



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

PROBLEMATIKA NÁVRHU MOBILNÍCH SÍTÍ ČTVRTÉ GENERACE

4G MOBILE NETWORK DESIGN ISSUES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN ŽŮREK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. VÍT NOVOTNÝ, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Martin Žůrek

ID: 83015

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Problematika návrhu mobilních sítí čtvrté generace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou vývoje mobilních sítí, zaměřte se na nastupující čtvrtou generaci řešení Evolved Packet System s přístupovou sítí typu Long Term Evolution (LTE), otázky nasazování tohoto typu do komerčního provozu, přechodu od sítí třetí generace a kooperaci s nimi. Prostudujte odlišnosti návrhu a výstavby přístupové sítě LTE od návrhu přístupových sítí předchozích generací a uveďte jaký to má dopad na plánování sítě (výhody, problémy). Na základě získaných poznatků navrhnete laboratorní úlohu na téma plánování přístupové sítě.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] DAHLMAN, E., PARKVALL, S., SKÖLD, J. 3G Evolution - HSPA and LTE for Mobile Broadband. Elsevier, ISBN 978-0-12-372533-2, UK, 2008
- [2] LESCUYER, P., LUCIDARME, T. Evolved Packet System - The LTE and SAE Evolution of 3G UTMS. John Wiley & Sons Ltd., ISBN 978-0-470-05976-0, UK, 2008

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 31.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Vít Novotný, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, 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.

ANOTACE

V první části bakalářské práce je popsána historie a vývoj mobilních telekomunikačních sítí, jejich standardy a celosvětový rozvoj s cílem postupného sjednocení telekomunikačních sítí do jednoho typu transportní a aplikační platformy.

Druhá část bakalářské práce je zaměřena na poslední generaci buňkových sítí, přechod od sítí předešlých generací a komunikace mezi nimi. Zabývám se také rozdíly v architektuře čtvrté generace, kde jsou popsány základní bloky nového jádra a přístupové sítě. V poslední části se zaměřuji na plánování a výstavbu nové přístupové sítě pro komerční účely a její výstavbu.

Klíčová slova: LTE, EPS, LTE-Advanced, HSPA+, OFDM, LTE buňka

ABSTRACT

In the first part of bachelor thesis, there it is described the history and development of mobile telecommunication networks, their standards and global development for the progressive unification of telecommunications networks into one type of transport and application platforms.

The second part of bachelor thesis is focused on the latest generation cellular networks, the transition from the previous generation networks and communication between them. It deals with the differences in fourth-generation architecture, which describes the basic building blocks of a new core and access networks. The last section focuses on planning and construction of new access network for commercial purpose and its construction.

Keywords: LTE, EPS, LTE-Advanced, HSPA+, OFDM, LTE Cell

ŽŮREK, M. Problematika návrhu mobilních sítí čtvrté generace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 25 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Vít Novotný, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Problematika návrhu mobilních sítí čtvrté generace“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové 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 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o trestně právních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 31.5.2012

.....
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Vítu Novotnému, Ph.D. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne 31.5.2012

.....
podpis autora

OBSAH

Úvod.....	6
1 Vývoj mobilních sítí.....	7
1.1 Sítě první generace	7
1.2 Sítě druhé generace.....	7
1.3 Sítě třetí generace	8
1.4 Sítě čtvrté generace.....	8
1.5 Vývoj 3GPP standardů.....	9
2 GSM.....	11
2.1 Rozdělení kmitočtového pásma.....	11
2.2 Vývoj GSM systému.....	11
2.3 Architektura GSM systému	12
2.3.1 Parametry GSM systému	14
3 UMTS.....	15
3.1 Režimy systému UMTS	15
3.1.1 Rozdělení kmitočtového pásma.....	15
3.1.2 Přístupová metoda v systému UMTS	15
3.2 Architektura sítě UMTS	16
3.2.1 Uživatelský terminál UE	16
3.2.2 Přístupová síť UTRAN	17
3.2.3 MIMO	19
3.2.4 Konfigurace více antén	20
3.2.5 Páteřní síť UMTS	20
4 LTE	22
4.1 Kmitočtové pásmo v přístupové síti LTE	22
4.2 OFDM	23
4.2.1 Struktura rámce v LTE.....	24
4.2.2 Struktura zdrojového bloku RB.....	26
4.2.3 Výhody a nevýhody OFDM.....	26
4.2.4 OFDMA	27
4.2.5 SC-FDMA.....	27
4.2.6 Přístup do sítě LTE	27
4.3 Architektura rozvinutého paketového systému EPS.....	28
4.3.1 Uživatelský terminál.....	30
4.3.2 Jádro EPC.....	30
4.3.3 Přístupová síť LTE.....	31
4.3.4 Základnové stanice	32
4.3.5 LTE Protokol.....	32
5 LTE - ADVANCE	34
5.1 Seskupování kmitočtového spektra	34
5.2 MIMO	34
5.3 Reléové stanice	34
5.4 UE pro LTE-Advance	35
6 Plánování sítě.....	36
6.1 Kanálový model.....	36

6.2	Výstavba LTE/LTE-A a předchozí 3GPP systémy	37
7	Nasazení sítě LTE pro širokou veřejnost	38
8	Laboratorní úloha.....	39
9	Závěr.....	40
	Použitá literatura.....	41
	Seznam zkratek a symbolů.....	43

ÚVOD

Nedílnou součástí našeho každodenního života je komunikace. Mobilní telefony se beze sporu staly pomyslným zlomovým bodem v komunikační technologii. Doba prvních analogových telefonních přístrojů, používající pevné připojení je minulostí. Člověk má možnost volného pohybu, není spojen dráty. Proto i v této oblasti vznikla nejrůznější komunikační zařízení, která nepotřebují drátové spoje, a signál je přenášen volným prostorem. Samotný mobilní telefon je jen koncové zařízení, které je spojeno bezdrátově s přístupovými body mobilních sítí pomocí rádiových vysílačů, jež jsou dále napojeny na páteřní část sítí tvořenou s ústřednami, nebo branami a dalšími prvky celé sítě, jako jsou různé databáze a další řídicí uzly. Tato část řeší zpracování řídicích informací pro budování, udržení a ukončení aplikačních relací, a samozřejmě vlastní transport aplikačních/uživatelských dat směrem k a od protějšího koncového uzlu. V diplomové práci se budu dále zabývat mobilními telekomunikačními sítěmi, především těmi nejnovějšími. Tedy mobilními sítěmi čtvrté generace, pracujícími s novou plochou architekturou, která je čistě paketově přepínaná.

V první části je krátce popsána historie a vývoj mobilních telekomunikačních sítí, jejich standardy a postupný celosvětový rozvoj s cílem postupného sjednocení telekomunikačních sítí do jednoho typu transportní a aplikační platformy.

Druhá část mé práce je zaměřena na poslední generaci buňkových sítí, přechod od sítí předešlých generací a komunikace mezi nimi. Zabývám se také rozdíly v architektuře čtvrté generace, kde jsou popsány základní bloky nového jádra a přístupové sítě. V poslední části se zaměřuji na nasazení nové přístupové sítě pro komerční účely a její výstavbu.

1 VÝVOJ MOBILNÍCH SÍTÍ

1.1 Sítě první generace

První komerční síť pracující na principu buněk byla spuštěna v květnu 1978 společností Batelco v Bahrajnu. Byla to malá celulární síť původně určená pro královskou rodinu, a byla dostupná také i obyvatelům Bahrajnu. Zařízení, původně vyvinuté pro japonskou policii dodala japonská firma Matsushita/Panasonic.

O dva měsíce později byla spuštěna první celulární síť v USA pod názvem Advanced Mobile Phone System - AMPS. v laboratořích AT&T v Newarku. Testovací provoz byl okolo Chicaga a testovali ji zaměstnanci Bell System. Komerční testovací provoz byl zahájen až 20. prosince 1978. Tato celulární síť jako první mohla pracovat se zařízeními různých výrobců a pracovala ve frekvenčním pásmu 800 MHz. Po úspěšném testovacím provozu této sítě se začaly AMPS sítě budovat po celém světě. Avšak úplné komerční spuštění povolil FCC až byly ve všech oblastech společnosti, které byly schopny konkurovat společnosti Bell System. V roce 1983 byla spuštěna první komerční mobilní síť ve městě Chicago v USA.

V Evropě byla spuštěna první celulární síť v roce 1981 s názvem NMT 450 Nordic Mobile Telephone System pracující ve frekvenčním pásmu 450 MHz. Tato síť byla spuštěna v Dánsku, Švédsku, Finsku a Norsku. Ve Velké Británii byla spuštěna v roce 1985 síť TACS (Total Access Communication System) v Japonsku a Hong Kongu byla spuštěna síť J-TACS (Japonský Total Access Communication System). Tyto sítě pracovali na frekvenci 900 MHz. Síť C-Netz byla spuštěna v západním Německu a Rakousku. Síť Radiocom 2000 byla spuštěna ve Francii a RTMS v Itálii. V USA byla mobilní síť modernizována a plně digitalizována, roku 1990 byl vytvořen standard IS-54B.[12] [10]

1.2 Sítě druhé generace

Evropská komise pro telekomunikace a pošty, sdružující 26 evropských telekomunikačních společností, spustila v roce 1982 projekt Groupe Spéciale Mobile - GSM. Projekt měl sloužit mobilní síť v Evropě a vytvořit jednu mobilní telefonní síť. Evropská komise rozhodla o plné digitalizaci této sítě pracující na frekvenci 900MHz. Evropský telekomunikační institut ETSI byl od roku 1989 zodpovědný za vývoj GSM standardu, který měl nabízet přenos hlasu, zasílání krátkých textových zpráv SMS (Short Message Service), hlasovou schránku, přesměrování a tolik očekávaný roaming. O rok později přichází první návrh standardu a v roce 1991 je vydán. Ještě téhož roku je spuštěna první zkušební GSM síť v Ženevě. Bylo rozhodnuto o iniciálech GSM, které zůstaly zachovány, ale jejich význam byl změněn na: „Global System for Mobile Communications.

V roce 1992 byly zprovozněny první GSM sítě v Dánsku, Finsku, Francii, Německu, Itálii, Portugalsku, a Švédsku. 17. června téhož roku je podepsaná první roamingová dohoda mezi finskou společností Telecom Finland a anglickou společností Vodafone, uskutečnil se tak sen o evropské mezinárodní síti GSM. Následoval velký rychlý vývoj, do GSM asociace patří roku 1993 70 členů ze 48 zemí, včetně australské společnosti Telstra, čímž byly překročeny hranice Evropy. Mimo jiné s sebou přináší i obrovský pokrok v technologii samotných mobilních telefonů. Ty jsou totožné s dnešními svým moderním vzhledem, dostupnou cenou, dlouho výdrží baterie.

S rychlým nárůstem zákazníků GSM rychle klesá počet volných kanálů. Současně s vývojem GSM je ve Velké Británii vyvíjen nový systém DCS1800, vycházející ze standardu GSM, ale pracující ve frekvenčním pásmu 1800MHz. V září téhož roku byla v Anglii spuštěna první síť DCS1800, jež přináší daleko více rádiových kanálů, za cenu menšího dosahu signálu.

