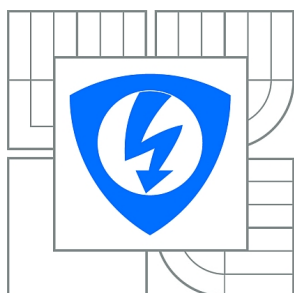


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VÝKONNOSTNÍ ANALÝZA MOBILNÍ SÍTĚ PRO M2M KOMUNIKACE

PERFORMANCE ANALYSIS OF MOBILE NETWORKS FOR M2M COMMUNICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

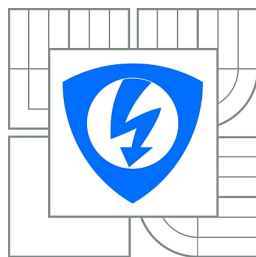
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAREK DŮBRAVA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PAVEL MAŠEK

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Marek Důbrava

ID: 147421

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Výkonnostní analýza mobilní sítě pro M2M komunikace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci bakalářské práce bude nutné se seznámit s problematikou M2M (Machine-To-Machine) přenosů. Bude nutné identifikovat klíčové aspekty M2M komunikace, které mají zásadní vliv na výkonnost mobilní sítě. Praktická část bakalářské práce bude spočívat ve vytvoření modelu sítě čtvrté generace (LTE) v simulačním prostředí OPNET Modeler a provedení simulací zaměřených na zjištění kritických parametrů sítě: přetížení základnové stanice provozem/počtem připojených účastníků, prioritizace provozu, zjištění parametrů zpoždění, propustnosti v závislosti na pohybu koncových uzlů, atd. Na základě zjištěných parametrů sítě bude provedena optimalizace modelu LTE sítě pro řešení problémů, které způsobuje M2M komunikace v současných mobilních sítích.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] M2M communications: a systems approach. 1st ed. Editor David Boswarthick, Omar Elloumi, Olivier Hersent. Chichester: John Wiley, 2012, xxiii, 308 s. ISBN 978-1-119-99475-6.

[2] HERSENT, Olivier, David BOSWARTHICK a Omar ELLOUMI. The internet of things: applications to the smart grid and building automation. Hoboken: John Wiley, 2012, xxv, 344 s. ISBN 1119994357.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 4.6.2014

Vedoucí práce: Ing. Pavel Mašek

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce „Výkonnostní analýza mobilní sítě pro M2M komunikace“ se zabývá teoretickým rozbořem M2M zařízení a mobilních sítí třetí a čtvrté generace. Druhá část bakalářské práce se věnuje simulaci přetížení sítě LTE. Přetížení sítě LTE je dosaženo dvěma způsoby: přetížení objemem přenášených dat nebo přetížení způsobené nově připojenými zařízeními do sítě. Třetí část práce se věnuje návrhu a simulaci vylepšení M2M komunikace v LTE síti. Pro simulace byl využit simulační nástroj OPNET Modeler.

KLÍČOVÁ SLOVA

M2M, mobilní sítě, přetížení LTE, OPNET Modeler

ABSTRACT

This bachelor thesis "The benchmark analysis of mobile network for M2M communication" focuses on theoretical study of M2M devices and third- and fourth-generation mobile networks. The second part of the thesis is devoted to the LTE network overload simulation. The LTE network overload is achieved in two ways: the overload caused by the volume of data transmitted, or the overload caused by devices newly connected to the network. The third part of the thesis deals with the design and simulation improvement of M2M communication in the LTE network. A network simulator OPNET Modeler was used for the simulation.

KEYWORDS

M2M, mobile network, overload LTE, OPNET Modeler

DŮBRAVA, Marek *Výkonnostní analýza mobilní sítě pro M2M komunikace*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 71 s. Vedoucí práce byl Ing. Pavel Mašek

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Výkonnostní analýza mobilní sítě pro M2M komunikace“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlu Maškovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
(podpis autora)

OBSAH

Úvod	12
1 Teoretický rozbor M2M	13
1.1 Úvod do teorie M2M	13
1.1.1 Úvod do M2M	13
1.1.2 Stručný význam IoT	13
1.1.3 Význam M2M	13
1.1.4 Oblast sítě M2M	14
1.1.5 Krátce z historie M2M	15
1.2 Bezpečnost M2M	16
1.2.1 Zabezpečení zařízení	16
1.2.2 Zabezpečení komunikace	17
1.3 Přehlcení M2M	19
2 Rozbor mobilních sítí 3G/4G	20
2.1 Základní informace	20
2.1.1 Úvod	20
2.1.2 Organizace 3GPP/3GPP2	21
2.1.3 Krátce z historie	21
2.1.4 Standardy 3G/4G	23
2.2 Metody přístupu ke sdílenému médiu	24
2.2.1 TDMA	24
2.2.2 FDMA	24
2.2.3 OFDMA	25
2.2.4 Použití více antén (MIMO)	26
2.3 Mobilní sítě 3. generace	28
2.3.1 Architektura UMTS	28
2.3.2 Přehled release UMTS	30
2.4 Mobilní sítě 4. generace	31
2.4.1 Architektura LTE	31
2.4.2 Kompatibilita se staršími sítěmi	33
2.4.3 Bezdrátová modulace OFDM	34
2.4.4 Přehled release LTE	35
2.5 Požadavky na mobilní sítě	35
2.5.1 Typ a množství dat v mobilních sítích	36
2.5.2 Typy zařízení připojené v mobilní síti	37
2.5.3 Využití sítí podle generací	38

2.6	Hlavní nedostatky LTE sítě	40
2.6.1	Přetížení bezdrátového rozhraní základnových stanic	40
2.6.2	Přetížení nově připojenými zařízeními	40
2.6.3	Zajištění služeb	40
2.6.4	Nedostatek přenosového pásma	41
3	Simulace LTE sítě	42
3.1	Představení progeamu OPNET Modeler	42
3.2	Typy provozu využité pro simulaci	44
3.3	Režijní data LTE	46
3.4	Přetížení sítě přenášnými daty	48
3.4.1	Porovnání přístupu k médiu	50
3.4.2	Přetížení sítě s prioritizací služeb	51
3.5	Přetížení nově připojenými zařízeními	53
3.5.1	Scénář	53
3.5.2	Výsledky simulace při přetížení připojenými stanicemi	54
3.5.3	Porovnání přístupu k médiu	56
4	Předcházení nedostatkům LTE sítě	59
4.1	Nedostatek přenosového pásma	59
4.2	Přetížení bezdrátového rozhraní	59
4.2.1	Simulace v čase rozptýlené M2M komunikace	59
4.3	Přetížení nově připojenými zařízeními	61
4.3.1	Simulace navrženého počtu sektorů	62
5	Závěr	64
	Literatura	65
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	67
6	Přílohy	71

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Jednoduché schéma M2M [1]	14
1.2	Rozvětvené schéma M2M [1]	14
1.3	Schéma zabezpečení M2M [1]	18
2.1	Princip TDMA [7]	24
2.2	Princip FDMA [7]	25
2.3	Princip OFDMA [7]	26
2.4	Síťová architektura UMTS [8]	28
2.5	Základní architektura sítě LTE [8]	32
2.6	Přepojování mezi základnovými stanicemi [8]	33
2.7	Zobrazení subnosných frekvencí modulační OFDM [7]	34
2.8	Typy přenášených dat v mobilních sítích [12]	36
2.9	Typy zařízení v mobilních sítích [12]	37
2.10	Počet připojených zařízení podle generace [12]	38
2.11	Počet připojených M2M zařízení podle generace [12]	39
3.1	Ukázka grafického prostředí OPNET Modeler	42
3.2	Paleta zařízení OPNET Modeler	43
3.3	Podrobné nastavení FTP provozu	44
3.4	Podrobné nastavení HTTP provozu	45
3.5	Podrobné nastavení VoIP provozu	45
3.6	Scénář sítě určené pro měření režijních dat	46
3.7	Graf přenesených dat na MAC vrstvě LTE	47
3.8	Scénář sítě určené pro přetížení datovým tokem	48
3.9	Graf propustnosti a zahozených paketů	49
3.10	Graf pokusů o opětovné navázání spojení a zpoždění	49
3.11	Graf porovnání přenosové rychlosti odlišných přístupů k médiu	50
3.12	Graf porovnání zpoždění bezdrátové sítě odlišných přístupů k médiu	51
3.13	Graf odezvy rozdílných služeb v přetížené síti	52
3.14	Scénář určený pro přetížení základnové stanice počtem klientů	54
3.15	Graf propustnosti na aplikační vrstvě	54
3.16	Graf propustnosti na MAC vrstvě	55
3.17	Graf pokusů o opětovné připojení pro scénář s 260 klienty	55
3.18	Graf pokusů o opětovné připojení pro scénář s 360 klienty	56
3.19	Graf pokusů o opětovné připojení pro scénář s 500 klienty	56
3.20	Graf propustnosti na aplikační vrstvě s přístupem TDD	57
3.21	Porovnání propustnosti na aplikační vrstvě u přístupů FDD a TDD	57
3.22	Graf propustnosti na MAC vrstvě s přístupem TDD	58
3.23	Porovnání propustnosti na MAC vrstvě u přístupů FDD a TDD	58

4.1	Porovnání přenášená data	60
4.2	Porovnání ztráty paketů	60
4.3	Porovnání zpoždění	61
4.4	Porovnání propustnosti na aplikační vrstvě	62
4.5	Porovnání propustnosti na MAC vrstvě	63

SEZNAM TABULEK

2.1	Základní generační rozdělení [8]	20
2.2	Bezdrátové standardy [8] [4] [5]	23
3.1	Typy provozů ve scénáři	44
3.2	Zpoždění různých typů provozů	51

ÚVOD

Příležitost uplatnění Machine to machine (M2M) zařízení se stále rozrůstá. Svou prací ulehčují lidem život, proto jsou hojně používány v bezpečnostní technice, měřící technice, zdravotnictví a v dalších odvětvích. Domácnosti požadují pohodlí, které M2M přináší, naopak firmy potřebují stabilitu a přesně vykonanou práci. Obě tyto odvětví využijí výhody M2M, proto je jejich budoucnost perspektivní. Počet klientů v mobilních sítích stále stoupá, ať už se jedná o M2M zařízení, nebo o mobilní počítače klientů. Z tohoto důvodu i poptávka po mobilní datové komunikaci stoupá a poskytovatelé musí najít řešení, které umožní zvýšení propustnosti jejich sítě a zároveň sníží cenu služeb. Síť čtvrté generace (označovaná jako Long Term Evolution (LTE)) nabízí větší propustnost než předchozí generace mobilních sítí, proto je ideálním nástupcem.

První část práce patří teoretickému rozboru M2M. Nejprve je vysvětleno vše potřebné k uvedení do této problematiky, je zde vzpomenua i její historie. Není zapomenuto ani na celkovou bezpečnost přístrojů, nebo na schopnost přehlcení sítí těmito stroji.

Druhá část práce obsahuje teoretický rozbor sítí třetí a čtvrté generace. Jsou zde uvedeny základní informace o těchto sítích, jejich stručné rozdělení. Dále jsou sepsány nejdůležitější protokoly těchto sítí a jsou stručně popsány. Uveden je i stručný pohled do historie.

Třetí část bakalářské práce je zaměřena na vytvoření simulačních modelů s podporou M2M v sítích LTE. Z teoretických informací a provedených simulací jsou vytvořeny modely, které zmírňují dopad M2M komunikace na LTE síť. Je zde popsáno zlepšení výsledků a jsou uvedeny průběhy v grafech.

1 TEORETICKÝ ROZBOR M2M

1.1 Úvod do teorie M2M

1.1.1 Úvod do M2M

V důsledku neustálého technologického vývoje se začaly nasazovat zařízení, které plní svou funkci aniž by musely být kontrolovány lidmi. Zařízení jsou připojeny do sítě, v které komunikují s ostatními protějšky. Díky takovým zařízením začaly vznikat fráze typu Internet of Things (IoT), Internet of Objects (IoO) a Machine to machine (M2M). Tyto zařízení poskytují člověku nové obzory, pohodlí, bezpečnost, umožňují vykonávat některé práce za člověka a taky se nikdy neunaví. V poslední době jsou takovéto zařízení na každém kroku a stále víc jich přibývá. Příkladem může být sledování vozů, monitorování objektů, síťové zařízení umožňující připojení k Internetu, chytrá domácnost a další [1].

1.1.2 Stručný význam IoT

IoT, nebo IoO ukazují přímo na zařízení v internetu. Vznik takového pojmenování má základ v připojování více a více různorodých zařízení k celosvětové síti. Nyní jsou k síti běžně připojeny počítače, telefony, navigace nebo M2M zařízení. Množství propojených zařízení se velmi rychle rozrůstá, začínají se připojovat chytré domácnosti, bezpečnostní systémy vozidel, elektrické, plynové a vodní měřiče. Zanedlouho bude většina spotřebičů připojena k IoT [2].

1.1.3 Význam M2M

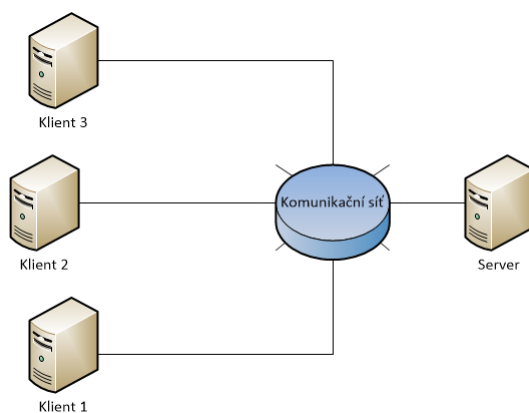
Zkratku M2M je možné vyložit více způsoby, nejčastěji „Machine to machine“, ale také „Machine to Man“ nebo „Machine to mobile“. Někdy i Machine to (Communication Network to) Machine (M2(CN2)M). V práci je použit význam „Machine to machine“, který je nejvhodnější a dají se s ním nahradit i ostatní překlady [1].

Nejjednodušší vysvětlení principu M2M nalezneme ve schématu, které je znázorněno na obrázku 1.1. Jsou na něm uvedeny dvě zařízení komunikující přes médium. Médium je chápáno jako jednoduchý spoj mezi těmito zařízeními, který může být realizován kabelem, optickým vláknem, nebo bezdrátovou kartou. Síť obsahuje aktivní prvky a většinou spojuje více zařízení. Příkladem je Internet, nebo firemní síť postavená na technologii Ethernet. V tomto příkladu je tak možné, aby první zařízení navázalo spojení s druhým zařízením. Po spojení si mohou zařízení předávat data. Příkladem je komunikace teplotního čidla v obývací místnosti s centrální jednotkou vytápění, která podle získané teploty upraví svůj výkon [1].



Obr. 1.1: Jednoduché schéma M2M [1]

Další obrázek 1.2 reprezentuje rozvětvenou topologii M2M. Tato topologie je častá v mnoha případech. Obdobné zařízení provozují tu samou aplikaci a připojují se na společný server. Příkladem je elektronický sběr dat ze solárních elektráren, nebo monitorování dopravy [1].



Obr. 1.2: Rozvětvené schéma M2M [1]

1.1.4 Oblast sítě M2M

Anglicky M2M area networks byla poprvé použita v ETSI TS 102 690. Oblast sítě M2M je popsána jako síť poskytující fyzickou a media access control (MAC) vrstvu mezi různými M2M zařízeními, nebo propojení M2M zařízení do další sítě přes směrovač. Příklady bezdrátové oblasti sítě M2M [1]:

- Wireless Personal Area Network (WPAN) protokolu 802.15.x,
- Wireless local area network (WLAN) protokolu 802.11x,
- ZigBee,
- KNX standardy (EN 50090, ISO/IEC 14543),
- Bluetooth,
- a další ...

Příklady místní kabelové oblasti sítě M2M [1]:

- power-line communication (PLC),
- Ethernet 802.3x,
- meter bus (M-BUS),
- a další ...

Požadavky na návrh oblasti sítě M2M se přímo vztahují na vlastnosti těchto zařízení, které jsou omezeny výpočetním výkonem, pamětí, napájením z baterie nebo nízkou cenou. Protokoly na komunikaci M2M s těmito požadavky, nebo jen některými požadavky, jsou zpracovány v The Internet Engineering Task Force (IETF). IETF IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN) umožňuje komunikaci Internet Protocol version 6 (IPv6) protokolu s využitím standardu The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802.15.4. Maximum transmission unit (MTU) rámců v této komunikaci je omezeno na 127 B. Tato možnost znamená jednoduchou komunikační cestu M2M do Internet Protocol (IP) sítí. Tyto sítě jsou upraveny, aby vyhovovaly omezeným technickým možnostem M2M zařízení, které jsou uvedeny v této kapitole. [1].

1.1.5 Krátce z historie M2M

Začátek M2M komunikace vznikl kolem poloviny dvacátého století. Tehdy zařízení nevypadala tak, jak je známe dnes, ale byly to nejčastěji primitivní čidla s jednosměrnou komunikací a pouze jedinou funkcí. Za úkol měly měřit různé veličiny. Používaly se v National Aeronautics and Space Administration (NASA), leteckém průmyslu a v meteorologii [3].

Významný krok pro M2M bylo zavedení prvního reálného použití mezi lidmi. Komunikace zde je obousměrná. Jako příklad použití je uvedena policejní komunikace pomocí bezdrátových spojů mezi auty a kanceláři [3].

Velkému růstu pomohlo rozšíření Advanced Mobile Phone System (AMPS), přes které mohly M2M zařízení komunikovat a provozovatelé těchto zařízení nemuseli budovat vlastní komunikační síť. Mohlo se tak komunikovat i na větší vzdálenosti. Zde se objevuje první zmínka o obchodním modelu M2M. Rozšíření proběhlo do automobilového a zabezpečovacího průmyslu [3].

V devadesátých letech a prvním desetiletí současného milénia nastal přestup mobilních komunikací z analogového na digitální kódování. Tato událost zase přispěla k rozšíření M2M. Začali se budovat mobilní sítě Global System for Mobile Communications (GSM) a General Packet Radio Service (GPRS). Zmínku si zaslouží i satelitní připojení. Komunikace je umožněna i na blízkou vzdálenost pomocí Wi-Fi, Near Field Communication (NFC), Radio Frequency Identification (RFID) a

Bluetooth [3].

Postupem času tato zařízení rozšiřují své funkce. S hojným připojením těchto zařízení k Internetu začala vznikat zkratka IoT [3].

1.2 Bezpečnost M2M

U většiny výpočetní techniky je bezpečnost na prvních příčkách. U M2M je bezpečnost ještě klíčovější. M2M jsou v tomto ohledu zranitelnější z důvodu jejich neviditelnosti. Útok na soběstačné zařízení může trvat týdny, než se projeví závada. Naopak u zařízení s lidským dohledem je skutečnost útoku méně utajená, protože uživatel může zaznamenat neobvyklou aktivitu a udělat bezpečnostní protipatření. To samé platí i pro fyzický kontakt, kdy útočník může zkoumat M2M zařízení dlouhou dobu s vědomím, že si vlastník pro zařízení nepřijde. Bezpečnost M2M je popsána níže ve dvou částech. První část se zabývá bezpečností zařízení. Druhá část popisuje rizika komunikace. Na konci této kapitoly je obrázek 1.3, který zobrazuje bezpečnou M2M komunikaci přes síť Internet [1].

