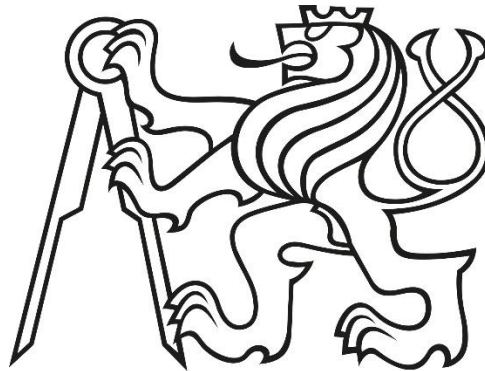


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky



Analýza efektivity komunikace v mobilních sítích s
využitím dronů

Performance Analysis of Communication in Mobile
Networks with Drones

Bakalářská práce

2017

Lukáš Hach

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hach** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **434764**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Multimediální technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza efektivity komunikace v mobilních sítích s využitím dronů

Název bakalářské práce anglicky:

Performance Analysis of Communication in Mobile Networks with Drones

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s architekturou mobilních sítí a s možnostmi využití dronů pro zvýšení efektivity komunikace v budoucích mobilních sítích. Pomocí simulací vyhodnoťte maximální propustnost sítě a energetickou spotřebu uživatelských zařízení a celé sítě při využití dronů jako základnových stanic. Porovnejte dosažené výsledky s výsledky pro běžnou architekturu mobilní sítě 4G využívající velké množství malých buněk. Předpokládejte uživatele pohybující se ve skupinách i náhodně a zhodnoťte vliv pohybu uživatelů na výše uvedené metricky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] L. Zhao, J. Yi, F. Adachi, C. Zhang, 'Radio Resource Allocation for Low-Medium-Altitude Aerial Platform Based TD-LTE Networks against Disaster,' IEEE VTC Spring, 2012.
- [2] 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.
- [3] B. Galkin, J. Kibilda, L.A. DaSilva, 'Deployment of UAV-mounted access points according to spatial user locations in two-tier cellular networks,' Wireless Days, 2016.
- [4] Z. Xiao, P. Xia, X.G. Xia, 'Enabling UAV Cellular with Millimeter-Wave Communication: Potentials and Approaches,' IEEE Communications Magazine, May 2016.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **02.02.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Anotace – Vlivem stále rostoucích požadavků na přenosovou kapacitu je nutné zvyšovat i počet základnových stanic v hustě obydlených oblastech. V místech, kde by výstavba nových základnových stanic nebyla efektivní, se nabízí řešení použití létajících základnových stanic. Díky vysoké mobilitě a možnosti měnit pozici létající základnové stanice vůči uživatelům v reálném čase lze dosáhnout zvýšení přenosové kapacity sítě. Tato bakalářská práce porovnává vliv použití dronů jako základnových stanic a použití stávající architektury využívající velký počet malých buněk z pohledu maximální přenosové kapacity a energetické efektivity, během downlinku. Vliv je porovnáván pomocí pohybového modelu skupiny uživatelů (crowd mobility model). Výsledkem práce je dvojnásobné zvýšení přenosové kapacity oproti architektuře stávající mobilní sítě, při použití dronu jako létající základnové stanice s uvažováním neomezené páteřní linky. Se zvýšením přenosové kapacity se však pojí horší energetická efektivita.

Klíčová slova – Mobilní sítě, Přenosová kapacita, Pohybový model, Drony, Létající základnové stanice, Energetická efektivita

Abstract - Due to increasing demands on the transmission capacity, base stations in highly populated areas are densely deployed. In places where a construction of the new base stations is no efficient, flying base stations can be considered. Thanks to the high mobility and the possibility to change the position of the flying base stations with respect to the users in real time, it is possible to increase the transmission capacity of the network. This bachelor thesis compares performance of the drones acting as flying base stations with existing dense small cell from the point of view of the maximum transmission capacity and energy efficient, during downlink. The performance is compared using a crowd mobility model. The result of the work is a double increase in transmission capacity compared to the existing mobile network architecture, using the dron as an air base with considerations of unlimited spines. However, with increased transmission capacity, there is a lower energy efficiency.

Keywords – Mobile networks, Transmission capacity, Crowd mobility model, Drones, Flying base station, Energy efficiency

Obsah

Seznam obrázků	1
Seznam tabulek	1
Seznam zkratk	2
1. Úvod.....	3
1.1 Motivace	4
1.2 Mobilní sítě nové generace.....	4
2. Drony v mobilních sítích.....	6
3. Modely pro simulace	9
3.1 Generování pozice uživatelů	9
3.2 Určování pozice dronu.....	11
3.3 Šíření signálu	12
4. Porovnané scénáře.....	14
4.1 Scénář s neomezeným připojením k páteřní síti.....	14
4.2 Scénář s omezenou páteřní linkou	15
4.3 Scénář bez dronu	15
5. Výsledky simulací a zhodnocení výsledků	17
5.1 Vstupní parametry	17
5.2 Výsledky simulací	18
5.2.1 Vliv počtu uživatelů na velikosti přenosové kapacity	18
5.2.2 Vliv velikosti poloměru skupiny na přenosové kapacitě	20
5.3 Energetická efektivita	22
5.4 Shrnutí výsledků	23
6. Závěr.....	23
Reference.....	25

Seznam obrázků

Obr. 1 Situace během přesunu skupiny	10
Obr. 2 Pohyb uživatelů během simulace s vyznačenými FlyBS a pevnými BS	10
Obr. 3 Pohyb skupiny s názorným pohybem uživatelů uvnitř skupiny	11
Obr. 4 Srovnání průměrné velikosti kapacity s počtem uživatelů a použitým modelem.....	19
Obr. 5 Pdf graf průměrné přenosové rychlosti pro scénář s neomezeným připojením k páteřnímu spoji.....	20
Obr. 6 Pdf graf průměrné přenosové rychlosti pro scénář bez použití dronu	20
Obr. 7 Pdf graf pro scénář s omezeným připojením k páteřnímu spoji	20
Obr. 8 Závislost průměrné přenosové kapacity na rozložení skupiny s porovnáním všech variant modelu.....	21
Obr. 9 Graf závislosti energetické efektivity na počtu uživatelů během použitých scénářů....	22

Seznam tabulek

Tab. 1 Vstupní parametry.....	17
-------------------------------	----

Seznam zkratek

Základnová stanice BS – Base station

Létající základnová stanice FlyBS – Flying base station

Internet věcí IoT – Internet of things

Pátá generace mobilní sítě 5G-Fifth generation

Centrální uživatel - C_u

Komunikace mezi zařízeními D2D - Device-to-Device

Koncové zpoždění E2E Latency - End to End latency

LTE-Long Term Evolution

Více vstupu více výstupů MIMO Multiple input Multiple output

Výpočty na okraji sítě MEC - Mobile Edge Computing

Hustota pravděpodobnosti pdf - Probability density function

Poměr signálu ku rušení plus šum SINR Signal to interference plus noise ratio

Přímá viditelnost LOS - line of sight

Kvalita zkušeností(spokojenosti) QoE - Quality of Experience

Správa rádiových zdrojů RRM - Radio resource management

1. Úvod

S vývojem stále nových služeb v oblasti mobilních zařízení, např. internet věcí (IoT – Internet of things), samořiditelná auta, online vysílání pomocí mobilního telefonu ve vysokém rozlišení, se kladou stále větší nároky na mobilní síť. Přesněji na zvyšování kapacity přenosu a redukci latence.

Budoucí mobilní sítě počítají s velkým nárůstem počtu základnových stanic (BS – Base station) pracující na principu malých buněk. Nárůst počtu těchto základnových stanic je způsobený neustálým zvyšováním požadavků na přenosovou kapacitu sítě. K poskytnutí vysokých přenosových kapacit, řádově stovky Mbps až desítky Gbps [1], je nutné rozmístit desítky BS na místech [2], kde se zdržuje velký počet uživatelů. V místech, kde by výstavba nových BS byla velice obtížná či neekonomická se začíná uvažovat o použití pohyblivých létajících základnových stanic (FlyBS – Flying base station) [3], tedy dronů, či balónů. Již nyní se drony testují jako dopravce poštovních zásilek či pro profesionální nahrávání videa. Drony by tedy jistě mohly v budoucnu nést i hardware pro komunikaci a pomocí lokace uživatelů by mohly sledovat skupiny uživatelů a tím zvýšit celkovou přenosovou kapacitu.

