

Evaluatie van de electromagnetische 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. Tevens groeit ook de bezorgdheid bij de menigte over de electromagnetische straling die hierbij gebruikt wordt. De overheid hanteert dan ook strenge richtlijnen waaraan mobiele toestellen en zendmasten moeten voldoen.

Dit onderzoek tracht de specifieke absorptie snelheid van elektromagnetische straling in kaart te brengen door rekening te houden met alle mobiele toestellen en zendmasten. Om dit te verwezelijken wordt gebruik gemaakt van een tool ontwikkeld door de onderzoeksgroep WAVES aan de UGent. Deze tool simuleert een volledig netwerk waarbij zendmasten bevestigd worden aan drones. Dit onderzoek observeert verder hoe deze drones kunnen worden aangestuurd zodoende dat bepaalde doelstellingen zoals het minimaliseren van energieverbruik of electromagnetische straling bereikt kunnen worden.

Uit de resultaten blijkt dat...

Keywords—LTE, electromagnetische blootstelling, energieverbruik, drone, femtocell, microstrip patch antenna, radiation pattern, specific absorption rate (SAR)

I. Introduction

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) apparatuur tot volwaardige zelf-rijdende autos.

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 is 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 als enige oplossing zagen om de wetgeving te negeren en de electromagnetische straling te laten toenemen zodoende dat toch iedereen behandeld kon worden [1].

De electromagnetische straling die vrijkomt bij netwerken kunnen echter niet met onachtzaamheid behandeld worden. Onderzoek toont aan dat buitensporige electromagnetische straling verscheidinge biologische neveneffecten kunnen veroorzaken [2], [3]. Het wordt dus duidelijk dat electromagnetische 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 electromagnetische straling. Verscheidene publicaties bespreken hoe electromagnetische straling berekend kunnen worden maar overwegen zelden alle verschillende bronnen van straling.

Dit onderzoek stelt een methode voor waarbij rekening gehouden wordt met electromagnetische 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 van electromagnetische straling van elke bron duidelijk geïdentificeerd worden.

Het gedrag van de electromagnetische straling en het energieverbruik zullen geanalyseerd worden door de tool toe te passen op verschillende scenarios door gebruik te maken van verschillende soorten antennes, vlieghoogtes en bevolkingsdichtheden. Waarden zoals Specific Absorptietempo (SAT), electromagnetische straling en energieverbruik zullen inzicht geven in hoe het netwerk reageert op deze veranderde scenarios en hoe het netwerk ernaar te optimaliseren.

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 drone netwerk wat een geschikt startpunt is voor dit onderzoek.

II. State of the Art

A. Electromagnetische Straling

Personen in een mobiel netwerk worden blootgesteld aan verscheidene bronnen van electromagnetische straling, uitgedrukt in V/m . Eenmaal deze electromagnetische straling geabsorbeerd wordt door het menselijk lichaam spreken we van het specifieke absorptietempo (SAT). wat uitgedrukt wordt in W/kg . 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 veld-

sterkte voor elk punt niet meer dan 31 V/m mag bedragen. [4], [5]. De maximale SAT voor het volledige lichaam komende van een mobiel apparaat verspreid over een 10 g tissue (SAR_{10g}) is beperkt tot $2W/kg$ [6].

Verschillende onderzoeken berekenen de electromagnetische veldsterkte van verschillende bronnen [7], [8], [9], [10] waarbij sommigen de uplink (UL) electromagnetische veldsterkte geconverteerd wordt naar locale SAT [9], [10]. Met de naderende 5G technologie werd [11] gepubliceerd waarbij beschreven wordt hoe deze locale SAT-waarden van alle verschillende bronnen berekend kunnen worden en bij elkaar opgeteld worden. Uiteindelijk beschrijft [12] hoe de electromagnetische 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 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 bewaking of aanvallen zonder piloten in gevaar te brengen [13]. 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 [14] 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 [15] hoe drones gebruikt kunnen worden voor Long-Term Evolution (LTE) en Zeng et al. presenteert in [13] een handleiding waarbij uitdagingen zoals energieverbruik, mobiliteit en de richting van de antenne voor een 5G netwerk besproken worden. In [16], Deruyck et al. ontwikkelt een deployment tool voor een drone gestuurd netwerk voor rampsituaties waarbij een ideale vlieghoogte van 100 meter aangeraden wordt. Dit wordt verder uitgebreid in [17] 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 [18] 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 bevinden. Deze algoritmen trachten bepaalde doelstellingen zoals minimaal energieverbruik of kortste vlieg afstand te bereiken [19], [20], [21], [22]. Deze optimalisatie kan gebeuren door verschillende implementaties waaronder exacte algoritmen of machinaal leren

[18], [23].