1.2.1 Zabezpečení zařízení

Na samotné M2M zařízení mohou být provedeny útoky, které mají zajistit jeho kontrolu a dostat útočníka do administrace zařízení. Po úspěšném útoku může útočník plně, nebo z části ovládat toto zařízení, může ho odstavit z provozu, odcizit z něj data nebo odesílat protistraně nepravé informace. Jako opatření proti tomuto útoku postačí vytvoření bezpečného administrátorského jména a hesla [1].

Další útok může přijít za účelem vyřadit zařízení z provozu. Nejčastější způsob provedení může být distributed denial of service (DDoS) útok, který přetěžuje server zasíláním nadměrných počtů požadavků. Tímto útokem dojde k přetížení napadeného serveru, který je schopný odpovědět jen na malou část dotazů. Dotazy tak začnou propadávat maximální čekací době, nebo jsou zahazovány. Obranou proti těmto útokům bývá kvalitní a pokročilý firewall [1].

Dalším důvodem zvýšení bezpečnosti je důležitost zařízení. Každý vlastní počítač, nebo telefon. Když je osobní zařízení zničeno z důvodu útoku je omezena jedna osoba. Ovšem soběstačné zařízení může být i důležitý síťový prvek, nebo server, na kterém mohou být závislé stovky lidí. M2M se používá i ve zdravotnictví, proto je důležité, aby přístroje hlídající nebo zajišťující zdravotní funkce byly spolehlivé [1].

Bezpečnost jen zhorší spolupráce všech zařízení v IoT. Na Internetu, jsou všechny zařízení dostupné z veřejné sítě, ve které se může skrývat kdokoli. Dobrý příklad je hnutí Anonymous, které v posledních několika měsících často napadá zařízení, nebo komunikaci mezi nimi. Velmi často se používá takzvaná Brána firewall, která oddělí

dvě sítě a povolí mezi nimi jen určitý druh komunikace. Výsledkem takového řešení je, že privátní síť není z celosvětové sítě dostupná, ale zařízení v privátní síti je schopno komunikovat se zařízeními ze sítě internet [1].

1.2.2 Zabezpečení komunikace

Bezpečností samotného zařízení vše nekončí. Důležitá data mohou být napadena i v komunikační síti během přesouvání dat na cílové zařízení. Zde je důležitý faktor, zda komunikace probíhá po síti Internet, nebo po vlastním privátním komunikačním médiu. Pokud je toto vedení odpojeno od Internetu, tak odpadá velké množství příležitostí k odposlouchávání přenášených dat. Komunikace je napadnutelná jen z místní sítě, tedy útočník potřebuje fyzický přístup k médiu. Tato bezpečnostní výhoda je vykoupena omezením možnosti komunikace se světem. Často jsou ze strany poskytovatelů služeb nabízeny řešení M2M. V těchto řešeních se může jednat o vytvoření virtuální, nebo fyzické sítě pouze pro dané M2M potřeby a poskytovatel těchto služeb se zavazuje za bezpečí dat při přenášení přes jeho síť [1].

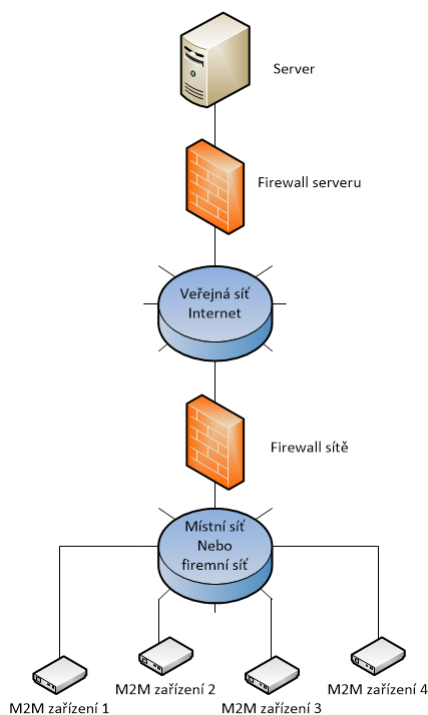
Napadení může být cíleno na získání dat z komunikace, kdy při přeposílání mezi zařízeními jsou data odposlechnuta a následně jsou z nich vyčteny informace. Pokud komunikace probíhá přes síť Internet, je v dnešní době téměř povinností šifrovat komunikaci. Nejpoužívanější standard pro šifrování komunikace je statická šifra Advanced Encryption Standard (AES), která je používána například v zabezpečení Wi-Fi sítí Wi-Fi Protected Access (WPA)-AES/WPA2-AES. Starší šifra Data Encryption Standard (DES) je postupně vytlačována předchozí šifrou (AES), dále International Data Encryption Algorithm (IDEA) a spousta dalších. Útočník může být schopen ze zachycených dat informace získat, ale trvalo by to velmi dlouho. Proto se bere jako fakt, že útočník nemůže informace získat. Nevýhodou je pomalejší doba navázání spojení a větší požadavky na výpočetní výkon na komunikujících zařízeních [1].

Internet je nechvalně proslulý svou anonymitou, dalším slabým místem může být identita. Zařízení se spojují mezi sebou a vyměňují si informace, ale je těžké zaručit s kým právě komunikují. Útočník se může představit jako jiné zařízení a tím na server odeslat své data. Základním identifikátorem v síti internet je logická adresa IP, která se však může s přemístěním zařízení měnit, nebo může být snadno duplikována. Proto se k ověření zařízení používají různé klíče a další identifikátory. Používá se symetrický a asymetrický typ klíče. Symetrický má výhodu velmi rychlého šifrování, ale nevýhodou je distribuce takového klíče. Ta je realizována manuálním přidáním klíče na obě komunikační strany, nebo nastavením z předchozí asymetrické komunikace. Asymetrická kryptografie používá dvojici klíčů veřejný a soukromý. Nevýhodou je velmi pomalé šifrování oproti symetrické kryptografii. Výhodou je eliminace výměny klíčů. Příklad: při navazování zabezpečené komunikace

se nejčastěji používá asymetrická šifra (Šifrovací protokol s veřejným klíčem (RSA), ElGamal a další), následně pro přenos dat je použita symetrická šifra (AES, DES, IDEA) [1].

Vše potřebné pro autentizaci zařízení a navázání zabezpečené komunikace je zahrnuto v kryptografickém protokolu Transport Layer Security (TLS) a starším Secure Sockets Layer (SSL). Nejčastěji se používá v osobních počítačích, ale pro některé M2M zařízení je tento protokol velmi náročný na výpočetní výkon [1].

Příklad nejlépe zabezpečené M2M je na obrázku 1.3. Popisuje firemní síť využívající Bránu firewall, do které není možné proniknout z veřejné sítě internet. Bránu firewall je opatřen i server. Brána serveru filtruje přicházející data a propouští požadavky pouze z naší lokální sítě na obrázku. Pro úplnou bezpečnost je nutné zabezpečené spojení procházející sítí Internet. Pokud zabezpečené spojení neumožňují M2M zařízení 1 až 4 je nutné vytvořit mezi Brány firewall virtuální zabezpečené spojení [1].



Obr. 1.3: Schéma zabezpečení M2M [1]

1.3 Přehlcení M2M

M2M zařízení obvykle nejsou na zpoždění v síti náchylné. Většinou pracují se statickými daty, které nepotřebují být zpracovány v reálném čase. Ale komunikace těchto zařízení velmi snadno způsobí přetížení sítě a to hned z několika důvodů [1]:

- Synchronizace – mnoho zařízení je naprogramováno na pravidelné odesílání dat. Člověk, který toto zařízení programuje, pro pohodlnost zvolí odesílání v celou hodinu. To způsobí, že všechny takto naprogramované zařízení začnou odesílat data ve stejnou chvíli na přelomu hodiny. Sít je tak jednorázově přetěžována. Při komunikaci Human to Human (H2H) je navazování spojení většinou náhodné a nikdy není tak přesné.
- Nepředvídatelnost – poskytovatel služeb, především mobilních služeb, není předem obeznámen s umístěním zařízení. Proto při nepředvídatelném shluku zařízení na jednom místě může dojít k přetížení sítě. Příkladem je velký festival, který do malého města přitáhne stovky lidí s mobilními zařízeními.
- Nárazové – některé zařízení nemusí dlouhodobě spotřebovávat data, ovšem při nevšední události můžou vygenerovat spoustu dat. Příkladem je bezpečnostní systém, který po spuštění alarmu začne odesílat videa z kamer.

2 ROZBOR MOBILNÍCH SÍTÍ 3G/4G

Mobilní sítě jsou tvořeny mnoha standardy, podle kterých komunikuje mnoho zařízení. Tento celek začíná od mobilních zařízení, pokračuje k přístupovým bodům a končí v jádru sítě. Více o struktuře těchto sítí je uvedeno v této kapitole.

2.1 Základní informace

2.1.1 Úvod

Mobilní sítě se skládají z mnoha standardů. Pro jednoduchost jsou rozděleny do takzvaných „generací“, které rozdělují sítě do základních kategorií. Základní rozdíly mezi generacemi jsou uvedeny v tabulce 2.1. V současnosti se pohybujeme na přelomu 3. a 4. generace, ale na neobydlených, nebo řídké obydlených místech se stále setkáváme s druhou generací [8].

Tab. 2.1: Základní generační rozdělení [8]

Generace	Standardy	Přenos	Maximální teoretická rychlost
1G	NMT, TACS	analogový	žádná možnost přenosu digitálního signálu
2G	GSM, CDMA2000	digitální	307kb/s
3G	UMTS, HSPA+, LTE	digitální	172,8Mb/s
4G	LTE Advanced	digitální	3Gb/s

V posledních letech, s příchodem sítí třetí generace, nastal trend mobilního Internetu. V důsledku zlevnění této služby je spousta chytrých telefonů, tabletů, přenosných počítačů, nebo M2M zařízení připojeno k síti Internet přes mobilního operátora. Tímto velmi rapidně narostla spotřeba objemu přenášených dat. Počet připojených uživatelů se neustále zvyšuje a nároky aplikací jsou stále větší (například video streaming, stahování aplikací a další). Proto mobilní operátoři musí najít způsob jak zvýšit kapacitu a zároveň snížit náklady na provoz sítě. V některých oblastech je mobilní připojení srovnatelné s pevnými přípojkami, ovšem cena za přenesené data je daleko větší [8].

V současnosti jsou všechny města České republiky pokryta 3G sítí s maximální teoretickou rychlostí kolem 42Mb/s. Některá města začínají být pokryta Long Term Evolution (LTE) s maximální teoretickou rychlostí až 100Mb/s [6].

2.1.2 Organizace 3GPP/3GPP2

The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) spojuje šest telekomunikačních organizací pracujících na vývoji širokopásmových mobilních sítí. Tato organizace byla vytvořena v roce 1998 a jejím cílem je vytvořit globální síť třetí generace. Ovšem jejich vývoj se nezastavil a nyní již pracují na sítích čtvrté generace. Svou hotovou práci vydávají v číslovaných „Release“. Release můžeme přeložit jako vydání. Jsou vydávány postupně a obsahují veškerou dokumentaci potřebnou k sestavení zařízení. Podle vydání jsou výrobci schopni vytvořit zařízení, které jsou navzájem kompatibilní [4].

The 3rd Generation Partnership Project 2 (3GPP2) je partnerská společnost 3GPP, která se podílí převážně na vývoji protokolů postavených na Code division multiple access (CDMA) [5].

2.1.3 Krátce z historie

První pokusy o rádiovou komunikaci provedl Guglielmo Marconi v roce 1890. První mobilní telefon, zabudovaný v automobilu, vydal americký úřad Federal Communications Commission (FCC) v roce 1946. V roce 1947 vydala společnost AT&T koncept opakovaného použití mobilních frekvencí, který se stal základem všech dalších komunikačních systémů [8]. V letech 1950 až 1960 se poskytovala telefonní služba jen pro velmi omezený počet uživatelů. V této době byli komunikující jednotky zabudovávány do automobilů z důvodu velkých rozměrů a vysoké hmotnosti [7].

1G

Velký nárůst uživatelů začal kolem roku 1980, kdy služby začaly být mezinárodní a provozovali je první operátoři. Nejznámější z nich jsou Nordic Mobile Telephone (NMT), AMPS, Total Access Communication System (TACS). Operátor NMT začal první se službou roaming. Tyto sítě, označeny 1G, byly analogového původu s téměř žádnou možností přenášení digitálního signálu [8].

2G

Mobilní sítě druhé generace byly plně digitální. V Evropě začal projekt 2G v polovině roku 1980. O projekt se staral European Telecommunications Standards Institute (ETSI). Sítě byly založeny na technologii Time division multiple access (TDMA), později, roku 1993, na technologii CDMA. Tyto sítě jsou úzkopásmové tj. nejsou schopny přenášet vysoký tok dat. Díky digitální síti se umožnilo nabízet i jiné služby než přenos hlasu. Vyvinuly se tak Short message service (SMS) zprávy a započala

myšlenka nabízet přístup k přepínané síti pomocí mobilních služeb, příkladem takovéto služby může být e-mail. Tato technologie může přenášet maximálně 9,6kb/s [8].

Vyšší rychlosti se dosáhlo zavedením GPRS do GSM. Tyto sítě se někdy nazývají 2,5G [8].

3G, 4G, současnost

Příchod vyšší přenosové rychlosti podpořil mobilní aplikace, kterých se na této síti provozuje nespočet. Mobilní standardy 3G a 4G nyní spravuje organizace 3GPP, ale první zmínky o 3G standardu sahají k počátku devadesátých let, kdy ještě 3GPP neexistovala [8].

2.1.4 Standardy 3G/4G

Aby byla zaručena kompatibilita zařízení v mobilních sítích je potřeba aby výrobci zařízení používali stejné komunikační standardy. Standard definuje všechny pravidla komunikace jako jsou informace o syntaxi, synchronizace a další. Vytvoření takového standardu je složitý proces, který vyžaduje spoustu finančních prostředků a nemalou dobu vývoje a testování. Proto se na tvorbě standardů podílejí většinou nad-národní organizace a sdružení, jako jsou 3GPP, IEEE a další. V tabulce 2.2 je zobrazena většina standardů sítí 3. a 4. generace [8].

Tab. 2.2: Bezdrátové standardy [8] [4] [5]

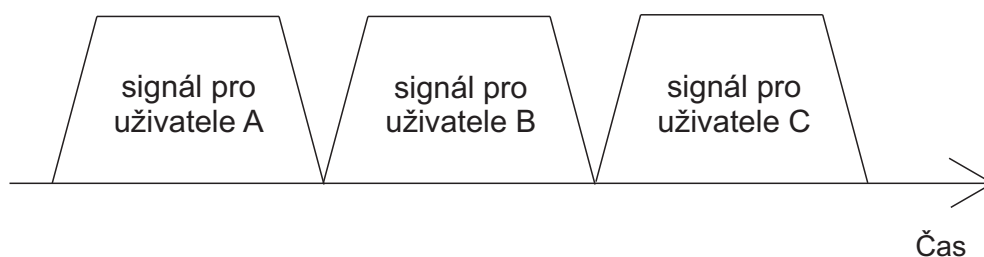
Generace	Standard	Orga-nizace	Maximální rychlost	Šířka pásma	spektrální efektivita
2G	GSM	GSM	14,4 kb/s	200 kHz	0,072 bit/s/Hz
2,5G	GPRS	GSM	171 kb/s	200 kHz	0,855 bit/s/Hz
2,75G	EDGE	GSM	474 kb/s	200 kHz	2,37 bit/s/Hz
2.75G	CDMA2000	3GPP2	307 kb/s	1,25 Mhz	0,25 bit/s/Hz
3G	1xEV-DO Rev.A	3GPP2	3,1 Mb/s	1,25 MHz	2,48 bit/s/Hz
3G	UMTS	3GPP	2 Mb/s	5 MHz	0,4 bit/s/Hz
3,5G	HSDPA	3GPP	14 Mb/s	5 MHz	2,8 bit/s/Hz
3,5G	HSPA+ 2x2 MIMO	3GPP	42 Mb/s	5 MHz	8,4 bit/s/Hz
3,9G	LTE	3GPP	100 Mb/s	20 MHz	5 bit/s/Hz
3,9G	LTE 2x2 MIMO	3GPP	172,8 Mb/s	20 MHz	8,6 bit/s/Hz
4G	LTE Advanced 8x8 MIMO	3GPP	3 Gb/s	100 MHz	30 bit/s/Hz

2.2 Metody přístupu ke sdílenému médiu

Přístupový bod mobilního operátora musí obsloužit několik klientů. Tato komunikace, která je typu Point to Multipoint (PTMP) přináší určité komplikace, například přístup ke společnému médiu, nebo dělení propustnosti mezi klienty. Existuje řada přístupů ke sdílenému médiu, které definují pravidla chování těchto zařízení tak, aby nedošlo k současnému vysílání do jednoho média a tím vytvoření kolize v komunikaci. Níže jsou uvedeny základní metody přístupu. Na těchto metodách se dále staví pokročilejší systémy přístupu jako je CDMA [7].

2.2.1 TDMA

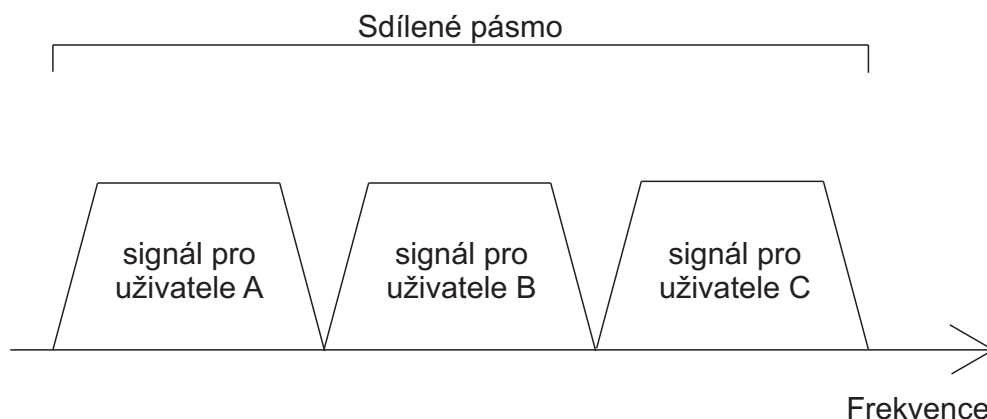
Time division multiple access (TDMA) umožňuje sdílení média na základě časových slotů. Využívá jen jeden frekvenční kanál. Přístupový bod určuje, s kterým zařízením v daném čase komunikuje, ostatní zařízení nesmí vysílat. Výhodou je jednoduchost a nízká cena řešení, nevýhodou je větší odezva, která roste úměrně s počtem připojených zařízení. Tato metoda je použita v komunikačních protokolech GSM. Obrázek 2.1 zobrazuje TDMA [7].



