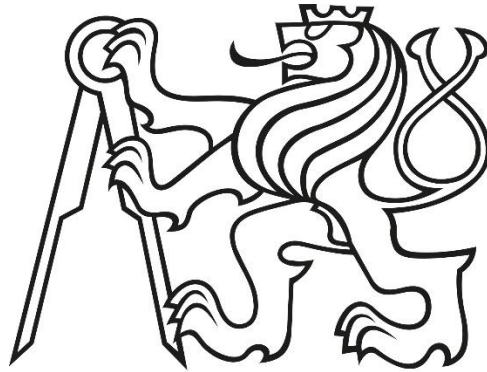


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky



Snižování spotřeby energie pro pohyb létající
základnové stanice v mobilních sítích

Reduction of Energy Consumed by Movement of
Flying Base Stations in Mobile Networks

Diplomová práce

2019

Autor: Bc. Lukáš Hach

Vedoucí práce: doc. Ing. Zdeněk Bečvář, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hach** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **434764**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Studijní obor: **Komunikační systémy a sítě**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Snižování spotřeby energie pro pohyb létající základnové stanice v mobilních sítích

Název diplomové práce anglicky:

Reduction of Energy Consumed by Movement of Flying Base Stations in Mobile Networks

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s možnostmi využití dronů pracujících jako létající základnová stanice pro zvýšení kvality a efektivity komunikace v budoucích mobilních sítích. Předpokládejte pohyb létajících základnových stanic v reálném čase podle požadavků mobilních uživatelů na komunikační kapacitu. Navrhněte algoritmus snižující energii spotřebovanou pro pohyb létajících základnových stanic za předpokladu, že dojde pouze k zanedbatelnému a předem definovanému snížení celkové komunikační kapacity uživatelů. Efektivitu navrženého algoritmu porovnejte s vhodnými existujícími řešeními.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Z. Becvar, P. Mach, J. Plachy, M.F.P de Tudela, "Positioning of Flying Base Stations to Optimize Throughput and Energy Consumption of Mobile Devices," IEEE VTC-Spring, 2019.
- [2] J. Chen, D. Gesbert, "Optimal positioning of flying relays for wireless networks: A LOS map approach," IEEE ICC, 2017.
- [3] Z. Becvar, M. Vondra, P. Mach, J. Plachy, D. Gesbert, "Performance of Mobile Networks with UAVs: Can Flying Base Stations Substitute Ultra-Dense Small Cells?", European Wireless (EW 2017), pp. 1-6, 2017.
- [4] R. I. Bor-Yaliniz, A. El-Keyi, H. Yanikomeroglu, "Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks", IEEE ICC, 2016.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Zdeněk Bečvář, Ph.D., katedra telekomunikační techniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **04.02.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2020**

doc. Ing. Zdeněk Bečvář, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Analýza efektivity komunikace v mobilních sítích s využitím dronů zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne ...

.....
Jméno Příjmení

Poděkování

Vedoucímu práce doc. Ing. Zdeňku Bečvářovi, Ph.D za pomoc a cenné rady při tvorbě diplomové práce.

Anotace – Použitím dronů jako létajících základnových stanic FeNB (Flying enhanced Node B) je možné velice rychle uspokojit aktuální požadavky uživatelů na velikost přenosové kapacity. Problémem při použití FeNB je omezená kapacita baterií. Aby bylo možné naplno využít přínosů, které FeNB umožňují je potřeba maximalizovat dobu po kterou FeNB obsluhuje uživatele. Toho lze dosáhnout minimalizací spotřebované energie pro pohyb FeNB. V této práci je představen algoritmus, který snižuje energii spotřebovanou pro pohyb FeNB za cenu určitého kontrolovaného snížení přenosové kapacity. Výsledkem algoritmu je přibližná lineární závislost mezi snížením přenosové kapacity a množstvím ušetřené energie. Sklon lineární závislosti závisí na počtu použitých FeNB. Je zjištěno, že při použití čtyř FeNB a snížení dosažené přenosové kapacity o 10% lze dosáhnout 7% úspory spotřebované energie jedné FeNB.

Klíčová slova – Mobilní sítě, Drony, Snižování spotřeby energie, Přenosová kapacita, Létající základnové stanice

Abstract – Using drones acting as flying base station (FeNB – enhanced Node B) it is possible to quickly meet the current user requirement for transmission capacity. The problem with using FeNBs is limited battery capacity. To take full advantages of the benefits introduced by the FeNB's, the operational time of the FeNB's should be prolonged. This can be achieved by minimizing the energy consumed for the FeNB's movement. This work introduces an algorithm reducing the amount of energy consumed by the FeNB's movement while a limited impact on transmission capacity is perceived. The result of the introduced algorithm is almost linear relationship between lowering the transmission capacity and the amount of saved energy. The slope of the linear dependence depends on the number of using FeNB. It has been found that with use of four FeNBs and a 10% reduction of the transmission capacity, a 7% saving of the consumed energy by one FeNB is saved.

Keywords – Mobile networks, Drones, Reducing amount of energy consumed, Transmission capacity, Flying base station

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Existující řešení.....	13
3	Model systému.....	16
3.1	Definice množin.....	16
3.2	Model pohybu uživatelů.....	16
3.3	Komunikační kanál.....	18
3.3.1	Přenosová kapacita a energetická efektivita.....	18
3.3.2	Přidělování komunikačních prostředků.....	20
3.4	Energie spotřebovaná pro pohyb dronu.....	20
4	Navržené řešení pro snížení spotřeby energie pro pohyb.....	23
4.1	Vyhledání polohy pro FeNB.....	23
4.2	Výběr cíle.....	23
4.3	Algoritmus snižující spotřebu energie.....	24
5	Simulační scénář a výsledky.....	27
5.1	Simulační scénář.....	27
5.2	Výsledky simulací.....	29
5.2.1	Vliv počtu FeNB na sledované metriky.....	29
5.2.2	Vliv počtu uživatelů na přenosovou kapacitu a energetickou efektivitu ..	33
5.2.3	Vliv rozhodné vzdálenosti FeNB od zvolené polohy na sledované metriky	35
6	Závěr.....	39
	Reference.....	40

Seznam obrázků

Obr. 1 Příklad pohybu uživatele během simulace	18
Obr. 2 Ukázka sil působící na dron [41].	21
Obr. 3 Graf znázorňující průběh okamžitého výkonu na rychlosti dronu s porovnáním s různými velikostmi vrtule	22
Obr. 4 Zobrazení rozhodovací vzdálenosti okolo polohy FeNB	25
Obr. 5 Rozmístění uživatelů fixních eNB a FeNB	28
Obr. 6 Průměrná spotřeba jedné FeNB v závislosti na maximální rychlosti pohybu	29
Obr. 7 Závislost SINR na počtu FeNB	30
Obr. 8 Průběh průměrné uživatelské přenosové kapacity, 1000 uživatelů	31
Obr. 9 Průměrná spotřebovaná energie jedné FeNB v závislosti na počtu FeNB	32
Obr. 10 Relativní energetická efektivita v závislosti na počtu FeNB	33
Obr. 11 Vliv počtu uživatelů na relativní uživatelskou přenosovou kapacitu	34
Obr. 12 Relativní energetická efektivita v závislosti na počtu uživatelů	35
Obr. 13 Relativní závislost uživatelské přenosové kapacity na vzdálenosti FeNB od ideální polohy	36
Obr. 14 Celková spotřebovaná energie	37
Obr. 15 Závislost poklesu přenosové kapacity na množství spotřebované energie pro pohyb FeNB	38

Seznam tabulek

Tab. 1 Vstupní parametry	27
--------------------------------	----

1 Úvod

Počet aktivních mobilních zařízení se v posledních dekáдах enormně zvýšil a tento trend je očekáván i v následujících letech. Proto se hledají stále nové způsoby zlepšit parametry sítě. Zlepšením je myšleno zvýšit přenosovou kapacitu, redukovat latenci a celkově zvýšit spolehlivost mobilní sítě [1]. Jednou z metod jak dosáhnout těchto zlepšení je zvýšit počet základnových stanic [2] a to hlavně v hustě osídlených oblastech. Zvýšením počtu buněk se zvýší pravděpodobnost komunikace na přímou viditelnost (LOS - Line of Sight) čímž se zlepší kvalita komunikačního kanálu a následně se zvýší přenosová kapacita.

Pro efektivnější pokrytí oblasti mobilním signálem je vhodné použít inteligentní plánování reagující na okamžité potřeby uživatelů. Fixní základnové stanice (eNB – enhanced Node Base) by za určitých situací nemusely být tím nejvhodnějším způsobem zajištění pokrytí oblasti mobilní sítě. Jedná se o situace, kdy se na malé ploše dočasně objeví větší počet uživatelů a o pár hodin později už se zde nenachází. Tím se myslí například sportovní utkání, hudební koncerty či dopravní zácpy [3]. Právě za těchto okolností je vhodnější nasazení dronů jako létajících základnových stanic (FeNB – Flying eNodeB) [4] oproti nákladné výstavbě klasických eNB. Výhodou nasazení FeNB je také vysoká adaptivnost v oblastech, kde nedochází k přetížení příliš často. Při nasazení FeNB je nutné vypořádat se s jejich umístěním v prostoru a to jak s ohledem na zvýšení přenosové kapacity tak i na spotřebu energie pro pohyb.

Mnoho prací v oblasti použití dronů jako létajících základnových stanic se zaměřuje na zvýšení přenosové kapacity [5, 6] nebo na možnost záložního řešení při přírodních katastrofách, kdy fixní eNB mohou být poškozené (např. [7]) V obou případech je nutné se vypořádat s efektivním výběrem polohy FeNB. Optimalizací polohy dronu se zabývají autoři např. v [8, 9, 10, 11]. V těchto publikacích se zohledňuje poloha dronu pouze za účelem co nejvyššího navýšení přenosové kapacity nebo nejefektivnějším pokrytím určité oblasti mobilním signálem. Nezohledňuje se však množství vynaložené energie potřebné pro let dronu.

Tato diplomová práce se zabývá vývojem algoritmu, který minimalizuje výdej energie potřebný k pohybu dronu použitého jako létající základnové stanice za předpokladu, že dojde pouze k předem definovanému snížení přenosové kapacity. Navržený algoritmus uvažuje komunikaci mezi základnovou stanicí a uživateli ve směru downlink a to za předpokladu plně využívaného každého uživatelského komunikačního kanálu. Výsledky se porovnávají se se současnou architekturou mobilní sítě, tedy při využití fixních eNB.

Výsledkem navrženého řešení je přibližně lineární závislost mezi snížením přenosové kapacity a ušetřenou energií pro pohyb FeNB. Dále je zjištěn několikanásobný nárůst přenosové kapacity při použití několika jednotek FeNB oproti použití pouze fixních eNB. Porovnává se i energetická efektivita použití FeNB oproti použití pouze fixních eNB. U představeného scénáře je zjištěno, že použití více jak deseti FeNB už nepřináší razantní

zvýšení přenosové kapacity což způsobuje snížení energetické efektivity pod úroveň použití pouze fixních eNB.

Diplomová práce je rozdělena do šesti hlavních kapitol. V následující kapitole jsou představeny odborné publikace, které sloužili jako inspirace a možné navázání na představné problémy týkající se použití dronů jako létajících základnových stanic. V třetí kapitole je popsán model systému. Vysvětleny jsou vztahy a modely použité v navrženém algoritmu. Ve čtvrté části je principiálně vysvětlen navržený algoritmus snižující spotřebovanou energii pro pohyb FeNB. Pátá kapitola je věnována zhodnocení výsledků. Kapitola obsahuje zdůvodnění výsledných průběhů sledovaných metrik jimiž, jsou přenosová kapacita, energetická efektivita a spotřebovaná energie. V poslední části jsou výsledky shrnuty a vysvětlen přínos představovaného řešení. Dále jsou nastíněny možnosti pro budoucí práce.

2 Existující řešení

Tato kapitola je zaměřena na popis odborných článků, které se zabývají problematikou blízkou k této diplomové práci. Vysvětluje se jejich přínos a je zdůrazněno čím se tato diplomová práce od zmiňovaných publikací odlišuje či jak je doplňuje.