Onderzoek waarbij de electromagnetische straling gelimiteerd wordt is echter beperkt. Deruyck et al. bespreekt in [8] hoe een conventioneel mobiel netwerk geoptimaliseerd kan worden zodoende dat het energieverbruik van het volledige netwerk minimaal wordt of de electromagnetische blootstelling van een individu. Echter onderzoek waarbij een drone-gestuurd netwerk geoptimaliseerd wordt naar electromagnetische straling is door de auteur niet gekend.

C. Technologies

Voor het ontwikkelen van het netwerk zullen de meer robuuste drones van [16] 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 electromagnetische straling ondervinden zonder onderbrekingen, wordt frequency division duplexing gebruikt.

De antenne op de drone zullen 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 [24]. 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 [13].

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 [13]. Hiervan bestaan verschillende soorten zoals monopoolantennes, dipoolantennes en vleugel antennes [25], [26], [27], [28]. Een andere vorm van antennes zijn directionele antennes dewelke energie besparen door de electromagnetische straling daar te focussen waar het nodig is. Eén soort hiervan dat uitgebreid onderzocht zijn in verscheidene antenne-arrays zijn de microstrip-antennes [29], [30], [31]. Deze voorzien verschillende voordelen ten opzichte van meer traditionele antennes [32], [33] zoals het beperkte gewicht, lage productiekosten en aerodynamica.

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 and geprinte dipool antennes. dewelke allemaal gelijkende karakteristieken hebben [32], [33]. 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 cirkulaire 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 [32].

III. Methodologie

A. Electromagnetische Straling

A.1 Totale Electromagnetische Straling

De totale SAT voor het volledige lichaam ($SAR_{10g}^{wb,total}$) van een individue can berekend worden als een eenvoudige som van de SAT-waarden van de verschillende bronnen. Dit is gebaseerd op de formule in [11] 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.

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

In bovenstaande formule staat *wb* voor whole body oftewel het volledige lichaam en *UE* voor User Equipment oftewel het mobiele apparaat op de grond. De eerste parameter, $SAR_{10g}^{wb,myUE}$, duidt de geabsorbeerde electromagnetische straling aan komende van de gebruik zijn eigen apparaat. Ondanks het feit dat de UL straling bedoeld is voor het UABS die deze gebruiker behandelt, een deel van deze straling wordt ook geabsorbeerd door zijn gebruiker. Dit komt vanwege het omnidirectionele gedrag van de gsm zijn antenne. Een tweede parameter is $SAR_{10g}^{wb,myUABS}$ dewelke de straling aanduidt veroorzaakt door downlink (DL) dataverkeer, komende van de UABS die deze gebruiker behandelt. Als derde parameter hebben we $SAR_{10g}^{wb,otherUE}$ dewelke de straling aanduidt veroorzaakt door andere gebruikers hun mobiel apparaat. Als laatste stelt $SAR_{10g}^{wb,otherUABSs}$ de DL straling voor komende van alle UABSs die andere gebruikers behandelen. Een illustratie is te vinden in 1 waarbij de groene pijl straling in het nabije veld voorstellen en alle andere pijlen straling in het verre veld voorstellen.

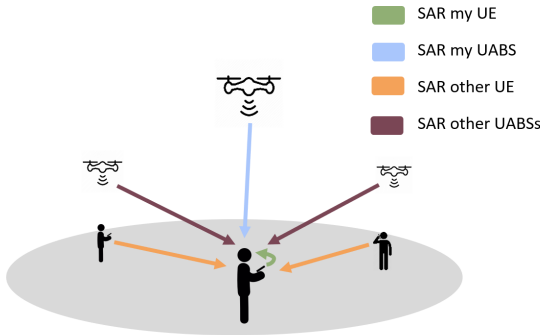


Fig. 1

Deze illustratie toont hoe de gemiddelde gebruiker (hier getoont in het midden) beïnvloed wordt door verschillende bronnen van electromagnetische straling.