Využití tohoto konceptu najde uplatnění v nových mobilních sítích (5G a 5G+ [1] a [4]). Na místech s vysokou koncentrací mobilních zařízení by mohly drony zvýšit počet připojených zařízení a poskytnou vyšší přenosové rychlosti [5]. Létající základnové stanice mohou pracovat také jako záloha při výpadku klasických základnových stanic [6]. Například při přírodních katastrofách, kdy mobilní síť přestane fungovat nebo funguje pouze velice omezeně. Lidé v nesnázích tak nemohou využít mobilních služeb a vyslat nouzový signál o jejich poloze.

Tato bakalářská práce analyzuje průběh bezdrátové komunikace mezi uživateli pohybující se podle modelu skupinového pohybu (crowd mobility model) a dronem, použitým jako létající základnová stanice [5] [7]. V použitém modelu pro vyhodnocování přenosové kapacity jsou použity milimetrové vlny, z důvodu efektivního využití pomocí FlyBS. Práce teoreticky porovnává efektivitu komunikace v mobilních sítích a vyhodnocuje vliv použitého pohybového modelu uživatelů. K vyhodnocení výsledků je předpokládáno umístění dronu do polohy, která zohledňuje aktuální polohu uživatelů vůči dronu a také jejich aktuální požadavek na přenosovou kapacitu.

Bakalářská práce je rozdělena do šesti hlavních částí. V následující kapitole jsou rozebrány odborné publikace, zabývající se podobnou tematikou. V třetí části je popsán použitý pohybový model a jsou vysvětleny vztahy nutné k vyhodnocení celkové propustnosti a energetické efektivnosti. Čtvrtá část se věnuje použitým scénářům pro hodnocení efektivnosti komunikace. V páté části jsou rozebrány výsledky získané ze simulací v prostředí MATLAB.

Poslední část obsahuje závěr. Zde jsou rozebrány výsledky a nastíněny možnosti pro budoucí práce.

1.1 Motivace

Se zvyšováním přenosové kapacity však přichází problém se zvyšováním šířky kanálu. V dnešní době mají pásma pro vysílání v mobilních sítích, tedy 800, 900, 1800, 2100 a 2600 MHz, svoje omezení. Proto je nutné využití vyšších pásem, kde je k dispozici mnohem širší šířka pásma [7]. Příkladem je například vysílací pásmo 38 GHz, tedy tzv. milimetrové vlny. Přenos na takto vysokých frekvencích má však svoje nevýhody. Hlavními nevýhodami jsou značné ztráty volným prostorem a ještě větší ztráty v případě, kdy není zajištěna přímá viditelnost mezi základnovou stanicí a uživatelem. Snížení útlumu při šíření milimetrových vln lze dosáhnout rozdělením komunikační cesty na dvě části. První část představuje spoj mezi pevnou BS a FlyBS, druhou částí je cesta mezi dronem a uživateli.

1.2 Mobilní síť nové generace

V dnešní době se již připravuje síť nové generace – 5G (5G - fifth generation). V článkách [1] a [4] se autoři zabývají postupně všemi šesti hlavními vylepšeními, které by 5G síť měla obsahovat:

1. **Zvýšení kapacity** – Zvýšení kapacity a rychlosti přenosu lze dosáhnout kombinací použití více vysílacích spekter. Příležitost nabízí milimetrové vlny, kde lze zvětšit šířku pásma. Dalším řešením je použití technologie massive MIMO (Multiple input Multiple output), která je také popsána v [8]. Metoda spočívá v principu vícecestného šíření signálu to vede ke zvýšení kapacity celého kanálu. Další řešení je vybudovat větší počet malých buněk. Ty mohou zajistit větší kapacitu a také poskytnout signál většímu počtu zařízení [9]. V poslední řadě technika (Device-to-Device D2D). Tato technika spočívá v principu komunikace mezi zařízeními bez spolupráce základnové stanice.
2. **Zvýšit přenosovou rychlost**
3. **Snížit latenci (End to End latency – E2E Latency)** – Autoři v [4] nabízí řešení v používání vzdušného rozhraní a zavedení pouze optických vedení na páteřní síti. Vzdušné rozhraní je myšleno právě použitím dronů.
4. **Zvýšit počet připojených zařízení** – Po roce 2020 se počítá s navýšením všech zařízení využívající bezdrátové připojení v řádu 10x až 100x. Zde bude potřeba rozlišit zařízení, které opravdu potřebují nejspolehlivější síť a ty zařízení, které si vystačí pouze s dočasným připojením. Např. signalizace o stavu domácích spotřebičů.

5. **Snížit cenu poskytovaných služeb** – Prvním řešením je optimalizace energetických výdajů na provoz základnových stanic. Další řešení souvisí se zvýšením kapacity tedy i rychlosti přenosu. Minimalizovat funkce vykonávající základnovou stanicí. Tyto funkce přesunout do cloudu.
6. **Zvýšit kvalitu služeb (Quality of Experience – QoE)** – Zlepšit vnímání uživatele, jak spolehlivě pracuje síť.

2. Drony v mobilních sítích

Následující kapitola obsahuje rozbor článků publikovaných v odborných časopisech. U všech popisovaných článků je vysvětleno v čem se tato bakalářská práce liší.

Příklady architektury sítě s použitím dronů jsou uvedeny v [10] a [11]. V těchto pracích se však uvažuje pouze architektura stávající 4G sítě. Použití dronů, jako létající základnové stanice v 5G sítích je popsán v [12]. Autoři zde popisují nepopiratelné výhody použití dronů – zvýšení kapacity, snížení latence (přiblížení koncových bodů sítě blíže k uživateli). Také jsou zde popsány výzvy a překážky, které je nutné překonat, aby bylo možné drony používat jako FlyBS a vytvořit tak nové odvětví telekomunikační techniky.

Autoři článku [13] se zabývají ideálním poměrem mezi výškou dronu a plochou, kterou dokáže FlyBS ozářit svým signálem. Optimální výška závisí jak na velikost a typu pokrývané plochy (předměstí, městská zástavba, hustá městská zástavba) tak na stanovení maximálního útlumu a v poslední řadě na vyzařovacím úhlu antény umístěné na dronu. Výsledkem modelu je lineární závislost mezi letovou výškou dronu a poloměrem plochy, kterou dron obsluhuje. Autoři také vyhodnocují vliv uvažovaného typu zástavby. Výslednou výšku autoři stanovili v řádu jednotek kilometrů. Takto vysoká výška je způsobená úhlem vyzařovací antény a také použité frekvence – 2 000 MHz. V modelu této bakalářské práce se uvažuje všesměrová anténa, stabilní výška FlyBS (řádově desítky metrů) a také použití milimetrových vln jako v článku [5] a [7].

V článku [14] je popsán vliv FlyBS na interferenci způsobenou jinými základnovými stanicemi. Se zvyšující výškou je nutné vysílat s větším výkonem, čímž vzniká větší úroveň rušení s ostatními základnovými stanicemi (BS – Base Station). Vlivem větší výšky BS se také zvyšuje interference způsobená interakcí mezi větším počtem buněk. Proto je tato bakalářská práce zaměřena na nižší letové výšky, řádově desítky metrů, a nižší vysílané výkony. Menší letovou výškou a nižšími vysílacími výkony se snižuje energetická náročnost provozu FlyBS.

V článku [6] se autoři zabývají FlyBS jako záložním řešením během přírodních katastrof. FlyBS v tomto případě nepředstavují drony ale balóny s malou pohyblivostí. Použitý model v [6] počítá s umístěním balónu ve výšce 2–20 km, čímž se však značně liší od modelu použitého v této bakalářské práci. Autoři představují energeticky úspornější algoritmus pro správu rádiových zdrojů (radio resource management-RRM) a porovnávají ho s ostatními RRM algoritmy. Použitím úsporného RRM algoritmu je možné snížit energetickou náročnost na provoz sítě za cenu menší celkové propustnosti. Energetická náročnost je však během krizových situací prioritní, kvůli možným výpadkům celé elektrické sítě.

