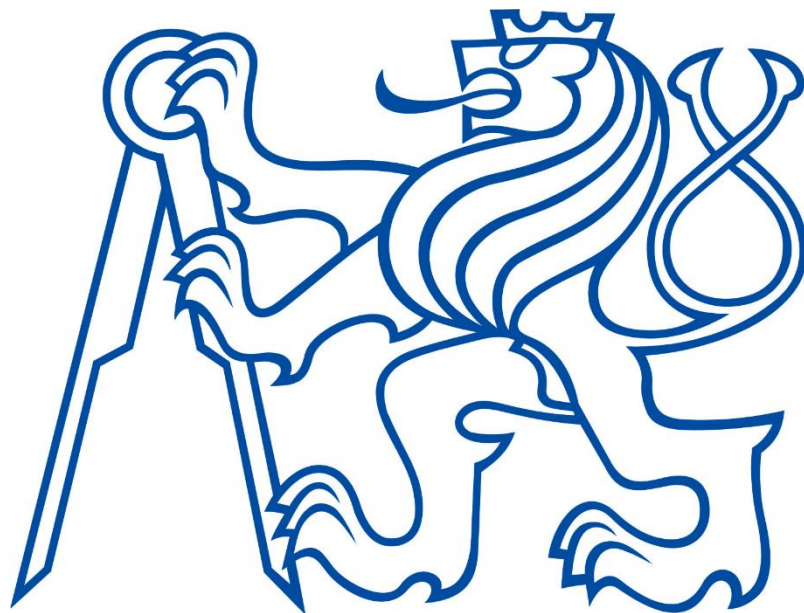


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky

Handover s využitím predikce úrovně signálu v mobilních sítích



květen 2017

Diplomant: Lukáš Dvořáček

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

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou zadanou diplomovou práci na téma „Handover s využitím predikce úrovně signálu v mobilních sítích“ zpracovával samostatně a uvedl jsem veškeré použité zdroje a literaturu. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze dne: 25.5.2017

.....
podpis

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dvořáček** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **393451**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Sítě elektronických komunikací**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Handover s využitím predikce úrovně signálu v mobilních sítích

Název diplomové práce anglicky:

Handover Exploiting Signal Level Prediction in Mobile Networks

Pokyny pro vypracování:

Prostudujte možnosti rozšíření procedury předání spojení mezi základnovými stanicemi v mobilních sítích (handover) o možnost využití predikce úrovně signálu přijímaného od základnových stanic. Analyzujte vybrané metody predikce z hlediska výpočetní složitosti, přesnosti predikce a vhodnosti pro využití v reálných sítích. Dále navrhněte rozšíření existujících predikčních metod tak, aby bylo možné využít potenciálu budoucích mobilních sítí zejména z hlediska predikce vývoje signálu od obsluhující a sousedních základnových stanic.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Becvar, Z.; Mach, P.; Calvanese Strinati, E.: Prediction of channel quality after handover for mobility management in 5G, International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity, Finland, November 2014.
- [2] Becvar, Z.; Mach, P.: Mitigation of Redundant Handovers to Femtocells by Estimation of Throughput Gain, Mobile Information Systems, Vol. 9, No 4, 2013.
- [3] Samaan, N.; Karmouch, A.: A Mobility Prediction Architecture Based on Contextual Knowledge and Spatial Conceptual Maps, IEEE Transaction on Mobile Computing, Vol.4, No. 6, pp. 537-551, 2005.

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: **20.02.2017** Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

Anotace

Diplomová práce se zabývá problematikou častého přepojování v mobilních sítích s velkým množstvím malých základnových stanic. Ty jsou v dnešní době používány především pro zlepšení pokrytí městské zástavby signálem, a tedy ke zkvalitnění poskytovaných mobilních služeb. Nicméně během pohybu uživatele na území s velkou koncentrací základnových stanic může docházet k nadbytečnému předávání spojení mezi základnovými stanicemi. V práci je navržena a vyhodnocena metoda pro rozhodování o přepojení, založená na predikci kvality komunikačního kanálu. O přepojení je rozhodnuto na základě porovnání predikované hodnoty zlepšení kvality komunikačního kanálu s požadovanou hranicí zlepšení kvality. S využitím této metody je možné dosáhnout 35 % snížení počtu uskutečněných přepojení při pouhém 10 % poklesu průměrné přenosové rychlosti.

Klíčová slova

predikce, předávání spojení, mobilní síť, mobilita, nadbytečné přepojování

Summary

This master thesis is focused on a problem of frequent handovers in mobile networks with a high amount of small cells. These are nowadays exploited to improve coverage in urban areas where it leads to an increase in quality of services. However, the high amount of base stations deployed in an area can lead to unnecessary handovers. Thus, we propose and test a solution for a handover decision based on a prediction of a communication channel quality. The handover decision is extended by a comparison of the predicted improvement of the channel quality and with a threshold representing a required channel quality improvement. The proposed solution reduces the amount of handovers by up to 35% with only 10% drop in average bit rate.

Index Terms

Prediction, hand over, mobile network, mobility, redundant handover

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval mému vedoucímu práce doc. Ing. Zdeňku Bečvářovi, Ph.D. za jeho čas a ochotu při vedení této práce, poskytnuté odborné rady a připomínky.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Existující řešení	2
2.1	Hystereze.....	3
2.2	Time to Trigger	3
2.3	Predikce přepojování s využitím Quality of Experience.....	4
2.4	EPPS - Handover with eNB Pre-Selection and Parameter Self-Optimization	5
2.5	Mobilní algoritmus předpovědi pohybu (MMP).....	7
2.6	Shrnutí existujících řešení	7
3	Algoritmus.....	9
4	Simulace.....	15
4.1	Pohybový model.....	15
4.2	Simulační scénář.....	18
5	Výsledky	22
5.1	SINR hranice = 0 dB	23
5.2	SINR hranice = 400 dB	25
5.3	SINR hranice = 800 dB	27
5.4	SINR hranice = 1200 dB	29
6	Možné návrhy zlepšení	31
6.1	Tracking Area (TA).....	31
6.2	Time advance	32
7	Závěr	33
8	Reference.....	35

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Princip využití hystereze pro přepojení.....	3
Obrázek 2 - Princip využití Time To Trigger pro přepojení.	4
Obrázek 3 - Přepojování v závislosti na rychlosti pohybu UE.	6
Obrázek 4 - Vývojový diagram algoritmu.	9
Obrázek 5 - Sčítání hodnot SINR od obsluhujících eNB stanic.....	12
Obrázek 6 - Jednotlivé části simulace.	15
Obrázek 7 - Simulovaná oblast s rozmístěnými eNB stanicemi.....	15
Obrázek 8 - Pohyb jednoho uživatele ze skupiny "zaměstnanci".....	16
Obrázek 9 - Pohyb jednoho uživatele ze skupiny "residenti".....	17
Obrázek 10 - Závislosti uskutečněných přepojení a bps na požadované hranici SH.	22
Obrázek 11 - Poměr bps a počtu přepojení v závislosti na požadované hranici SH.	23
Obrázek 12 - Procentuální zastoupení jednotlivých CQI úrovní, SINR 0.	24
Obrázek 13 - Maximální získané hodnoty bps, SINR 0 dB.	24
Obrázek 14 - Procentuální zastoupení jednotlivých CQI úrovní, SINR 400 dB.	25
Obrázek 15 - Snížení hodnoty bps, SINR 400 dB.....	26
Obrázek 16 - Úspěšnost správného rozhodnutí, SINR 400 dB.....	27
Obrázek 17 - Procentuální zastoupení jednotlivých CQI úrovní, SINR 800 dB.	28
Obrázek 18 - Snížení hodnoty bps, SINR 800 dB.....	28
Obrázek 19 - Úspěšnost správného rozhodnutí, SINR 800 dB.....	29
Obrázek 20 - Procentuální zastoupení jednotlivých CQI úrovní, SINR 1200 dB.	30
Obrázek 21 - Snížení hodnoty bps, SINR 1200 dB.....	30
Obrázek 22 - Úspěšnost správného rozhodnutí, SINR 1200 dB.....	31
Obrázek 23 - Time Advance	33

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Výběr eNB v závislosti na rychlosti a požadované úrovni QoS.	5
Tabulka 2 - PSO – úprava hystereze a TTT	6
Tabulka 3 - Parametry simulace [15]	10
Tabulka 4 - Úspěšnost rozhodnutí v závislosti na minimální požadované hranici SINR SH.	13
Tabulka 5 - Úspěšnost rozhodnutí v závislosti na hodnotě SINR získané přepojením.	14
Tabulka 6 - Modulační a kódové schéma	21

Seznam zkratek

bps	bit/symbol
CQI	Channel Quality Indicator
eNB	Evolved Node B
EPPS	Handover with eNB Pre-Selection and Parameter Self-Optimization
EPS	eNB Pre-Selection
GPS	Global Positioning System
HeNB	Home Evolved Node B
IoT	Internet of Things
MCC	Mobile Country Code
MMP	Mobile Motion Prediction algorithm
MNC	Mobile Network Code
NRT	non-real time
PLMN ID	Public Land Mobile Network Identification
POI	Points of Interest
PSO	Parameter Self-Optimization
QoE	Quality of Experience
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RT	real time
SINR	Signal to Interference & Noise Ratio
TA	Tracking Area
TAC	Tracking Area Code
TAI	Tracking Area Identifier
TAU	Tracking Area Update
TTT	Time to Trigger
UE	User Equipment

1 Úvod

V dnešní době narůstají nároky na objem datových přenosů v mobilních sítích. To je způsobeno především stále se zvyšujícím počtem používaných mobilních telefonů, rozvojem mobilních komunikací a v neposlední řadě i nástupem internetu věcí (IoT) [1]. Cílem IoT je vytvářet z obyčejných zařízení zařízení „chytrá“ a to doplněním o schopnost vzájemné komunikace a přístupu ke cloudovému úložišti. Jejich činnost závisí především na vzájemné datové komunikaci, která se realizuje zejména v mobilních sítích [3]. S trendem IoT, který se rozšiřuje ve všech odvětvích průmyslu, narůstají nároky na kvalitu pokrytí mobilních sítí, na objem datového přenosu i na kvalitu mobilních služeb. Jen v průběhu roku 2016 se v porovnání s rokem minulým celosvětově navýšil objem dat přenesených v mobilních sítích o 63 % [2] a bylo přeneseno více jak 4,4 exabajtů dat [3].

Snahou všech mobilních operátorů je požadavkům IoT i mobilních uživatelů vyhovět. Proto implementují efektivnější technologie pro přenos dat, rozšiřují používaná pásma, navyšují počet základnových stanic (eNB) a tím tak zlepšují signálové pokrytí, propustnost a přenosovou rychlost mobilních sítí.

S rozlohou, kterou je potřeba pokrýt signálem, souvisí i úroveň vyzařovaného výkonu eNB stanice. Hranice výkonů pro různé typy eNB stanic nejsou pevně stanoveny a mohou se u jednotlivých výrobců lišit. Dále uvedené výkonové hodnoty pro jednotlivé typy eNB stanic jsou čerpány z údajů výrobce Fujitsu [4]. Pro distribuci signálu do několikakilometrové vzdálenosti od vysílací eNB stanice se zpravidla používají makro eNB stanice. Vyzařovaný výkon makro eNB stanic se pohybuje v rozsahu od 20 do 160 W. Na pokrytí vnějšího území s maximální vzdáleností jednoho kilometru od základnové eNB stanice se nejčastěji používají mikro eNB stanice. U tohoto typu eNB stanice se hodnota vyzařovaného výkonu pohybuje v rozmezí od 2 do 20 W. Piko eNB stanice s vyzařovaným výkonem v rozmezí od 250 mW do 2 W a dosahem až 300 metrů mohou být implementovány do vnějšího i vnitřního prostředí. Posledním typem eNB stanic jsou femto eNB stanice, také známé jako domácí eNB stanice (HeNB). S vyzařovaným výkonem od 10 do 200 mW jsou uzpůsobeny především pro implementaci do vnitřních prostorů budov. Právě v budovách, kde se předpokládá výskyt častých odrazů šířícího se signálu, je větším počtem femto eNB stanic dosaženo rovnoměrnějšího pokrytí daného prostoru signálem, než menším počtem piko eNB stanic [4].

Během pohybu uživatele se uživatelské zařízení (UE) může vyskytnout v oblasti, která již není dostatečně pokryta mobilním signálem od aktuální obsluhující eNB stanice a mohlo by tak dojít k přerušení ve spojení. Aby k této situaci nedocházelo, je třeba s patřičnou rezervou, zohledňující úroveň přijímaného signálu, provést přepojení UE k jiné eNB stanici. Ve snaze zajistit nejlepší úroveň pokrytí dané oblasti mobilním signálem navyšují mobilní operátoři počet implementovaných eNB. S přibývajícím počtem použitých eNB stanic

současně narůstá počet uskutečněných nadbytečných přepojení, a také dochází k častějšímu rušení mezi jednotlivými eNB stanicemi [4]. Za nadbytečná jsou považována taková přepojení, která v porovnání se signálem přijímaným z obsluhující eNB stanice, nepřinášejí dostatečné zlepšení hodnoty SINR.

V této diplomové práci je navrženo řešení pro snížení počtu přepojení v prostoru hustě pokrytém femto eNB stanicemi. Navrhovaný algoritmus se skládá ze tří částí. Nejprve odhadne míru kvality signálu (definovanou odstupem signálu od šumu a interference – dále jen SINR), které bude dosaženo přepojením. Na základě srovnání velikosti predikované hodnoty s hodnotou SINR, která je pro uskutečnění přepojení požadována, algoritmus rozhoduje o uskutečnění přepojení. Následně je testována úspěšnost daného rozhodnutí, které je pak zohledněno v dalších rozhodnutích o přepojení.

Diplomová práce je strukturována následovně. Nejprve jsou popsány metody pro omezení počtu přepojení. Následuje kapitola, ve které jsou detailně rozpracovány způsoby predikce navrženého algoritmu. Pak je blíže popsána simulace, na jejímž základě je navržený algoritmus testován. Po této kapitole následuje kapitola zaměřující se na výsledky a jejich diskuzi. V předposlední kapitole jsou zmíněna možná zlepšení, které by přispěla k lepší přesnosti predikce. Práce je ukončena závěrem.