A.2 Electromagnetische straling van een individuele bron

De electromagnetische veldsterkte berekenen in een bepaald punt in het verre veld wordt gedaan worden voor alle UABS's en alle mobiele apparaten behalve het apparaat in dat punt. Dit zal namelijk straling in het nabije veld zijn en dient anders berekend te worden. De electromagnetische veldsterkte E voor het individual 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)-waarde te hebben berekend [7], [8]. Dit kan bekomen worden door de zendvermogen P_t op te tellen met de zendversterking G_t en het aftrekken van het kabelverlies L_t . 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.

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

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 [16].

A.3 Samenvoegen van meerdere bronnen

De totale electromagnetische 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 electromagnetische 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. 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 electromagnetische veldsterkte naar SAT

Formule 1 verwacht dat de SAT waarden in functie van het volledige lichaam uitgedrukt zijn. Om de electromagnetische veldsterkte te kunnen omzetten naar deze SAT-waarden dient er een verschil gemaakt te worden tussen bronnen in het nabije veld ($SAR^{wb,nf}$) en het verre veld

($SAR^{wb,ff}$). To make this calculation possible, a distinction has to be made between near-field SAT and far-field SAT ($SAR^{wb,ff}$). $SAR_{10g}^{wb,myUABS}$ 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 [12]. Onderzoek toont aan dat 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 [12]. WiFi opereert in het 2400 MHz spectrum wat heel dichtbij LTE valt (2600 MHz). Daarom wordt in [12] aangenomen dat de conversie constante ook van toepassing is voor LTE.

Het berekenen van SAT in het verre veld word bijgevolg 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 zeldvermogen P_{tx} van het apparaat te vermenigvuldigen met de conversie constante voor het nabije veld.

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

B. Microstrip Patch antenna

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 [32].

De dimensies van de antenne hangen af van de gebruikte frequency en de eigenschappen van het diëlectrisch substraat. De antenne zal opereren met een frequency 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 [33], [34]. Voor dit onderzoek is glas het gekozen substraat vanwege zijn hogere diëlectrische constante van $\epsilon_r = 4.4$ ten opzichte van andere materialen zoals Teflon met een diëlectrische constante van $\epsilon_r = 2.2$ [33]. Glass met een hoogte van 2.87 mm zal de dimensies van het volledige antenne oppervlakte verminderen

| beschrijving | symbool | waarde |
|--------------------------|--------------|-----------|
| middenfrequentie | f_0 | 2600 Hz |
| diëlectrische constante | ϵ_r | 4.4 |
| Hoogte van het substraat | h | 0.00287 m |

TABLE I

Overzicht van de configuratie parameters

wacht voordelig is bij de beperkte ruimte die beschikbaar is op een drone.

De dimensies van de stralingsplaat kunnen berekend worden met de formules uit [33], [34]. 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 figuur 2 en zal resulteren in het stralingspatroon getekend in figuur 3.

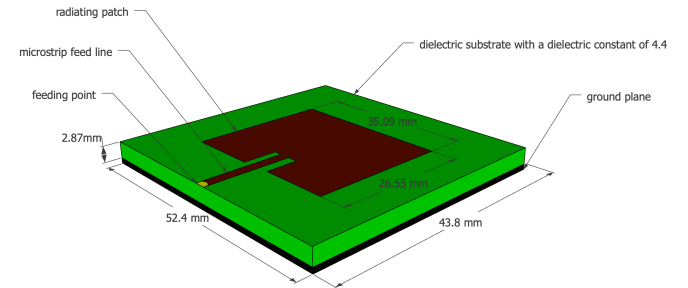


Fig. 2

Design van een microstrip patch antenne.

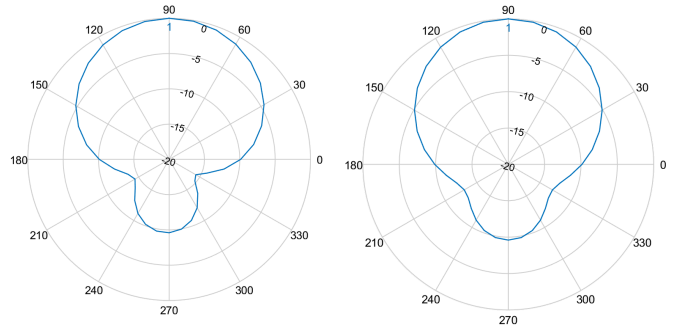


Fig. 3

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

C. Optimaliseren van het netwerk

Deruyck et al. bespreekt in [8] hoe een traditioneel mobiel netwerk geoptimaliseerd kan worden naar Hoewel een toenemend zendvermogen wel degelijk resulteert in een toenemende electromagnetische veldsterkte is deze regel niet van toepassing indien we het energieverbruik bekijken over het hele netwerk heen. De auteurs van [8] tonen een omgekeerd equivalente relatie aan. De reden hierachter is dat

het vaak goedkoper is op gebied van energie om de electromagnetische straling van een al 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 [8].