Americký komunikační úřad - FCC roku 1994 vydražil velké množství kmitočtů v pásmu 1900MHz pro nově vznikající síť. Tyto síť používaly standard GSM PCS1900. [2]

Důležitým mezníkem ve vývoji telekomunikačních sítí je spuštění druhé vývojové fáze GSM systému v roce 1995. Tato "dva a půl generace" přinesla paketově přepínaný přenos (GPRS, EDGE), který přináší nové služby, zejména datové přenosy. V Evropě většina mobilních telefonů dokáže pracovat v pásmech 900MHz a 1800MHz, která jsou současně používaná. Druhá fáze GSM systému má za následek přejmenování standardu DCS1800 na GSM1800 a PCS1900 na GSM1900.[10] [16]

1.3 Síť třetí generace

Vývoj buňkových systémů se ubíral cestou přepínání paketů pro svoje široké použití. Dalším stupněm vývoje paketově přepínaných systémů jsou technologie třetí generace označované jako 3G. Sem patří jednak technologie CDMA2000 rozvíjená v Americe a později i v Evropě, a především technologie UMTS (Universal Mobile Telecommunications system). Přístupová síť UMTS pracuje s širokopásmovým mnohonásobným přístupem s kódovým dělením W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access). Tato přístupová metoda je dále kombinovaná s časovým TDD, nebo frekvenčním FDD multiplexem. Nové kódování přineslo mobilním technologiím nové možnosti, které byly pro předchozí generace buňkových sítí nemožné. Hlavní důraz je kladen na velkou datovou náročnost a na propustnost těchto sítí, v první fázi 2Mb/s. Díky asymetrickému přenosu dat, kde je šířka pásma přidělována podle aktuální potřeby a tím je efektivněji využito dané kmitočtové pásmo. Rychlosti pro stahování dat k uživateli jsou výrazně vyšší, než rychlosti pro odesílání dat od uživatele. Není přenášen jen zvuk, ale i obraz, jsou uskutečněny první videohovory. Mobilní telefony pro 3G síť s sebou přinášejí další nové možnosti a současně i bezproblémovou podporu 2G sítí.

V současné době je využívána 3.5 generace buňkových systémů a její vývojově vyšší stupně. Tyto systémy používají několik standardů. Nejrozšířenějším evropským standardem je v současnosti vedle GSM perspektivnější 3G systém UMTS. Zavedením nového schématu pro přenos dat vznikla 3.5 generace modernizovaná o vysokorychlostní přenosy HSPA (High-Speed Packet Access), případně HSPA+. Dalším standardem je americký CDMA2000 a čínský TD-SCDMA. Jejich přístupová síť pracují s širokopásmovým mnohonásobným přístupem s kódovým dělením W-CDMA, avšak s jinou základní šířkou pásma.

Poslední vývojový stupeň s označením 3.9G, nebo také Pre-4G je vyvinutý paketový systém EPS (Evolved Packet System) s přístupovou sítí Long Term Evolution (LTE), která vychází z jádra sítě UMTS a z přístupové technologie E-UTRA (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access) za použití nového širokopásmového multiplexu OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex).[10] [17] [18] [21]

1.4 Síť čtvrté generace

Do sítí čtvrté generace patří přístupová síť LTE, především její druhá fáze Long Term Evolution Advanced (LTE-A). Pro evropský trh mobilních technologií se více prosazuje řešení LTE. Standard WiMAX je považována za nástupce WiFi sítí. Avšak ten se příliš nerozšířil a je již spíše na ústupu, a to ve prospěch LTE-Advanced.

Mezinárodní standardizační organizace 3GPP předložila ITU-R návrh standardu LTE Release 10, tedy druhou vývojovou fázi s názvem LTE-Advanced, která rozšiřuje technické prostředky přístupové sítě LTE.

LTE-Advanced byla 20. října 2010 uznána organizací ITU-R za síť čtvrté generace. [1]
[10] [20]

1.5 Vývoj 3GPP standardů

Mezinárodní organizace 3GPP vydala několik standardů (Release) na základě kterých byl a je směřován samotný vývoj rádiových buňkových sítí. Ke každému stupni Vydání (Release) je podle dané definice určeno zařízení.

Přehled Vydání (Release):

Vydání 99 (prosinec 1999)

- obsahovala základní funkce s W-CDMA. Na základě frekvenčního duplexu FDD (FD-CDMA) přenosová rychlost 385kb/s.
- standardizace přístupové sítě UTRAN a zpětná kompatibilita s GSM sítí.
- první použitelná verze UMTS.

Vydání 4 (duben 2001)

- přidán časový duplex TDD (TD-CDMA) v rámci UTRA.
- podpora multimediálních zpráv.
- zavádění IP protokolu.

Vydání 5 (březen 2002)

- toto vydání je zásadní pro HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) a přesunutí funkcí z RNC na NodeB.
- podstatné snížení zpoždění, teoretická přenosová rychlost až 14,4Mb/s pro downlink.
- jádro sítě je postaveno na IP protokolu, což přináší rozšíření o multimediální služby založené na IP protokolu.

Vydání 6 (prosinec 2004)

- zavedení HSUPA (High Speed Uplink Packet Access)

Vydání 7 (červen 2007)

- zavedení HSPA Evolution (HSPA+), přenosové rychlosti pro downlink 42Mb/s a pro uplink 11Mb/s.
- definice více antén MIMO (Multiple Input - Multiple Output).

Vydání 8 (prosinec 2008)

- standardizace EPC (Evolved Packet Core)
- standardizace přístupové sítě LTE a s ní přesunutí řídicích funkcí do nového eNodeB.
- definice nové přístupové techniky OFDMA (Ortogonal Frequency Division Multiple Access)
- celá síť pracuje pouze s IP protokolem

Vydání 9 (prosinec 2009)

- podpora všesměrového vysílání.
- podpora sítí za pomoci lokalizační služby.
- podpora mobility mezi LTE a WiMAX.

- definice pikobuňky a buňky pro domácnosti.

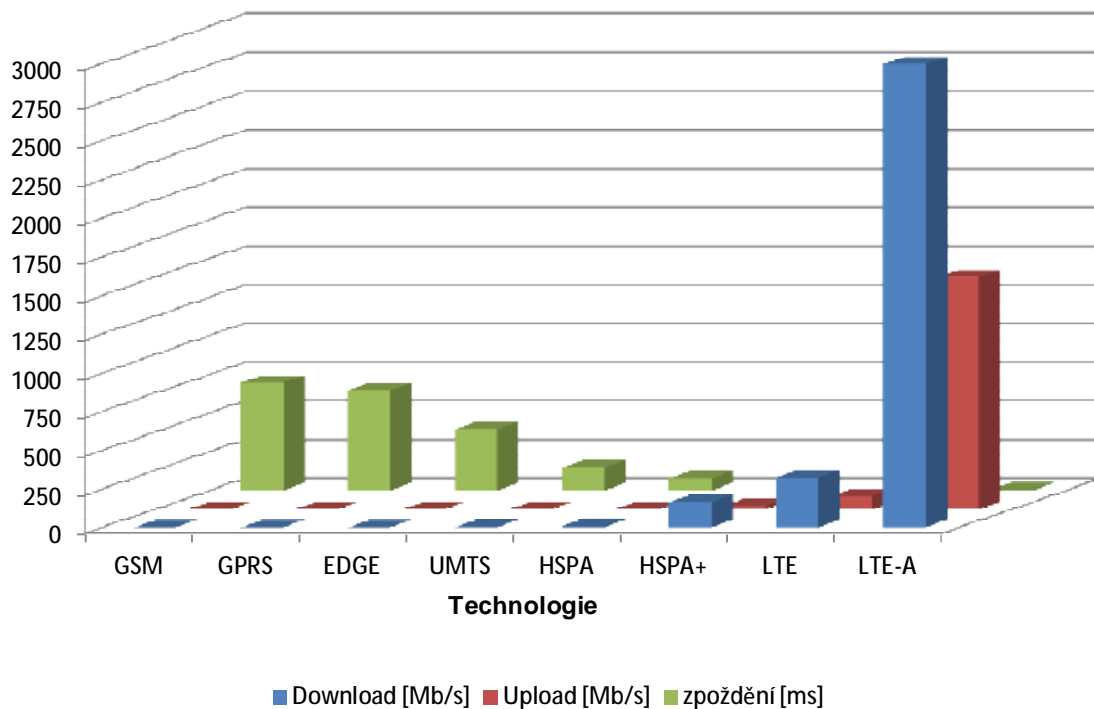
Vydání 10 (březen 2011)

- standardizace LTE-Advanced
- podpora sdružování šířky pásma (MC-HSPDA, LTE-Advanced)
- rozšíření MIMO až na 8x8
- zlepšení v oblasti mezibuněčné koordinace v různorodých sítích.

Vydání 11

- rozšiřuje stávající technologie HSDPA a HSUPA
- rozšíření IP služeb

[11] [14] [3]



Obr. 1.1: Vývoj mobilní technologie v závislosti na přenosové rychlosti zpoždění. [8] [3]

2 GSM

Předešlé a současné generace telekomunikačních sítí, které jsem popsal na začátku své práce, jsou důkazem rychlého vývoje a celosvětového růstu. Rozcestníkem v těchto buňkových sítích byla síť 2.5G, která byla digitální a u níž bylo poprvé spuštěno přepínání paketů s technologií GPRS. Na konci 20. století byl systém postupně upravován k přechodu na systém třetí generace UMTS.

2.1 Rozdělení kmitočtového pásma

První vývojová fáze systému GSM označovaná jak P-GSM (Primary GSM) nepodporovala přepínání paketů. Nabízela pouze základní služby, jako přenos hlasu, posílání krátkých SMS (Short Message Service), hlasovou schránku, možnost přesměrování a roaming. P-GSM má přidělené kmitočtové pásmo 890 MHz až 960 MHz, které je rozděleno na dvě části pro uplink a downlink. Pro přístup je použita přístupová metoda FDMA s kmitočtovým duplexem FDD. Uvnitř každého pásma je vytvořeno 124 rádiových kanálů. Přístupovou metodou TDMA je vytvořeno 8 časových intervalů TS, neboli Time Slotů, pro každý rádiový kanál. Potom celkový počet účastnických rádiových kanálů je $124 \cdot 8 = 992$. Pro nedostatek rádiových kanálů bylo rozšířeno rádiové pásmo o 10 MHz na spodních okrajích, čímž vznikl prostor pro dalších 50 rádiových kanálů. Rozšířený GSM systém nese označení E-GSM (Extended GSM). Následným vyčerpáním kapacity rádiových kanálů E-GSM bylo zavedeno také pásmo 1800 MHz, pod označením DCS 1800 (Digital Cellular System). Pro americký trh je používán systém PCS 1900. Přehled systémů GSM je uveden v Tab. 2.1. [5] [8]

Tab. 2.1: Přehled systémů GSM [8]

	P-GSM	E-GSM	DCS 1800	PCS 1900
Uplink [MHz]	890-915	880-915	1710-1785	1850-1910
Downlink [MHz]	935-960	925-960	1805-1880	1930-1990
Šířka pásma [MHz]	25	35	75	60
počet duplexních párů [-]	124	174	375	299
Odstup duplexních párů [MHz]	45	45	95	80
počet uživatelských kanálů [-]	992	1392	2992	2392

