

Evaluating Human Electromagnetic Exposure in a UAV-aided Network

Thomas Detemmerman

Student number: 01707806

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

Counsellors: Dr. ir. Margot Deruyck, German Dario Castellanos Tache

Master's dissertation submitted in order to obtain the academic degree of
Master of Science in Information Engineering Technology

Academic year 2019-2020

Acknowledgement

I would like to thank Prof. dr. ir. Wout Joseph, Prof. dr. ir. Luc Martens and Dr. ir. Margot Deruyck for providing me access to their capacity based deployment tool which allowed me to complete my research regarding electromagnetic exposure but also for helping me to map the road of my research. Further I would like to express my gratitude to MPhil German Dario Castellanos Tache who followed up my weekly progress by providing answers to questions or problems I had and gave me extensive feedback and suggestions to the results I booked. I would also like to show my deepest appreciation towards mrs Carine Lambrecht and miss Anke Blommaert for taking a second - and even a third - eye on the linguistic part of this document but also for the general mental support during this journey making this entire degree possible, allowing me to stand where I am today.

The author(s) gives (give) permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use. In all cases of other use, the copyright terms have to be respected, in particular with regard to the obligation to state explicitly the source when quoting results from this master dissertation.

Evaluating Human Electromagnetic Exposure in a UAV-aided Network

by Thomas Detemmerman

Master's dissertation submitted in order to obtain the academic degree of Master of Science in
Information Engineering Technology industriële wetenschappen: informatica
Academiejaar 2019-2020

Supervisors: Prof. dr. ir. Wout Joseph, Prof. dr. ir. Luc Martens
Counsellors: Dr. ir. Margot Deruyck, MPhil. German Dario Castellanos Tache
Faculty of engineering and architecture
Ghent University

Abstract

Society relies more than ever on the availability of wireless networks. Due to the mobility of a UAV, a UAV-aided network is able to provide this necessary access in case the existing terrestrial network gets damaged. However, the public is concerned about the potential health effects of the electromagnetic radiation caused by these networks. Therefore, mobile devices and base stations have to comply to strict legislation enforced by the government.

This research investigates how different scenarios influence power consumption, electromagnetic exposure and specific absorption rate. These different scenarios are defined by various flying heights, number of UAVs available and population sizes. Further, the proper microstrip patch antenna is defined and attached to the UAV. The antenna will be responsible for the communication between the UAV and the users it covers. Its performance is compared to an equivalent isotropic radiator. Thereafter, the network will be optimized towards goals like electromagnetic exposure of the average user or power consumption of the entire network; which results in conflicting requirements.

To accomplish this goal, the capacity based deployment tool of the WAVES research group at Ghent University will be extended so it would be able to calculate electromagnetic exposure. Further, the tool now also provides support to optimize the networks towards electromagnetic exposure or power consumption.

It looks from the results that the microstrip patch antenna with an aperture angle of 90° is a suitable starting point for an antenna. This directional antenna focusses electromagnetic radiation where it is needed. Unwanted sideways radiation is therefore reduced by design. The sufficiently large aperture angle covers enough users. The antenna is recommended to be deployed in a power consumption optimized network since less drones are required and therefore also less expensive. The optimal flying height for the city centre of Ghent is believed to be

situated at 80 metres since lower flying heights require much more UABSs and higher flying heights have a negative influence on the electromagnetic exposure. When this configuration is applied to a network with 224 users, the average user will experience a SAR of around $0.2 \mu W/kg$ and a downlink electromagnetic exposure of $114 mV/m$. The network will require on average 96 UABSs with a total power consumption of $69.5 W$. That is $7.24 W$ per UABS.

Keywords

Deployment tool, Electromagnetic exposure, LTE Microstrip patch antenna, Power consumption, Radiation pattern, Specific absorption rate (SAR), UAV, Unmanned aerial base stations Wireless access network, Emergency network.

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

door

Thomas Detemmerman

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master of Science in de industriële wetenschappen: informatica
Academiejaar 2019-2020

Promotoren: Prof. dr. ir. Wout Joseph, Prof. dr. ir. Luc Martens
Begeleider: Dr. ir. Margot Deruyck, MPhil. German Dario Castellanos Tache
Faculteit Ingenieurswetenschappen en architectuur
Universiteit Gent

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, electromagnetische 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 istorope antenne. Vervolgens zal het netwerk geoptimaliseerd worden naar electromagnetische 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 electromagnetische straling berekend kan worden. Verder is de tool nu ook in staat om te optimaliseren naar electromagnetische 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 electromagnetische straling daar waar het nodig is. Ongewenste zijwaardse 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 electromagnetische straling laten toenemen. Wanneer deze configuratie toegepast wordt op een netwerk met 224 zal de gewogen gemiddelde gebruiker een SAR ondervinden van $0.2 \mu\text{W}/\text{kg}$ en een downlink electromagnetische straling van 114 mV/m . Het netwerk zal hiervoor gemiddeld 96 UABSs vereisen met een totaal energieverbruik van 69.5 W . Dat is 7.24 W per UABS.

Trefwoorden

LTE, Electromagnetische blootstelling, Energieverbruik, Drone, Femtocell, Microstrip patch antenna, Stralingspatronen, Specific absorption rate (SAR).

Evaluating Human Electromagnetic Exposure in a UAV-aided Network

Thomas Detemmerman

Supervisor(s): Prof. dr. ir. Wout Joseph, Prof. dr. ir. Luc Martens

Abstract—Society relies more than ever on the availability of wireless networks. Due to the mobility of a UAV, a UAV-aided network is able to provide this necessary access in case the existing terrestrial network gets damaged. However, the public is concerned about the potential health effects of the electromagnetic radiation caused by these networks. Therefore, mobile devices and base stations have to comply to strict legislation enforced by the government.

This research investigates how different scenarios influence power consumption, electromagnetic exposure and specific absorption rate. These different scenarios are defined by various flying heights, number of UAVs available and population sizes. Also, the proper microstrip patch antenna is defined and attached to the UAV. The antenna will be responsible for the communication between the UAV and the users it covers. Its performance is compared to an equivalent isotropic radiator. Thereafter, the network will be optimized towards goals like electromagnetic exposure of the average user or power consumption of the entire network; which results in conflicting requirements.

To accomplish this goal, the capacity based deployment tool of the WAVES research group at Ghent University will be extended so it would be able to calculate electromagnetic exposure. Further, the tool now also provides support to optimize the networks towards electromagnetic exposure or power consumption.

It looks from the results that the microstrip patch antenna with an aperture angle of 90° is a suitable starting point for an antenna. This directional antenna focusses electromagnetic radiation where it is needed. Unwanted sideways radiation is therefore reduced by design. The sufficiently large aperture angle covers enough users. The antenna is recommended to be deployed in a power consumption optimized network since less UAVs are required and therefore also less expensive. The optimal flying height for the city centre of Ghent is believed to be situated at 80 metres since lower flying heights require much more UABSs and higher flying heights have a negative influence on the electromagnetic exposure. When this configuration is applied to a network with 224 users, the average user will experience a SAR of around $0.2 \mu\text{W}/\text{kg}$ and a downlink electromagnetic exposure of $114 \text{ mV}/\text{m}$. The network will require on average 96 UABSs with a total power consumption of 69.5 W . That is 7.24 W per UABS.

Keywords—Deployment tool, Electromagnetic exposure, LTE Microstrip patch antenna, Power consumption, Radiation pattern, Specific absorption rate (SAR), UAV, Unmanned aerial base stations, Wireless access network, Emergency network

I. Introduction

SOCIETY is constantly getting more and more dependent on wireless communication. On any given moment, in any given location, an electronic device can request to connect to the bigger network, starting from small Internet of Things (IoT) up to self-driving cars.

Also in exceptional and possibly life threatening situations, the public relies on the cellular network despite the fact that the network might be severely damaged and not properly functioning anymore. One solution for a fast temporarily deployable back-up network is to use Unmanned Aerial Vehicle (UAV)s. A base station can be attached to these flying UAVs to support the network over a limited area. This approach is also useful in case of an unexpected

increase in traffic. For example during the terrorist attacks at Brussels Airport, mobile network operators saw all telecommunications drastically increasing causing moments of contention. Some operators even decided to temporarily exceed the exposure limits in order to handle all connections [1]. Electromagnetic exposure caused by these networks can however not be neglected. Research shows how excessive electromagnetic radiation can cause diverse biological side effects [2], [3]. It becomes clear that electromagnetic exposure is a key value when designing a UAV-aided network and should definitely not surpass the limits predefined by the government.

UAV-aided networks can, thanks to their mobility, easily be repositioned towards a certain goal. Several papers explain how a network can be optimized towards different goals like power consumption. However, very limited research has been done where a UAV-aided network is optimized towards electromagnetic exposure. While several publications exist, discussing how the electromagnetic exposure can be calculated, most of them only consider a limited number of sources; e.g. only base stations or only the user's mobile device. Papers who cover electromagnetic exposure from all the different sources and convert it into a single value are rather limited.

This research proposes a method to optimize the network towards electromagnetic exposure and power consumption when considering all four sources of radiation in a telecommunications network, being: the user's own phone, the base station that is serving this user, all devices from other users in the network and all other active base stations that are not serving this user. In this way, the contribution of each source towards the total electromagnetic exposure can easily be identified.

The behaviour of the electromagnetic exposure and power consumption of the network will be analysed by applying the tool in different scenarios by using different types of antennae, various flying height and population densities. Values like Specific Absorption Rate (SAR), electromagnetic exposure and power consumption will give insight in how the network behaves so the network could be optimized accordingly.

To make this research possible, an existing capacity based deployment tool developed by the WAVES research group at Ghent University is extended for the specific purpose. This planning tool describes a fully configured UAV-network which is a suitable starting point for this research.

II. State of the Art

A. Electromagnetic exposure

Users in a telecommunication network are exposed to various sources of electromagnetic radiation, expressed in V/m . Once the exposure is absorbed by the human body, we speak of the specific absorption rate (SAR) which is expressed in W/kg . The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) has concluded that the threshold effect for SAR_{10g}^{wb} is at 4 W/kg meaning that any higher absorption rate would overwhelm the thermoregulatory capacity of the human body [4], [5]. All these values are subjected to limitations enforced by the government. This research is based in Ghent, a Flemish city in Belgium where an individual antenna in the 2.6 GHz frequency band could not exceed 4.5 V/m and the cumulative sum of all fixed sources has its maximum at 31 V/m [4], [6]. The maximum whole body SAR-values for a mobile device over a 10 g tissue (SAR_{10g}) is defined at 0.08 W/kg [7], [4], [8]. The Federal Communications Commission (FCC) of the United States of America (USA) follows the recommendations of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Std C95.1-1999 [9], [10] that defines regulations based on 1 g tissue. The SAR_{1g}^{wb} is therefore defined at 1.6 W/kg despite the fact that this value has been reviewed and changed by the IEEE to 8 W/kg in Std C95.1-2005 [10]. An overview is given in table I.

Institute	Description	Value	Units
ICNIRP	SAR_{10g}^{wb}	4	W/kg
BE	SAR_{10g}^{wb} from base stations	0.08	W/kg
BE	SAR_{10g}^{head} for UE	2	W/kg
USA	SAR_{1g}^{head} for UE	1.6	W/kg

TABLE I: Overview of the different SAR limitations.

Several papers calculate exposure originating from specific sources [11], [12], [13], [14] where some convert the up-link (UL) radiation into localized SAR for head and torso [13], [14]. With the advent of 5G, paper [15] describes how the localized SAR-values are achieved from all different sources. Finally, [16] describes how the electronic radiation can be converted into whole body SAR values.

In a realistic network, some users are calling while others are using other types of telecommunication services like browsing the web. Therefore, all absorbed electromagnetic exposure should be expressed in whole body SAR while still covering all sources.

B. Optimized UAV-aided networks

A UAV knows several applications. It was originally mainly used to support the military for surveillance and remote attacks without endangering pilots [17]. However, UAVs have recently become more accessible by the general public due to decreasing costs. This allowed UAVs to be researched for various applications.

A UAV equipped with a femtocell base station antenna is called a Unmanned Arial Base Station (UABS) which

brings several advantages like mobility and rapid deployment. However, it brings also challenges like limited weight of the payload and sparse power supply.

Kawamoto et al. introduced in [18] a WiFi network with the support of UAVs while considering resource allocation and antenna directivity. Gangula et al. illustrates in [19] how UAVs can be used as a relay for Long-Term Evolution (LTE) and Zeng et al. proposes in [17] a tutorial in 5G-and-beyond wireless systems where challenges like energy consumption, mobility and antenna direction are discussed. In [20], Deruyck et al. designed a capacity based deployment tool for UAV-aided emergency networks for large-scale disaster scenarios where an ideal flying height of 100 m is suggested. This was expanded in [21] with a performance evaluation of the direct-link backhaul of this tool where a slightly lower flying height of 80 metres is recommended.

Mozaffari et al. provides in [22] guidelines on how to optimize and analyse UAVs equipped for wireless communication equipment. A research area that has been excessively studied is the location solution optimization problem where networks are designed in such a way that certain goals like minimal power consumption or shortest flying distance are achieved [23], [24], [25], [26]. These optimizations can be done through different implementation methods like exact algorithms or machine learning [22], [27].

