UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2016 Pavel Homolka

Univerzita Pardubice

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Analýza reálného provozu mobilních datových sítí

Pavel Homolka

Bakalářská práce

2016

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: **2015/2016**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Pavel Homolka**
Osobní číslo:	**I13130**
Studijní program:	**B2646 Informační technologie**
Studijní obor:	**Informační technologie**
Název tématu:	**Analýza reálného provozu mobilních datových sítí**
Zadávající katedra:	**Katedra informačních technologií**

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je ověřit teoretické předpoklady a kapacity využití mobilních datových sítí nové generace. Autor práce podrobně představí architekturu mobilních datových sítí typu 3G, HSPA, HSPA+ a LTE. Autor dále zpracuje metodiku měření základních síťových parametrů. V praktické části autor vyhodnotí naměřená data, jež ověří ovlivnění parametrů přenosu v závislosti na vzdálenosti vysílače, profilu terénu, počtu dostupných BTS apod.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **50**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

RODRIGUEZ, Jonathan. Fundamentals of 5G mobile networks. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd, 2015, pages cm. ISBN 9781118867525.

METSALA, Esa a Juha SALMELIN. LTE backhaul: planning and optimization. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2015, pages cm. ISBN 9781118924648.

Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Josef Horálek, Ph.D.**
Katedra informačních technologií

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2016**

Univerzita Pardubice Česká republika

L.S.

prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan

Mgr. Josef Horálek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2016

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 10. 5. 2016

Pavel Homolka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce, jímž byl pan Mgr. Josef Horálek, Ph.D., za odbornou pomoc, cenné připomínky a trpělivost při zpracování mé bakalářské práce.

ANOTACE

Cílem práce je ověřit teoretické předpoklady a kapacity využití mobilních datových sítí nové generace. Autor práce podrobně představí architekturu mobilních datových sítí typu 3G, HSPA, HSPA+ a LTE. Autor dále zpracuje metodiku měření základních síťových parametrů. V praktické části autor vyhodnotí naměřená data, jež ověří ovlivnění parametrů přenosu v závislosti na vzdálenosti vysílače, profilu terénu, počtu dostupných BTS apod.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mobilní datová síť, 3G, 4G, UMTS, HSDPA, HSUPA, HSPA+, HSPA+ DC, LTE, LTE-A, mobilní, data, síť

TITLE

Analysis of the real network traffic of mobile data networks

ANNOTATION

The purpose of thesis is to verify the theoretical assumptions and the capacity utilization of mobile data networks of the new generation. The author presents details of the architecture of mobile data networks type of 3G, HSPA, HSPA + and LTE. Then the author processes the measurement methodology of basic network parameters. The practical part evaluates the measured data to verify the influence of transmission parameters depending on the distance of the transmitter, the terrain profile, the number of available etc.

KEYWORDS

Mobile data network, 3G, 4G, UMTS, HSDPA, HSUPA, HSPA+, HSPA+ DC, LTE, LTE-A, mobile, data, network

OBSAH

0 ÚVOD 14

1 Literární rešerže mobilních datových sítí 16

2 UNIVERSAL MOBILE TELECOMMUNICATIONS SYSTEM (UMTS) A JEHO EVOLUCE 17

2.1 Úvod do UMTS 17

2.2 Vývoj UMTS 17

2.3 Architektura sítě UMTS 18

2.4 High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) – 3,5G 20

2.5 High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) – 3,75G 21

2.6 HSPA+ a další vývoj 22

3 LONG TERM EVOLUTION (LTE) 23

3.1 Úvod – LTE a 4G 23

3.2 Architektura sítě LTE 24

3.3 Techniky pro navyšování propustnosti mobilních datových sítí 25

3.3.1 Využívání systému více antén 25

3.3.2 Sdružování nosných 26

3.4 Kategorie LTE/LTE-A 28

4 FREKVENČNÍ SPEKTRUM PRO VYSOKORYCHLOSTNÍ MOBILNÍ DATOVÉ SÍTĚ 29

5 PRAKTICKÁ ČÁST 33

5.1 Metodika měření parametrů mobilních datových sítí 33

5.2 Výsledky měření parametrů mobilních datových sítí 38

5.2.1 Palác Pardubice (Masarykovo náměstí, Pardubice) 38

5.2.2 Koleje Univerzity Pardubice – Pavilon A (ulice Studentská, Pardubice) 40

5.2.3 Jankov (okres Pelhřimov, kraj Vysočina) 42

5.2.4 Jankov (okres Pelhřimov, kraj Vysočina) 44

6 ZÁVĚR 47
7 Použitá literatura 48

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 Síťová architektura UMTS 19
Obrázek 2 Ilustrace sdíleného kanálu HS-DSCH v porovnání s běžnými kanály UMTS 20
Obrázek 3 Architektura sítě LTE 24
Obrázek 4 Možnosti sdružování nosných v LTE-A 27
Obrázek 5 ServiceMode – LTE 34
Obrázek 6 ServiceMode – WCDMA 35
Obrázek 7 aplikace NetMonster – ilustrace 36
Obrázek 8 Aplikace Speedtest.net – ilustrace 37
Obrázek 9 Umístění základnových stanic – Palác Pardubice (T-Mobile/O2, Vodafone) 38
Obrázek 10 Umístění základnových stanic – Koleje Univerzity Pardubice (T-Mobile/O2, Vodafone) 40
Obrázek 11 Umístění základnových stanic – Vyskytná 42
Obrázek 12 Terénní profil – Vyskytná 42
Obrázek 13 Terénní profil – Milíčov 43
Obrázek 14 Umístění základnových stanic – Komorovice 44
Obrázek 15 Terénní profil – Komorovice 45
Obrázek 16 Terénní profil – Milíčov 45

Tabulka 1 Definované kategorie LTE/LTE-A (rok 2016) 28
Tabulka 2 UMTS FDD (2100Mhz) 30
Tabulka 3 LTE FDD (800Mhz) 31
Tabulka 4 LTE FDD (2600Mhz) 32
Tabulka 5 Palác Pardubice – průměrné naměřené hodnoty parametrů pro WCDMA 39
Tabulka 6 Palác Pardubice – průměrné naměřené hodnoty parametrů pro LTE 39
Tabulka 7 Koleje Univerzity Pardubice – průměrné naměřené hodnoty parametrů pro WCDMA 41
Tabulka 8 Koleje Univerzity Pardubice – průměrné naměřené hodnoty parametrů pro LTE 41
Tabulka 9 Jankov (severní okolí) – průměrné naměřené hodnoty parametrů pro LTE 43
Tabulka 10 Jankov (jižní okolí) – průměrné naměřené hodnoty parametrů pro WCDMA 46
Tabulka 11 Jankov (jižní okolí) – průměrné naměřené hodnoty parametrů pro LTE 46

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

GSM	Global System for Mobile Communications
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
DC	Dual Carrier
2G	second generation wireless telephony technology
3G	third generation of mobile telecommunications technology
4G	fourth generation of mobile telecommunications technology
3GPP	Third Generation Partnership Project
ANSI	American National Standards Institute
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
RAN	Radio Access Network
UTRAN	UMTS Terrestrial RAN
CN	Core Network
IMS	IP Multimedia Subsystem
MIMO	Multiple Input / Multiple Output
UE	User Equipment
HS-DSCH	High-Speed Downlink Shared Channel
TTI	Time Transmission Interval
MIMO	Multiple Input / Multiple Output
SIMO	Single Input / Multiple Output

MISO	Multiple Input / Single Output
16-QAM	16-State Quadrature Amplitude Modulation
64-QAM	64-State Quadrature Amplitude Modulation
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	LTE Advanced
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Domain Multiple Access
E-UTRAN	Evolved UTRAN
EPC	Evolved Packet Core
S-GW	Serving Gateway
MME	Mobility Management Entity
P-GW	Packet Data Network Gateway
PCRF	Policy Control and Charging Rules Function
HSS	Home Subscriber Server
TDD	Time Division Duplex
FDD	Frequency Division Duplex
EARFCN	E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number
DD	Digital dividend
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSCP	Received Signal Code Power
ME	Mobile Equipment
USIM	UMTS Subscriber Identity Module
PLMN	Public Land Mobile Network

ISDN	Integrated Services Digital Network
PSTN	Public Switched Telephone Network
RNC	Radio Network Controller
HLR	RNC Radio Network Controller
MSC/VLR	Mobile Services Switching Centre/Visitor Location Register
GMSC	Gateway MSC
SGSN	Serving GPRS (General Packet Radio Service) Support Node
GGSN	Gateway GPRS Support Node
LTE RRC	LTE Radio Resource Control
MCC-MNC	Mobile Country Codes-Mobile Network Codes
LTE DL BW	LTE Downlink Bandwidth
SNR	Signal to Noise Ratio
CID	Cell ID

0 ÚVOD

Je pozoruhodné sledovat, jakým významným způsobem došlo v posledních několika letech (především od roku 2009) k masivnímu rozvoji vysokorychlostních mobilních datových sítí na území České republiky. V současné době (rok 2016) můžeme být svědky velké mediální kampaně mobilních operátorů v České republice, jejímž cílem je přesvědčit uživatele mobilních telefonů, že právě jejich mobilní datová síť je ta nejlepší.

Aktuálně je spuštěno na území České republiky hned několik mobilních bezdrátových technologií, které lze označit jako vysokorychlostní. Jedná se především o, v současné době stále nejpoužívanější, sítě 3. generace reprezentované technologií UMTS a jejími nadstavbami pro výrazné zrychlení přenosu dat směrem k uživateli i směrem opačným. Tyto technologie, které „vylepšují“ UMTS, představují především HSDPA, HSUPA, HSPA+ a HSPA+ DC. Všechny tyto technologie jsou implementovány v mobilních sítích operátorů v České republice. Jejich rozvoj ale po roce 2011 téměř ustrnul. Od roku 2014 se však začala masivně nasazovat nová technologie pro vysokorychlostní přenos dat, která se označuje jako LTE. V současné době už dokonce na některých místech České republiky (jedná se především o Prahu) začíná být nasazována technologie, která představuje evoluci LTE. Tato technologie má označení LTE-A a jedná se o první technologii mobilních datových sítí, která se může označit jako „síť 4. generace“. Avšak aktuálním problémem pro využití této technologie je především stále relativně malý počet koncových zařízení, ačkoliv každým měsícem se tato situace zlepšuje.

Všechny výše zmíněné technologie jsou nesmírně zajímavé jak z technického pohledu, tak také z pohledu uživatele dané vysokorychlostní mobilní datové technologie. Z tohoto důvodu jsem si zvolil toto téma, jelikož se domnívám, že bude velice zajímavé ho zpracovat. V teoretické části krátce uvedu do problematiky výše zmíněných mobilních datových technologií 3. a 4. generace. Kromě výše zmíněných technologií se zmíním i o frekvenčních přídělech jednotlivých operátorů v České republice, jelikož bez nich by nebylo možné dané technologie provozovat.

Dané technologie umožňují dosahovat rozdílných rychlostí přenosu dat směrem k uživateli i od uživatele, či dosahují rozdílné hodnoty parametru ping (ping představuje dobu mezi vysláním paketu a následnou odpovědí na něj). Tyto síťové vlastnosti budu testovat v praktické části na výše zmíněných technologiích (v závislosti na tom, které technologie podporuje mobilní operátor a moje testovací zařízení). Dále se pak pokusím naměřená data

vyhodnotit a vyvodit z nich závěr. Data pro praktickou část budou sbírána jednak v Pardubicích (zástupce města), tak na venkově (u obce Jankov na Vysočině).