2.2 Vývoj GSM systému

Technologie přepínání okruhů CSD (Circuit Switched Data) je nejstarším a nejjednodušším způsobem přenosu dat, kde přenosová rychlost je 13 kb/s. Technologii GPRS zavádí 2. vývojová fáze GSM 2, která umožňovala datové přenosy. Rychlost přenosu těchto datových přenosů závisí na kvalitě signálu a počtu přidělených timeslotů. Podle kvality signálu je určeno kódové schéma pro přenos dat CS (Coding Scheme). GPRS má definované čtyři kódovací schémata, která určují teoretickou a uživatelskou přenosovou rychlost na jeden timeslot (Tab. 2.2). Schéma CS-1 je využíváno za špatných přenosových podmínek. Přenáší pouze malé množství užitečných dat a velkou část tvoří zabezpečovací bity. Naopak schéma CS-4 přenáší podstatně více uživatelských dat vyšší přenosovou rychlostí, ovšem za cenu

velmi nízkého zabezpečení. Teoretická přenosová rychlost při využití všech osmi timeslotů a kódovacího schéma CS-4 je 171,2 kbit/s. [5] [8]

Tab. 2.2: Kódové schéma GPRS [5] [8]

Kódové schéma	Přenosová rychlost pro jeden TS [kb/s]	Uživatelská přenosová rychlost pro jeden TS [kb/s]
CS-1	9,1	6,7
CS-2	13,4	10,0
CS-3	15,6	12,0
CS-4	21,4	16,7

Vývojová fáze GSM 2+ zavádí do systému GSM technologii EDGE (Enhanced Data Rates for Global Evolution), která pracuje navíc s osmi stavovou klíčovou modulací 8-PSK, která přinesla efektivnější využití spektra a tím zvýšení přenosové rychlosti při využití všech 8 timeslotů až na 384kb/s. Nutno podotknout, že na okrajích buňky dochází k většímu počtu odrazů signálu, než u základnové stanice, což má za následek snížení modulace až na původní GMSK modulaci použitou u technologie GPRS. Vývojová fáze GSM 2+ přinesla především efektivnější přidělení kmitočtového pásma, vyšší kapacitu sítě, vysokou úroveň zabezpečení a kompatibilitu s ostatními sítěmi. [8]

2.3 Architektura GSM systému

Samotný systém GSM je složena ze tří základních částí. Výjimku tvoří mobilní stanice MS, které jsou samotnou součástí. Níže jsou popsány jednotlivé subsystémy GSM. Blokové schéma architektury je na Obr. 2.1.

- **Mobilní stanice MS**

Komunikace probíhá v rádiové části systému GSM, kde MS komunikuje přímo s nejlépe vyhodnocenou základnovou stanicí BTS na základě rušení a zpoždění signálu. Při vyhodnocení kvalitnějšího rádiového kanálu, nebo změně buňky dochází k handoveru typu MAHO (sítí řízené přepnutí s asistencí MS). Jedná se o tzv. tvrdý handover, při kterém MS nemusí pracovat na více kanálech současně. Nevýhodou tohoto typu handoveru je úplné přerušení rádiového spojení na desítky ms, při kterém může dojít ke ztrátě dat při datových přenosech. [5][8]

Mobilní stanice je identifikována pomocí jednoznačného čísla IMEI (International Mobile Equipment Identity) uloženého v její paměti. Uživatel je následně identifikován pomocí SIM karty, respektive jednoznačného čísla SIM karty IMSI (International Mobile Subscriber Identity). [5] [8]

- **Subsystém základnových stanic BSS**

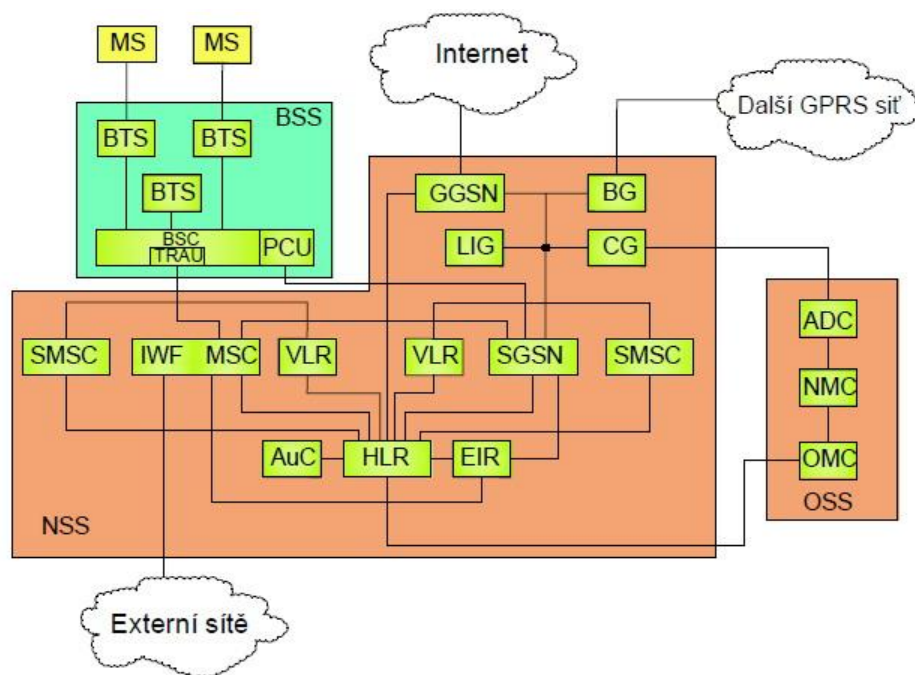
Je složen z jedné, nebo více základnových stanic BTS, které zajišťují přenos dat mobilních stanic MS přes rádiové rozhraní. Samotné řízení BTS provádí řídicí jednotka BSC, která je pro GPRS rozšířena o PCU (Packet Control Unit) provádějící řízení datového toku. Dále je datový tok směřován do SGSN (Serving GPRS Support Node) a přes bránu GGSN (Gateway GPRS Support Node) do internetu. Přes BTS jsou řízeny vysílací výkony MS. [5][8]

- **Síťový a přepojovací subsystém NSS**

Subsystém NSS (Network Switching Subsystem) je páteří částí sítě GSM a zajišťuje jak řídicí, tak i přepojovací a transportní funkce. Řídí komunikaci mezi koncovými zařízeními v GSM síti i mimo ni. Provádí spínací funkce, které zajišťuje mobilní rádiová ústředna MSC. Pokud je ústředna připojena k externím sítím označuje se GMSC (Gateway MSC). Nedílnou součástí v NSS subsystému je domovský lokační registr HLR, což je databáze všech účastníků, které NSS spravuje. K HLR patří Centrum autentičnosti AuC, které ověřuje totožnost každého účastníka. S AuC je těsně propojen registr mobilních stanic EIR, který zaznamenává data o neoprávněně užívaných mobilních stanicích, popř. o odcizených mobilních stanicích a to na základě seznamu IMEI čísel. Každá mobilní rádiová ústředna MSC obsahuje návštěvní lokační registr VLR, což je dočasná databáze pro účastníky právě připojené k této ústředně. Jednotka CG zpracovává vyhodnocení dat za účelem zúčtování. Protože v některých zemích musí být možný odposlech, který zajišťuje brána LIG. [5] [8]

- **Operační subsystém OSS**

Řídí provoz a podporuje údržbu hardwaru předchozích subsystémů, monitoruje registr účastníků a do jisté míry řeší jejich tarifkaci. [5] [8]



Obr. 2.1: Architektura GPRS [5][8]

- AuC (Authentication Centre) - centrum autentičnosti
- BG (Border Gateway) - brána pro komunikaci s dalšími sítěmi
- BSC (Base Station Controller) - základnová řídicí jednotka
- BTS (Base Transceiver Station) - základnová rádiová stanice
- CG (Charging Gateway) - brána pro zúčtování dat v síti GPRS
- EIR (Equipment Identity Register) - registr mobilních stanic
- GGSN (Gateway GPRS Support Node) - brána pro komunikaci s GPRS s vnějšími sítěmi
- HLR (Home Location Register) - domovský lokační registr

IWF (Interworking Function) - jednotka spolupráce s externími sítěmi
 LIG (Legal Intercetion Gateway) - jednotka odposlechu
 MS (Mobile Station) - mobilní stanice
 MSC (Mobile Switching Centre) - mobilní radiotelefonní ústředna
 PCU (Packet Control Unit) - paketová řídicí jednotka
 SMSC (Short Message Service Centre) - centrum pro řízení provozu krátkých textových zpráv
 TRAU (Transcoder and Rate Adaption Unit) - transkódovací jednotka
 VLR (Visitor Location Register) - návštěvnický lokační registr

2.3.1 Parametry GSM systému

Tab. 2.3: Parametry GSM systému [5] [8]

	GSM 900	GSM 1800
Frekvenční pásmo uplink [MHz]	890-915	1710-1785
Frekvenční pásmo pro downlink [MHz]	935-960	1805-1880
Šířka pásma [MHz]	25	75
počet rádiových kanálů [-]	124	374
Odstup duplexních párů [MHz]	45	95
počet uživatelských kanálů [-]	992	2992
Přenosová rychlost v 1 rádiovém kanálu [kb/s]	270,833	270,833
Přenosová rychlost v 1 uživatelském kanálu [kb/s]	33,864	33,864
Přenosová rychlost (hlas) [kb/s]	13	13
Přenosová rychlost (data) [kb/s]	9,6	9,6
Spektrální účinnost [b/s/Hz]	0,52	0,52
Přístupová metoda	FDMA/TDMA	FDMA/TDMA
Maximální velikost buňky [km]	35	35
Maximální rychlost pohybu	250	250

3 UMTS

První vývojová fáze UMTS inovuje 2G systém o nový hardware v podobě rádiové přístupové sítě (UTRAN - UMTS Terrestrial Radio Access Network) pracující ve srovnání s předešlou generací s efektivnější mnohonásobnou širokopásmovou přístupovou metodou W-CDMA s pevnou šířkou pásma 5 MHz. Pro downlink je použita čtyřstavová modulace QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), pro uplink je použita modulace OCQPSK (Orthogonal Complex QPSK). V dalších vývojových fázích následuje příprava na plně paketové jádro s novými přenosovými technologiemi. [8]

3.1 Režimy systému UMTS

Systém UMTS má dva základní způsoby řešení duplexního provozu. Oba režimy používají přenosové rámce s dobou trvání 10 ms a s rozprostírací rychlostí posloupnosti 3,84 MChip/s.

Symetrický režim FDD, který pracuje s různými rádiovými kanály pro downlink a uplink, které vytváří duplexní pár s odstupem 190 MHz. Přenášená data jsou rozdělena do superrámce o délce 720 ms. Superáramec je složen ze 72 rámců s dobou trvání 10 ms. tento rámeček je dále rozdělen na 15 timeslotů s dobou trvání 0,667 ms. Obvykle jsou tři timesloty použity pro řídicí data.

Asymetrický režim TDD pracuje jen s jedním rádiovým kanálem. Směry přenosu se střídají v čase. Je použito opět 15 timeslotů kterým jsou přidělena přenášená data. [6] [7]

3.1.1 Rozdělení kmitočtového pásma

Systém UMTS má vyhrazená kmitočtová pásma uvedena v Tab. 3.1. Pro nepárovaná pásma (TDD) s asymetrickými přenosovými rychlostmi určenými hlavně uvnitř budov byla vybrána technologie TD-WCDMA.

Pro párovaná pásma (FDD) vhodná pro velkoplošné pokrytí byla vybrána technologie FD-WCDMA.