$$f = w * \left(1 - \frac{E_m}{E_{max}}\right) + (1 - w) * \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right) * 100 \quad (8)$$

Formule 8 geeft een gewicht terug dat aanduidt hoe goed het netwerk presetted. w is de belangrijkheidsfactor die loopt van 0 tot 1, grenzen inbegrepen. Een w gelijk aan 0 betekend dat electromagnetische 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 electromagnetische 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 gewogen electromagnetische straling van de 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 extremas [8]. 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 9 waarbij w_1 en w_2 de gewichten zijn van respectievelijk de mediaan en 95^{ste} percentiel. Aangezien verondersteld wordt dat beiden waarden een gelijkwaardige rol spelen zullen beiden een gewicht van 0.5 krijgen.

$$E_m = \frac{w_1 * E_{50} + w_2 * E_{95}}{w_1 + w_2} \quad (9)$$

D. Simulatie Tool

D.1 Main Algorithm

First, a description of the area has to be provided to the tool. This is done with so-called shape-files. These files contain a complete description about the shape of the buildings. Thereafter, users are uniformly distributed over the area and a temporary UABS is positioned above each user. Now, the decision algorithm needs to decide which of these UABSs can actually remain and how hard each one should be radiating. Once the decision algorithm is done, the tool checks whether the number of online UABSs does not exceed the capacity of the facility where the UABSs are stored. If this is the case, the UABSs covering the least amount of users will be removed.

D.2 Decision Algorithm

Solving the network is done by the decision algorithm and starts by calculating the path loss between all users

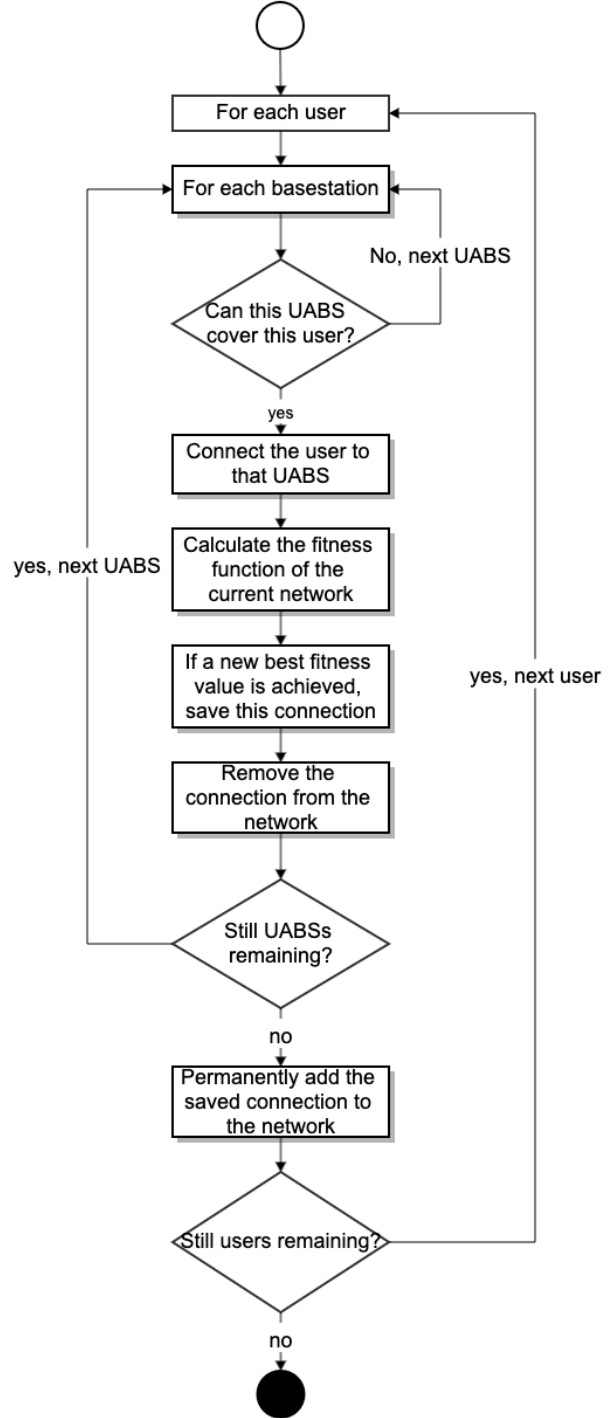


Fig. 4
Flowchart of the decision algorithm.