Všechny tyto technologie využívají systému, kde je mobilní síť rozdělena na tzv. buňky, v rámci kterých jsou sdíleny uváděné teoretické rychlosti dané technologie. V praxi se nejčastěji setkáme s tím, že jedna základnová stanice obsluhuje až 4 (typicky 3) buňky v rámci jedné mobilní datové technologie.

1 LITERÁRNÍ REŠERŽE MOBILNÍCH DATOVÝCH SÍTÍ

Mobilní datové sítě představují takové bezdrátové sítě, jejichž dosah není limitován pouze na lokální úroveň (např. úroveň budovy), ale jejichž rozsah je plošný. Počínaje sítěmi 3G lze hovořit o tom, že mobilní datové sítě poskytují širokopásmový přístup k internetu.

Mobilní datové technologie nové generace, které budu v této práci podrobně analyzovat, zaštiťuje soubor norem vyhovujícím standardu International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000) vydaného unií ITU. Takové datové technologie, které danou specifikaci splňují, jsou označované jako 3G neboli sítě 3. generace.

Problematice datových sítí spadajících do standardu 3G se podrobně věnuje publikace 3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband.

Nejtypičtějším zástupcem patřícím do „rodiny“ 3G je mobilní síť UMTS. Tato technologie se stala nástupcem mobilní sítě GSM (2G). Jejími hlavními cíli bylo přinést podporu video hovorů a navýšení celkové datové propustnosti sítě. Původní síť UMTS (Release 99) standardizovaná v roce 1999 dosahovala rychlosti pouze 384 kb/s. Na tuto technologii je zaměřena publikace WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications. Další publikací věnující se základům sítě UMTS je Third Generation Mobile Communication Systems.

Datová propustnost „holé“ sítě UMTS se záhy ukázala jako nedostatečná. Z tohoto důvodu byly vyvinuty nadstavby, které měly propustnost sítě mnohonásobně navýšit. Těmito technologiemi se staly HSDPA, HSUPA a HSPA+. HSDPA je protokol, který výrazně navýšil rychlost stahování v síti UMTS (až na 14,4Mb/s). Sítě obsahující podporu HSDPA se označují jako 3,5G. Protokol HSUPA umožnil zvýšení rychlosti také v odchozím směru (až na 5,76 Mb/s). Mobilní síť implementující HSUPA je označována jako 3,75G. Protokol HSPA+ navýšil rychlost v příchozím směru až na 21,6 Mb/s.

Nejmodernější mobilní datovou technologií, která formálně náleží do sítí 3. generace je LTE. Tato technologie byla navržena jako čistě datová síť (veškerá komunikace je realizována skrze pakety). Panovaly spory mezi odbornou veřejností, zda lze tuto síť považovat stále za 3G, jelikož přináší vskutku rozsáhlé množství změn sahajících až k architektuře samotné sítě. Nakonec se přijalo stanovisko, že oficiální označení sítě bude 3,9G. Rychlosti v této síti mohou dosahovat až 300/75 Mb/s. Tuto technologii důkladně rozebírají Esa Metsäla a Juha Salmelinb v publikaci LTE backhaul: planning and optimization.

2 UNIVERSAL MOBILE TELECOMMUNICATIONS SYSTEM (UMTS) A JEHO EVOLUCE

2.1 Úvod do UMTS

Předchozí generace mobilních sítí 2G (GSM) byla navržena pro bezproblémový přenos hlasu, ale jejím velkým úskalím je rychlost přenosu dat. Vzhledem k rostoucím nárokům mobilních aplikací na dostupnou šířku pásma a dostatečnou kvalitu dané služby (např. při prohlížení videa v „reálném čase“ apod.), byl již na konci minulého století započat vývoj mobilních sítí nové generace, dnes označované jako „3G“. Jedná se tedy o síť navrženou jak k standardnímu přenosu hlasu (jako GSM), tak již od počátku jsou důležitým atributem sítě přenos dat.

Z tohoto důvodu bylo v roce 1998 vytvořeno sdružení 3GPP (Third Generation Partnership Project). Mezi členy tohoto sdružení patří standardizační subjekty z celého světa. Příkladem může být ANSI ze Spojených států amerických či ETSI z Evropy. Cílem této partnerské skupiny bylo vytvoření standardu, vyhovujícímu cílům mobilní sítě 3. generace. Tento standard dostal název UMTS. V obecné rovině pod označením „3G“ není myšlena jedna konkrétní technologie, ale spíše souhrn nejrůznějších technických specifikací a vylepšení, které vyhovují specifikacím stanoveným 3GPP.

2.2 Vývoj UMTS

Standard UMTS byl poprvé specifikován pod označením Release 99, přičemž je postaven na standardu sítě GSM, z čehož nepřímo vyplývá zpětná kompatibilita s přechozí generací. Release 99 přinesl, jako novinku, nový typ rádiové přístupové sítě, které se označuje jako UTRAN. Dle původní specifikace standard umožnoval dosažení teoretické rychlosti 2Mb/s pro stahování dat na uživatelské zařízení a 384kb/s pro jejich odesílání. V roce 2001 byla přestavena specifikace pod označením Release 4, která přinesla několik dílčích změn, které se zaměřovaly především na úpravu páteřní sítě UMTS. Mezi klíčová vylepšení patřilo především aplikování systému IMS (IP Multimedia Subsystem) a v neposlední řadě také striktní oddělení uživatelských a kontrolních dat, které využívají spojově orientovaný přenos.

Další specifikace pak přinášely vylepšení primárně zaměřené na poskytnutí co nejvyšší rychlosti přenosu dat. Release 5 poprvé specifikoval technologii HSDPA (High Speed Downlink Packet Access), která zvýšila sdílenou přenosovou kapacitu jedné mobilní buňky až

na 14,4Mb/s. Vzhledem k tomu, že rychlost směrem od uživatele zůstávala stále na maximu 384kb/s, v Release 6 byla přestavena technologie HSUPA (High Speed Uplink Packet Access), která měla výše uvedený nedostatek odstranit. Maximální rychlost směrem od uživatele zde dosáhla hodnoty 5,76Mb/s. Zatím poslední specifikací, která se zabývá vylepšením UMTS technologie, je Release 7. Ten přináší několik technik, jak navýšit přenosovou rychlost v příchozím i odchozím směru (efektivnější modulace, MIMO, …). Tato technologie dostala označení HSPA+.

Šířka frekvenčního kanálu pro UMTS (platí i pro jeho nadstavby) je 5Mhz.

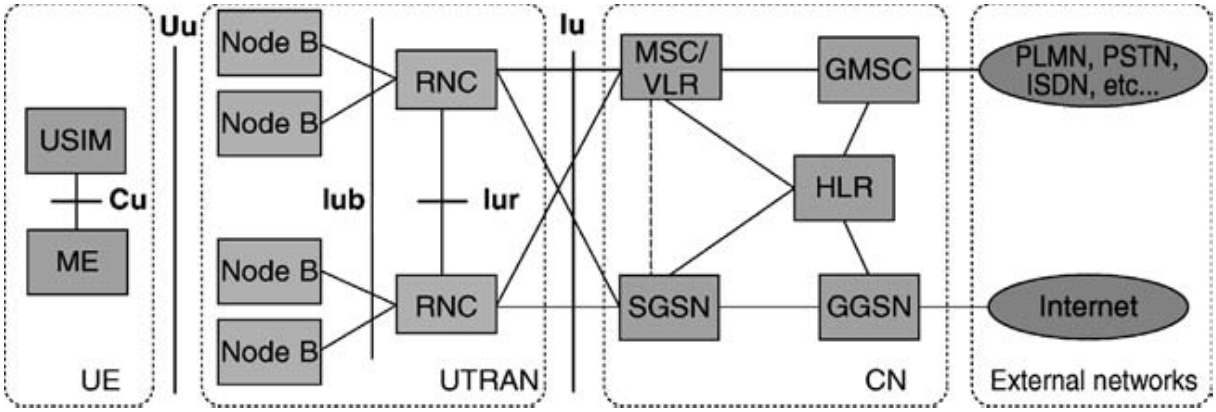
2.3 Architektura sítě UMTS

Architektura UMTS systému je tvořena několika logickými prvky sítě, přičemž každý prvek má definované určité funkce. Síťové prvky mohou být seskupovány do větších celků jak na základě podobné funkčnosti, tak na základě toho, do které podsítě patří.

Dle funkčního hlediska lze síťové prvky rozdělit na Radio Access Network (RAN, UMTS Terrestrial RAN = UTRAN), Core Network (CN) a User Equipment (UE). RAN obstarává všechny funkcionality, které primárně představují komunikaci s bezdrátově připojenými uživatelskými zařízeními. CN část je zodpovědná za přepínání a směrování hovorů a datových připojení do externích sítí. UE pak představuje rozhraní mezi uživatelem a rádiovou částí sítě.

Vlastností systému UMTS je modularita, která povoluje provozovat několik síťových prvků stejného typu. V zásadě platí, že aby se daná UMTS síť dala označit za provozuschopnou, musí mít nejméně jeden logický síťový prvek od každého typu. Provozovat v rámci systému UMTS více entit stejného typu umožňuje vytváření dílčích sítí, které jsou funkční jak samostatně, tak v kooperaci s dalšími dílčími sítěmi. Takové dílčí sítě jsou vzájemně rozlišeny pomocí jednoznačných identifikátorů a nazývají se PLMN. Typicky platí, že jednu dílčí síť PLMN provozuje jeden mobilní operátor. Sítě typu PLMN mohou být propojeny nejen s dalšími sítěmi PLMN, ale i se sítěmi jiných typů (ISDN, PSTN, internet apod.).

Obrázek 1 Síťová architektura UMTS



(zdroj: WCDMA for UMTS: radio access for third generation mobile communications, s. 76)

UE se skládá ze dvou částí:

- Mobilní zařízení (ME) představuje rádiový terminál, který slouží pro komunikaci přes rozhraní Uu.
- USIM je čipová karta, která slouží k identifikaci uživatele mobilního zařízení. Provádí autentifikační algoritmy pro přístup k mobilnímu terminálu.

Architektura UTRAN zahrnuje 2 rozdílné prvky:

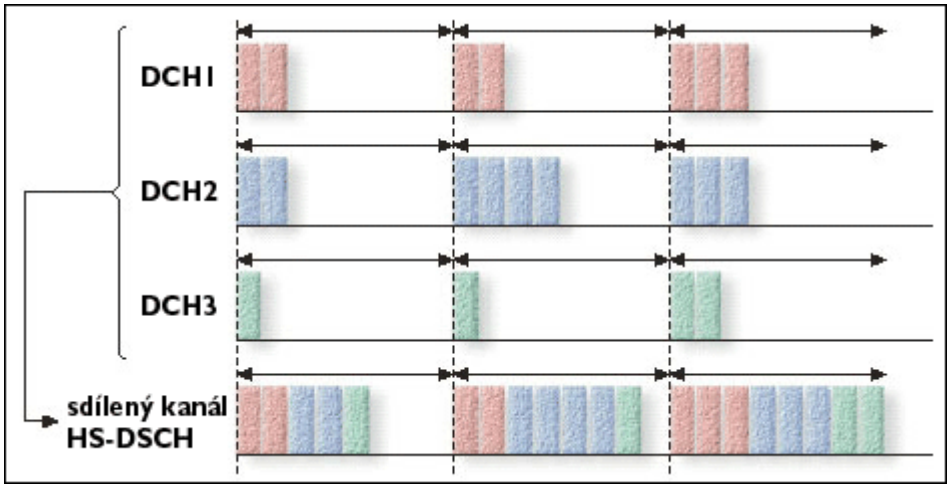
- Prvek Node B, který převádí datové toky mezi rozhraními Iub a Uu. Dále se uplatňuje při řízení zdrojů rádiových přenosů směrem k uživatelským zařízením a zpět.
- Radio Network Controller (RNC) řídí rádiové zdroje spadající do jeho domény (všechny prvky typu Node B, které jsou připojeny).