Pro systém DECT je rezervováno pásmo 1, avšak do budoucna se počítá jako kmitočtové pásmo pro UMTS. [6]

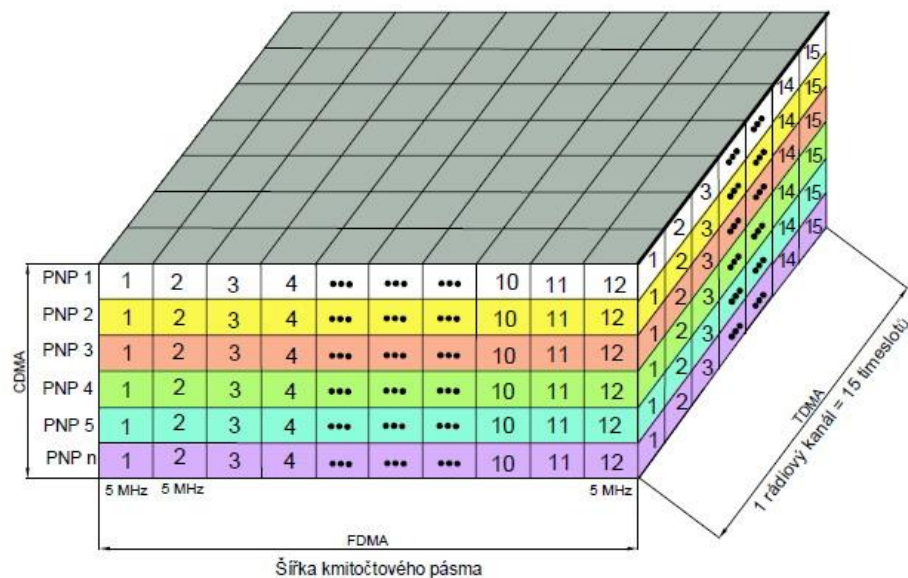
Tab. 3.1: Kmitočtová pásma systému UMTS [6] [7]

Pásmo	Kmitočtový rozsah [MHz]	Šířka pásma [MHz]	Využití
1	1885 - 1900	15	DECT
2	1900 -1920	20	UMTS TDD
3	1920 -1980	60	UMTS FDD
4	1980 - 2010	30	UMTS-MSS
5	2010 - 2025	15	UMTS TDD
6	2110 - 2170	60	UMTS FDD
7	2170 - 2200	30	UMTS-MSS

3.1.2 Přístupová metoda v systému UMTS

Pro systém UMTS byl vybrán pro většinu aplikací asymetrický vysokorychlostní přenos dat, který využívá kombinaci přístupových metod CDMA, FDMA a TDMA. Tím je docíleno

efektivnější využití kmitočtového pásma s výrazně vyšší rychlostí pro downlink, než pro uplink. Kmitočtové pásmo je mnohonásobným přístupem s kmitočtovým dělením FDMA rozděleno na rádiové kanály o šířce 5 MHz, které jsou dále mnohonásobným přístupem s časovým dělením TDMA rozděleny na 15 timeslotů. Každý timeslot je mnohonásobným přístupem s kódovým dělením CDMA rozlišen několika různými pseudonáhodnými posloupnostmi, kde počet těchto posloupností odpovídá počtu uživatelů jak ukazuje Obr. 3.1. [6] [8]



Obr. 3.1: Přístupová metoda v UMTS systému [8]

3.2 Architektura sítě UMTS

Páteří sítě UMTS, respektive její první vývojová řada vychází z architektury GSM, která pracuje kromě techniky přepínání paketů také s technikou přepínání okruhů. To umožnilo postupný přechod na All IP síť, kde veškerá komunikace je založena na IP protokolu. Samotný IP protokol není závislý na rozhraní, tím je dosaženo snazšího zavádění nových služeb pomocí již existujících protokolů, např. řízení datových toků QoS, řízení multimediálních služeb SIP a s ním spojený VoIP. [8] **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

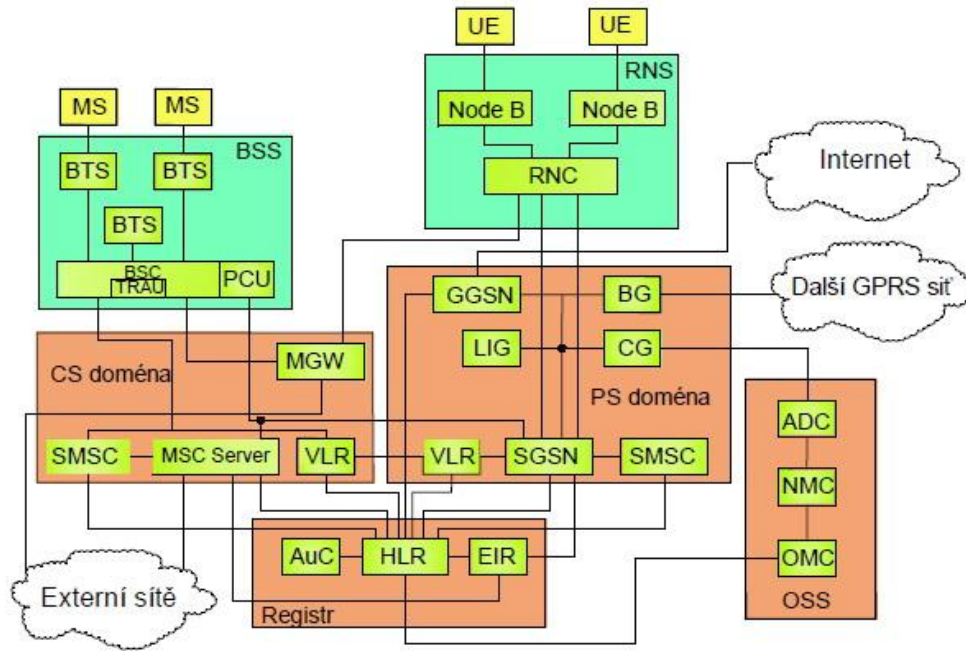
Architektura systému UMTS je složena ze tří základních částí, které jsou:

3.2.1 Uživatelský terminál UE

Uživatelský terminál tvoří mobilní zařízení ME a identifikační modul USIM (obdoba SIM karty), který slouží k identifikaci uživatele. Uživatelský terminál kromě mobilního telefonu může být i notebook, PDA, USB klient pro připojení k síti internet.

3.2.2 Přístupová síť UTRAN

Ve Vydání 99, respektive Release 99 je zavedena nová základnová rádiová stanice Node B, který nahrazuje BTS a dále je zavedena nová řídicí jednotka rádiové sítě RNC, která inovuje základnovou řídicí jednotku BSC z předchozí generace GSM. Jako přenosová technologie je použita ATM, která využívá asynchronní přenos dat a tím slučuje paketový a synchronní přenos dat. Pro efektivnější směřování vysokorychlostních dat byla upravena ve Vydání 4 okruhová doména CS. Původní mobilní radiotelefonní ústředna MSC byla rozdělena na MGW (Media Gateway) a MSC Server, jak ukazuje Obr. 3.2. [8] [14]



Obr. 3.2: Architektura systému UMTS - Vydání 4 [5] [8]

- ADC (Administrative Centre) - administrativní centrum
- AuC (Authentication Centre) - centrum autentičnosti
- BG (Border Gateway) - brána pro komunikaci s dalšími sítěmi
- BSC (Base Station Controller) - základnová řídicí jednotka
- BTS (Base Transceiver Station) - základnová rádiová stanice
- CG (Charging Gateway) - brána pro zúčtování dat v síti GPRS
- EIR (Equipment Identity Register) - registr mobilních stanic
- GGSN (Gateway GPRS Support Node) - brána pro komunikaci s GPRS s vnějšími sítěmi
- HLR (Home Location Register) - domovský lokační registr
- IWF (Interworking Function) - jednotka spolupráce s externími sítěmi
- LIG (Legal Interception Gateway) - jednotka odposlechu
- MS (Mobile Station) - mobilní stanice
- MSC (Mobile Switching Centre) - mobilní radiotelefonní ústředna
- NMC (Network Management Center) - centrum managementu sítě
- OMC (Operational and Maintenance Center) - provozní a servisní centrum
- PCU (Packet Control Unit) - paketová řídicí jednotka
- RNC (Radio Network Controller) - řídicí jednotka rádiové sítě
- SGSN (Serving GPRS Support Node) - brána pro komunikaci s vnějšími sítěmi

SMSC (Short Message Service Centre) - centrum pro řízení provozu krátkých textových zpráv
TRAU (Transcoder and Rate Adaption Unit) - transkódovací jednotka
UE (User Equipment) - uživatelský terminál
VLR (Visitor Location Register) - návštěvnický lokační registr

- **Vydání 5**

Druhá vývojová fáze UMTS 3,5 označovaná jako 3,5G ve Vydání 5 zavádí v rádiové části novou přístupovou metodu HSDPA, která přináší vyšší přenosové rychlosti, 14,4Mb/s na buňku. V reálném provozu lze dosáhnout rychlosti kolem 2Mb/s. Ta je docílena dodatečnými modulačními schémata - modulace 16-QAM a dále za použití techniky rychlého přidělování radiových zdrojů - FPS (Fast Packet Scheduling) a hybridní metody automatické žádosti o opakování HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request). K dalšímu snížení zpoždění přispělo přesunutí funkcí z RNC do NodeB, jako např: přidělování jednotlivých rádiových kanálů, zajišťování radiových zdrojů, plánování přenosu pro rychlá data.

- **Vydání 6**

Implementuje technologii HSUPA zvyšující přenosovou rychlost v uplinku na 5,76 Mb/s pro celou buňku. V technologii HSUPA jsou také některé funkce přesunuty z RNC do NodeB, dále je použita HARQ. V reálném provozu lze bez problému dosáhnout rychlosti 1,4 Mb/s. [5] [8]

- **Vydání 7**

Následuje další zvýšení přenosové rychlosti ve Vydání 7 a to díky technice více antén MIMO. Podle počtu antén je odvozeno samotné označení, nejčastěji MIMO 2x2 a MIMO 4x4. Tedy MIMO 2x2 nese označení pro 2 antény, ovšem každá anténa slouží jako přijímací i jako vysílací. Základní myšlenkou je přenos dat mezi EU a NodeB několika různými nezávislými radiovými cestami s nižší přenosovou rychlostí přes každou anténu, než jako jeden datový sériový tok. Technika více antén je podrobněji popsána v následující podkapitole 3.2.3. [4] [8]

Předchozí vylepšení zastřešuje ve Vydání 7 technologie HSPA+, která rozšiřuje stávající technologii HSDPA mimo modulace 16-QAM ještě o modulaci 64-QAM. Tím je dosaženo o polovinu vyšší přenosové rychlosti pro downlink, až na 21,6 Mb/s. Také pro uplink je rozšířena stávající technologie HSUPA mimo modulace QPSK o modulaci 16-QAM, čímž je dosaženo přenosové rychlosti v uplinku až na 11,5 Mb/s. Ovšem se zvyšujícím se počtem stavů, klesá odolnost proti interferencím a to převážně na okrajích buňky Proto jsou nové modulace používány většinou v blízkosti NodeB, protože na okrajích buňky není požadovaný odstup signálu od šumu, který musí být alespoň o 6 dB větší než pro modulaci 16 QAM kde je zapotřebí odstup signálu od šumu 21 dB pro downlink. Technologie HSPA+ zavádí podporu techniky MIMO 2x2, ale pouze pro downlink, s modulací QPSK, popř. 16-QAM. Tím je dosaženo přenosové rychlosti pro downlink 28 Mb/s. Dále rozšiřuje stávající kanál FACH (Forward Acces Channel) v UMTS, určený pro řídící informace na kanál E-FACH (Enhanced Forward Access Channel), který zajišťuje okamžitou komunikaci, dokud není sestaveno spojení. Tím je docíleno nespojitého vysílání, uživatelský terminál v době kdy nevysílá žádná data, může vypnout vysílací obvody a tím šetřit baterii. Současně podporuje nespojitý příjem, proto nemusí stále kontrolovat svůj stav v síti. Nespojité vysílání a příjem snižují interference v buňce působením menšího počtu aktivních uživatelských terminálů. [4] [8]

Posledním vylepšením ve Vydání 7 je technologie E-EDGE (Evolved EDGE), která vychází z technologie EDGE představená v GSM systému, se kterou je plně kompatibilní.