Budoucí mobilní sítě se budou muset vypořádat s velkým nárůstem aktivních zařízení a s tím jsou spojené nároky na spolehlivost a dostupnost sítě [12]. Nasazením dronů jako létajících základnových stanic – FeNB lze dosáhnout zvýšení přenosové kapacity a zvýšení energetické efektivity sítě [3]. Zlepší se i schopnost sítě dynamicky reagovat na nečekané situace jako například nečekané přetížení sítě v malé oblasti [13] nebo při přírodních katastrofách.

Přínosy plynoucí z použití dronu se zabývá mnoho publikací například [6, 14, 15] a použitím dronů jako létajících základnových stanic je potřeba věnovat další výzkum [8, 9, 16]. Řada problémů musí být vyřešena a prozkoumána [4, 15]. Konkrétně se jedná o stanovení letové výšky [17], prozkoumání závislosti rušení na zvýšení počtu použitých zdrojů elektromagnetického záření či minimalizaci vynaložené energie pro pohyb a zvýšení kapacity použitých baterií [18].

Autoři článku [3] představují architekturu létající přístupové sítě (FlyRAN – Flying radio access network). Provedené testy v publikaci ukazují možnou kombinaci FlyRAN s se stávající přístupovou sítí (RAN – Radio access network). Práce [3] ukazuje, že použití jediné FeNB v mobilní síti může nahradit až deset fixních eNB. Dále je v práci ukázáno, že použití FeNB může vést až k 5-ti násobnému zvýšení energetické efektivity.

Publikace [19] se zabývá poměrem optimální výšky FeNB a velikostí plochy, kterou FeNB dokáže obsluhovat. Výška FeNB je závislá jak na velikosti obsluhované plochy tak i na typu zástavby (předměstí města či hustá zástavba). Autoři uvažují i stanovení maximálního možného útlumu, pro danou výšku FeNB. Výslednou výšku autoři stanovili řádově na tisíce metrů z důvodu maximalizace velikosti obsluhované plochy. Takto vysoká letová výška je způsobena tím, že autoři uvažují směrovost antény a stanovením malého útlumu šířením signálu v zástavbě. Oproti tomu autoři v [17] se zabývají podstatně nižší letovou výškou a to řádově desítky metrů kvůli maximalizaci přenosové kapacity. Nižší letová hladina (řádově desítky metrů) je použita i v této diplomové práci. Aby autoři článku [17] zvýšili přenosovou kapacitu hledají takovou polohu, kde bude FeNB komunikovat s uživateli na přímou viditelnost. Představený algoritmus ukazuje, že při použití dronů jako létající základnové stanice dojde až ke dvojnásobnému zvýšení přenosové kapacity. Tato diplomová práce uvažuje také komunikaci na přímou viditelnost a navrhuje i možnost ušetřit část vynaložené energie pro let tím, že se FeNB nebude nacházet přímo ve zvolené poloze, ale v takové při které ještě dokáže uživatelům poskytovat dostatečně vysokou přenosovou kapacitu.

Článek [20] se zabývá nárůstem interferencí s rostoucím počtem nasazených FeNB. Navíc čím výše se FeNB pohybuje tím je nutné vysílat vyšším výkonem. FeNB tedy bude

zdrojem interferencí pro okolní buňky čímž klesne přenosová kapacita. Tato diplomová práce se také zabývá ideálním počtem nasazených FeNB ovlivňující velikost interferencí a je ukázán vliv nárůstu spotřebované energie na počtu použitých FeNB.

Pokročilejší model pro výpočet ztrát uvažující pravděpodobnost přímé viditelnost podle druhu zástavby je popsán v [21]. Autoři článku představují parametry α , β , γ , které definují hustotu zástavby. Představeny jsou čtyři simulační prostředí: první venkovská oblast druhá předměstí města, třetí husté městské prostředí s blízkými budovami a čtvrté nejhustší prostředí s vysokými mrakodrapy. Model vznikl na základě statistických parametrů ITU-R. Tento model je využit jak pro simulaci v této práci tak i v řadě dalších prací například [22, 23, 24].

Dron schopný fungování jako FeNB bude muset nést: antény, procesor, podpůrné obvody zajišťující rádiovou komunikaci a hlavně dostatečně silná zdroj energie. Autoři v [3] mimo jiné představují jakou zátěž představuje potřebný hardware. Hlavní omezující faktor je omezená kapacita baterií. Klade se proto důraz na snižování hmotnosti dronů. Například velmi lehké silikonové antény s fázovým uspořádáním váží přibližně 100 gramů [25]. Výpočetní hardware a pomocné obvody mohou vážit okolo 300-400 gramů [3] a baterie váží přibližně také 300-400 gramů. A samozřejmě samotná konstrukce dronu obsahující tělo dronu, rotory a vrtule může vážit okolo 500 gramů. Výsledná hmotnost je tedy přibližně jeden a půl kilogramu. Konvenční drony se dokáží vznášet přibližně desítky minut [5]. Prodloužení doby letu umožňují nové baterie složené z vodíkových článků. Při použití vodíkových baterií je možné zvýšit dobu letu až na 2.5 hodiny [18]. Při takové době letu už je možné uvažovat o nasazení dronů v případech jako jsou dopravní zácpy sportovní utkání nebo během rušných hodin, kdy se většina lidí přesouvá do nebo ze zaměstnání. Pro případ obsluhy určité oblasti po delší dobu se musí vyřešit problém s dobíjením baterií. Jedno řešení je pořízení dobíjecích stanic blízko fixních eNB nebo dobíjení dronů pomocí speciálních laserů [4]. Problematikou dobíjení dronů se zabývají [26, 27, 28]. Zajímavé řešení je představeno v [28] kde se uvádí jako možnost dobíjení dronů z elektrického vedení pomocí indukční smyčky. Dron by pak nemusel vůbec přistát po dobu několika dní. Dobíjecí čas je však zatím poměrně dlouhý a to přibližně šest hodin. Výzkum je však ještě na začátku a lze očekávat zlepšení v nadcházejících letech hlavně díky vývoji nových materiálů. Nicméně snižováním energetické zátěže nezpochybnitelně vede k prodloužení doby letu dronu. Pro tento účel je potřeba vyvíjet nové metody snižování energetického výdeje, čímž se tato diplomová práce také zabývá.

Možnost vedoucí ke snížení energetické zátěže je snížení vysílaných výkonů z FeNB. Například v [29] se autoři zabývají minimalizací vysílaného výkonu tím, že hledají optimální umístění dronu pro maximální pokrytí. Další práce zabývající se nasazením dronů jako létajících základnových stanic a zároveň minimalizací vysílaného výkonu jsou [30, 31]. Autoři v těchto pracích zohledňují minimální požadovanou přenosovou kapacitu, kterou je nutné dosáhnout při daném vysílacím výkonu. Dalším řešením zlepšení energetické účinnosti komunikace je vyvinout optimální letový plán po předem známé trase. V článkách [32, 33] je představen přístup teorie her řešící problém

přidělování časových slotů pro jeden či více dronů sbírající data ze senzorů pro plánování předefinované trasy.

Další problémem je připojení dronu k páteřní síti. Na realizaci připojení k páteřnímu spoji závisí výsledná maximální přenosová kapacita, kterou může dron za použití všech prostředků poskytovat. Bezdrátovým připojením se zabývají publikace [13, 34]. Autoři v [34] se zabývají bezdrátovým optickým spojením v neviditelném spektru. Pro fungování musí být zajištěna neustálá LOS komunikace mezi FeNB a fixní eNB. Použitím této metody je možné dosáhnout velmi vysokých rychlostí, řádově jednotky gbit/s. To je dáno možností obsazení velmi širokého komunikačního pásma. Tato diplomová práce uvažuje neomezenou kapacitu spojení mezi fixní eNB a FeNB. Výslednou uživatelskou přenosovou kapacitu omezuje pouze šířka kmitočtového spektra jedné FeNB, která je v této diplomové práci volena o velikosti 20 MHz, což odpovídá velikosti spektra pro technologii LTE [35].

3 Model systému

Následující kapitola je rozdělena do čtyř hlavních podkapitol. V první podkapitole jsou definovány množiny se kterými se v diplomové práci pracuje. Druhá podkapitola se zabývá rozborem modelu pro generování polohy uživatelů. Třetí podkapitola je věnována matematickým vztahům nutných k výpočtu sledovaných metrik a poslední část je věnována vysvětlení výpočtu spotřebované energie dronu pro pohyb.

3.1 Definice množin

Mějme množinu uživatelů definovanou jako $M = \{m_1, m_2, \dots, m_m\}$, kde $m_m \in \mathbb{R}^3$ a reprezentuje pozici m -tého uživatele. Také je vytvořena množina F definující jak fixní eNB tak i létající FeNB. Množina F se skládá ze dvou podmnožin F^F značící fixní eNB a F^L značící létající základnové stanice, takže platí $F^F + F^L = F$. Souřadnice základnových stanic jsou definovány jako $E^{F,L} = \{e_1^{F,L}, e_2^{F,L}, \dots, e_b^{F,L}\}$, kde $e_b^{F,L} \in \mathbb{R}^3$, $b \in F$ reprezentuje pozici b -té základnové stanice, současně platí $b = h + l$, kde h je počet fixních eNB a l je počet FeNB. Pozice fixních základnových stanic se s časem nemění. Pro úplnou definici platí, množina $f \in E^F$ a $l \in E^L$, $E = E^F \cup E^L$. Dále je vytvořen vektor $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, který značí jaký uživatel je připojen ke které eNB či FeNB. Přiřazení je prováděno na základě poměru signálu od interferencí a šumu $SINR$. Uživatel je přiřazen k té eNB či FeNB od které přijímá nejvyšší úroveň signálu, tedy nejvyšší $SINR$.

3.2 Model pohybu uživatelů

Použitý model pro pohyb uživatelů je inspirován článkem [36], kde autoři představují model referenčního bodu skupinového pohybu (RPGM – reference point group mobility), který definuje uživatele uvnitř skupiny. Každá skupina je definována svým referenčním bodem a vektorem určující rychlost a směr pohybu celé skupiny. Dále každý uživatel uvnitř skupiny získá na základě skupinového vektoru svůj vlastní pohybový vektor určující jeho souřadnice, rychlost a směr pohybu.

Původní RPGM model je navržen pouze pro generování uživatelů uvnitř skupin, proto se provedla modifikace tohoto modelu. Způsob generování polohy uživatelů je rozdělen na dvě větve. V první větvi se generuje pohyb první části uživatelů, kteří nenásledují žádný referenční bod a pohybují se zcela volně. Druhá část z celkového počtu uživatelů se generuje podle RPGM modelu, tedy pohyb těchto uživatelů je závislý na jejich referenčním bodě.

Uživatelé první větve modelu tvoří podmnožinu $K \subset U$. Uživatelé z podmnožiny K nejsou součástí žádné skupiny a pohybují se zcela nezávisle. Oproti tomu uživatelé z podmnožiny $L \subset U$ tvoří část uživatelů, kteří následují svůj referenční skupinový bod. Zároveň platí $(K \cup L) = U$. Každý uživatel z množiny U je reprezentován svými souřadnicemi (x_i, y_i, z_i) . Počáteční souřadnice náhodných uživatelů z první větve modelu x_i a y_i , kde $i \in K$ je generována náhodně v intervalu $(0, velikost\ plochy)$. Výška uživatele

z_i je stanovena na 1,5 metru. Což odpovídá průměrné výšce člověka [37]. Rychlost pohybu uživatelů v_i je volena náhodně z intervalu (v_{min}, v_{max}) , kde $v_{min} = 1,2$ m/s, $v_{max} = 1,5$ m/s [36]. Pozice uživatelů během simulace jsou generovány podle následujících rovnic:

$$\begin{aligned}
 v_i(t + \Delta t) &= \min[\max(v_i(t) + \Delta v_i, 0), V_{max}] \\
 \varphi_i(t + \Delta t) &= \varphi_i(t) + \Delta \varphi_i \\
 x_i(t + \Delta t) &= x_i(t) + v_i(t) \times \cos \varphi_i(t) \\
 y_i(t + \Delta t) &= y_i(t) + v_i(t) \times \sin \varphi_i(t) \\
 z_i(t + \Delta t) &= z_i(t)
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Δv a $\Delta \varphi$ reprezentují změny v rychlosti a směru pohybu. Aby nedocházelo k velkým změnám směru pohybu uživatele, vybírá se $\Delta \varphi$ z intervalu $(-\pi/12, \pi/12)$.