2.4 High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) – 3,5G

HSDPA označovaná též jako síť „3,5G“, představuje nadstavbu sítě UMTS, přičemž vylepšení sítě probíhá především na softwarové úrovni. Důvodem k nasazení této technologie bylo dosažení mnohem větší přenosové rychlosti směrem k uživateli a výrazné zlepšení kapacity datové sítě, přičemž rychlost odesílání dat zde zůstává totožná jako u „holého“ UMTS (384kb/s). HSDPA technologie byla poprvé definována v Release 5 a dle specifikace umožňuje dosažení přenosové rychlosti směrem k uživateli až 14,4Mb/s na jednu mobilní buňku. Změny v samotné síti se týkají především přístupové části UTRAN, přičemž principiálně nejdůležitější změnou zde je přesunutí několika procedur, které spravují rádiové zdroje, z RNC přímo do NodeB.

Pro HSDPA byl vytvořen nový komunikační kanál HS-DSCH, který dokáže efektivněji využít dostupné frekvenční spektrum k navýšení rychlosti přenášení dat. Data jsou přenášena pomocí paketů společně a dělena mezi jednotlivé uživatele až pomocí speciálních algoritmů.

Obrázek 2 Ilustrace sdíleného kanálu HS-DSCH v porovnání s běžnými kanály UMTS



(*zdroj: http://www.mobilmania.cz/clanky/technologie-hsdpa-nejrychlejsi-mobilni-data-jsou-za-humny/sc-3-a-1109670/default.aspx)*

V technologii HSDPA se uplatňuje několik technik, které slouží k dosažení vyšší rychlosti přenosu dat ve směru k uživateli. Jednou z takových technik je používání adaptivní modulace a kódování. Uživatel, který se nachází blízko základnové stanice NodeB a dosahuje dobré úrovně a kvality signálu, nepotřebuje tak důslednou ochranu proti potenciálním chybám při

přenosu dat jako uživatel na okraji buňky. Adaptivní modulace tudíž umožní uživateli dosáhnout vyšší přenosové rychlosti. Adaptivní modulace je prováděna přímo na úrovni základnové stanice NodeB.

Mezi nejdůležitější vlastnosti HSDPA patří to, že rádiové zdroje jsou převážně sdíleny mezi aktivními uživateli, přičemž výjimku zde tvoří zdroje určené pro klasické volání, případně pro streamování videa. Funkce, která se v HSDPA zabývá řízením toku dat a přiřazování rádiových prostředků jednotlivým zařízením, se nazývá „Rychlé plánování datových přenosů“. Dynamické přidělování prostředků má interval 2ms (UMTS má tuto hodnotu 10ms). Tento časový interval se nazývá TTI (Time Transmission Interval).

Poslední důležitá vlastnost HSDPA se označuje jako „Rychlé přeposílání chybných dat“. Při přenosu dat směrem k uživatelskému zařízení se může stát, že data budou nějakým způsobem poškozena. Mobilní stanice tedy bude muset data poslat znovu. V UMTS tuto funkcionalitu obstarává řídící RNC, zatímco v HSDPA má tento úkol na starosti přímo stanice NodeB, ke které je zařízení aktuálně připojeno.

2.5 High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) – 3,75G

Technologie HSUPA, která umožňuje rychlý přenos dat směrem od uživatele, byla poprvé představena v UMTS Release 6. Teoreticky dosažitelná rychlost přenosu dat zde, oproti „čistému“ UMTS a HSDPA (384kb/s), dosahuje hodnoty 5,76Mb/s. Oproti HSDPA, které zahrnuje jen programové vylepšení na úrovni základnové stanice NodeB a řídícího RNC, HSUPA přináší změny i na úrovni samotných mobilních terminálů, jelikož mobilní terminál odesílá data. Ačkoliv je z technického pohledu princip fungování HSDPA a HSUPA podobný, najdeme v něm několik rozdílů. Důležitou odlišností je způsob plánování pro rychlé přidělování zdrojů požadované základnové stanici. Další je pak především jiná technika pro rychlou adaptaci na změnu kvality signálu mezi uživatelským zařízením a NodeB, přičemž v HSUPA se uplatňuje technika regulace vysílacího výkonu příslušného mobilního zařízení (u HSDPA je tento problém řešen pomocí změny modulace a kódového poměru na úrovni základnové stanice).

Jak už bylo zmíněno, tak zásadní odlišností mezi HSDPA a HSUPA je způsob, jakým jsou datové přenosy plánovány a posléze pak přidělovány jednotlivým mobilním zařízením, která o ně požádají. Pro HSDPA platí, že rádiové zdroje se sdílí mezi aktivními mobilními

zařízeními. V technologii HSUPA je však všem aktivním uživatelům přiděleno specifické množství zdrojů paralelně. Každé mobilní zařízení, které podporuje technologii HSUPA, umožňuje adaptivní přidělování prostředků od NodeB každých 10ms.

V HSUPA má velký význam metoda rychlého datového plánovaní. Princip této metody spočívá v tomto: Jakmile má dané mobilní zařízení data, které má za úkol přenést, tak prvním krokem mobilního zařízení je odeslat požadavek k danému mobilnímu vysílači NodeB o přidělení rádiových prostředků. Základnová stanice poté, v případě úspěšného ověření požadavku, přidělí danému mobilnímu zařízení potřebné prostředky.

2.6 HSPA+ a další vývoj

Pokud má mobilní datová síť implementované technologie HSDPA i HSUPA, tak se taková síť souhrnně označuje jako HSPA. Vzhledem k tomu, že maximální rychlosti datového připojení v obou směrech (HSDPA a HSUPA) nebyly za krátký čas již dostatečné, v novějších specifikacích 3GPP (Release 7, Release 8) byly tyto rychlosti postupně navýšeny. Jako dobré způsoby pro navýšení propustnosti mobilní datové sítě se ukázaly především: efektivnější modulace signálu, používání systému více antén (MIMO), a agregace větší části frekvenčního spektra[1]. Použitím systému 2x2 MIMO je možno zdvojnásobit přenosovou rychlost v sestupném směru až na 28,8Mb/s. V případě použití efektivnější modulace signálu 64-QAM (HSDPA umožňuje maximálně 16-QAM) lze původní rychlost pro HSDPA (14,4Mb/s) navýšit až na 21,6Mb/s. Taková síť se již označuje „HSPA+“ (je založena na specifikaci Release 7). V případě použití systému 2x2 MIMO současně s touto modulací, lze dosáhnout teoretické rychlosti v příchozím směru až 43,2Mb/s. Specifikace Release 8 pak umožňuje další navýšení kapacity mobilní buňky pomocí techniky označované jako „DC“ (Dual Carrier), díky níž se zdvojnásobí původní šířka přenosového pásma na dvojnásobnou hodnotu (tudíž i maximální dosažitelná rychlost přenosu dat bude dvojnásobná). Technologii HSUPA lze vylepšovat obdobnými způsoby jako HSDPA, nicméně nejvíce je jako vylepšení zde využívána technologie 2x2 MIMO, po jejíž aplikaci dojde ke zvýšení teoretické rychlosti z původních 5,76 Mb/s na 11,5Mb/s.

[1] Tyto techniky jsou základem pro technologii LTE-A a budou popsány později.

3 LONG TERM EVOLUTION (LTE)

3.1 Úvod – LTE a 4G

Další milník ve vývoji mobilních datových sítí je znám pod označením LTE. Oficiálně je tato technologie specifikovaná sdružením 3GPP ve standardizačních normách Release 8 (uvolněno v roce 2008) a Release 9 (uvolněno v roce 2010). Podstatný rozdíl mezi UMTS a LTE spočívá v použité přenosové technologii. Zatímco v UMTS je pro přenos využita technologie WCDMA, tak v LTE jsou použity dvě různé přenosové technologie. Pro přenos dat směrem k uživateli se využívá technologie OFDMA, pro opačný směr toku dat je použita přístupová technologie SC-FDMA. Ačkoliv se jedná o „novou“ technologii bez přímé vazby na předchozí generace mobilních celulárních sítí, tak nesplňuje oficiální specifikace vydané standardizační organizací ITU pro zařazení do kategorie 4G. LTE technologie je tedy řazena do sítí třetí generace stejně jako UMTS a jeho nadstavby, přičemž nejčastěji bývá síť LTE oficiálně označována jako 3,9G.

První technologie, která splňuje požadavky ITU pro 4G, byla specifikována v Release 10 (uvolněno v roce 2011) pod označením LTE-A. „A“ zde znamená „Advanced“, což má ukazovat na to, že se jedná o technologii založenou na LTE, která byla specifikována v Release 8 a Release 9. LTE-A tedy představuje evoluci LTE a přidává tak k původní technologii nové možnosti a vylepšení. Mezi klíčová vylepšení zde patří především:

- schopnost technologie sdružovat nosné (frekvenční kanály),
- možnost ještě lépe vzájemně koordinovat vzájemné interference mezi překrývajícími se sousedními buňkami
- optimalizace technologie pro efektivní využívání více vysílacích a přijímacích antén na straně vysílací stanice i mobilního terminálu – MIMO.

Díky těmto vylepšením je možné splnit požadavky ITU pro sítě 4G, které požadují dosažení rychlosti přenosu dat 1Gb/s pro stacionární zařízení a 100Mb/s pro zařízení v pohybu (při rychlosti 100km/h).

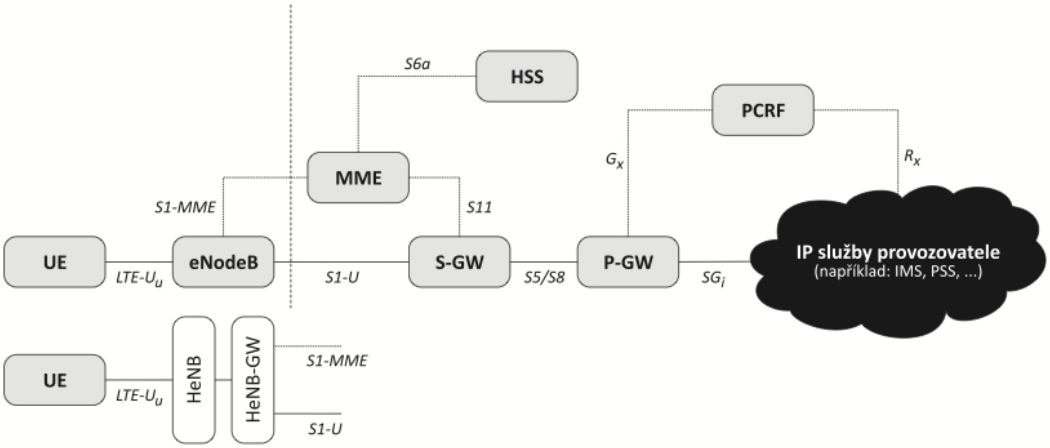
Šířka frekvenčního kanálu pro LTE může být: 1,4Mhz, 3Mhz, 5Mhz, 10Mhz a 20Mhz.