Obr. 2.1: Princip TDMA [7]

2.2.2 FDMA

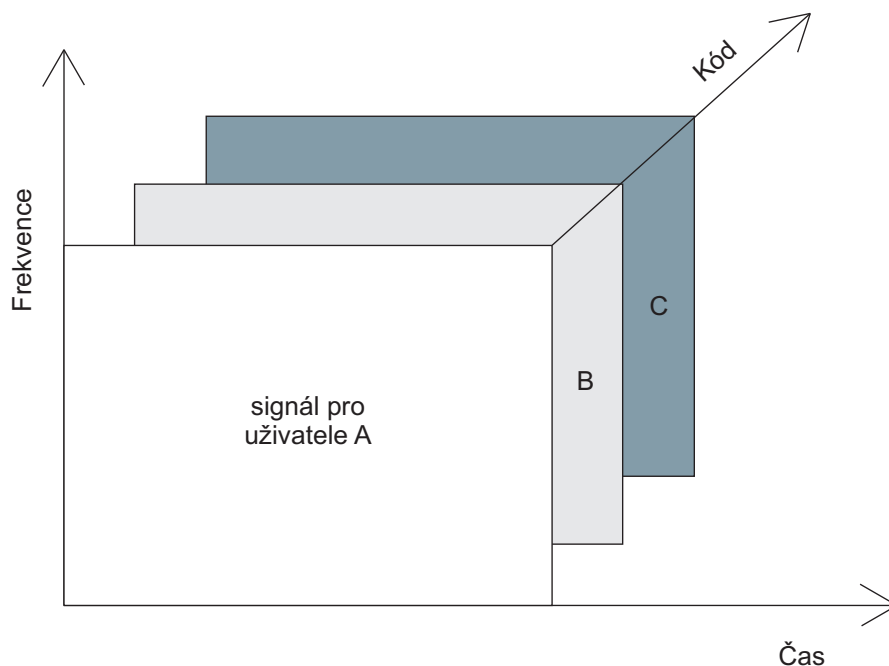
Frequency-division multiple access (FDMA) pro komunikaci PTMP využívá rozdělení přiděleného frekvenčního pásma mezi klienty. Tak vznikne pro každého klienta komunikační kanál k přístupovému bodu. Nevýhodou jsou vysoké náklady, složitost zařízení a špatné využití pásma. Výhodou je velmi nízká odezva. Princip je zobrazen na obrázku 2.2 [7].



Obr. 2.2: Princip FDMA [7]

2.2.3 OFDMA

Modulační metoda Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) využívá pro přenos mezi zařízeními stovky až tisíce subnosných frekvencí, na rozdíl od většiny ostatních, které využívají jen jednu nosnou frekvenci. Při komunikaci PTMP se tato modulace využívá pro rozdělení kanálu pro více uživatelů, nazývá se Orthogonal frequency division multiple access (OFDMA). Podobně jako FDMA je se v jeden okamžik vysílá k více zařízením. Přístupový bod z modulace OFDM vyčlení část nosných frekvencí pro jednotlivé zařízení. Princip je demonstrován na obrázku 2.3. Výhody jsou velmi nízká latence, jednodušší zařízení oproti FDMA, ale zároveň složitější než TDMA. Velká výhoda je jednoduchost rozdělení šířky pásma podle potřeby. Používá se v komunikačních protokolech CDMA, LTE, IEEE 802.16 (WiMax) [7].



Obr. 2.3: Princip OFDMA [7]

2.2.4 Použití více antén (MIMO)

Používání více antén (Multiple Input Multiple Output (MIMO)) je technika, která má za cíl dosažení lepších parametrů. Například zvětšení buněk, vyšší přenosové rychlosti a zvýšení maximálního počtu klientů na buňku. Více antén lze použít na vysílací straně i na přijímací straně [8].

Důležitou vlastností každého více anténního systému je vzájemná vzdálenost antén. Může být použita větší vzdálenost, při které se antény nebudou navzájem ovlivňovat, nebo se budou ovlivňovat minimálně. V méně případech se antény umísťují blízko od sebe a jejich vzájemné ovlivňování je vysoké. Souvztažnost antén je mnohdy upravována konstrukcí antén například směrem vyzařovaného paprsku. Doposud je uvažováno jen o anténách v jedné polarizaci, ale velmi často se vzájemné rušení antén omezuje typem polarizace. Dvě antény blízko sebe s pootočenou polarizací o 90° mají mezi sebou teoreticky nekonečný útlum. Reálný útlum není nekonečný a souvisí s konstrukčním provedení antén [8].

Výhody více anténního systému

Uspořádáním antén na vysílači a/nebo na přijímači dosáhneme různými způsoby různých výsledků. Nejpoužívanější z nich jsou [7]:

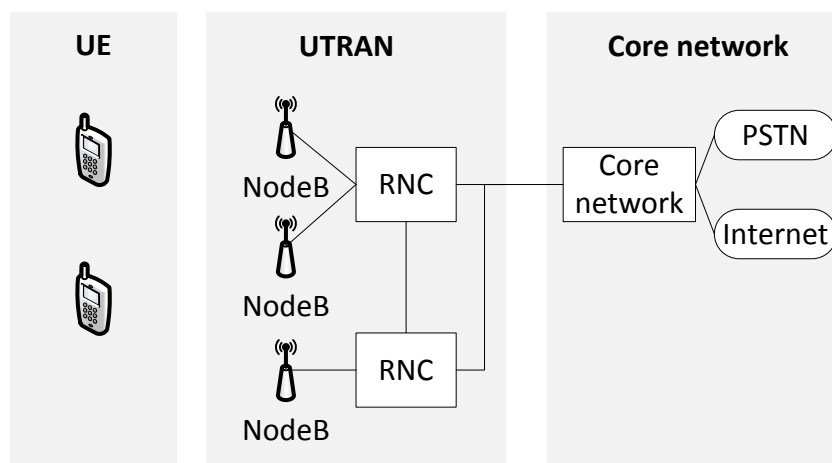
- Více antén může být použito k zamezení slábnutí signálu na daném kanále. Pro tuto metodu je potřeba minimalizovat rušení antén, například velkou vzdáleností, nebo odlišnou polarizací.
- Další možností je zlepšení parametrů přijímaného signálu, za pomoci posouzení odrazů, který je přijat více anténami. Z těchto zachycených dat se vybírá hlavní nosná frekvence a odstraňují (nebo upravují a přičítají k užitečnému signálu) se opožděné odrazy signálu. Tímto lze zrekonstruovat přesnější signál, než za pomoci jedné antény.
- Více antén na vysílací a přijímací straně umožní vytvoření více komunikačních kanálů. Toto způsobí velký nárůst přenosové rychlosti. Tento jev je velmi často používán pod názvem Multiple-input multiple-output (MIMO) s označením $X \times X$ kde X značí počet antén. Tedy pro dvě antény na každé straně je použito označení MIMO 2×2 .

2.3 Mobilní sítě 3. generace

Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) je systém třetí generace, navazující na předchozí GSM standard [8].

2.3.1 Architektura UMTS

Na obrázku 2.4 je zobrazeno blokové schéma síťové architektury UMTS systému. Dělí se na User Equipment (UE), UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN) a Core network. UTRAN popisuje radiový přístup k síti, spadá do něj základnová stanice zvaná NodeB a Radio Network Controller (RNC). Základnová stanice (NodeB) a RNC jsou popsány níže v této sekci [8]. Do UE spatají klientské stanice, které se autorizují pomocí Subscriber identity module (SIM) a připojují se k NodeB.



Obr. 2.4: Síťová architektura UMTS [8]

Základnová stanice

Na obrázku 2.4 je zobrazena bezdrátová část mobilní sítě, která je označena jako UTRAN. Její nejdůležitější částí je základnová stanice, v anglických standardech je uvedena názvem „NodeB“, která bezdrátově komunikuje s mobilními zařízeními. Ve městech základnová stanice pokrývá oblast v okruhu od půl až do jednoho kilometru, v některých případech i menší. Pro zvýšení propustnosti se obvykle používá

rozdělení pokryté oblasti na tři sektory. Každý sektor má vlastní anténu a bezdrátovou jednotku. Pokud uživatel telefonuje, nebo přenáší data a pohybuje se kolem základnové stanice, může být postupně obsluhován sektory aniž by ztratil spojení. Tuto funkci poskytuje možnost libovolného předávání spojení mezi sektory [8].

Základnová stanice je do sítě operátora připojena kabelovým vedením nazývaným „E1“ s propustností 2Mb/s, nebo bezdrátovým spojem, přes který vede virtuální tunel obsahující spoj E1. Tato možnost je častější z důvodů jednoduchosti a absence poplatků za položený kabel [8].

Radio Network Controller

Druhá část základnové stanice je Radio Network Controller (RNC), jejímž cílem je [8]:

- Vytvořit rádiové spojení a uvést odkaz na klienta.
- Nastavení služeb klientovi jako jsou maximální šířka pásma (v závislosti na současné volné šířce), typ přenášených dat (data/hlas), Quality of service (QoS) neboli prioritizace služeb a další podrobnosti.
- Spravování mobility, která má za úkol přepínání spojení mezi jednotlivými sektory, nebo přepínání spojení mezi jinými základnovými stanicemi.
- Prevence proti přetížení v síti, nebo na bezdrátovém rozhraní. Když je požádáno o navázání nového spojení a nejsou již dostupné síťové zdroje, RNC zablokuje tento požadavek aby nedošlo k přetížení nějaké z částí základnové stanice a k rozpojení současných spojení. RNC může omezit datový provoz, aby bylo možné navázat více hlasových spojení.

2.3.2 Přehled release UMTS

Zde jsou uvedeny vydání (release) obsahující 3G. U každého vydání je stručný popis hlavních změn [4].

- **Release 99** - Vydána v roce 1999, maximální rychlost na buňku je 2Mb/s. Obsahuje přepínané okruhy pro hlas (64kb/s) a pro přepínané paketové připojení (384kb/s). Obsahuje službu lokace.
- **Release 4** - Přidání Time Division Synchronous Code Division Multiple Access (TD-SCDMA) a IP Multimedia Subsystem (IMS).
- **Release 5** - Zavedené podpory IPv6 a normalizován přenosový standart High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA).
- **Release 6** - Doplnění High-Speed Uplink Packet Access (HSUPA) a podpory broadcast a unicast multimédií.
- **Release 7** - Nasazení vyšší modulace Quadrature amplitude modulation (64QAM) a přidání podpory MIMO, přenosová rychlost tak vzrostla na teoretických 42Mb/s.
- **Release 8** - Lepší využití pásma pomocí Dual-cell HSDPA a Dula-cell HSUPA. První LTE.

2.4 Mobilní sítě 4. generace

Long Term Evolution (LTE) sítě jsou současnou novinkou v mobilních komunikacích. Nabízí efektivní využití pásma, velkou přenosovou rychlost a možnost nasazení v nízkých kmitočtech a tím dobré pokrytí členitých a rozlehlých oblastí. Méně podstatnými novinkami mohou být menší spotřeba přijímače oproti HSPA, nebo možnost plynulého přechodu na LTE-Advanced. Díky těmto nejmodernějším technikám je LTE nejvhodnějším kandidátem na použití v mobilních komunikacích [7].

2.4.1 Architektura LTE

Obrázek 2.5 zobrazuje základní síťovou architekturu sítě LTE. Hlavním rozdílem mezi architekturou Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) a LTE je vysazení centrální jednotky Radio Network Controller (RNC). Její činnost vykonává základnová stanice a hlavní brána. Pro odlišení od základnové stanice v UMTS se základnová stanice LTE označuje anglicky „Enhanced NodeB“ ve zkratce jen eNodeB. Z důvodů odebrání RNC základnová stanice obstarává bezdrátové rozhraní a řídí QoS [8].

Základnová stanice

Základnová stanice LTE jsou zodpovědné za přepojování klientů mezi sebou. eNodeB mohou mezi sebou komunikovat pomocí rozhraní „X2“. Rozhraní je použito pro předání informací o přepojení klienta, nebo předání dat určených pro přepojeného klienta. Díky této komunikaci je možné minimalizovat časovou prodlevu, nebo ztráty dat při přepojování mezi stanicemi [8].

Rozhraní propojující základnovou stanici a hlavní bránu se nazývá „S1“. Komunikace na rozhraní S1 probíhá výhradně s využitím IP protokolu, což je velký rozdíl oproti E1 v UMTS. Základnové stanice mohou být připojeny pomocí technologie Ethernet 100Mb/s, 1000Mb/s nebo pomocí optického vlákna [8].

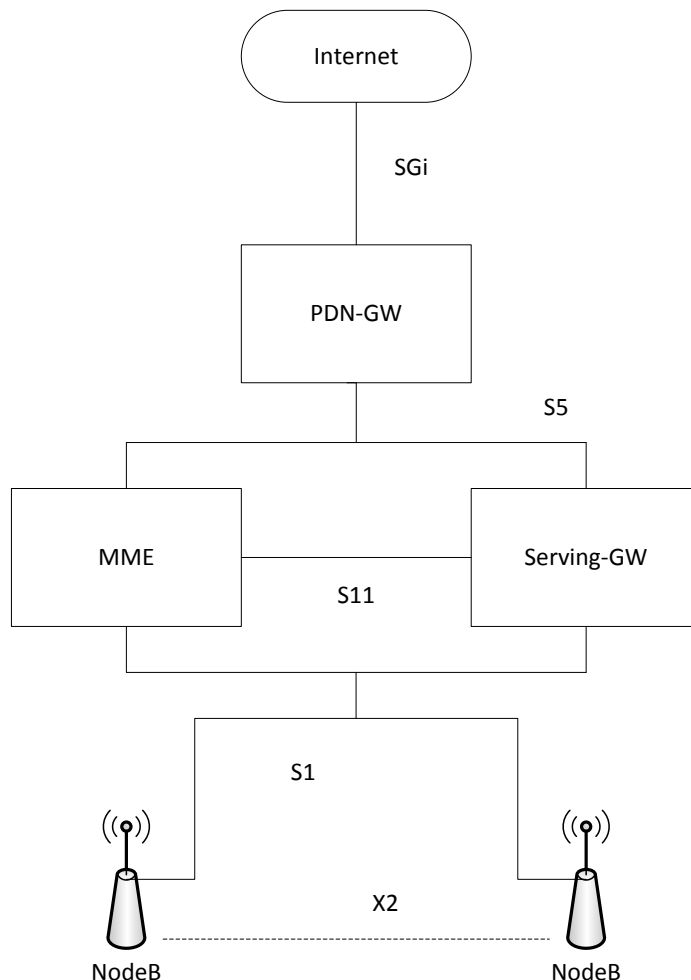
Jádro sítě LTE

Jádro sítě LTE, které je zobrazeno na obrázku 2.5, se skládá z Serving Gateway (Serving-GW) a Mobility Management Entity (MME). I když je dělíme, jsou často provozovány na jednom fyzickém zařízení. Komunikují mezi sebou po rozhraní S11. V UMTS podobné funkce plnila jednotka Serving GPRS support node (SGSN) [8].

MME plní následující funkce [8]:

- Stará se o sezení uživatele, autentizaci a jeho mobilitu. Dále zajišťuje přepojování klientů mezi jednotlivými eNodeB i mezi staršími technologiemi GSM, UMTS.

- Sledování pozice pro mobilní zařízení v nečinném stavu.
- Výběr výchozí brány pro připojení k internetu pro mobilní zařízení.



Obr. 2.5: Základní architektura sítě LTE [8]

Serving-GW obstarává přenos IP paketů mezi mobilním zařízením a veřejnou sítí Internet. Stejně jako v systému UMTS je mezi bránou a mobilním zařízením vytvořen IP tunel pro snadnou změnu směrování při přepojení mobilního zařízení na jinou stanici. Tunel GPRS Tunneling Protocol (GTP) je stejný jako u UMTS. Jediným rozdílem je, že se navazuje mezi bránou a eNodeB, zatím co u v předchozí verzi se navazoval mezi bránou na RNC [8].

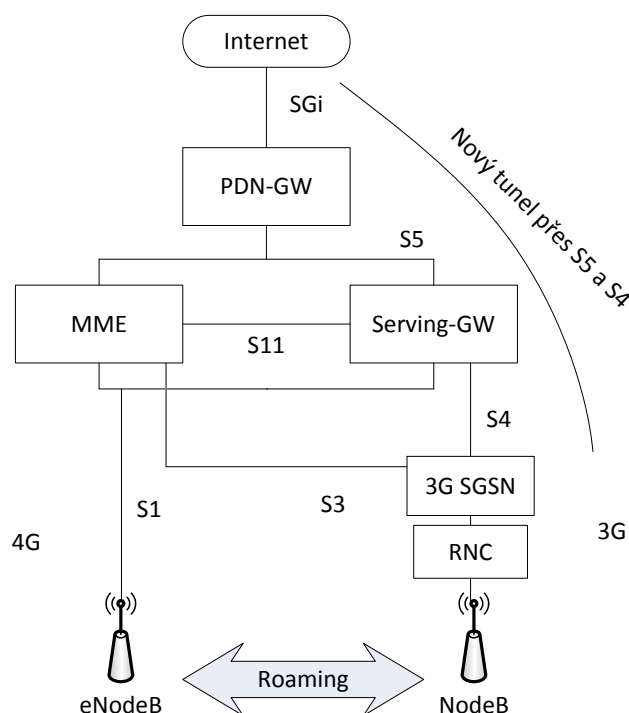
Rozhraním S1 je propojena základnová stanice eNodeB a jádro sítě obsahující MME a Serving-GW. Rozhraní S1 je použito na přenos dat mezi Evolved Node B (eNodeB) a bránou Serving-GW i na přenos signalizačních dat mezi eNodeB a

MME. Na vyšších vrstvách protokolu se spojení dělí na S1-C (control) přenáší signalizační data mezi MME a eNodeB a S1-U (user) přenáší data mezi bránou a eNodeB. Signalizační data jsou bezdrátově posílána pomocí speciálního protokolu, který nepoužívá IP adresaci, dále na eNodeB jsou data zabalena do paketu a opatřena IP adresami připravena tak na přenos po S1. Data uživatele jsou opatřena IP adresami už v mobilním zařízení [8].

2.4.2 Kompatibilita se staršími sítěmi

Mnoho operátorů nasazuje LTE sítě tam, kde provozují starší, například GSM nebo UMTS služby. Pokrytá oblast novým LTE je většinou hodně malá. Bezdrátový přechod z 3G na 4G síť, nebo naopak je náročný úkol, který požaduje úplné odpojení od stávající sítě, zdlouhavé připojení a ověření k druhé síti. Pro poskytování kvalitních služeb potřebujeme, aby klient mohl využívat nové LTE, ale také aby z něj mohl přejít na starší síť aniž by ztratil spojení, nebo svou IP adresu [8].