Uživatelé druhé větve z podmnožiny $L \in U$ sledují centrální bod své skupiny. Generování souřadnic referenčního bodu (x_{sk}, y_{sk}) se provádí naprosto stejně jako souřadnice uživatele z první větve. Pouze generování uživatelů patřící do skupiny respektují maximální velikost skupiny d_{sk} . Souřadnice uživatelů z podmnožiny L se získají:

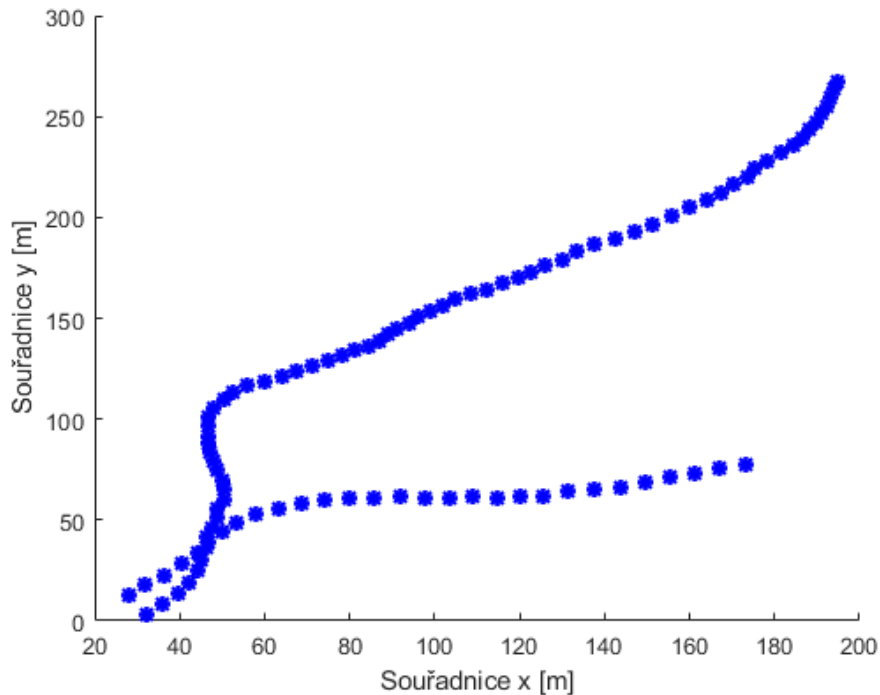
$$\begin{aligned}
 x_{iL} &= x_{sk}(t) + \Delta d_{sk}(t) \\
 y_{iL} &= y_{sk}(t) + \Delta d_{sk}(t)
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

$\Delta d_{sk}(t)$ je vzdálenost od centrálního bodu skupiny. Tato hodnota je volena náhodně z intervalu $(0, d_{sk})$.

Aby se zabránilo úniku uživatelů mimo sledovanou plochu, je implementován způsob otočení uživatele zpět směrem dovnitř plochy. Otočení je realizováno vrácením uživatele zpět o jednu pozici a k jeho úhlu pohybu je přičtena hodnota π radiánů.

$$\begin{aligned}
 \varphi_i(t + \Delta t) &= \varphi_i(t) + \pi \\
 x_i(t + \Delta t) &= x_i(t) - v_i(t) \times \cos \varphi_i(t) \\
 y_i(t + \Delta t) &= y_i(t) - v_i(t) \times \sin \varphi_i(t)
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Obr. 1 znázorňuje jak se uživatel během simulace pohybuje. Doba trvání simulace je patnáct minut s krokem simulace o trvání jedné sekundy.



Obr. 1 Příklad pohybu uživatele během simulace

3.3 Komunikační kanál

Pro jednoduchost modelování parametrů se v této diplomové práci uvažuje použití všesmerových antén. Důvodem je nezávislost směru přijímaného signálu na zisk antény čímž se značně zjednoduší výpočet přenosové kapacity.

3.3.1 Přenosová kapacita a energetická efektivita

V idealizovaném případě, kdy se mezi přijímačem a vysílačem nebude nacházet žádná překážka a nebudou se uvažovat ztráty absorpcí a rozptylem, bude poměr mezi přijatým a vysílaným výkonem roven ztrátám volným prostorem (FSL – Free Space Loss). Výpočet ztrát probíhá pomocí následující rovnice [38]:

$$L_{FSL} = \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \quad (3.4)$$

kde d je vzdálenost v metrech mezi vysílačem a přijímačem, f je vysílací frekvence v Hz a c představuje rychlost světla ve vakuu v metrech za sekundu. Hodnota ztrát FSL je bezrozměrná.

Přenosová kapacita komunikačního kanálu je definována jako maximální množství informace v bitech, přenesené za jednu sekundu. K výpočtu je použit Shannon-Hartleyův vztah pro maximální teoretickou kapacitu bezdrátového spoje [38]:

$$C = B_m \log_2 \left(1 + \frac{P_p}{N + I} \right) \quad (3.5)$$

B_m je šířka uživatelského pásma m -tého uživatele v Hz, P_p je přijatý výkon ve watttech, N je úroveň šumu ve watttech a I reprezentuje celkovou interferenci ve watttech. Poměr přijímaného výkonu a součet výkonu šumu a interferencí $N + I$ je znám jako odstup signálu od šumu plus interference (SINR – Signal to interference plus noise ratio). SINR vyjadřuje sílu signálu oproti ostatním zdrojům elektromagnetického záření. Úroveň šumu lze vypočítat následovně [38]:

$$N = k * T * B_m \quad (3.6)$$

kde k je Boltzmannova konstanta $k = 1.380 * 10^{-23} \text{ J} * \text{K}^{-1}$ a T je teplota okolního prostředí v kelvinech.

Další sledovaná metrika této práce je energetická efektivita sítě. Autoři [39] definují vzorec udávající poměr mezi přenosovou kapacitou komunikačního kanálu a energií potřebnou k vyslání informace:

$$E_{eff} = \frac{C}{(\sum_{t=0}^t P_V) * t} \quad (3.7)$$

energie představuje v rovnici (3.11) součin sumy všech okamžitých hodnot vysílaného výkonu za dobu t . Výsledná hodnota efektivity je v jednotkách bit/joule. Vztah demonstruje kolik energie je použito pro vyslání informace. Čím větší efektivita tím větší množství informace lze komunikačním kanálem přenést za cenu stejného množství spotřebované energie.

Pro vygenerování grafu, který bude zobrazovat průběh klesající přenosové kapacity v závislosti na ušetřené energii je nutné uvést jakým způsobem se přepočítají hodnoty přenosové kapacity a spotřebované energie na procenta. Přepočet na procenta se provádí z důvodu lepší přehlednosti výsledků. Hodnoty procentuální přenosové kapacity jsou vytvořeny následovně:

$$C_{\%,i} = 100 * \frac{C_{roz}}{C_{max}} (\%) \quad (3.8)$$

kde C_{max} značí maximální průměrnou uživatelskou přenosovou kapacitu dosaženou v případě, kdy se FeNB nachází ve svých určených polohách. C_{roz} značí průměrnou uživatelskou přenosovou kapacitu při zvolené rozhodné vzdálenosti r_{roz} .

Hodnoty procentuální spotřebované energie pro pohyb se získají poměrem mezi průměrnou spotřebovanou energií jednoho FeNB v dané vzdálenosti r_{roz} a maximální spotřebou, které se dosahuje v případě, kdy FeNB se pohybuje přesně po určeném bodě.

Následný přepoččet na procentuální hodnotu energie probíhal podle:

$$E_{\%,FeNB,i} = 100 * \frac{E_{roz}}{E_{max}} (\%) \quad (3.9)$$

kde E_{max} značí průměrnou spotřebu jedné FeNB pro případ, kdy se FeNB pohybuje v určené poloze a dosahuje tedy maximální hodnoty. E_{roz} značí průměrnou spotřebu jedné FeNB v rozhodné vzdálenosti r_{roz} .

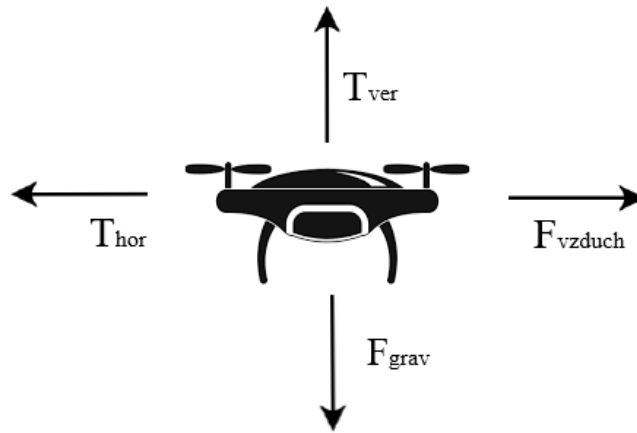
3.3.2 Přidělování komunikačních prostředků

Uživatelům jsou přiřazovány jednotlivé uživatelské kanály B_m tak, aby všichni uživatelé připojení k jedné základnové stanici dosáhli stejné přenosové kapacity. Je vytvořen vektor $\mathbf{B} = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$, kde b_m představuje šířku komunikačního kanálu m -tého uživatele a musí platit $\sum b_m = B_{NB}$. Jedna základnová stanice, ať už se jedná o eNB nebo o FeNB, má vyhrazené pásmo B_{NB} o velikosti 20 MHz podle standartní velikosti při použití technologie LTE na kmitočtu 1800 MHz [35].

3.4 Energie spotřebovaná pro pohyb dronu

V současné době existuje mnoho variant konstrukce dronů lišící se hlavně v počtu vrtulí. Jedná se o kvadrokoptéry, hexakoptéry či obecně multikoptéry. Tato diplomová práce se zabývá kvadrokoptérou. Kvadrokoptéra disponuje čtyřmi vrtulemi. Aby se kvadrokoptéra dokázala vznášet musí se dva protilehlé rotory vrtulí otáčet po směru hodinových ručiček a zbylé dva rotory v opačném směru [40]. Navíc se všechny rotory musí otáčet stejnou úhlovou rychlostí, tak vznikne nulové úhlové zrychlení kolem osy dronu a zároveň nulový aerodynamický moment. Splněním těchto podmínek se dosáhne stabilně vznášejícího dronu. Obr. 2 znázorňuje jaké síly působí na dron během letu.

Aby se dron mohl vznášet ve stále stejné výšce být tah všech rotorů roven gravitační síle působící na dron $T_{ver} = F_{grav}$ zároveň pokud se dron má držet ve stále stejné pozici musí se i tah T_{hor} rovnat síle okolního vzduchu F_{vzduch} . Vertikálně bude dron stoupat pokud jeho rotory vytvoří dostatečný vertikální tah T_{ver} překonávající tíhu vyvolanou gravitací země $F_{grav} = mg$. Toho lze dosáhnout zvýšením otáček všech rotorů dronu najednou. Oproti tomu horizontální pohyb se provádí zvýšením nebo snížením otáček rotorů směřující do směru požadovaného pohybu.



Obr. 2 Ukázka sil působící na dron [41].