and between users and UABSs. Thereafter, the tool iterates over each user and tries to connect that user to each UABS. This connection is not always possible. A UABS might be saturated with users and will not be able to cover yet another one or maybe the user is so far away that in order to cover that user, the UABS would have to exceed

its maximum allowed input power. If however a connection is possible, the user will be connected to that UABS and the fitness function (eq. 8) is applied. This is repeated for each UABS. Only the connection which results in the best fitness value for the entire network will be used. Thereafter, the tool shifts to the next user. When the last user has been processed, the network is fully designed for an unlimited number of drones and the result is returned to the main algorithm for further processing. The flowchart of this algorithm is given in figure 4.

IV. Scenarios

The default configuration is given in table II and is always applicable unless mentioned otherwise.

| | |
|-------------------------------|--------------------------------|
| Broadband cellular network | |
| technology | LTE |
| frequency | 2.6 GHz |
| UAV | |
| carrier power | 13.0 A |
| average carrier speed | 12.0 m/s |
| average carrier power usage | 17.33 Ah |
| carrier battery voltage | 22.2 V |
| Femtocell antenna | |
| maximum P_{tx} | 33 dBm |
| antenna direction | downwards (az: 0°; el: 90°) |
| gain | 4 dBm |
| feeder loss | 2 dBm |
| implementation loss | 0 dBm |
| radiation pattern | EIRP or microstrip patch |
| height | 100m |
| UE Antenna | |
| height | 1.5m from the floor |
| gain | 0 dBm |
| feeder loss | 0 dBm |
| radiation pattern | EIRP |
| number present in the network | 224 |

TABLE II
Overview of default configuration values.

Three main scenarios will be investigated. The first one has only one user and one UABS present in the network. SAR, electromagnetic exposure, power consumption and antenna transmission power are investigated at different flying heights.

In a second scenario, the network is expanded for multiple users while still considering only one UABS. The scenario is divided into two cases. One with a variable flying height but with a fixed number of 224 users as is average on an usual day at 5 p.m. in Ghent [16]. In the other case, the number of users varies but the flying height is set to 100 metres [16]. The power consumption, electromagnetic exposure and specific absorption rate are investigated for each case.

The third scenario is quite similar to the previous scenario. The same two cases are investigated, but now an unlimited number of UABSs is available.

Each case from each scenario consists out of four possible configurations. There are two possible antennae, namely EIRP and microstrip patch antenna, which can both be applied in a PwrC. Opt. network or an Exp. Opt. network.

It is important to note that all measured values are strictly limited to the sources mentioned in the previous section and thus only cover data traffic between User Equipment (UE) and UABSs. Any other potential sources like backhaul links will not be covered.

An overview of the simulation configuration scenarios is presented in figure 5

| | | 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. 5
Matrix with the four possible configurations

V. Results

A. One User and One Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

The results show that for a varying flying height, a logarithmic relationship exists between the P_{tx} and the flying height. This is mainly caused by the logarithmic scale in which the decibels of the P_{tx} are expressed. So while 10 dBm equals 10 mW, 20 dBm equals 100 mW. Each time the flying height becomes too large to cover, the P_{tx} increases with one dBm. When using the default configuration, with a maximum P_{tx} of 33 dBm, a UABS can fly up to 387 m before losing connection in a free line of sight (LOS) scenario.

This scenario is investigated with a microstrip patch antenna using power consumption optimization. However, the chosen optimization strategy does not really matter because the decision algorithm decides which user needs to be connected to which UABS. Since only one UABS is available, both optimization strategies will behave identical. Further, also the used antenna will not make any difference. The user is namely positioned in the perfect centre of the main beam where there is no attenuation experienced for both antennae.