Research where network is optimized towards electromagnetic exposure is rather limited. Deruyck et al. discusses in [12] how a terrestrial network can be optimized towards either a minimal exposure or minimal power consumption of the entire network. However, to the best of the author knowledge, no research has been done where a UABS-network has been optimized towards electromagnetic exposure.

C. Technologies

For the deployment of the network, the more robust UAV from [20] will be used (details in table III) and will be operating in the 2.6 GHz bandwidth. Since the users are assumed to experience a constant electromagnetic exposure without interruptions, frequency division duplex is used.

The onboard antenna of the UAV will act as the gateway between the UE and the backhaul network. However, determining which antenna to use and how to position it, can be challenging. The radiation pattern from the antenna can be influenced by the UAV [28]. Also the fact that the UAV will hover above the user makes traditional 2D modelling insufficient. A 3D-model which accounts for both elevation and azimuth directivity will be required [17].

The easiest radiation pattern is a hypothetical isotropic radiator which radiates equally in all directions. Antennae that radiate equal quantities for a certain plane are called omnidirectional antennae [17] and several UABSs use antennae like monopoles, dipoles and wing antennae [29], [30], [31], [32]. Another type of antennae are directional antennae which save energy by focussing the electromagnetic energy where it is needed. One type that has excessively been researched in various array-configurations is a microstrip patch antenna [33], [34], [35]. These pro-

vide several advantages compared to traditional antennae [36], [37] like lightweightness and being low in cost, causing them to be more aerodynamic.

A basic microstrip antenna consists of a ground plane and a radiating patch, both separated by a dielectric substrate. Several variations exist like microstrip patch antennae, microstrip slot antennae and printed dipole antennae which all have similar characteristics [36], [37]. They all are thin, support dual frequency operation and they all have the disadvantage that they will transmit at frequencies outside the aimed band which is also known as spurious radiation. The microstrip patch and slot antenna support both linear and circular polarization while the printed dipole only supports linear polarization. Further, the fabrication of a microstrip patch antenna is considered to be the easiest of the considered patch antennae [36].

Fig. 1 shows a microstrip patch antenna made of Teflon and an aluminium patch. The antenna is attached to a UAV and is pointing towards the ground where the users are located.



Fig. 1: Image of a microstrip patch antenna attached to the bottom of a UAV.

III. Methodology

The first subsection explains how electromagnetic radiation is calculated for each source and how to convert these values to SAR. The second subsection gives a overview of how a microstrip patch antenna can be designed. The third section discusses how the network can be optimized towards either electromagnetic exposure or power consumption and finally the algorithm itself is explained.

A. Electromagnetic Exposure

A.1 Total Electromagnetic Exposure

The total whole body SAR ($SAR_{10g}^{wb,total}$) of a user can be calculated by a simple sum of individual SAR values from the different sources and is based on [15]. This formula assumes that the users are holding their device next to their ear and therefore investigates localized SAR for head and torso area. However for this case, this would result into incorrect conclusions since the position of the device relative to the user is unknown. The position of the phone can be next to the head but also in front of the user. The induced electromagnetic radiation will therefore be expressed in function of the entire body.

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

The first parameter, $SAR_{10g}^{wb,myUE}$, indicates the absorbed electromagnetic radiation by the whole body originating from the user's own device. Despite that the UL radiation is destined for the serving UABS, a portion of that radiation is directly absorbed by its user, due to the omnidirectional nature of the mobile's antenna. The second parameter, $SAR_{10g}^{wb,myUABS}$, represents the downlink (DL) radiation caused by the UABS that is serving the user. As the third parameter, we have the $SAR_{10g}^{wb,otherUE}$ which is radiation caused by other people's devices. The radiation of these devices is once again destined for a specific UABS but again, a portion of that UL radiation will also be absorbed by our user. Finally, $SAR_{10g}^{wb,otherUABSS}$ represents the DL radiation by the other UABSSs to which our user is exposed to but not served by. An illustration is given in fig. 2. The green arrow stands for near-field radiation, the others represent far-field radiation.

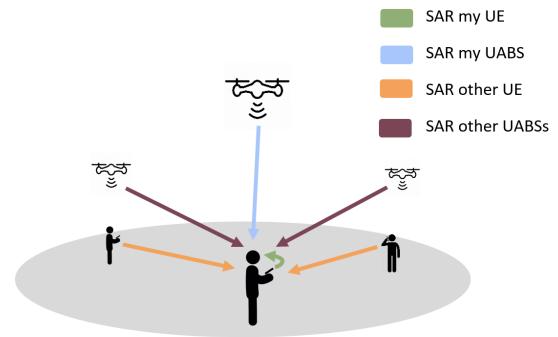


Fig. 2: Illustration of the network that shows how the average user (here shown in the center) is influenced by different types of sources.

A.2 Electromagnetic Radiation from a Single Source

In order to find the total electromagnetic radiation to which a user is exposed, the electromagnetic radiation from each sources needs to be calculated first. This is done with formula 2 which applies to all sources in the far-field. This includes all UABSSs and all User Equipment (UE) belonging to other people. The exposure E of a single user u from a single radiator i can be calculated as follows:

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

Calculating the real radiation power (RRP) for a certain user u , requires first the equivalent isotropic radiation power (EIRP)-value to be calculated [11], [12]. This is achieved by adding the transmission power P_{tx} to the transmitter gain G_t and thereafter subtracting the feeder

loss L_t . This formula needs to be expanded to also account for attenuation from the used antenna. This value depends on the angle between this user and the antenna's main beam. The attenuation from an equivalent isotropic radiator is always zero. This leads to the following formula:

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

The used frequency in formula 2 is denoted as f and is expressed in MHz. Since LTE is used, this value will be 2600 MHz.

At last, formula 2 requires the path loss PL . In order to calculate this, an appropriate propagation model — of which several exist — is required. The Walfish-Ikegami model is used since it performs well for femtocell networks in urban areas [20].

A.3 Combining Exposure

The total electromagnetic exposure E_{tot} , in a certain spot, originating from different sources can be calculated with formula 4. E_i stands for the electromagnetic exposure from source i and n stands for all far-field radiators of a certain category which will either be UABSs or UE from other people. E_{tot} will be calculated for each location where a user is positioned.

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

A.4 Converting electromagnetic radiation into SAR-values

Formula 1 expects that the radiation is expressed in whole body SAR-values. To make this calculation possible, a distinction has to be made between near-field SAR ($SAR^{wb,nf}$) and far-field SAR ($SAR^{wb,ff}$). $SAR_{10g}^{wb,myUE}$ is a form of near-field radiation, all the other types are far-field radiation.

Converting the electromagnetic radiation is done with a conversion factor which is based on Duke of the Virtual Family. Duke is a 34-year old male with a weight of 72 kg, a height of 1.74 m and BMI of 23.1 kg/m [16]. Research shows that the conversion factors for WiFi in the far-field is $0.0028 \frac{W/kg}{W/m^2}$ and $0.0070 \frac{W/kg}{W}$ for the near-field [16]. Since WiFi, at a frequency of 2400 MHz, is very close to LTE, at 2600 MHz, it is assumed in [16] that this value is also applicable for LTE. Calculating SAR from far-field radiation is done as follows:

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

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

The constant in equation 6 converts the power flux density S to the required $SAR_{10g}^{f,wb}$. To make this possible, the electromagnetic radiation from formula 4 should first be converted to the power flux density with formula 5.

The SAR caused by near-field radiation is calculated by multiplying the constant with the used transmission power P_{tx} of the UE which results in the following formula:

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

The power of the UE can be calculated using equation 8 [16].

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

P_{max} is the maximum allowed transmission power by UE for LTE, defined at 23 dBm. However, this is the worst case and the actual used power is usually much lower thanks to power control. P_{pusch} is the required received power at the UABS and will here be -120 dBm. α is the path loss compensation factor set to one which means full compensation [38], [39]. For the 20-MHz channel used in this paper, M will be set to 100 and σ , as the correction factor, is set to zero [16], [38].

B. Microstrip Patch antenna

A microstrip patch antenna is chosen because it allows easy production but more important, it has a low weight and has a thin profile causing it to be very aerodynamic which is useful when attaching it to a drone [36].

The dimensions of the antenna depend on the frequency it is operating at and the characteristics of the used substrate. The antenna will be radiating at a centre frequency f_0 of 2.6 GHz. Each substrate has a dielectric constant ϵ_r representing the permittivity of the substrate that depends on the used material. Substrates with a high dielectric constant and low height reduce the dimensions of the antenna while a lower dielectric constant with a high height improves the performance of the antenna [37], [40]. In this research, a substrate like glass is chosen because of the higher dielectric constant of $\epsilon_r = 4.4$ compared to materials like Teflon with only a dielectric constant of $\epsilon_r = 2.2$ [37]. Doing this in combination with an antenna height of 2.87 mm will decrease the dimensions of the entire antenna surface. This comes in handy since UAVs only have limited space available.

Description	Symbol	Value
Center frequency	f_0	2600 MHz
Dielectric constant	ϵ_r	4.4
Height of the substrate	h	0.00287 m

TABLE II: Overview of configuration parameters.

The dimensions of the radiating patch can be calculated with the formulas from [37], [40]. Doing so will result in a radiating patch of 35.09 mm by 26.55 mm and a ground-plane of at least 52.40 mm by 43.80 mm. The microstrip patch antenna as illustrated in fig. 3 will result in the radiation pattern of fig. 4.

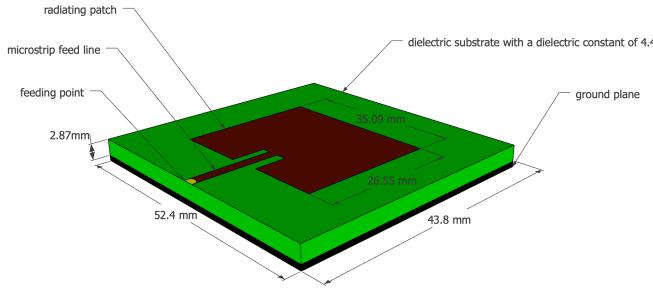


Fig. 3: Design of the microstrip patch antenna.

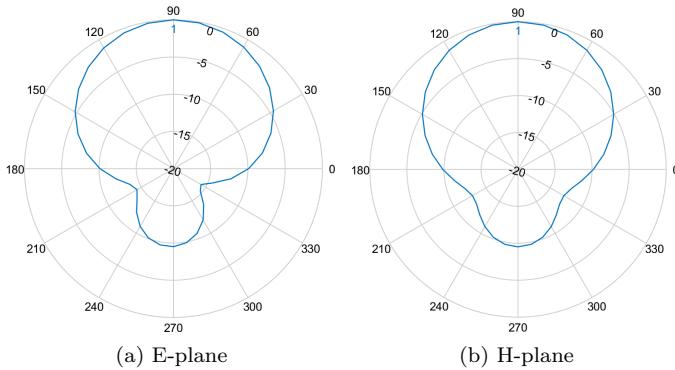


Fig. 4: Radiation patterns generated by the used microstrip patch antenna.

C. Optimizing the network

Deruyck et al. discusses in [12] how a terrestrial telecommunication network either can be optimized towards electromagnetic exposure of an individual or towards power consumption of the entire network. However, an increasing transmission power of an antenna comes with an increasing electromagnetic exposure. This is not the case considering both values for an entire network. In fact, the authors from [12] prove that both become inversely equivalent. The reason why the network behaves like this is because it is often cheaper to increase the exposure of an already active base station than activating a new one. This leads to the following fitness function which is based on [12].

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

Formula 9 returns a fitness value which represents the performance of the entire network. w is the importance factor of electromagnetic exposure ranging from 0 to 1, boundaries included. A w set to 0 means that electromagnetic exposure is not important. Such network will therefore be called a power consuption optimized (PwrC. Opt.) network. Likewise, a w set to 1 means that minimizing exposure is top priority and will result in an exposure optimized (Exp. Opt.) network. P_{max} is the power consump-

tion of all UABSSs, both active and inactive, when radiating at the highest level possible while P is the effective power used by the current designed network. This will be the power required for the flying UAVs themselves and their antennae. E_m will be the weighted exposure of the average user for the current designed network and E_{max} the weighted average of the electromagnetic exposure when all antennae are at their highest power level.

When optimizing the network, it is not only important to consider the average exposure of all users, but also to limit high extremes [12]. A weighted average will be used not only considering the median but also the 95 percentile from all users' DL exposure using formula 10. Since both values are considered to have equal importance, the weight factors w_1 and w_2 will both have an equal importance of 50%.

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

D. Simulation 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 UABSSs can actually remain and how strong each one should be radiating. Once the decision algorithm is done, the tool checks whether the number of online UABSSs does not exceed the capacity of the facility where the UABSSs are stored. If this is the case, the UABSSs 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 and between users and UABSSs. Thereafter, the algorithm iterates over each user and tries to connect that user to each UABSS. This connection is not always possible. A UABSS 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 UABSS would have to exceed its maximum allowed input power. If however a connection is possible, the user will be connected to that UABSS and the fitness function (eq. 9) is applied. This is repeated for each UABSS. Only the connection which results in the best fitness value for the entire network will be used. Doing so will make sure that, given the currently designed network, the user is optimized. In other words, each user is optimized and not the entire network. It is however assumed that the average network will be optimized as well. 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 UAVs and the result is returned to the main algorithm for further processing. The flowchart of this algorithm is given in fig. 5.