3.2 Architektura sítě LTE

Architektura sítě vychází z návrhu architektur mobilních datových sítí předchozích generací (GSM a UMTS). Zásadní odlišnost však spočívá v tom, že architektura sítě LTE umožňuje pouze přepojování paketů, zatímco UMTS umožňovala také přepojování okruhů (pro přenos hlasu). LTE architektura je složena ze dvou základních částí:

- přístupové části, která se označuje jako E-UTRAN
- jádra sítě, které se zde nazývá EPC

Obrázek 3 Architektura sítě LTE



(zdroj: https://publi.cz/books/236/04.html)

Přístupový část mobilní datové sítě LTE, tedy E-UTRAN, zahrnuje základnové stanice eNodeB (jedná se o obdobu označení základnových stanic jako u UMTS, přičemž počáteční písmeno „e“ představuje zkratku slova Evolved). Mezi úkoly každé základnové stanice patří: řízení a zajištění mobility uživatelů, plánování přenosu dat pro směry, přidělování rádiových prostředků, šifrování či propojení E-UTRAN s EPC (přístupové části a páteřní sítě).

Samotné jádro sítě je pak tvořeno několika prvky. Jedním z takových prvků je obsluhující brána (S-GW), jejímž úkolem je především přenášení paketů od všech uživatelských zařízení v síti. Úkolem prvku S-GW je také správa poplatků mezi jednotlivými operátory při roamingu. Dalším důležitým prvkem architektury sítě LTE je MME, jehož role je řízení signalizace mezi uživatelským zařízením a jádrem sítě. Mezi klíčové úkoly tohoto prvku patří

zajištění autentizace a autorizace uživatele či zabezpečení dat při jejich přenosu. Posledním velmi důležitým prvkem v jádře sítě je prvek, který obstarává řízení toku dat a podílí se na zajištění kvality jednotlivých služeb. Jedná se o prvek s označením P-GW. Příkladem jeho účelu může být zajištění minimální přenosové rychlosti pro aplikace v „reálném“ čase.

Jádro architektury sítě LTE-A pak kromě výše zmíněných prvků také zahrnuje 2 logické funkce:

- PCRF (Policy Control and Charging Rules Function) zahrnuje definice pro dodržování pravidel (např. určí, co se stane v případě, že uživatelský profil a požadovaná služba spolu dle definice pravidel nekorespondují).
- HSS (Home Subscriber Server) zahrnuje informace o uživatelských zařízeních připojených k síti (např. profil kvality služeb přidružených danému uživatelskému zařízení).

3.3 Techniky pro navyšování propustnosti mobilních datových sítí

Pro významné zvýšení přenosové kapacity mobilních buněk lze uvést 2 základní techniky používané v mobilních datových sítích nové generace.

3.3.1 Využívání systému více antén

Jednou z cest pro zvýšení přenosové kapacity buňky je používání systému s více anténami na straně vysílače i přijímače, přičemž zde dochází k paralelnímu přenosu dat. Kromě zvýšení přenosové rychlosti mezi komunikujícími stranami umožňuje částečně potlačit nepříznivé jevy, mezi nimiž lze zmínit pomalé nebo rychlé úniky, které pak mají za následek zhoršení kvality signálu.

Platí, že více antén je možné použít jak pouze na jedné z komunikujících stran (tedy buď na přijímači, nebo na vysílači), tak také na obou komunikujících stranách zároveň. V případě, že vysílající a přijímací strana nedisponují stejným množstvím antén, tak se takový anténní systém nazývá SIMO (Single Input / Multiple Output), případně MISO (Multiple Input / Single Output). V případě používání systému více antén (používá se pro mobilní datové sítě „nové“ generace) hovoříme o systému MIMO (Multiple Input / Multiple Output). Tento systém antén byl umožněn již v UMTS, nicméně velké uplatnění našel až v LTE, kde je počet antén rozšířen až na 4 (4x4 MIMO), v LTE-A pak dokonce na 8 antén (8x8 MIMO).

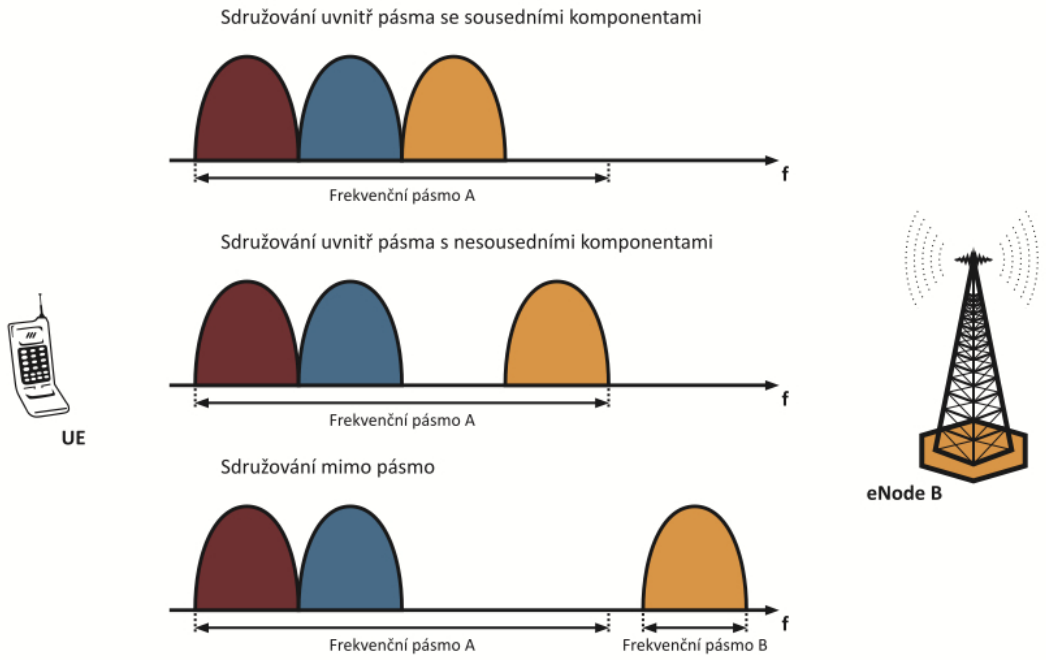
Vzhledem k tomu, že jsou data přenášena na stejné frekvenci a v tentýž čas, vzniká problém vzájemného rušení dat přenášených mezi více anténami. Z tohoto důvodu je třeba jednoznačně definovat cestu, jakou každá část modulovaných dat bude putovat. Tento proces zajišťuje blok mapování dat, který kromě jiného zajistí fázovou změnu signálu pro eliminaci vzájemného rušení mezi datovými proudy.

3.3.2 Sdružování nosných

Ačkoliv použitím systému více antén (až 8x8 MIMO v Release 10) zajistíme vyšší spektrální účinnost, stále přenosová kapacita mobilní buňky v LTE-A nedosahuje kýžených 1Gb/s, kterou oficiálně vyžaduje IMT-Advanced, aby bylo možné danou technologii prohlásit za 4G. Tím důvodem je nedostatečná šířka používaného frekvenčního bloku (v LTE je maximum 20Mhz). Pro odstranění tohoto limitu je v LTE-A umožněno agregovat více frekvenčních bloků, přičemž ze všech agregovaných bloků lze data mezi mobilním terminálem a mobilní základnovou stanicí eNodeB přenášet paralelně. Taková alokace frekvenčního pásma je známá jako sdružování nosných. Cílem bylo rozšířit možnosti pro alokaci frekvenčního pásma oproti HSPA+ DC, které umožňovalo „spojit“ pouze 2 bloky o šířce pásma 5Mhz pro směr dat k uživateli. Oproti tomu LTE-A umožňuje agregovat až 5 frekvenčních bloků o maximální šířce 20Mhz, přičemž maximálně 5 bloků lze využít jak pro sestupný směr datového toku, tak pro směr vzestupný. Konečným důsledkem je tedy možnost alokace frekvenčních bloků až do velikosti 100Mhz. Každý dílčí sdružený frekvenční blok se v LTE-A označuje jako nosná komponenta.

Při využití agregace více pásem pro přenos dat mobilním terminálem platí, že je vždy určena jedna z nosných komponent jako primární (platí pro vzestupný i sestupný směr toku dat) a ostatní jako sekundární (mohou být až 4). V zásadě nelze obecně definovat způsob, jakým si mobilní zařízení zvolí svou primární komponentu, jelikož v každém zařízení může být zvolen vlastní způsob pro přidělování komponent. Primární komponenta se volí především kvůli signalizaci o stavu zařízení, zatímco účelem sekundárních komponent je pouze navýšení šířky pásma pro přenos dat.

Obrázek 4 Možnosti sdružování nosných v LTE-A



(*zdroj: https://publi.cz/books/236/05.html*)

V technologii LTE-A můžeme rozlišit tři způsoby přiřazení jednotlivých komponent danému mobilnímu zařízení:

- Agregace komponent uvnitř jednoho frekvenčního pásma, přičemž jednotlivé komponenty spolu sousedí.
- Agregace komponent uvnitř jednoho frekvenčního pásma, přičemž jednotlivé komponenty spolu nesousedí.
- Agregace komponent skrze více frekvenčních pásem (komponenty spolu můžou i nemusí sousedit)

V případě, že mobilní zařízení nepodporuje sdružování nosných, je umožněno přistupovat ke každé dílčí komponentně zcela samostatně. Mobilní zařízení disponující možností agregace více nosných, přistupuje ke všem dílčím komponentám současně.

3.4 Kategorie LTE/LTE-A

Technologie LTE-A je v nových specifikacích Release neustále vylepšována. Jak již bylo zmíněno výše, tak LTE-A pomocí sdružování nosných a používání systému MIMO umožňuje výrazné navýšení přenosových rychlostí v obou směrech. Z toho vyplývá, že může vznikat velmi mnoho kombinací způsobů, kterým by bylo možno příslušné rychlosti pro dané zařízení, s LTE čipem, dosáhnout. Z tohoto důvodu má každý LTE čip svou kategorii, která vymezuje dosažitelné rychlosti v rámci sítě a také způsoby, jakým jí lze dosáhnout.