Autoři v [5] se mimo jiné zabývají potřebným hardwarem, který by každý dron musel nést, aby mohl plnohodnotně sloužit jako FlyBS. Jedná se o antény, rozhraní pro rádiovou komunikaci, procesor, pomocné obvody pro komunikaci a hlavně potřebný zdroj energie-baterie. Hlavním nedostatkem dnešních dronů je právě výdrž baterií. Baterie nedokáží dodávat potřebný výkon po delší dobu. Proto se klade důraz na snižování hmotnosti obsaženého hardwaru. Pro příklad antény se silikonovými procesory s fázovým uspořádáním váží okolo 100 g [15]. Další zátěží je procesor vážící okolo 300-400 g plus baterie jejichž váha se také pohybuje okolo 300-400 g. A v poslední řadě konstrukce dronu vážící okolo 300 g. Konečná váha tedy přesahuje jeden kilogram. Tuto váhu dokáže dron nést po dobu cca dvou až tří hodin za použití vodíkových článků [16]. Proto se autoři v [5] zaměřují stejně jako tato bakalářská práce na malé drony létající na v nízkých výškách, aby se snížila energetická zátěž. Od této práce se tato bakalářská práce odlišuje použitím jiného pohybového modelu (model skupinového pohybu) a také uvažováním pouze downlinku.

Problematikou týkající se přenosu dat mezi pevnou BS a FlyBS je [11]. Autoři v článku řeší realizaci tohoto spoje optickým kabelem mezi BS a FlyBS. FlyBS je řešena v tomto článku malým balónem naplněným heliem – Helikite. Použitím balónu se rapidně sníží hmotnost celé FlyBS ale za cenu snížené pohyblivosti. Od článku [11] se tato bakalářská práce liší v použití pohyblivějších dronů a uvažováním bezdrátového spoje mezi pevnou BS a FlyBS, tedy páteřní linky. V článku [5] je jako jedna z možností řešena realizace připojení k páteřnímu spoji sítě pomocí radioreléového spoje na vysokých frekvencích. Autoři zde použili model pro zlepšení energetické náročnosti, kde se výpočet pozice dronu provádí na okraji mobilní sítě (Mobile Edge Computing - MEC). Výpočet se provádí v kontrolní jednotce. Vzniklé zpoždění při přenosu mezi kontrolní jednotkou a dronem je zanedbatelné.

Problém použití radioreléového spoje mezi pevnou BS a FlyBS je omezení přenosové kapacity připojení k páteřnímu spoji sítě. Jako řešení se nabízí použití bezdrátového optického spoje v neviditelném spektru. O této problematice pojednává [17]. Výhodou bezdrátového optického spoje je vysoká přenosová kapacita. Při použití bezdrátového optického spoje mezi BS a FlyBS se zvětší celková propustnost sítě při použití FlyBS. Pro zjednodušení simulací se dále uvažuje použití bezdrátového optického spoje jako neomezeného připojení k páteřnímu spoji sítě. Celková propustnost se tedy omezuje pouze šířkou komunikačního pásma 500MHz, stejně jako v člancích [5] a [7]. K efektivnější realizaci připojení k páteřnímu spoji sítě je potřebná přímá viditelnost mezi pevnou BS a FlyBS. Tato bakalářská práce porovnává použití neomezeného tak i neomezeného připojení k páteřnímu spoji za přímé viditelnosti. Omezené připojení k páteřnímu spoji je realizované radioreléovým spojem. Porovnáván je vliv použitého přístupu na velikosti přenosové kapacity s tím spojena i energetická efektivita.

Hlavní pozornost však článek [5] věnuje porovnání FlyBS a použití malých statických buněk, tak jak se používají v architektuře sítě LTE (LTE-Long Term Evolution). Model, který autoři v [5] používají pro simulaci spočívá v pohybu uživatelů po ulici dlouhé 500 metrů. Počet uživatelů se pohybuje mezi 10 až 1000. Použité jsou dva scénáře. V prvním scénáři jsou

pevné BS umístěné pravidelně podél ulice. Ve druhém scénáři je použit dron jako FlyBS. Porovnává se vliv použití FlyBS a použití malých buněk na poměru SINR (Signal to interference plus noise ratio), na propustnosti celé sítě, a na energetické náročnosti uživatelských zařízení. Poměr SINR udává poměr mezi užitečným signálem a rušivým signálem. Rušivý signál je součet úrovně interferenčních signálu a úrovně šumového signálu. Simulace ukazují, že FlyBS nabízí ve všech ohledech lepší parametry.

Hlavní odlišností této práce od výše zmiňovaných prací je kombinace použití vyšších kmitočtů pro přenos a uvažování pouze downlinku. V bakalářské práci se parametry shodují s pracemi [5] a [7]. Od těchto publikací se bakalářská práce odlišuje simulacemi bližších realitě kvůli použitému pohybovému modelu (crowd mobility). V další řadě je zde výpočet ideální pozice dronu pro vysílání, který se vypočítává podle váženého průměru zohledňující pozici uživatelů a také jejich požadavek na přenosovou kapacitu. Síť přistupuje dynamicky k měnícím se požadavkům uživatelů a stává se tak více inteligentní.

3. Modely pro simulace

Tato kapitola je rozdělena na tři části. Nejprve je popsán způsob generování pozice uživatele. Poté jsou uvedeny vztahy nutné k vyhodnocení pozice dronu zohledňující aktuální pozici uživatele tak i jejich požadavek na přenosovou kapacitu sítě. V poslední části jsou zde uvedeny vztahy, sloužící pro modelování.

3.1 Generování pozice uživatelů

Pohybový model vychází z článku [18]. Simulace je prováděna v programu MATLAB. Pro scénáře je uvažována plocha o čtvercové hraně 2000 m. Prvním krokem je vygenerování centrálního uživatele $C_u = (C_u(x), C_u(y))$. Tento uživatel se vygeneruje uprostřed uvažované plochy, je tak výchozím bodem simulace. Okolo tohoto bodu se v předem určeném poloměru r generují náhodně další uživatelé $U_i = (U_i(x), U_i(y))$. Poloměr r určuje maximální velikost skupiny. Pozice uživatele U_i se určuje z následujících rovnic [18]:

$$U_i(x) = C_u(x) + \Delta * r * \cos \alpha \quad (3.1)$$

$$U_i(y) = C_u(y) + \Delta * r * \sin \alpha \quad (3.2)$$

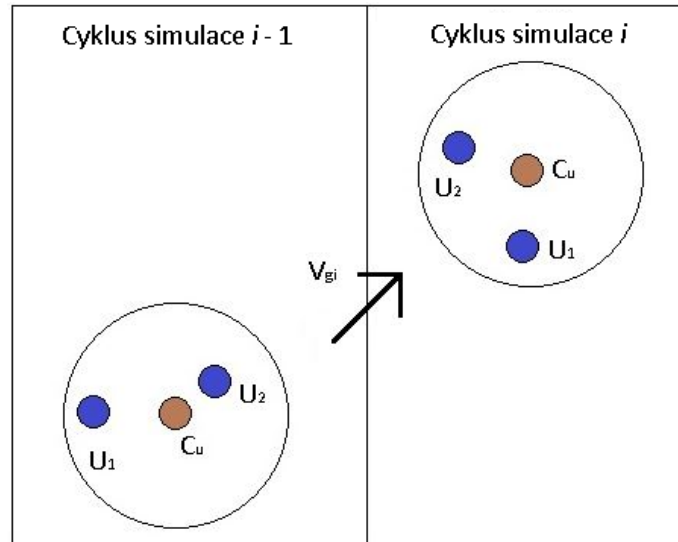
kde r reprezentuje zvolený poloměr skupiny v metrech, Δ je náhodné číslo ($\Delta \in \langle 0,1 \rangle$) s rovnoměrným rozložením, úhel α je generován náhodně. V dalším cyklu probíhá přesun celé skupiny do nové pozice viz Obr. 1. Nejprve se vygeneruje další pozice centrálního uživatele C_u :

