followed by all other UABS's in the network. When the population increases, there is not only more radiation from User Equipment (UE) but also from more UABS's that are serving the other users. The exposure from other people's UE is so low that it can be neglected. An Exp. Opt. network will limit the total exposure mainly by trying to reduce the exposure from other UABS's.

A directional microstrip patch antenna is introduced because it gives several advantages compared to omnidirectional antennae. Directional antennae are able to focus their energy there where it is needed, namely towards the ground. Microstrip patch antennae further benefit from their thin and lightweight design. The performance of this directional microstrip patch antenna has been compared to a fictional isotrope antenne. This isotrope antenne has higher exposure and coverage for less power, compared to realistic antennae like microstrip patch antennae because of the absence of attenuation, and can hypothetically be compared with an antenna with a very big aperture angle. This type of antenna can achieve the same coverage with less resources like power and number of drones. A microstrip patch antenna with a more limited aperture angle of 90° requires more resources but causes less sideways radiation. So the exposure from other UABS's will be way less.

Remarkable is that an EIRP Exp. Opt. network behaves

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

High electromagnetic exposure
Low power consumption

Low electromagnetic exposure
High power consumption (many drones)

Fig. 20: Matrix with the four possible configurations, colour-coded based on the results.

very similar to a microstrip PwrC. Opt. network as shown in figure 20. This results in the best of both worlds. The microstrip patch antenna will generate less electromagnetic radiation by design and the power consumption optimization reduces the number of required drones and power. A microstrip patch antenna with an aperture angle of 90° is considered as a good solution but if budget is limited, an antenna with a larger aperture angle would further reduce cost without interfering with the Flemish legislation regarding electromagnetic exposure.

The electromagnetic radiation of an Exp. Opt. network increases with higher flying altitudes. Around 80 metres, the exposure from the user's device surpasses the exposure from the serving UABS. On the other hand, a PwrC. Opt. network shows that the lowest exposure is measured around 70 to 80 metres. Further, the results also show that the number of required drones decreases when the flying height becomes larger; a conclusion that was also made in [18]. When also considering the results from [19] where a flying altitude from 80 metres is suggested for an optimal access and backhaul connectivity, a flying height of 80 metres is also here proposed for the city centre of Ghent.

In short, a PwrC. Opt. network is proposed with a fixed flying height of 80 metres. A microstrip patch antenna with a sufficiently large aperture angle is a good starting point. However, different antenna configurations should be investigated.

Dankwoord

Special thanks to the WAVES research group at Ghent University for providing access to their capacity based deployment tool and therefore making this research possible.

Referencies

- [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] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
 - [27] 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.
 - [28] 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.
 - [29] 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.
 - [30] L. Akhondzadeh-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.
 - [31] 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.
 - [32] 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.
 - [33] 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.
 - [34] 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.
 - [35] 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.
 - [36] 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.
 - [37] 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.
 - [38] A. Sudarsan and A. Prabhu, “Design and development of microstrip patch antenna,” *International Journal of Antennas (JANT) Vol*, vol. 3, 2017.