Tabulka 1 Definované kategorie LTE/LTE-A (rok 2016)

Kategorie uživatelského zařízení	Maximální teoretická rychlost pro downlink [Mb/s]	Maximální použitelný počet antén v systému MIMO	Maximální teoretická rychlost pro uplink [Mb/s]	3GPP Release
0	1	1	1	Release 12
1	10,3	1	5,2	Release 8
2	51	2	25,5	Release 8
3	102	2	51	Release 8
4	150,8	2	51	Release 8
5	299,6	4	75	Release 8
6	301,5	2 nebo 4	51	Release 10
7	301,5	2 nebo 4	102	Release 10
8	2998,6	8	1497,8	Release 10
9	452,2	2 nebo 4	51	Release 11
10	452,2	2 nebo 4	102	Release 11
11	603	2 nebo 4	51	Release 11
12	603	2 nebo 4	102	Release 11
13	391,7	2 nebo 4	150,8	Release 12
14	3917	8	N/A	Release 12
15	750	2 nebo 4	N/A	Release 12
16	979	2 nebo 4	N/A	Release 12

4 FREKVENČNÍ SPEKTRUM PRO VYSOKORYCHLOSTNÍ MOBILNÍ DATOVÉ SÍTĚ

Frekvenční spektrum, ve kterém pracují technologie jako UMTS či LTE, lze rozdělit na dva základní typy:

- TDD (Time Division Duplex)
- FDD (Frequency Division Duplex)

První způsob přenosu dat směrem k uživateli a od uživatele se nazývá TDD. V TDD dochází k časovému dělení pro duplexní přenos, což znamená, že daná komunikace probíhá na stejné frekvenci. V jeden časový okamžik probíhá komunikace směrem k uživateli, v jiný okamžik uživatelské zařízení data odesílá. Frekvenční pásma založená na TDD se označují „nepárová". Příkladem využití TDD je provozování LTE v Číně.

Druhý způsob se nazývá FDD, jehož základní charakteristika spočívá v tom, že oba směry komunikace probíhají na jiných frekvencích. Frekvenční pásma založená na FDD se nazývají „párová". Zde se zaměřím právě na frekvenční pásma typu FDD, které používají mobilní operátoři k provozování vysokorychlostních mobilních datových sítí v České republice.

V tabulce (Tabulka 1) můžeme vidět frekvenční příděly jednotlivých mobilních operátorů v České republice. Pásmo FDD 2100Mhz je široké 2x60Mhz. Uplink je zde v rozsahu 1920-1980 MHz, downlink se pak nachází v rozsahu 2110-2170. EARFCN nám definuje střední frekvenci daného frekvenčního kanálu, přičemž udávané pětimístné číslo představuje pětinásobek hodnoty skutečné frekvence. Každý frekvenční kanál je zde široký 5Mhz. Toto frekvenční pásmo bylo ji od prvopočátku plánováno primárně pro sítě typu UMTS (případně jeho nadstaveb). V létě roku 2014 však v tomto frekvenčním pásmu Vodafone, jako první operátor v České republice, spustil i technologii LTE, která je zde provozována na frekvenčních blocích s EARFCN 10712 a 10737. Později zde začal provozovat LTE i T-Mobile na frekvenčních blocích s EARFCN 10762 a 10787. Jedná se tedy o pásmo v současné době (rok 2016) technologicky neutrální. Toto pásmo se se označuje jako „pásmo 1".

Tabulka 2 UMTS FDD (2100Mhz)

Mobilní operátor	EARFCN
O2	10564
	10588
	10613
	10637
Vodafone	10663
	10687
	10712
	10737
T-Mobile	10762
	10787
	10812
	10836

Pásmo 800Mhz (Tabulka 2) vzniklo uvolněním části frekvenčního pásma po ukončení analogového televizního vysílání v České republice. Proto se často označuje jako DD (Digital dividend). Toto pásmo FDD je široké 2x30Mhz. Frekvenční bloky mají velikost 5Mhz. Zajímavostí tohoto pásma je, že downlink je umístěn níže než uplink (downlink je v rozsahu 791-821 MHz, uplink pak v rozsahu 832-862 MHz). Označení tohoto pásma je „pásmo 20“. Toto pásmo je aktuálně (rok 2016) primárně využíváno pro sítě typu LTE, případně LTE-A, přičemž je toto pásmo díky nízké frekvenci velmi výhodné jak pro pokrývání venkova (dlouhý dosah signálu), tak pro města (dobré pronikání signálu skrze překážky).

Tabulka 3 LTE FDD (800Mhz)

Mobilní operátor	Rozsah frekvenčních bloků pro downlink [Mhz]
T-Mobile	791-796
	796-801
O2	801-806
	806-811
Vodafone	811-816
	816-821

Posledním pásmem (rok 2016), které je primárně vyhrazeno pro vysokorychlostní mobilní datové sítě (UMTS, LTE apod.) u nás, je pásmo 2600Mhz. Toto pásmo alokuje 70Mhz párového spektra, přičemž downlink je zde v rozsahu 2620-2690MHz, uplink disponuje rozsahem 2500-2570 MHz. Primární použití tohoto frekvenčního pásma je pro sítě LTE či LTE-A, ovšem vysoká frekvence (krátký dosah, špatná prostupnost signálu skrze překážky) omezuje využití tohoto pásma na posilování kapacity sítě v nejvytěžovanějších oblastech. Označení tohoto pásma je „pásmo 7“.

LTE technologie, případně LTE-A, je využívána také ve frekvenčních pásmech původně vyhrazených pro sítě typu GSM či UMTS. Jedná se o frekvenční pásma 900Mhz (pásmo 8), 1800Mhz (pásmo 3) a 2100Mhz (pásmo 1). Využití LTE v pásmu 900Mhz je ovšem v současné době (rok 2016) velmi omezen díky vysoké fragmentaci tohoto pásma (operátoři zde mohou využít frekvenční blok pro LTE o maximální velikosti 3Mhz). Zlepšení by mohl přinést až plánovaný tzv. refarming frekvenčního pásma, kde by se jednotlivé frekvenční bloky přeuspořádaly tím způsobem, aby každý operátor měl co největší spojitou část spektra.

Tabulka 4 LTE FDD (2600Mhz)

Mobilní operátor	Rozsah frekvenčních bloků pro downlink [Mhz]
O2	2620-2625
	2625-2630
	2630-2635
	2635-2640
T-Mobile	2640-2645
	2645-2650
	2650-2655
	2655-2660
Vodafone	2660-2665
	2665-2670
	2670-2675
	2675-2680
nepřiděleno	2680-2685
	2685-2690

5 PRAKTICKÁ ČÁST

5.1 Metodika měření parametrů mobilních datových sítí

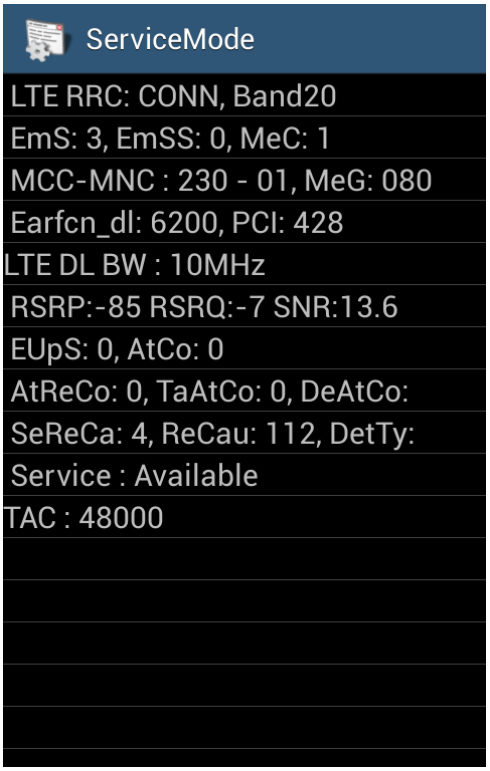
Cílem praktické části bylo ověření síťových parametrů mobilních datových sítí UMTS (HSDPA, HSUPA, HSPA+) a LTE. Pro tyto účely byl využit mobilní telefon Samsung S7275R (Galaxy Ace 3 LTE). Tento přístroj podporuje všechny výše zmíněné technologie, přičemž dokáže naplno využít sítě UMTS ve větších městech, jelikož podporuje HSPA+ DC. Vzhledem k tomu, že UMTS je v ČR provozováno v hlavním frekvenčním pásmu určeném pro UMTS (2100Mhz), nevzniká jakýkoliv problém s kompatibilitou sítě UMTS a použitého mobilního zařízení. Teoretickým rychlostním maximem je 43,2Mb/s. Složitější situace nastává v případě frekvenčních pásem, ve kterých je provozována síť LTE, případně LTE-A. Tento mobilní telefon podporuje celkem čtyři frekvenční pásma využitelná na území České republiky pro sítě LTE. Jedná se o pásma 800Mhz, 900Mhz, 1800Mhz a 2600Mhz. Nelze tedy u tohoto zařízení využít LTE na frekvenci 2100Mhz. Samsung S7275R disponuje čipem pro LTE, který vyhovuje specifikaci Category 3, z čehož vyplývá, že maximální teoretická rychlost stahování dat na přístroj je 100Mb/s a teoretická rychlost odesílání dat je pak 50Mb/s. Samsung Galaxy Ace 3 LTE využívá operační systém Android ve verzi 4.2.2. Pro tento operační systém existuje nespočet aplikací sloužících k monitorování mobilních datových sítí.

K získání informací o mobilní buňce, ke které je zařízení aktuálně připojeno, byl využit standardní nástroj, který podporují mobilní telefony značky Samsung a produktové řady Galaxy (zahrnují operační systém Android). Tento nástroj se nazývá ServiceMode a jedna z cest, jak se do tohoto módu přepnout, je přes speciální kód **#0011#* , který se zadává standardně (jako telefonní číslo pro uskutečnění hovoru). ServiceMode nabízí velice detailní souhrn informací o mobilní buňce, přičemž mezi nejdůležitější informace zde patří:

1) V případě připojení zařízení k mobilní síti LTE:
    - První řádek nám specifikuje kromě použité technologie (*LTE RRC*) také frekvenční pásmo, na kterém zařízení aktuálně pracuje (v tomto případě *Band20* - frekvenční pásmo 800Mhz).
    - Položka *MCC-MNC* na třetím řádku nám specifikuje mobilního operátora (v tomto případě se jedná o mobilního operátora T-Mobile).

- Položka *Earfcn_dl* specifikuje konkrétní frekvenční blok v rámci frekvenčního pásma (lze dohledat pomocí „kalkulaček LTE“ dostupných na internetu)
- Položka *LTE DL BW* uvádí šířku frekvenčního kanálu určeného pro stahování dat na zařízení.
- Důležitý je zde řádek číslo 6, kde položka *RSRP* specifikuje referenční úroveň přijímaného signálu, položka *RSRQ* potom „kvalitu“ přijímaného signálu a nakonec položka *SNR* zachycuje odstup daného signálu od šumu na pozadí.

Obrázek 5 ServiceMode – LTE

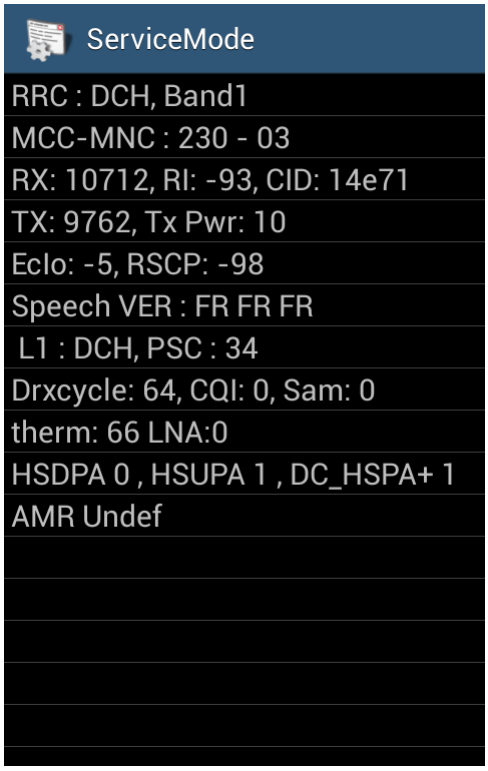


(zdroj: vlastní)

2) V případě připojení zařízení k mobilní síti WCDMA:
   - První řádek nám opět specifikuje použitou technologii a frekvenční pásmo, na kterém zařízení aktuálně pracuje (v tomto případě *Band1* - frekvenční pásmo 2100Mhz).
   - Položka *MCC-MNC* na druhém řádku nám obdobně specifikuje mobilního operátora (v tomto případě se jedná o mobilního operátora Vodafone).