K výpočtu energie je použit model podle [41] a [42]. Nejprve je nutné celkový směr pohybu rozdělit na vertikální a horizontální směr. Tím se získají dvě složky výsledného tahu:

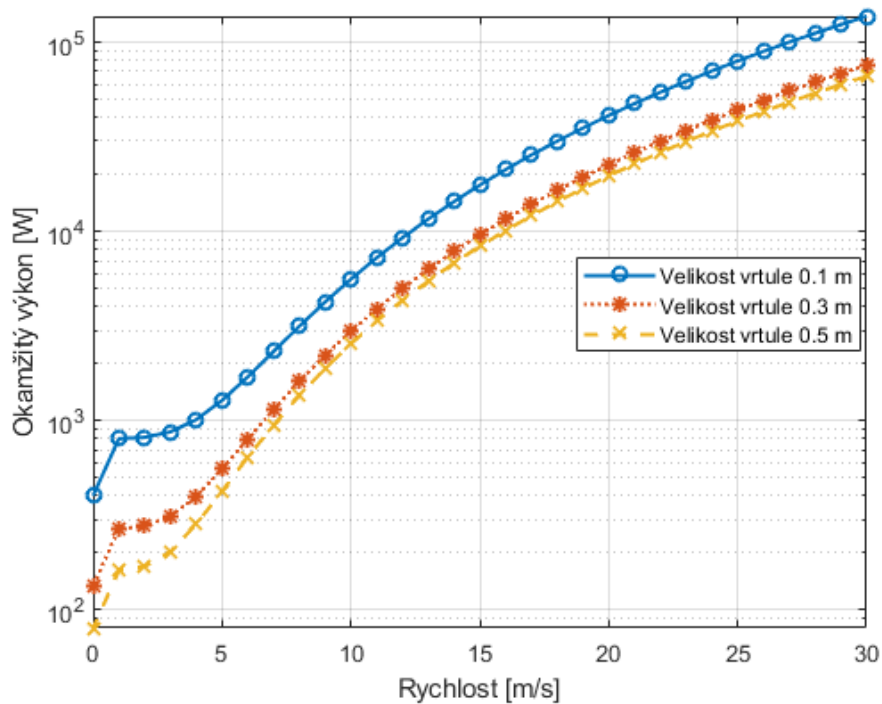
$$T_{ver} = v_{ver}^2 \frac{\rho c_D A}{2} + (mg) \quad (3.10)$$

$$T_{hor} = \sqrt{\left(\frac{v_{hor}^2 \rho c_D A}{2}\right)^2 + (mg)^2} \quad (3.11)$$

kde v_{ver} a v_{hor} jsou vertikální a horizontální rychlosti v metrech za sekundu, ρ je hustota vzduchu v kg/m^3 , c_D představuje součinitel odporu vzduchu, A je efektivní plocha kvadrokoptéry. Efektivní plocha se vypočte následovně:

$$A = \frac{1}{2} d_{MM}^2 + 3\pi r_{vrtule}^2 \quad (3.12)$$

d_{MM} je vzdálenost v metrech mezi motory a r_{vrtule} je poloměr velikosti vrtule kvadrokoptéry. Velikost vrtule tedy ovlivňuje zásadním způsobem efektivní plochu kvadrokoptéry a tím i celkovou spotřebu energie. Obr. 3 ukazuje, že při velikosti vrtule 0.1 metru je okamžitý výkon přibližně dvojnásobný oproti případu použití vrtule o velikosti 0.3 metru.



Obr. 3 Graf znázorňující průběh okamžitého výkonu na rychlosti dronu s porovnáním s různými velikostmi vrtule

Ze znalosti vertikálního a horizontálního tahu je možné spočít celkový spotřebovaný výkon. Protože použitý druh dronu je kvadrokoptéra, se čtyřmi rotory, je výpočet jednotlivých složek výkonu vynásoben čtyřmi:

$$P_{hor} = 4K \frac{T_{hor}^{\frac{3}{2}}}{r_{vrtule}} \quad (3.13)$$

$$P_{ver} = 4K \frac{T_{ver}^{\frac{3}{2}}}{r_{vrtule}} \quad (3.14)$$

Celková energie spotřebovaná pro let se vypočte podle následující rovnice:

$$E_{let} = (P_{hor} + P_{hor}) \times t \quad (3.15)$$

kde t je celková doba letu v sekundách. Výsledná energie je v joulech.

4 Navržené řešení pro snížení spotřeby energie pro pohyb

Tato kapitola je zaměřena na popis použitých metod, které se používají v algoritmu snižující spotřebovanou energii pro pohyb FeNB za předpokladu snížení přenosové kapacity. V první podkapitole je popsán způsob hledání polohy FeNB, která probíhá na základě nejnižší dosažené hodnoty $SINR$. V druhé kapitole je vysvětlen způsob přiřazování FeNB k polohám pomocí Hungarian algoritmu [43]. V poslední podkapitole je představen algoritmus řešící snížení spotřebované energie pro pohyb FeNB.

4.1 Vyhledání polohy pro FeNB

Poloha pro FeNB se hledá v případě pokud požadavek uživatelů na přenosovou kapacitu c_m^{min} není splněn, tedy pokud alespoň jeden uživatelský kanál dosahuje menší přenosové kapacity než c_m^{min} . Vyhledání polohy probíhá na základě polohy uživatele s nejnižší hodnotou $SINR$. Protože v okolí uživatele s nejnižší hodnotou $SINR$ dosahují uživatelé nejnižší přenosových kapacit c_m . Po vyhledání polohy se teoreticky do tohoto bodu umístí FeNB a spočte se uživatelská přenosová kapacita c_m a celý proces ověřování je zopakován. Algoritmus 1 ukazuje pseudokód pro hledání polohy pro FeNB.

Algoritmus 1: Nalezení bodů pro FeNB

1. **for** $m \in U$
 2. Spočtení $c_{m,F}$ podle (3.5)
 3. **end for**
 4. **while** $c_m < c_m^{min}$ pokud se nachází uživatel s $c_m < c_m^{min}$
 5. $[x_p, y_p] = \min_U SINR_m$ uživatel s nejnižším $SINR$
 6. **for** $m \in U$
 7. Spočtení $c_{m,F}$ podle (3.5) s FeNB v bodě x_p a y_p
 8. **end for**
 9. **end while**
-

Výsledkem jsou souřadnice bodů pro FeNB. Počet bodů určuje počet použitých FeNB.

4.2 Výběr cíle

Problém přiřazení FeNB k bodům je vyřešen pomocí Hungarian algoritmu [43] umožňující přiřadit každé FeNB optimální cíl v polynomiální čase na základně vzdálenosti mezi FeNB a body kam FeNB poletí. Vzdálenost se vypočte pomocí rovnice:

$$d_{FeNB,c} = \sqrt{(e_x^F(t) - x_{p,F}(t))^2 + (e_y^F(t) - y_{p,F}(t))^2} \quad (4.1)$$

kde $e_{x,y}^F(t)$ značí x -ové a y -ové souřadnice polohy FeNB v čase t a $x_{p,F(t)}$ a $y_{p,F(t)}$ x -ovou respektive y -ovou souřadnici FeNB v čase t .

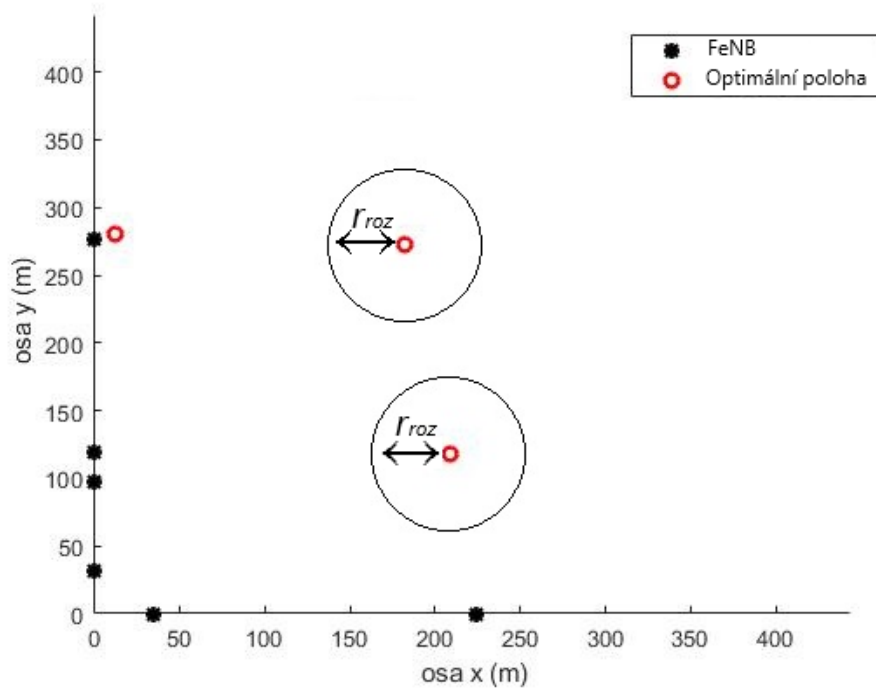
Hungarian algoritmus pracuje s maticí \mathbf{H} , kde počet sloupců m odpovídá jednotlivým FeNB a počet řádků n odpovídá jednotlivým zvoleným pozicím pro FeNB. Hodnoty prvků v matici $H_{n,m}$ odpovídají vzdálenosti mezi jednotlivými FeNB a vybranými polohami. Pro použití Hungarian algoritmu je nutné, aby matice \mathbf{H} byla čtvercová, tedy aby $m = n$, což v této práci je splněno, protože počet FeNB a počet vybraných poloh je stejný, z důvodu, že jedno FeNB může obsadit pouze jednu zvolenou polohu pro vysílání.

Algoritmus je založen na metodě redukce matice, pomocí které se hledají minimální prvky matice v každém řádku a následně v každém sloupci. Řádky představují jednotlivé zvolené polohy pro FeNB a sloupce jednotlivé FeNB. Umístění těchto hodnot je poté zanášeno do řešení. Postupuje se podle následujících kroků:

1. Řádková redukce – od každého prvku v řádku se odečte nejmenší hodnota daného řádku, vzniknou tak řádky obsahující alespoň jednu nulovou hodnotu
2. Sloupcová redukce – stejně jako u řádkové redukce pouze s rozdílem, že se pracuje se sloupci. Od každého sloupce se odečte jeho nejmenší hodnota
3. Překrývání nulových hodnot v řádku – Nalezne se právě jedna nepřekrytá nulová hodnota každého řádku a označí se krycí čarou sloupec tam kde se nachází nulová hodnota řádku.
4. Překrývání nulových hodnot ve sloupci – V každém sloupci se hledá nepřekrytá a právě jedna nulová hodnota. Po nalezení se označí krycí čarou řádek ve kterém se tato nulová hodnota nachází. Pokud je počet krycích čar roven počtu FeNB respektive zvolených poloh je nalezeno řešení v podobě polohy nulových hodnot v redukované matici. Tyto polohy představují v matici \mathbf{H} optimální přiřazení dané FeNB a daného zvoleného bodu.
5. Pokud je počet čar menší než počet FeNB pokračuje se nalezením minimálního prvku v redukované matici, který není překrytý krycí čarou. Tuto minimální hodnotu prvku odečítáme od ostatních nepřekrytých prvků matice a přičteme je k prvkům, které jsou překryté jak řádkovou tak sloupcovou krycí čarou. Následuje znovu krok 3 dokud není nalezen stejný počet krycích čar jako FeNB.

4.3 Algoritmus snižující spotřebu energie

Pomocí výše vysvětleného Hungarian algoritmu se určí nejvhodnější kombinace kam který FeNB poletí. Aby došlo k ušetření energie je nutné minimalizovat pohyb dronu. Toho je docíleno umístěním FeNB ne přímo do určené polohy vybranou podle $SINR$, nýbrž do rozhodovací vzdálenosti r_{roz} . Obr. 4Obr. 4 zobrazuje rozhodovací vzdálenost r_{roz} v okolí FeNB. Rozhodná vzdálenost r_{roz} je hlavní parametr v určování poměru mezi dosažitelnou přenosovou kapacitou a ušetřenou energií pro pohyb FeNB.



Obr. 4 Zobrazení rozhodovací vzdálenosti okolo polohy FeNB

Algoritmus 2 slouží pro pohyb FeNB směrem ke své pozici. Pozice FeNB se získává z následující rovnice:

$$\begin{aligned} e_x^F(t + \Delta t) &= e_x^F(t) + v_{FeNB} * \cos(\gamma_f(t)) \\ e_y^F(t + \Delta t) &= e_y^F(t) + v_{FeNB} * \sin(\gamma_f(t)) \end{aligned} \quad (4.2)$$

kde e_x^F a e_y^F značí x -ové a y -ové souřadnice FeNB, Δt je simulační krok algoritmu, γ_f značí úhel mezi současnou polohou FeNB a cílovým bodem a v_{FeNB} je aktuální rychlost FeNB. Úhel γ se získá ze vztahu:

$$\gamma(t) = \tan^{-1} \left(\frac{e_x^F(t) - x_{p,F}(t)}{y_{p,F}(t) - e_y^F(t)} \right) + \frac{\pi}{2} \quad (4.3)$$

zde $x_{p,F}$ a $y_{p,F}$ značí souřadnice polohy pro danou FeNB. Aby se dosáhlo dalšího snížení vynaložené energie je rychlost pohybu v_{FeNB} volena dynamicky a to v závislosti na vzdálenosti od své cílové polohy. Pokud se FeNB nachází v blízkosti svého cíle sníží se rychlost pohybu na průměrnou rychlost lidské chůze 0.2 ± 1.3 m/s [44]. Snížením rychlosti pohybu dojde ke snížení spotřebované energie. Navíc pokud se FeNB bude nacházet ve vzdálenosti menší než je rozhodovací vzdálenost r_{roz} , zůstane FeNB stát na místě, čím dochází k největší úspoře energie. Další pohyb FeNB vyvolá posunutím sledovaného bodu, který je ovlivněn pozicí pohybujících uživatelů.