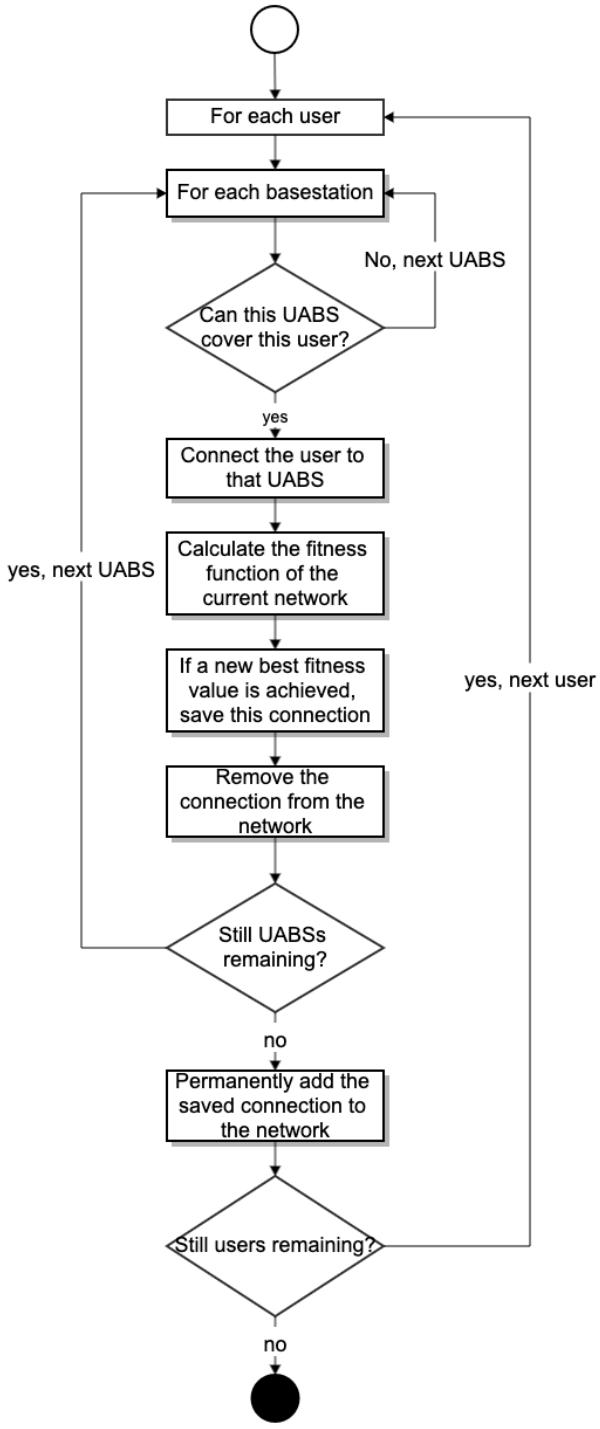


Fig. 5: Flowchart of the decision algorithm.

IV. Scenarios

The default configuration is given in table III and is applicable in all scenarios unless mentioned otherwise in the restrictions of that specific scenario.

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

Broadband cellular network

Technology	LTE
Frequency	2.6 GHz
Power offset (P_{pusch})	-120 dBm
Path loss compensation (α)	1
Correction value	0 dBm
Number of used resource blocks	100
<hr/>	
Femtocell antenna	
Maximum P_{tx} antenna direction	33 dBm downwards (az: 0°; el: 90°)
Gain	4 dBm
Feeder loss	2 dBm
Implementation loss radiation pattern	0 dBm EIRP or microstrip patch
Flying altitude	100 m
<hr/>	
UAV	
UAV power	13.0 A
Average UAV speed	12.0 m/s
Average UAV power usage	17.33 Ah
UAV battery voltage	22.2 V
<hr/>	
UE Antenna	
Height	1.5m from the floor
Gain	0 dBm
Feeder loss	0 dBm
Radiation pattern	EIRP
Quantity in network	224

TABLE III: Overview of default configuration values.

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. Two parameters will be evaluated. The first one will be a variable flying height ranging from 20 to 200 metres with a fixed number of 224 users. This is the average population size on an usual day at 5 p.m. in Ghent [20]. The second evaluated parameter is the number of users ranging from 50 to 600 users while flying height is set to 100 metres [20]. The power consumption, electromagnetic exposure and specific absorption rate are investigated for each parameter.

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

Four configurations are considered for each evaluated parameter in each scenario. 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. An overview of the simulation configuration scenarios is presented in fig. 6

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 UE and UABSs. Any other potential sources like backhaul links or any other technology will not be covered.

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

Fig. 6: Matrix with the four possible configurations

V. Results

Four configurations will be investigated while evaluating two parameter, being the population size and flying height. The parameters are evaluated for three different scenarios by monitoring the power consumption, electromagnetic exposure and SAR-values. The electromagnetic radiation and SAR are measured for the weighted average user using equation 10 with both w_1 and w_2 set to 50%. Each result is averaged over 20 simulations.

A. One User and One UABS

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. 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, the used antenna will not make any difference. The user is 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, it is noticed that the UL radiation increases exponentially while the DL radiation remains constant at 10 nW/kg during the entire time as shown in fig. 7. The reason that the DL radiation remains constant is because of the power control which makes sure that no more power is used than strictly necessary. We can therefore confirm that the electromagnetic exposure is a constant fraction of power and distance. The UL radiation starts very low at 1 nW/kg 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 [12]. However, for this scenario, a PwrC. Opt.

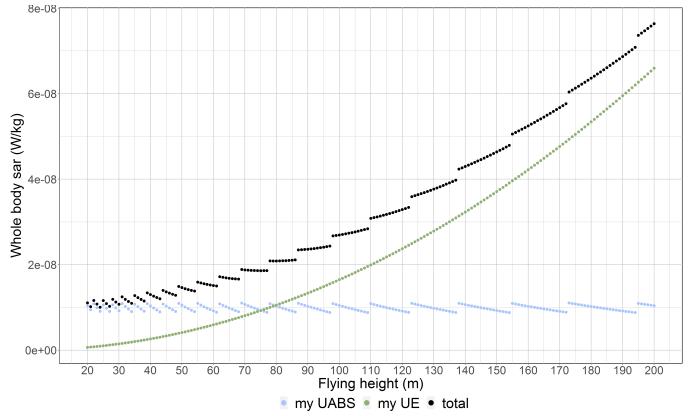


Fig. 7: This figure shows how SAR values from different sources are influenced by different flying altitudes.

network will not necessarily result in a lower power consumption. For example, at 100 metres, an EIRP Exp. Opt. network exposes the average user to 1.5 mV/m less but requires 20 mW more. 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 requires more UABSs which costs more energy. 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. Since the power consumption of an individual UABS is higher in a PwrC. Opt. network and only one UABS remains in each configuration, the power consumption in a PwrC. Opt. network is often higher.

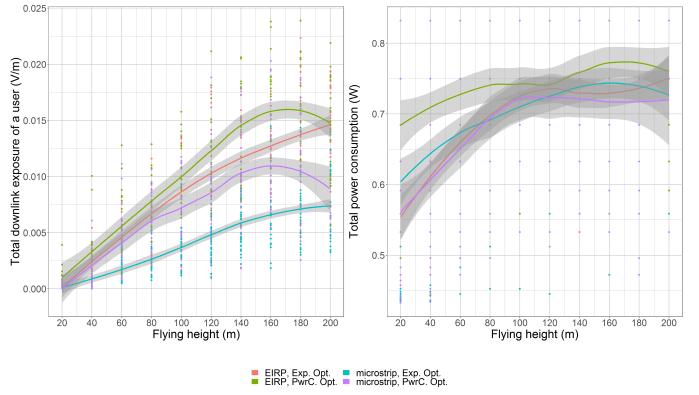


Fig. (a) show how the flying height influences the downlink electromagnetic radiation of the average user and fig. (b) the power consumption of the entire network for the only UABS available in the network.

Further, fig. 8 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. Increasing the flying height from 20 to 100 metres improves the coverage between 1% and 2% for all four configurations. The increasing electromagnetic radiation is however not unlimited. A microstrip PwrC. Opt. network is at his highest point around 162 metres and an EIRP PwrC. Opt. is at his highest at 195 metres. This decline starts later for exposure optimized networks and is situated outside the investigated flying range. The decreasing electromagnetic radiation at high flying altitudes is not caused by the obstructing buildings but by the distance in general.

Fig. 9 shows the whole body SAR_{10g} for the weighted average user, deducted from all electromagnetic sources. When investigating the three different sources, we see that the SAR^{myUABS} shows the same curve as it did with the electromagnetic exposure in fig. 8.a. This is normal behaviour considering that equation 6 is able of converting the DL exposure to SAR by simply multiplying with a constant. During the entire time, SAR^{myUABS} is the most dominant factor followed by the near-field radiation from the user's own device. The far-field radiation from other UE barely has influence. As an illustration, when the UABS flies at 140 metres, the average user in an EIRP PwrC. Opt. network will experience around 2.1 nW/kg from the UABS and around 0.2 nW/kg from his own device. The exposure from other UE can be neglected with 0.03 pW/kg . A low but plausible value considering that most UE are not radiating anything since they are uncovered.

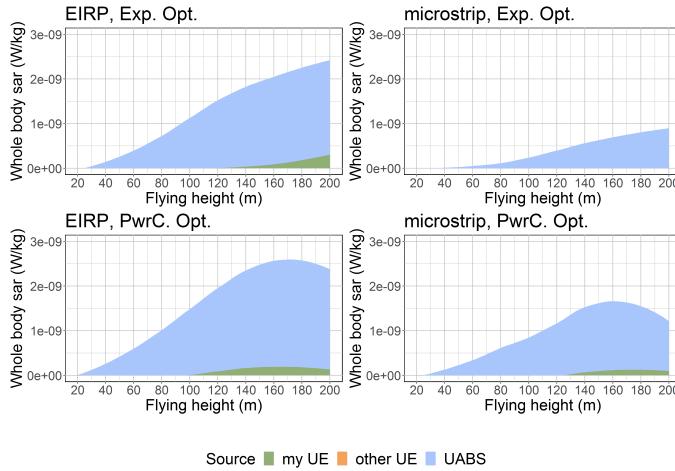


Fig. 9: Influence of the flying height for each considered configuration.

B.2 Variable Number of Users

The number of users present in the network increases from 50 to 600. Fig. 10.b shows that the number of covered users increases linearly compared to the number of users present in the network. It illustrates how an equivalent isotropic radiator is able to reach more users compared

to a microstrip patch antenna. Just like an power consumption optimized network is able to reach more users than an exposure optimized network.

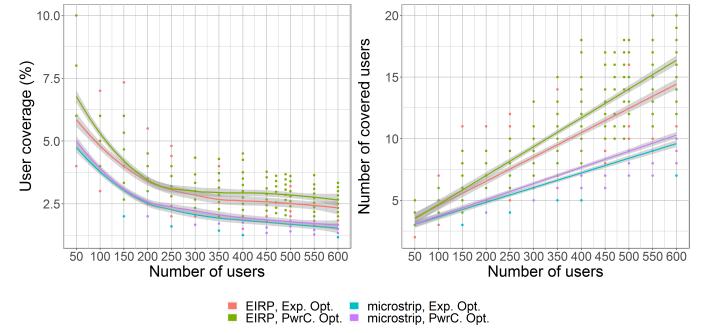


Fig. 10: The influence of increasing traffic on the user coverage.

For example, with 600 users, 5 to 7 additional people can be covered when replacing a microstrip patch antenna with an equivalent isotropic radiator and changing an exposure optimized network with an power consumption optimized network will cover one or two additional users.

Fig. 11.a gives the electromagnetic exposure of the weighted average user for different populations sizes while 11.b presents the power consumption of the entire network for all these population sizes. Figure 11.a is influenced by 10.a. When less users are covered, the exposure of the average user will decrease as well. For example, in an EIRP PwrC. Opt. network, 50 users have a 6.75% coverage which corresponds with a weighted average exposure of 18 mV/m while 600 users with 2.75% coverage only have 9 mV/m . Further, fig. 11.b is directly influence by fig. 10.b. When the UABS has to cover more users, the probability that some of these users have a worse path loss is higher. The UABS solves this problem by increasing the power consumption. Increasing the population from 50 to 600 will require between 0.05 and 0.1 W more. For this scenario, no clear difference in power consumption exists between the four configurations.

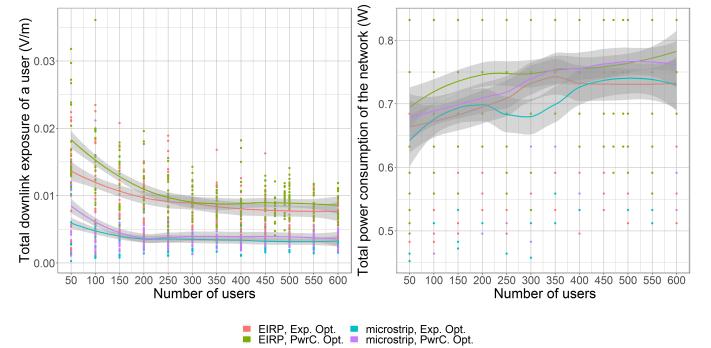


Fig. 11: These two figures show how various sizes of population influence the downlink electromagnetic radiation of the average user (left) and power consumption of the entire network (rights) for one UABS available in the network.