E-EDGE zavádí dvě nosné pro downlink a tím přidělení uživateli až 8 timeslotů, tedy dvojnásobek, než v prvním vývojovém stupni EDGE technologii. Dále jsou přidány nová vícecestavová modulační a kódová schémata, která se dělí na úroveň A s přenosovou rychlostí do 98,4 kb/s na jeden timeslot a úroveň B s rychlostí do 118,4 kb/s na jeden timeslot. Symbolová rychlost je pro úroveň A 270,833kS/s a pro úroveň B 325, kS/s. Pro downlink jsou použity turbo kódy s úrovní A pracující s modulacemi 8-PSK, 16-QAM a 32-QAM. Pro uplink jsou použity konvoluční kódy pracující pouze s 8-PSK a 16-QAM. Úroveň B je použita jak pro downlink, tak pro uplink. Přenosový časový interval TTI je zkrácen z 20 ms na 10 ms. Latence je snížena z 200 ms na 80 ms. Dále je zlepšena kvalita služeb QoS a zvýšena spektrální účinnost. Tím je docíleno zvýšení přenosové rychlosti hlavně ve středu buňky a jejím okolí. Na okrajích buňky je použit diverzitní příjem ke snížení interferencí a také jsou použity turbokódy ke zvýšení odolnosti proti chybám. Teoretická maximální rychlost je pro technologii E-EDGE 1,8944 Mb/s pro downlink a 0,947 Mb/s pro uplink, reálné rychlosti jsou poloviční. [4] [8]

Techniku více antén lze využít i v případě, kdy technologie HSPA+ není mobilní sítí podporována, protože více antén umožňuje diverzitní příjem a tím potlačení rušení z okolních buněk především na okrajích určité buňky. [4] [8]

- **Vydání 8**

Zavádí technologii Dual Carrier HSDPA. Většina UMTS sítí má přidělenou šířku pásma alespoň 10 MHz v rámci licence. Šířka jednoho kanálu je 5 MHz. DC-HSDPA (Dual Carrier HSDPA) lze dosáhnout dvojnásobné přenosové rychlosti s využitím dvou sousedních kanálů. Navíc při použití modulace 64-QAM je přenosová rychlost rovna 42 Mb/s jako s technologií MIMO, která ovšem ve Vydání 8 není podporovaná v kombinaci s DC-HSDPA.

- **Vydání 9**

Kvalitnější využití technologie MIMO v kombinaci s DC-HSDPA přináší až Vydání 9, kde je dosaženo přenosové rychlosti 84 Mb/s. Technologie DC-HSDPA je rozšířena o možnost využití nosných z různých radiofrekvenčních pásem pod názvem DB-DC-HSDPA (Dual Band DC-HSDPA). Jsou navýšeny rychlosti i pro uplink, tedy směrem od uživatele pomocí technologie DC-HSUPA.[8]

- **Vydání 10**

Je zavedena nová technologie MC-HSPDA (Multi Carrier-HSDPA), která rozšiřuje možnosti DC-HSDPA. Umožňuje využití tří, nebo čtyř nosných současně. Podmínkou je, že jednotlivé nosné musí být sousední a poskytovatel musí mít k dispozici větší šířku pásma pro tři, respektive čtyři nosné, tedy 15 MHz, nebo 20 MHz. Je dosaženo přenosové rychlosti až 168,8 Mbit/s s technikou MIMO 2x2 a 64-QAM.

- **Vydání 11**

Jsou dále navýšeny přenosové rychlosti. Pro downlink za použití až osmi nosných s technikou více antén MIMO 4x4 a maximální přenosovou rychlostí 672 Mbit/s. Uplink je rozšířen o modulaci 64-QAM a MIMO 2x2 s maximální přenosovou rychlostí 70 Mbit/s. [4] [8] [14]

3.2.3 MIMO

Technika více antén MIMO (Multiple Input Multiple Output) zvyšuje přenosové charakteristiky a výkon systému. Mezi hlavní přednosti patří zvýšení přenosové rychlosti

v malých buňkách a zvýšení pokrytí na okrajích středních a velkých buněk. Samotná šířka pásma zůstává pro techniku MIMO zachována, avšak to je využito efektivněji. Se zvyšujícím se počtem antén se zvyšuje přenosová rychlost a kvalita spojení. [14]

3.2.4 Konfigurace více antén

Jedním z důležitých parametrů při konfiguraci MIMO je vzdálenost λ (nm) mezi samotnými anténami v přijímači, nebo vysílači. Tato vzdálenost je závislá na vlnové délce a nosném kmitočtu. Další možností jak snížit vzájemnou korelaci antén je různá polarizace. K dosažení různých cílů je nejpoužívanější metoda:

- Prostorové multiplexování

Velice efektivní využití šířky pásma kmitočtového kanálu je za použití pomalejších paralelních komunikačních kanálů, kde každý kanál je vysílán přes jednu anténu. Jednotlivé kanály jsou vysílány se stejným kmitočtem, ale s různým prostorovým kódem (MIMO).

Navíc je využita MRC (Maximal Ratio Combining) metoda pro snížení šumu při využití více antén v prostředí kde síla signálu je malá a rušení šířením mnohacestných odrazů velké.

Potom propustnost komunikačního kanálu roste téměř lineárně s počtem antén a je dána vztahem:

$$\frac{C}{B} = N_L \cdot \log_2 \left(1 + \frac{N_R}{N_L} \cdot \frac{S}{N} \right) \quad (3.1)$$

kde C...maximální dosažitelná rychlost při přenosu informace radiovým kanálem (b/s)

B...šířka radiokomunikačního kanálu (MHz)

N_L ...paralelní kanály se sníženým poměrem signál - šum, $N_L = \min \{ N_T, N_R \}$

N_R ...zisk přijímací antény (dB)

N_T ...zisk vysílací antény (dB)

S...střední hodnoty výkonu signálu (dB)

N...střední hodnota výkonu šumu (dBm) [3]

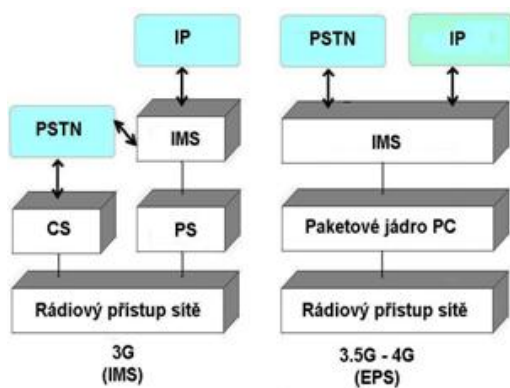
3.2.5 Páteřní síť UMTS

Vychází z páteřní sítě systému GSM založená na protokolu GTP (GPRS Tunnel Protocol).

V následujících Vydáních prošla páteřní síť UMTS změnami směrem k čistě paketovému provozu.

- Vydání 5

Samotné jádro 3G sítě prošlo také zásadními změnami. Doména CS je odstraněna ve Vydání 5 a její služby jsou převedeny do domény přepínání paketů PS. Tím je docíleno zavedení VoIP technologie. IP multimediální služby v reálném čase jsou poskytovány nově přidáním subsystémem IMS (IP Multimedia Subsystem), jak ukazuje Obr. 3.3. [9]



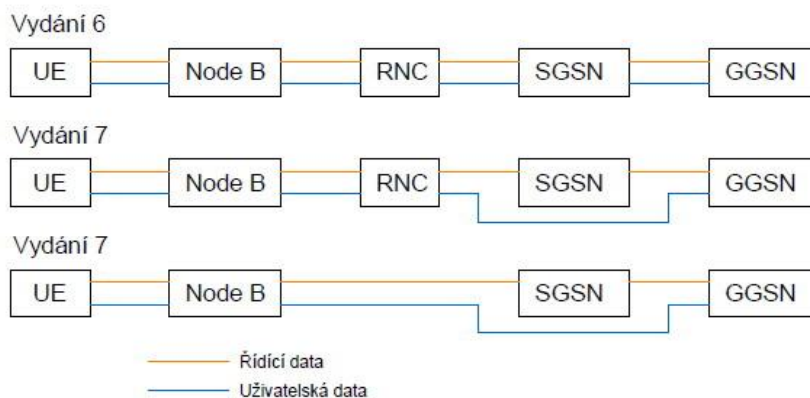
Obr. 3.3: Srovnání architektur celulárních sítí pro různé generace [9]

- **Vydání 6**

Přináší navýšení přenosové rychlosti pro uplink za použití technologie HSUPA. Je také definována spolupráce s WLAN sítěmi. Myšlenkou je využití stávajících terminálů pro WLAN sítě také v 3GPP systémech. [4]

- **Vydání 7**

Novinku s názvem „plochá architektura“ zavádí Vydání 7, kde uzlem SGSN procházejí pouze řídicí informace a pro tok samotných dat je tento uzel vynechán. Dalším krokem k ploché architektuře je přenesení funkcí z RNC přímo na NodeB. Tím je docílen přenos dat z Node B přímo do GGSN a podstatně snížena latence o dva uzly RNC a SGSN, jak ukazuje (Obr. 3.4). Tím byly položeny základy pro SAE (System Architecture Evolution). [7]



Obr. 3.4: Plochá architektura [7]

4 LTE

Přístupová síť LTE byla představena ve Vydání 8 a s ní i nová architektura systému SAE. Toto vydání je zásadní, protože přineslo podstatné změny v architektuře sítě, zavádí také nové technologie a je dalším stupněm vývoje HSPA+. Přístupová síť LTE bývá často nesprávně řazena mezi síť 4. generace. Nesplňuje některé požadavky 4G systému stanovené ITU, především přenosovou rychlost 1 Gb/s pro UE (User Equipment), které jsou v klidu a 100 Mb/s pro rychle se pohybující UE. Tyto požadavky jsou splněny až v LTE Advanced, která je specifikovaná ve Vydání 10. Samotný vývoj 4G zajišťuje celosvětové sdružení 3GPP, jehož cílem je celosvětový standard, jakým byl systém GSM. Mezi hlavní přednosti sítě LTE patří především přenosové rychlosti desítky Mb/s (Vydání 8), později až 100 Mb/s (Vydání 9 a vyšší). Přístupová síť LTE přináší podstatné snížení latence vycházející z architektury ve Vydání 7. Efektivnější využití přiděleného spektra a možnost použití ve stejném kmitočtovém pásmu jako předchozí analogové televizní vysílání, tzv. digitální dividendy. Pracuje jak v licencovaných, tak i nelicencovaných pásmech a to od 700 MHz do 2,4 GHz. Nižší kmitočtová pásma jsou použita pro lepší šíření signálu. Tím je zajištěno pokrytí stejného území menším počtem základnových stanic eNodeB, což je další novinkou v LTE. Veškerá komunikace je založena na protokolu IP zajišťující snadnější komunikaci s ostatními sítěmi a to jak pevnými, tak i mobilními. [14]