2 Existující řešení

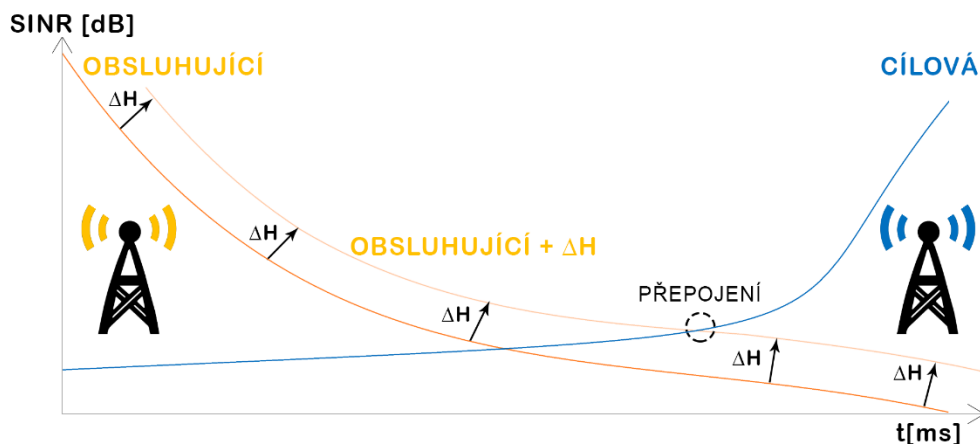
V této kapitole jsou detailně rozepsány tyto metody: hystereze, zabraňující zejména okamžitému přepojení při nabídce lepší hodnoty signálu od jiné eNB stanice; TTT (Time to Trigger), zabraňující přepojení při rychlém kolísání intenzity přijímaného signálu; QoE (Quality of Experience), zohledňující pravděpodobnost úspěchu přepojení a čas potřebný na jeho realizaci; EPS (eNB Pre-Selection), zohledňující při výběru cílové eNB stanice rychlost pohybu UE (User Equipment); PSO (Parameter Self-Optimization), která na základě aktuálního stavu mobilní sítě upravuje parametry TTT a hystereze. A nakonec metoda MMP (Mobile Motion Prediction algorithm), využívající při rozhodování o přepojení specifických modelů pohybu dále upravených o priority konkrétního uživatele.

2.1 Hystereze

Jednou ze základních metod používaných k omezení počtu nadbytečných přepojení UE je hystereze [5]. Pokud se UE pohybuje na rozhraní mezi dvěma eNB stanicemi, mohou se úroveň signálu z obou stanic často střídat. Aby nedocházelo k přepojení UE mezi eNB stanicemi okamžitě při každé vyšší úrovni signálu, navyšuje algoritmus aktuální hodnotu SINR nebo přijímaného výkonu UE o pevně definovanou hodnotu hystereze ΔH a přepojení je provedeno pouze pokud je splněna následující podmínka [5]:

$$S_T > S_S + \Delta H \quad (1)$$

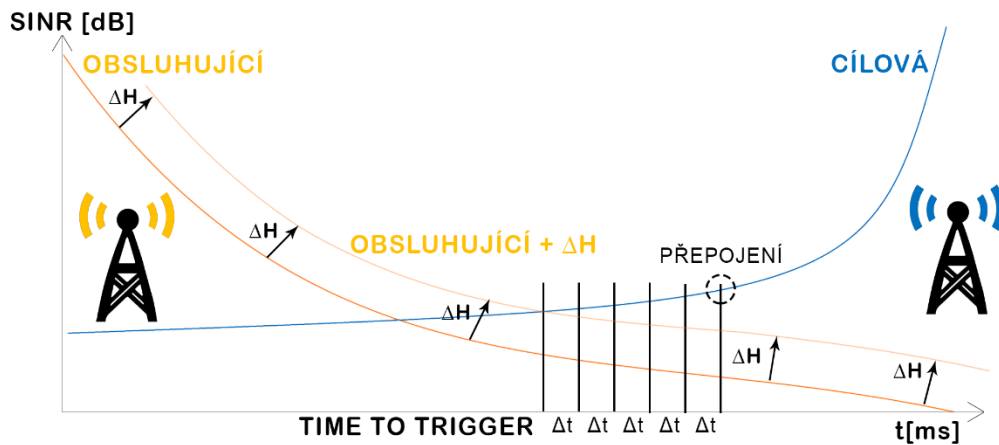
kde S_S je úroveň signálu přijatého z obsluhující eNB stanice a S_T reprezentuje úroveň signálu přijatého z cílové stanice. Hysterezi je definováno minimální požadované zlepšení hodnoty signálu, kterého musí dosáhnout signál potenciální cílové eNB stanice pro uskutečněné přepojení. Tato situace je znázorněna na následujícím obrázku (viz. obr. 1).



Obrázek 1 - Princip využití hystereze pro přepojení.

2.2 Time to Trigger

Další metodou, kterou může být metoda hystereze doplněna, je Time To Trigger (TTT). Hlavním cílem metody TTT je zabránit přepojení při rychlém kolísání intenzity přijímaného signálu [5]. Kolísání je nejčastěji způsobeno mnohacestným šířením signálu, při kterém, vlivem odrazů a rozdílů v délkách drah šíření jednotlivých signálů, dochází ke zpoždění v časech jejich příchodů [8]. Proto metoda TTT pro zabránění častého nežádoucího přepojování využívá časového intervalu, po jehož dobu musí být podmínka hystereze splněna, jak je znázorněno v následujícím obrázku (viz. obr. 2).



Obrázek 2 - Princip využití Time To Trigger pro přepojení.

Pokud dojde během časového intervalu k poklesu intenzity přijímaného signálu pod požadovanou hranici hystereze ΔH , uplynulý časový interval se vynuluje a dojde k spuštění nového cyklu.

Nevýhodou metody TTT je závislost na rychlosti pohybujícího se UE [9], [10]. Uživatelská zařízení pohybující se rychlostí nad 120 Km/h urazí v rozhodovacím intervalu velkou vzdálenost, během které se může i výrazně zhoršit kvalita SINR přijímaného signálu. Proto je nutné u TTT metody měnit čas potřebný k přepojení v závislosti na rychlosti pohybu UE [9], [10].

2.3 Predikce přepojování s využitím Quality of Experience

Většina dnes používaných metod rozhoduje o přepojení na základě hodnoty Reference Signal Received Power (RSRP), hodnoty Time to Trigger (TTT) a hystereze. Metoda predikce na základě kvality zkušeností (QoE) navíc zohledňuje kvalitu spojení minulého přepojení [11]. Použitý algoritmus se nejprve učí správně rozhodovat na základě již uskutečněných přepojení, založených na splnění podmínek běžné hystereze ΔH a intervalu TTT. Během přepojení algoritmus ukládá na obsluhující eNB stanici informace o hodnotě RSRP Reference Signal Received Quality (RSRQ) a také informace o hodnotách QoE. Parametr QoE v sobě zahrnuje informaci o čase potřebném k přenosu dat a také pravděpodobnost úspěchu, s jakou byla data v minulosti přenesena [11]. S využitím všech zaznamenaných hodnot a Softmaxovy i Sigmoidovy [11] logické funkce jsou definovány kvality jednotlivých přepojení. Při každém dalším požadavku na přepojení je vybráno přepojení s nejvyšší kvalitou.

Výhoda daného způsobu predikce spočívá především v začlenění pravděpodobnosti úspěšného přenosu dat do algoritmu ovlivňujícího výběr cílové eNB stanice. Tento způsob predikce [11] patří k úspěšnějším z existujících řešení (viz. Kap. 2). Daní za úspěšnost

správného rozhodnutí je nutnost použití databází na zaznamenávání velkého množství informací z předešlých přepojení a s tím související i velká hardwarová náročnost.

Metoda predikce použitá v předkládané práci, v porovnání s výše uvedenou metodou, ukládá pouze informace o predikované hodnotě SINR, kterou algoritmus od následujícího přepojení očekává. Lze předpokládat, že s množstvím ukládaných parametrů, které jsou používány pro následné rozhodnutí o přepojení, bude metoda s predikcí na základě QoE dosahovat lepších výsledků, byť za cenu velkých nároků na HW a tedy i nákladů spojených s ním.

2.4 EPPS - Handover with eNB Pre-Selection and Parameter Self-Optimization

V heterogenních sítích, které jsou tvořeny skupinami makro eNB a piko eNB stanic, může být UE přepojována mezi vhodně vybranými eNB stanicemi také na základě metod Pre-Selection (EPS) a Parameter Self-Optimization (PSO) [10].

Metoda EPS vybírá vhodné skupiny cílových eNB stanic v závislosti na rychlosti pohybu UE a s ohledem na kvalitu poskytované služby, kterou ke své činnosti UE požaduje. Rychlosti pohybu UE jsou rozděleny do tří skupin [10]. Do skupiny „vysoké rychlosti“ patří všechna UE, jejichž rychlost pohybu přesahuje hranici 120 Km/h. Skupina „střední rychlosti“ je uvažována od hranice 50 Km/h. Tato hranice definuje i horní mez poslední uvažované skupiny, kterou je skupina UE pohybujících se „nízkou rychlostí“ (viz. Tab. 1). Rychlostní limity, které jsou zmíněny i výše v textu, nejsou pevně definovány a mohou se tak při dalších prováděných testováních lišit [10].

V závislosti na požadované prioritě přenosu dat jsou poskytované služby děleny do skupin real-time (RT) a non real-time (NRT) (viz. Tab.1). V RT skupině jsou služby spojené s přenosem hlasu, videa a v neposlední řadě i služby související s hraním on-line her. Do skupiny NRT pak spadají všechny ostatní služby spojené s přenosem informací, pro jejichž správné fungování není nutné zajistit přenos v reálném čase.

Tabulka 1 - Výběr eNB v závislosti na rychlosti a požadované úrovni QoS.

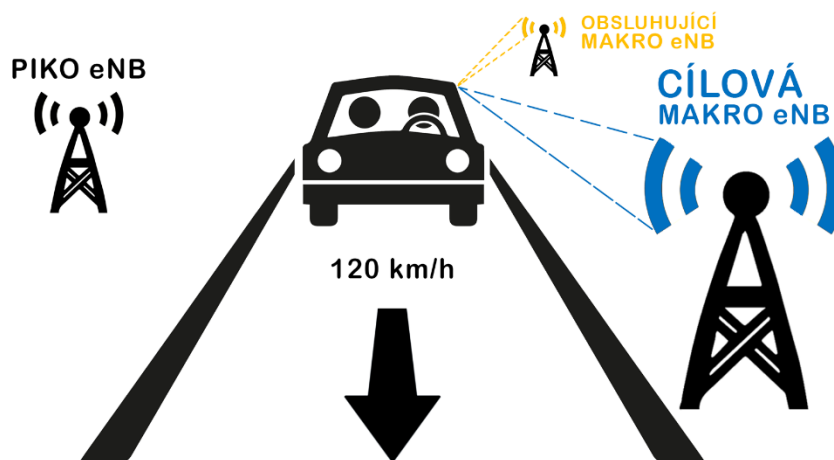
Rychlost	QoS	makro eNB stanice	piko eNB stanice
Vysoká	RT	vyšší priorita	NE
Vysoká	NRT	vyšší priorita	NE
Střední	RT	nižší priorita	vyšší priorita
Střední	NRT	vyšší priorita	nižší priorita
Nízká	RT	nižší priorita	vyšší priorita
Nízká	NRT	nižší priorita	vyšší priorita

Metoda PSO v závislosti na aktuálním poměru neuskutečněných přepojení, tzv. ping-pong přepojování UE, selhání radiového spoje a „ocenění“ těchto zmíněných parametrů upravuje hodnotu časového intervalu TTT i hranici hystereze ΔH [12], [13] (viz. Tab. 2). Na základě těchto dvou parametrů dokáže metoda PSO reagovat na aktuální dění v síti a průběžně upravovat požadované parametry pro přepojení.

Tabulka 2 - PSO – úprava hystereze a TTT

Událost	hystereze	TTT
neuskutečnění přepojení	snížení	snížení
ping-pong přepojování	zvýšení	zvýšení
vysoká rychlost UE	snížení	snížení

Z počtu neuskutečněných přepojení a ztracených paketů získaných ze simulace [10] vyplývá, že UE s rychlostí pohybu přesahující 120 Km/h je vhodné přepojovat jen mezi makro eNB stanicemi. Tato situace je znázorněna v následujícím obrázku (viz. obr. 3).



Obrázek 3 - Přepojování v závislosti na rychlosti pohybu UE.

Přepojování těchto UE k piko eNB stanicím vede ke zvýšení počtu neuskutečněných přepojení. Časté selhání během přepojení „rychle“ se pohybujícího UE k piko eNB stanicím může být způsobeno nevhodně zvolenou dobou TTT intervalu [10]. V takovém případě je čas potřebný k samotnému připojení k piko eNB stanici delší, než je doba strávená UE v oblasti pokryté signálem z této stanice. Při několikanásobném neúspěšném přepojení k některé z piko eNB stanic dochází ke ztrátě přenášených datových paketů a tím také k výraznému zhoršení kvality poskytované služby.

Jednou z podmínek pro využití všech výhod piko eNB stanic je vhodně zvolená oblast použití. Mezi hlavní oblasti, ve kterých je vhodné piko eNB stanice použít, patří nákupní centra, sportovní stadiony i hojně navštěvované veřejné prostory [4]. Zároveň se ale

v těchto oblastech nepředpokládá vysoká rychlost pohybu UE, neboť ta by ve spojení s připojením k piko eNB stanici spíše zhoršovala kvalitu poskytovaných služeb.

2.5 Mobilní algoritmus předpovědi pohybu (MMP)

Predikce budoucího pohybu uživatele lze využít i pro definování nejvhodnějších cílových eNB stanic. Daná predikce je založena na základě deterministického chování uživatele a specifických modelů pohybu. Algoritmus předpokládá, že se uživatelé pohybují podle modelových vzorů a jejich pohyb vykazuje určitou pravidelnost [14].

V první fázi implementace se algoritmus z pohybu uživatelů učí a zaznamenává si informace o pravidelně se opakujících cestách. Uložená data pak používá k výpočtu modelových pohybů pro danou lokalitu a porovnává je s modelovými vzory. V závislosti na modelových vzorech a aktuálních změnách v chování uživatele a konkrétních preferencích jednotlivce se mění pravděpodobnost budoucího reálného pohybu uživatele.

Nevýhodou tohoto způsobu predikce pohybu a jeho následného využití v rozhodnutí o přepojení k cílové eNB stanici je vysoká citlivost na změny chování uživatele. Ty zahrnují detailní znalosti uživatelského kalendáře, které mohou být v rozporu s jeho soukromím. Zároveň implikují nutnost zpracování velkého množství dat [14].