$$C_u(x)(n) = C_u(x)(n-1) + v * t * \cos \beta \quad (3.3)$$

$$C_u(y)(n) = C_u(y)(n-1) + v * t * \sin \beta \quad (3.4)$$

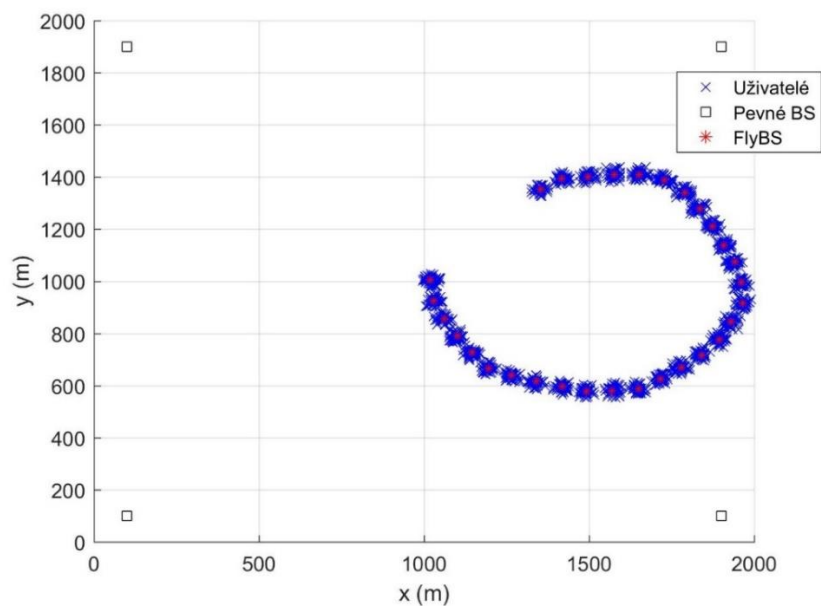
kde v je rychlost v metrech za sekundu, jakou se skupina pohybuje, t je celkový čas simulace a β je úhel určující směr skupiny, tedy směr vektoru V_{gi} , kterým se skupina vydává. Počátek vektoru V_{gi} je pozice centrálního uživatele C_u , velikost určuje rychlost pohybu v a směr určuje úhel β . Úhel β je volen náhodně v mezích od -5° do 5° . Rozsah úhlu β je malý z důvodu velkého počtu cyklů. V případě velkého rozsahu by uživatelé chodili v malém kruhu. Příklad

pohybu je v Obr. 2. Rychlost pohybu v je stanovena na průměrnou rychlost lidské chůze, tedy 1,4 m/s (5 km/h) [19]. Simulace probíhá každých pět sekund po dobu třiceti minut, aby byl znatelný celý pohyb po sledované ploše.

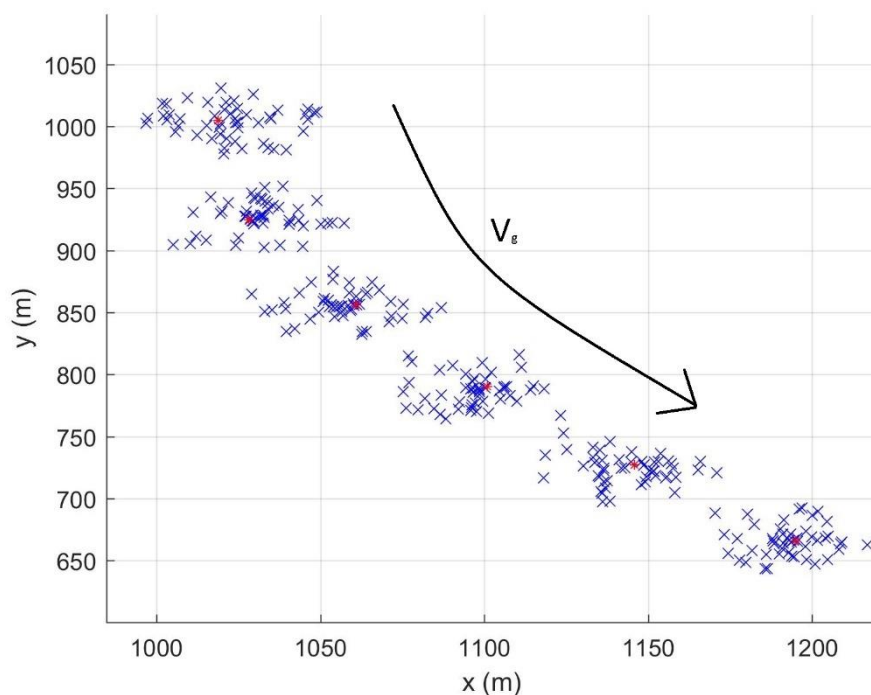


Obr. 1 Situace během přesunu skupiny

Následující obrázky obsahují rozložení uživatelů a jejich pohyb během simulace. Pro rovnoprávné porovnání výsledků je vždy volen stejný pohyb jako v Obr. 2. Uživatelé se podle pohybového modelu pohybují i uvnitř skupiny, detail tohoto pohybu je v Obr. 3.



Obr. 2 Pohyb uživatelů během simulace s vyznačenými FlyBS a pevnými BS



Obr. 3 Pohyb skupiny s názorným pohybem uživatelů uvnitř skupiny

3.2 Určování pozice dronu

Během každého cyklu simulace se počítá pozice dronu (x_d, y_d) . Výpočet je realizován podle stejného vztahu jako v [5], kdy se vychází z pozice každého uživatele U_i :

$$x_d = \frac{1}{n_u} \sum_i a_i U_i(x) \quad (3.5)$$

$$y_d = \frac{1}{n_u} \sum_i a_i U_i(y) \quad (3.6)$$

kde n_u představuje počet uživatelů v jedné skupině a $a_i \in \langle 0,1 \rangle$, $\sum_i a_i = 1$ je relativní požadavek na kapacitu.

3.3 Šíření signálu

Zdrojem pro všechny rovnice uvedené v této kapitole je [20]. Během simulace je uvažována pouze přímá viditelnost (LOS – Line of sight). Vztahem pro maximální kapacitu sítě je *Shannon-Hertleivův teorém*. Tento vztah určuje kolik je teoreticky možné přenést bitů v daném komunikačním kanálu za jednotku času:

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (3.7)$$

kde B je šířka pásma v Hz a SNR je odstup signálu od šumu. SNR je poměr přijatého výkonu P a šumového výkonu P_N :

$$SNR = \frac{P}{P_N} \quad (3.8)$$

kde P a P_N jsou ve $wattech$. Šumový výkon P_N je definován takto:

$$P_N = kTB \quad (3.9)$$

kde k je Boltzmannova konstanta $k = 1,380\ 648 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ a T teplota okolí v kelvinech. Rovnice (3.8) je poměrem dvou výkonů, lze ji tedy přepsat do decibelového tvaru:

$$SNR_{dB} = 10 \log\left(\frac{P}{P_N}\right) = P_{dB} - P_{NdB} \quad (3.10)$$

kde P_{dB} je přijatý výkon v dB a P_{NdB} je šumový výkon v dB . Pro vypočtení přijímaného užitečného výkonu se vychází z výkonové bilance:

$$P_P = \frac{P_V G_V G_P}{FSL} \quad (3.11)$$

kde P_V je vysílaný výkon, G_V je zisk vysílací antény, G_P je zisk přijímací antény. FSL představují ztráty volným prostorem. V tomto případě nejde o klasické ztráty, kde se energie přeměňuje na teplo, ale o jakési „ředění“ energie v prostoru při šíření kulové vlny. FSL se vypočítá podle vztahu:

$$FSL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi dF}{c}\right)^2 \quad (3.12)$$

kde F představuje frekvenci v Hz, na které se vysílá, c rychlost světla v metrech za sekundu a d je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem v metrech. Tedy mezi BS a FlyBS nebo mezi FlyBS a uživateli. Rovnici (3.11) lze pro jednoduchost převést do decibelů takto:

$$P_P = P_V + G_V + G_P - FSL_{dB} \quad (3.13)$$

kde P_P je přijatý výkon v dBm , P_V je vysílaný výkon také v dBm . Zisky na přijímací straně G_P a na vysílací straně G_V jsou v dB . FSL ztráty volným prostorem jsou též v dB a vypočítají se podle vzorce:

$$FSL_{dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (3.14)$$

Vzdálenost d v metrech, se vypočítá podle vzorce pro vzdálenost dvou bodů v trojrozměrném prostoru:

$$d = \sqrt{(x_d - x_i)^2 + (y_d - y_i)^2 + (z_d - z_i)^2} \quad (3.15)$$

V poslední řadě energetická efektivita E (bit/J). Tato rovnice je získána z práce [21] :

$$E = \frac{P_V}{C} \quad (3.16)$$

kde C je celková kapacita kanálu v bps a P_V je vysílaný výkon ve watttech

4. Porovnané scénáře

Simulace probíhají ve třech scénářích. Ve všech scénářích je použita vysílací frekvence podle [5] a [7], tedy $F = 38$ GHz a uvažována přímá viditelnost (line of sight-LOS) a scénáře probíhají během downlinku.