The SAR coming from the users own device is on average zero since most users are uncovered. Fig. 12 shows the exposure for the covered user just below the UABS. Scenario I already showed that the SAR from the user's own device is only influenced by the flying height and is also confirmed by the results in fig. 12.a where constant SAR^{myUE} is measured of $0.15 \mu\text{W}/\text{kg}$. The SAR from the UABS experiences a slight increase of $0.005 \mu\text{W}/\text{kg}$.

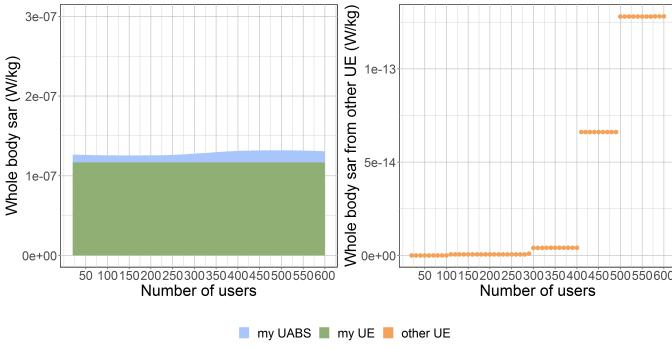


Fig. 12: SAR-values for the user who is directly beneath the only UABS available.

When the population grows, more users will be near the UABS. The UABS will likely decide to cover these users as well as visible in fig. 13. These users might have a slightly worse path loss because of obstructing buildings or somewhat bigger distance. The UABS reacts to this by increasing his power consumption causing an increase in the DL SAR for the central user. The far-field radiation from UE is very low as mentioned before and therefore added separately in fig. 12.b. It shows that the SAR from other UE increases from zero to $0.15 \mu\text{W}/\text{kg}$.

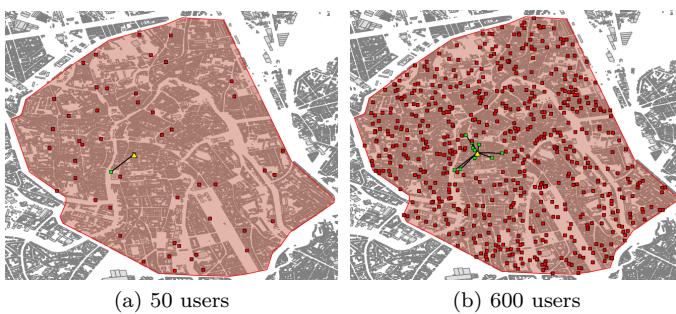


Fig. 13: Overview of which users are connected to the UABS.

C. Unlimited Number of UABSs

C.1 Variable Flying Height

The same scenario as in the previous section is investigated. Only now, an unlimited number of UABSs is available. The results prove that the different optimization strategies work as intended. A PwrC. Opt. network has indeed a lower power consumption and therefore result

in higher electromagnetic radiation. On the other hand, an Exp. Opt. network will reduce the electromagnetic exposure by using more UAVs and hence increase the network's power consumption. This conclusion was already made in [12] and is supported by these results. For example, when comparing both optimization strategies for the same equivalent isotropic radiator and the same default flying height, we see that the power consumption optimized network requires 51 W and therefore exposes its users to 15 mV/m . When optimizing towards electromagnetic radiation, the exposure drops to 11.5 mV/m but at a cost of a higher power consumption of 54 W .

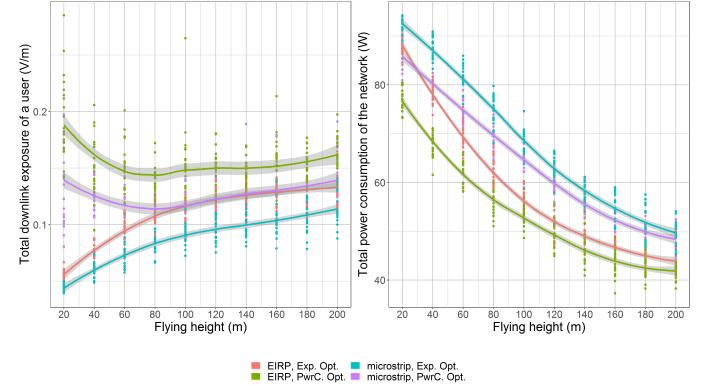


Fig. 14: These two figures show how the flying height influences the downlink electromagnetic radiation of the average user (left) and power consumption of the entire network (right) for an unlimited number of UAVs.

The exposure in fig. 14 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 .

Fig. 15.a shows that the optimal coverage is achieved at a low flying height of 40 metres with around 99% coverage. However, there is a downside to this. Fig. 15.b shows that the number of required UAVs increases when the flying altitude becomes lower; a behaviour which was also determined in [20]. For example, an microstrip Exp. Opt. network and an EIRP PwrC. Opt. network require respectively 84 and 64 UABSs at a flying altitude of 200 m which increases respectively to 211 and 162 UABSs at a much lower flying altitude of 20 m .

Fig. 16 shows how each source contributes to the total SAR. A first consequence of raising the flying altitude from 20 to 200 metres is an increase between 89 and 141 nW/kg for SAR originating the user's own device; a behaviour also explained in the first scenario. Fig. 16 shows that once the flying altitude surpasses the NLoS of the buildings, around 70 to 80 metres, the SAR^{myUABS} remains more or less constant for all configurations. This is situated around 160 nW/kg for microstrip PwrC. Opt. networks. The microstrip Exp. Opt. and EIRP PwrC. Opt. networks has on average 98 nW/kg and the EIRP Exp. Opt. network is situated around 47 nW/kg . These higher flying altitudes will also result in an increase in electromagnetic radiation

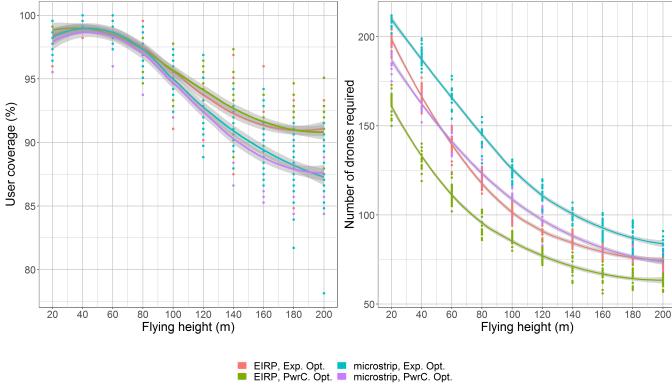


Fig. 15: This graph shows how much UAVs are required at different flying heights while trying to achieve a 100% coverage.

from other UABSSs. Raising the flying altitude from 20 to 200 metres will increase the the $SAR_{otherUABS}$ between 115 and 140 nW/kg for EIRP antennae and between 54 and 74 nW/kg for microstrip patch antennae for both optimization strategies.

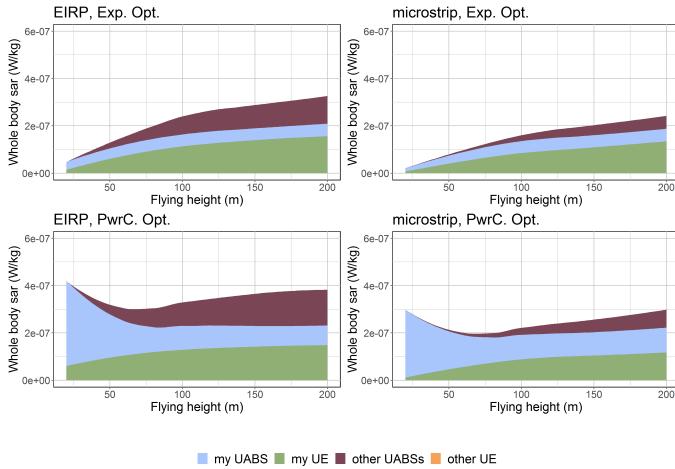


Fig. 16: Each chart corresponds with one of the four possible configurations. The contribution of each source towards the total SAR for a varying flying height is shown.

C.2 Variable Number of Users

The second evaluated parameter of this scenario is a variable number of users while the flying height is fixed to 100 metres. Fig. 17.a shows how the deployment tool tries to reach a 100% coverage. The percentage of covered users is slightly less for smaller networks. For only 50 users, an average coverage of around 93% is achieved while a network with 600 users has a coverage of around 97%. Fig. 17.b prove that more UAVs are required for these large populations. The difference in optimization strategy is very little for a small amount of people but increases very quickly. When the population increases from 50 to 600 users, 200

more UABSSs are required by a microstrip Exp. Opt. network, around 130 more UABSSs for an EIRP Exp. Opt. network or a microstrip PwrC. Opt. network and 110 more UABSSs for an EIRP PwrC. Opt. network. This is an expected behaviour when looking at scenario II, the percentage of covered users decreases for these larger populations.

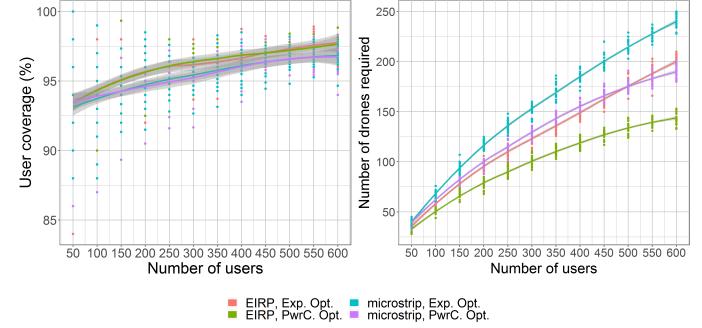


Fig. 17: This graph shows how much UAVs are required for different flying heights while trying to achieve a 100% coverage.

Fig. 18 shows that the electromagnetic radiation and power consumption increase for larger populations which is normal since more UABSSs will be available. When the population increases from 50 to 600 users, the electromagnetic radiation increases between 80 and 130 mV/m depending on the configuration. The power consumption with 50 users is for all configurations around 20 W . Once the population is increased to 600 users, a microstrip Exp. Opt. network will require 130 W , a microstrip PwrC. Opt. network requires 117 W , EIRP Exp. Opt. networks require 107 W and EIRP PwrC. Opt. network requires 92 W .

The correct behaviour of the decision algorithm became already clear in the previous subsection but is also confirmed here. When comparing both optimization strategies, a power consumption optimized network requires around 5 W less but exposes its users between 27 mV/m and 30 mV/m more than exposure optimized networks. Further, it is also noticed that equivalent isotropic radiators cause more electromagnetic radiation for less energy compared to microstrip patch antennae. When comparing the two types of antennae for a default number of 224 users, an equivalent isotropic radiator will expose the average user between 25 mV/m and 27 mV/m more while requiring around 12 W less than when the network would be using a microstrip patch antennae.

Fig. 19 represents the SAR from the weighted average user and shows how the SAR coming from the user's own device remains almost constant. The flying altitude is always the same so also the required energy to cover that distance will remain the same. For both optimization strategies, the SAR^{myUE} for networks with equivalent isotropic radiators vary around 1.1 $\mu W/kg$ and around 0.7 $\mu W/kg$ for networks using microstrip patch antennae. The SAR^{myUABS} barely increases in an exposure optimized network and is situated around 0.5 $\mu W/kg$ for both antennae. The power consumption optimized network also

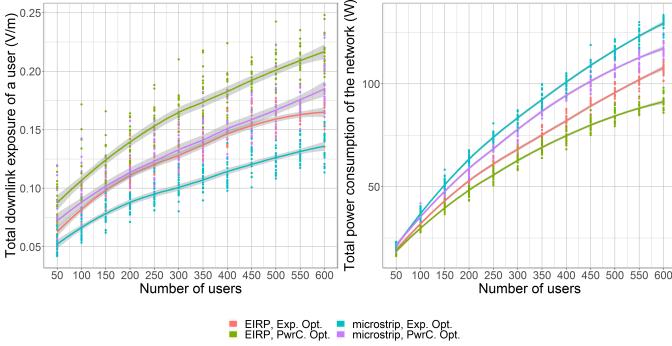


Fig. 18: The influence of the population size on the downlink electromagnetic radiation (a) and power consumption (b).

starts around $0.5 \mu\text{W}/\text{kg}$ but increases when more users become online. A normal behaviour when considering that these UABSs try to cover much more users. Therefore, the SAR^{myUABS} with 600 users increases up to $1 \mu\text{W}/\text{kg}$ for an equivalent isotropic radiator and almost $2 \mu\text{W}/\text{kg}$ for a microstrip patch antenna. The SAR value that increases the most is $SAR^{otherUABS}$ which starts really low with less than $0.1 \mu\text{W}/\text{kg}$ for 50 users for all configurations. The SAR increases however very fast. The biggest increase is noticed in an EIRP PwrC. Opt. network where $3 \mu\text{W}/\text{kg}$ is measured for 600 users. The $SAR^{otherUE}$ increases the least for microstrip Exp. Opt. with only $1 \mu\text{W}/\text{kg}$ for 600 users.