4.1 Kmitočtové pásmo v přístupové síti LTE

Pro síť LTE bylo organizací 3GPP vybráno 24 párových pásem pro režim FDD a 9 nepárových pásem pro režim TDD, viz Tab. 4.1 a Tab. 4.2. Většina těchto kmitočtových pásem byla již definována pro činnost s WCDMA/HSPA. Pro jednodušší nasazení nabízí LTE flexibilní šířku pásma 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz pro režim FDD. Pro režim TDD potom 1,6 MHz a 3,2 MHz. Šířka kmitočtového pásma umožňuje využit současných pásem, která vyžadují šířku pásma menší, nebo rovnou 5 MHz a umožnit tak plynulý přechod jen na přístupovou síť LTE. Kmitočtová pásma s šířkou 1,4 MHz a 3 MHz jsou určeny výhradně k migraci z WCDMA/HSPA, nebo GSM na LTE. Provozovateli sítě zůstává dostatečná velikost spektra pro podporu stávajících uživatelů. Současně může pracovat s malým rozsahem kmitočtového spektra LTE, které bude postupně rozšiřovat. Nová pásma jsou určena pro širokopásmové přenosy do 20 MHz s vysokou přenosovou rychlostí. [8] [14]

Tab. 4.1: Rozdělení kmitočtového pásma LTE TDD [3]

Pásmo	Downlink / Uplink [MHz]	Šířka pásma [MHz]
33	1990 - 1920	20
34	2010 - 2025	15
35	1850 - 1910	60
36	1930 - 1990	60
37	1910 - 1930	20
38	2570 - 2620	50
39	1880 - 1920	40
40	2300 - 2400	100
41	2496 - 2690	194

Tab. 4.2: Rozdělení kmitočtového pásma pro LTE FDD [3]

Pásmo	Downlink [MHz]	Uplink [MHz]	Šířka pásma [MHz]
1	2110 - 2170	1920 - 1980	60
2	1930 - 1990	1850 - 1910	60
3	1805 - 1880	1710 - 1785	75
4	2110 - 2155	1710 - 1755	45
5	869 - 894	824 - 849	25
6	875 - 885	830 - 840	10
7	2620 - 2690	2500 - 2570	70
8	925 - 960	880 - 915	35
9	1844,9 - 1879,9	1749,9 - 1784,9	35
10	2110 - 2170	1710 - 1770	60
11	1475,9 - 1500,9	1427,9 - 1452,9	25
12	728 - 746	698 - 716	18
13	746 - 756	777 - 787	10
14	758 - 768	788 - 798	10
17	734 - 746	704 - 716	10
18	860 - 875	815 - 830	15
19	875 - 890	830 - 845	15
20	791 - 821	832 - 862	30
21	1495,9 - 1510,9	1447,9 - 1462,9	15
22	3510 - 3600	3410 - 3500	90
23	2180 - 2200	2000 - 2020	20
24	1525 - 1559	1626,5 - 1660,5	34

4.2 OFDM

Vzhledem k široké škále požadavků, které přístupová síť LTE nabízí, především velikosti buněk od jednotek metrů až do sta kilometrů a vysoké pohybové rychlosti UE terminálů až 500 km/h, musí modulace OFDM splňovat určité parametry na fyzické vrstvě. Nosné frekvence, které mohou být použity v praxi jsou v rozsahu od 400MHz do 4 GHz. Šířka pásma je v rozmezí od 1,4 do 20 MHz. Vhodná modulace pro mobilní datovou komunikaci je rozhodující pro dosažení dobrého výkonu systému. Ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením (Orthogonal Frequency Division Multiplex - OFDM) rozděluje jeden vysokorychlostní sériový datový tok na několik stovek až tisíc paralelních datových toků (subnosných), každý s nízkou přenosovou rychlostí a každý s jiným nosným kmitočtem. Ortogonálním dělením jsou od sebe odděleny subnosné, takže maximum každé z nich se překrývá s průchody nulou ostatních. Tato vlastnost dělá OFDM vysoce spektrálně efektivní. S rostoucí šířkou přenosového kanálu roste i počet subnosných a tím i přenosová rychlost. Maximální přenosová rychlost je dosažena s šířkou pásma 20 MHz a využitím více antén. V praxi je náročné zpracování několika bitovými převodníky nahrazeno signálovým procesorem realizující samotný modulátor OFDM, který provádí převod z frekvenční oblasti do časové pomocí IFFT (Inverse Fast Fourier Transform). [8] [14]

Nízká přenosová rychlost jednotlivých datových toků pro každou subnosnou zajišťuje výrazné prodloužení doby jednoho symbolu, který je také výrazně delší, než samotné zpoždění v kanále. Vzhledem k prodloužení jednoho symbolu je potlačena ISI (Inter-Symbol Interference). [4]

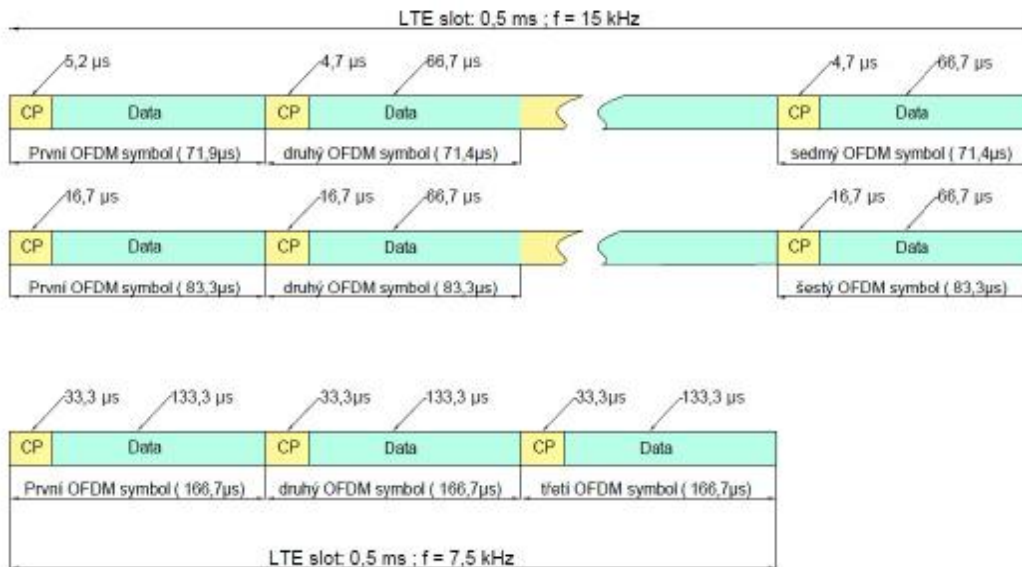
Vstupní data ze zdroje signálu jsou při přenosu kanálem zabezpečena proti chybám kanálovým kódováním FEC (Forward Error Correction). Modulací QPSK, 16-QAM, nebo 64-QAM jsou kódované bity převedeny do komplexních symbolů a v převodníku SPC (Serial to Parallel Converter) převedeny na paralelní toky dat. Ty jsou následně modulovány na subnosné signálovým procesorem.

Další klíčová operace v generování OFDM signálu je vytvoření ochranného intervalu na začátku každého OFDM symbolu přidáním cyklického prefixu CP. Tím je odstraněna mezisymbolová interference ISI a interference mezi nosnými ICI v důsledku šíření odrazy. Uvnitř buňky je interference z přilehlých buněk. CP je generován kopírováním posledních vzorků z výstupu IFFT a připojením na začátek. Pro úplné potlačení ISI musí být délka CP T_{CP} (μ s) zvolena delší, než nejdelší impulsní odezva kanálu. Tím je zaručena odolnost proti vícecestnému šíření. S prodlužující se dobou CP o délce T_{CP} se zvyšuje odolnost proti tomuto rušení, ale za cenu snižující se přenosové rychlosti užitečných dat, tedy vyšších režii. Více podrobností o CP intervalu je popsáno v části 4.2.1. Výstupní signál z IFFT je pak v převodníku PSC (Parallel to Serial Converter) převeden z paralelních toků na jeden sériový tok dat. Digitální signál je přiveden do D/A převodníku, kde na výstupu je analogový signál zesílen v zesilovači a anténou vyzářen do prostoru. Na přijímací straně jsou postupy opačné, vzorky CP jsou odstraněny a předány FFT. [4]

4.2.1 Struktura rámce v LTE

Přístupová síť LTE pracuje jak s párovým (TDD), tak nepárovým (FDD) spektrem. Pro každý duplex je jiná subrámcová struktura. Pro FDD je použit rámeček typu 1, TDD pracuje s rámečkem typu 2.

Nejmenším prvkem je OFDM symbol, který je složen z užitečných dat a cyklického prefixu CP o délce T_{CP} . Pokud je LTE nakonfigurována s normální délkou T_{CP} , která minimalizuje všechny odražené signály s maximálním rozdílem délek drah 1,4 km mezi přímým a odraženým signálem, jeden slot je dlouhý 0,5 ms a obsahuje 7 OFDM symbolů. V prvním OFDM symbolu je délka CP větší než ve zbylých šesti OFDM symbolech (tj. 5,2 μ s a pak už 4,7 μ s). Potom délka prvního OFDM symbolu včetně užitečných dat je 71,9 μ s a druhého až sedmého symbolu je 71,3 μ s. Pro rozšířený CP s délkou trvání $T_{CP} = 16,7 \mu$ s minimalizuje všechny odražené signály s maximální délkou 10 km, než přímý signál. Jeden slot obsahuje pouze 6 OFDM symbolů, každý s délkou trvání 83,3 μ s. Dva sloty tvoří jeden subrámeček s délkou 1 ms. Potom rámeček o délce 10 ms je tvořen 10 subrámečky, respektive 20 sloty a označuje se jako rámeček typu 1 jak ukazuje Obr. 4.1. Takto vzniklý rámeček se používá pro režim FDD. Jeden celý rámeček je použit pro downlink a jeden pro uplink. Tyto režimy jsou odděleny frekvenčně. Třetí typ OFDM symbolu o dvojnásobné délce 166,7 μ s je určen pro zajištění odolnosti signálu proti případným interferencím. Předpokládáné využití je pro multimediální vysílání, popř. v LTE Advanced. [14]

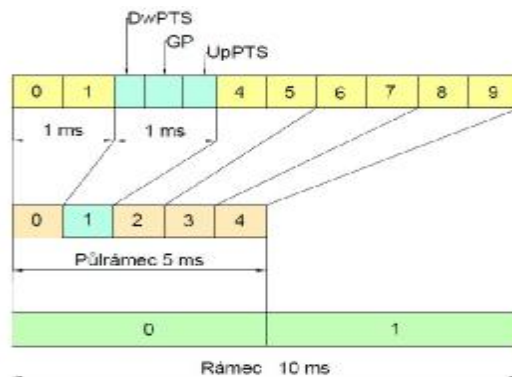


Obr. 4.1: LTE FDD rámeč typu 1 [14]

Pro režim TDD je použit rámeč typu 2, také o délce 10 ms, který je složen ze dvou půlrámčů s délkou 5 ms, jak ukazuje Obr. 4.2. Každý půlrámeč obsahuje 4 subrámeč po 1 ms pro přenos užitečných dat a 1 subrámeč s délkou 1 ms, který obsahuje trojici timeslotů určenou k přepínání mezi downlinkem a uplinkem. První timeslot s označením DwPTS (Downlink Pilot Timeslot), druhý timeslot s označením GP (Guard Period) spolu s třetím timeslotem UpPTS (Uplink Pilot Timeslot) mají pro různé konfigurace celkem sedm uspořádání jednotlivých subrámečů s periodou přepínání buď 5 ms, nebo 10 ms, jak je zobrazeno v tab.Tab. 4.3. Pro případ s periodou 5 ms se speciální subrámeč použije v obou půlrámčích. Pokud je stanovena perioda 10 ms je speciální subrámeč použit jen jednou a to v prvním půlrámci. [4] [14]

Pro potlačení interferencí ze sousedních buněk, tedy přenosy pro downlink a uplink včetně sousedních buněk mají nastaveny stejné parametry. Dynamická konfigurace pro downlink a pro uplink není možná a je dána staticky viz Tab. 4.1.