2.6 Shrnutí existujících řešení

Cílem všech způsobů predikce, využívaných pro optimalizaci přepojení, je správně vybírat vhodné cílové eNB stanice. Tím se sníží počet nadbytečných přepojení, omezí přenos velkého množství datového toku signalizace, sníží se latence a tudíž se zvýší kvalita nabízené služby [6]. Vzhledem k množství parametrů, které jsou během přenosu mobilního signálu mezi eNB stanicí a UE zkoumány a zaznamenány, vzniklo několik způsobů, jejichž pomocí je možné predikci a následný výběr nejlepšího přepojení provést.

Vždy se však jedná o výpočetně náročné operace. Jak je popsáno ve výše uvedených odstavcích, predikce pro určení nejlepších přepojení na uživatelské cestě může využívat ke své funkci informace o síle přijímaného signálu (RSRP) [11], o rychlosti pohybu UE, o aktuální poloze UE nebo o kvalitě minulého přepojení QoE (Quality of Experience). Parametr QoE je nejčastěji definován jako počtem neuskutečněných přepojení mezi párem obsluhující a cílové eNB stanice, tak i dobou potřebnou k přenosu daného objemu dat [11].

Predikcí a následným výběrem vhodného přepojení k cílové eNB stanici se také zabývají tyto práce [20][21].

V porovnávané diplomové práci [20] byl použit stejný způsob predikce hodnoty zlepšení SINR, kterou má přepojení k cílové eNB stanici přinést. Daná práce při výběru vhodné cílové

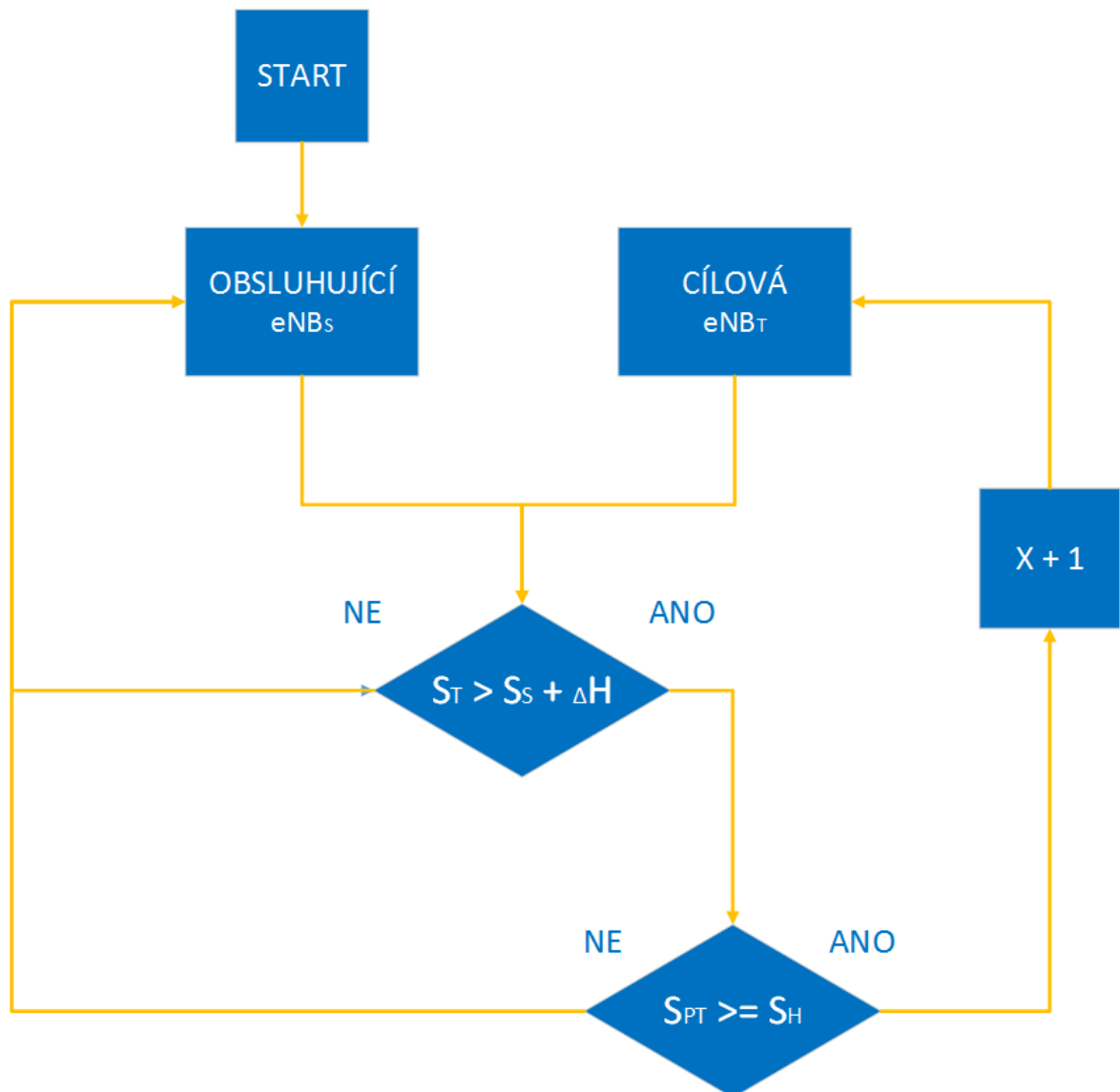
stanice navíc zohledňuje i střední hodnotu času, po kterou je uživatel k cílové eNB stanici připojen. Z požadované hodnoty zisku a doby připojení uživatele k cílové stanici je vypočtena hodnota zlepšení, která je očekávána i při dalším výskytu stejného přepojení.

V předkládané práci je o uskutečnění přepojení k cílové eNB stanici rozhodováno na základě porovnání predikované hodnoty zlepšení a pevně definované hranice SINR zisku (S_H), které má každé uskutečněné přepojení minimálně přinést. Tím jsou lépe eliminována přepojení ke stanicím, ve kterých v minulých výskytech uživatel strávil jen krátkou dobu. Dalším rozdílem je doba, po kterou se algoritmus učí. Zatímco v porovnávané práci se po dobu 500 sekund algoritmus predikovat pouze učí, v předkládané práci je první predikovaná hodnota zlepšení definována pevně a následně je po celou dobu pohybu UE upravována v závislosti na hodnotách SINR z předchozích přepojení. Dalším rozdílem oproti porovnávané práci je rozdělení uživatelů do dvou skupin na základě podobného způsobu chování. Díky rozdělení uživatelů je zjištěna různá úspěšnost správného rozhodnutí o přepojení v závislosti na pohybu prostředí s různým počtem implementovaných eNB stanic.

V odborném článku [21] je daná problematika výběru vhodného přepojení řešena komplexně. Oproti předkládanému řešení je zde navíc pro výběr vhodné cílové eNB stanice uvažováno zatížení jednotlivých eNB stanic, rychlost pohybu UE i vzdálenost UE od eNB stanice. Předkládaná práce se v porovnání s odborným článkem především zaměřuje na způsob rozhodování o přepojení s využitím znalosti předešlých zlepšení hodnot SINR.

3 Algoritmus

V této kapitole je detailněji rozepsána struktura navrženého algoritmu pro predikci a následné rozhodnutí o přepojení. Algoritmus používá pro predikci očekávané hodnoty SINR metodu průměrování s exponenciálním zapomínáním. Na základě algoritmu je predikována hodnota zlepšení (S_{PT}), která musí být větší nebo rovna požadované hranici SINR (S_H), aby bylo přepojení provedeno.



Obrázek 4 - Vývojový diagram algoritmu.

Ve vývojovém diagramu algoritmu (viz. obr. 4) je hodnota SINR od obsluhující eNB stanice navýšená o hysterezi ΔH . Takto upravená hodnota SINR je definována pomocí $S_S + \Delta H$. Hodnota SINR od potenciální cílové eNB stanice je definována jako S_T . Predikovaná hodnota SINR nabízeného přepojení je definována jako S_{PT} . Počet výskytů přepojení v daném eNB páru je definováno pomocí X a pomocí S_H je definována hranice zlepšení hodnoty SINR, která je pro uskutečnění přepojení požadována (viz. Tab. 5).

Tabulka 3 - Parametry simulace [15]

Parameter	Hodnota
Frekvence nosné [GHz]	2
Šířka pásma [MHz]	20
Vyzařovaný výkon mikro eNB / femto eNB [dBm]	27 / 15
Výška umístění mikro eNB [m]	32
Výška umístění piko eNB [m]	3 / 4 / 6 / 7,5 / 9 / 10,5 / 12 / 13,5
Počet UE/ mikro eNB / femto eNB	2 x 30 / 4 / 90
Útlum stěn [dB]	10
Model ztráty šířením z mikro eNB / femto	Okumura Hata [15]/ ITU-R P.1238
Model pohybu	Manhattan-like
Hranice SINR zlepšení S_H [dB]	0 / 100 / 200 / 400 / 600 / 800 / 1000 / 1200
Minimální hranice SINR S_{MIN} [dB]	- 8
Rychlost UE [m/s]	1
Simulovaná doba pohybu [s] / počet různých realizací	40 000 s / 10
Velikost oblasti simulace [m]	640 x 360

Index g pro obsluhující eNB stanici a index h pro potenciální cílovou eNB stanici jsou v následujícím textu zvoleny s cílem usnadnit čtenáři pochopení daného algoritmu. V prvním kroku uživatelské cesty je UE připojeno k eNB stanici $eNB_g(t_0)$ s největším odstupem signálu od šumu a interference. V stejném kroku uživatelské cesty je také testováno splnění podmínky hystereze (1) (viz. Kap. 2.1).

Pokud se stanice z minulého kroku uživatelské cesty (t_0) od stanice s maximální hodnotou SINR v kroku aktuálním (t_τ) neliší, přepojení nenastává, jak je definováno v následující rovnici:

$$\max(SINR_g + \Delta H; SINR_i \forall i) = SINR_g + \Delta H \quad (2)$$

V opačném případě, kdy se tyto stanice liší, nastává první přepojení a s ním související záměna obsluhující eNB_g stanice za eNB_h stanici cílovou. Tato cílová stanice se pro následující bod uživatelské cesty stává eNB stanicí obsluhující. Aby algoritmus znal počet přepojení pro danou kombinaci eNB stanic, je vytvořen eNB pár $eNB_{gh}(X)$, kde X charakterizuje počet výskytů tohoto páru. Přepojením ze stanice eNB_g ke stanici eNB_h je navýšen počtu výskytů X páru eNB_{gh} , jak je definováno v následujících rovnicích:

$$\max(SINR_g + \Delta H; SINR_i \forall i) = SINR_i \quad (3)$$

$$\text{obsluhující } eNB(t_0) = eNB_g \quad (4)$$

$$\text{obsluhující } eNB(t_\tau) = eNB_h \quad (5)$$

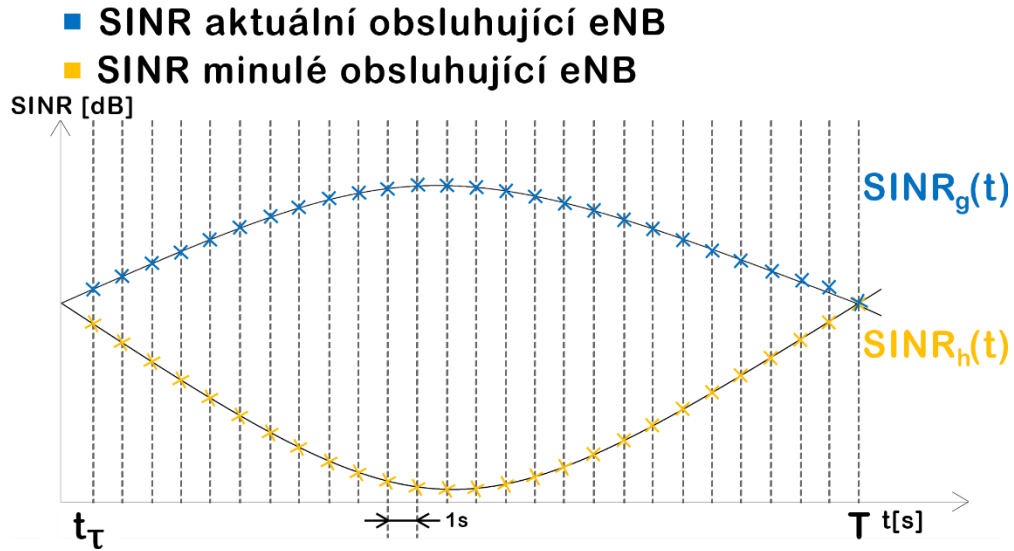
$$eNB_h \in \{eNB_i\} \quad (6)$$

$$\text{počet výskytů } eNB_{gh} = X + 1 \quad (7)$$

Pro získání informace o hodnotách SINR, které byly do okamžiku přepojení k další eNB stanici získány, algoritmus sčítá v každém bodě uživatelské cesty příspěvky SINR jak od aktuální obsluhující stanice ($SINR_h$), tak i hodnoty ($SINR_g$) od minulé obsluhující stanice (viz. obr. 5), jak je také definováno v rovnicích (8) a (9).

$$SINR_g = \sum_{t=t_\tau}^T SINR_g(t) \quad (8)$$

$$SINR_h = \sum_{t=t_\tau}^T SINR_h(t) \quad (9)$$



Obrázek 5 - Sčítání hodnot SINR od obsluhujících eNB stanic.

Sčítání jednotlivých hodnot SINR aktuálně připojené eNB, tak i eNB stanice přepojením opuštěné, je prováděno po celou dobu splnění podmínky hystereze (1) (viz. Kap. 2.1). Tedy až do okamžiku $(T + 1)$, kdy nastává přepojení k další eNB stanici.

Po uskutečnění přepojení k další eNB stanici jsou nasčítané hodnoty SINR aktuální (eNB_h) i minulé obsluhující (eNB_g) stanice odečteny, jak je také definováno v následující rovnici:

$$SINR_{eNB_{gh}}(X) = \sum_{t=t_\tau}^T SINR_g(t) - \sum_{t=t_\tau}^T SINR_h(t) \quad (10)$$

Hlavním důvodem v ukládání rozdílu hodnot SINR ($SINR_{eNB_{gh}}(X)$) od aktuální i minulé obsluhující stanice je schopnost algoritmu učit se predikovat zlepšení, které má následující výskyt stejného přepojení přinést ($SINR_{eNB_{gh}}(X + 1)$).