- Položka *RX* specifikuje střední hodnotu v rámci frekvenčního bloku (EARFCN), při čemž platí: EARFCN = střední hodnotu v rámci frekvenčního bloku * 5.
- *CID* přestavuje identifikaci mobilní buňky v hexadecimálním tvaru
- Důležitý je parametr *RSCP* na řádku 6, který specifikuje referenční úroveň přijímaného signálu.
- Zajímavý je předposlední řádek, jelikož signalizuje aktivitu HSDPA, HSUPA, HSPA+ či HSPA+ DC

Obrázek 6 ServiceMode – WCDMA

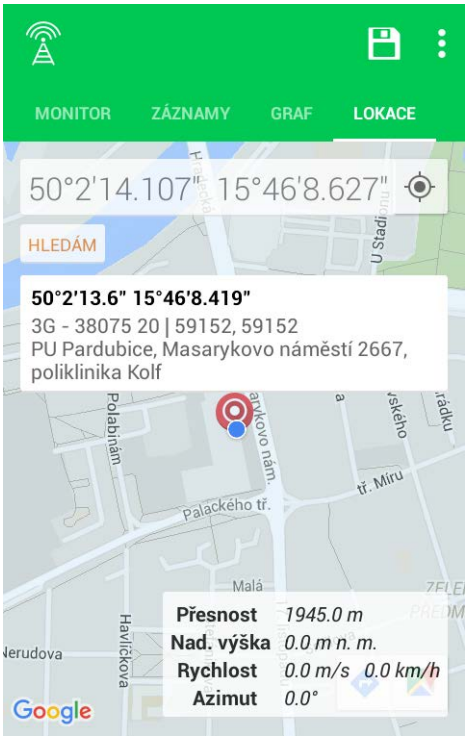


(zdroj: vlastní)

Jako kvalitní diagnostický nástroj pro mobilní datové sítě byla využita aplikace NetMonster z repozitáře Google Play. Tato aplikace umožňuje monitorovat, ke kterým mobilním buňkám je telefon právě připojen. Důležitou vlastností této aplikace je propojení s neoficiální databází všech mobilních buněk jednotlivých operátorů v České republice, kterou přestavuje webový server GSMweb.cz. Díky tomu lze identifikovat místo, kde se nachází daný vysílač mobilního signálu. Informace o zachycených buňkách (záznamy) je možno logovat do externího

souboru a případně poslat na GSMweb.cz (hlavně v případě, že se jedná o nové, tj. dosud nezachycené buňky). Pro účely této práce byla však z této aplikace primárně využita funkcionalita umožňující grafické zobrazení mobilních buněk na mapě vůči místu, kde se aktuálně nachází mobilní zařízení. Aktuální poloha zařízení se detekuje pomocí GPS, případně pomocí bezdrátových sítí. Poloha mobilního vysílače se pak identifikuje z databáze mobilních buněk v aplikaci.

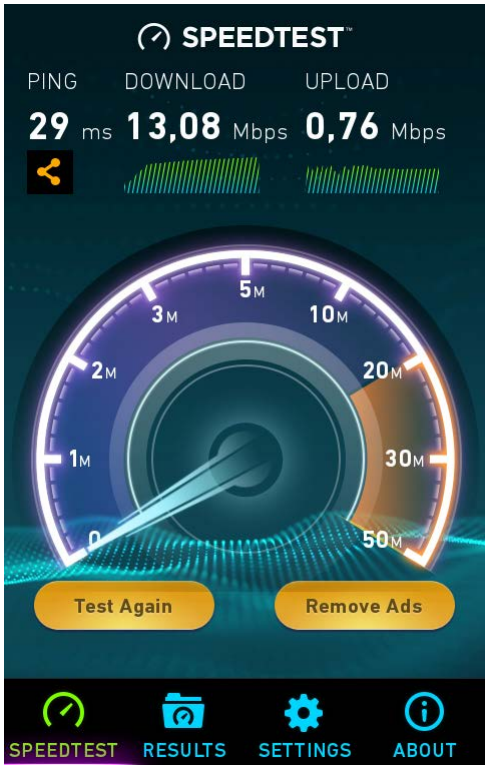
Obrázek 7 aplikace NetMonster – ilustrace



(zdroj: vlastní)

Testování mobilních datových sítí jednotlivých operátorů bylo prováděno na mobilním zařízení Galaxy Ace 3 pomocí aplikace Speedtest.net, která je volně dostupná v repozitáři Google Play. Aplikace umožňuje měřit rychlost stahování dat na přístroj, odesílání dat k vysílači a zjistit hodnotu parametru *ping*. Důležité pro relevantnost naměřených parametrů sítě je zvolit preferovaný testovací server v rámci aplikace, jelikož aplikace si ve výchozím nastavení nastavuje testovací server automaticky. V případě, že testy parametrů mobilní sítě probíhají vůči různým testovacím serverům, je vysoce pravděpodobné, že zejména parametr *ping* bude značně zkreslený. Pro potřeby měření v rámci této práce byl zvolen jako výchozí testovací server *Nej TV a. s.*, který je umístěný v Praze.

Obrázek 8 Aplikace Speedtest.net – ilustrace



(zdroj: vlastní)

K znázornění terénního profilu mezi mobilním zařízením a základnovou stanicí byly využity mapové podklady a nástroje serveru *mapavysilacu.cz*.

Shrnutí důležitých pojmů pro analýzu výsledků měření:

- **ping**: Tento parametr představuje množství času, které uplyne mezi odesláním síťového požadavku a přijetím odpovědi. Základní jednotka: *ms*. Čím je hodnota parametru menší, tím lépe.
- **RSRP (Reference Signal Received Power)** : Tento parametr představuje referenční sílu signálu, setkáme se s ním při analýze signálu technologie LTE. Základní jednotka: *dBm*. Uvádí se v záporných hodnotách. Čím je hodnota parametru větší (tzn. blíže hodnotě 0), tím lépe.
- **RSRQ (Reference Signal Received Quality)** : RSRQ představuje kvalitu analyzovaného signálu v LTE. Základní jednotka: *dB*. Uvádí se v záporných hodnotách. Čím je hodnota parametru větší (tzn. blíže hodnotě 0), tím lépe.
- **RSCP (Received Signal Code Power)**: Tento parametr přestavuje výkon referenčního signálu, setkáme se s ním při analýze sítě WCDMA. Základní jednotka: *dBm*. Uvádí se v záporných hodnotách. Čím je hodnota parametru větší (tzn. blíže hodnotě 0), tím lépe.

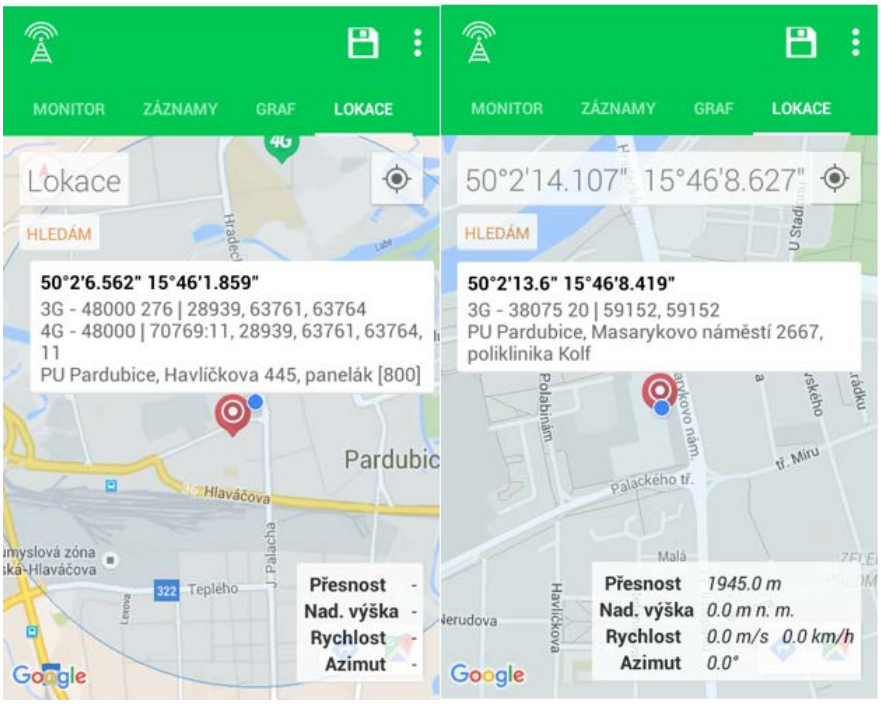
5.2 Výsledky měření parametrů mobilních datových sítí

Jednotlivá měření parametrů mobilní datové sítě probíhala ve dvou zcela odlišných prostředích, které reprezentují město a venkov. Jako zástupce města byly vybrány Pardubice, jako zástupce venkova bylo zvoleno blízké okolí obce Jankov na Vysočině. Měření probíhala opakovaně na totožných místech v různých denních hodinách za účelem získání větší relevantnosti naměřených dat.

5.2.1 Palác Pardubice (Masarykovo náměstí, Pardubice)

Prvním místem pro měření parametrů mobilní datové sítě v Pardubicích se stalo obchodní centrum Palác Pardubice, které se nachází u hlavní křižovatky na Masarykově náměstí. Toto místo bylo vybráno z toho důvodu, že se jedná, z hlediska návštěvnosti, o vysoce frekventované místo v Pardubicích. Vysoká koncentrace pohybujících se lidí v obchodním domě a jeho těsné blízkosti dává předpoklad pro vysokou zatíženost mobilních datových sítí mobilních operátorů.

Obrázek 9 Umístění základnových stanic – Palác Pardubice (T-Mobile/O2, Vodafone)



(zdroj: vlastní)

Obrázek (levá část) znázorňuje přibližnou polohu mobilního zařízení a mobilní základnové stanice operátora T-Mobile. Vysílací antény jsou umístěny na střeše paneláku v ulici

Havlíčkova (č. p. 445). Z tohoto umístění vysílá mobilní signál, kromě operátora T-Mobile, také operátor O2. Oba operátoři zde provozují vysokorychlostní mobilní datové sítě typu WCDMA (HSPA+, O2 používá i HSPA+ DC) a LTE (800Mhz).

Obrázek (pravá část) zachycuje umístění mobilního vysílače operátora Vodafone. Vysílací antény jsou umístěny na střeše *polikliniky Kolf*, nacházející se taktéž na *Masarykově náměstí (č. p. 2667)*. Vodafone zde provozuje rychlé mobilní sítě HSPA+ DC a LTE (2100Mhz). Nicméně LTE zde vysílá ve frekvenčním pásmu 2100Mhz, a z tohoto důvodu nelze zde použitým mobilním přístrojem ověřit parametry této sítě.