When investigating this scenario at different flying heights, we notice that the UL radiation increases exponentially while the DL radiation remains constant during the entire time. The reason that the DL radiation remains constant is because of power control which makes sure that no more power is used than strictly necessary. So at lower flying altitudes, there is less path loss and the UABS will therefore reduce the P_{tx} . We can therefore confirm that the electromagnetic exposure is a constant fraction of power and distance. The UL radiation starts very low but surpasses the DL radiation around 80 metres.

B. Increased Population with one UABS

B.1 Variable Flying Height

A PwrC. Opt. network has higher exposure compared to an Exp. Opt. network; a behaviour that was already proven by [8]. However, for this scenario, a PwrC. Opt. network will also result in a higher power consumption. To understand this, the behaviour of the deployment tool needs to be understood first. A PwrC. Opt. network will result in a few high powered UABSs because increasing the input power of an antenna costs less than activating a new UAV. Likewise, an Exp. Opt. network generates a lot of low powered UABSs because the lower the power of the antenna, the lower the exposure. This has the consequence that the cover radius is less and therefore more UAVs, which cost more energy, are required. When only a limited amount of UABSs are available, like only one in this scenario, the tool will only keep UABSs which cover the most users. Therefore, the power consumption in a PwrC. Opt. network is much more higher.

Further, the results also show that the exposure increases with higher flying altitudes because there is a lower probability of having non line of sight (NLOS) links by obstructing buildings. This has as consequence that more users become covered. The increasing electromagnetic radiation is however not unlimited. At even higher flying altitudes, the distance between a given UABS and some users further away becomes too large causing the coverage to decrease again. When this decrease occurs depends on the configuration. A PwrC. Opt. network tends to decline earlier than an Exp. Opt. network.

When replacing the fictional EIRP antenna by a microstrip patch antenna, the percentage of covered users drops for both optimization strategies. This is because users, who have a higher horizontal distance between themselves and the UABS, experience a higher attenuation.

The results further show that the radiation from the UABS is the main factor followed by the near-field radiation from the user's own device. The far-field radiation from other UE barely contributes anything.

B.2 Variable Number of Users

Also the results from this case show how EIRP antennae designs are able to cover more users than microstrip patch antennae just like PwrC. Opt. networks will reach more users than Exp. Opt. networks. The contribution to the

total SAT from each individual source is identical to the previous scenario.

There is still only one UABS available. When population grows, more users become uncovered and therefore the average electromagnetic exposure decreases. For example, an EIRP PwrC. Opt. network will have the highest exposure and therefore covers the most users as opposed to a microstrip patch antenna in an Exp. Opt. network which will radiate the least and thus has the lowest number of covered users.

While the population grows, more and more users become uncovered causing the average SAR to drop. However, this does not conclude that by increasing the population, the SAR of a user who is directly beneath a UABS would be less. To investigate this, a user is positioned in the middle of the city centre of Ghent and a UAV is positioned above him. Initially, only 49 people are active around him. The SAT of our central user is monitored while the population around him is growing. Figure 6 shows with the black lines which users are connected. The left map is for only 50 users and shows that only one user is connected besides our central user. The map on the right considers 600 users and shows much more connected users. The results show that the UL SAT of the central user remains constant; a normal behaviour since the flying altitude does not change. The SAT from the UABS experiences a slight increase. When the population grows, more users become available and some will spawn near the central user. The UABS will likely decide to cover these users as well as visible in figure 6. These users might have a slightly worse path loss because of obstructing buildings or a somewhat bigger distance. The UABS reacts to this by increasing its power consumption causing an increase in the DL SAT for the central user. The results further also show that the SAT from other UE increases when the population increases. But as mentioned before, it is much less compared to the other sources.

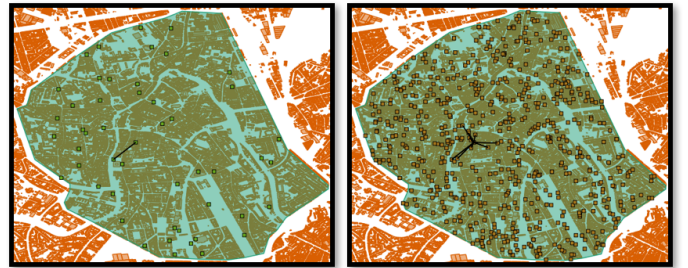


Fig. 6

Overview of which users are connected to the UABS. The map on the left is for 50 active users while the map on the right considers 600 active users.