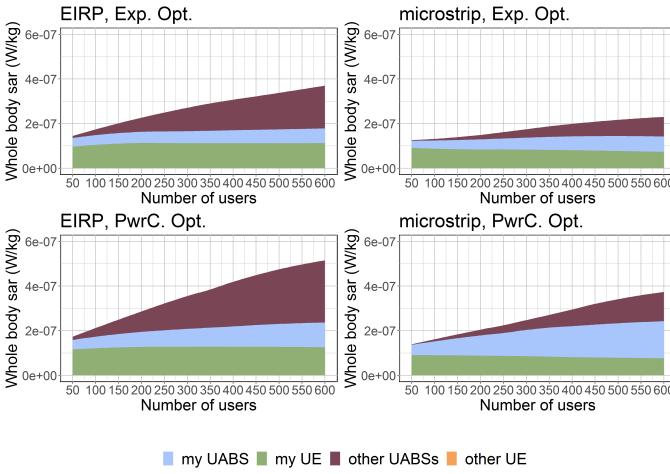


Fig. 19: Each figure corresponds with a certain configuration and shows how the SAR from different sources are influenced by an increasing population size. An unlimited number of UABSs is available.

VI. Conclusion

A capacity-based deployment tool has been used to identify the SAR of a user and how a network can be optimized towards DL electromagnetic exposure and overall power consumption. This has been investigated for differ-

ent flying heights, number of users and number of available UABSs. The results confirm that optimizing towards electromagnetic exposure and total power consumption indeed result in conflicting requirements as it was already stated in [12]. The proposed fitness function works as intended. For default configurations, the electromagnetic field radiation from a power consumption optimized network can be reduced up to 23% for equivalent isotropic radiators and 30% for microstrip patch antennae by optimizing towards electromagnetic exposure. Doing so, decreases the range of the UABS since the power of an individual UABS will drop between 0.07 and 0.12 W. Therefore, much more UABSs will be needed. The exposure optimized networks will, on average, use 18 UAVs more than power consumption optimized networks and the network therefore requires 4 W more energy.

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. A microstrip patch antenna with an aperture angle of 90° causes less electromagnetic exposure and coverage and requires more power compared to an equivalent isotropic radiator. For a default configuration, a microstrip patch antenna can reduce between 30% and 34% of the electromagnetic exposure emitted by an equivalent isotropic radiator. This will require on average 24 extra UABSs which increase the total power consumption with 12 W. The required power per UABS will increase with 0.022 W in a PwrC. Opt. network and with 0.007 W in an Exp. Opt. network.

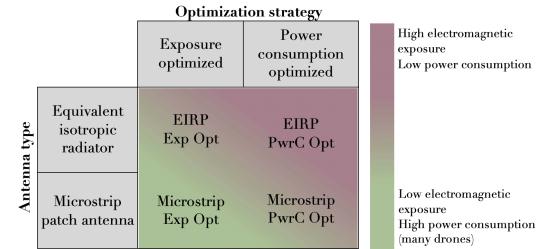


Fig. 20: Matrix with the four possible configurations, colour-coded based on the results.

Fig. 20 shows an overview based on the results from the two optimization strategies and the two types of antenna. Remarkable is that an EIRP exposure optimized network behaves very similar to a microstrip power consumption optimized network. Therefore, the microstrip patch antenna in a power consumption optimized network is recommended. The microstrip patch antenna will generate less electromagnetic radiation by design and the power consumption optimization reduces the number of required UAVs and power. A microstrip patch antenna with an aperture angle of 90° is considered as a good solution but if budget is more limited, an antenna with a larger aperture angle would further reduce cost without interfering

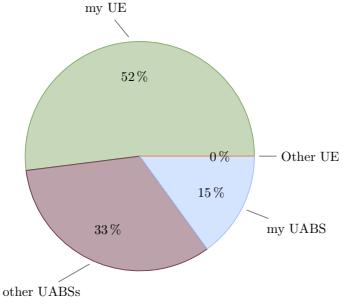


Fig. 21: Contribution from each source towards the total SAR that is experienced by the weighted average user. The percentages are averaged over the four considered configurations.

with the Flemish legislation regarding electromagnetic exposure. The SAR from the configuration with the most exposure is still a hundred thousandth of the maximal allowed whole body SAR (0.08 W/kg).

Fig. 21 gives an overview of the contribution of SAR in percentage to the total exposure for a default network. The values have been averaged over all four considered configurations. The user's main source of exposure is clearly the user's own device which contributes 52% of the total experienced exposure. A conclusion that was also made by the authors of [15] and [41]. Further, in [41] is also concluded that, thanks to power control, the electromagnetic radiation from the mobile phone comes really close to the exposure from the UABS. Also this is confirmed by the results. Fig. 21 shows that the electromagnetic exposure from all UABSs together covers the remaining 48% of which 15% is from the serving UABS. The electromagnetic exposure from devices belonging to other people can be ignored compared to the much higher electromagnetic exposure from the other sources and contributes only 0.0001%.

Further, the results show that power consumption and electromagnetic exposure increases when more users needs to be covered. When the population increases from 50 to 600 users, the electromagnetic radiation increases between 80 and 130 mV/m depending on the configuration. The power consumption increases with 110 W for all configurations. The main source that is influenced by the number of users is the SAR from other UABSs with an increase between 1 and 3 $\mu\text{W/kg}$, depending on the configuration. Further, increasing the flying altitude has a positive influence on the number of required UAVs which on their turn have a positive influence on power consumption. Increasing the flying altitude from 20 m to 200 m, decreases the number of required UAVs around 59%. This decrease was also noticed in [20]. Also authors from [15] made the conclusion that reduced path loss decreases electromagnetic exposure. The electromagnetic radiation from the UABSs remains more or less the same for flying altitudes between 80 and 200 metres. Most UABSs are in LoS and no more power will be used thanks to power control. However, the electromagnetic radiation from the user's own device does increase in order to reach the high flying UAVs. At

around 80 metres, the exposure from the user's device surpasses the exposure from the serving UABS. When more UABSs are available in the network, electromagnetic exposure from other UABS will increase as well. This is because more UABSs come into LoS when the flying height becomes larger. Raising the flying altitude from 20 to 200 m will increase the SAR from other UABSs between 46 and 49 times when using an equivalent isotropic radiator antenna and between 70 and 85 times when using a microstrip patch antenna. When also considering the results from [21] where a flying altitude of 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 conclusion, a microstrip patch antenna with an aperture angle of 90° is a suitable starting point for an antenna. This directional antenna focusses electromagnetic radiation where it is needed and unwanted sideways radiation is reduced. The sufficiently large aperture angle covers enough users. The antenna is recommended to be deployed in a power consumption optimized network since less UAVs are required and therefore also less expensive. The optimal flying height for the city centre of Ghent is believed to be situated at 80 metres since lower flying heights require much more UABSs and higher flying heights have a negative influence on the electromagnetic exposure. When this configuration is applied to a network with 224 users, the average user will experience a SAR of around $0.2 \mu\text{W/kg}$ and a DL electromagnetic exposure of 69.5 W . The network will require on average 96 UABSs with a total power consumption of 114 V/m . That is 1.19 W per UABS.

As a future work, still some parameters require further evaluation. Different Physical Uplink Shared Channel (PUSCH) values are expected to have a big influence on UL radiation and exposure from backhaul connections still have to be considered. Further, MiMo and massive MiMo are ready to be supported since the tool can easily be extended with some more complex radiation patterns like beamforming. Another consideration is improving the time complexity by replacing the exact algorithm with an heuristic algorithm.

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 overschreden 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. Cesaroni, M. Grandolfo, M. Hietanen, A. McKinlay, M. Repacholi, D. H.

- Sliney, J. A. Stolwijk, et al., "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 ghz)," *Health physics*, vol. 74, no. 4, pp. 494–521, 1998.
- [6] "Normen zendantennes." <https://omgeving.vlaanderen.be/normen-zendantennes>. Accessed: 19-03-2020.
- [7] E. Commission, "Council recommendation of 12 july 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 hz to 300 ghz)," *Official Journal of the European Communities*, vol. 59, 1999.
- [8] "Wireless devices." <https://www.health.belgium.be/en/wireless-devices>. Accessed: 13-05-2020.
- [9] A.-K. Lee, S.-E. Hong, M. Taki, K. Wake, and H. Do Choi, "Comparison of different sar limits in sam phantom for mobile phone exposure," in 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp. 687–689, IEEE, 2018.
- [10] W. H. Bailey, R. Bodemann, J. Bushberg, C.-K. Chou, R. Cleveland, A. Faraone, K. R. Foster, K. E. Gettman, K. Graf, T. Harrington, et al., "Synopsis of ieee std c95. 1™-2019 "ieee standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 hz to 300 ghz"," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 171346–171356, 2019.
- [11] D. Plets, W. Joseph, K. Vanhecke, and L. Martens, "Exposure optimization in indoor wireless networks by heuristic network planning," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 139, pp. 445–478, 01 2013.
- [12] M. Deruyck, E. Tanghe, D. Plets, L. Martens, and W. Joseph, "Optimizing lte wireless access networks towards power consumption and electromagnetic exposure of human beings," *Computer Networks*, vol. 94, 12 2015.
- [13] D. Plets, W. Joseph, S. Aerts, K. Vanhecke, G. Vermeeren, and L. Martens, "Prediction and comparison of downlink electric-field and uplink localised sar values for realistic indoor wireless planning," *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 162, no. 4, pp. 487–498, 2014.
- [14] D. Plets, W. Joseph, K. Vanhecke, and L. Martens, "Downlink electric-field and uplink sar prediction algorithm in indoor wireless network planner," in The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014), pp. 2457–2461, IEEE, 2014.
- [15] S. Kuehn, S. Pfeifer, B. Kochali, and N. Kuster, "Modelling of total exposure in hypothetical 5g mobile networks for varied topologies and user scenarios," Final Report of Project CRR-816, Available on line at: <https://tinyurl.com/r6z2gqn>, 2019.
- [16] D. Plets, W. Joseph, K. Vanhecke, G. Vermeeren, J. Wiart, S. Aerts, N. Varsier, and L. Martens, "Joint minimization of uplink and downlink whole-body exposure dose in indoor wireless networks," *BioMed research international*, vol. 2015, 2015.
- [17] Y. Zeng, Q. Wu, and R. Zhang, "Accessing from the sky: A tutorial on uav communications for 5g and beyond," *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 12, pp. 2327–2375, 2019.
- [18] Y. Kawamoto, H. Nishiyama, N. Kato, F. Ono, and R. Miura, "Toward future unmanned aerial vehicle networks: Architecture, resource allocation and field experiments," *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 1, pp. 94–99, 2018.
- [19] R. Gangula, O. Esrafilian, D. Gesbert, C. Roux, F. Kaltenberger, and R. Knopp, "Flying robots: First results on an autonomous uav-based lte relay using open airinterface," in 2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), pp. 1–5, IEEE, 2018.
- [20] M. Deruyck, J. Wyckmans, W. Joseph, and L. Martens, "Designing uav-aided emergency networks for large-scale disaster scenarios," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2018, 12 2018.
- [21] G. Castellanos, M. Deruyck, L. Martens, and W. Joseph, "Performance evaluation of direct-link backhaul for uav-aided emergency networks," *Sensors*, vol. 19, no. 15, p. 3342, 2019.
- [22] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y.-H. Nam, and M. Debbah, "A tutorial on uavs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems," *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2334–2360, 2019.
- [23] Q. Wu, L. Liu, and R. Zhang, "Fundamental trade-offs in communication and trajectory design for uav-enabled wireless network," *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 1, pp. 36–44, 2019.
- [24] M. Deruyck, A. Marri, S. Mignardi, L. Martens, W. Joseph, and R. Verdone, "Performance evaluation of the dynamic trajectory design for an unmanned aerial base station in a single frequency network," in 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp. 1–7, IEEE, 2017.
- [25] A. V. Savkin and H. Huang, "Deployment of unmanned aerial vehicle base stations for optimal quality of coverage," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 1, pp. 321–324, 2018.
- [26] H. Huang and A. V. Savkin, "A method for optimized deployment of unmanned aerial vehicles for maximum coverage and minimum interference in cellular networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 5, pp. 2638–2647, 2018.
- [27] C. T. Cicek, H. Gultekin, B. Tavli, and H. Yanikomeroglu, "Uav base station location optimization for next generation wireless networks: Overview and future research directions," in 2019 1st International Conference on Unmanned Vehicle Systems-Oman (UVS), pp. 1–6, IEEE, 2019.
- [28] A. Rizwan, D. Biswas, and V. Ramachandra, "Impact of uav structure on antenna radiation patterns at different frequencies," in 2017 IEEE International Conference on Antenna Innovations & Modern Technologies for Ground, Aircraft and Satellite Applications (iAIM), pp. 1–5, IEEE, 2017.
- [29] M. Nosrati, A. Jafargholi, and N. Tavassolian, "A broadband blade dipole antenna for uav applications," in 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), pp. 1777–1778, IEEE, 2016.
- [30] M. Nosrati, A. Jafargholi, R. Pazoki, and N. Tavassolian, "Broadband slotted blade dipole antenna for airborne uav applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 8, pp. 3857–3864, 2018.
- [31] B. A. Arand, R. 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.
- [32] L. Akhoondzadeh-Asl, J. Hill, J.-J. Laurin, and M. Riel, "Novel low profile wideband monopole antenna for avionics applications," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 61, no. 11, pp. 5766–5770, 2013.
- [33] S. S. Siddiq, G. Karthikeya, T. Tanjavur, and N. Agnihotri, "Microstrip dual band millimeter-wave antenna array for uav applications," in 2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON), pp. 1–4, IEEE, 2016.
- [34] Y. Zheng, J. Zhou, W. Wang, and M. Chen, "A low-profile broadband circularly polarized antenna array for uav ground-to-air communication," in 2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), pp. 219–220, IEEE, 2018.
- [35] X. Sun, R. Blázquez-García, A. García-Tejero, J. M. Fernández-González, M. Burgos-García, and M. Sierra-Castañer, "Circular array antenna for uav-uav communications," in 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pp. 2025–2028, IEEE, 2017.
- [36] I. Singh and V. Tripathi, "Micro strip patch antenna and its applications: a survey," *Int. J. Comp. Tech. Appl.*, vol. 2, no. 5, pp. 1595–1599, 2011.
- [37] K. Kashwan, V. Rajeshkumar, T. Gunasekaran, and K. S. Kumar, "Design and characterization of pin fed microstrip patch antennae," in 2011 Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), vol. 4, pp. 2258–2262, IEEE, 2011.
- [38] R. Mullner, C. F. Ball, K. Ivanov, J. Lienhart, and P. Hric, "Contrasting open-loop and closed-loop power control performance in utran lte uplink by ue trace analysis," in 2009 IEEE International Conference on Communications, pp. 1–6, IEEE, 2009.
- [39] M. Lauridsen, A. R. Jensen, and P. Mogensen, "Reducing lte uplink transmission energy by allocating resources," in 2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), pp. 1–5, 2011.
- [40] A. Sudarsan and A. Prabhu, "Design and development of microstrip patch antenna," *International Journal of Antennas (JANT)* Vol. vol. 3, 2017.
- [41] A. Gati, E. Conil, M.-F. Wong, and J. Wiart, "Duality between uplink local and downlink whole-body exposures in operating networks," *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, vol. 52, no. 4, pp. 829–836, 2010.