Algoritmus využívá ke svému učení a následné zvýšení přesnosti predikce metodu průměrování s exponenciálním zapomináním. V této metodě je koeficientem α definována poměrná část, s jakou je predikce algoritmu pro následující výskyt stejného přepojení ovlivněna hodnotou SINR z naposledy uskutečněného přepojení. Doplnkem poměrné části $(1 - \alpha)$ je definováno zastoupení hodnot všech minulých přepojení, jak je uvedeno v následující rovnici:

(11)

$$S_{PT_{eNB_{gh}}}(X) = (1 - \alpha) \cdot \left(\sum_0^{N=X-1} S_{PT_{eNB_{gh}}}(N) \right) + \alpha \cdot \left(SINR_{eNB_{gh}}(X) \right)$$

Velikost koeficientu α se v závislosti na správném rozhodnutí o přepojení mění. Aktuální hodnota SINR $SINR_{eNB_{gh}}(X)$ při úspěšném rozhodnutí o přepojení ovlivňuje predikovanou hodnotu $S_{PT_{eNB_{gh}}}(X)$ menší částí než v případě neúspěšného rozhodnutí o propojení.

Jak již bylo zmíněno, algoritmus nejdříve predikuje a při splnění podmínky hystereze (1) další eNB stanicí porovnává, zda bylo jeho rozhodnutí správné či nikoli (viz. Tab. 3). Algoritmus se rozhoduje o uskutečnění přepojení na základě níže uvedené rovnice:

$$S_{PT_{eNB_{gh}}}(X - 1) > S_H \quad (12)$$

Pokud je podmínka (12) splněna, je přepojení k cílové eNB stanici uskutečněno. V opačném případě se přepojení UE od aktuálně obsluhující eNB stanice neuskuteční. Dané rozhodnutí je prohlášeno za úspěšné, pokud je hodnota SINR odmítnutého přepojení menší než SINR hodnota požadované hranice S_H , jak je také definováno v následující tabulce:

Tabulka 4 - Úspěšnost rozhodnutí v závislosti na minimální požadované hranici SINR S_H .

$S_{PT_{eNB_{gh}}}(X - 1) > S_H$	$SINR_{eNB_{gh}}(X) \geq S_H$	přepojení uskutečněno	úspěšné rozhodnutí
NE	ANO	NE	NE
NE	NE	NE	ANO

Úspěšnost algoritmu správně rozhodnout o přepojení je definována na základě porovnání predikované hodnoty SINR $S_{PT_{eNB_{gh}}}(X - 1)$ se skutečnou hodnotou $SINR_{eNB_{gh}}(X)$, která byla přepojením získána (viz. Tab. 4). Predikovaná hodnota je pro každý další výskyt daného eNB páru pozměněna podle rovnice (11).

Tabulka 5 - Úspěšnost rozhodnutí v závislosti na hodnotě SINR získané přepojením.

$SINR_{eNB_{gh}}(X) \geq S_{PT_{eNB_{gh}}}(X - 1)$	přepojení uskutečněno	úspěšné rozhodnutí
ANO	ANO	ANO
NE	ANO	NE
ANO	NE	NE
NE	NE	ANO

Dříve než algoritmus začne s využitím definovaných hranic S_H (viz. Tab. 5) rozhodovat a vybírat přepojení, která mají být provedena, a naopak potlačovat ta přepojení, která podle poznatků z minulých průchodů nepřinášejí dostatečné zlepšení SINR, je nutné předem definovat další pravidla, kterými bude algoritmus řízen.

Jedno ze zásadních pravidel se zaměřuje na první výskyt každého eNB páru. Během pohybu UE dochází k přepojování mezi nejrůznějšími kombinacemi eNB párů. Předem není možné definovat okamžik prvního výskytu daného páru. Je však možné jednoznačně definovat, aby se při prvním výskytu daného eNB páru přepojení vždy uskutečnilo. Predikovaná hodnota S_{PT} je pro první výskyt každého eNB páru pevně stanovena a měla by nabývat hodnoty větší jak hranice SINR S_H (viz. Tab. 5), která je pro uskutečnění všech přepojení následně požadována.

Pro snadné pochopení dalšího pravidla, které je v algoritmu také zahrnuto, uvažujeme aktuální obsluhující eNB_h stanici a potenciální cílové stanice v pořadí eNB_j a eNB_k , které uživatel v daném pořadí na své cestě mívá. Nastane-li situace, kdy dojde k odmítnutí přepojení k cílové eNB_j stanici a z předešlých výsledků pro eNB pár eNB_{hk} vyplývá, že dané přepojení také nepřinese požadovanou hranici zlepšení SINR S_H , je třeba navzdory těmto předpokladům přepojení uskutečnit. S velkou pravděpodobností by totiž mohla nastat situace, při které by vynechání přepojení v eNB páru eNB_{hk} při současném trvalém připojení k obsluhující eNB_h stanici vedlo k poklesu kvality připojení až k minimální hranici S_{MIN} (viz. Tab. 5). Tím by mohlo dojít k výraznému zhoršení kvality přenosového kanálu a také k omezení poskytovaných služeb, které jsou na vyšších úrovních kvality kanálu závislé. Proto je nutné, dříve než úroveň hodnoty SINR přijímaného z aktuální obsluhující eNB stanice klesne pod hranici S_{MIN} , provést přepojení k jedné z potenciálních cílových eNB stanic s lepší hodnotou SINR.

4 Simulace

Simulaci je možné rozdělit do dvou hlavních částí. V první části je proveden výpočet vzdálenosti pohybujícího se UE od eNB stanic a následný přepočítání této vzdálenosti na přijatý výkon i hodnotu SINR. Druhá část simulace je zaměřena na omezení počtu přepojení s využitím vytvořeného algoritmu. Ten na základě aktuálního $SINR_{eNB_{gh}}(X)$ i minulých zlepšení $\left(\sum_0^{N=X-1} S_{PT_{eNB_{gh}}}(N)\right)$ hodnoty SINR daného eNB páru predikuje kvalitu zlepšení hodnoty SINR $S_{PT_{eNB_{gh}}}(X)$ a rozhoduje o uskutečnění přepojení v následujícím výskytu. V dané části simulace je i výpočet úspěšnosti, s jakou algoritmus správně rozhoduje o přepojení, a tím tak ovlivňuje velikost predikované hodnoty SINR (viz. obr. 6).



Obrázek 6 - Jednotlivé části simulace.

4.1 Pohybový model

Pohybový model použitý v simulaci vychází z modelu Manhattan, který je dále doplněn o body zájmu (POI), jak je popsáno v [15]. Pro nalezení nejkratší cesty pohybu uživatele mezi jednotlivými body zájmu je využito teorie grafů. Model je tvořen soustavou pravoúhlých ulic, širokých 16 metrů, lemovaných dvoumetrovými chodníky po obou stranách.



Obrázek 7 - Simulovaná oblast s rozmístěnými eNB stanicemi.

V ilustračním obrázku (viz. obr. 7) jsou pomocí žluté mřížky vyznačeny cesty, kudy se v simulované oblasti pohybují uživatelé. Červenými body jsou vyznačeny pozice makro eNB stanice, zelenými body jsou vyznačeny pozice femto eNB stanic. Výšky, v jakých jsou jednotlivé femto eNB stanice umístěny, nejsou rozlišeny.

Pro uživatele platí následující předpoklady:

- Uživatel přechází vozovku pouze na křižovatce.
- Pohybuje se kontinuální rychlostí 1 m/s vždy středem chodníku a to bez zastavení, proto není potřebné zaznamenávat relace mezi pohybem a dobou, kdy se uživatel nepohybuje.
- Začátek a konec jeho cesty je tvořen vždy dvěma body zájmu (POI), přičemž na daném území simulačního modelu jsou následující body zájmu:
 - dvě kancelářské budovy
 - dvě restaurace
 - dva obchody a deset obytných bloků.
- Uživatelé volí mezi těmito body zájmu vždy nejkratší možnou cestou.

Uživatele jsou rozděleni do čtyř kategorií. První kategorie je tvořena tzv. „zaměstnanci“, kteří do daného prostoru docházejí do zaměstnání z oblasti mimo simulační prostor. Cílem jejich cesty může být s pravděpodobností 40 % administrativní budova, s pravděpodobností 5 % restaurace nebo obchod. Cesta jednoho vybraného uživatele ze skupiny „zaměstnanci“ je v následujícím obrázku (viz. obr. 8) znázorněna oranžovou barvou.



Obrázek 8 - Pohyb jednoho uživatele ze skupiny "zaměstnanci".

Druhým typem uživatelů jsou tzv. „residenti“. To jsou naopak ti uživatelé, kteří v simulovaném prostoru žijí, ale do zaměstnání docházejí mimo tento prostor. S 50 % pravděpodobností směřují tito residenti rovnou do zaměstnání a zpět domů, přičemž

4.2 Simulační scénář

Pro simulace jsou zvoleny dvě testovací skupiny uživatelů, kdy každá skupina obsahuje pohybové souřadnice vždy třiceti různých uživatelů. Uživatelé byli rozděleni do těchto skupin na základě podobného způsobu pohybu v simulované oblasti. První skupina je složena ze „zaměstnanců“ a „návštěvníků“. Druhá skupiny je složena z „residentů“ a „roamingových residentů“ (viz. Kap. 4.1). Simulace předpokládá velmi optimistický způsob pohybu uživatele konstantní rychlostí 1 m/s (viz. Tab. 5). Měření přijatého výkonu od všech aktuálně dostupných eNB stanic během pohybu uživatele se v časovém intervalu jedné sekundy periodicky opakuje po dobu 40 tisíc sekund (viz. Tab. 5). Každý pohyb uživatele je zapsán pomocí X, Y, Z bodu v trojrozměrné kartézské soustavě souřadnic. Stejným způsobem jsou zapsány i polohy jednotlivých eNB stanic v testovaném území. Celkem bylo pro simulaci použito deset skupin různého rozmístění devadesáti eNB stanic i dvakrát deset různých skupin pohybů uživatelů („dropů“). Výšce, ve které jsou jednotlivé eNB stanice umístěny, odpovídá i jejich vyzařovaný výkon (viz. Tab. 5). Realizovaná simulace odpovídá signálem pokryté městské zástavbě pražských Holešovic (viz. obr. 7) s velkou koncentrací femto eNB stanic (HeNB) a čtyř mikro eNB stanic [15]. Jednotlivé femto eNB stanice jsou umístěny především v budovách, a to ve výšce pohybující se od 3 do 13,5 metrů nad zemí. Vyzařovaný výkon těchto stanic je nastaven na 15 dBm. Čtyři mikro eNB stanice, které jsou umístěny ve výšce 32 metrů nad zemí, vyzařují výkonem 27 dBm.

Za účelem otestování schopnosti predikce snížení počtu přepojení je pro všechny stanice zvolena stejná vysílací frekvence i stejná šířka pásma. Pro testování byla zvolena frekvence 2 GHz a šířka pásma 20 MHz [15]. Z tohoto důvodu je v následném výpočtu SINR zahrnut termální šum o hodnotě -101 dB [16], který je svázán s používanou 20 MHz šířkou pásma.

Z výše uvedených vstupních parametrů první části algoritmu již lze dopočítat hodnoty odstupu signálu od šumu a vzájemné interference tzv. SINR, jak je také definováno v následující rovnici:

$$SINR = \frac{P_{servisní\ eNB}}{\text{šum} + \sum P_{ostatní\ eNB}} \quad (13)$$

Kde pomocí $P_{servisní\ eNB}$ je definován přijatý výkon od obsluhující eNB stanice, $P_{ostatní\ eNB}$ je výkon do jednotlivých eNB stanic, šum charakterizuje termální šum pro 20 MHz pásmo (viz. Tab. 5).

V každém bodu uživatele je s využitím Euklidovské věty vypočtena vzdálenost, kterou musí překonat vyslaný signál mezi aktuálním místem uživatele a implementovanými eNB stanicemi. Dosazením vysílaného výkonu eNB stanice, vypočtené vzdálenosti, používané

vysílací frekvence a zisků obou antén do Friisova vztahu, jak je také definováno v následující rovnici:

$$P_P = P_V + G_V + G_P - \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) [dB] \quad (14)$$

Kde pomocí P_P je definován přijatý výkon UE, P_V definuje vysílaný výkon eNB stanice, G_V je zisk vysílací antény eNB, G_P je zisk přijímací antény UE, d je vzdálenost mezi UE a eNB, λ je vlnová délka.

Pomocí Friisova vztahu je vypočten přijímaný výkon od jednotlivých eNB stanic. Při výpočtu v simulaci jsou uvažovány jak na straně vysílače, tak i na straně přijímače, izotopické zářiče se ziskem 0 dBi.

V druhé části simulace je obsažen popsáný algoritmus (viz. Kap. 3), s jehož pomocí je rozhodováno o uskutečnění nebo vynechání nabízeného přepojení. Aby bylo možné přechody mezi jednotlivými eNB stanicemi vzájemně rozlišit, jsou jednotlivé eNB označeny indexy. Kombinací indexu obsluhující stanice eNB_h a cílové stanice eNB_g je vytvořen pár eNB_{hg} . Dodržováním tohoto rozdělení navíc získáme informace o počtu uskutečněných přepojení pro daný pár $eNB_{hg}(X)$. Při správném návrhu rozmístění a nastavení vysílacích výkonů eNB stanic by měly být všechny páry zatížené přibližně stejným počtem přepojení. Naopak eNB stanice, které tvoří páry s nulovým počtem přepojení, jsou nevhodně umístěny nebo mají nastavenou špatnou úroveň vysílaného výkonu.

V každém kroku jsou z přijímaných výkonů vypočteny hodnoty SINR od všech aktuálně dostupných eNB stanic. V prvním kroku je UE simulací připojen ke stanici, která mu nabídne nejlepší hodnotu odstupů signálu od šumu a interference (SINR). K této hodnotě je připočtena hodnota hystereze ΔH a následně je testována podmínka hystereze (1). Pokud je splněna podmínka hystereze (1), je zvažováno, zda přepojení k dané cílové stanici uskutečnit či nikoliv. Jedná-li se o první nabídku, je přepojení uskutečněno vždy. V ostatních případech je výsledek závislý na predikci algoritmu (viz kap. 3). Po uskutečnění přepojení jsou ukládány aktuální hodnoty SINR od současné i minulé obsluhující stanice. Navíc jsou tyto hodnoty přepočteny na hodnoty CQI (Channel Quality Indicator) koeficientů a počtu bitů na symbol. CQI koeficienty definují kvalitu přenosového kanálu, resp. aktuální hodnotu SINR zařazují do jedné z patnácti úrovní kvality přenosového kanálu. Pro každou z těchto úrovní je definováno použití konkrétního typu modulace, kódového poměru a počtu bitů na symbol (viz Tab. 6).