V návrhu rámeče LTE TDD je počítáno se spoluprací dřívějších 3GPP systému. Timesloty DwPTS, GP a UpPTS je možné volit s různou délkou a docílit tak přesného načasování. Pro timeslot UpPTS je délka jeden, nebo dva OFDM symboly. Timeslot DwPTS může nabívat od tří do dvanácti OFDM symbolů. Timeslot GP od jednoho do 10 OFDM symbolů.



Obr. 4.2: Rámeč LTE TDD typu 2 [14]

Tab. 4.3: Uspořádání LTE TDD subrámců [14]

Konfigurace	Rámec									
	1. půlrámec					2. půlrámec				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

4.2.2 Struktura zdrojového bloku RB

Rozestup pomocných nosných vln je stanoven na $\Delta f = 15$ kHz, potom délka trvání jednoho symbolu na jedné subnosné je $T_U = 66,7$ μ s. Vzorkovací kmitočet pro šířku pásma 20 MHz je určen $f_{S20} = \Delta f \cdot N_{FFT} = 15\,000 \cdot 2048 = 30,72$ MHz, kde N_{FFT} je počet subnosných o velikosti FFT. Minimum je stanoveno na 72 subnosných. Například pro pásmo 5 MHz LTE využívá 512 subnosných, ale jen 300 z nich obsahuje uživatelská data, zbylé subnosné jsou určeny k synchronizaci a přenosu řídicích dat. Definice těchto parametrů plně odpovídá vzorkovací frekvenci 30,72 MHz, což je násobkem základní jednotky v LTE definované jako $T_s = 1/30,72$ μ s. Tím je zaručena zpětná kompatibilita s UMTS. Čipová rychlost pro UMTS je 3,84 MChip/s, pro HSPA je 7,68 MChip/s což je přesně osmina, respektive čtvrtina předpokládané vzorkovací frekvence v LTE.

Nejmenší zdrojový prvek RE (Resource Element) je složen z jednoho OFDM symbolu na jedné nosné. Základní jednotkou přenosu v systému LTE je zdrojový blok RB (Resource Block), který se skládá z 12 subnosných o délce 0,5 ms. Standardní zdrojový blok RB je složen z $12 \cdot 7$ OFDM symbolů. V případě prodlouženého prefixu CP má zdrojový blok 72 OFDM symbolů. Specifikace fyzické vrstvy LTE definuje libovolné množství zdrojových bloků v rozmezí od 6 do 110 RB pro šířku radiového pásma 20MHz. [14]

4.2.3 Výhody a nevýhody OFDM

Velkou výhodou modulace OFDM je přidělení určitého počtu subnosných, v závislosti na šířce přenášeného pásma. Tím je zaručeno využití pro rozdílné šířky přenosových kanálů. Navíc OFDM pracuje s vysokou spektrální účinností pro přidělené spektrum. Ta je dána umístěním samotných subnosných velmi blízko sebe, odolnost proti mnohacestnému šíření a tím minimalizuje ISI a ICI. [4] [14]

Mezi nevýhody OFDM modulace patří vzájemné posunutí sousedních subnosných neboli frekvenční offset vlivem Dopplerova jevu. Tento stav nastává při vzájemném pohybu přijímače a vysílače, kdy jsou porušeny podmínky ortogonality a dochází ke vzniku ICI. Tyto jsou v praxi eliminovány pomocí CP, za cenu snížení přenosové rychlosti. Další nevýhodou jsou výkonové ztráty v lineárních zesilovačích při vysoké hodnotě poměru špičkového výkonu k průměrnému výkonu signálu PAPR (Peak to Average Power Ratio).

Kde samotné zesílení lineárního zesilovače je omezeno napájecím napětím. Hodnota PAPR je kompromisem mezi výkonem EU a životností baterie. [4]

4.2.4 OFDMA

Přístupová síť LTE používá pro downlink mnohonásobný přístup OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Acces), pracující s ortogonálním frekvenčním multiplexem OFDM. Všechny subnosné jsou rozděleny mezi jednotlivé uživatele, tzv lokalizovaně, čili subnosné jednoho uživatele jsou umístěny do bloku. Přístupová metoda OFDMA přebírá výhody modulace OFDM, zejména flexibilitu v počtu přidělených subnosných, a tím lze měnit přenosovou rychlost podle potřeb daného uživatele, v závislosti na přidělené šířce kmitočtového spektra. Umožňuje využití více antén a to jak ve vysílači, tak i v přijímači. [4] [14]

4.2.5 SC-FDMA

Pro uplink je použit mnohonásobný přístup SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access), který také vychází z výhod modulace OFDM za použití rozprostírání signálu pomocí diskrétní Fourierovy transformace DFTS-OFDM předřazeným signálovým procesorem, který provádí výpočet rychlé Fourierovy transformace FFT. Pomocí SC-FDMA je signál modulovaný na dané subnosné lineární kombinace všech dat přenášených symbolů ve stejném časovém okamžiku, tedy každý symbol je rozprostřen ve všech subnosných. Proto nemůže při zpracování signálu docházet ke vzniku stejných OFDM symbolů, jako u OFDMA. To má za následek výrazně nižší poměr špičkového výkonu k průměrnému výkonu signálu PAPR. V tomto případě se hodnota PAPR blíží hodnotě jedné (Single Carrier FDMA). Zvýšení energetické účinnosti je zásadní pro uplink, kde je výkon UE omezen kapacitou akumulátoru. [4] [14]

4.2.6 Přístup do sítě LTE

Uživatelský terminál, který není připojen do přístupové sítě LTE musí nejprve nalézt synchronizační informace a poté provést synchronizaci s eNode B, od které obdrží dekodovací informace pro zabezpečenou komunikaci. Synchronizační proces se skládá z následujících kroků:

- získání frekvence a synchronizace symbolu k buňce
- časové nastavení rámce buňky
- stanovení parametrů identity na fyzické vrstvě

Při vyhledávání LTE buňky jsou používány dva synchronizační signály, které jsou využívány v každé buňce pro downlink. Primární synchronizační signál (PSS) a sekundární synchronizační signál (SSS). Detekce těchto dvou signálů umožňuje synchronizaci času, frekvence, stanovuje délku CP a informuje UE, zda buňka pracuje s FDD, nebo s TDD. Sloty PSS a SSS jsou vloženy dvakrát do 10 ms rámce.

Pro buňku FDD je PSS vždy umístěn v posledním OFDM symbolu prvního a jedenáctého slotu, každého rádiového rámce. To umožňuje UE stanovit délku CP. SSS se nachází v OFDM symbolu před PSS, tedy v šestém, respektive pro rozšířené CP v pátém OFDM symbolu.

V buňce TDD se nachází PSS ve třetím symbolu třetího a třináctého slotu DwPTS, SSS struktura je umístěna tři symboly před PSS. Rámce LTE FDD a LTE TDD jsou podrobněji popsány v podkapitole 4.2.1. Nyní terminál identifikuje PSS, je nastavena fyzická identita vrstvy buňky a pevná pozice SSS, která dále nastaví časové nastavení rámců, skupinovou

identitu buňky. Jakmile je nastavena identita fyzické vrstvy pro downlink, je provedeno měření vůči přijatému referenčnímu signálu a UE může získat systémové informace pro správný a zabezpečený přenos dat, šířce pásma, konfigurace TDD a další parametry.

Systémové informace jsou přenášeny v MIB bloku (Master Information Block) transportním kanálem downlinku BCH a SIB bloku (System Information Block) sdíleným kanálem DL-SCH. V LTE je definováno devět typů SIB bloků. Z toho SIB4 až SIB8 nesou data o typu sousedních buněk jako LTE, WCDMA/HSPA, GSM, nebo CDMA2000 a jejich parametrech.

Následuje synchronizace a získání přístupových parametrů pro uplink. Zpoždění rádiového signálu pro uplink v LTE buňce je stanoveno na $6,7 \mu\text{s}/\text{km}$ a úměrně stoupá s velikostí buňky. Správné stanovení vzdálenosti UE od eNode B, tedy zpoždění rádiového signálu, je zajištěna pomocí preamble přímého přístupu. Ta je mapována na fyzickém kanálu PRACH. Struktura kanálu PRACH je totožná s WCDMA, tedy preamble ve WCDMA je v LTE také OFDM symbol skládající se ze Zadoff-Chu sekvencí. Nejmenší preamble o délce 1 s je složena z cyklické předpony CP o délce 0,1 ms, sekvence preamble o délce 0,8 ms a hlídací doby GT o délce 0,1 ms je určena pro buňku s poloměrem do 15 km. Celkem jsou definovány čtyři formáty preamble s různými parametry v závislosti na velikosti buňky, jak ukazuje

Tab. 4.4. Preamble pracuje s oběma typy duplexů a to FDD a TDD. V TDD je umístěna v timeslotu UpPTS. Následně je OFDM symbol mapován na fyzický kanál PRACH. Bloky SIB jsou přenášeny podle potřeb UE a podle časového nastavení samotné sítě v závislosti na rychlosti pohybu UE a režiiích. [3]

Tab. 4.4: Preamble a její formáty [3]

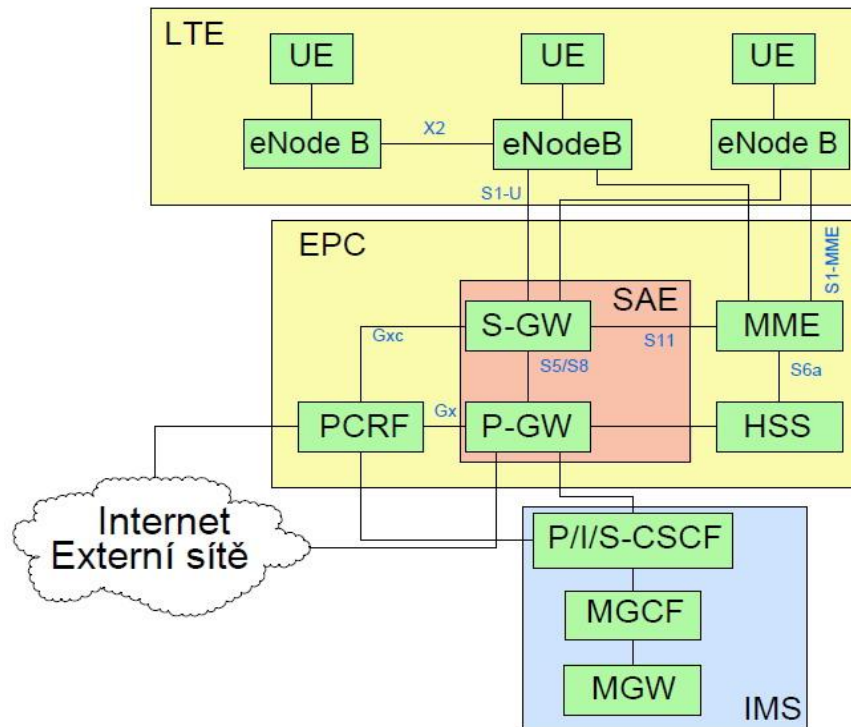
formát preamble	T_{CP} [ms]	T_{SEO} [ms]	T_{GT} [ms]	max. poloměr buňky [km]
0	0,1	0,8	0,1	14
1	0,68	0,8	0,52	77
2	0,2	1,6	0,2	29
3	0,68	1,6	0,72	100