Algoritmus 2: Pohyb FeNB

1. Spočtení $d_{FeNB,c}$ (4.1)
 2. Optimální přiřazení FeNB k bodům pro vysílání (Hungarian algoritmus)
 3. **for** $\Delta t \in t$ (t celkový čas simulace)
 4. Posunutí uživatelů o simulační krok
 5. Pohyb FeNB o simulační krok (4.2) a (4.3), aktualizace $d_{FeNB,c}$
 6. Spočtení $d_{FeNB,c}$ (4.1)
 7. **if** $d_{FeNB,c} < r_{roz}$
 8. $v_{FeNB} = 0$
 9. **else if** $d_{FeNB,c} < (r_{roz} + v_{FeNB} * t_{SIM}) \ \&\& \ d_{FeNB} > r_{roz}$
 10. $v_{FeNB} = 0,2 \pm 1.3 \text{ m/s}$
 11. **else if** $d_{FeNB,c} > r_{roz} + v_{FeNB} * t_{SIM}$
 12. $v_{FeNB} = v_{max}$
 13. **end if**
 14. Spočtení c_m
 15. **end for**
-

5 Simulační scénář a výsledky

Tato kapitola je rozdělena do dvou hlavních podkapitol. První je věnována představení simulačního scénáře. Druhá podkapitola je zaměřena na zhodnocení výsledků práce. Dále druhá podkapitola rozdělena na další podkapitoly a věnující jednotlivým skupinám grafů. U každého výsledného grafu je vysvětleno, jakým způsobem je vygenerován a zdůvodnění výsledného průběhu.

5.1 Simulační scénář

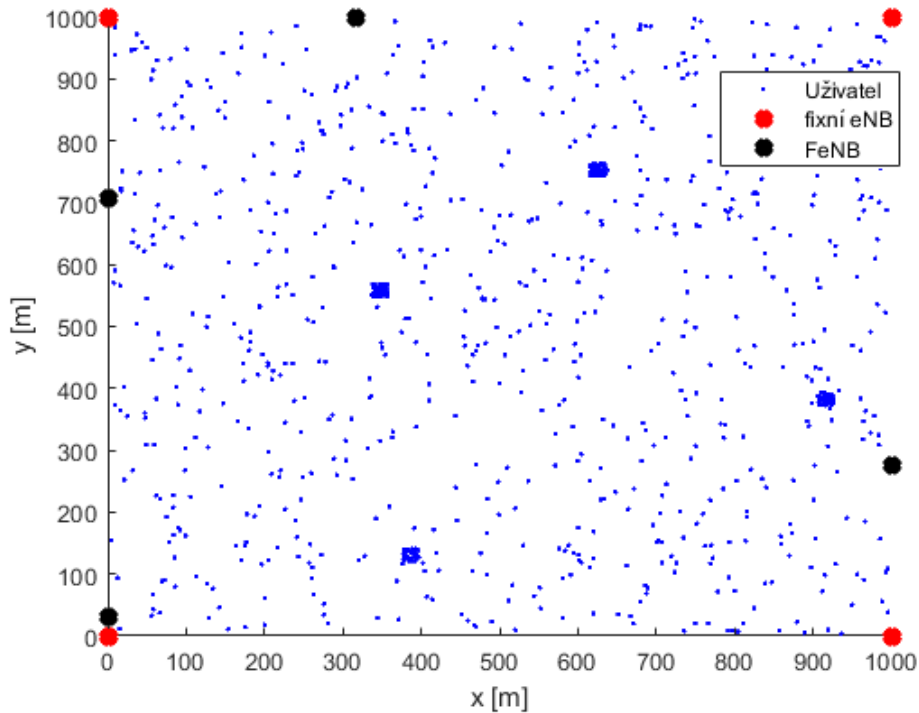
Během simulací jsou použity následující vstupní parametry obsažené v Tab. 1. V této diplomové práci se uvažuje šířka komunikačního kanálu $B_{NB} = 20$ MHz [35]. Vysílací frekvence f je 1800 MHz. Celá práce je zaměřena na směr komunikace ve směru downlink za předpokladu, že všichni uživatelé využívají plně svůj přidělený komunikační kanál. Simulace jsou prováděny v programu MATLAB.

Tab. 1 Vstupní parametry

Parametr	Hodnota
Počet uživatelů - m	100 až 1000
Počet FeNB - l	1 až 30
Počet fixních eNB - h	4
Vysílací frekvence - f	1800 MHz
Šířka komunikačního kanálu základnové stanice - B_{NB}	20 MHz
Vysílací výkon eNB, FeNB - P_V	10 dBm
Zisk vysílací antény - G_V	10 dBi
Zisk uživatelské přijímací antény - G_P	0 dBi
Délka simulace - t	15 minut
Výška FeNB	40 metrů
Velikost oblasti	1000x1000 metrů
Velikost vrtule FeNB - r_{vrtule}	0.3 m

Jsou sledovány následující metriky jako uživatelská přenosová kapacita c_m , energetická efektivita $E_{eff,m}$ a množství spotřebované energie E , dále se vyhodnocují hodnoty pro graf zobrazující snižující procentuální přenosovou kapacitu $C_{\%,i}$ v závislosti na procentuální hodnotě ušetřené energie $E_{\%,FeNB,i}$.

Obr. 5 znázorňuje jak jsou uživatelé rozmístěni během simulace. Obr. 5 zobrazuje čtyři fixní eNB, čtyři FeNB a tisíc uživatelů pohybujících se podle pohybového modelu popsáno v kapitole na straně 16. Čtvrtina uživatelů se pohybuje ve skupinách (výraznější modrá místa) a zbytek zcela náhodně. Obr. 5 ukazuje všechny FeNB ve svých počátečních pozicích na okraji plochy. Jedná se tedy o začátek simulace.

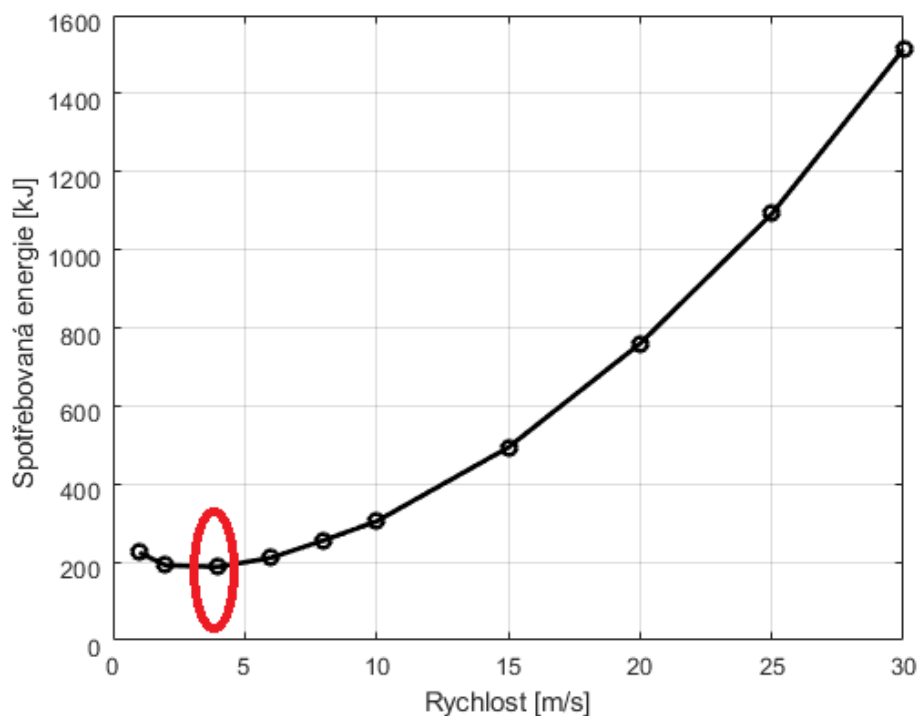


Obr. 5 Rozmístění uživatelů fixních eNB a FeNB

Hlavním parametrem, který ovlivňuje spotřebu energie FeNB je rychlost pohybu, jak je vysvětleno v kapitole na straně 20. Musela být zvolena maximální rychlost pohybu tak, aby se dosáhlo nejnižší spotřeby energie. Obr. 6 znázorňuje jak vypadá závislost spotřebované energie na zvolené maximální rychlosti. Zvolená maximální rychlost velmi ovlivňuje spotřebovanou energii a to i v případě, že FeNB letí touto maximální rychlostí pouze po omezenou dobu, protože ve chvíli, kdy FeNB dorazí do blízkosti své zvolené polohy zpomalí se rychlost pohybu nebo dokonce zcela zastaví. Což závisí na tom, zda se se FeNB nachází v rozhodovací vzdálenosti r_{roz} .

Jak ukazuje Obr. 3 na stránce 22, je vidět, že okamžitý výkon roste s rychlostí exponenciálně. To je způsobeno kvadratickou závislostí rychlosti pohybu na tahu dronu v horizontální rovině podle (3.10).

Obr. 6 je vytvořen vyhodnocením celkové spotřebované energie jednou FeNB přes měnící se maximální rychlost v_{FeNB} za celou dobu trvání 15-ti minutové simulace. Na základě průběhu je pro pohyb FeNB zvolena rychlost $v_{FeNB} = 4\text{m/s}$.



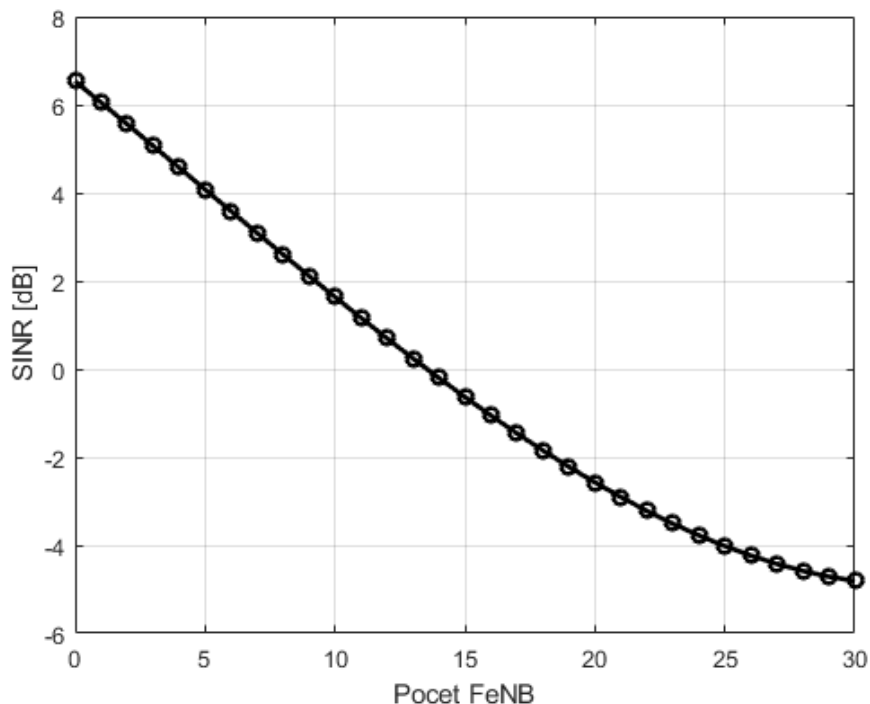
Obr. 6 Průměrná spotřeba jedné FeNB v závislosti na maximální rychlosti pohybu

5.2 Výsledky simulací

5.2.1 Vliv počtu FeNB na sledované metriky

Díky většímu počtu FeNB lze očekávat zvýšení uživatelské přenosové kapacity. To je způsobeno tím, že k jedné základnové stanici bude připojeno méně uživatelů. Méně uživatelů se tak bude muset dělit o celou šířku komunikačního kanálu jedné základnové stanice B_m o velikosti 20 MHz. Na uživatele tak zbyde větší množství prostředků a zvýší se tím jeho přenosová kapacita. Avšak čím více (F)eNB se bude na ploše nacházet, tím se zvětší velikost interferencí a sníží se tak hodnota poměru signálu k interferencím a šumu – $SINR$, což dokazuje graf na Obr. 7