Při každém dalším následném přepojení jsou hodnoty SINR, počty bitů na symbol a výskyty jednotlivých CQI úrovní zaznamenány a uloženy vždy pro konkrétní eNB pár. Takto získanou

hodnotou $SINR (S_{PT} eNB_{gh}(X))$ následně algoritmus uvažuje při predikci a následném rozhodnutí o přepojení k danému eNB páru.

Na samém konci uživatelské cesty dojde ke zhodnocení zaznamenaných hodnot: celkový objem bitů na symbol (bps), který UE získalo, je vydělen počtem uskutečněných přepojení. Takto získaná hodnota charakterizuje kvalitu jednotlivého přepojení. Následně ze získaných CQI koeficientů je možné získat procento výskytu jednotlivých koeficientů během uživatelské cesty.

Poslední částí je konečné zhodnocení úspěšnosti algoritmu. Za úspěšné je rozhodnutí považováno tehdy, predikoval-li algoritmus přepojení, které bylo následně provedeno a zároveň přineslo požadované zlepšení. Úspěšné je i rozhodnutí neuskutečnit přepojení, které požadované zlepšení nepřineslo (viz. Tab. 3). Naopak za neúspěšné je považováno takové rozhodnutí, kdy by přepojení zlepšení přineslo a nebylo uskutečněno a naopak (viz. Tab. 4).

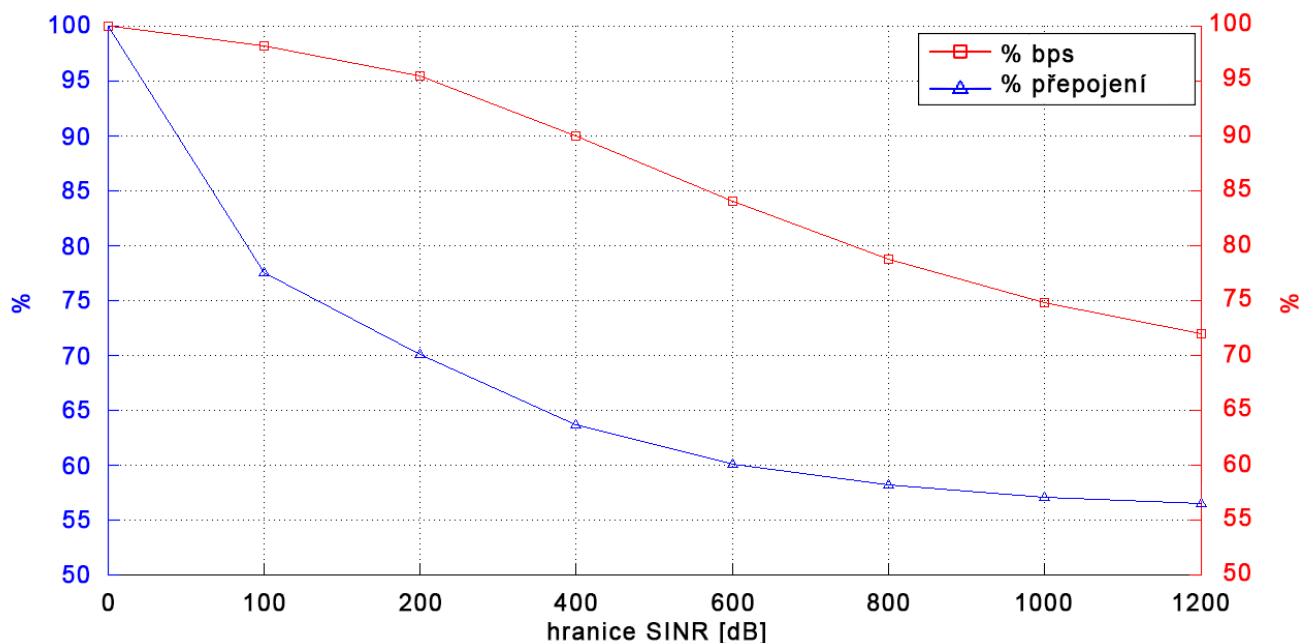
Algoritmus navržený v této práci samozřejmě není jediný možný a nabízí se tedy možnost srovnání výsledků obsažených v této práci s výsledky dosaženými konkurenčními algoritmy. Toto srovnání by však vedlo k neúměrné časové zátěži, v jejímž důsledku by nebylo možné kvalitně odladit předkládaný algoritmus.

Tabulka 6 - Modulační a kódové schéma

CQI index	modulace	Kódová rychlost x 1024 [bit/s]	bit na symbol	hranice SINR [dB]
0	mimo rozsah			
1	QPSK	78	0,1523	-9,478
2	QPSK	120	0,2344	-6,659
3	QPSK	193	0,3770	-4,098
4	QPSK	308	0,6010	-1,798
5	QPSK	449	0,8770	0,399
6	QPSK	602	1,1758	2,424
7	16QAM	378	1,4766	4,489
8	16QAM	490	1,9141	6,367
9	16QAM	616	2,4063	8,456
10	64QAM	466	2,7305	10,266
11	64QAM	567	3,3223	12,218
12	64QAM	666	3,9023	14,122
13	64QAM	772	4,5234	15,849
14	64QAM	873	5,1152	17,786
15	64QAM	948	5,5547	19,809

5 Výsledky

V simulaci s hranicí SINR $S_H = 0$ dB (viz. Tab. 5), která odpovídá stavu bez zásahu predikce, bylo uskutečněno 100 % ze všech nabídnutých přepojení (viz. obr. 10). V tomto případě každé UE dosáhne maximálního počtu bitů na symbol (bps), kterého lze během své cesty získat. Zvýšením požadované hranice SINR na hodnotu 200 dB algoritmus sníží hodnotu uskutečněných přepojení o 30 % a hodnotu bps o 5 %. Opakované navyšování požadované hodnoty SINR o hodnotu 200 dB přináší vzhledem k simulaci s požadovanou hranicí SINR $S_H = 0$ dB další 5 % snižování hodnoty bps. Nejvýraznější pokles v počtu přepojení nastává při navyšování požadované hodnoty SINR od těsné hranice 0 dB až k hranici 400 dB. Po přesáhnutí 600 dB hodnoty SINR dochází téměř k saturaci v počtu uskutečněných přepojení na hodnotou 55 %.



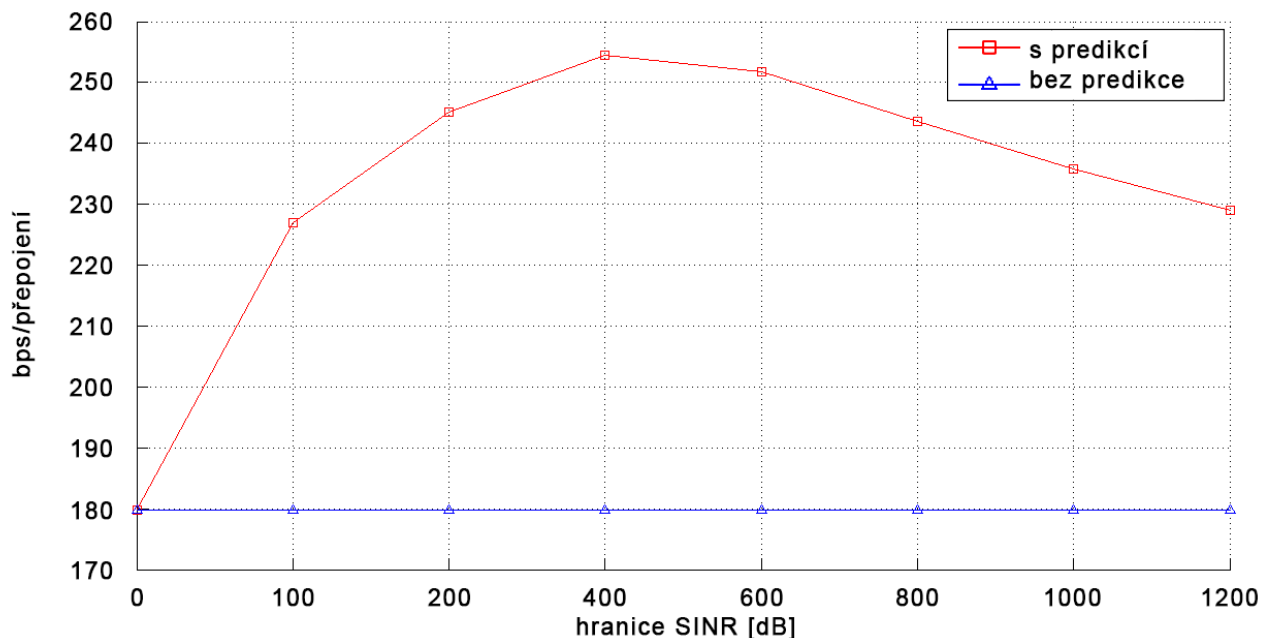
Obrázek 10 - Závislosti uskutečněných přepojení a bps na požadované hranici S_H .

V následujícím grafu (viz. obr. 11) je znázorněn průměrný přínos jednoho uskutečněného přepojení, který je zde definován na základě celkové hodnoty bps získané za dobu uživatelské cesty, vztahené k celkovému počtu uskutečněných přepojení. Daný poměr je vyneseno pro každou požadovanou hranici SINR S_H (viz. Tab. 5)

Hraniční hodnota SINR 400 dB, při které je dosaženo nejlepšího poměru v počtu získaných bps a množství uskutečněných přepojení, je patrna z grafu (viz. obr. 11).

Z průběhu závislosti požadované hranice SINR S_H (viz. Tab. 5) a poměru bps k množství uskutečněných přepojení také vyplývá, že vhodným rozsahem pro hranici požadované

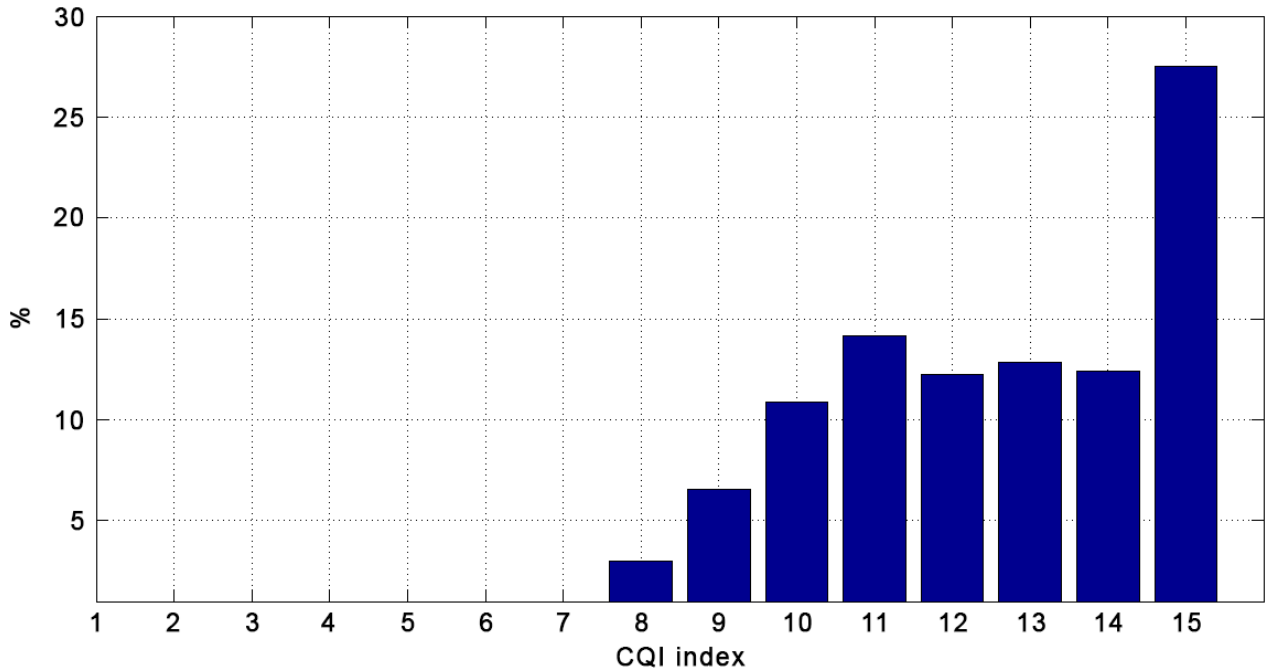
hodnoty SINR je 200 až 600 dB (viz. obr. 11). Další navyšování této hodnoty SINR vede k poklesu získaných bps a k malému nebo žádnému snížení v počtu uskutečněných přepojení (viz. obr.10).



Obrázek 11 - Poměr bps a počtu přepojení v závislosti na požadované hranici S_H .

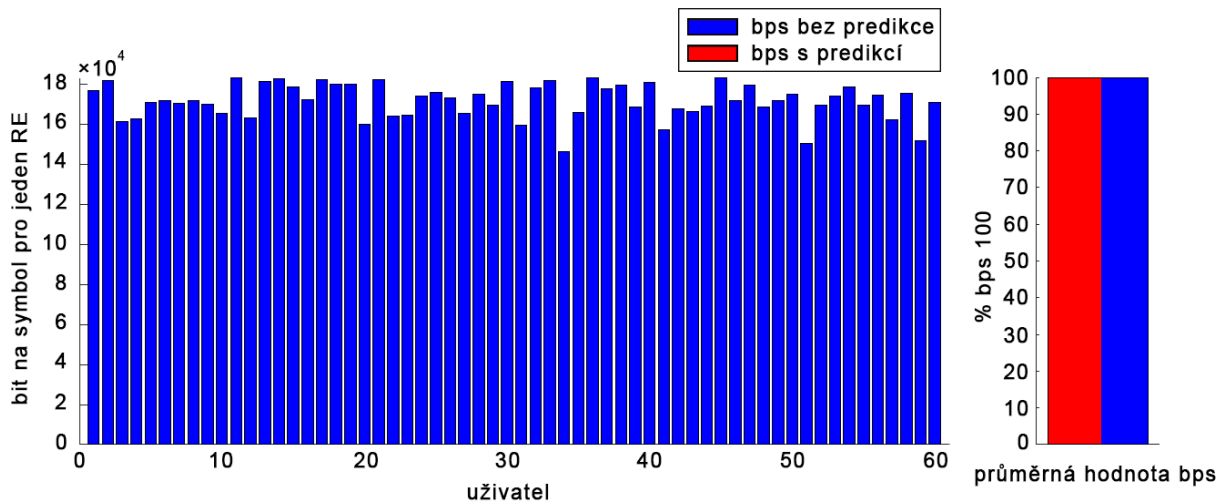
5.1 SINR hranice = 0 dB

První realizace simulace, která byla uskutečněna, odpovídá stavu bez zásahu predikce: všechna nabídnutá přepojení byla realizována. S častým přepojováním v dané simulaci také souvisí kvalita přenosového kanálu, kterou měla všechna testovaná UE po celou dobu své cesty k dispozici. V grafu (viz. obr. 12) jsou znázorněny hodnoty procentuálního zastoupení pro jednotlivé kvality kanálů (CQI), získané zprůměrováním všech šedesáti uživatelů. Častým přepojováním je zajištěno vysoké procentuální zastoupení nejlepší úrovně CQI. Největší úrovně CQI je dosaženo na více jak jedné pětině uživatelských cest. V porovnání s ostatními CQI úrovněmi není nejvyšší CQI úroveň shora omezená. Jakmile získaná hodnota překročí SINR hranici 19,809 dB, je přepočtena a zařazena do 15. úrovně CQI. Všechny ostatní úrovně CQI mají pro přepočet z hodnoty SINR stanovený rozsah přibližně 2 dB (viz. Tab. 5).