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

Thomas Detemmerman

Supervisor(s): Wout Joseph, Luc Martens

Abstract—

De hedendaagse samenleving vertrouwt meer dan ooit op de aanwezigheid van draadloze netwerken. Dankzij de mobiliteit van drones kan een drone-gestuurd netwerk de nodige mobiele data voorzien indien het bestaande netwerk beschadigd is. 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 istorope 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 zijwaardse 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. Wan- neer deze configuratie toegepast wordt op een netwerk met 224 zal de gewogen gemiddelde gebruiker een SAR ondervinden van $0.2 \mu\text{W}/\text{kg}$ en een downlink elektromagnetische straling van $114 \text{ mV}/\text{m}$. Het netwerk zal hiervoor gemiddeld 96 UABSs vereisen met een totaal energieverbruik van 69.5 W . Dat is 7.24 W per UABS.

Sleutelwoorden—LTE, Elektromagnetische blootstelling, Energieverbruik, Drone, Femtocell, Microstrip patch antenna, Stralingspatronen, Specific absorption rate (SAR)

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 draadloos netwerk, gaande van kleine Internet of Things (IoT) apparaten tot volwaardige zelf-rijdende auto's.

Ook in uitzonderlijke en zelfs mogelijks levensbedreigende situaties verwacht de samenleving de aanwezigheid van het mobiele netwerk. Desondanks het feit dat dit netwerk zelf mogelijk beschadigd kan zijn door de situatie. Een mogelijk tijdelijke oplossing om een beschadigd 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 een onverwachte toename aan gebruikers. Bijvoorbeeld tijdens de aanslagen op de Brusselse luchthaven zagen alle mobiele operatoren een toename in data verkeer. Sommige operatoren raakten zodanig verzwakt dat ze beslisten om de elektromagnetische straling te laten toenemen boven de opgelegde limieten zodat toch iedereen behandeld kon worden [1].

De elektromagnetische straling die vrijkomt bij netwerken kan echter niet met onachtzaamheid behandeld worden. Onderzoek toont aan dat buitensporige elektromagnetische straling verscheidinge biologische neveneffecten kan 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 zodat bepaalde doelstellingen zoals minimaal energieverbruik bereikt kunnen worden.

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

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

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

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

II. State of the Art

A. Elektromagnetische Straling

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

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

TABEL I: Overview of the different SAT limitations.

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

In een realistisch netwerk kunnen sommige gebruikers telefoneren terwijl anderen andere vormen van communicatie gebruiken zoals surfen op het internet. Aangezien de positie van het mobiel apparaat tegenover zijn gebruiker

niet gekend is, is het belangrijk dat de SAT-waarden berekend worden in functie van het volledige lichaam.

B. Geoptimaliseerde drone-gestuurde netwerken

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

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

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

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

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

C. Technologieën

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

magnetische straling ondervinden, zonder onderbrekingen, wordt frequency division duplexing gebruikt.

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

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

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

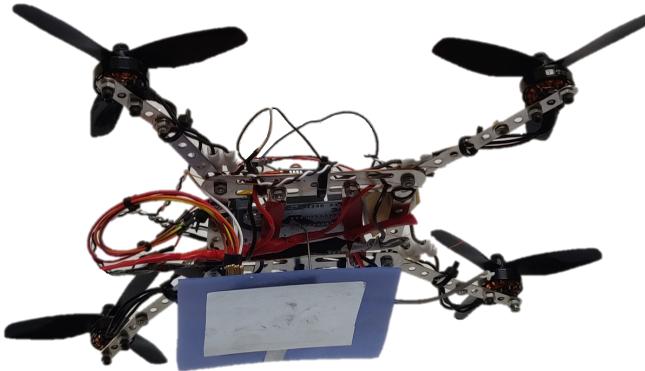


Fig. 1: Afbeelding van een microstrip patch antenne bevestigd aan de onderkant van een drone.

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

III. Methodologie

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

A. Elektromagnetische Straling

A.1 Totale 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 [15] die aanneemt dat het mobiele apparaat tegen het oor van zijn gebruiker gehouden wordt. Hierdoor worden alle waarden in lokale SAT-waarden voor het hoofd uitgedrukt. In dit netwerk is de plaats van het mobiele apparaat echter niet gekend wat zou leiden tot onjuiste conclusies. Bijgevolg zal alles uitgedrukt worden in functie van het volledige lichaam.

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

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

A.2 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

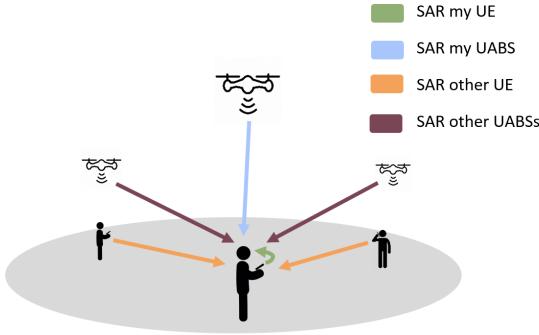


Fig. 2: Deze illustratie toont hoe de gemiddelde gebruiker (hier getoond in het midden) beïnvloed wordt door verschillende bronnen van elektromagnetische straling.

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

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

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

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

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

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

A.3 Samenvoegen van meerdere bronnen

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

in elk punt waar er zich een gebruiker bevindt.

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

A.4 Omzetten van elektromagnetische veldsterkte naar SAT

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Hierbij staat P_{max} voor het maximaal toegestane zendvermogen van het mobiele apparaat wat voor LTE 23 dBm bedraagt. Dit is echter in het slechtste geval. De effectieve waarde ligt dankzij power control doorgaans lager. P_{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 [38], [39]. Voor het 20 MHz kanaal in deze paper zal M gelijk zijn aan 100 en zal σ , als correctiefactor, nul bedragen [16], [38].

B. Microstrip Patch Antenne

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

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

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

TABEL II: Overzicht van de configuratie parameters

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

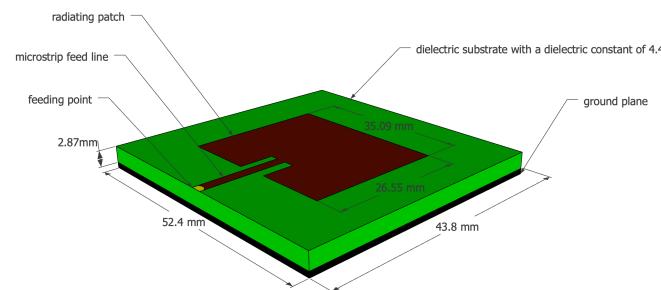


Fig. 3: Schema van de microstrip patch antenne.

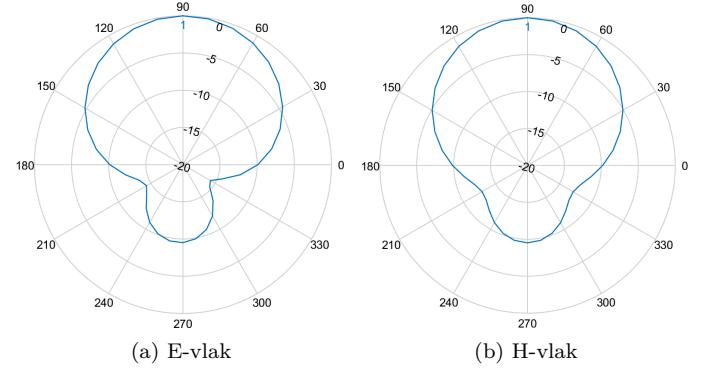


Fig. 4: Stralingspatroon gegenereerd door de microstrip patch antenne.

C. Optimaliseren van het netwerk

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

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

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

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

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

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

D. Simulatie Tool

D.1 Hoofdalgoritme

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

D.2 Beslissingsalgoritme

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

IV. Scenario's

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

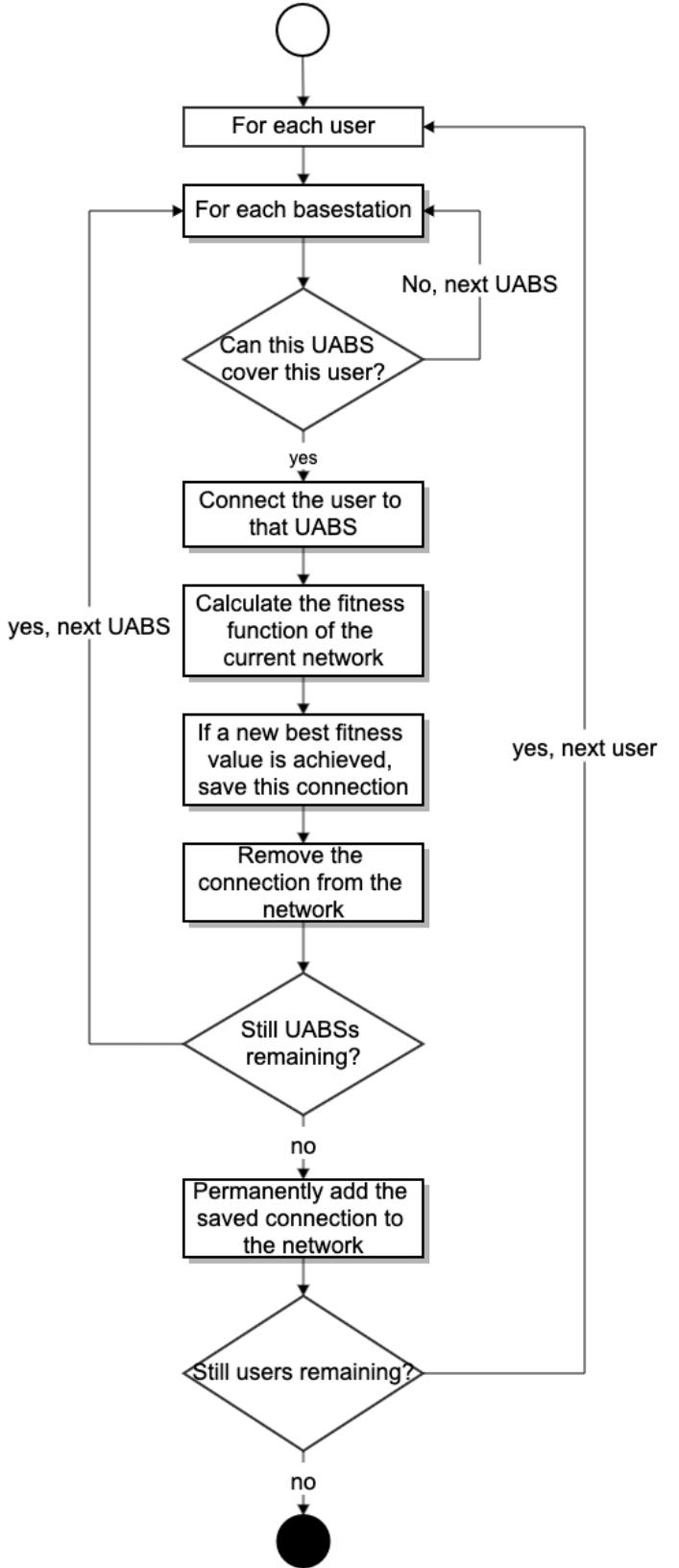


Fig. 5: Flowchart of the decision algorithm.

Mobielt 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 van de drone	13.0 A
Gemiddelde snelheid	12.0 m/s
Gemiddeld energieverbruik	17.33 Ah
Voltage batterij	22.2 V
Femtocell antenna	
Maximum P_{tx}	33 dBm
Richting van de antenne	neerwaarts
Zendversterking	4 dBm
Kabelverlies	2 dBm
Implementatieverlies	0 dBm
Stralingspatroon	EIRP or microstrip patch
Vlieghoogte	100m
UE Antenna	
Hoogte	1.5m vanaf de vloer
Zendversterking	0 dBm
Kabelverlies	0 dBm
Stralingspatroon	EIRP
Aantal aanwezig in het netwerk	224

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

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

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

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

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

Een overzicht is gegeven in fig. 6.