Obrázek 2.6 zobrazuje, jak se v praxi klient přesouvá mezi různými technologiemi v síti jednoho operátora. Pokud se mobilní telefon dostane mimo dosah LTE



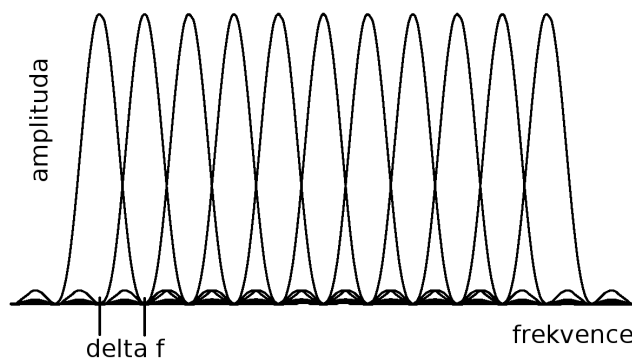
Obr. 2.6: Přepojování mezi základnovými stanicemi [8]

sítě, naváže spojení se sítí nižší generace. Z přístupového bodu putuje požadavek o přesměrování sítě na klienta jednotce MME, ta s tímto požadavkem kontaktuje SGSN. Rozhraní určené pro zasílání těchto požadavků se nazývá S3 a je základem inter-SGSN, který se stará o přepojení klienta. Tímto je vytvořen virtuální tunel mezi klientem a bránou poskytovatele, spojení S4 a S5. 3G a 2G síť je na přepojování spojení připravená, proto není potřeba žádná další modifikace současné sítě [8].

2.4.3 Bezdrátová modulace OFDM

V sítích LTE se na přenos informací vzduchem používá modulace Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). Tato modulace velmi specificky používá velké množství subnosných frekvencí, řádově stovky subnosných při šířce kanálu 20 Mhz. Tato modulační metoda se používá u LTE, DVB-T, Wi-Fi 802.11n a další [7].

Na obrázku 2.7 jsou zobrazeny jednotlivé subnosné frekvence. Těmito frekvencemi je vyplněna celá šířka pásma, frekvence jsou od sebe rovnoměrně vzdálené. Vzdálenost těchto frekvencí uváděna jako Δf [7].



Obr. 2.7: Zobrazení subnosných frekvencí modulace OFDM [7]

2.4.4 Přehled release LTE

Přehled níže zobrazuje pouze základní změny ve vydání (release) obsahujících problematiku 4G [7] [4].

- **Release 8** - Kromě vylepšení HSPA, je zde první vydání LTE, System Architecture Evolution (SAE).
- **Release 9** - Vydání v roce 2009, přidány služby lokalizace, Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS) a další.
- **Release 10** - Rok 2011. Vydání LTE-Advanced, přidání podpory MIMO pro download i upload, Inter-cell interference coordination (ICIC).
- **Release 11** - Pokročilé metody sdílení šířky bezdrátového pásma.
- **Release 12** - Přidání pokročilé prioritizace.
- **Release 13** - Zatím nevydané, ale rozpracované.

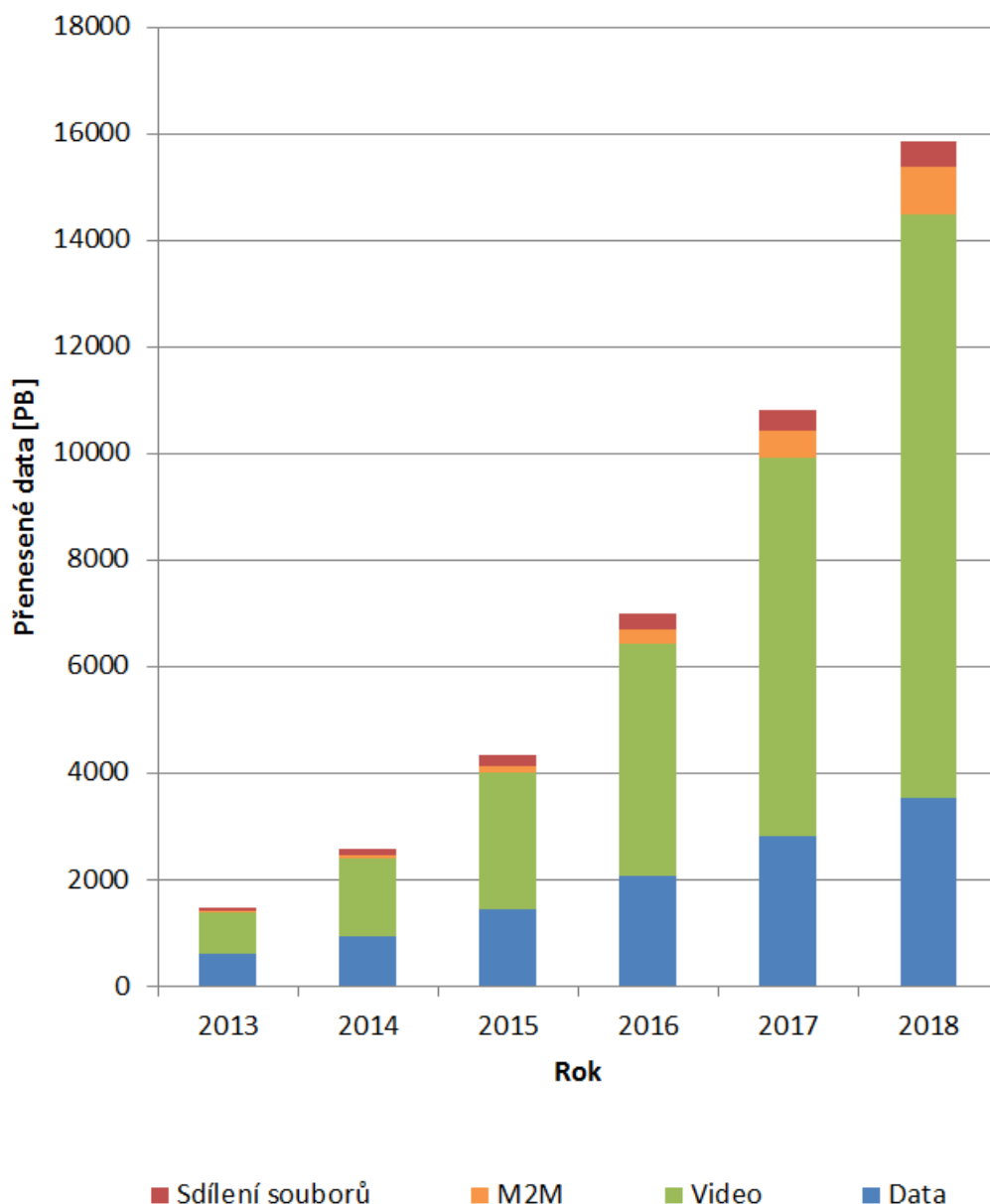
2.5 Požadavky na mobilní sítě

V této kapitole jsou uvedeny požadavky na mobilní sítě. Tyto požadavky jsou určeny typem připojených zařízení do mobilní sítě a daty přenášenými přes mobilní síť. Je zde zobrazena i predikce do budoucna až do roku 2018. V roce 2013 bylo mobilními sítěmi přeneseno 1 487 PB dat, předpověď na rok 2018 je 15 858 PB dat. Data jsou získána z celosvětové předpovědi Cisco Visual Networking Index (VNI) [12].

Velký nárůst mají zaznamenat Machine to machine (M2M) zařízení. Příkladem může být koncept chytrého města (smart city). V takovém městě by měla být většina zařízení připojených k Internetu (Internet of Things (IoT)). Je velmi pravděpodobné, že spousta z těchto zařízení bude komunikovat prostřednictvím mobilní sítě. Hlavní využití těchto zařízení jako měřicí sondy různých veličin, bezpečnostní čidla, správa infrastruktury a další automatizace. Velký nárůst by měly zaznamenat i M2M zařízení, které by měl člověk nosit na sobě, například přístroje sledující zdraví, chytré hodinky nebo brýle a sportovní doplňky. Zaměřujeme se na města, protože zde je s největší potenciál růstu M2M zařízení [13] [12].

2.5.1 Typ a množství dat v mobilních sítích

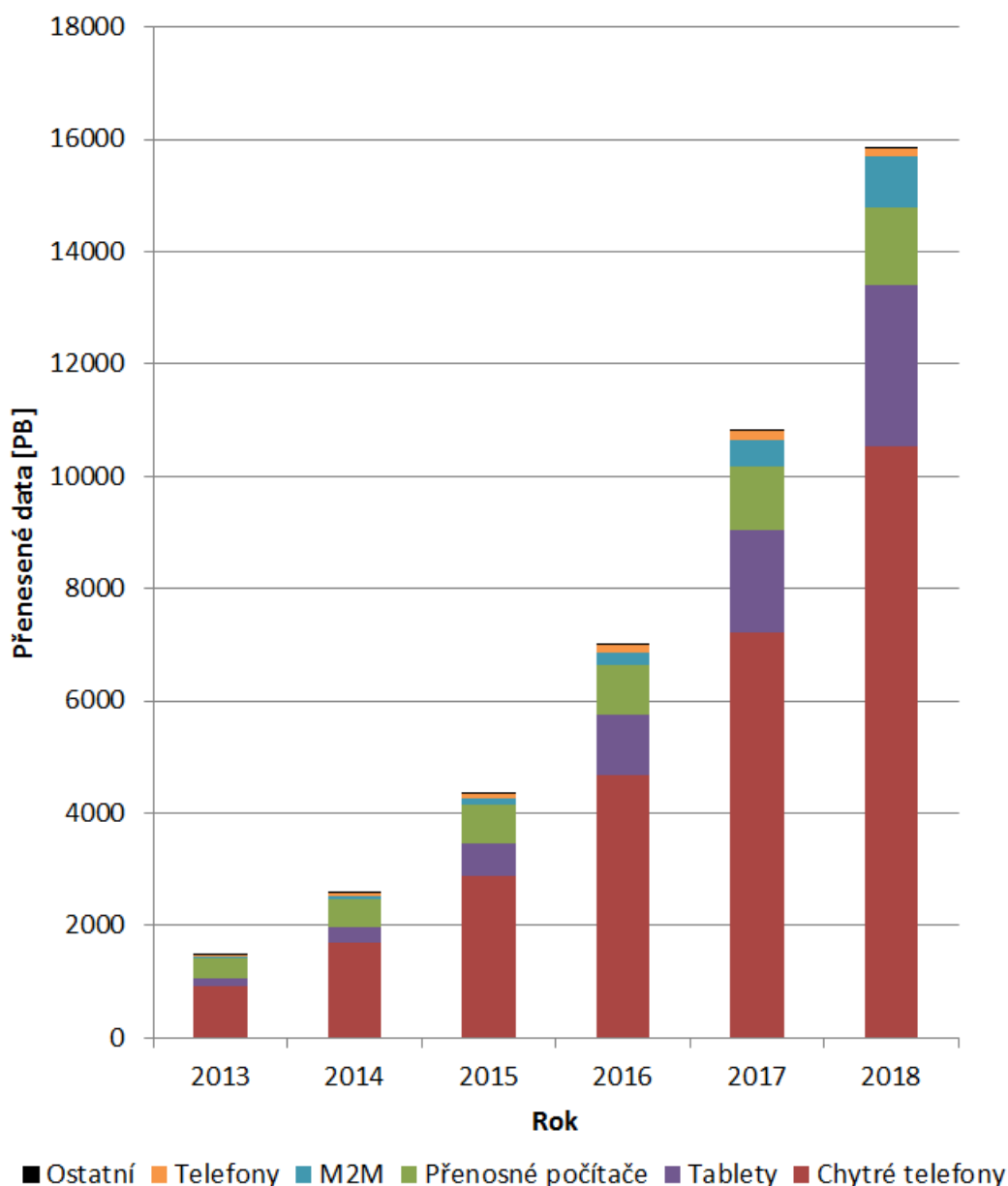
Graf 2.8 zobrazuje současný stav a predikci dat přenášených v mobilních sítích na celém světě. Největším nárůstem do budoucna by měly být data, které generují M2M zařízení. Nárůst těchto dat by měl být do roku 2018 téměř 44 násobný. V roce 2018 by měly data generovaná M2M zařízeními využívat téměř 6 % globálního provozu. Data přenášející video narostou do roku 2018 téměř 14 násobně a měly by zabírat 69 % globálního provozu.



Obr. 2.8: Typy přenášených dat v mobilních sítích [12]

2.5.2 Typy zařízení připojené v mobilní síti

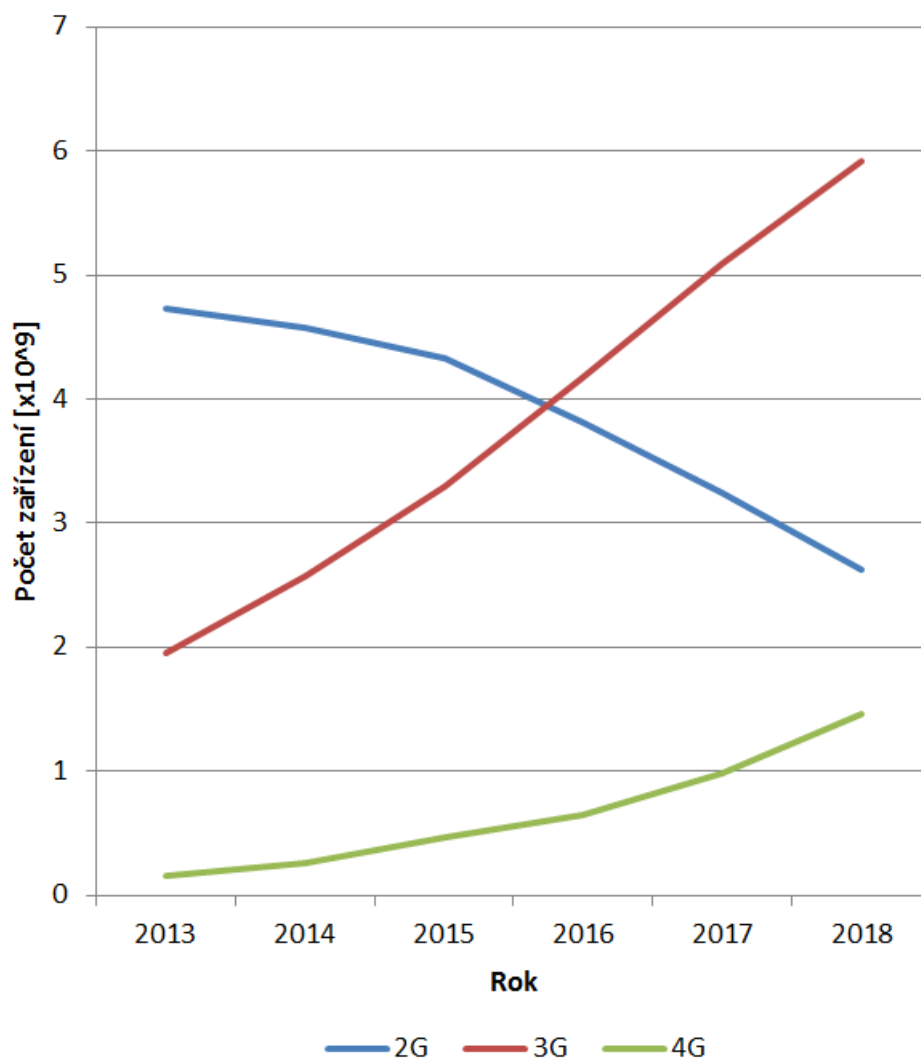
Graf 2.9 zobrazuje současný stav a predikci zařízení, které spotřebovávají data v mobilních sítích. Největší nárůst do roku 2018 by měli mít M2M zařízení s 44 násobným nárůstem a s celkovým podílem 6 %. Tablety jsou druhé v pořadí nárůstu s 22 násobným zvýšením a s celkovým poměrem přenesených dat 14 %. Na třetím místě jsou chytré telefony s 11 násobným nárůstem využití dat a s celkovým poměrem 66 %.



Obr. 2.9: Typy zařízení v mobilních sítích [12]

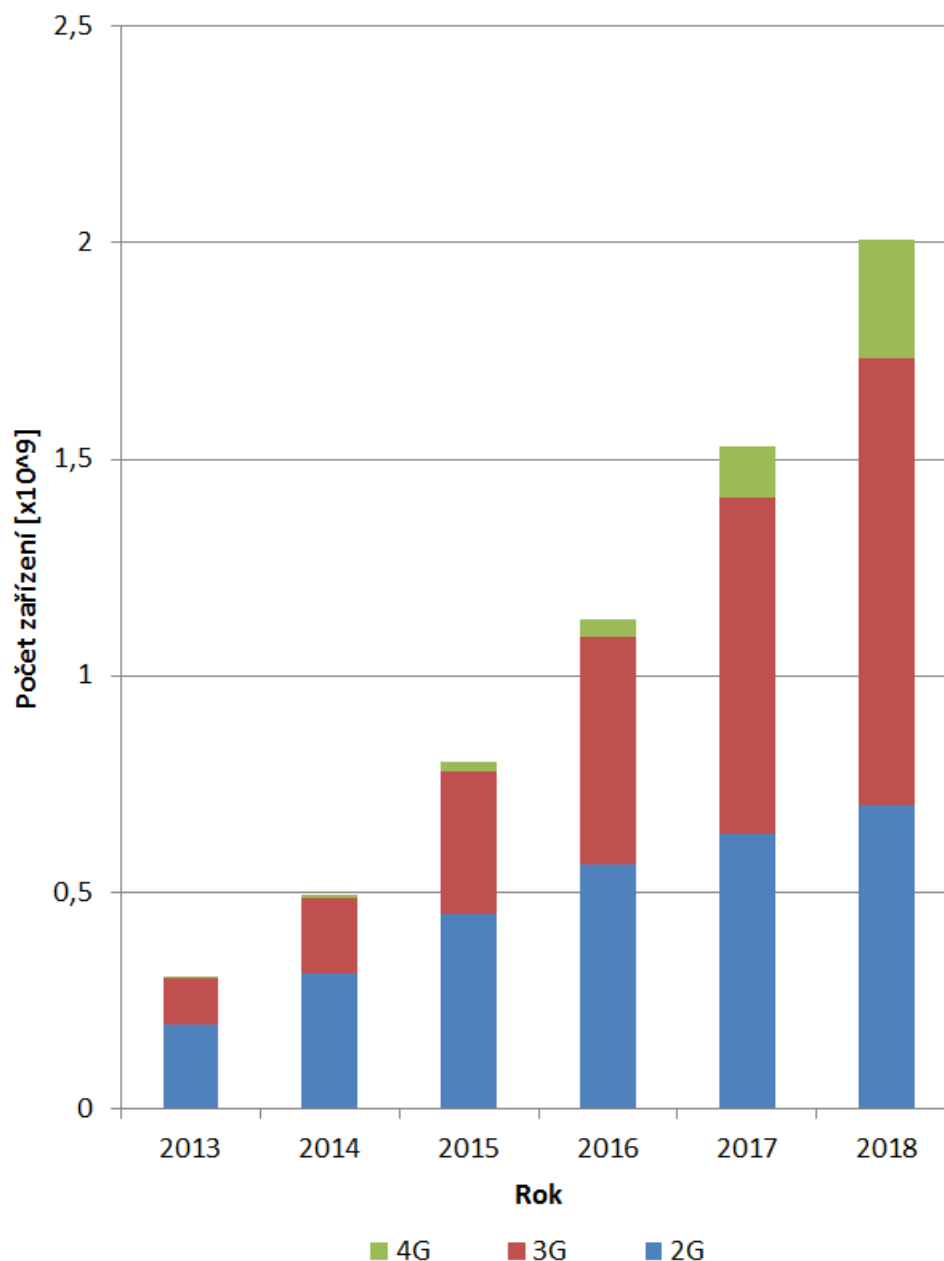
2.5.3 Využití sítí podle generací

V této sekci je popsán současný stav a predikce počtů zařízení připojující se k mobilním sítím. Data jsou sečtena z celého světa [12].