Tabulka 5 Palác Pardubice – průměrné naměřené hodnoty parametrů pro WCDMA

Mobilní operátor	Rychlost stahování dat [Mb/s]	Rychlost odesílání dat [Mb/s]	Ping [ms]	RSCP [dBm]	Technologie
T-Mobile	5,37	2,74	43	-94	HSPA+
O2	16.32	3,98	37	-88	HSPA+ DC
Vodafone	13,82	1,73	35	-94	HSPA+ DC

Tabulka 6 Palác Pardubice – průměrné naměřené hodnoty parametrů pro LTE

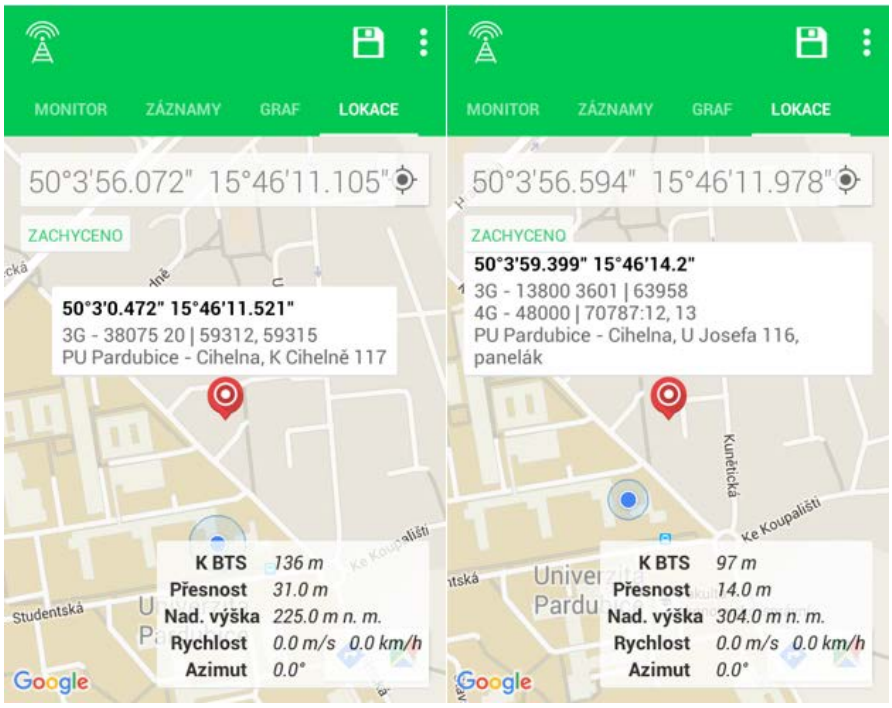
Mobilní operátor	Rychlost stahování dat [Mb/s]	Rychlost odesílání dat [Mb/s[	Ping [ms]	RSRP [dBm]	RSRQ [dB]	Frekvenční pásmo [Mhz]
T-Mobile	27,04	10,49	21	-86	-7	800
O2	26,65	12,89	35	-86	-7	800
Vodafone	Použité frekvenční pásmo není měřícím zařízením podporováno.					2100

Je patrné z naměřených údajů, že ačkoliv jsou základnové stanice vzdáleny jen několik desítek metrů od místa, kde je prováděno měření, tak signál v případě technologie WCDMA technologie nedosahuje očekávané intenzity. Je to způsobeno především faktem, že signál na frekvenci 2100Mhz, kde je WCDMA provozováno, velmi obtížně prostupuje překážkami. Dále si jde všimnout výrazně nižší naměřené rychlosti pro síť WCDMA operátora T-Mobile, které je dáno „pomalejší“ použitou technologií (HSPA+ oproti HSPA+ DC, které zde používá konkurence).

5.2.2 Koleje Univerzity Pardubice – Pavilon A (ulice Studentská, Pardubice)

Jako druhé místo pro měření parametrů mobilních datových sítí v rámci Pardubic byl zvolen areál kolejí Univerzity Pardubice. Jedná se o oblast, kde je vysoká koncentrace panelových domů, nicméně potenciální zatíženost mobilních datových sítí jednotlivých operátorů je zde nižší než v Paláci Pardubice, jelikož je zde předpoklad pro využívání primárně pevného připojení.

Obrázek 10 Umístění základnových stanic – Koleje Univerzity Pardubice (T-Mobile/O2, Vodafone)



(zdroj: vlastní)

Obrázek (levá část) zobrazuje lokaci základnové stanice operátora Vodafone, která se nachází v ulici *K cihelně (č. p. 117)*. Vysílací antény se nachází na střeše panelové domu. Operátor zde používá vysokorychlostní datové technologie: WCDMA (HSPA+ DC), LTE (2100Mhz).

Pravá část obrázku nám ukazuje, že operátoři O2 a T-Mobile, mají umístěny své vysílače pouze o jeden panelový dům dále. Konkrétně se vysílače nachází v ulici *U Josefa (č. p. 116)* opět na střeše panelového domu.

Tabulka 7 Koleje Univerzity Pardubice – průměrné naměřené hodnoty parametrů pro WCDMA

Mobilní operátor	Rychlost stahování dat [Mb/s]	Rychlost odesílání dat [Mb/s]	Ping [ms]	RSCP [dBm]	Technologie
T-Mobile	15,50	3,71	40	-82	HSPA+ DC
O2	8,23	3,25	40	-79	HSPA+ DC
Vodafone	26,22	4,02	30	-75	HSPA+ DC

Tabulka 8 Koleje Univerzity Pardubice – průměrné naměřené hodnoty parametrů pro LTE

Mobilní operátor	Rychlost stahování dat [Mb/s]	Rychlost odesílání dat [Mb/s[	Ping [ms]	RSRP [dBm]	RSRQ [dB]	Frekvenční pásmo [Mhz]
T-Mobile	25,38	14,48	24	-77	-7	800
O2	36,84	18,40	38	-70	-7	800
Vodafone	Použité frekvenční pásmo není měřícím zařízením podporováno.					2100

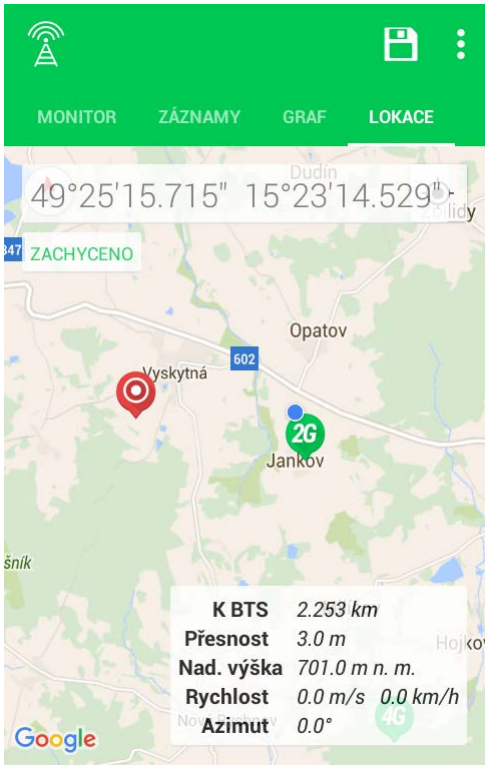
V první tabulce si můžeme všimnout, že je na tomto místě k dispozici technologie HSPA+ DC od všech tří operátorů. Síla signálu zde dosahuje obdobných hodnot, přičemž signál je velmi silný. Navzdory tomu byly naměřeny velmi rozdílné hodnoty pro rychlost stahování dat od všech operátorů. Vodafone má zde (Tabulka 6) poměrně málo vytíženou buňku v porovnání s konkurencí a k tomu ještě mnohem lepší hodnotu parametru ping.

V další tabulce (Tabulka 7) můžeme vidět, že síla signálu i jeho kvalita zde od obou operátorů dosahují vynikajících hodnot. Operátor T-Mobile zde zaujme nejnižší hodnotou parametru ping, zatímco operátor O2 zde má výrazně vyšší rychlosti při stahování dat na mobilní přístroj.

5.2.3 Jankov (okres Pelhřimov, kraj Vysočina)

Další lokalita pro testování mobilních datových sítí byla vybrána na venkově, konkrétně u obce Jankov v kraji Vysočina. V této lokalitě nalezneme několik potenciálně málo vytížených mobilních buněk.

Obrázek 11 Umístění základnových stanic – Vyskytná



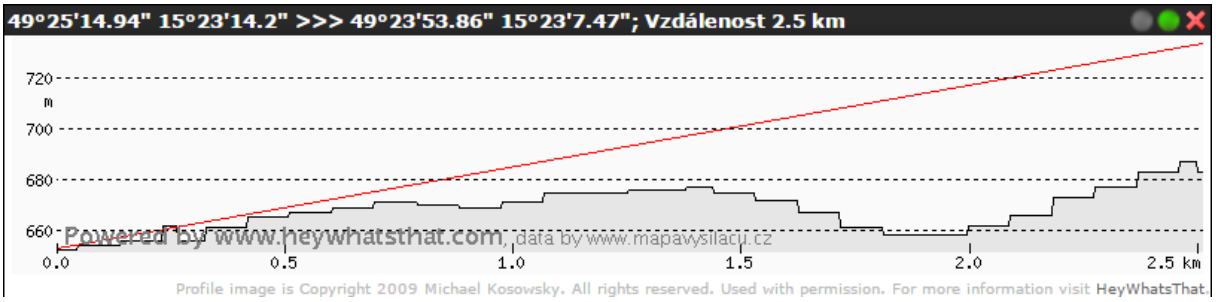
(zdroj: vlastní)

Obrázek 12 Terénní profil – Vyskytná

(zdroj: vlastní)

Při pohledu na ilustraci terénního profilu (Obrázek 11) mezi mobilním zařízením a základnovou stanicí, která se nachází na příhradovém stožáru u nedaleké obce, můžeme vidět, že je zde přímá viditelnost. Toto místo bylo vybráno z toho důvodu, aby se otestovalo, jakou maximální rychlostí lze komunikovat se základnovou stanicí eNodeB, na které je provozována technologie LTE ve frekvenčním pásmu 800Mhz. Tento vysílač využívají operátoři O2 a T-Mobile.

Obrázek 13 Terénní profil – Milíčov



(zdroj: vlastní)

Tento obrázek (Obrázek 13) ilustruje terénní profil k nejbližšímu vysílači operátora Vodafone. Ačkoliv je vzdálenost přibližně stejná jako v předchozím případě pro konkurenční operátory, tak díky terénní nerovnosti mezi mobilním telefonem a základnovou stanicí operátora (nachází se dle ilustrace přibližně 250m od měřícího mobilního zařízení) bude síla signálu mírně degradována.