Obrázek 12 - Procentuální zastoupení jednotlivých CQI úrovní, SINR 0.

V grafu (viz. obr. 13) je znázorněna hodnota celkového počtu bitů na symbol (bps), kterou jednotlivá UE během své cesty získala. V tomto případě jsou všechna UE připojena vždy k eNB stanici, poskytující nejvyšší kvalitu kanálu, a tudíž je provedeno maximální množství přepojení. Hodnoty odpovídají maximálnímu počtu bps, kterých mohou UE první realizace (drop 1) za celou dobu cesty dosáhnout. Protože dané realizaci s hranicí $S_H = 0 \text{ dB}$ odpovídá stav bez zásahu predikce, jsou výsledky s predikcí i bez predikce totožné. V pravém sloupci (průměrná hodnota bps) je znázorněna průměrná hodnota bps získaná z naměřených hodnot všech šedesáti uživatelů.

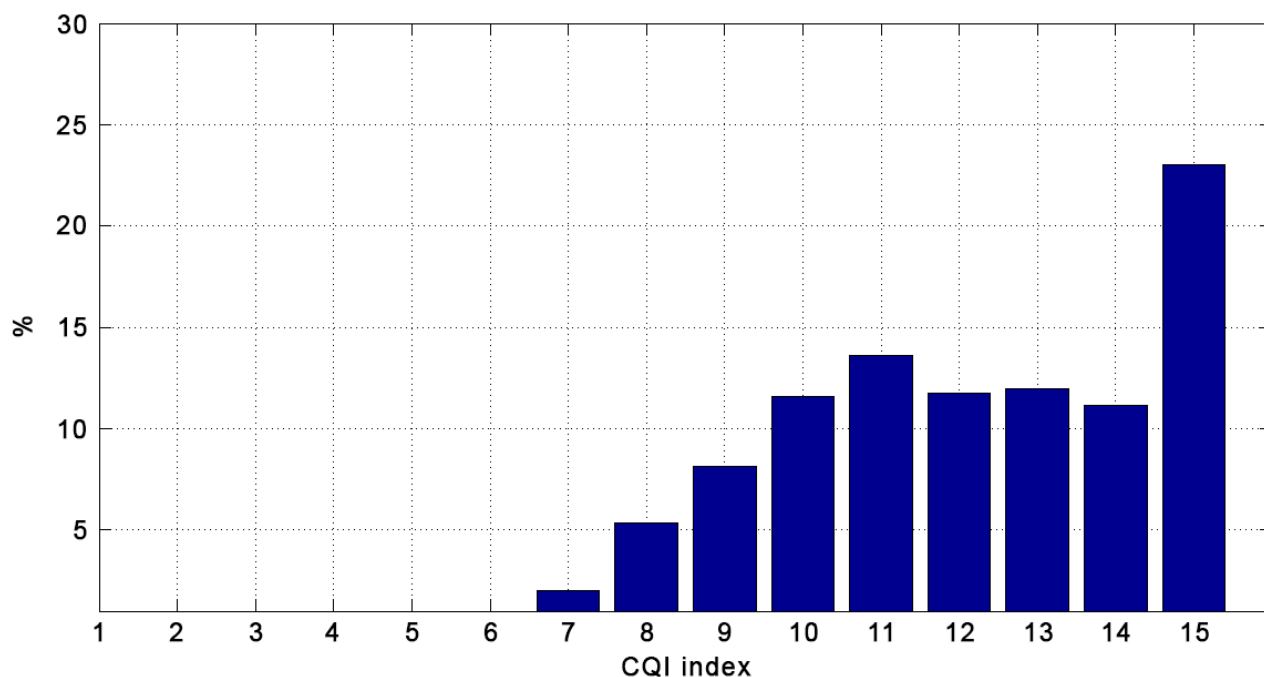


Obrázek 13 - Maximální získané hodnoty bps, SINR 0 dB.

5.2 SINR hranice = 400 dB

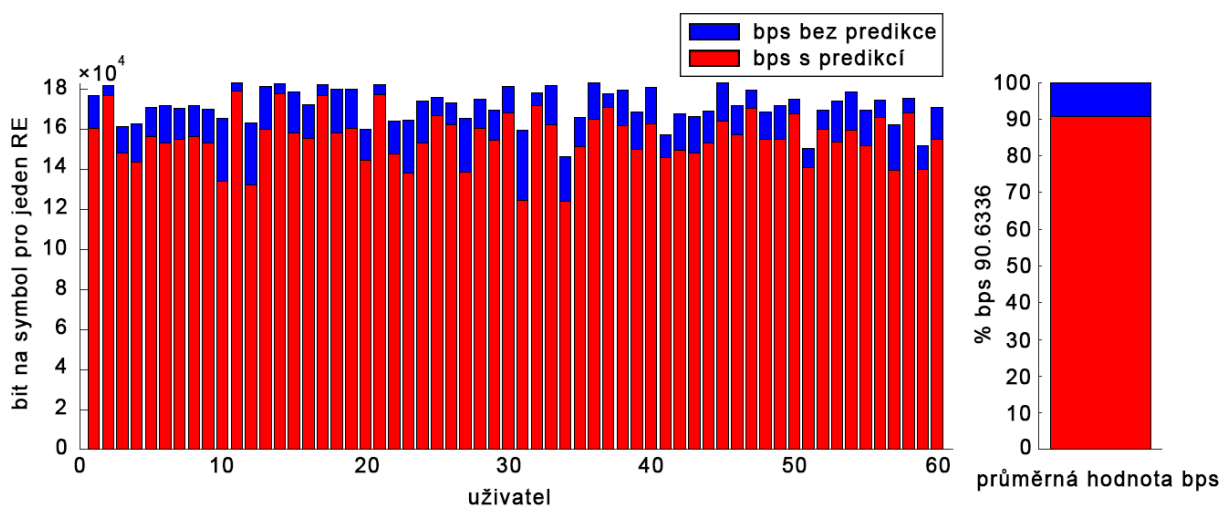
V případě nastavení požadované hranice zlepšení SINR na 400 dB již byla některá nabízená přepojení odmítnuta. Omezení počtu realizovaných přepojení je patrné z grafu procentuálního zastoupení jednotlivých CQI úrovní (viz. obr. 14). Ve srovnání se simulací s hraniční hodnotou SINR $S_H = 0$ dB nastává pokles v procentuálním zastoupení 11. a vyšších CQI úrovní. K tomu dochází odmítnutím predikcí vybraných přepojení k potenciální cílové stanici. Proto v této realizaci zůstává UE připojeno k obsluhující eNB stanici až do vzdálenosti, ve které již dochází k poklesu přijímaného výkonu, tak i ke zhoršení hodnoty SINR. S hodnotou SINR, jak již bylo definováno (viz. Tab. 6), souvisí i kvalita přenosového kanálu CQI.

Nejvýraznější pokles je zaznamenán u 15. CQI úrovně, která se nyní vyskytuje na méně jak jedné pětině všech uživatelských cest.



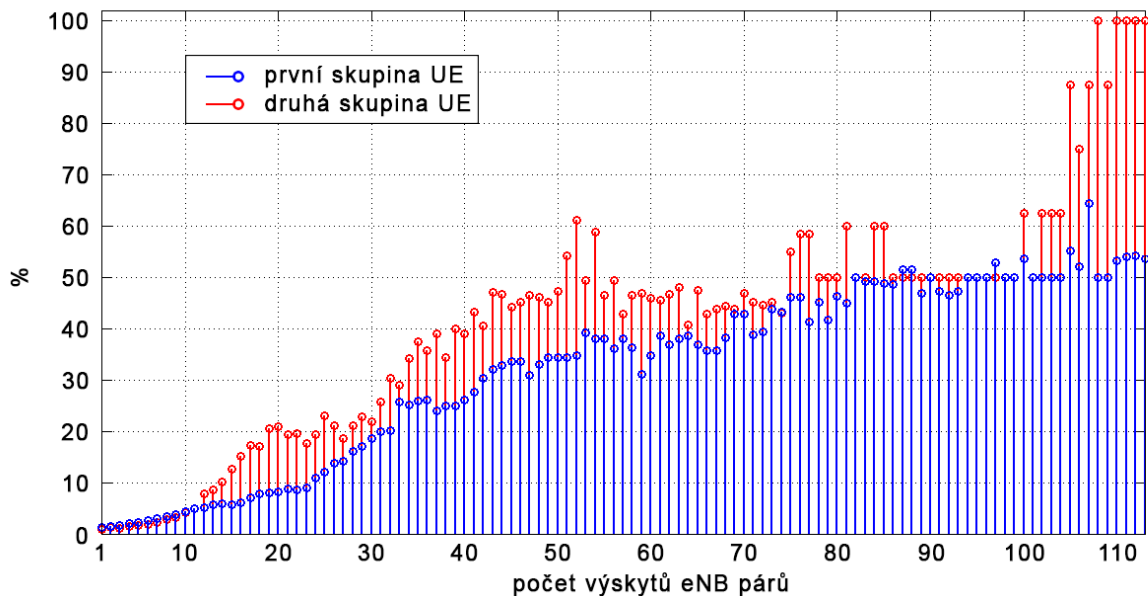
Obrázek 14 - Procentuální zastoupení jednotlivých CQI úrovní, SINR 400 dB.

V porovnání se simulací, která realizovala všechna nabízená přepojení, je vlivem menšího počtu uskutečněných přepojení způsoben přibližně 10 % pokles průměrného objemu bps (viz. obr. 15), kterého UE první realizace (drop 1) za celou dobu své cesty mohla dosáhnout.



Obrázek 15 - Snížení hodnoty bps, SINR 400 dB.

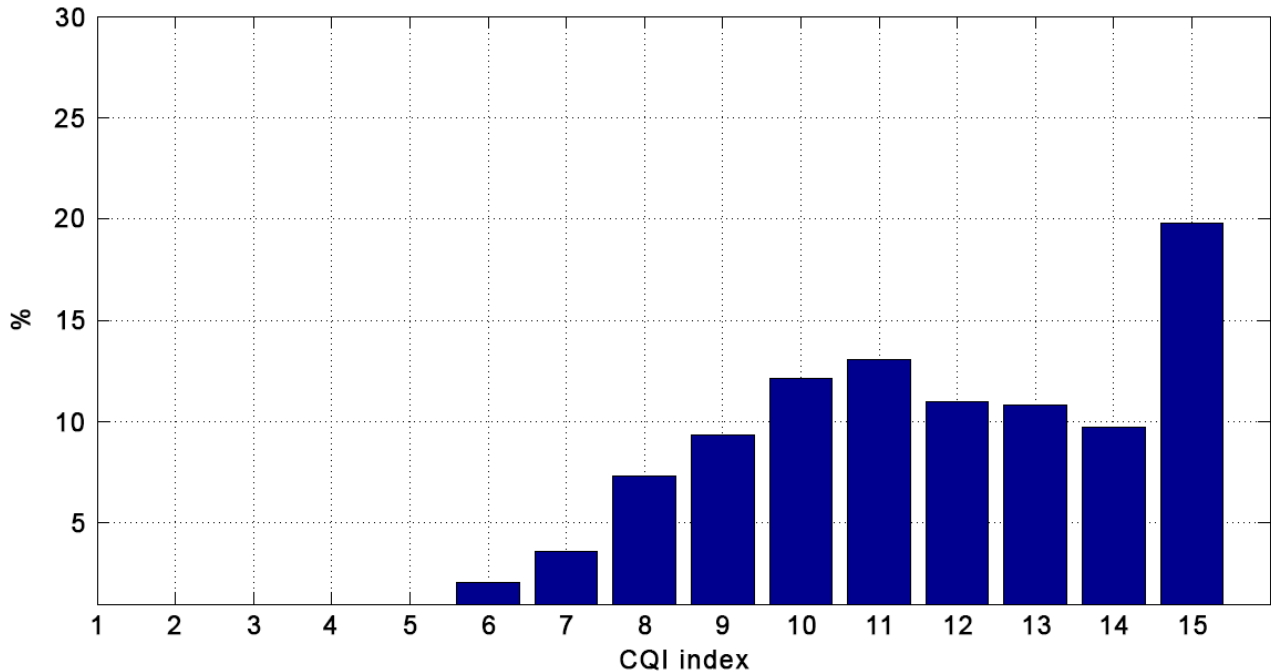
Úspěšnost predikce algoritmu se mezi první a druhou testovanou skupinou uživatelů lišila. První testovací skupina tvořená z již zmiňovaných skupin „zaměstnanců“ a „návštěvníků“ (viz. Kap. 4.1.1), pro kterou je charakteristický především pohyb po hranicích simulované oblasti s náhodným bodem, kde simulovanou oblast opouští (viz. obr. 8). Nebylo dosaženo lepší než 50 % úspěšnosti správného rozhodnutí. Ve druhé testované skupině, tvořené z „residentů“ a „roamingových residentů“, pro kterou je typický pohyb uživatelů ve střední části simulované oblasti s vysokou koncentrací eNB stanic (viz. obr. 9), je úspěšnost predikce výrazně lepší. To je proto, že UE je ke každé stanici připojen přibližně stejnou dobu. Naopak na krajích simulované oblasti se doba připojení k jedné eNB stanici velmi liší, proto je úspěšnost predikce nižší (viz. obr. 16). V situacích s více jak stonásobným výskytem nabídky stejného eNB páru je použitý algoritmus schopen správně rozhodnout o přepojení i se 100 % úspěšností.



Obrázek 16 - Úspěšnost správného rozhodnutí, SINR 400 dB.