Obr. 2.10: Počet připojených zařízení podle generace [12]

Graf 2.10 zobrazuje rozdělení zařízení podle použité technologie. Největšího růstu by měla dosáhnout 4G síť, která vzrostla téměř 9 násobně až na 1,47 miliard zařízení. 3G síť by měla být nejpoužívanější a do roku 2018 naroste 2 násobně na hodnotu téměř 6 miliard zařízení. U 2G sítě je patrné, že je již v současnosti postupně vytlačována. Do roku 2018 by se měl počet zařízení v 2G síti snížit na 2,6 miliard [12].



Obr. 2.11: Počet připojených M2M zařízení podle generace [12]

Graf 2.11 zobrazuje počty M2M zařízení připojených k sítím 2G - 4G. Největší nárůst by mělo zaznamenat využívání 4G sítě a to více jak 200 násobně na 272 milionů zařízení. Počet připojených M2M zařízení přes 3G sítě by měl vzrůst téměř 8 násobně na miliardu zařízení. Počet zařízení v síti druhé generace i na vzdory klesajícímu trendu z předchozího grafu 2.10 by měl vzrůst téměř 3 násobně na počet 700 milionů zařízení [12].

2.6 Hlavní nedostatky LTE sítě

Při využívání LTE sítě se mobilní operátoři v dnešní době setkávají se situacemi, které negativně ovlivňují výkonnost sítě. V této kapitole jsou popsány zejména problémy, které vznikají při komunikaci M2M zařízení v LTE síti [13].

2.6.1 Přetížení bezdrátového rozhraní základnových stanic

Přenesená data M2M zařízení jsou obvykle velmi malá (v současnosti 1,4 % z celkového mobilního provozu), ale předpokládá se velký nárůst počtu zařízení. Také M2M zařízení většinou komunikují daleko častěji, než zařízení ovládané člověkem. Je velmi pravděpodobné, že M2M zařízení budou komunikovat podle periodických časových intervalů. To může způsobit, že ve velmi krátký okamžik nastane mnoho požadavků na eNodeB. Tyto požadavky sice mají částečně náhodný přístup, ale v krátkém časovém intervalu. Velký počet požadavků způsobí přetížení bezdrátové (fyzické) části základnové stanice.

Při přetížení základnové stanice začne vznikat zahazování paketů a odmítání požadavků, ale M2M zařízení začnou své neúspěšné požadavky opakovat. Proto je zde potřeba implementace funkčního mechanismu, který bezpečně oblouží náhodné přístupy do mobilní sítě [13].

2.6.2 Přetížení nově připojenými zařízeními

V současnosti je počet M2M zařízení malý, ale podle predikce viz sekce 2.5 se má do roku 2018 jejich počet 44 násobně zvýšit. To by mohlo způsobit přetížení základnových stanic, které se v současnosti budují a nejsou připraveny na velký počet klientů v budoucnosti. Podobná situace přetížení základnové stanice může nastat při nějaké společenské události jako je festival, koncert, hokejový nebo fotbalový zápas. Na události může být velký počet lidí, kteří s sebou přinesou i velký počet mobilních zařízení připojených přes LTE síť.

2.6.3 Zajištění služeb

Je jisté, že v jeden okamžik může probíhat komunikace M2M zařízení s komunikací Human to Human (H2H) zařízení. Nicméně komunikace M2M nesmí kolidovat s H2H komunikací, ale zároveň je potřeba splnit prioritizaci služeb (Quality of service (QoS)) obou typů zařízení. Zařízení se může k síti připojit přímo k eNodeB, nebo přes bránu, popřípadě opakovač. Opakovač může být i chytrý prvek, který zprostředkovává připojení třeba i přes jinou technologii (Wi-Fi, Ethernet, a jiné).

Další rozhodování může nastat při umístění zařízení mezi více základnových stanic, zde se musí M2M zařízení rozhodnout na kterou základnovou stanici se připojí. Používanými parametry při rozhodování je síla signálu a vytíženost základnových stanic/opakovačů. Důležitým prvkem by mělo být i rozhodování na základě typu služby, aby mohlo být dosaženo minimální odezvy, maximální propustnosti, nebo malé provozní ceny [13].

2.6.4 Nedostatek přenosového pásma

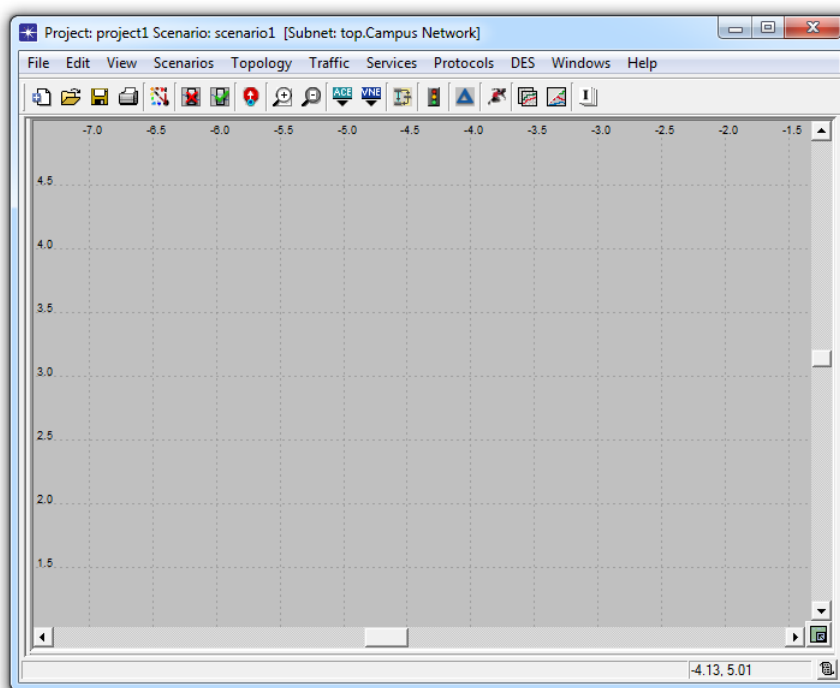
Všechny poskytovatele mobilních sítí nejvíce zatěžuje nedostatek přenosového pásma pro současné a hlavně nově nastupující sítě. Toto pásmo je velmi drahé a proto se s ním musí nakládat efektivně. Je velmi důležité, aby nové technologie dokázali na úzkém pásmu přenést velké množství dat.

3 SIMULACE LTE SÍTĚ

V první části této kapitoly bude představeno použité simulační prostředí OPNET Modeler. V druhé části budou uvedeny získané výsledky simulací sítě LTE. Pozornost bude zaměřena na přetížení vytvořené mobilní sítě LTE datovým tokem a velkým počtem nově připojených klientů.

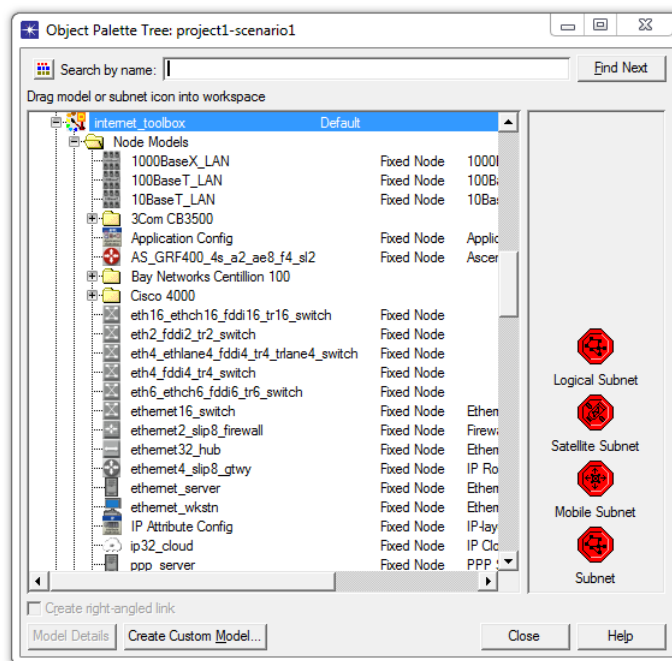
3.1 Představení progeamu OPNET Modeler

OPNET Modeler je simulační prostředí vyvinuto firmou OPNET Technologies, Inc. Slouží pro návrh a simulaci síťových technologií. Všechny scénáře jsou simulovány ve verzi OPNET Modeler 17.5. Velkou výhodou OPNET Modeleru oproti jiným simulačním nástrojům (např. NS-3 (Network Simulator 3)) je grafické prostředí, díky kterému je práce efektivní a rychlá. Obrázek 3.1 zobrazuje toto prostředí, které je velmi propracované a postačuje na téměř všechna nastavení. Velkou část zobrazované plochy zabírá plátno, na kterém se vytváří scénář. Prvky sítě se na scénář vkládají z palety zařízení, který se otevírá v druhém okně, viz obrázek 3.2 [10].



Obr. 3.1: Ukázka grafického prostředí OPNET Modeler

Každý z prvků má vlastní grafické konfigurační okno. Podle nastavení těchto parametrů probíhá simulace. Hlavní nastavení simulace, jako je například čas nebo



Obr. 3.2: Paleta zařízení OPNET Modeler

jádro pro simulaci, je dostupné přímo v okně simulace. V tomto okně se simulace spouští a je zde zobrazen i její průběh. Rychlost simulace je závislá na počtu událostí ve scénáři, počtu vybraných statistik a délce simulace. V jednoduchém schématu jdou odsimulovat hodiny za pár minut, ale ve složitých scénářích je simulace velmi zdoluhavá například níže zobrazený scénář s 500 klientskými stanicemi a délkou simulace 5 minut probíhal hodiny [10].

OPNET Modeler umí zobrazit spoustu statistik, které velmi usnadní přehled nad simulovanou sítí. Tyto statistiky lze přímo v programu zobrazit nejčastěji v grafu, nebo exportovat. Další výhodou je velké množství podporovaných technologií např. Ethernet, LTE, UMTS, WiFi. Kompletní přehled podporovaných technologií je k dispozici v manuálu, který je součástí instalace. Nevýhodou může být placená verze některých podporovaných technologií [10].

3.2 Typy provozu využité pro simulaci

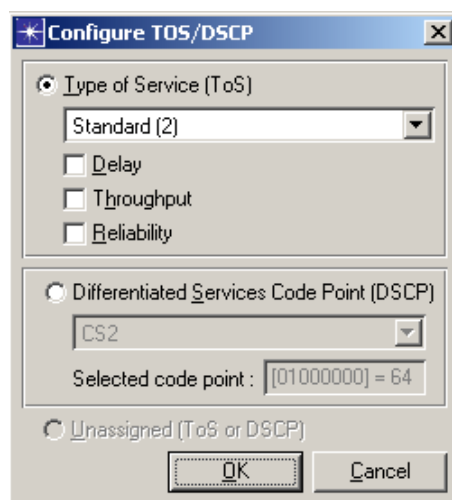
V této sekci jsou popsány tři typy provozů, které jsou použity v simulaci zaměřené na Quality of service (QoS). Jsou zde uvedeny i podrobné informace o nastavené prioritě u každého z typů provozů. Všechny přenosy včetně VoIP jsou navázány mezi mobilní stanicí a serverem jménem „FTP server“. Priorita je určena pomocí Type of service (ToS) záznamu v hlavičce paketů. Priority a typy provozů jsou pro přehlednost vyneseny do tabulky 3.1.

Protokol	TOS slovy	TOS hodnota
File Transfer Protocol (FTP)	Maximize throughput	0100
Hypertext Transfer Protocol (HTTP)	Normal service	0000
Voice over IP (VoIP)	Interactive voice	1100

Tab. 3.1: Typy provozů ve scénáři

Provoz přes protokol FTP

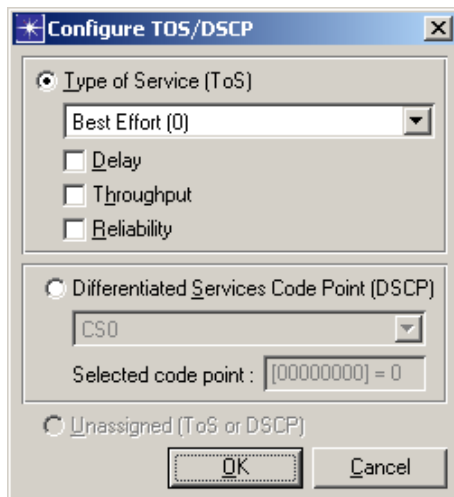
FTP provoz byl využit pro generování velkého objemu dat určeného k přetížení sítě. Tento provoz má prioritu nastavenou na Maximize throughput. Přesné nastavení v aplikaci OPNET Modeler je zobrazeno na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Podrobné nastavení FTP provozu

Provoz přes protokol HTTP

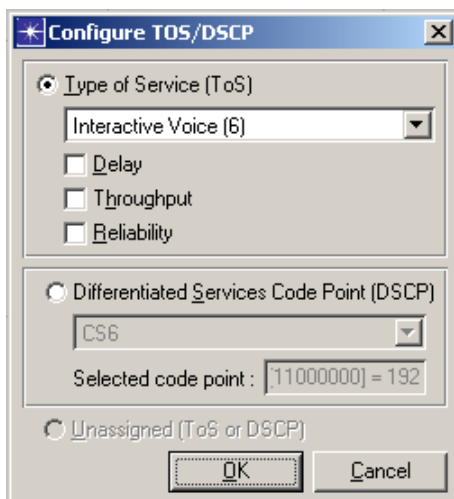
Priorita je nastavena na Normal service. Obrázek 3.4 zobrazuje nastavení proiritizace služeb v OPNET Modeleru.



Obr. 3.4: Podrobné nastavení HTTP provozu

Provoz přes protokol VoIP

Priorita je nastavena na hodnotu Interactive voice, tedy ze všech tří provozů má VoIP nejvyšší prioritu.

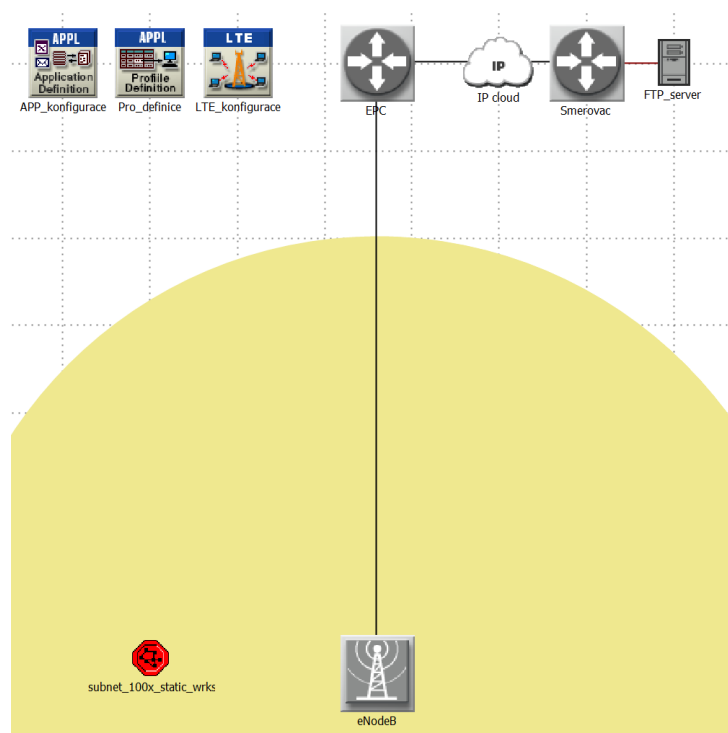


Obr. 3.5: Podrobné nastavení VoIP provozu

3.3 Režijní data LTE

Data, které klient potřebuje stáhnout na aplikační vrstvě modelu International Organization for Standardization/The Open Systems Interconnection (ISO/OSI) jsou přeneseny přes nižší vrstvy k bezdrátovému médiu (každá vrstva k uživatelským datům přidá své data). Tyto režijní data v síti LTE jsou odečteny ze simulace níže.

Na obrázku 3.6 je zobrazen scénář navržený pro měření režijních dat LTE. Scénář obsahuje 100 LTE klientů, každý z těchto klientů stahuje z FTP serveru soubor o velikosti 100KB. Přenesená data na MAC vrstvě LTE základnové stanice jsou odečteny z grafu viz obrázky 3.7. Jelikož OPNET Modeler neumožňuje zobrazení grafu přenesených dat eNodeB, k dosažení tohoto výsledku je použita integrace grafu přenosové rychlosti.