V prvním scénáři kapacitu všech uživatelů omezovala pouze šířka celého pásma podle [5], tedy 500 MHz. Není zde brán ohled na omezení připojení k páteřnímu spoji, tedy omezení spoje pevné BS a dronu.

V druhém scénáři je výsledná kapacita sítě ovlivněna omezením připojení k páteřnímu spoji sítě. Propustnost toho spoje je ovlivněna vzdáleností dronu od statické BS.

V posledním scénáři se vypočítávají parametry spojení bez použití dronů. Signál v tomto modelu vysílají pevné BS umístěné na stejných místech jako v předchozích variantách. Vysílací parametry jsou voleny stejné jako při vysílání dronu, aby se konečné výsledky daly porovnat bez zvyhodňování některého ze scénářů.

4.1 Scénář s neomezeným připojením k páteřní síti

Přidělené kmitočtové pásmo se spravedlivě rozděluje na všechny uživatele podle toho, jaký mají požadavek na kapacitu sítě $C_{pož}$. Požadavek na přenosovou kapacitu $C_{pož}$ je generován podle Gaussovské křivky normálního rozdělení ($\mu = 1 \cdot 10^9$ a $\sigma = 1 \cdot 10^8$). Pokud je požadavek splněn pro všechny uživatele a zároveň celková šířka pásma B_{celk} nepřesáhne celkovou šířku pásma tak se s šířkou jednotlivých pásem B_i nehýbe. Tedy součet šířek všech uživatelských kanálů nepřesáhne 500 MHz, tedy $\sum_i B_i \leq 500 \text{ MHz}$. Pokud však dojde k situaci, kdy uživatelské požadavky na přenosovou kapacitu jsou tak velké, že by celkový komunikační kanál o šířce 500 MHz nedokázal takto velkou přenosovou kapacitu vytvořit, musí se jejich požadavek na přenosovou kapacitu snížit. Ke snížení dojde poměrovým snížením šířky uživatelských kanálů, tak aby platilo $\sum_i B_i = 500 \text{ MHz}$. Všechny uživatelské kanály se přepočtou následující rovnicí:

$$B_i = B_i * \frac{\sum_i B_i}{5 * 10^8} \quad (4.1)$$

Toto řešení je ohleduplné vůči všem uživatelům.

K vypočtení polohy dronu jsou použity vztahy (3.5) a (3.6). Dále je postupováno výpočtem vzdálenosti mezi dronem a uživatelem ze vztahu (3.15). Následuje výpočet ztrát volným prostorem FSL podle rovnice (3.12), přijatého výkonu uživatelem P_P (3.13) a podle

rovnice (3.7) se vypočte kapacita C pro jednoho uživatele. Celý tento proces se opakuje pro všechny uživatele ve skupině a pro každý cyklus simulace.

4.2 Scénář s omezenou páteřní linkou

Druhý scénář probíhal s uvažováním omezeného připojení k páteřnímu spoji mezi dronem a základnovou stanicí. Tento spoj je realizován pomocí úzce směrové antény na straně pevné BS. Vysílací anténa je pohyblivá a vždy směřuje přímo na dron, díky své směrovosti vysílá signál pouze na zaměřenou FlyBS a neovlivňuje tak uživatele na povrchu. V této simulaci jsou podmínky stejné jako v předchozí variantě. Šířka kanálu B_k mezi pevnou BS a FlyBS je v této práci 500 MHz. V této simulaci se upravují uživatelské požadavky podle aktuální maximální kapacity C_{max} spoje mezi pevnou BS a FlyBS definovanou jako:

$$C_{max} = B_k * \log_2 \left(1 + \frac{P_{FlyBS}}{kTB_k} \right) \quad (4.2)$$

kde P_{FlyBS} je výkon přijatý FlyBS a B_k je šířka celého kanálu. Pokud součet všech jednotlivých požadavků je větší než C_{max} , tedy $\sum_i C_{pož,i} > C_{max}$ musí se upravit požadavek $C_{pož}$ tak, aby se součet všech požadavků rovnal maximální přenosové kapacitě C_{max} . Úprava probíhá následujícím vztahem:

$$C_{pož,i} = \frac{\sum_i C_{pož,i}}{C_{max}} * C_{pož,i} \quad (4.3)$$

kde $C_{pož,i}$ je aktuální uživatelský požadavek na přenosovou kapacitu sítě. Tento přepočít se provádí pro každý uživatelský požadavek, aby byly všechny požadavky rovnoměrně zredukovány. Součet všech požadavků je pak roven maximální přenosové kapacitě C_{max} , $\sum_i C_{pož,i} = C_{max}$. Jednotlivé požadavky se poté splní během simulace přidělením příslušně širokého kmitočtového pásma. V modelu jsou rovnoměrně rozmístěné čtyři základnové stanice. Dron je připojen vždy k nejbližší BS, od které přijímá nejsilnější signál. Během simulace se tedy maximální kapacita C_{max} liší v závislosti na vzdálenosti dronu od nejbližší BS.

4.3 Scénář bez dronu

Třetí a poslední scénář je vytvořen pro porovnání se stávající architekturou. Uživatelé se pohybují po stejné trase jako při předešlých dvou scénářích a požadují stejný požadavek na

kapacitu sítě $C_{pož}$. V tomto scénáři se přiděluje šířka pásma stejně jako v prvním scénáři uvažující neomezené připojení k páteřnímu spoji sítě. Uživatelské kanály se v případě přesáhnutí celkové šířky komunikačního kanálu redukuje rovnicí (4.1)

5. Výsledky simulací a zhodnocení výsledků

V této kapitole jsou definovány vstupní parametry, podle kterých je simulováno. Dále jsou zde vyhodnoceny výsledky všech tří scénářů. Tyto výsledky jsou zde následně rozebrány a porovnány.

5.1 Vstupní parametry

Všechny tři typy scénářů, tedy použití dronů s neomezeným připojením k páteřnímu spoji mezi pevnou BS a dronem, tak i neomezeným připojením k páteřnímu spoji a i pro scénář pouze s pevnými BS, jsou použity stejné vstupní parametry. Parametry jsou zvoleny podle článku [5]. Následující tabulka Tab. 1 obsahuje všechny vstupní parametry ke všem scénářům.

Tab. 1 Vstupní parametry

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>
Počet uživatelů	50 až 400
Vysílací frekvence	38 GHz
Šířka celého pásma	500 MHz
Požadovaná přenosová propustnost	0,6 – 1,4 Gbps
Vysílací výkon FlyBS, BS	32 dBm
Zisk vysílací antény	20 dBi
Zisk přijímací antény dronu	20 dBi
Zisk uživatelské přijímací antény	0 dBi
Výška FlyBS, BS	50 m
Výška uživatele	1,5 m
Teplota	20 °C (293,15 K)
Počet BS	4
Velikost oblasti	2000x2000 m
Poloměr velikosti skupiny	30 až 900 metrů
Délka simulace	30 minut
Počet opakování	360

5.2 Výsledky simulací

Tato kapitola obsahuje výsledky simulací. V první podkapitole jsou výsledky vlivu počtu uživatelů na velikost přenosové kapacity. V další podkapitole je vyhodnocen vliv velikosti skupiny na velikosti přenosové kapacity. Poslední kapitola obsahuje vyhodnocení energetické náročnosti pro každý použitý model.

5.2.1 Vliv počtu uživatelů na velikosti přenosové kapacity

Následující graf Obr. 4 znázorňuje výsledný průběh průměrné přenosové kapacity kanálu pro jednoho uživatele v závislosti na počtu uživatelů při maximálním poloměru skupiny 30 metrů. Simulace probíhala v cyklech, ve kterých se zvyšoval počet uživatelů ve skupině, ale poloměr r skupiny zůstal stejný, 30 metrů. V grafu se nachází tři průběhy, pro každý scénář. Podle vztahu pro kapacitu (3.7), má kapacita klesající logaritmický průběh při snižujícím se SNR . Očekává se tedy i stejná závislost přenosové kapacity, kvůli snižující se šířce uživatelského pásma vlivem většího počtu uživatelů ve skupině.