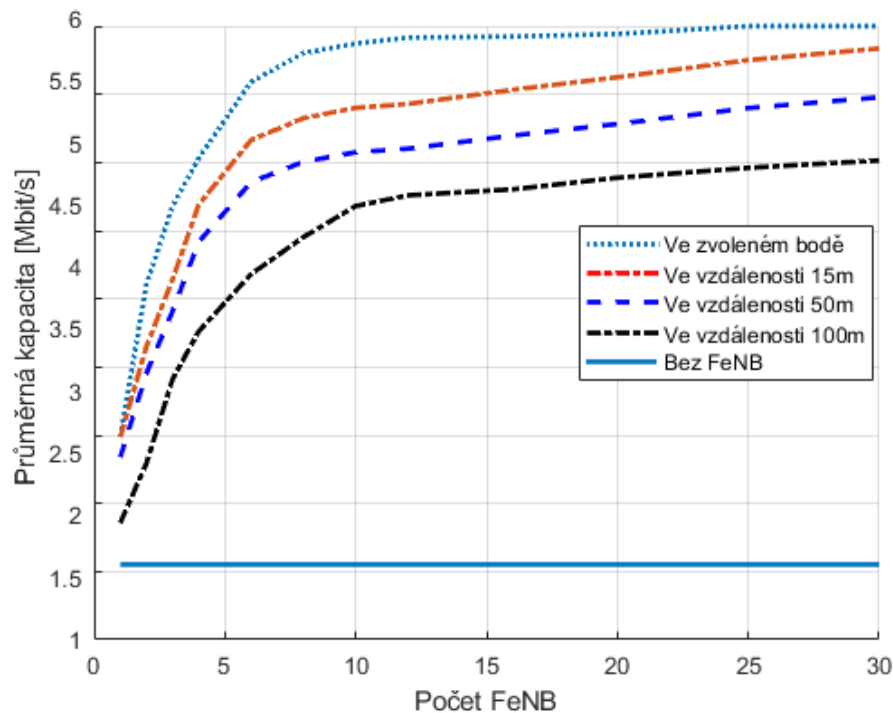
Obr. 7 znázorňuje průběh velikosti $SINR$ v závislosti na zvyšujícím počtu použitých FeNB. Graf je získán průměrováním přes všechny uživatelské hodnoty $SINR$ pro jednotlivé počty použitých FeNB.



Obr. 7 Závislost SINR na počtu FeNB

Obr. 8 znázorňuje průběhy závislosti průměrné uživatelské přenosové kapacity na počtu FeNB. Jak je zmíněno výše se zvyšujícím počtem FeNB se zvyšuje přenosová kapacita z důvodu širších uživatelských komunikačních kanálů. Proto lze pozorovat počáteční strmý nárůst uživatelské přenosové kapacity. Ovšem se zvyšujícím počtem FeNB se zvyšuje velikost interference, která značně ovlivňuje uživatelskou kapacitu. To je důvod proč nárůst uživatelské kapacity už není tak strmý pro větší počet použitých FeNB. Přenosová kapacita sice stoupá ale další nárůst FeNB není tak razantní, záleží samozřejmě na pozici FeNB od zvolené polohy. Největšího zvýšení uživatelské přenosové kapacity je dosaženo při použití pěti až sedmi FeNB. S dalšími FeNB už není zvýšení tak markantní.

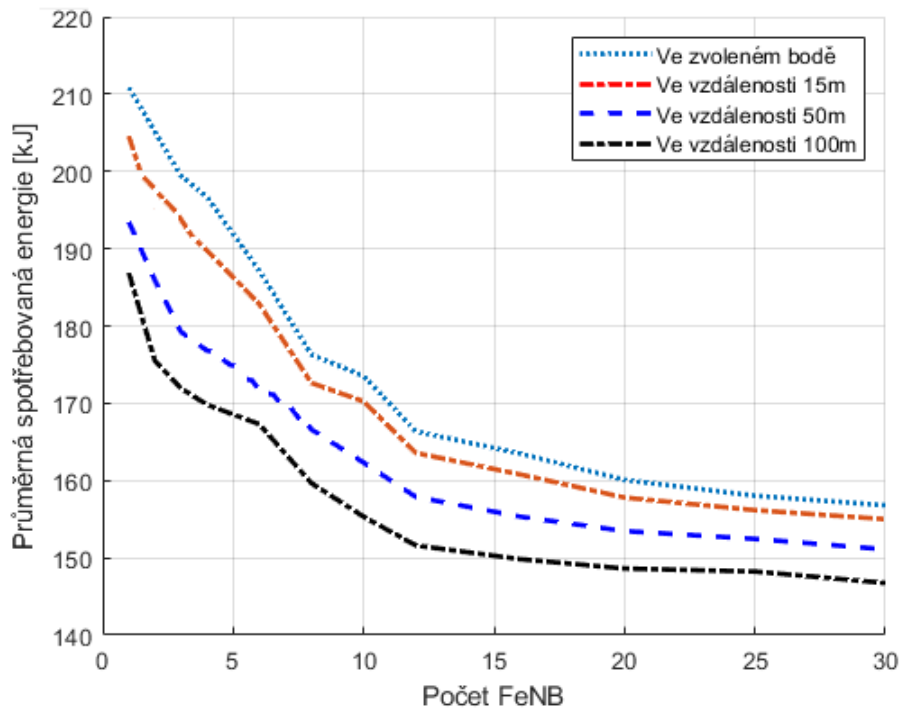
Obr. 8 dále porovnává velikost dosažené přenosové kapacity pro případ použití pouze fixních eNB. Při použití pouze fixních eNB lze dosáhnout přenosové kapacity 1,2 Mbit/s. Oproti tomu scénář s použitými FeNB vykazuje několikanásobné zvýšení přenosové kapacity.



Obr. 8 Průběh průměrné uživatelské přenosové kapacity, 1000 uživatelů

Obr. 9 znázorňuje průběh průměrné spotřebované energie spotřebované jedním FeNB v závislosti na zvyšujícím počtu FeNB. Průběh je získán průměrováním spotřebované energie přes všechny FeNB.

Klesající průběh je způsoben výběrem bližší polohy pro FeNB v důsledku většího počtu bodů a FeNB. Obr. 9 porovnává vliv velikosti rozhodné vzdálenosti r_{roz} . Zvolením velké rozhodné vzdálenosti r_{roz} , v řádu vyšších desítek metrů, lze dosáhnout úspory energie přibližně 20 kJ při použití jednoho až deset FeNB během 15- ti minutové simulace.

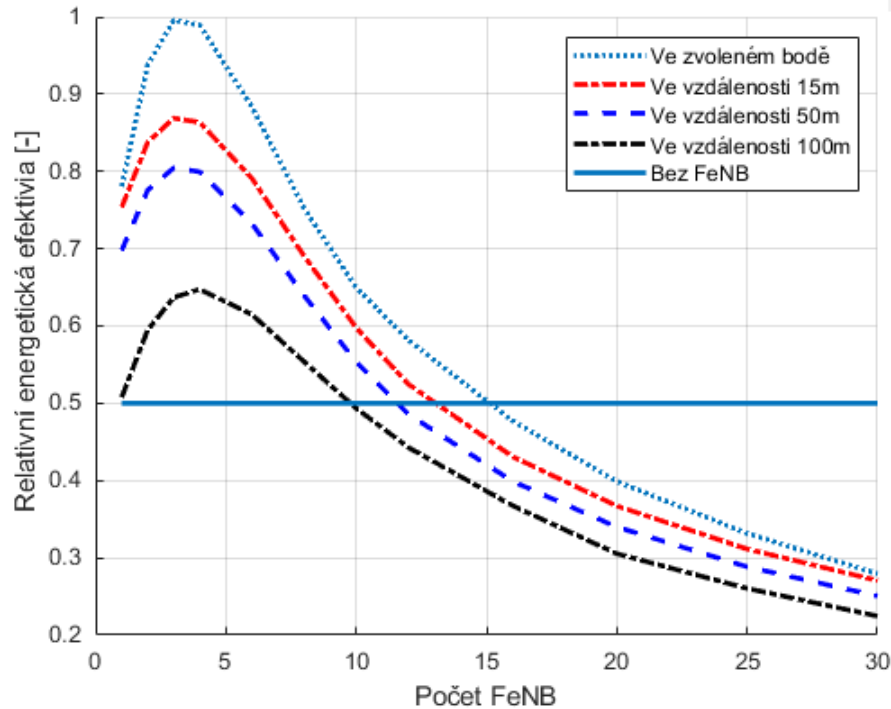


Obr. 9 Průměrná spotřebovaná energie jedné FeNB v závislosti na počtu FeNB

Obr. 10 ukazuje průběh relativní energetické efektivity komunikace mezi eNB respektive FeNB v závislosti na různých počtech použitých FeNB. Komunikace je uvažována ve směru downlink. Hodnoty grafu se získali zprůměrováním všech energetických efektivit pro daný počet FeNB. Dále je porovnáván vliv rozhodné vzdálenosti r_{roz} od zvolené polohy FeNB pro vysílání.

V grafu je vidět počáteční nárůst energetické efektivity, který je způsoben strmým nárůstem přenosové kapacity pro menší počet FeNB, jak ukazuje Obr. 8, zobrazující závislost uživatelské přenosové kapacity na počtu použitých FeNB. Obr. 10 dosahuje maxima energetické efektivity při použití třech až čtyřech FeNB. Přesný počet závisí na rozhodné vzdálenosti r_{roz} od zvolené polohy. Následný pokles energetické efektivity je způsoben tím, že s rostoucím počtem nasazených FeNB roste množství spotřebované energie a nárůst přenosové kapacity při použití více FeNB už není tak razantní.

Z grafu je patrné, že při použití deseti až patnácti FeNB už není efektivnější než použití pouze fixních eNB. Důvodem je příliš velké zvýšení spotřebované energie jednotlivými FeNB a zároveň stále se zmenšujícím přírůstkem přenosové kapacity.



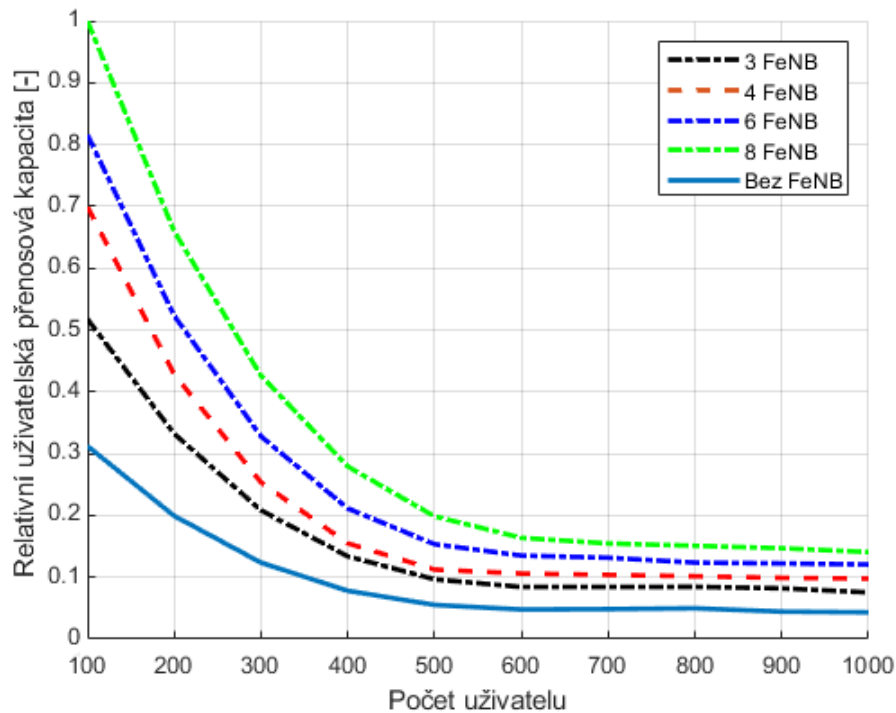
Obr. 10 Relativní energetická efektivita v závislosti na počtu FeNB

5.2.2 Vliv počtu uživatelů na přenosovou kapacitu a energetickou efektivitu

Obr. 11 zobrazuje průběh uživatelské přenosové kapacity přes různé množství uživatelů s porovnáním s různými počty FeNB a i scénářem, kde jsou použity pouze fixní eNB. Uživatelská přenosová kapacita je získána průměrováním všech hodnot přenosové kapacity přes celou dobu trvání simulace.