Obr. 3.6: Scénář sítě určené pro měření režijních dat

Výpočet režijních dat

Z grafu 3.7 jsou odečteny data odeslaná 90,0Mbit, a data přijatá 4,7Mbit.

$$SumP = 90 + 4,7 = 94,7 \text{ Mbit} \quad (3.1)$$

$$SumP = \frac{94,7 * 1024}{8} = 12\,121 \text{ kByte} \quad (3.2)$$

$$SumU = 100 * 100 = 10\,000 \text{ kByte} \quad (3.3)$$

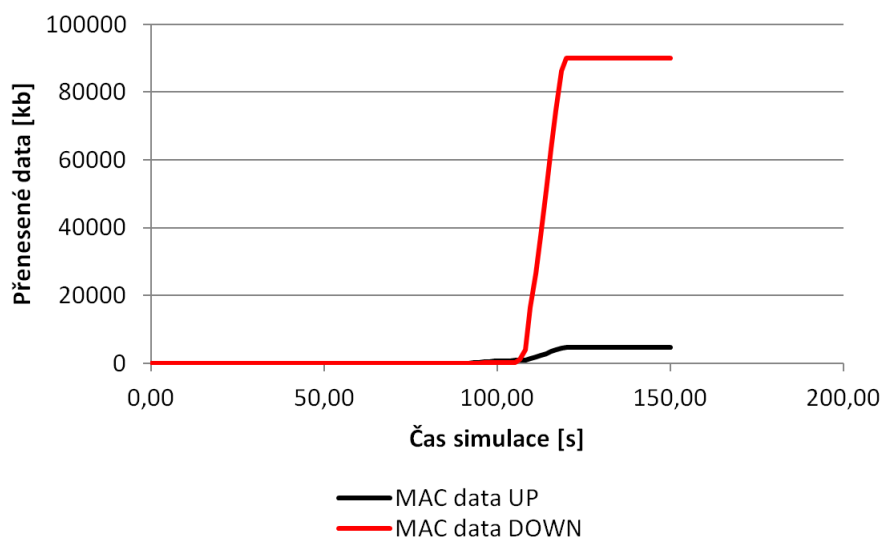
$$Poměr = \frac{(12121 - 10000) * 100}{10000} = 21.21 \% \quad (3.4)$$

SumP - Celkové přenesené data na MAC vrstvě základnové stanice

SumU - Teoreticky přenesené data na aplikační vrstvě základnové stanice

Poměr - Poměr režijních dat

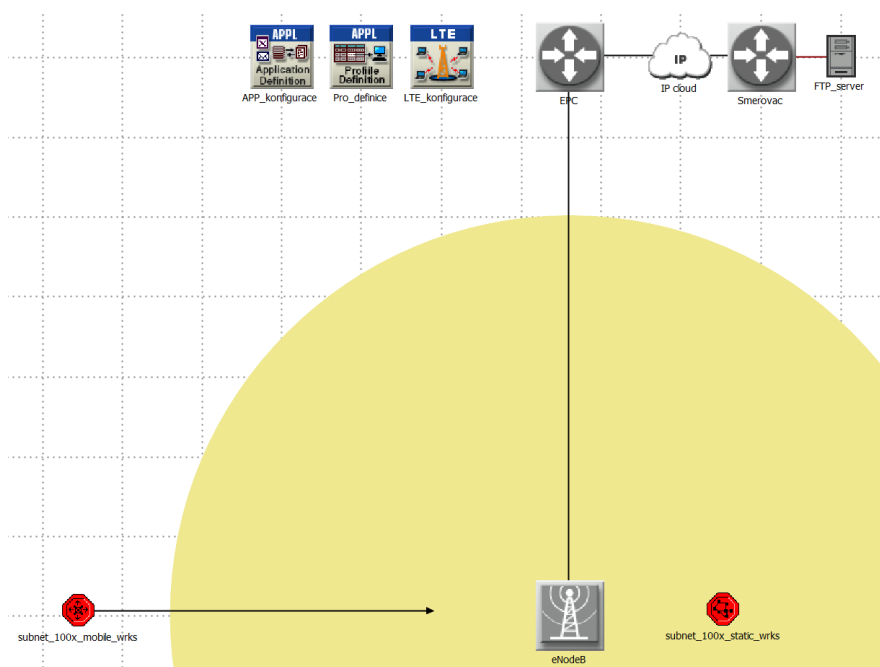
Poměr režijních dat k poměru stažených dat na Aplikační vrstvě je 21.21 %.



Obr. 3.7: Graf přenesených dat na MAC vrstvě LTE

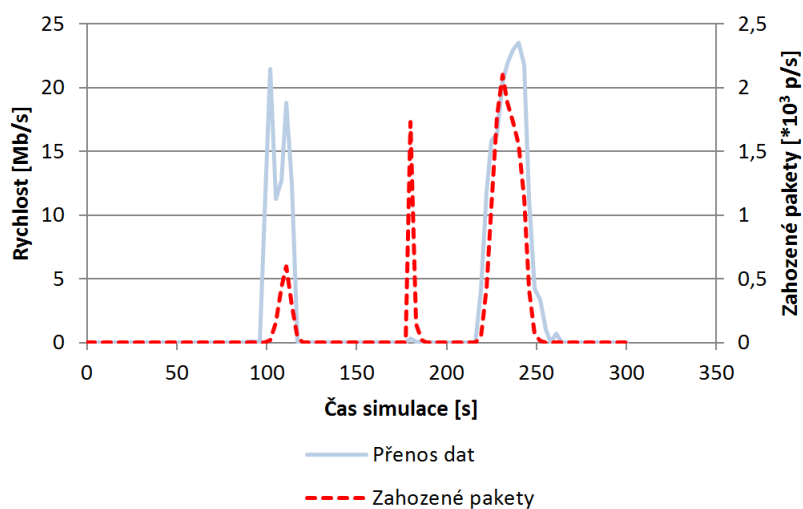
3.4 Přetížení sítě přenášenými daty

Další scénář, viz obrázek 3.8, je sestaven tak, aby došlo k přetížení základnové stanice LTE sítě (eNodeB) množstvím přenášených dat. Aby mohl být výsledek porovnán s nepřetíženým průběhem, je soubor z ftp serveru stahován ve 100. sekundě prvními 100 mobilními zařízeními, které jsou stále na dosah signálu. Po prvním stažení se zde ve 3 minutě připojí dalších sto zařízení a v 220. sekundě začne všech 200 stanic stahovat stejný soubor přes FTP. K bezdrátovému médiu je přistupováno pomocí Frequency Division Duplex (FDD). Tato metoda vyžaduje dva kanály u každého je nastavena šířka přenosového pásma na 5 MHz. Využita je i technologie MIMO, základnová stanice má dvě antény vysílací a dvě antény přijímací, klientské stanice mají dva kanály přijímací a jeden vysílací. Úroveň signálu mobilních stanic po připojení se pohybovala v rozmezí -75 dBm až -90 dBm.

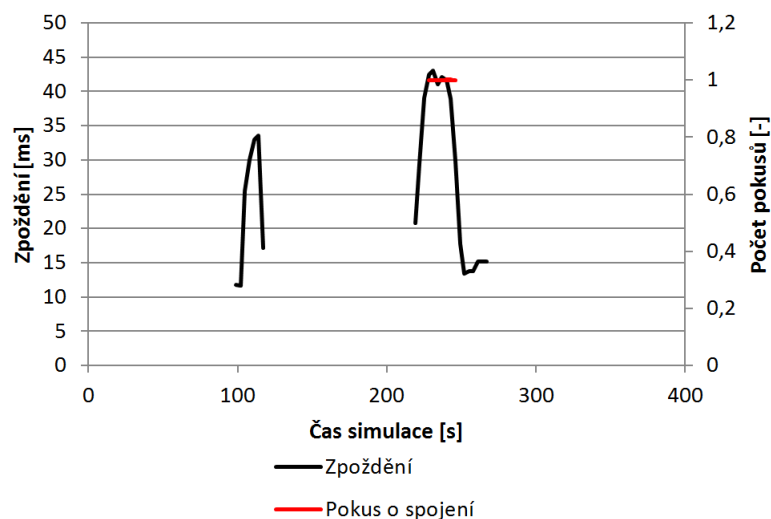


Obr. 3.8: Scénář sítě určené pro přetížení datovým tokem

Při tomto přetížení můžeme pozorovat řízení toku eNodeB, které zamezí zvýšení odezvy spojení metodou zahazování paketů. Graf 3.9 zobrazuje současnou přenosovou rychlost a počet zahazených paketů. Je zde patrné malé zahazování paketů ve 100. sekundě, kdy základnová stanice není přetížená. Při stahování souboru 200 zařízeními v 220. sekundě dochází k velkému zahazování paketů. Zahazování je způsobeno řídicím mechanismem provozu základnové stanice. Ve 3. minutě je zahazování způsobeno rychlým přesunem 100 stanic do místa pokrytého signálem a jejich následným připojením. Odezva rádiové části eNodeB je zobrazena na grafu 3.10.



Obr. 3.9: Graf propustnosti a zahazených paketů



Obr. 3.10: Graf pokusů o opětovné navázání spojení a zpoždění

Ze začátku přetížení základnové stanice, kdy ještě nebyla rychlost FTP přenosu zregulována zahozenými daty, docházelo k odpojování a následném připojování klientů. Tento jev nastal z důvodů úplného přetížení bezdrátové části základnové stanice. Odpojování klientů skončilo při zredukování rychlosti Transmission Control Protocol (TCP) spojení metodou zahazování paketů viz graf 3.10.

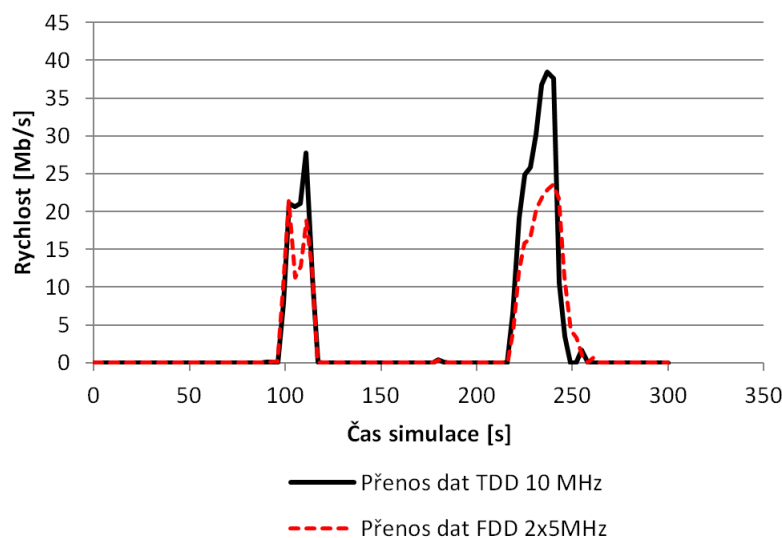
Vlastnosti sítě zobrazené v této části práce jsou popsány i v článku [11], kde jsou měřeny parametry reálně nasazeného sektoru. Základnová stanice v článku využívá stejnou šířku bezdrátového pásma jako v simulovaném scénáři. V článku [11] bylo dosaženo průměrné rychlosti na sektoru 17Mb/s. V simulaci bylo dosaženo maximální hodnoty 23,56 Mb/s. Tato hodnota nebude v reálném nasazení dosažena, protože v simulaci není zahrnuto rušení z jiných základnových stanic. Navíc v reálném nasazení pro zaručení dobrých služeb musí být vždy redundance.

3.4.1 Porovnání přístupu k médiu

V této části jsou porovnány výsledky sítě s odlišným přístupem k médiu. Scénář je použit stejný jako výše v bodě 3.4. Pouze je doplněn o další profil přístupu k médiu. Jsou zde porovnány výsledky dvou přístupů:

- FDD se dvěma kanály šířky 5 MHz.
- Time Division Duplex (TDD) s jedním kanálem šířky 10 MHz.

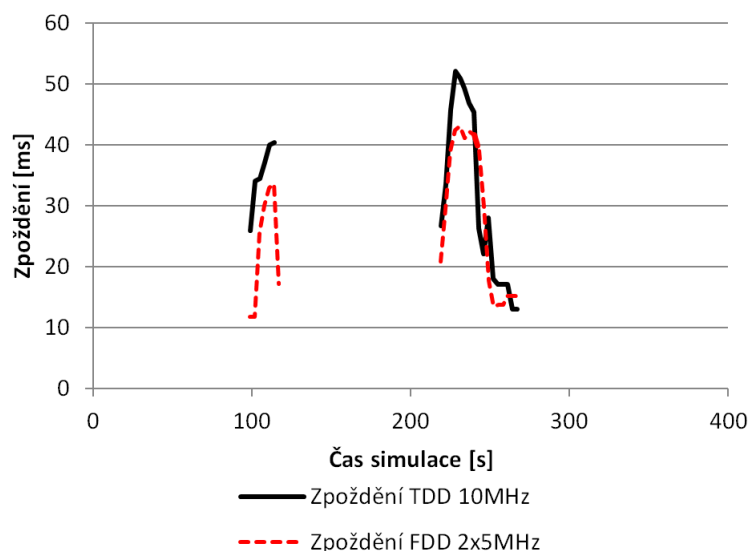
Šířky kanálů byly zvoleny tak, aby oba scénáře využívaly stejnou celkovou šířku pásma.



Obr. 3.11: Graf porovnání přenosové rychlosti odlišných přístupů k médiu

Z grafu 3.11 je zřejmé, že přístupová metoda TDD dokáže na stejném pásmu poskytnout rychlejší přenos.

Druhý graf 3.12 zobrazuje nevýhodu TDD, což je vyšší zpoždění bezdrátového rozhraní. Toto zpoždění je vyšší v průměru o 10 ms, tento čas není pro distribuci mobilních dat kritický, proto se upřednostňuje nasazení TDD. Tento přístup k médiu je použit i u reálně nasazeného sektoru měřeného v článku [11].



Obr. 3.12: Graf porovnání zpoždění bezdrátové sítě odlišných přístupů k médiu

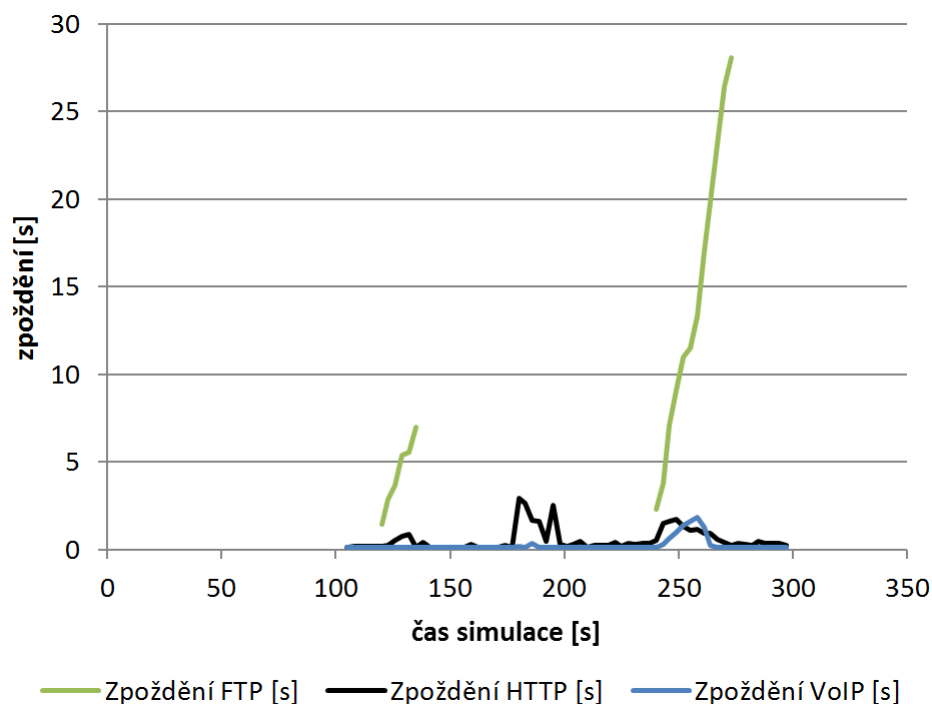
3.4.2 Přetížení sítě s prioritizací služeb

Scénář použitý pro tuto simulaci vychází ze scénáře v části 3.4. Do scénáře byly přidány tři typy provozu popsané v sekci 3.2.

V grafu 3.13 zobrazuje hodnota „Zpoždění FTP“ dobu uplynulou od vyslání požadavku do přijetí odpovědi. Hodnota „Zpoždění HTTP“ zobrazuje dobu načtení jednoho prvku. Hodnota „Zpoždění VoIP“ udává zpoždění paketů od doby vyslání do doby přijetí cílovou stanicí.

Protokol	Maximum [s]	Průměr [s]	Minimum [s]
FTP	28,03	10,44	1,42
HTTP	2,90	0,55	0,12
VoIP	1,81	0,23	0,11

Tab. 3.2: Zpoždění různých typů provozů



Obr. 3.13: Graf odezvy rozdílných služeb v přetížené síti

Na grafu 3.13 jsou zobrazeny tři důležité jevy. První nastává ve 2 minutě, kdy je síť zatížena. Nejvíce vzroste odezva FTP dat, protože má FTP nejnižší prioritu. Mírně vzroste i zpoždění HTTP služby. Odezva VoIP je téměř nedotčená.

Ve třetí minutě se připojuje dalších 100 zařízení a současně začínají zasílat požadavky na HTTP a VoIP službu. Zpoždění VoIP se pozvedlo jen minimálně z průměrné hodnoty 0,13 s na hodnotu 0,33 s. Odezva HTTP vzrostla z průměrné hodnoty 0,22 s až na 2,90 s.

Třetí důležitý jev nastává ve 4 minutě, kdy se spustí stahování z ftp serveru na všechny zařízení. Odezva FTP služby výrazně vzrostla na 28 s. Odezva HTTP služby vzrostla na 1,7 s. Zpoždění se dotklo i VoIP služby maximální odezva zde byla 1,81 s. Pro přehlednost byly hodnoty vyneseny do tabulky 3.2.

3.5 Přetížení nově připojenými zařízeními

Základnová stanice nemá přesně určený maximální počet připojených klientů. V této simulaci je zobrazeno chování stanice při přetížení počtem připojených zařízení. Maximální teoretický počet stanic je dán vzorcem:

$$klientMax = RB * 12 * 75 \% * CELL, \quad (3.5)$$

- RB - Resource Blocks (RB), bloky závislé úměrně na šířce používaného pásma u bezdrátového rozhraní. Šířka pásma 10 MHz odpovídá 50 RB, 5 MHz 2 RB,
- 12 - konstanta počtu subnosných,
- 75 % - Maximální hodnota je snížena, protože 25 % je využito bezdrátovou režijí,
- CELL - počet buněk, sektorů.

3.5.1 Scénář

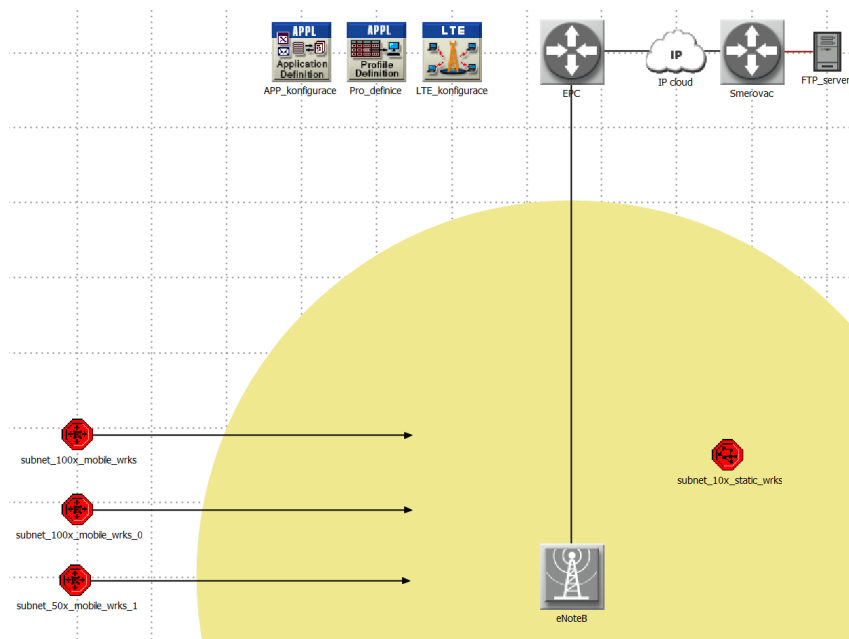
Na obrázku 3.14 je zobrazen použitý scénář, v dalších simulacích je pouze upraven počet pohyblivých zařízení. Důležitým parametrem je nastavení bezdrátového rozhraní základnové stanice. Byla použita šířka pásma 2x5MHz a přístup k bezdrátovému médiumu FDD. Úroveň signálu mobilních stanic po připojení se pohybovala v rozmezí -70 dBm až -90 dBm.