Kvůli omezené šířce pásma v použitém modelu, je logické, že se zvyšujícím se počtem připojených uživatelů, se sníží průměrná přenosová rychlost jednoho uživatele. Toto omezení je způsobené snižující se šířkou pásma přidělenou jednotlivým uživatelům. Kvůli logaritmické závislosti přenosové kapacity na šířce pásma mají křivky klesající logaritmický charakter.

V případě prvního scénáře, použití dronu s neomezeným připojením k páteřnímu spoji sítě, je kmitočtové pásmo rozděleno podle aktuálního požadavku uživatelů. V případě méně účastníků je možné kmitočtové pásmo jednotlivých uživatelů méně omezovat. Čím větší kmitočtové pásmo můžeme uživatelům poskytnout tím větších přenosových kapacit lze dosáhnout. Proto tato křivka s rostoucím počtem uživatelů logaritmicky klesá.

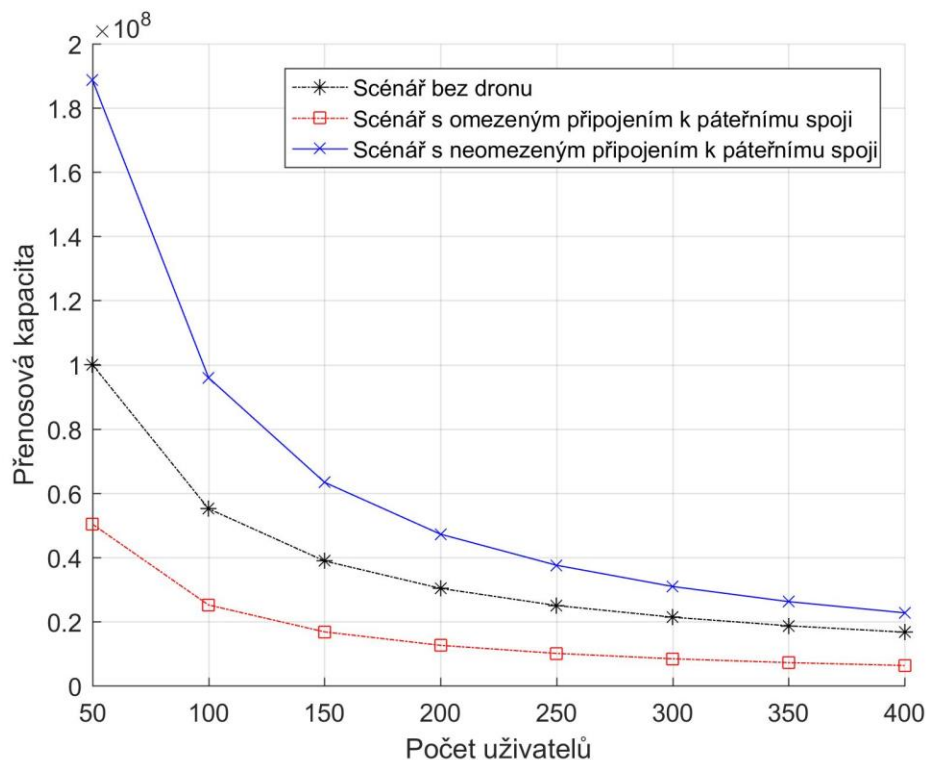
Průběh přenosové kapacity pro scénář používající pouze pevné BS pro přenos, je též logaritmicky klesající. Pro padesát uživatelů je však průměrná přenosová kapacita o polovinu menší než u scénáře uvažující neomezené připojení k páteřnímu spoji mezi pevnou BS a FlyBS. Důvod poklesu je větší vzdálenost mezi BS a uživateli. S větší vzdáleností vzniká větší útlum při přenosu a tím se zhoršují podmínky pro přenos. Se zvyšujícím počtem uživatelů rozdíl mezi scénářem uvažující neomezené připojení k páteřnímu spoji a scénáři nepoužívající drony, logaritmicky klesá.

Průběh pro scénář s uvažováním omezeného připojení k páteřnímu spoji mezi pevnou BS a FlyBS je nejvíce omezen. Pro tento typ scénáře lze očekávat nejnižší hodnoty přenosových kapacit.

Nejvyšší přenosová kapacita kanálu je dosažena v prvním scénáři, použití dronů s uvažováním neomezeného připojení k páteřnímu spoji. Důvodem nejlepších výsledků je vzdálenost dronu od uživatelů. Vlivem malé vzdálenosti vznikají menší ztráty při přenosu, proto uživatelé přijímají vyšší úroveň signálu než v ostatních variantách a proto tento scénář dosahuje nejvyšších přenosových kapacit.

Druhá v pořadí je scénář bez použití dronů. Pokles průměrné přenosové kapacity kanálu je v této metodě ze začátku poloviční a postupně se rozdíl zmenšuje vlivem klesající logaritmické křivky v porovnání se scénářem s použitím dronu s neomezeným připojením k páteřnímu spoji.

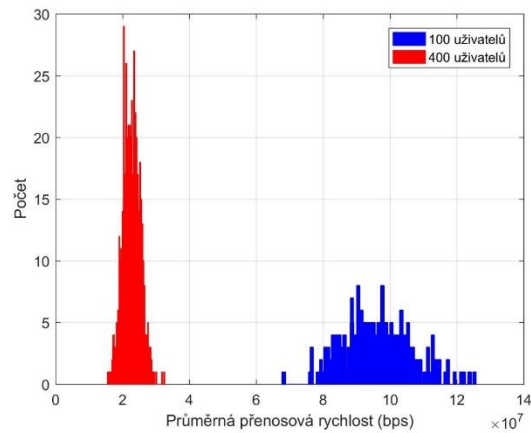
Nejmenších hodnot přenosové kapacity je dosaženo ve scénáři s použitím dronu a omezeným připojením k páteřnímu spoji mezi pevnou BS a FlyBS. Právě vlivem toho omezení připojení je přenosová kapacita nejmenší. Tato metoda je závislá pouze na vzájemné poloze pevné BS a FlyBS, díky tomu tato vzdálenost určuje přenosovou kapacitu pro koncové uživatele. Nutno podotknout, že tento scénář nezohledňuje vzájemnou polohu dronu a sítě. Poloha dronu je zohledňována pouze vůči uživatelům. Nejmenších přenosových kapacit bylo u toho scénáře dosaženo také z důvodu velké vzdálenosti mezi pevnou BS a FlyBS po velkou část modelového času.



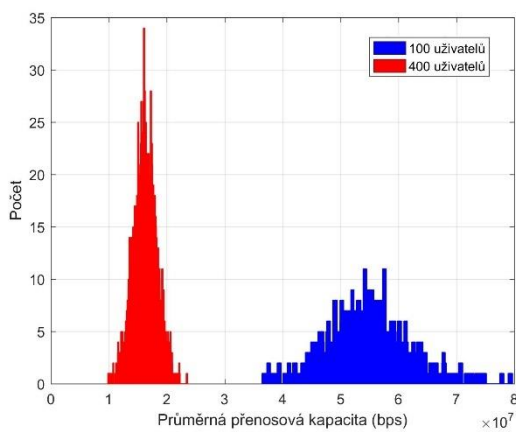
Obr. 4 Srovnání průměrné velikosti kapacity s počtem uživatelů a použitým modelem

V následujících grafech Obr. 5, Obr. 6 a Obr. 7 jsou vykresleny hustoty pravděpodobnosti (pdf - probability density function) výskytu hodnot přenosové kapacity. Všechny hustoty pravděpodobnosti byly průměrovány desetkrát během deseti opakování.