Pokles uživatelské přenosové kapacity je způsoben zvyšujícím počtem aktivních uživatelů připojených k jedné základnové stanici. V důsledku toho se uživatelům přidělují menší komunikační prostředky čímž klesá uživatelská přenosová kapacita.

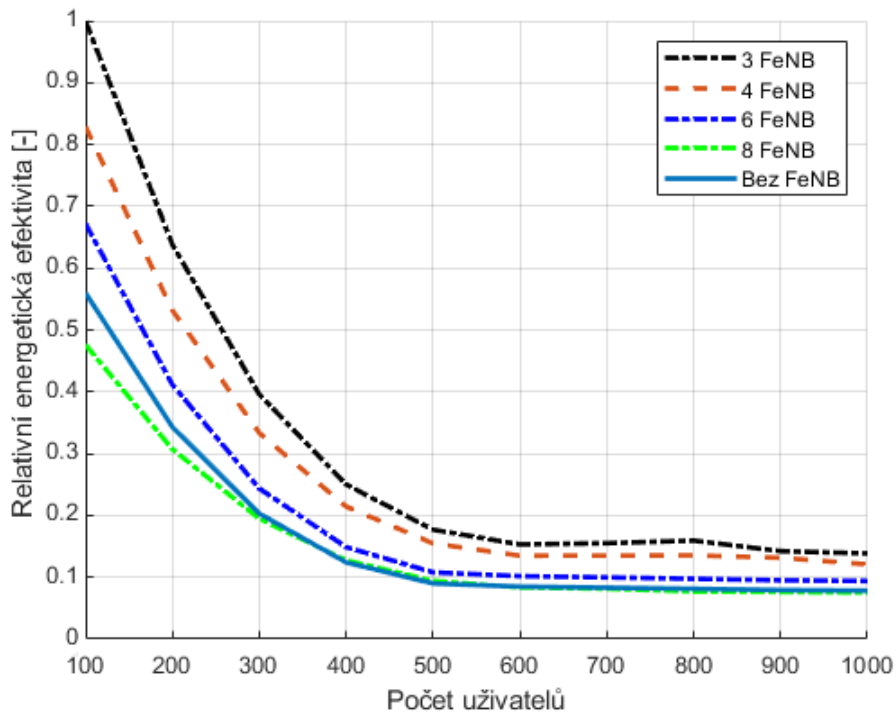
Z grafu je patrné, že použití třech FeNB je dosaženo téměř dvojnásobné uživatelské přenosové kapacity oproti případu, kdy jsou použity pouze fixní eNB. Se zvyšujícím počtem FeNB uživatelská přenosová kapacita roste. To je způsobeno přidělením širšího uživatelského komunikačního pásma v důsledku menšího počtu uživatelů připojených k jedné základnové stanici.



Obr. 11 Vliv počtu uživatelů na relativní uživatelskou přenosovou kapacitu

Obr. 12 zobrazuje vývoj relativní energetické efektivity uživatelské komunikace, ve směru downlink, s rostoucím počtem aktivních uživatelů. Porovnává se různý počet FeNB a použití pouze fixních eNB. Energetická efektivita klesá s narůstajícím počtem uživatelů. Důvodem je snížení dosažené uživatelské přenosové kapacity jak zobrazuje Obr. 11.

Při použití třech FeNB je dosaženo nejvyšší energetické efektivity, což je způsobeno největším poměrem mezi dosaženou uživatelskou přenosovou kapacitou a energií spotřebovanou pro přenos signálu mezi základnovými stanicemi a uživateli. Při použití osmi FeNB je již spotřebovaná energie tak velká, že je energeticky efektivnější použití pouze fixních eNB.

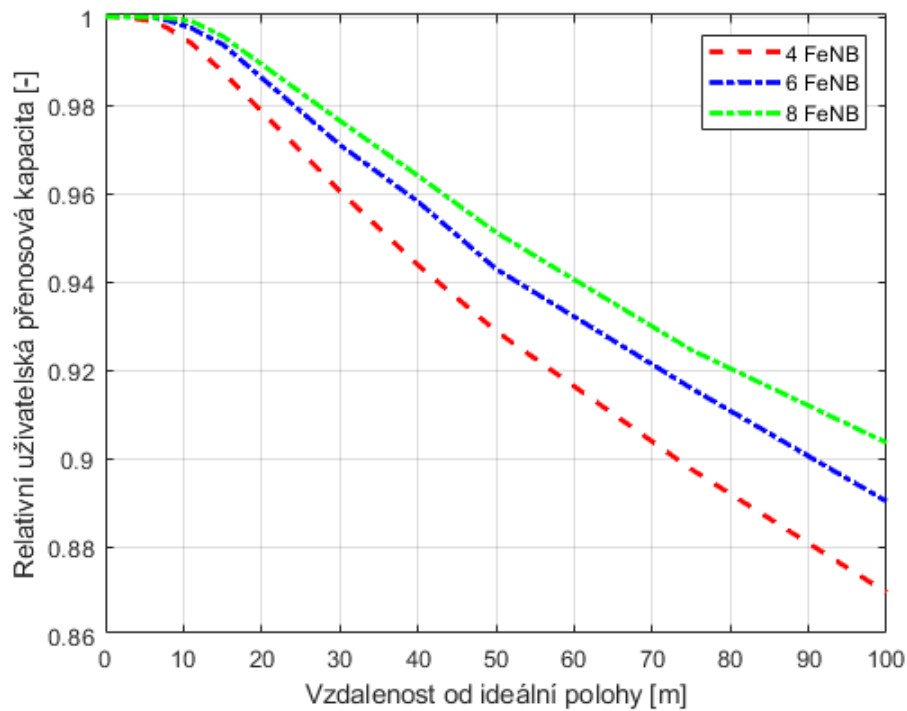


Obr. 12 Relativní energetická efektivita v závislosti na počtu uživatelů

5.2.3 Vliv rozhodné vzdálenosti FeNB od zvolené polohy na sledované metriky

Obr. 13 zobrazuje jaký lze očekávat pokles uživatelské přenosové kapacity se vzrůstající vzdáleností od zvolené polohy. Pokles je způsobený závislostí přenosové kapacity na rostoucí útlum volným prostorem.

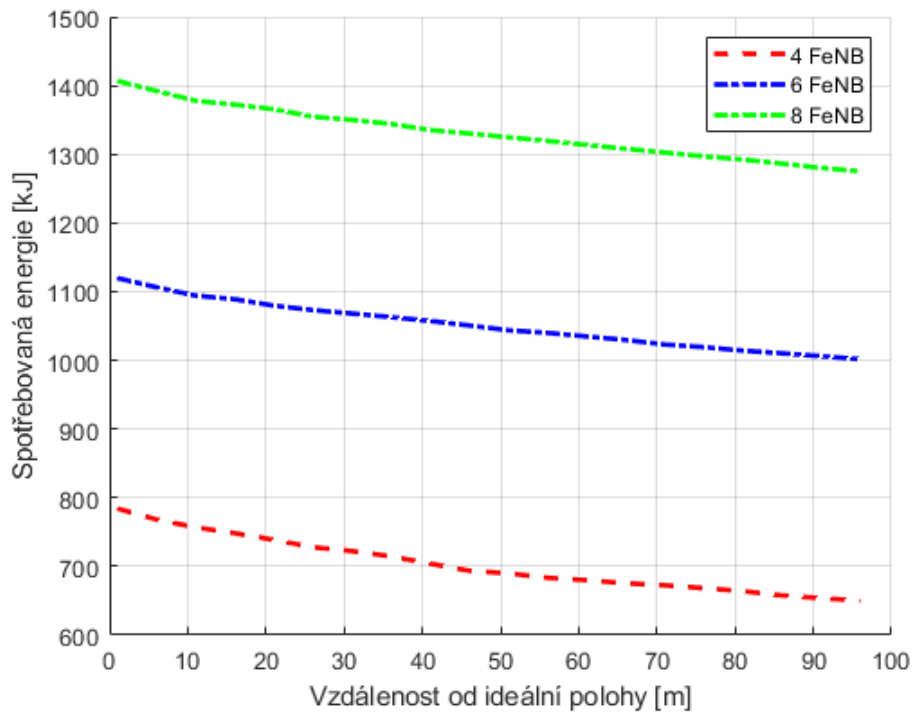
Jak je zmíněno výše, maximálních přenosových kapacit je dosaženo v případě, kdy se FeNB nachází přesně ve zvolené pozici. Obr. 13 obsahuje průběhy vytvořené porovnáním maximální dosažené přenosové kapacity, pro jednotlivé počty FeNB, a přenosových kapacit dosažených v různých vzdálenostech od zvolené polohy. Z grafu lze pozorovat mírně strmější průběh s nižším počtem FeNB, to je způsobeno počtem připojených uživatelů k jedné základnové stanici. V případě, kdy je méně uživatelů připojených k jedné základnové stanici získají uživatelé širší komunikační kanál. S širším komunikačním kanálem roste odolnost na zvýšení útlumu volným prostorem rostoucím se vzdáleností mezi základnovou stanicí a uživatelem. Z grafu je patrné, že vliv širšího komunikačního kanálu však není tak výrazný a to v řádu jednotek procent.



Obr. 13 Relativní závislost uživatelské přenosové kapacity na vzdálenosti FeNB od zvolené polohy

Obr. 14 znázorňuje průběh celkové spotřebované energie přes vzdálenost od zvolené polohy s porovnáním různých počtů FeNB. Průběhy energií pro Obr. 14 jsou získány sečtením všech hodnot spotřebované energie během 15-ti minutové simulace.

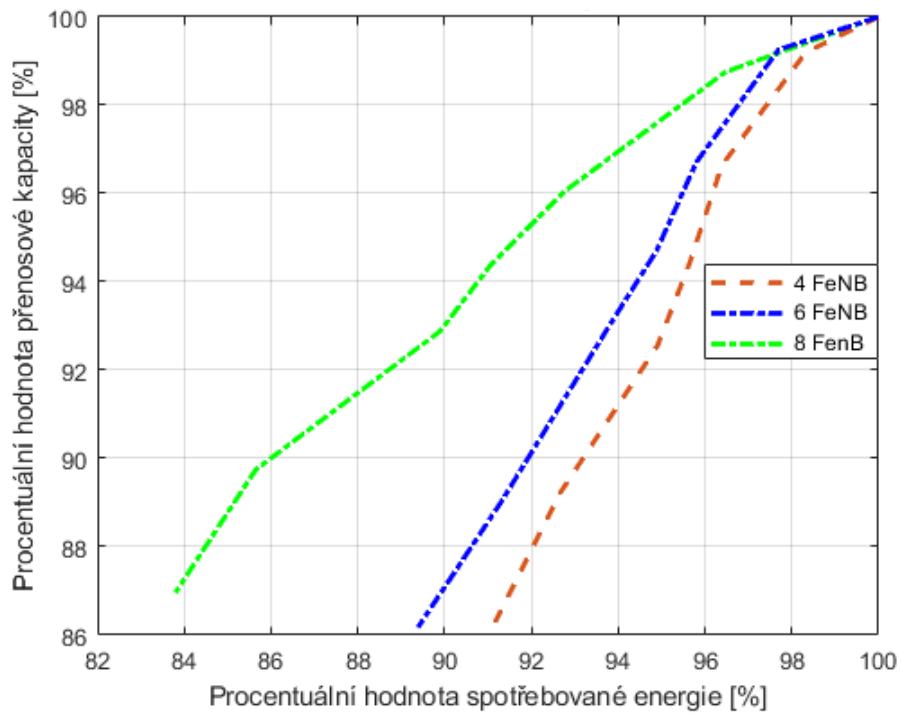
Průběhy mají klesající tendenci způsobenou ušetřením spotřebované energie díky větší rozhodné vzdálenosti r_{roz} . Větší r_{roz} umožňuje FeNB překonat menší vzdálenost od své počáteční polohy a navíc umožňuje FeNB stát na místě pokud se FeNB nachází v rozhodné oblasti jak zobrazuje Obr. 4. FeNB se začne pohybovat v případě, když se zvolená poloha v závislosti na pohybu uživatelů posune vůči FeNB do větší vzdálenosti než r_{roz} .