C. Unlimited Number of UABSs

C.1 Variable Flying Height

The same cases as in the previous scenario are investigated. Only now, an unlimited number of UABSs is

available. The results prove that the different optimization strategies work as intended. PwrC. Opt. networks have indeed a lower power consumption but therefore result in higher electromagnetic radiation. On the other hand, an Exp. Opt. network will reduce the electromagnetic exposure by using more UAVs and thence also increase the network's power consumption. This conclusion was already made in [8] and is supported by these results.

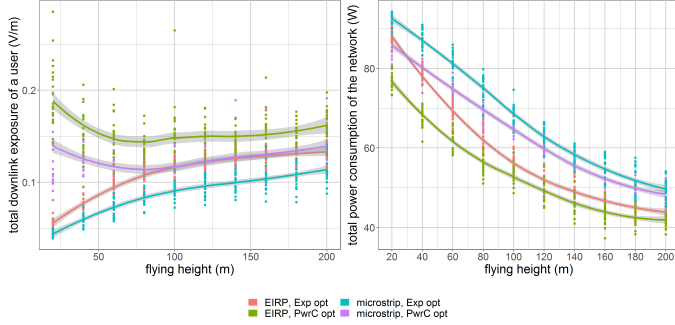


Fig. 7

These two figures show how the flying height influences the downlink electromagnetic radiation of the average user (left) and power consumption of the entire network (right) for an unlimited number of drones.

The exposure in figure 7 shows that an Exp. Opt. network increases logarithmically while the PwrC. Opt. network rather has a concave relationship with the flying height, and has its lowest point at around 70 metres.

At a flying height of 20 m, the Exp. Opt. network has on average 220 to 224 UABSs. That is (almost) one UABS for each user so it is logical that the electromagnetic exposure is very low. The number of UAVs in a PwrC. Opt. network is much less in order to save energy but it is still able to achieve the same percentage of coverage. This is done by increasing the radiation so the cover radius would become larger. The results further show that the network profits from increasing the flying altitude. Not only less UAVs are needed but also the power consumption is lower. Both can be explained by the lower path loss when UABSs fly higher.

Figure 8 shows how each source contributes to the total SAT. A first consequence of higher flying altitudes is the increase in electromagnetic radiation from the user's own device; a behaviour also explained in the first scenario. A second consequence is that also the exposure from 'other UABSs' increases, caused by lower path loss from less obstructing buildings. The figures from 8 further also clearly show that this increase in electromagnetic radiation will be less for a microstrip patch antenna. The reason behind this is that energy will be more focussed towards the ground and there is less sideways radiation because of attenuation.

C.2 Variable Number of Users

When the flying height of the UABSs is fixed to 100 metres and the density of the population increases, also the number of required UAVs increases in order to reach

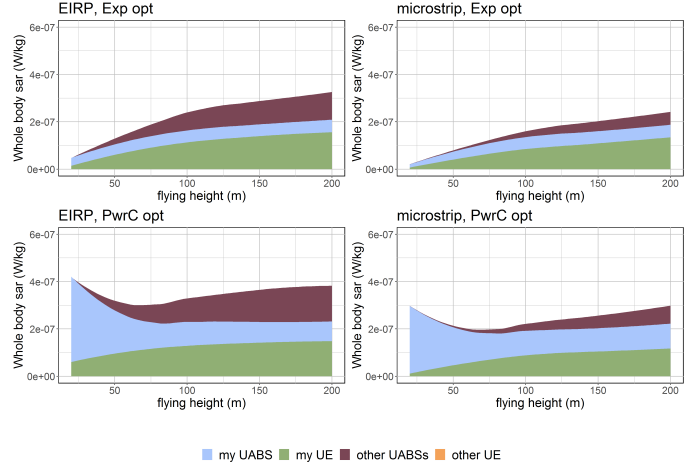


Fig. 8

Each chart corresponds with one of the four possible configurations. The contribution of each source towards the total SAT for a varying flying height is shown.

a 100 % coverage. Figure 9 shows that when the number of UABSs and users increases, also the electromagnetic exposure and power consumption increases. Once again, the EIRP antenna in a power consumption network has the highest exposure for the lowest power consumption and a microstrip patch antenna in an Exp. Opt. network the lowest exposure for the highest power consumption. The two other combinations are in the middle and behave very similar.