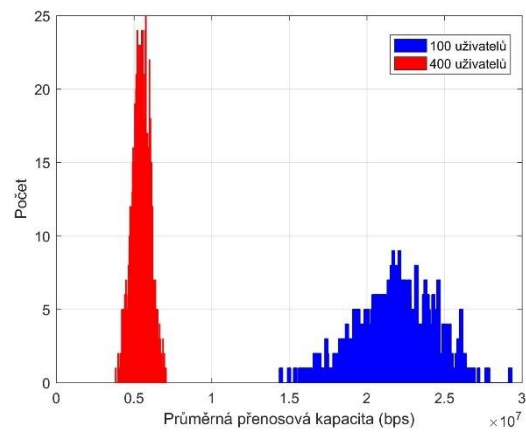
Z grafů jednotlivých scénářů lze vyčíst, jak se se zvyšujícím počtem uživatelů zmenšuje jejich průměrná přenosová rychlost



Obr. 5 Pdf graf průměrné přenosové rychlosti pro scénář s neomezeným připojením k páteřnímu spoji



Obr. 6 Pdf graf průměrné přenosové rychlosti pro scénář bez použití dronu



Obr. 7 Pdf graf pro scénář s omezeným připojením k páteřnímu spoji

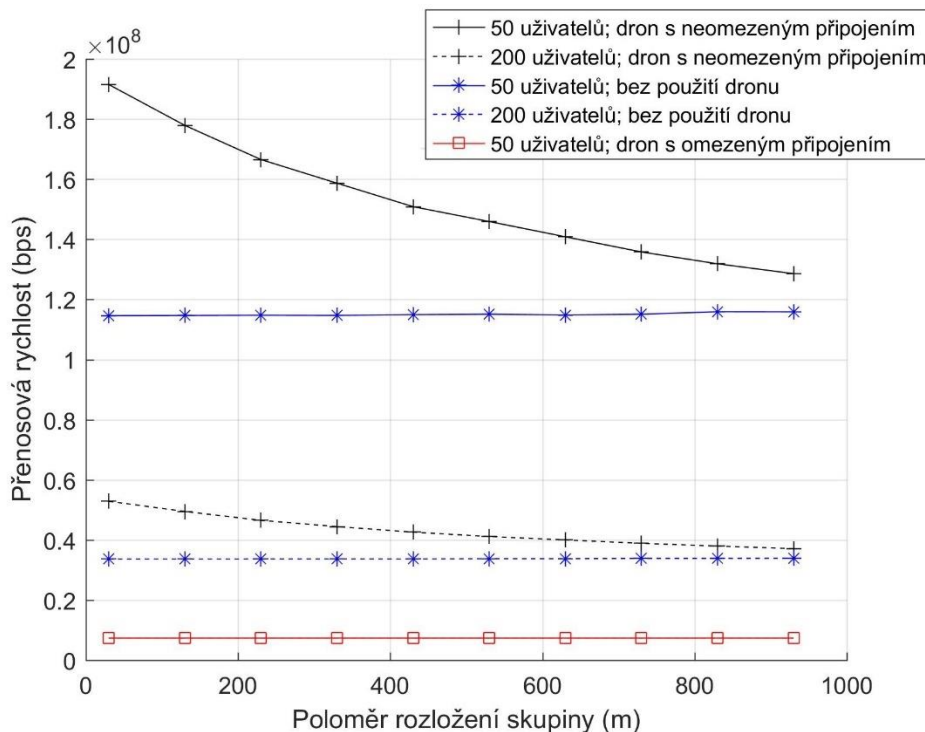
5.2.2 Vliv velikosti poloměru skupiny na přenosové kapacitě

Dalším parametrem, který ovlivňuje velikost přenosové kapacity je rozloha, na které se skupina vyskytuje. Vlivem většího poloměru skupiny se zvětšuje průměrná vzdálenost mezi FlyBS a uživateli. Se zvyšující se vzdáleností mezi FlyBS a uživateli se snižuje poměr SNR. Tím klesá průměrná přenosová kapacita i kapacita celé sítě.

Výsledný průběh průměrné přenosové kapacity je znázorněn v Obr. 8. Tento obrázek obsahuje porovnání všech tří scénářů a také porovnává vliv počtu uživatelů, v prvním případě s padesáti uživateli a ve druhém s dvěma sty uživateli.

Z Obr. 8 je vidět, že nejvyšší přenosové kapacity je dosaženo v případě použití dronu s neomezeným připojením k páteřnímu spoji. Scénář modelující stávající architekturu je nezávislý na poloměru skupiny. Pevná BS totiž přiděluje kmitočtové pásmo každému uživateli jednotlivě podle jeho požadavku, musí však splňovat podmínku pro maximální šířku pásma všech uživatelů. V porovnání se scénářem bez použití dronu je nárůst u malých skupin téměř dvojnásobný. Se zvyšujícím se poloměrem skupiny se rozdíl snižuje viz Obr. 8 to je způsobeno stále zvětšující se skupinou.

Ve scénáři uvažovaném používání dronu s omezeným připojením k páteřnímu spoji, je celková kapacita uživatelských kanálů omezena maximální kapacitou páteřní linky C_{max} . Tato maximální kapacita C_{max} je nezávislá na poloměru skupiny a na počtu připojených uživatelů. Proto je v následujícím grafu zobrazen jeden průběh závislosti přenosové kapacity na poloměru skupiny, protože průběh přenosové kapacity pro větší počet uživatelů by byl stejný. Je to způsobeno tím, že na komunikační kanály mezi uživateli a dronem je vyhrazena celková šířka pásma 500MHz, která je dostačující k tomu, aby se vlivem poloměru skupiny nezměnila průměrná přenosová kapacita na jednoho uživatele. Průběh velikosti průměrné přenosové kapacity je proto konstantní.



Obr. 8 Závislost průměrné přenosové kapacity na rozložení skupiny s porovnáním všech variant modelu

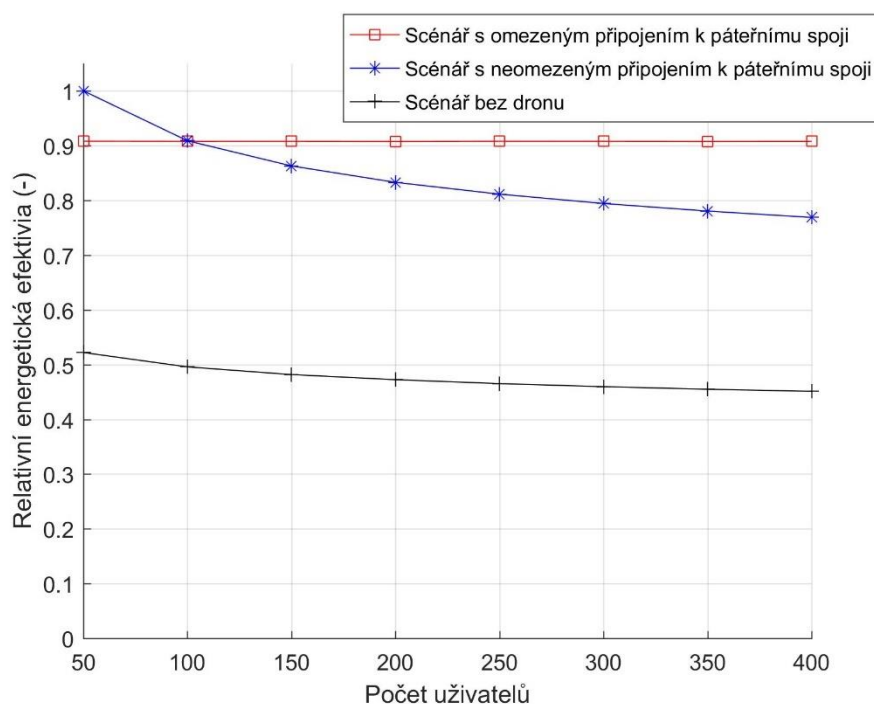
5.3 Energetická efektivita

Energetická efektivita E se řídí podle rovnice (3.16). V následujícím grafu Obr. 9 jsou znázorněny průběhy relativní energetické efektivnosti na počtu uživatelů všech tří použitých scénářů.

Konstantní průběh pro scénář uvažující omezené připojení k páteřnímu spoji, je konstantní z důvodu nezávislosti kapacity páteřní linky na počtu připojených uživatelů. Kapacita připojení k páteřnímu spoji se s rostoucím počtem uživatelů nemění. Díky tomu je celková přenosová kapacita konstantní. S tím je spojena i energetická efektivita.