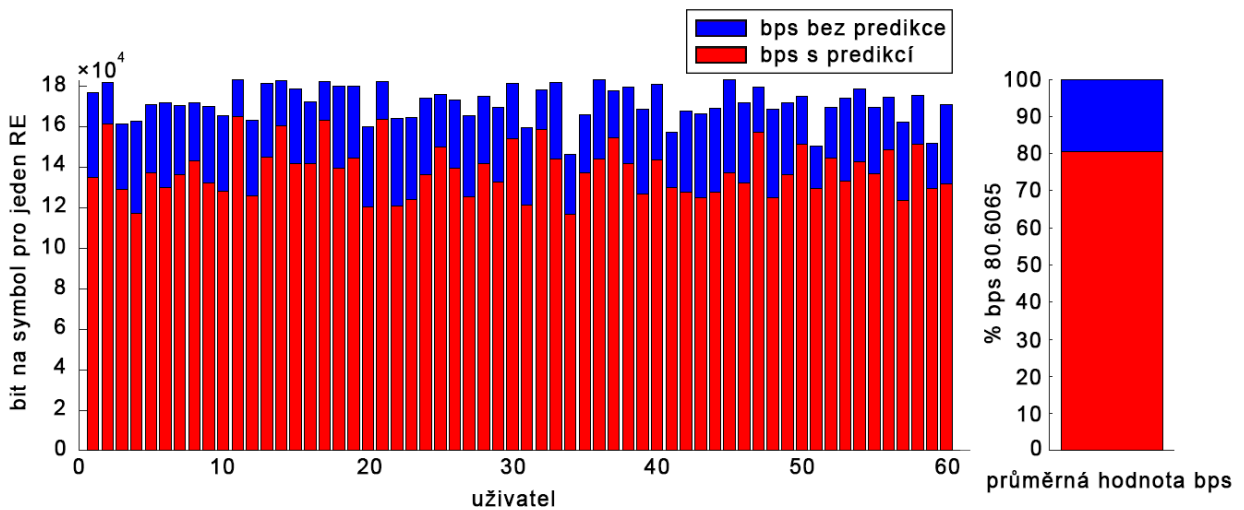
5.3 SINR hranice = 800 dB

Pro požadovanou hranici zlepšení hodnoty SINR 800 dB dochází k dalšímu poklesu v počtu realizovaných přepojení i k poklesu procentuálního zastoupení 11. a vyšších CQI úrovní (viz. obr. 17). Nejvýraznější pokles je opět zaznamenán u 15. CQI úrovně, která se nyní vyskytuje přibližně na jedné čtvrtině všech uživatelských cest. Lze předpokládat, že se snižujícím se počtem realizovaných přepojení souvisí i narůst procentuálního zastoupení CQI úrovní s horší kvalitou komunikačního kanálu. Daný předpoklad je v simulaci potvrzen výskytem 6. CQI úrovně, která se v dříve zobrazených grafech procentuálního zastoupení jednotlivých CQI úrovní nevyskytovala.



Obrázek 17 - Procentuální zastoupení jednotlivých CQI úrovní, SINR 800 dB.

V porovnání s případem, kdy byla realizována všechna přepojení, je vlivem menšího počtu přepojení v dané simulaci způsoben přibližně 25 % pokles v objemu bps (viz. obr. 18), které UE první realizace (drop 1) za celou dobu své cesty mohou dosáhnout.

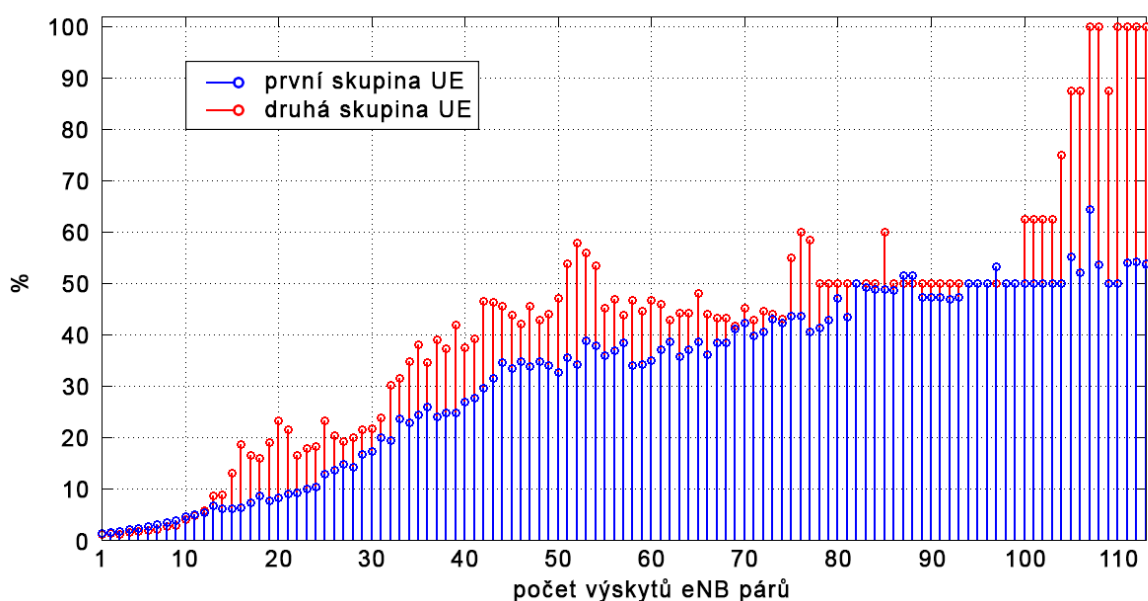


Obrázek 18 - Snížení hodnoty bps, SINR 800 dB.

Podobně jako v předchozím (s požadovanou hodnotou SINR 400 dB) je i pro požadovanou hodnotu SINR 800 dB úspěšnost predikce algoritmu mezi první a druhou testovanou skupinou uživatelů rozdílná. První testovací skupina složená ze skupin „zaměstnanců“ a „návštěvníků“

(viz. Kap. 4.1.1), pro kterou je charakteristický především pohyb po hranicích simulované oblasti s menší hustotou koncentrace eNB stanic a náhodným bodem, kde simulovanou oblast opouští (viz. obr. 8). Nebylo dosaženo lepší než 50 % úspěšnosti správného rozhodnutí.

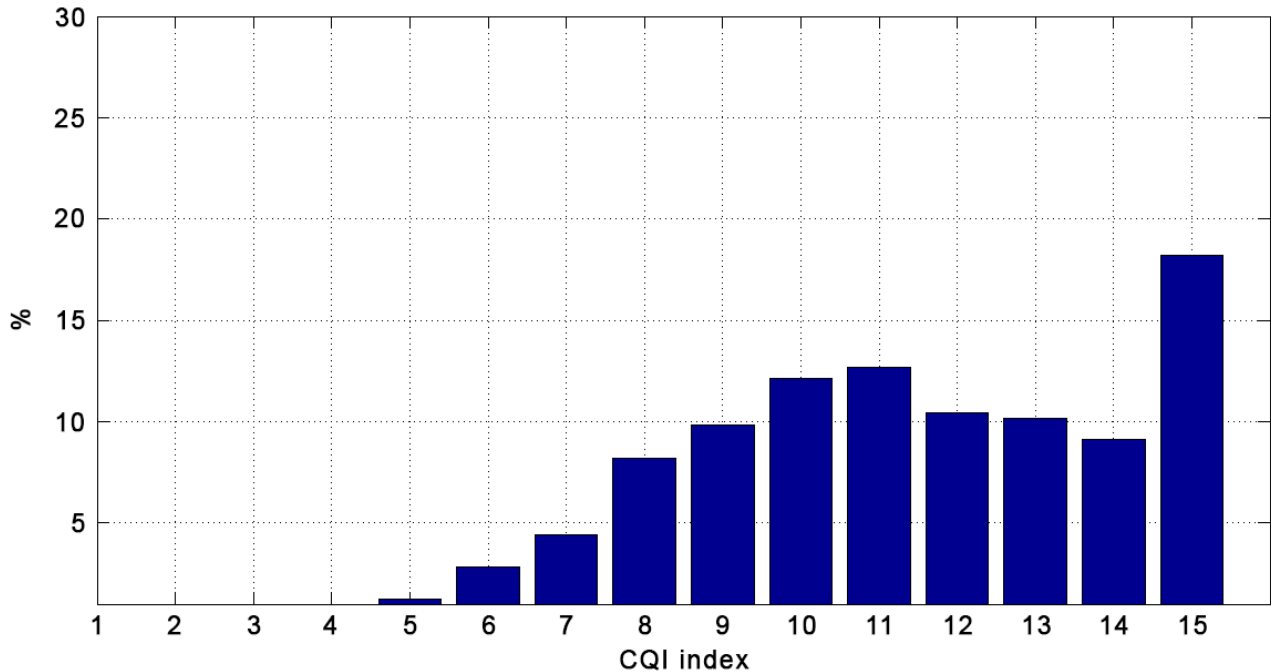
Ve druhé testované skupině, tvořené z „residentů“, pro kterou je typický pohyb uživatelů ve střední části simulované oblasti s vysokou koncentrací eNB stanic (viz. obr. 9), je úspěšnost predikce výrazně lepší (viz. obr. 19). Při pohybu uživatelů z této skupiny dokáže použitý algoritmus správně rozhodnout o přepojení s úspěšností 60 % pro stonásobný výskyt stejného eNB páru a s úspěšností až 100 % pro více jak sto desátým výskytem stejného eNB páru.



Obrázek 19 - Úspěšnost správného rozhodnutí, SINR 800 dB.

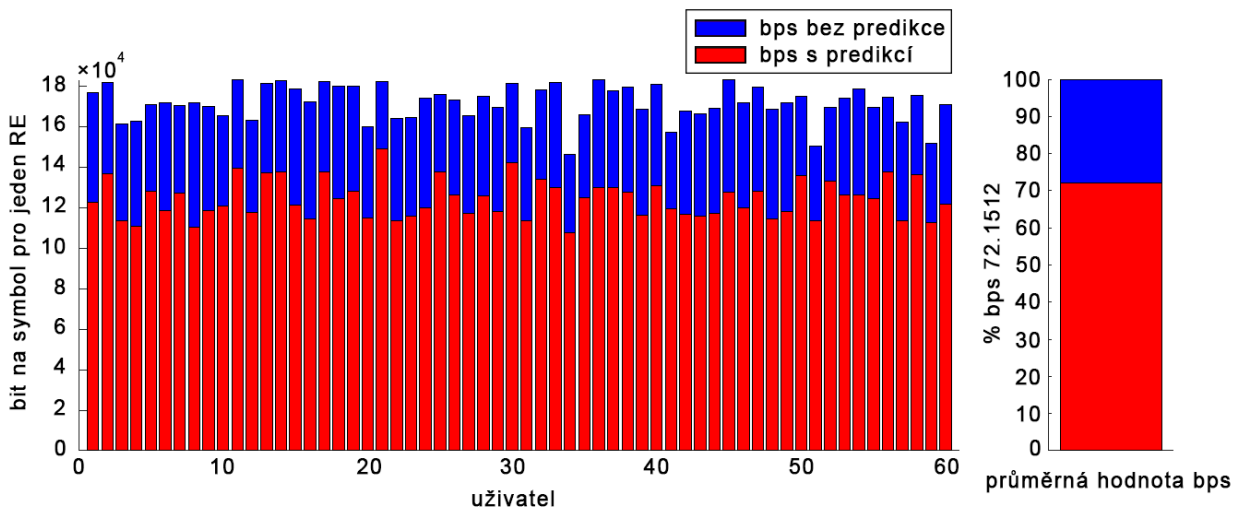
5.4 SINR hranice = 1200 dB

Požadovaná hranice zlepšení 1200 dB je získána jen u malého počtu nabízených přepojení. Proto i počet realizovaných přepojení je u této simulace v porovnání se všemi uskutečněnými simulacemi nejmenší. Malému počtu přepojení odpovídá i velký pokles v kvalitě komunikačního kanálu (CQI). Ve srovnání se simulací, ve které byla uskutečněna všechna nabízená přepojení, nastává výrazný pokles v procentuálním zastoupení 11. a vyšších CQI úrovní. Nejvýraznější pokles opět nastal u 15. CQI úrovně (viz. obr. 20), která je v průměru poskytnuta UE na méně než 20 % jejich uživatelské cesty. Při této simulaci se objevila i 5. úroveň kvality komunikačního kanálu. To je také nejhorší CQI úroveň, která byla ze všech uskutečněných simulací naměřena.



Obrázek 20 - Procentuální zastoupení jednotlivých CQI úrovní, SINR 1200 dB.

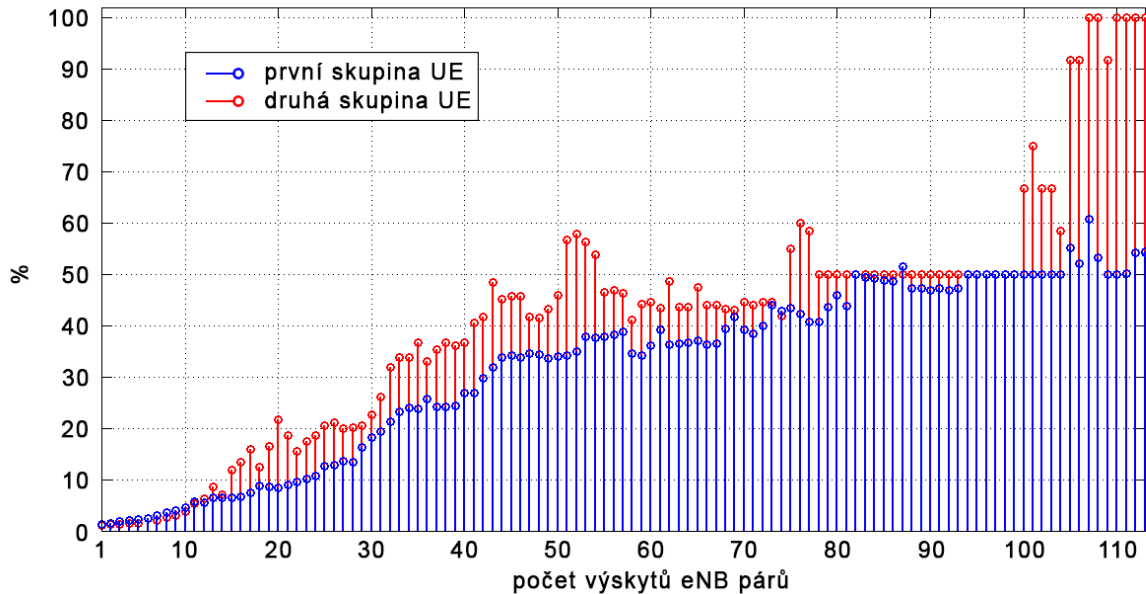
V porovnání se simulací, která realizovala všechna nabízená přepojení, je vlivem menšího počtu přepojení v dané simulaci způsoben přibližně 30 % pokles v objemu bps (viz. obr. 21), které UE první realizace (drop 1) za celou dobu své cesty mohou dosáhnout.