Obr. 14 Celková spotřebovaná energie

Cílem práce je navrhnout algoritmus snižující spotřebovanou energii pro pohyb FeNB za cenu mírného snížení přenosové kapacity. Výsledným grafem znázorňující chování navrženého algoritmu je Obr. 15. Obr. 15 znázorňuje jak velké snížení přenosové kapacity $C_{%,i}$ přinese ušetření spotřebované energie $E_{%,FeNB,i}$ pro pohyb FeNB.

Obr. 15 například ukazuje, že při použití čtyřech FeNB lze dosáhnout 7% energetické úspory za předpokladu, že přenosová kapacita dosáhne pouze 90% své maximální možné hodnoty.



Obr. 15 Závislost poklesu přenosové kapacity na množství spotřebované energie pro pohyb FeNB

6 Závěr

V této diplomové práci je navržen algoritmus snižující spotřebovanou energii pro pohyb dronů použitých jako létající základnové stanice. Snížení spotřebované energie je dosaženo za cenu snížení uživatelské přenosové kapacity. Směr komunikace se v představovaném algoritmu uvažuje pouze ve směru downlink za předpokladu, že všichni uživatelé plně využívají svůj přidělený komunikační kanál. Dosažení snížení spotřebované energie je dosaženo minimalizací pohybu FeNB. Algoritmus pracuje s představenou metrikou r_{roz} rozhodné vzdálenosti od zvolené polohy FeNB vůči uživatelům. Poloha se vybírá podle pozice uživatele s nejnižším dosaženým $SINR$. Kombinací rozhodné vzdálenosti r_{roz} a dynamicky volenou rychlostí pohybu FeNB, která značně ovlivňuje potřebu energie, je dosaženo dočasného zastavení FeNB na jednom místě, čímž vzniká úspora energie. Pohyb FeNB vyvolá přesun uživatelů, kteří určují svojí polohou pozici pro vysílání. Pokud se FeNB nachází v menší vzdálenosti od své určené polohy než je zvolena rozhodná vzdálenost r_{roz} , zůstává stát a šetří energii. Výsledkem algoritmu vznikla přibližně lineární závislost mezi ušetřenou energií a snížením přenosové kapacity.

Práce se také zabývá přínosem nasazení FeNB v současných mobilních sítích. Sledován je vliv na přenosovou kapacitu a na energetickou efektivitu sítě z pohledu komunikace mezi základnovou stanicí a uživateli. Výsledky ukazují několikanásobné zvýšení uživatelské přenosové kapacity už při nasazení několika jednotek FeNB. Navýšení přenosové kapacity roste přibližně logaritmicky a při větším počtu FeNB už růst přenosové kapacity není příliš významný. Z výsledků je také zjištěno, že energetická efektivita dosahuje maxima při použití třech až čtyřech FeNB. S dalším nárůstem FeNB už energetická efektivita klesá. Při použití deseti až patnácti FeNB, v závislosti na vzdálenosti FeNB od určené polohy, je použití FeNB z hlediska energetické efektivitě méně efektivní než použití pouze fixních eNB.

Použití dronů jako základnových stanic vede ke zvýšení přenosové kapacity díky optimálnější poloze nad uživateli, čímž lze dosáhnout komunikaci na přímou viditelnost a také minimalizací vzdáleností mezi FeNB a uživateli. Omezení použití FeNB je nedostatečná kapacita baterií, proto je nutné se zabývat způsoby snižující množství spotřebované energie a dosáhnout tak prodloužení času po kterou může FeNB obsluhovat uživatele.

Práci je možné v budoucnu rozšířit například o implementování více komplexního modelu letu dronu, kde jsou zahrnuty budovy jako překážky. Další rozšíření se může týkat zamyšlením nad způsobem optimalizací výpočtu polohy FeNB, protože vliv výpočetní náročnosti není zanedbatelný. Možné je využití techniky výpočtu na okraji mobilní sítě (Mobile Edge Computing). Zaměřit se další práce mohou nad metodami predikce pohybu uživatelů což by vedlo k zefektivnění určování polohy FeNB.

Reference

- [1] ETSI, „etsi.org,“ [Online]. Available: <https://www.etsi.org/technologies/5g>, Accessed: 2019-02-12..
- [2] X. Ge, S. Tu, G. Mao, C. X. Wang a T. Han, „5G Ultra-Dense Cellular Networks,“ *IEEE Wireless Communications*, 2016.
- [3] Z. Becvar, M. Vondra, P. Mach, J. Plachy a D. Gesert, „UAVs in Future Mobile Networks: Can flying base station substitute Ultra-Dense Small Cells?,“ *IEEE Communications Magazine*, 2016.
- [4] Y. Zeng, R. Zhang a T. Lim, „Wireless Communications with Unmanned aerial vehicles opportunities and challenges,“ *IEEE Communications Magazine*, 2016.
- [5] S. Chandresakharan, K. Gomez, A. Al-Hourani, S. Kandeepan, T. Rasheed, L. Goratti, L. Reynaud, .. Grace, I. Bucaille, T. Wirth a S. Allsopp, „Designing and Implementing Future Aerial Communication Networks,“ *IEEE Communications Magazine*, 2016.
- [6] I. Bor-Yaliniz a H. Yanikomeroglu, „The New Frontier in RAN Heterogeneity,“ *IEEE Communications magazine*, 2016.
- [7] L. Zhao, C. Zhang, H. Zhang, X. Li a L. Hanzo, „Power-Efficient Radio Resource Allocation for Low-Medium-Altitude Aerial Platform Based TD-LTE Networks,“ *IEEE VTC*, 2012.
- [8] O. Jian, Z. Yi, L. M. a L. Jia, „Optimization of beamforming and path planning for UAV-assisted wireless relay networks,“ *Chinese Journal of aeronautics*, 2014.
- [9] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis a M. Debbah, „Drone small cells in the clouds: Design deployment and performance analysis,“ *Proc. IEEE Global Telecomm. Conf.*, pp. 1-6, 2015.
- [10] D. H. Choi, B. H. Jung a D. K. Sung, „Low-complexity maneuvering control of a UAV-based relay without location information of mobile ground nodes,“ *Proc. IEEE Symposium on Computers and Commun.*, pp. 1-6, 2014.
- [11] Y. Jin, Y. D. Zhang a B. K. Chalise, „Joint optimization of relay position and power allocation in cooperative broadcast wireless networks,“ *Proc. IEEE Int. Conf Acoustics Speech and Signal Processing*, 2012.
- [12] 2020: Beyond 4G Radio Evolution for the Gigabit Experience,“ únor 2011.
[Online].Available: <http://nsn.com/sites/default/files/document/>
- [13] Y. Li a L. Cai, „UAV-Assisted Dynamic Coverage in a Heterogeneous Cellular System,“ *IEEE Network*, 28 Červenec 2017.
- [14] W. Guo, C. Devine a S. Wang, „Performance Analysis of Micro Unmanned Airborne Communication Relays for Cellular Networks,“ *CSNDSP*, 2014.

- [15] P. Li a J. Xu, „Placement Optimization for UAV-Enabled Wireless Networks with Multi-Hop Backhauls,“ *Journal of Communications and information networks*, pp. 64-73, 2018.
- [16] B. Galkin, J. Kibikla a L. DaSilva, „Deployment of UAV-mounted access points according to spacial user locations in two-tier cellular networks,“ *WD*, 2016.
- [17] J. Chen a D. Gesbert, „Optimal positioning of flying relays for wireless networks: A LOS map approach,“ *IEEE International conference on Communications*, 2017.
- [18] J. Regan, „Hydrogen Cells May Boost Drone Flight Times,“ *Dronlife.com*, 2015.
- [19] A. Al-Hourani, S. Kandeepan a S. Lardner, „Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage,“ *IEEE Wireless Communications Letters*, č. 6, 2014.
- [20] B. V. D. Bergh, A. Chiumento a S. Pollin, „LTE in the sky: trading off propagation benefits with interference costs for aerial nodes,“ *IEEE Communications Magazine*, 2016.
- [21] A. Al-Hourani, S. Kandeepan a a. A. Jamalipour, „Modeling air-toground to ground path loss for low altitude platforms in urban environments,“ *IEEE Global Communications Conference*, 2014.
- [22] E. Kalantari, H. Yanikomeroglu a A. Yongacoglu, „On the number and 3d placement of drone base stations in wireless cellular networks,“ v *IEEE 84th Vehicular Technology Conference*, 2016.
- [23] V. Sharma, M. Bennis a a. R. Kumar, „Uav-assisted heterogeneous networks for capacity enhancement,“ *IEEE Communications Letters*, 2016.
- [24] R. I. Bor-Yaliniz, A. El-Keyi a H. Yanikomeroglu, „Efficient 3-d placement of an aerial base station in next generation cellular networks,“ v *IEEE International Conference on Communications*, 2016.
- [25] G. M. Rebeiz, S. Y. Kim a O. Inac, „Millimeter-wave large-scale phased-arrays for 5G systems,“ v *IEEE MTT-S Internation Microwave Sympostim*, 2015.
- [26] V. Sharma, K. Srinivasan, H.-C. Chao, K.-L. Hua a W.-H. Cheng, „Intelligent deployment of UAVs in 5G heterogeneous communication environment for improved coverage,“ *Journal of Network and Computer Applications*, 2016.
- [27] L. D. P. Pugliese, F. Guerriero, D. Zorbas a T. Razafindralambo, „Modelling the mobile target covering problem using flying Drones,“ *Optimization Letters*, pp. 1021-1052, 2016.
- [28] M. Blenkin, „Australian Aviation,“ 23 Srpen 2017. [Online]. Available: <http://australianaviation.com.au/2017/08/lockheed-martins-melbourne-research-lab-takes-flight/>.
- [29] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis a M. Debbah, „Efficient Deployment of Multiple Unmanned Aerial Vehicles for Optimal Wireless Coverage,“ *IEEE Communications Letters*, 2016.
- [30] H. Clausen, „Autonomous self-deployment of wireless access networks,“ *Bell Labs Technical Journal*, pp. 55-71, 2009.

- [31] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis a a. M. Debbah, „Optimal transport theory for power-efficient deployment of unmanned aerial vehicles,“ v *IEEE International Conference on Communications*, 2016.
- [32] A. Abdulla, H. N. Z. M. Fadlullah, N. Kato, F. Ono a R. Miura, „An optimal data collection technique for improved utility in UAS-aided networks,“ v *IEEE INFOCOM 2014 - IEEE Conference on Computer Communications*, 2014.
- [33] A. Abdulla, Z. M. Fadlullah, H. Nishiyama, N. Kato, F. Ono a a. R. Miura, „Toward Fair Maximization of Energy Efficiency in Multiple UAS-Aided Networks: A Game-Theoretic Methodology,“ . *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015.
- [34] O. Bouchet, H. Sizun, C. Boisrobert, F. d. Fornel a P. N. Favennec, *Free-Space Optics: Propagation and Communication*, 2014.
- [35] S. Yi, S. Chun, Y. Lee, S. P. a S. Jung, „Overview of LTE and LTE-Advanced New Features,“ *Wiley Telecom*, 2013.
- [36] X. Hong, M. Gerla, G. Pei a C. C. Chiang, „A group mobility model for ad hoc wireless network,“ *MSWiM '99*, 1999.
- [37] „WorldData.info,“ eglitis-media, [Online]. Available: <https://www.worlddata.info/average-bodyheight.php>. [Přístup získán 4 Květen 2019].
- [38] P. Pavel a S. Zvánovec, *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů*, České vysoké učení technické v Praze.
- [39] K. M. S. Huq, S. Mumtaz, J. Rodriguez a R. K. Aguiar, „Comparison of energy-efficiency in Bit pre Joule on different downling CoMP Techniques,“ *IEEE Wireless Communications Magazine*, 2012.
- [40] O. Hernandez, „Wired,“ 2018. [Online]. Available: <https://video.wired.com/watch/dot-physics-the-crazy-science-of-drone-flight>.
- [41] Klaus, „Klaus & Lita,“ 29 09 2015. [Online]. Available: <https://klsin.bpmsg.com/how-fast-can-a-quadrocopter-fly/>.
- [42] S. Baluta, „Starlino,“ Starline electronics, 28 10 2015. [Online]. Available: <http://www.starlino.com/power2thrust.html>.
- [43] Kuhn a H. W., „The Hungarian Method for the assignment problem,“ *Naval Research Logistics Quarterly*, p. 83–97, 1955.
- [44] Aspelin a Karen, „Establishing Pedestrian Walking Speeds,“ 2005.