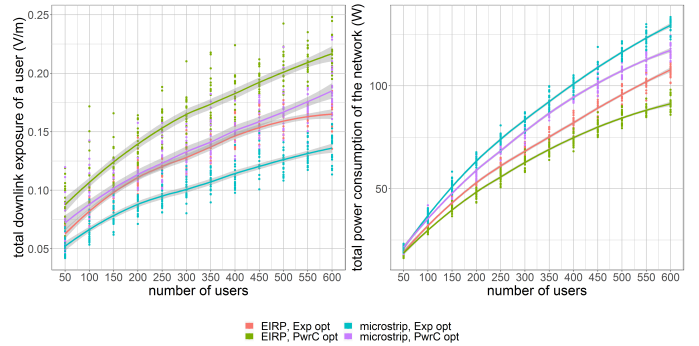


Fig. 9

These two figures show how the number of users influences the downlink electromagnetic radiation of the average user (left) and power consumption of the entire network (right) for an unlimited number of drones.

When looking at the different contributions to the total SAT in figure 10, we see that the weighted average SAT from the users' own device and from the serving UABS remains constant. The flying altitude is always the same so also the required energy to cover that distance will remain the same. The only SAT values that increase are the DL

SAT from other UABSs and the UL SAT from other UE. When more users come online, also more UAVs will be radiating. The electromagnetic radiation will thus increase for both types of sources. Moreover, there is very little path loss at this flying altitude since it is higher than the average building.

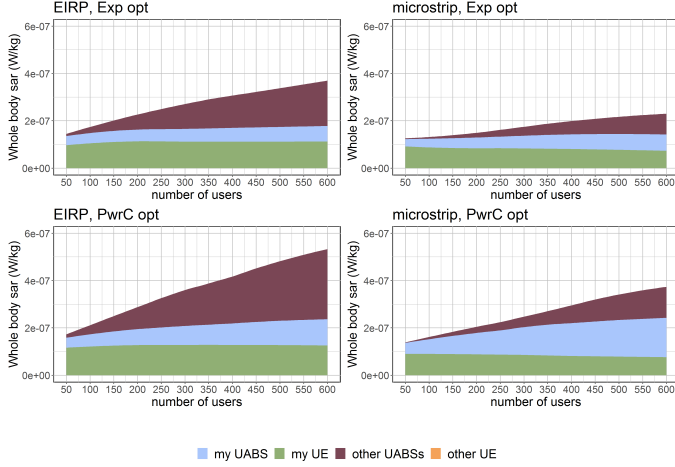


Fig. 10

Each chart corresponds with one of the four possible configurations. The contribution of each source towards the total SAT for a varying number of users shown.

VI. Conclusion

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 [8]. However, the fitness function should be used with care considering that UABSs can be placed anywhere as opposed to the transmission towers from [8] 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 result 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 UABSs) 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 UABSs in the network. When the population increases, there is not only more radiation from UE but also

from more UABSs 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 UABSs.

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 UABSs will be way less.

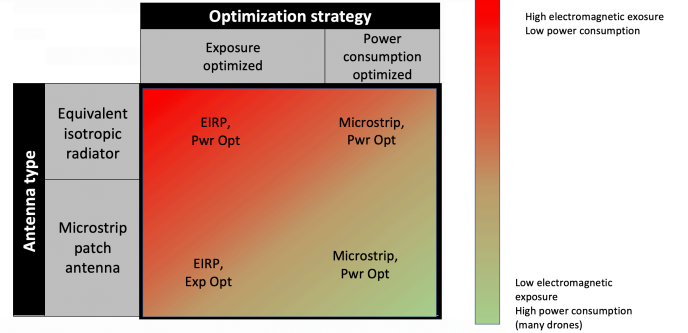


Fig. 11

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

Remarkable is that an EIRP Exp. Opt. network behaves very similar to a microstrip PwrC. Opt. network as shown in figure 11. 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 [16]. When also considering the results from [17] 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.

Acknowledgement

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.

References

- [1] "Base overschreed stralingsnormen na aanslagen," De standaard, 2019.
- [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] "Normen zendantennes." <https://omgeving.vlaanderen.be/normen-zendantennes>. Accessed: 19-03-2020.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] B. A. Arand, R. Shamsaei, 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] A. Sudarsan and A. Prabhu, “Design and development of microstrip patch antenna,” International Journal of Antennas (JANT) Vol, vol. 3, 2017.