Obrázek 21 - Snížení hodnoty bps, SINR 1200 dB.

Pro dané simulační nastavení a první testovanou skupinu, složenou ze „zaměstnanců“ a „návštěvníků“ (viz. Kap. 4.1.1), pro kterou je charakteristický především pohyb po hranicích simulované oblasti s menší hustotou koncentrace eNB stanic a náhodným bodem,

kde simulovanou oblast opouští, dokáže algoritmus správně rozhodnout o přepojení s úspěšností až 50 %. Ve druhé testované skupině, tvořené z „residentů“, pro kterou je typický pohyb uživatelů ve střední části simulované oblasti s vysokou koncentrací eNB stanic, je úspěšnost predikce opět výrazně lepší (viz. obr. 22). Při pohybu uživatelů z této skupiny dokáže použitý algoritmus správně rozhodnout o přepojení s úspěšností větší než 60 % pro stonásobný výskyt stejného eNB páru a s úspěšností až 100 % u všech eNB párů s více jak sto desátým výskytem.



Obrázek 22 - Úspěšnost správného rozhodnutí, SINR 1200 dB.

6 Možné návrhy zlepšení

6.1 Tracking Area (TA)

Další metodou, kterou je možno použít pro určení polohy UE, a to především ve stavu nečinnosti (tzv. idle mode) bez nutnosti záznamu informací z GPS, je TA (Tracking Area) [18]. Poloha aktivního UE je známá pomocí obsluhující eNB stanice na tzv. „buňkové“ úrovni. Jakmile se UE zařízení přepne do „idle“ módu, není možné pro určení jeho polohy využívat pouze informace o naposledy používané obsluhující eNB stanici, ale je nutné použít metodu TA (Tracking Area). Operátor sjednotí jednotlivé sousední eNB stanice do jedné TA. Pro snadnou identifikaci těchto TA je každé oblasti přiděleno jedinečné číslo TAC (Tracking Area Code).

Při prvním přihlášení UE do sítě je každému zařízení přidělen TAI (Tracking Area Identifier), který se skládá z TAC (Tracking Area Code) a PLMN ID (Public Land Mobile Network).

PLMN je tvořen kombinací mobilního kódu země (MCC) a kódu mobilní sítě (MNC), který je jedinečným pro každého mobilního operátora na světě.

Záznamy o poloze UE v „idle“ módu jsou vysílány vždy při přechodu UE mezi jednotlivými TA oblastmi pomocí TAU (Tracking Area Update). Tyto zprávy jsou vysílány v určitých periodách i v rámci pohybu uživatele v rámci jedné TA, čímž je poskytována bloku MME ústředny (Mobility Management Entity) zpětná informace o schopnosti UE přijímat data.

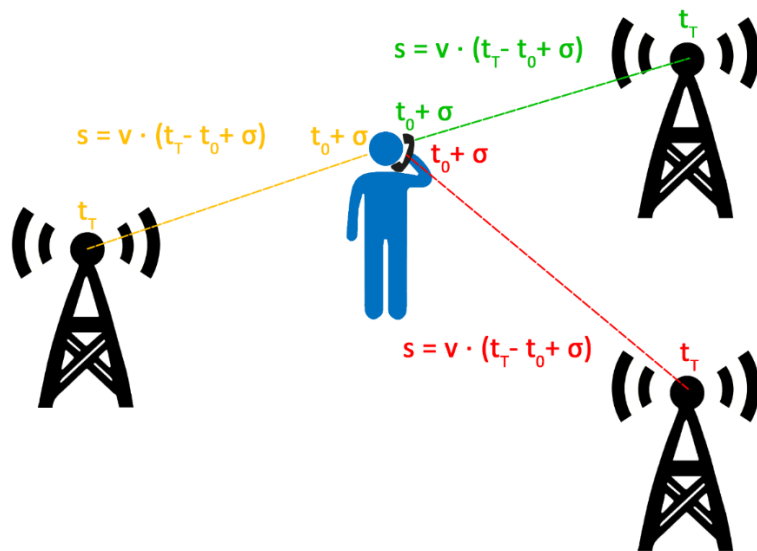
Daná metoda predikce pohybu UE a s ní související přepojování ke vhodným eNB stanicím by byla použitelná v případě, že by operátorem vytvořené jednotlivé TA byly složené z malých skupin blízko sebe umístěných femto eNB stanic. Nevýhodou pro tuto metodu je zcela opačný trend ve velikostech TA a množství eNB stanic obsažených v jednotlivých TA oblastech. Snahou je z důvodu náročnosti přepojení mezi jednotlivými TA snížit počet přepojení.

Ve využití TAI pro identifikaci připojené eNB stanice pomocí celosvětově jednotně definovaných parametrů MCC a MNC spočívá možná výhoda této metody: univerzálnost použití mezi jednotlivými mobilními operátory.

6.2 *Time advance*

Další možností, jak zpřesnit polohu UE, kterou lze dále zohlednit při výběru vhodné cílové eNB stanice, je využití metody založené na výpočtu vzdálenosti mezi pohybujícím se UE a obsluhující eNB stanicí.

Při prvním přihlášení UE a vyslání servisního požadavku k eNB stanici je v odpovědi zahrnuta informace o časovém předstihu, který má dané UE při odesílání následujících požadavků zohlednit. Vychází se přitom z následujících předpokladů: se vzrůstající vzdáleností od eNB stanice je totiž nutné uvažovat i čas potřebný k přenosu a vzniku možného zpoždění [19]. Na základě rozdílu času odeslání požadavku a jeho přijetí a znalosti přenosové rychlosti signálu je možné stanovit vzdálenost od dané eNB stanice. Pokud je tento výpočet uskutečněn z hodnot, získaných od třech eNB stanic, je možné ho považovat za velmi přesné vyjádření polohy UE (viz. obr. 23). Tato hodnota je následně zohledněna při výběru nevhodnější cílové eNB stanice. Nezanedbatelnou nevýhodou této metody je její vysoká hardwarová náročnost při velkém počtu UE.



Obrázek 23 - Time Advance

V obrázku je symbolem s definována vzdálenost mezi UE a základnovou stanicí. Symbol σ reprezentuje časový předstih, v definuje rychlost šíření signálu, symbolem t_0 je definován čas odeslání požadavku a symbolem t_T je definován čas příchodu požadavku.

7 Závěr

Cílem diplomové práce byl návrh algoritmu pro rozhodnutí o přepojení uživatelského zařízení k nabízeným cílovým eNB stanicím na základě predikované hodnoty SINR, kterou mělo nabízené přepojení přinést. Pokud byla predikovaná hodnota SINR větší nebo rovna požadované hranici zlepšení, bylo přepojení uskutečněno. Pro predikci hodnoty SINR, kterou měla následující nabídka daného eNB páru přinést, algoritmus použil metodu průměrování s exponenciálním zapomínáním. Za úspěšné rozhodnutí bylo považováno takové přepojení, které přineslo zlepšení hodnoty SINR větší nebo rovné požadované hodnotě (viz. Tab. 4), rovněž tak rozhodnutí o neuskutečnění přepojení v situaci, kdy dané přepojení nezlepšilo požadovanou hodnotu SINR. Jakákoliv jiná kombinace byla považována za neúspěšnou.

Použitá metoda průměrování s exponenciálním zapomínáním dosahovala výborných výsledků (úspěšnost až 100 %) pro skupinu „uživatelů“ (residentů), kteří se pohybovali ve střední části simulované oblasti s vysokou koncentrací eNB stanic. Naopak pro skupinu „zaměstnanců“, která testovanou oblast pouze navštěvovala a pohybovala se především po jejích hranicích s malou koncentrací eNB stanic, byla úspěšnost algoritmu pouze 50 %.

Pro dosažení lepších výsledků by bylo třeba nahradit popsanou metodu průměrování s exponenciálním zapomínáním jinou, sofistikovanější metodou. Ta by při rozhodování měla zohlednit dobu, kterou uživatelské zařízení stráví po přepojení u eNB stanice, hodnotu SINR,

rychlost pohybu uživatelského zařízení, obsazenost jednotlivých eNB stanic, kvalit poskytovanych služeb nebo pravděpodobnost úspěšnosti přenosu dat.

Hlavním nedostatkem použité metody je nesprávné odhadnutí hodnoty SINR pro situace, kdy je doba připojení k dané eNB stanici v porovnání s ostatními připojeními výrazně kratší. V takovém případě totiž algoritmus mylně předpokládá delší dobu připojení a s ním i související větší hodnotu SINR, kterou má dané připojení přinést.

Tato situace se v simulaci vyskytovala zejména u skupiny „zaměstnanců“, u kterých bylo pozorováno nepredikovatelné chování v simulované oblasti (náhodné a často i opakované místo vstupu a opuštění simulované oblasti).

Algoritmus ve většině případů splnil očekávání, nicméně z výše uvedeného vyplývá prostor pro další zlepšení. To by mohlo v závislosti na dalších okolnostech přinést podstatně větší úspěšnost této metody.

8 Reference

1. *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2015–2020* [online]. 2015, 22 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.pdf>
2. Wireless: the next generation: A new wave of mobile technology is on its way, and will bring drastic change. *The Economist* [online]. 2016 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://www.economist.com/news/business/21693197-new-wave-mobile-technology-its-way-and-will-bring-drastic-change-wireless-next>
3. *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021 White Paper* [online]. 2017, (Document ID:1454457600805266) [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>
4. High-Capacity Indoor Wireless Solutions: Picocell or Femtocell? *FUJITSU NETWORK COMMUNICATIONS INC.: Picocell or Femtocell?* [online]. 2013, 9 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <https://www.fujitsu.com/us/Images/High-Capacity-Indoor-Wireless.pdf>
5. BECVAR PH.D, doc. Ing. Zdenek. *REDUCTION OF HANDOVER INTERRUPTION IN MOBILE NETWORKS* [online]. Prague, 2009 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://www.zdenekbecvar.org/PhD_Thesis_ZdenekBecvar.pdf. DOCTORAL THESIS. ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
6. Z. Becvar, P. Mach and E. C. Strinati, "Prediction of channel quality after handover for mobility management in 5G," *1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity*, Akaslompolo, 2014, pp. 35-39.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.techlib.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7041026&isnumber=7041014>
7. M. M. M. Mohamed, H. A. Elsayed and S. H. EL-Ramly, "Adaptive hysteresis Handover Algorithm in heterogeneous mobile networks," *2015 11th International Computer Engineering Conference (ICENCO)*, Cairo, 2015, pp. 7-12.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.techlib.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7416318&isnumber=7416313>
8. Technologie pro mobilní komunikaci: Problémy šíření rádiového signálu. *Technologie pro mobilní komunikaci: Problémy šíření rádiového signálu* [online]. ČVUT - Praha [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://tomas.richtr.cz/mobil/obecne-sireni.htm>

9. M. Saeed, M. El-Ghoneimy and H. Kamal, "An enhanced fuzzy logic optimization technique based on user mobility for LTE handover," *2017 34th National Radio Science Conference (NRSC)*, Alexandria, Egypt, 2017, pp. 230-237.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7893481&isnumber=7893454>
10. H. W. Ferng and Y. Y. Huang, "Handover scheme with enode-B pre-selection and parameter self-optimization for LTE-A heterogeneous networks," *2016 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC)*, Jeju, 2016, pp. 594-599.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7872954&isnumber=7872927>
11. Z. Ali, N. Baldo, J. Mangues-Bafalluy and L. Giupponi, "Machine learning based handover management for improved QoE in LTE," *NOMS 2016 - 2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, Istanbul, 2016, pp. 794-798.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.techlib.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7502901&isnumber=7502779>
12. H. Hu, J. Zhang, X. Zheng, Y. Yang and P. Wu, "Self-configuration and self-optimization for LTE networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 2, pp. 94-100, February 2010.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5402670&isnumber=5402648>
13. N. Sinclair, D. Harle, I. A. Glover, J. Irvine and R. C. Atkinson, "Parameter Optimization for LTE Handover Using an Advanced SOM Algorithm," *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Dresden, 2013, pp. 1-6.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.techlib.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6692692&isnumber=6691801>
14. N. Samaan and A. Karmouch, "A mobility prediction architecture based on contextual knowledge and spatial conceptual maps," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 4, no. 6, pp. 537-551, Nov.-Dec. 2005.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.techlib.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1516104&isnumber=32476>
15. Z. Becvar, M. Vondra and P. Mach, "Dynamic Optimization of Neighbor Cell List for Femtocells," *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Dresden, 2013, pp. 1-6.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.techlib.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6692526&isnumber=6691801>

16. CAMPBELL, Andrew. Ekahau Site Survey Heatmap Visualizations: Interference / Noise. *Ekahau* [online]. 2015 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <https://www.ekahau.com/blog/2015/03/10/ekahau-site-survey-heatmap-visualizations-part-4-interference-noise/>

17. T. M. Mutlu and B. Canberk, "A spatial estimation-based handover management for challenging femtocell deployments," *2014 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, Odessa, 2014, pp. 144-148.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.techlib.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6849027&isnumber=6848989>

18. MICHELLE, Dr. M. LTE: Tracking Area (TA) and Tracking Area Update (TAU). *NETMANIAS: TECH-BLOG* [online]. Netmanias USA: 5214 36th Ave, 2013, [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.netmanias.com/en/post/blog/5930/lte-tracking-area/lte-tracking-area-ta-and-tracking-area-update-tau>

19. J. D. Roth, M. Tummala, J. C. McEachen, J. W. Scrofani and R. A. DeGabriele, "Maximum likelihood geolocation in LTE cellular networks using the timing advance parameter," *2016 10th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, Gold Coast, QLD, 2016, pp. 1-10.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.techlib.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7843379&isnumber=7843289>

20. GOMAR LLARIO, JUAN. *Estimation of Signal Level Evolution for Handover in Networks with Femtocells* [online]. Prague, 2015 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://riunet.upv.es/handle/10251/52508>. Master Thesis. Universitat Politècnica de Valencia. Vedoucí práce Doc. Ing. Zdeněk Bečvář Ph.D.

21. Zdenek Becvar and Pavel Mach, "Mitigation of Redundant Handovers to Femtocells by Estimation of throughput Gain," *Mobile Information Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 315-330, 2013. doi:10.3233/MIS-130165,
<https://www.hindawi.com/journals/misy/2013/615072/cta/>