Maximální teoretický počet klientů pro tento scénář je podle rovnice 3.5:

$$klientMax = 25 * 12 * 75 \% * 1 = 225 klientů \quad (3.6)$$

Generování provozu ve scénáři je realizováno stahováním dat z FTP serveru, vždy se stahuje soubor o velikosti 10 kB. Ve scénáři je 10 nepohyblivých se stanic, které stahují soubor v 2. minutě a ve 4. minutě. Další stanice jsou ze začátku simulace odpojeny a připojují se v 3. minutě. Ve 4. minutě každá ze stanic začne stahovat soubor z FTP serveru. Postupně je simulace provedena s celkovým počtem 260, 360 a 500 mobilních klientů.

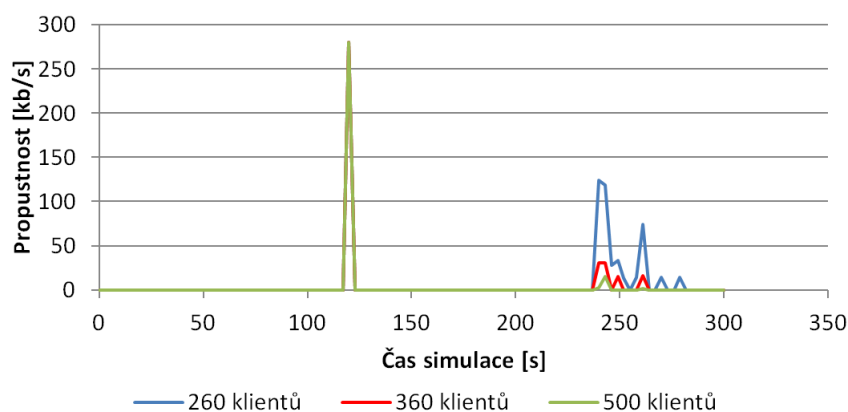
Byl uvažován scénář s 1000 klienty a více sektory, ale z hlediska výpočetní náročnosti nemohl být realizován. Simulace scénáře nebyla u konce ani po čtyřech dnech od jejího spuštění.



Obr. 3.14: Scénář určený pro přetížení základnové stanice počtem klientů

3.5.2 Výsledky simulace při přetížení připojenými stanicemi

Grafy 3.15 a 3.16 obsahují průběhy ze tří scénářů, které se liší podle počtu klientů viz předchozí sekce 3.5.1. Poslední statistika je rozdělena do tří grafů (3.17, 3.18 a 3.19) z důvodu přehlednosti. Grafy simulací pro různé počty klientů jsou do 3 minuty stejné, protože se mění jen počet zařízení, které se připojují v průběhu simulace. Z toho důvodu se křivky v grafech překrývají.

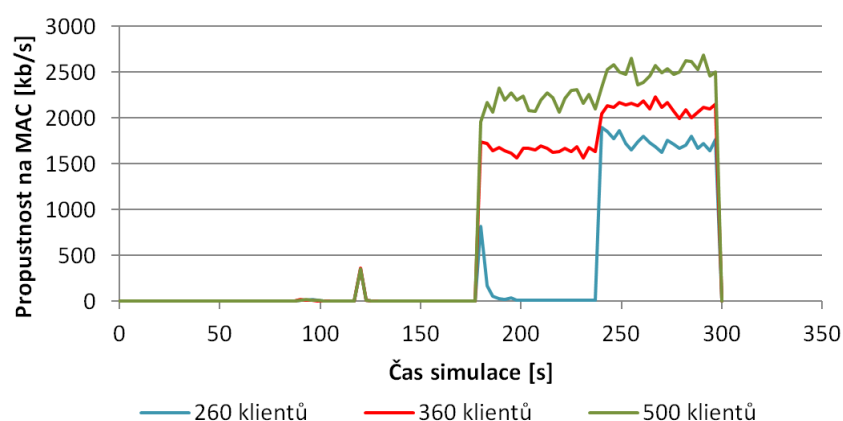


Obr. 3.15: Graf propustnosti na aplikační vrstvě

Vliv přetížení na propustnost eNodeB

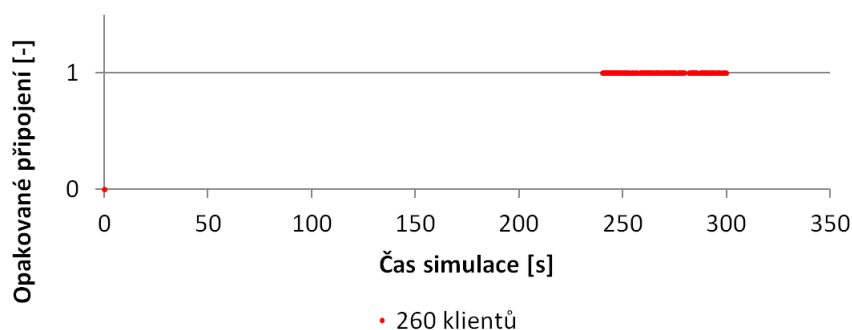
Z prvního grafu číslo 3.15 vyplývá, že je rychlost omezena počtem připojených klientů, protože maximální rychlost je v 2. minutě, kdy byl soubor stahován pouze 10 statickými klientskými stanicemi, vyšší, než v 4. minutě. Přenosová rychlost je postupně omezována počtem klientů, pro scénář s 360 klienty je maximální přenosová rychlost velmi malá, jen 30 kbit/s oproti maximu 280 kbit/s z 2 minuty. V posledním scénáři s 500 klienty je přenosová rychlost na aplikační vrstvě téměř nulová (méně než 15 kbit/s).

Vliv přetížení sítě na přenášená data na MAC vrstvě eNodeB

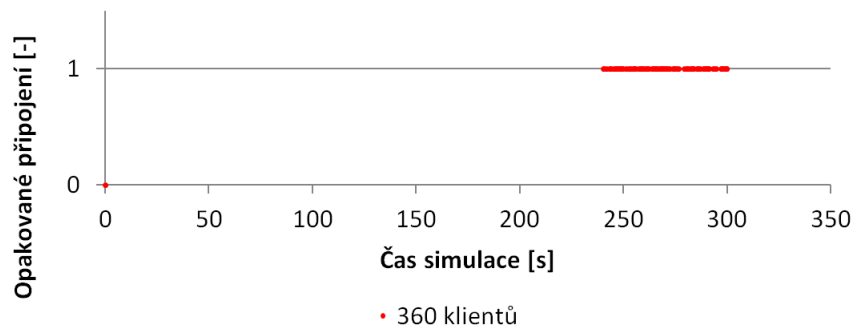


Obr. 3.16: Graf propustnosti na MAC vrstvě

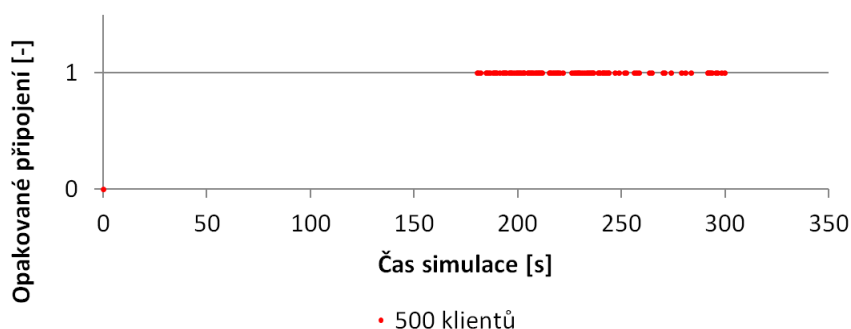
Graf 3.16 zobrazují přenos dat na MAC vrstvě základnové stanice. Z grafu vyplývá, že při velkém počtu připojených stanic jsou provozní data tak velké, že bezdrátové rozhraní není schopno obsloužit všechny stanice. Proto je velmi omezena propustnost na dat na aplikační vrstvě viz předchozí graf č. 3.15.



Obr. 3.17: Graf pokusů o opětovné připojení pro scénář s 260 klienty



Obr. 3.18: Graf pokusů o opětovné připojení pro scénář s 360 klienty



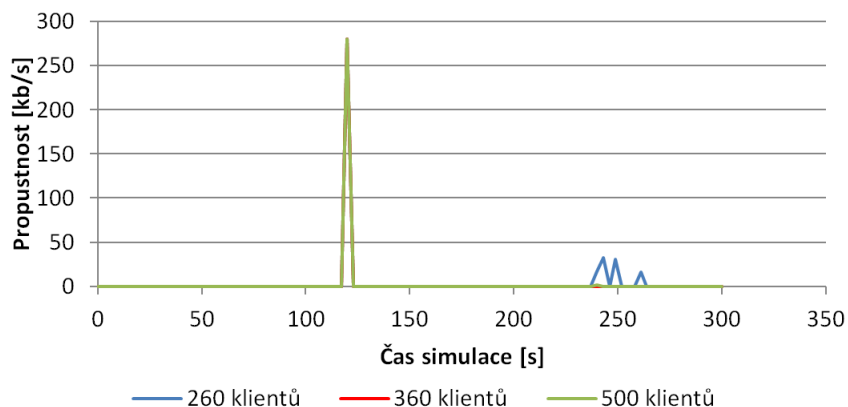
Obr. 3.19: Graf pokusů o opětovné připojení pro scénář s 500 klienty

Vliv přetížení na připojené stanice

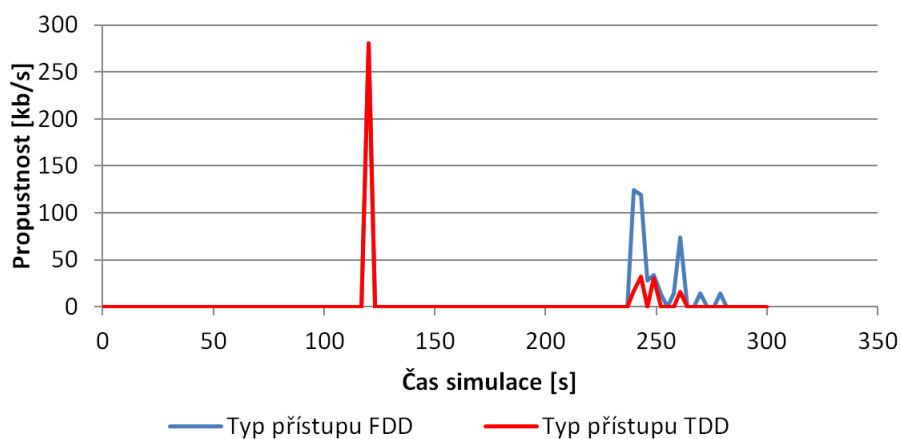
Graf pokusů o znovu připojení je odečítán na jednom z klientských zařízení, které se připojují ve 3. minutě. Z grafů 3.17 a 3.18 vyplývá, že se stanice při 260 a 360 klientech začnou odpojovat až ve 4 minutě, kdy z důvodu přenášení dat dojde k přetížení základnové stanice a následném odpojování klientů. Graf scénáře s 500 klienty (číslo 3.19) značí úplné přetížení základnové stanice připojenými zařízeními, kdy eNodeB není schopná obsloužit všechny stanice, proto probíhá neustále odpojování a připojování klientů.

3.5.3 Porovnání přístupu k médiu

Tato sekce porovná maximální počet připojených klientů pro rozdílné přístupy k bezdrátovému médiu. Je zde zobrazeno a popsáno, který přístup k médiu je vhodnější na velký počet klientů. Scénář je použit z bodu 3.5.1, ale je zde upraven přístup k médiumu na TDD se šířkou kanálu 10 MHz. Šířka byla zvolena tak, aby základnová stanice využívala stejnou šířku pásma jako u předchozí simulace (3.5.1).



Obr. 3.20: Graf propustnosti na aplikační vrstvě s přístupem TDD



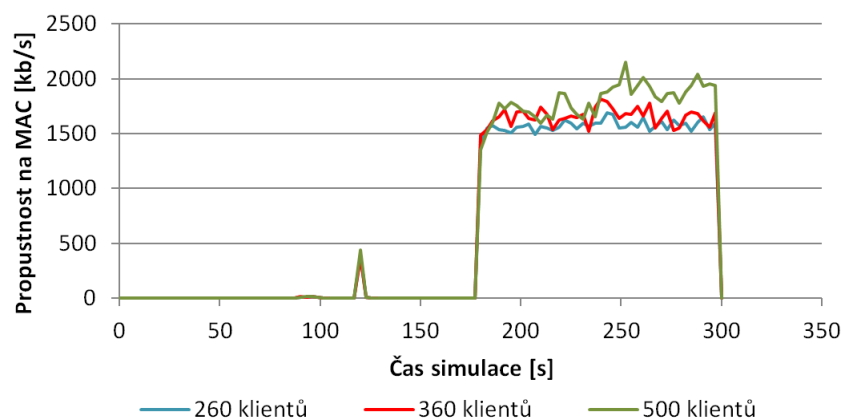
Obr. 3.21: Porovnání propustnosti na aplikační vrstvě u přístupů FDD a TDD

Vliv přetížení na propustnost eNodeB

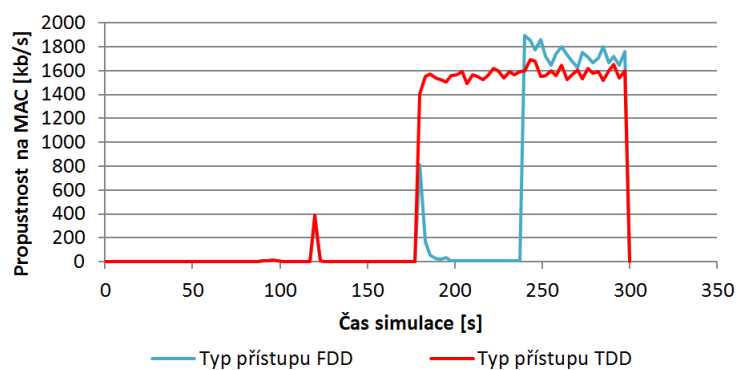
Graf číslo 3.20 zobrazuje propustnost FTP dat základnovou stanicí. Je zřejmé, že přístup TDD je schopen obsloužit menší počet klientů než FDD. Pro porovnání rozdílů je zde graf 3.21, obsahuje hodnoty ze simulací s TDD a FDD přístupem při 260 klientech.

Vliv přetížení sítě na přenášená data na MAC vrstvě eNodeB

Graf 3.22 zobrazuje přenos dat na MAC vrstvě základnové stanice. Z grafu 3.23 vyplývá, že TDD přístup vyprodukuje velké množství režijních dat. Tyto data zahltní bezdrátové rozhraní natolik, že přenos uživatelských dat je velmi omezený. Porovnání je vytvořené pro scénáře s 260 klienty.



Obr. 3.22: Graf propustnosti na MAC vrstvě s přístupem TDD



Obr. 3.23: Porovnání propustnosti na MAC vrstvě u přístupů FDD a TDD

Vliv přetížení na připojené stanice

Při změně přístupu k médiu nenastala v těchto grafech žádná změna, proto platí stejné výsledky jako v bodě 3.5.2.

4 PŘEDCHÁZENÍ NEDOSTATKŮM LTE SÍTĚ

Tato kapitola obsahuje teoretické návrhy protiopatření, které by měly omezit problémy sepsané v sekci 2.6. Každý návrh je odsimulován a porovnán s výsledky bez aplikovaného vylepšení z předchozích simulací.

4.1 Nedostatek přenosového pásma

Pro lepší využití přenosového pásma musíme přenést velký objem dat přes úzké pásmo. Lepší efektivita je možno dosáhnout zvýšením počtu buněk. Proto jsou ve městech základnové stanice hustě vystavěny. Další zlepšení nastane při použití TDD přístupu k bezdrátovému médiu. Tento jev byl odsimulován a porovnán v sekci 3.4.1.

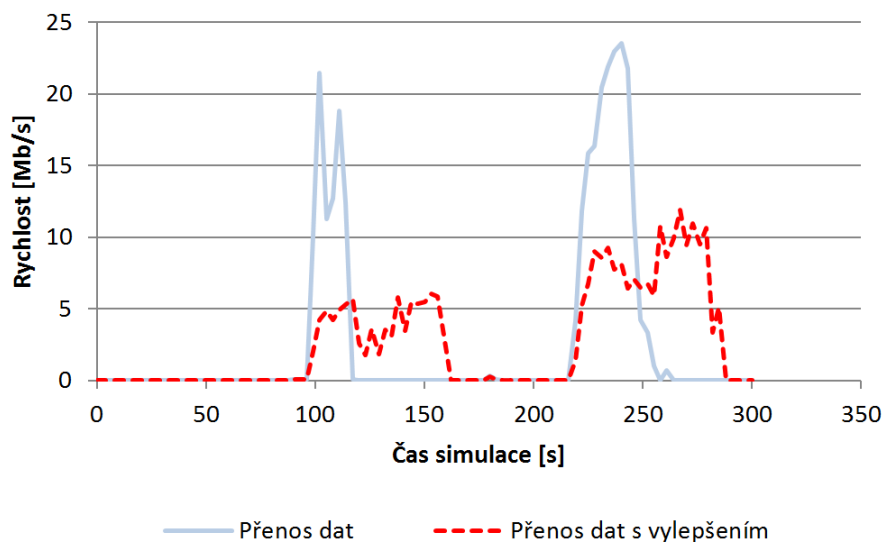
4.2 Přetížení bezdrátového rozhraní

Proti krátkodobému přetížení základnové stanice by bylo vhodné, aby M2M zařízení přistupovaly k síti zcela náhodně. Zatížení sítě by se pak rovnoměrně rozprostřelo v čase a nedocházelo by ke krátkodobému přetěžování základnových stanic. Toto řešení však není na straně poskytovatele služeb, ale na straně výrobců M2M zařízení. Provozovatelé LTE sítí však mohou k tomuto kroku donutit výrobce pomocí cen připojení za periodický, nebo náhodný přístup.

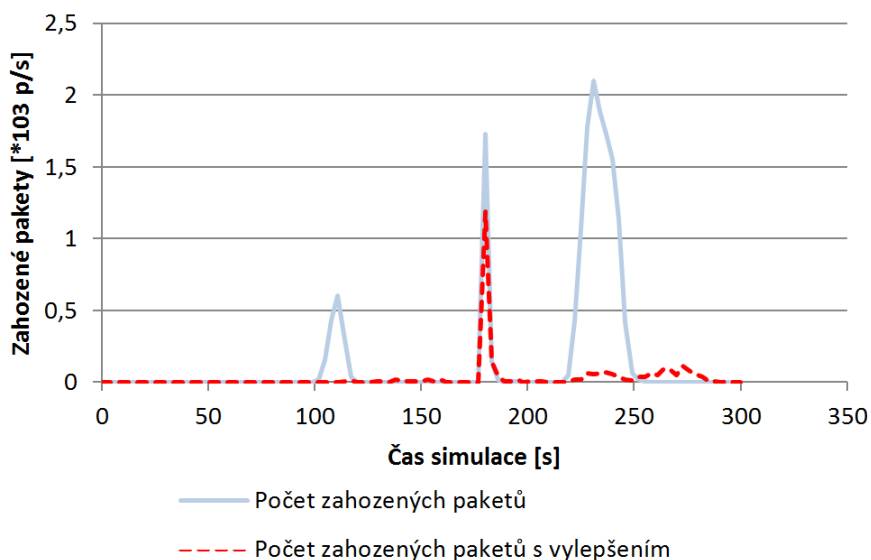
4.2.1 Simulace v čase rozptýlené M2M komunikace

Scénář byl použit stejný jako v bodě 3.4. Podle teoretických předpokladů byl přidán rozptyl pro přístup k FTP serveru. Stanice se tak budou dotazovat v náhodném čase rozptýleném do 60 s. Následující grafy zobrazí porovnání scénáře bez a s vylepšením.