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

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

Fig. 6: Matrix met de vier mogelijke configuraties.

V. Resultaten

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

A. Eén gebruiker en één UABS

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

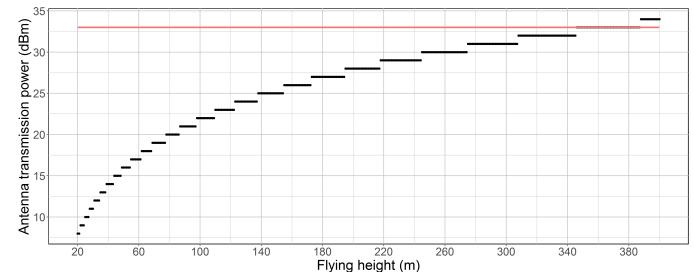


Fig. 7: Het vereiste zendvermogen om de gebruiker op de grond te bereiken. Gemeten op verschillende vlieghoogtes.

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

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

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

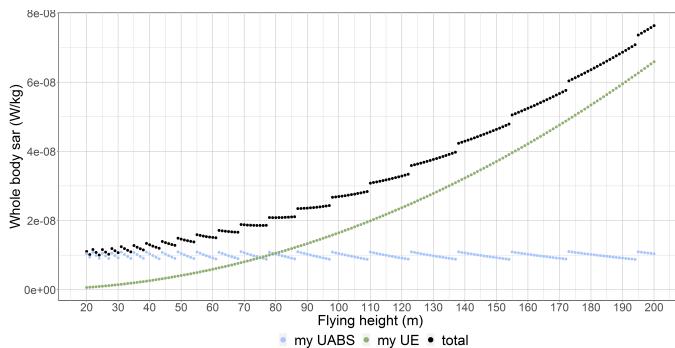


Fig. 8: Deze figuur toont hoe SAT-waarden van verschillende bronnen beïnvloed worden door een variabele vlieghoogte.

B. Toenemende populatie met één UABS

B.1 Variabel vlieghoogte

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

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

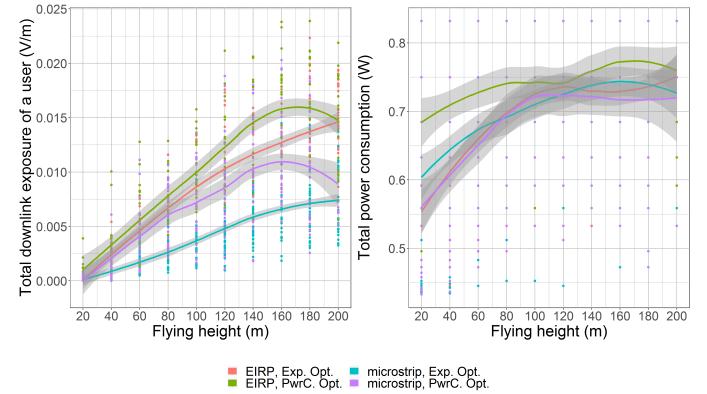


Fig. 9: Fig. (a) toont hoe de vlieghoogte beïnvloed wordt door DL elektromagnetische straling van de gewogen gemiddelde gebruiker en fig. (b) toont het En energieverbruik van het volledige netwerk wanneer een enkele drone beschikbaar is.

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

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

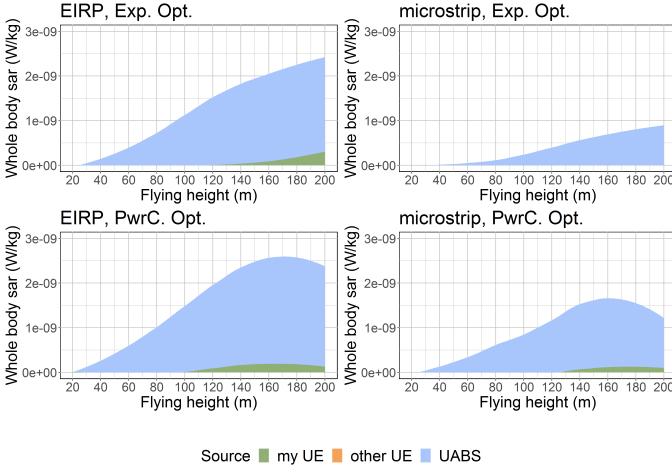


Fig. 10: Elke grafiek komt overeen met een specifieke configuratie en toont hoe de SAT van verschillende bronnen beïnvloed wordt door een toenemende vlieghoogte.

B.2 Variabel aantal gebruikers

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

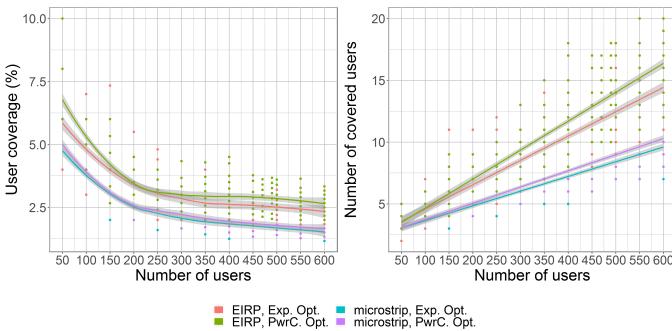


Fig. 11: De invloed van de populatiegrootte op de dekkingsgraad.

Fig. 12.a geeft de elektromagnetische blootstelling van de gewogen gemiddelde gebruiker weer bij verschillende populatiegroottes terwijl 12.b het energieverbruik weergeeft voor al deze populatiegroottes. Fig. 12.a is beïnvloed door fig. 11.a. De elektromagnetische straling neemt af wanneer minder gebruikers behandeld worden. 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 heeft. Verder is fig. 12.b rechtstreeks beïnvloed door fig. 11.b. Wanneer de UABS meer mensen behandelt, neemt de kans op gebruikers met een ietwat slechter padverlies toe. De UABS zal dit probleem oplossen door het energieverbruik toe te laten nemen. Een toenemende populatie van 50 naar 600 gebruikers zal het energieverbruik tussen 0,05 en 0,1 W verhogen. Voor dit scenario is geen duidelijk verschil te merken tussen energieverbruik van de vier verschillende configuraties.

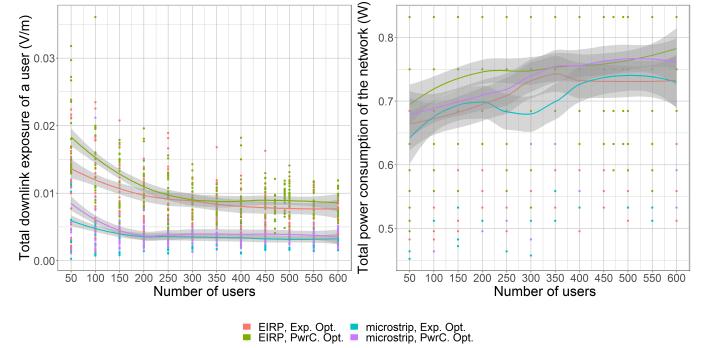


Fig. 12: Deze twee figuren tonen hoe de verschillende populatiegroottes invloed hebben op de DL elektromagnetische straling (fig. a) en het energieverbruik (fig. b).

De SAT komende van de gebruiker zijn eigen apparaat is gemiddeld nul aangezien de meeste gebruikers niet behandeld worden. Fig. 13 toont de elektromagnetische blootstelling van de gedekte gebruiker die zich onmiddellijk onder de UABS bevindt. Het eerste scenario toont hoe de SAT van de gebruiker zijn eigen mobiel apparaat enkel beïnvloed wordt door de vlieghoogte. Dit wordt ook bevestigd door de resultaten in fig. 13 waar een constante SAR^{myUE} van $0.15 \mu\text{W}/\text{kg}$ gemeten wordt. De SAT van de UABS ondervindt een kleine toename van $0.005 \mu\text{W}/\text{kg}$.

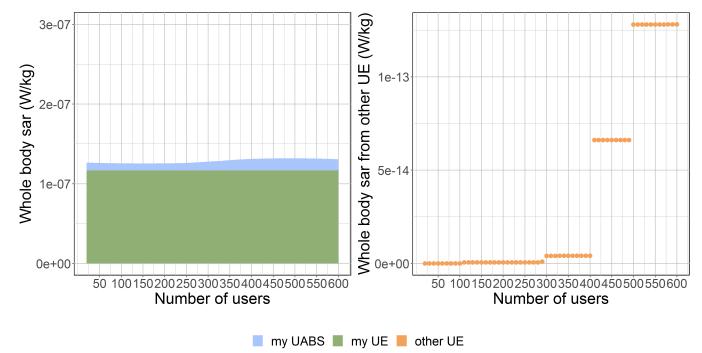


Fig. 13: SAR-waarden voor de gebruiker die zich onder de UABS bevindt.

Wanneer de populatie toeneemt, zullen meer gebruikers dichtbij de UABS terechtkomen. De UABS zal waarschijn-

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

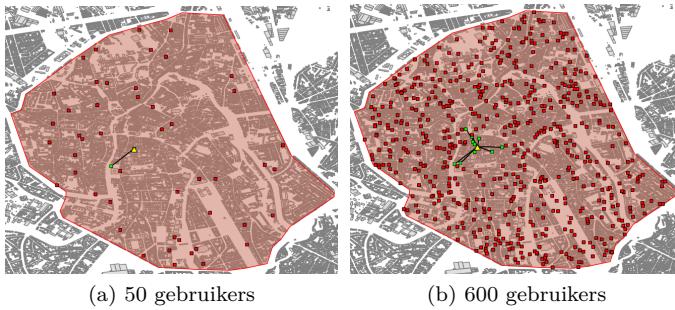


Fig. 14: Overzicht van welke gebruikers die verbonden zijn met de UABS.

C. Ongelimiteerd aantal UABS's

C.1 Variabel vlieghoogte

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

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

Fig. 16.a toont aan dat een optimale dekking van 90% bereikt wordt bij een lagere vlieghoogte van 40 m. Hier is echter een nadeel aan verbonden. Fig. 16.b toont dat het aantal vereiste drones toeneemt wanneer de vlieghoogte lager wordt; een vaststelling die reeds gemaakt is in [20]. Bijvoorbeeld, een microstrip Exp. Opt. netwerk en een EIRP PwrC. Opt. netwerk vereisen respectievelijk 84 en

64 drones op een vlieghoogte van 200 m wat respectievelijk toeneemt naar 211 en 162 drones bij een lagere vlieghoogte van 20 m.

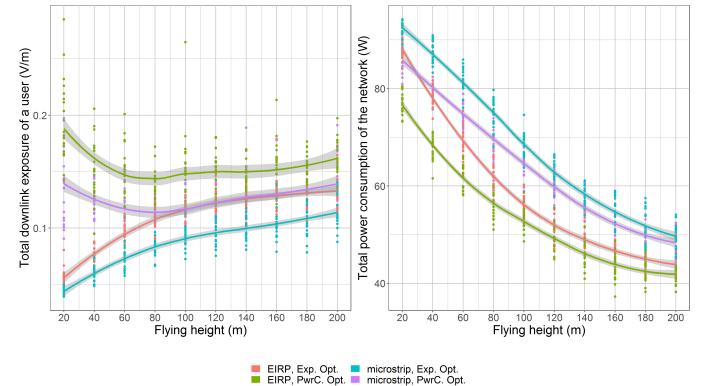


Fig. 15: Deze twee figuren tonen hoe de vlieghoogte invloed heeft op de DL elektromagnetische straling (fig. a) en het energieverbruik (fig. b).

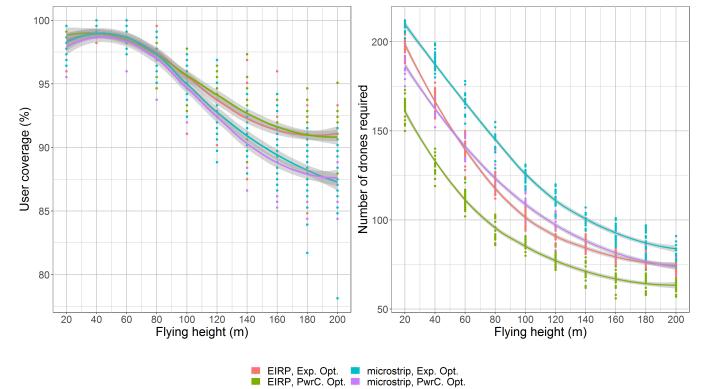


Fig. 16: Deze grafiek toont hoeveel drones vereist zijn op verschillende vlieghoogtes terwijl er getracht wordt om 100% dekking te bereiken.