Křivka pro scénář uvažující použití stávající architektury je logaritmicky klesající, z důvodu rostoucího počtu připojených uživatelů. Tím se zvyšuje celková přenosová kapacita. Stejný důvod má i klesající trend u křivky znázorňující průběh ve scénáři s neomezeným připojením k páteřnímu spoji, kde je přenosová kapacita nejvyšší ze všech scénářů a také nejmenší energetická efektivita.

Z grafu je vidět, že pro scénář uvažující použití dronů s neomezeným připojením k páteřnímu spoji je přibližně o 40 až 50 % méně energeticky efektivní než zbývající dva scénáře. To je zapříčiněno vyšší přenosovou kapacitou.



Obr. 9 Graf závislosti energetické efektivnosti na počtu uživatelů během použitých scénářů

5.4 Shrnutí výsledků

Nejvyšších hodnot přenosové kapacity dosáhl během simulací scénář s použitím dronu s uvažováním neomezeného připojení k páteřnímu spoji. Díky vhodnějším podmínkám pro přenos se dosahuje nejlepších hodnot přenosové kapacity. Vhodnější podmínky pro přenos jsou dosaženy polohou dronu, která minimalizuje vzdálenost, po které se šíří potřebný signál. Celková kapacita se pohybuje řádově v jednotkách Gbps a se zvyšujícím počtem uživatelů či se zvyšujícím poloměrem skupiny se celková přenosová rychlost snižuje.

Model pro stávající architekturu mobilní sítě, tedy použití pouze pevných BS dosahuje nižších přenosových kapacit než model s uvažováním neomezeného připojení k páteřnímu spoji zhruba o polovinu, avšak tyto hodnoty jsou z velké části idealizované, kvůli uvažování přímé viditelnosti mezi pevnou BS a uživateli.

Nejnižších přenosových kapacit je dosaženo při použití scénáře s uvažováním omezeného připojení k páteřnímu spoji sítě. Je to způsobeno omezením celkové přenosové kapacity uživatelských kanálů přenosovou kapacitou připojení k páteřnímu spoji sítě. Přenosová kapacita připojení k páteřnímu spoji je závislá na vzdálenosti pevné BS od FlyBS. Zlepšení nastane v případě umístění dronu do polohy zohledňující jak uživatelskou polohu a požadavky na přenosovou kapacitu tak zohledňující polohu pevné BS.

Z hlediska energetické efektivity je scénář uvažující neomezené připojení k páteřnímu spoji sítě nejméně efektivní a to o 40 až 50 % oproti ostatním použitým scénářům. Je to způsobeno vyšší přenosovou kapacitou.

6. Závěr

V této práci je porovnáván vliv počtu uživatelů a poloměru skupiny na přenosové kapacity při použití dronů jako základnových stanic při downlinku za pomoci použitého pohybového modelu pro skupinový pohyb. Dále je vyhodnocena energetická efektivita. Výsledky jsou porovnány s klasickou architekturou stávající mobilní sítě využívající velký počet malých buněk.

Nejvyšší přenosové kapacity dosáhl scénář s použitím dronu s uvažováním neomezeného připojení k páteřnímu spoji sítě. Důvodem je volnost pohyblivost dronu a možnost jeho vhodného umístění nad uživateli, což minimalizuje vzdálenost mezi uživateli a dronem. Výsledky ukázaly přibližně dvojnásobný nárůst kapacity při použití dronů s neomezeným připojením k páteřnímu spoji sítě oproti stávající architektuře mobilních při skupině o padesáti až sto uživatelích. Nárůst se snižuje s rostoucím počtem uživatelů.

Scénář s uvažováním omezeného připojení k páteřnímu spoji sítě je omezen přenosovou kapacitou tohoto spoje. Použití tohoto scénáře vychází nejmenší přenosová kapacita z důvodu zohlednění pouze polohy a aktuálního požadavku uživatelů. Není brán ohled na pozici pevné BS.

Použití dronů jako základnových stanic má svůj potenciál, právě kvůli možnosti minimalizace vzdálenosti mezi dronem a uživateli. Navíc díky kombinaci s milimetrovými vlnami lze dosáhnout zvýšení přenosových kapacit. Využití tento koncept najde v místech s vysokou koncentrací uživatelských zařízení a mimo jiné také jako záložní řešení při přírodních katastrofách.

Výsledky práce je možné rozšířit v budoucnu například o možnosti zohlednění pozice pevné BS vůči dronu při určování pozice dronu a zajistit tak vyšší přenosovou kapacitu. Dalším příkladem rozšířením může být uvažování vzniku interferencí od jiného zdroje, či měnit podmínky přenosu (uvažovat vícecestné šíření, přidání překážek či použití více dronů schopni komunikovat mezi sebou) Prostudována by měla být i situace, kdy dron bude téměř vybitý a bude ho nahrazovat jiný dron již plně nabit. Zde by se mohlo hovořit a jakési formě handoveru mezi drony.

Reference

- [1] A. Gupta a R. K. Jha, „A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies,“ *IEEE Communications*, 7 August 2015.
- [2] X. Ge, S. Tu, G. Mao, C. X. Wang a T. Han, „5G Ultra-Dense Cellular Networks,“ *IEEE Wireless Communications*, February 2016.
- [3] L. Gupta, R. Jain and G. Vaszkun, "Survey of Important Issues in UAV Communication Networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, November 2015.
- [4] P. K. Agyapong, M. Iwamura, D. Staehle, W. Kiess a A. Benjebbour, „Design considerations for a 5G network architecture,“ *IEEE Communication Mag.*, pp. 65-75, November 2014.
- [5] Z. Becvar, M. Vondra, P. Mach, J. Plachy a D. Gesbert, „UAVs in Future Mobile Networks: Can Flying Base Station Substitute Ultra-Dense Small Cells?,“ *European Wireless (EW 2017)*, 1-6 2017.
- [6] 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.
- [7] T. S. Rappaport, F. Gutierrez a E. Ben-Dor, „Broadband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Models Using Adaptive-Beam Antennas for Outdoor Urban Cellular Communications,“ *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, April 2013.
- [8] F. Rusek, „Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays,“ *IEEE Signal Process. Mag.*, January 2013.
- [9] F. Libillo, Z. Becvar, M. A. Puente, P. Mach, F. L. Presti, F. Gambetti, M. Goldhamer, J. Vidal, A. K. Widiawan a E. Calvanese, „An architecture for mobile computation offloading on cloud-enabled LTE small cells,“ *IEEE Conference Publications*, 2014.
- [10] Y. Zeng, R. Zhang a T. Lim, „Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges,“ *IEEE Communications Magazine*, May 2016.

- S. Chandrasekharan, „Designing and Implementing Future Aerial,“ *IEEE Communications Magazine*, May 2016.
[11]
- I. Bor-Yaliniz and H. Yanikomeroglu, "The New Frontier in RAN Heterogeneity: Multi-tier Drone-Cells," *IEEE Communications Magazine*, November 2016.
[12]
- A. Al-Hourani, S. Kandeepan a S. Lardner, „Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage,“ *IEEE Wireless Communications Letters*, December 2014.
[13]
- B. V. D. Bergh, A. Chiumento a S. Pollin, „LTE in the sky: trading off propagation benefits with interference cost for aerial nodes,“ *IEEE Communications Magazine*, May 2016.
[14]
- G. M. Rebeiz, S.-Y. Kim a O. Inac, „Millimeter-wave large-scale phased-arrays for 5G systems,“ *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2015.
[15]
- J. Regan, „Hydrogen Cells May Boost Drone Flight Times,“ *dronlife.com*, December 2015.
[16]
- O. Bouchet, H. Sizun, C. Boisrobert, F. d. Fornel a P.-N. Favennec, *Free-Space Optics, France, Paris: Hermes Science/Lavoisier*, 2014.
[17]
- S. Patil, E. Altan, M. K. Hanawal a J. Rojas-Mora, „Modeling and Simulation of Mobility of Crowds“ [.http://www-sop.inria.fr](http://www-sop.inria.fr).
[18]
- K. Aspelin, „Establishing Pedestrian Walking Speeds,“ 2005.
[19]
- P. Pechač a S. Zvánovec, *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů, České vysoké učení technické v Praze*.
[20]
- L. Mads, „Studies on Mobile Terminal Energy Consumption for LTE and Future 5G,“ Aalborg university, 2015.
[21]