Graf 4.1 zobrazuje porovnání přenosu dat při implementaci rozprostření požadavků v čase. Rozprostření mělo za následek snížení maximální přenosové rychlosti ve scénáři, síť by neměla být přetížena objemem dat.



Obr. 4.1: Porovnání přenášená data

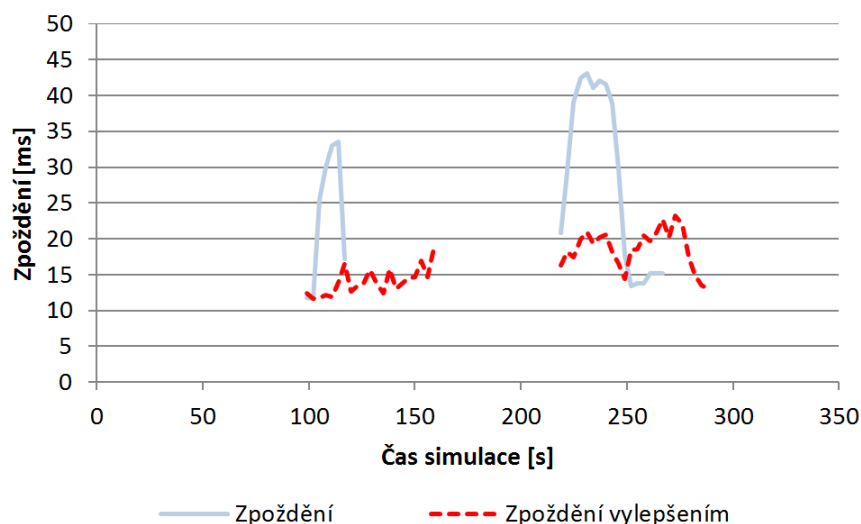


Obr. 4.2: Porovnání ztráty paketů

Graf 4.2 zobrazuje porovnání ztrátovosti paketů. Je patrné, že ztrátovost s tímto vylepšením velmi klesla (z maximálního počtu 2100 paketů za sekundu na 115 paketů za sekundu). Ve 3. minutě je ztrátovost způsobená rychlým připojováním nových

stanic při simulaci. V reálném prostředí se tak rychlé připojování nikdy nedosáhne, spíše bude probíhat postupné přepojování.

Graf 4.3 zobrazuje zpoždění ve vylepšeném scénáři. Sít není přetížená, proto se zpoždění drží nízké hodnoty do 23,2 ms.



Obr. 4.3: Porovnání zpoždění

4.3 Přetížení nově připojenými zařízeními

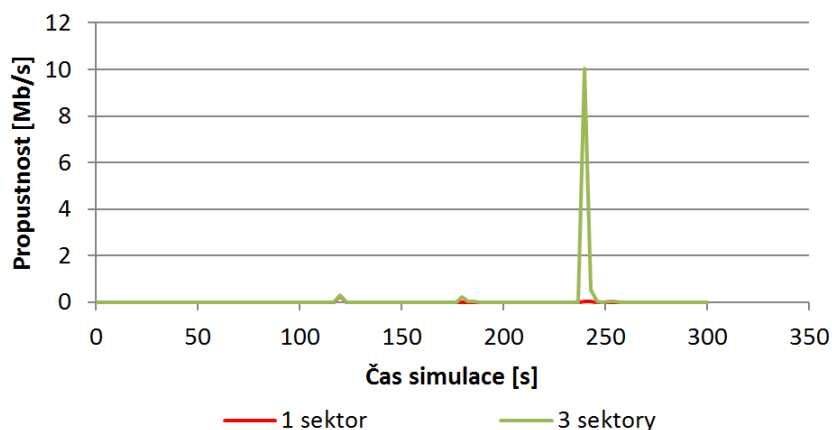
Každá základnová stanice má maximální teoretický počet klientských zařízení. Po překročení tohoto počtu dochází k nevyžádaným jevům. Tyto jevy jsou blíže popsány, odsimulovány a teoreticky vypočítány v sekci 3.5. Aby nedocházelo k tomuto typu přetížení, je nutné zvýšit maximální počet klientů v síti. Podle vzorce 3.5 můžeme maximální počet klientů ovlivnit šířkou pásma a počtem buněk. Nad šířkou pásma nebudeme v téhle sekci dále uvažovat, protože pásma je nedostatek a musí se s ním efektivně nakládat. Proto je nejlepším způsobem pro zvětšení maximálního počtu klientů zvýšit počet buněk. Počet sektorů na základnové stanici je obvykle 1, 3 a 6. Tyto čísla jsou určeny podle návrhu buněčného systému. V simulacích bylo použito vždy jednoho sektoru, počet sektorů bude zvětšen na 3.

Maximální teoretický počet klientů pro 3 sektory a šířku pásma 5MHz je podle rovnice 3.5:

$$klientMax = 25 * 12 * 75\% * 3 = 675 klientů \quad (4.1)$$

4.3.1 Simulace navrženého počtu sektorů

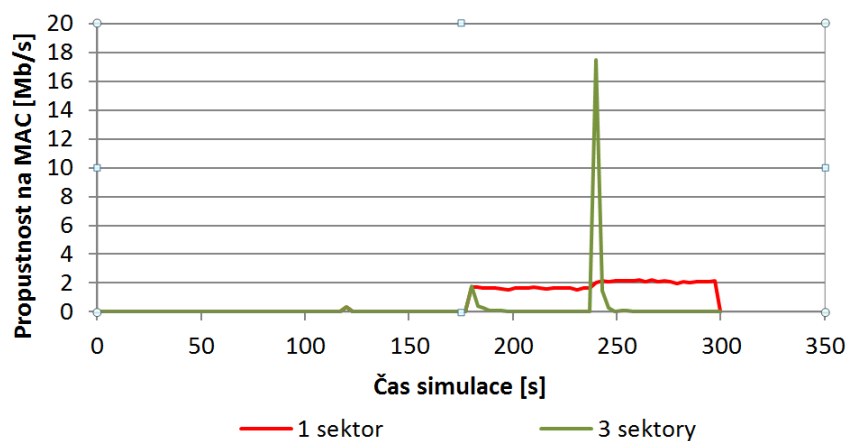
Scénář použitý pro tuto simulaci vychází z bodu 3.5.1. Pro tuto simulaci byl zvolen scénář s 360 klienty, nově vytvořený scénář má stejný počet stanic. Základnová stanice byla nahrazena za 3 sektorovou a stanice byly rozmístěny tak, aby v každém sektoru bylo 120 stanic. U scénáře se 3 sektory a 360 stanicemi nedocházelo k opětovným pokusům o spojení, protože základnová stanice nebyla přetížena počtem zařízení.



Obr. 4.4: Porovnání propustnosti na aplikační vrstvě

Graf 4.4 zobrazuje přenos dat na aplikační vrstvě základnové stanice. Všechny tři sektory jsou na tomto grafu uvažovány jako jedna základnová stanice a hodnoty ze sektorů jsou tedy sečtené. Do třetí minuty jsou průběhy stejné. Ve třetí minutě je malý nárůst způsobený nově připojenými stanicemi. Jedna buňka byla 360 klienty přetížena a nemohla tak přenést požadované data, proto jsou data přenesena 3 sektory ve třetí minutě větší než data přenesená jedním sektorem.

Graf 4.5 zobrazuje přenesená data na MAC vrstvě základnové stanice. Všechny 3 sektory jsou sečteny do jednoho grafu. Při přetížení jedné buňky došlo k zahlcení režijními daty, které nezabraly maximální možnou rychlost bezdrátového rozhraní, ale zamezily přenosu dat. Z tohoto důvodu jsou hodnoty pro 3 sektory daleko vyšší.



Obr. 4.5: Porovnání propustnosti na MAC vrstvě

Jedna přetížená buňka se opětovně pokoušela o připojení všech klientů, protože nejsou režijní data po 3 minutě nulová. U 3 sektorů jsou všechny stanice řádně připojeny, proto bez komunikace stanic nedochází k žádnému přenosu dat.

5 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo seznámit se s problematikou Machine to machine (M2M) komunikace a se sítěmi třetí a čtvrté generace. Následně pak navrhnout simulační model pro zjištění výkonnosti mobilních sítí v závislosti na jejich vytížení. Z výsledků simulačního modelu a teoretických informací navrhnout a odsimulovat vylepšení LTE sítě tak, aby nedocházelo k její přetěžování M2M komunikací.

První část práce se zabývá teoretickým rozbořem. Je rozdělena na problematiku M2M zařízení a teoretické shrnutí mobilních sítí 3. a 4. generace, které bylo nutné nastudovat pro simulaci výkonnostní analýzy mobilních sítí 4. generace.

Druhá část práce se zabývá výkonnostní analýzou mobilní sítě Long Term Evolution (LTE) v simulačním prostředí OPNET Modeler. Základní informace potřebné pro práci v programu OPNET Modeler jsou krátce uvedeny na začátku této části. V této části práce jsou odsimulovány tři scénáře. V prvním scénáři byl odsimulován a vypočítán poměr režijních dat sítě LTE. Poměr byl stanoven z teoretických znalostí a výsledků simulace. Druhý a třetí scénář se věnuje přetížení základnové stanice LTE. V druhém scénáři je základnová stanice přetížena přenosem dat, ve třetím scénáři je základnová stanice přetížena počtem nově připojených klientů. Ve všech třech simulacích byl scénář navržen podle znalostí z teoretické části práce. Pro dosažení požadovaných jevů bylo potřeba několikrát upravit scénáře podle výsledků z předchozích simulací. Dále byl porovnán rozdíl v přístupu k bezdrátovému médiumu při simulaci přetížení tokem dat a počtem připojených stanic. Přístup k médiumu FDD v porovnání k TDD lépe obstál při velkém počtu stanic kdy bylo dosaženo menší zpoždění naopak méně vhodný byl při přetížení tokem dat. Bylo zde odsimulováno i přetížení tokem dat s prioritizací služeb. Problém nastal při úplném přetížení stanice, kdy se zvedlo zpoždění u všech služeb.

Třetí část práce obsahuje tři návrhy pro implementaci M2M komunikace do LTE sítě. První návrh je odvozen ze simulace přetížení tokem dat, kde obstál TDD přístup k médiumu. Proto je tento přístup doporučen jako zlepšení výkonu sítě. Druhý návrh je zaměřen na nastavení M2M zařízení a na plánování jejich požadavků při komunikaci. Zde je doporučeno rozprostřít požadavky v čase, aby nedocházelo ke krátkodobému přetížení základnové stanice. Toto přetížení by mohlo mít za následek i zhoršení ostatních služeb, které mají vyšší prioritu. Třetím a posledním návrhem je zvýšení maximální kapacity sítě počtem sektorů, tedy v praxi vyšší hustotou buněk. Po aplikování tohoto zlepšení do schématu bylo možné bezproblémově obsloužit 360 stanic, které jednu buňku základnové stanice přetížily.

Závěrem lze říci, že u všech simulací dosažené výsledky odpovídaly teoretickým předpokladům. Úspěšné byly všechny tři návrhy vylepšení, které by měly pomoci bezpečně implementovat M2M komunikaci do LTE sítí.

LITERATURA

- [1] *M2M communications: a systems approach*. 1st ed. Editor David Boswarthick, Omar Elloumi, Olivier Hersent. Chichester: John Wiley, 2012, xxiii, 308 s. ISBN 978-1-119-99475-6.
- [2] HERSENT, Olivier, David BOSWARTHICK a Omar ELLOUMI. *The internet of things: applications to the smart grid and building automation*. 1st ed. Editor David Boswarthick, Omar Elloumi, Olivier Hersent. Hoboken: John Wiley, 2012, xxv, 344 s. ISBN 9781119994350.
- [3] The Evolution of M2M. AERIS COMMUNICATIONS. *Aeris Communications [online]*. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: <http://info.aeris.com/the-evolution-of-m2m-thank-you?submissionGuid=717daaff-4edf-4a4b-9d79-b769f440d94b>
- [4] 3GPP Official Page. 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. *3GPP Official Page [online]*. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: <http://www.3gpp.org/>
- [5] 3GPP2 Official Page. 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT 2. *3GPP2 Official Page [online]*. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: <http://www.3gpp2.org/>
- [6] T-Mobile Czech Republic a.s. T-MOBILE. T-Mobile - Mobilní internet [online]. [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: <http://www.t-mobile.cz/web/cz/osobni/internet/mobilni-internet>
- [7] DAHLMAN, Erik, Stefan PARKVALL a Johan SKÖLD. *4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. Amsterdam: Academic Press, 2011, xxiv, 431 s. technology/telecommunications. ISBN 978-0-12-385489-6.
- [8] SAUTER, Martin. *3g, 4g and beyond: bringing networks, devices, and the web together*. 2nd ed. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley and Sons, 2013, p. cm. ISBN 978-111-8341-483.
- [9] LU, Willie W. *Broadband wireless mobile: 3G and beyond*. 2nd ed. Hoboken, NJ: J. Wiley, 2002, xi, 376 p. ISBN 04-714-8661-2.
- [10] OPNET TECHNOLOGIES INC.: *OPNET Modeler Product Documentation Release 14.5*, OPNET Modeler, USA 2008

- [11] SEVINDIK, Volkan, Jiao WANG, Oguz BAYAT, Jay WEITZEN, Volkan SEVINDIK, Jay WEITZEN, Jiao WANG a Oguz BAYAT. Performance evaluation of a real long term evolution (LTE) network. *37th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks – Workshops*. IEEE, 2012, s. 679-685. DOI: 10.1109/LCNW.2012.6424050.
- [12] CISCO. *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013 2018: White Paper*. San Jose, CA, 2014.
- [13] HASAN, Monowar, Ekram HOSSAIN a Dusit NIYATO. Random access for machine-to-machine communication in LTE-advanced networks: issues and approaches. *IEEE Communications Magazine*. 2013, vol. 51, issue 6, s. 86-93. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6525600.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

M2M	Machine to machine
M2(CN2)M	Machine to (Communication Network to) Machine
SNMP	Simple Network Management Protocol
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
M2MPW	Machine to Machine-Physic layer-Wireless
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
UWB	Ultra wideband
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
ATIS	Alliance for Telecommunications Industry Solutions
CCSA	Certification in Control Self-Assessment
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
TTA	Telecommunications Technology Association
TTC	Telecommunication Technology Committee
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
SCDMA	Synchronous Code Division Multiple Access
CDMA2000	Code division multiple access 2000
HSPA	High Speed Packet Access
LTE (e-UTRA)	Long Term Evolution (Universal Terrestrial Radio Access)
CDMA2000 R. A	Code division multiple access 2000 Revision A
EV-DO R. B	Evolution-Data Optimized Revision B
LTE Advanced	Long Term Evolution Advanced
3GPP	The 3rd Generation Partnership Project

IoT	Internet of Things
IoO	Internet of Objects
ISO/OSI	International Organization for Standardization/The Open Systems Interconnection
DDoS	distributed denial of service
IP	Internet Protocol
MAC	media access control
H2H	Human to Human
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
WPAN	Wireless Personal Area Network
PLC	power-line communication
M-BUS	meter bus
IETF	The Internet Engineering Task Force
6LoWPAN	IPv6 Low power Wireless Personal Area Networks
IPv6	Internet Protocol version 6
MTU	Maximum transmission unit
NASA	National Aeronautics and Space Administration
AMPS	Advanced Mobile Phone System
GSM	Global System for Mobile Communications
NFC	Near Field Communication
GPRS	General Packet Radio Service
RFID	Radio Frequency Identification
WLAN	Wireless local area network
WPA	Wi-Fi Protected Access

IDEA	International Data Encryption Algorithm
AES	Advanced Encryption Standard
DES	Data Encryption Standard
RSA	Šifrovací protokol s veřejným klíčem
TLS	Transport Layer Security
SSL	Secure Sockets Layer
FCC	Federal Communications Commission
NMT	Nordic Mobile Telephone
TACS	Total Access Communication System
TDMA	Time division multiple access
CDMA	Code division multiple access
SMS	Short message service
3GPP2	The 3rd Generation Partnership Project 2
TIA	Telecommunications Industry Association
PTMP	Point to Multipoint
FDMA	Frequency-division multiple access
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing
OFDMA	Orthogonal frequency division multiple access
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple-input multiple-output
MME	Mobility Management Entity
SGSN	Serving GPRS support node
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
MAP	Mobile Application Part
SIM	Subscriber identity module

RNC	Radio Network Controller
QoS	Quality of service
TD-SCDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
IMS	IP Multimedia Subsystem
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High-Speed Uplink Packet Access
64QAM	Quadrature amplitude modulation
ICIC	Inter-cell interference coordination
SAE	System Architecture Evolution
MBMS	Multimedia Broadcast/Multicast Service
Serving-GW	Serving Gateway
GTP	GPRS Tunneling Protocol
eNodeB	Evolved Node B
FTP	File Transfer Protocol
TDD	Time Division Duplex
FDD	Frequency Division Duplex
ToS	Type of service
VoIP	Voice over IP
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
VNI	Visual Networking Index
UE	User Equipment

6 PŘÍLOHY

Tato práce obsahuje datový disk, na kterém je elektronická verze práce. Na tomto disku jsou umístěny všechny scénáře, se kterými se v této práci pracovalo.

Soubory na disku

- **VYKONNOSTNI_ANALYZA_MOBILNI_SITE_PRO_M2M_KOMUNIKACE.pdf** - elektronická verze bakalářské práce
- **SIMULACE.zip** - archiv obsahující všechny scénáře
 - **Rezijni_data_LTE** - složka, obsahující scénář použitý v bodě 3.3
 - **Pretizeni_site_prenasenyymi_daty** - složka, obsahující scénáře použité v sekci 3.4
 - * **Pretizeni_daty_FDD.opcfa** - scénář použitý v bodě 3.4
 - * **Pretizeni_daty_TDD.opcfa** - scénář použitý v bodě 3.4.1
 - * **Pretizeni_daty_QoS.opcfa** - scénář použitý v bodě 3.4.2
 - **Pretizeni_nove_pripojenymi_zarizenimi** - složka, obsahující scénáře použité v sekci 3.5
 - * **260klientu_FDD.opcfa**
360klientu_FDD.opcfa
500klientu_FDD.opcfa - scénáře použity v bodě 3.5.2
 - * **260klientu_TDD.opcfa**
360klientu_TDD.opcfa
500klientu_TDD.opcfa - scénáře použity v bodě 3.5.3
 - **Predchazeni_nedostatkum_LTE_site** - složka, obsahující scénáře použité v kapitole 4
 - * **Rozptylena_M2M_komunikace.opcfa** - scénáře použity v bodě 4.2.1
 - * **Vice_sektoru.opcfa** - scénáře použity v bodě 4.3.1