Fig. 17 toont de bijdrage van elke bron aan de totale SAT. Het eerste gevolg van de vlieghoogte te laten toenemen van 20 naar 200 m is de SAT van de gebruiker zijn eigen apparaat die toeneemt tussen 89 en 141 nW/kg ; een gedrag dat reeds geconstateerd werd in het eerste scenario. Fig. 17 toont aan dat de vlieghoogte hoger wordt dan de NLoS van de gebouwen rond 70 tot 80 meter. Hierna blijft de SAR^{myUABS} min of meer gelijk voor alle configuraties. Voor een microstrip PwrC. Opt. netwerk is dit rond 160 nW/kg . Een microstrip Exp. Opt. en EIRP Exp. Opt. netwerk bevindt zich rond 47 nW/kg . Deze hogere vlieghoogtes zullen tevens resulteren in een toegenomen elektromagnetische straling van andere UABS's. Wanneer de vlieghoogte toeneemt van 20 tot 200 m zal de $SAR^{otherUABS}$ tussen 115 en 140 nW/kg voor EIRP antennes bedragen en tussen 54 en 74 nW/kg voor microstrip patch antennes. Dit voor beide optimalisatiestrategieën.

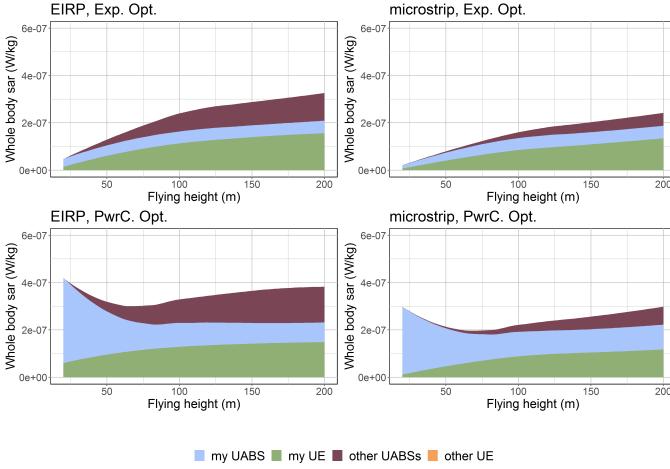


Fig. 17: Elke grafiek komt overeen met één van de vier mogelijke configuraties. De bijdrage van elke bron aan de totale SAT is voor een variërende vlieghoogte.

C.2 Variabel aantal gebruikers

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

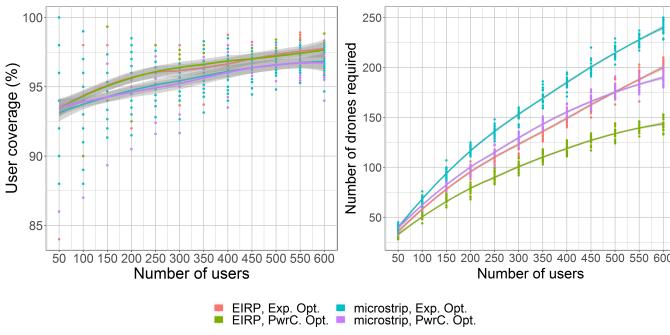


Fig. 18: Deze grafiek toont hoeveel drones vereist zijn op verschillende vlieghoogtes terwijl er getracht wordt een een dekking van 100% te hebben.

Fig. 19 toont aan dat de elektromagnetische straling en het energieverbruik toenemen voor grotere populaties wat

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

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

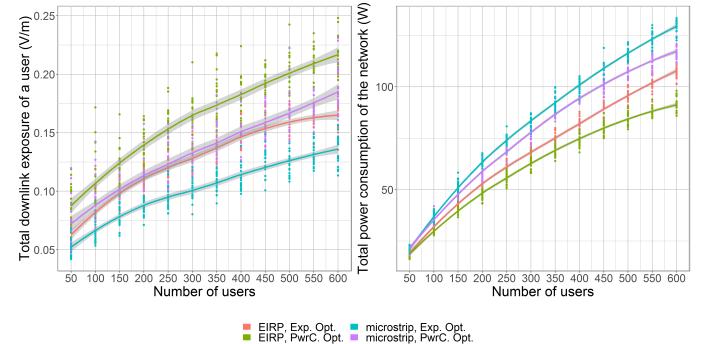


Fig. 19: De invloed van de populatiegrootte op de DL elektromagnetische straling (a) en energieverbruik (b).

Fig. 20 stelt de SAT van de gewogen gemiddelde gebruiker voor en toont aan hoe de SAT van de gebruiker zijn eigen mobiele apparaat zo goed als constant is. De vlieghoogte is namelijk altijd dezelfde waardoor ook de energie die nodig is om de afstand te overbruggen gelijk blijft. Voor beide optimalisatiestrategieën zal de SAR^{myUE} voor netwerken met isotrope antennes variëren rond 1.1 $\mu W/kg$ en rond 0.7 $\mu W/kg$ voor netwerken met een microstrip patch antenne. De SAR^{myUABS} neemt nauwelijks toe in een Exp. Opt. netwerk en bevindt zich rond 0.5 $\mu W/kg$ voor beide antennes. Een energiezuinig netwerk start ook rond 0.5 $\mu W/kg$ maar neemt toe wanneer meer mensen online komen. Dit is normaal aangezien deze UABS's trachten om meer mensen te behandelen. Hierdoor zal de SAR^{myUABS} voor 600 gebruikers toenemen tot 1 $\mu W/kg$ voor een isotrope antenne en tot wel 2 $\mu W/kg$ voor een microstrip patch antenne. De SAT-waarde neemt het meeste toe bij

$SAR^{otherUABS}$ die heel laag start rond minder dan $0.1 \mu W/kg$ voor 50 gebruikers in alle configuraties. Deze SAT neemt echter snel toe. De grootste toename wordt waargenomen in een EIRP PwrC. Opt. netwerk waarbij $3 \mu W/kg$ gemeten wordt voor 600 gebruikers. De $SAR^{otherUE}$ neemt het minste toe in een microstrip Exp. Opt. met slechts $1 \mu W/kg$ voor 600 gebruikers.

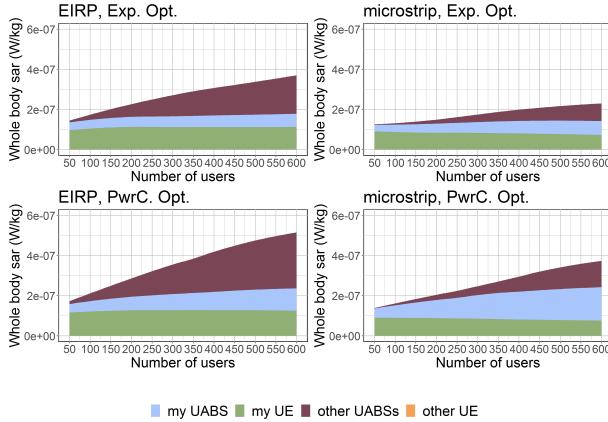


Fig. 20: Elke grafiek komt overeen met een specifieke configuratie en toont aan hoe de SAT van verschillende bronnen beïnvloed wordt door een toenemende populatie.

VI. Conclusie

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

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

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

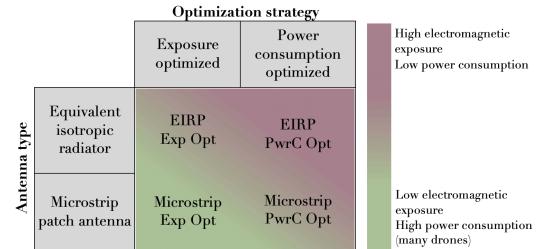


Fig. 21: Matrix met de vier mogelijke configuraties. Gekleurd op basis van de resultaten.

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

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

De resultaten tonen verder aan dat energieverbruik en elektromagnetische straling toenemen wanneer meer men-

sen aanwezig zijn in het netwerk. Wanneer de populatie toeneemt van 50 naar 600 gebruikers zal de electromagnetische straling tussen 80 en 130 mV/m toenemen afhankelijk van de configuratie. Het energieverbruik neemt toe met 110 W voor alle configuraties. De bron die het meest beïnvloed wordt door het aantal gebruikers is de SAT van andere UABS's en neemt toe tussen de 1en3 $\mu\text{W}/\text{kg}$. Verder heeft de vlieghoogte een positief effect op het aantal nodige drones die op hun beurt een positief effect hebben op het energieverbruik. Wanneer de vlieghoogte toeneemt van 20 m naar 200 m, neemt het aantal drones af met 59%. Deze afname werd ook vastgesteld in [20]. Ook de auteurs van [15] concludeerden dat electromagnetische straling afneemt wanneer het padverlies minder wordt. De electromagnetische straling van de UABS's blijven min of meer gelijk voor alle vlieghoogtes tussen 80 en 200 meter. Meeste UABS's zijn in LoS en dankzij power control zullen deze niet meer energie verbruiken dan strikt noodzakelijk. De electromagnetische straling van de gebruiker zijn eigen apparaten neemt echter wel toe om de hoog vliegende drones te kunnen bereiken. Rond 80 meter zal de straling van de gebruiker zijn eigen apparaat de straling van de behandelde UABS voorbijsteken. Wanneer meerdere UABS beschikbaar zijn in het netwerk, zal de blootstelling van andere UABS's toenemen naarmate de vlieghoogte toeneemt. Dit komt omdat bij hogere vlieghoogtes steeds meer UABS's in LoS komen. De vlieghoogte laten toenemen van 20 naar 200 m zal de SAT van andere UABS's tussen 46 en 49 keer groter maken voor een isotrope antenne en tussen 70 en 85 keer groter voor een microstrip patch antenne. Wanneer ook de resultaten van [21] overwogen worden waarbij een vlieghoogte van 80 meter voorgesteld wordt als optimale vlieghoogte voor optimaal bereik en backhaul verbindingen zal ook hier de vlieghoogte van 80 meter voorgesteld worden voor het stadscentrum van Gent.

Tot besluit wordt een microstrip patch antenne met een openingshoek van 90° als geschikt startpunt beschouwd. Deze directionele antenne focust de electromagnetische straling daar waar het nodig is. en reduceert hierdoor ongewenste zijwaardse straling. Het wordt aangeraden om de

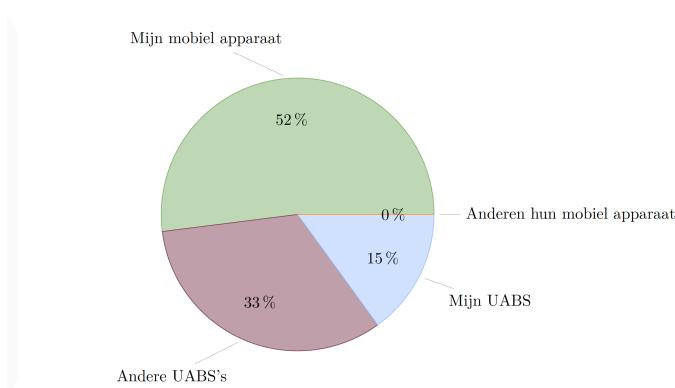


Fig. 22: Bijdrage van elke bron aan de totale SAR waaraan de gemiddelde gebruiker blootgesteld is. De percentages zijn uitgemiddeld over de vier overwogen configuraties.

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 electromagnetische straling laten toenemen. Wanneer deze configuratie wordt toegepast op een netwerk met 224 gebruikers zal de gemiddelde gebruiker een SAT ondervinden van ongeveer 0.2 $\mu\text{W}/\text{kg}$ en een DL electromagnetische blootstelling van 69.5 W. Het netwerk vereist gemiddeld 96 UABS's met een totaal energieverbruik van 114 V/m. Dat is 1.19 W per UABS.

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

Dankwoord

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

Referenties

- [1] “Base overschreed stralingsnormen na aanslagen,” De standaard, 2016.
- [2] L. Hardell and C. Sage, “Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards,” Biomedicine and Pharmacotherapy, vol. 62, no. 2, pp. 104 – 109, 2008.
- [3] “What are electromagnetic fields.” <https://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/en/index1.html>. Accessed: 15-10-2019.
- [4] “Elektromagnetische velden en gezondheid: Uw wegwijzer in het elektromagnetische landschap,” Federale overheidsdienst: volksgezondheid, veiligheid van de voedselketen en leefmilieu, vol. 5, 2014.
- [5] A. Ahlbom, U. Bergqvist, J. Bernhardt, J. Cesarini, M. Grandolfo, M. Hietanen, A. Mckinlay, M. Repacholi, D. H. Sliney, J. A. Stolwijk, et al., “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 ghz),” Health physics, vol. 74, no. 4, pp. 494–521, 1998.
- [6] “Normen zendantennes.” <https://omgeving.vlaanderen.be/normen-zendantennes>. Accessed: 19-03-2020.
- [7] E. Commission, “Council recommendation of 12 july 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 hz to 300 ghz),” Official Journal of the European Communities, vol. 59, 1999.
- [8] “Wireless devices.” <https://www.health.belgium.be/en/wireless-devices>. Accessed: 13-05-2020.
- [9] A.-K. Lee, S.-E. Hong, M. Taki, K. Wake, and H. Do Choi, “Comparison of different sar limits in sam phantom for mobile phone exposure,” in 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp. 687–689, IEEE, 2018.
- [10] W. H. Bailey, R. Bodermann, J. Bushberg, C.-K. Chou, R. Cleveland, A. Faraone, K. R. Foster, K. E. Gettman, K. Graf, T. Harrington, et al., “Synopsis of ieee std c95. 1™-2019 “ieee standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 hz to 300 ghz”,” IEEE Access, vol. 7, pp. 171346–171356, 2019.

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

Contents

List of Figures

List of Tables

List of Listings