Tabulka 9 Jankov (severní okolí) – průměrné naměřené hodnoty parametrů pro LTE

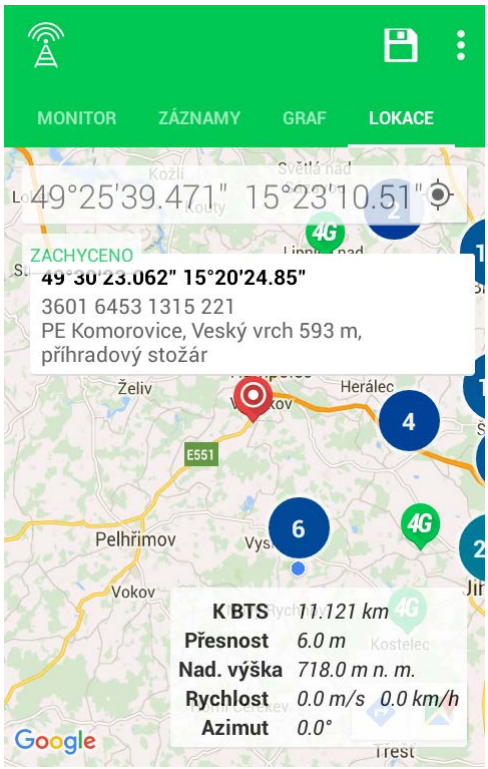
Mobilní operátor	Rychlost stahování dat [Mb/s]	Rychlost odesílání dat [Mb/s[	Ping [ms]	RSRP [dBm]	RSRQ [dB]	Frekvenční pásmo [Mhz]
T-Mobile	55,33	18,26	23	-79	-6	800
O2	55,13	20,32	20	-79	-7	800
Vodafone	36,36	22,74	32	-89	-7	800

Při pohledu na tabulku naměřených rychlostí lze konstatovat, že při přímé viditelnosti na základnovou stanici lze dosáhnout, při využití LTE v pásmu 800Mhz, lze bez problému dosáhnout více než 70% teoretické rychlosti i při vzdálenosti vyšší než 2km (za předpokladu nízkého vytížení dané buňky).

5.2.4 Jankov (okres Pelhřimov, kraj Vysočina)

Jako poslední místo pro měření parametrů bezdrátových mobilních datových sítí bylo vybráno strategické místo opět v okolí obce Jankov na Vysočině. „Strategické“ je myšleno v tom smyslu, že lze na tomto místě zachytit signál z opravdu velkého množství základnových stanic ze širokého okolí.

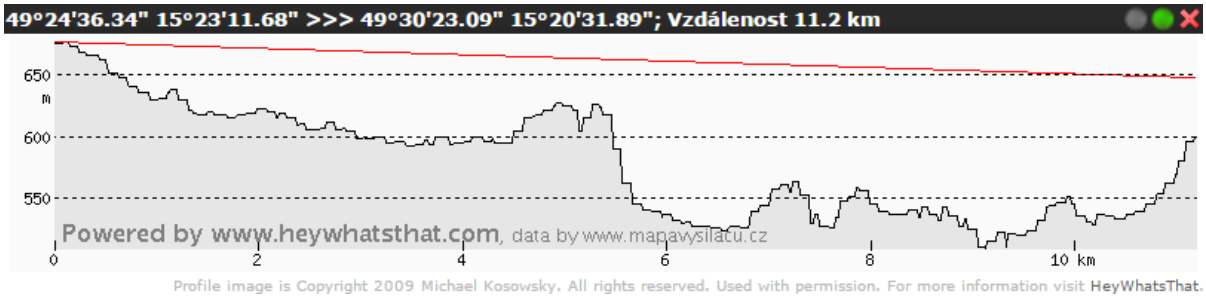
Obrázek 14 Umístění základnových stanic – Komorovice



(zdroj: vlastní)

Po přepnutí mobilního telefonu do režimu GSM/WCDMA se přístroj automaticky připojí k technologii k základnové stanici, která se nachází až v dalekých Komorovicích. Komorovice se nacházejí více než 11km daleko od místa prováděného měření (Obrázek 13). Základnovou stanici NodeB v Komorovicích provozují operátoři O2 a T-Mobile.

Obrázek 15 Terénní profil – Komorovice



(zdroj: vlastní)

Na této základnové stanici běží technologie HSPA+ ve standardním frekvenčním pásmu 2100Mhz. Dle obecných modelů dosahu signálu v závislosti na frekvenčním pásmu, by již vysílaný signál na této frekvenci neměl být dostatečný pro detekování běžným mobilním telefonem. Skutečnost je díky velmi výhodnému terénnímu profilu oproti teoretickým předpokladům rozdílná.

Obrázek 16 Terénní profil – Milíčov

(zdroj: vlastní)

Po přepnutí do LTE režimu se mobilní zařízení registruje v buňce základnové stanice, která se nachází přibližně ve vzdálenosti 1,3 km od místa provádění měření. Příhradový stožár se nachází u obce Milíčov. V současné době (květen 2016) je zde provozována mobilní datová technologie LTE od všech tří operátorů v České republice. LTE technologie zde od společností T-Mobile a O2 byla spuštěna teprve před několika málo dny. Dle legislativy tedy takové základnové stanice musí být nejprve ve zkušebním provozu.

Tabulka 10 Jankov (jižní okolí) – průměrné naměřené hodnoty parametrů pro WCDMA

Mobilní operátor	Rychlost stahování dat [Mb/s]	Rychlost odesílání dat [Mb/s]	Ping [ms]	RSCP [dBm]	Technologie
T-Mobile	10,76	2,66	39	-89	HSPA+
O2	8,47	2,03	37	-89	HSPA+
Vodafone	V této lokalitě není signál WCDMA detekovatelný.				

Tabulka 11 Jankov (jižní okolí) – průměrné naměřené hodnoty parametrů pro LTE

Mobilní operátor	Rychlost stahování dat [Mb/s]	Rychlost odesílání dat [Mb/s[	Ping [ms]	RSRP [dBm]	RSRQ [dB]	Frekvenční pásmo [Mhz]
T-Mobile	21,75	19,96	23	-80	-10	800
O2	16,57	20,38	36	-79	-10	800
Vodafone	37,05	22,01	35	-74	-7	800

Při pohledu na naměřené hodnoty (Tabulka 7), vzhledem k tak značné vzdálenosti mobilního zařízení od NodeB, je jistě překvapující fakt, že síla signálu je stále poměrně vysoká. Naměřené hodnoty pro rychlosti datové sítě v obou směrech vzhledem ke specifickým podmínkám a použité technologii (až 21,6Mb/s) určitě nezklamou.

Při pohledu na tabulku (Tabulka 8) vypadá poměrně překvapivě rozdíl mezi naměřenými hodnotami pro stahování dat. O2 a T-Mobile zde i přes velmi silný signál od základnové stanice a přímou viditelnost na vysílač dosahují velmi špatných výsledků. Když si pozorně prohlédneme tabulku, tak zjistíme, že parametr RSRQ nedisponuje hodnotami, které by se vzhledem k podmínkám daly očekávat. RSRQ je tedy v tomto případě hlavní příčinou nižších naměřených hodnot pro stahování dat.

6 ZÁVĚR

Teoretická část umožnila načerpat znalosti o principu fungování technologií UMTS, HSDPA, HSUPA, HSPA+, LTE a LTE-A. Z teoretické části byly pro praktickou část nejdůležitější informace o teoreticky dosažitelných rychlostech pro danou technologii. Díky těmto znalostem si lze pak snáze udělat představu o tom, jak kvalitní mobilní datovou sítí jednotlivý operátoři na území České republiky disponují.

Úkolem praktické části bylo vyhodnocení naměřených dat v závislosti na několika faktorech, kterými mohou být vzdálenost příslušného vysílače či profil terénu. K ověření vlivu těchto faktorů byly využity potenciálně vhodná místa na venkově. Analýza naměřených dat ukázala, že v případě použití vyššího frekvenčního pásma pro danou technologii a v případě výhodného terénního profilu mezi mobilním zařízením a vysílačem je možné zachytit mobilní signál i na takové vzdálenosti, kde bychom to neočekávali (obecně totiž platí, že s rostoucí frekvencí signálu klesá i dosah).

Testy méně frekventovaně využívaných mobilních datových sítí na venkově ukázaly, že není problém dosáhnout reálné rychlosti přenosu dat na více než 70% z rychlostí teoreticky dosažitelných danou technologií. Při testování vysílače využívající technologii LTE ve frekvenčním pásmu 800Mhz, který byl ve zkušebním provozu, se ukázalo, že parametr RSRQ je „uměle“ zhoršen, což má za následek výrazně nižší dosahované rychlosti ve směru k uživateli.

V rámci testů mobilních datových sítí dosáhl skvělých výsledků operátor Vodafone v síti HSPA+ DC, kde kromě špičkové odezvy síť umožní i dosažení vyšší rychlosti přenosu dat než konkurence. Operátora T-Mobile je třeba vyzdvihnout především za prvotřídní odezvu v rámci sítě LTE. Reálné přenosové rychlosti v rámci sítě LTE jsou pro O2 a T-Mobile téměř identické, Vodafone dle naměřených hodnot mírně zaostává. Je však třeba připustit skutečnost, že naměřené rychlosti i odezva sítě v rámci různých buněk se mohou občas i diametrálně lišit.

Při testování vysokorychlostních mobilních datových sítí jednotlivých operátorů v Pardubicích se ukázalo, že vysoké zatížení mobilních buněk jejími uživateli má z velké části za následek, že každý uživatel zdaleka nedosáhne teoretické rychlosti, kterou technologie umožňuje. Problémem je tedy, ve městech především, přenosová kapacita mobilní buňky. Právě tato věc „žene“ operátory k tomu, aby nasazovaly novější a efektivnější technologie, které tento problém budou postupem času eliminovat.

7 POUŽITÁ LITERATURA

DAHLMAN, Erik. *3G evolution: HSPA and LTE for mobile broadband*. 1st ed. Burlington, MA: Elsevier Academic Press, 2007, xxxv, 448 p.

HOLMA, Harri a Antti TOSKALA. *WCDMA for UMTS: radio access for third generation mobile communications*. 3rd ed. Chichester: Wiley, 2004, xxviii, 450p.

PRASAD, Ramjee, Werner MOHR a Walter KONHAŬSER. *Third generation mobile communication systems*. Boston: Artech House, 2000, xix, 386 p. ISBN 1580530826.

METSÄLÄ, Esa a Juha SALMELIN. *LTE backhaul: planning and optimization*. pages cm. ISBN 9781118924648.

HOLMA, Harri a Antti. TOSKALA. LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA based radio access. Chichester, U.K.: Wiley, 2009. ISBN 0470994010.

DOLEJŠ, Jan. LTE – vše, co potřebujete vědět o nejrychlejším mobilním internetu. *Svět Androida.* [online]. 2014-12-09 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z:http://www.svetandroida.cz/lte-internet-201412

E-UTRA. *Wikipedia: The Free Encyclopedia.* [online]. 2016-05-10 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/E-UTRA

BÍLÝ, Vladimír. Frekvenční příděl na pásmech GSM, DCS, UMTS a LTE v České republice. *GSMweb.cz.* [online]. 2015 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: http://gsmweb.cz/clanky/freq2.htm

PRAVDA, Ivan. Mobilní a bezdrátové sítě: Universal Mobile Telecommunication System (UMTS). *publi.cz.* [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: https://publi.cz/books/236/04.html

PRAVDA, Ivan. Mobilní a bezdrátové sítě: Long Term Evolution (Advanced) - LTE(-A). *publi.cz.* [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: https://publi.cz/books/236/05.html

NAVRÁTIL, Jan. Technologie HSDPA: nejrychlejší mobilní data jsou za humny. *mobilmania.cz.* [online]. 2005-03-24 [cit. 2016-05-10]. ISSN 1214-1887. Dostupné z: http://www.mobilmania.cz/clanky/technologie-hsdpa-nejrychlejsi-mobilni-data-jsou-za-humny/sc-3-a-1109670/default.aspx