V samotné buňce nejsou téměř interference pro downlink, popř. minimální, protože je dosaženo téměř vždy ortogonality signálu ze strany eNode B. Situace je o něco jiná pro uplink, kde rušení způsobují nejvíce terminály na okraji buňky A interference zasahují i do sousední buňky B. Sousední buňka B, respektive eNode B pro potlačení interferencí z buňky A může zvýšit vysílací výkon, ale zvýší i interferenci v buňce A. Řešením je plánování uplinku tak, aby se UE na okrajích buněk vyhnuly současným přenosům způsobující vysokou interferenci. Pro komunikaci o plánovacích procesech mezi sousedními buňkami slouží rozhraní X2. [3]

4.3 Architektura rozvinutého paketového systému EPS

Architektura přístupové sítě LTE (Long Term Evolution) a jádra sítě EPC (Evolved Packet Core) pracují čistě s paketovým spojením založeným na protokolu IPv4, respektive IPv6, včetně vnitřní komunikace v systému. Přístupová síť LTE vychází z přístupové sítě HSPA+. Samotný EPS je vysoce optimalizován pro poskytování protokolu IP i mezi vrstvami a uzly systému. IP je obvykle spojen s QoS (Quality of Service), která zaručuje poskytnutí základních služeb, popř. umožňuje jejich efektivnější využití. Nová architektura SAE (Systém Architecture Evolution) je doprovázena vývojem a poznatky převážně

z pevných sítí. Obsahuje dvě přístupové brány, S-GW a P-GW, které spolu se základními uzly systému tvoří EPC, jak je zobrazeno na Obr. 4.3. Dále výrazně snižuje latenci a zvyšuje přenosovou rychlost oddělením řídicích dat od uživatelských. Obvodově spínaná doména CS je úplně odstraněna a hlasové služby jsou převedeny do IMS domény pracující mimo jiné také s protokolem VoIP. [9]



Obr. 4.3 Architektura systému LTE [9]

- eNode B (Evolved Node B) - základnová stanice
- HSS (Home Subscriber Server) - domácí uživatelská server
- MGW (Media Gateway) - mediální brána pro komunikace se staršími 3GPP systémy
- MGCF (Media Gateway Control Function) - kontrolní funkce pro MGW
- MME (Mobility Management Entity) - řízení mobility
- P-GW (Packet Data Network Gateway) - brána pro paketovou datovou síť
- PCRF (Policy Control and charging Rules Function) - politika a zpoplatnění funkcí
- P/I/S-CSCF (Proxy/Interrogating/Serving Call Session Control Function)
- S-GW (Serving Gateway) - servisní brána
- UE (User Equipment) - uživatelský terminál

Rozvinutý paketový systém EPS má jasný cíl, integraci všech aplikací a služeb do zjednodušené společné architektury. Hlavní logické uzly EPS architektury jsou dále popsány v následujících podkapitolách.

4.3.1 Uživatelský terminál

Samostatnou součástí je uživatelský terminál UE, který může mít opět různé formy jako např.: PDA, USB modem. Každý terminál musí být schopen pracovat s šířkou pásma od 1,4 MHz až do 20 MHz s maximální modulací 64-QAM v downlinku. Pro uplink je modulace 64-QAM definovaná pro nejvyšší třídu. Podle počtu antén, které jsou definovány již v prvním vydání LTE. Uživatelské terminály jsou rozděleny do kategorií podle přenosových rychlostí v závislosti na použité modulaci a počtu antén jak je zobrazeno v Tab. 4.5. [14]

Tab. 4.5: Třídy terminálů LTE Vydání 8 [8] [14]

Třída	Downlink [Mbit/s]	Uplink [Mbit/s]	Nejvyšší modulace		MIMO
			downlink	uplink	
1	10	5	64-QAM	16-QAM	1 x 1
2	50	25	64-QAM	16-QAM	2 x 2
3	100	50	64-QAM	16-QAM	2 x 2
4	150	50	64-QAM	16-QAM	2 x 2
5	300	75	64-QAM	64-QAM	4 x 4

4.3.2 Jádro EPC

Zjednodušené vyvinuté paketové jádro EPC obsahující pouze paketovou doménu, která podporuje všechny paketově přepínané služby. Souběžně dokáže zpracovat veřejné přepínané telefonní síť. Rozvinuté paketové jádro je složeno z následujících logických uzlů.

- **Domácí účastnický server (HSS)** - obsahuje uživatelská data, požadavky pro QoS, omezení přístupu. HSS má dynamickou informaci o právě připojeném uživateli jako logický uzel MME, může také integrovat ověřovací centrum AuC.
- **Multimediální IP systém (IMS)** - platforma nabízející služby založené na IP protokolu. Poskytuje funkce a běžné procedury pro řízení relací, . Poskytuje funkce a běžné procedury pro řízení relací. Nahrazuje CS doménu a současně s CS doménami starších 3GPP systémů může spolupracovat. [9]
- **Uzel řízení mobility (MME)** - je kontrolní uzel zpracovávající signalizaci pomocí protokolů NAS (Non-Access Stratum). Zajišťuje vytvoření, udržení a ukončení komunikace mezi uživatelským terminálem a EPC na základě NAS postupů. Řídí celkovou koordinaci a plánování zdrojů. Obsahuje odhadovací funkce, které určují polohu a přenosovou rychlost pro UE.

NAS postup přístupu (Non Access Stratum) - je způsob připojení a správy uživatelských terminálů do systému. Vychází z přístupu UMTS, ale změnou je rychlejší vytvoření a udržení spojení a vytvoření toku dat - někdy také označovaného jako „nosič“. Tyto nosiče jsou dynamicky uloženy v MME, která je zabezpečí. Při nečinnosti UE zachovává MME informace o těchto nosičích a sleduje polohu UE. Při aktivaci jsou obnoveny informace o nosičích přímo z jádra sítě, aniž by docházelo k dalšímu ověřování. [9]

- **Paketová brána (P-GW)** - pracuje s domácím HSS, uživatelskými právy přístupu, využití služeb, přidělování IP adres pro UE. Umožňuje uživateli pojmenovávat a ukládat přístupové body. Pomocí QoS umožňuje prosazování datového toku, filtrování IP paketů, dále komunikuje se službami jiných typů sítí. (WiMAX, Internet).
- **Servisní brána (S-GW)** - směřuje všechny uživatelské IP pakety do příslušných eNodeB, obsahuje řídicí funkce pro správu IP sítě, zajišťuje podporu pro 3GPP sítě (GSM, UMTS). Uchovává informace o klidovém stavu UE. Provádí dočasné zásobování (buffer), zatímco MME zahajuje spojení. Obsahuje také funkce pro vyhodnocení odeslaných/přijatých dat.
- **Zpoplatnění funkcí (PCRF)** - Poskytuje oprávnění QoS a řízení toků dat na základě zpoplatnění funkcí. [14]

4.3.3 Přístupová síť LTE

Vychází z přístupové sítě představené ve Vydání 7. Je složena pouze s eNode B, které jsou mezi sebou propojeny rozhraním X2, potom k jádru systému jsou připojeny přes rozhraní S1. Toto se dále dělí na S1-MME spojující eNode B a MME, S1-U spojující eNode B a S-GW jak ukazuje Obr. 4.3. Různé protokoly tunelového propojení GTP (GPRS Tunnelling Protocol) jsou použity v síťovém rozhraní S1 a S5/S8. Struktura protokolu S1 pro řídicí rovinu je založen na Stream protokolu (SCTP), který zajišťuje spolehlivý přenos a využívá další pokročilé funkce.

Integrací řídicích funkcí do eNode B byla podstatně snížena latence díky těsné interakci mezi různými vrstvami protokolu rádiové bezdrátové sítě. Při pohybu UE mezi buňkami, tedy mezi různými eNode B jsou přenášeny veškeré informace související s UE přes rozhraní X2. Také samooptimalizační funkce eNode B využívají X2, přes které jsou zasílány informace o sousedním eNode B, jako frekvenční pásmo, fyzická identita buňky, pokrývaná oblast. Při opětovném výběru mezi frekvenčními pásmy, má každá frekvence určitou prioritu. V případě stejných priorit je primárním kritériem pro výběr určité buňky kvalita rádiového spojení. [4]

Přístupová síť LTE má dva handovery. Vnitřní, který nastává mezi dvěma eNode B přes rozhraní X2 a je bezešvý. Nedochozí k přerušení spojení a tím ztrátě informace při pohybu UE vysokou rychlostí mezi buňkami. Současně jsou posílány informace o buňkách, ve kterých byl UE aktivní, aby nedocházelo ke stálému přepínání, když UE je na hranici mezi buňkami. Mezi jednotlivými generacemi sítí 3GPP nastává tvrdý handover, čímž dojde k přerušení spojení do 100 ms a připojení na danou přístupovou síť. Primární kritérium pro výběr určité buňky je kvalita rádiového spojení. [4] [8]

Rozdíl v handoveru mezi LTE a UMTS sítí je ve sledování a aktivaci (z klidového módu). LTE využívá informací o UE pomocí nosičů a NAS postupu. K provedení handoveru v UMTS je zapotřebí aktivovat PS a CS doménu. Samotná organizace radiokomunikačního spoje k cílové buňce je totožná s UMST předáním a tomu odpovídající časové zpoždění. Předání z UMTS buňky do LTE buňky může být slepé, nebo řízené, v závislosti na UE, zda je schopen synchronizace s cílovou buňkou. [13]

spojení s EPC - zajišťuje zpětnou komunikaci a signalizaci s UE. [4]

4.3.4 Základnové stanice

Radio frekvenční specifikace organizace 3GPP byly vyvinuty postupně pro různé přístupové sítě GSM, UTRA, E-UTRA. Rychlý vývoj buňkových systémů a sním i následné rozmístění nové technologie vedle stávající často vede ke sdílení ve stejných místech současně. Navíc jsou sdíleny antény a jiné části zařízení. To vedlo k vývoji multi-základnovým stanicím a mnohem vyšší integraci zařízení. Společenství 3GPP definovalo MSR (Multi - Standard Radio) základnové stanice s přijímačem i vysílačem schopné současně pracovat s různými radio frekvenčními pásmy a jim příslušnými přístupovými technologiemi jako GSM/EDGE a LTE. Po přechodu jen na LTE mohou být základnové stanice nakonfigurovány jen do LTE s dvojitou šířkou kmitočtového pásma.

Ve Vydání 9 jsou společenstvím 3GPP definovány základnové stanice podle velikosti pokryté oblasti :

- Makro buňky - určené pro rozsáhlé území s minimální vazební ztrátou mezi základnovou stanicí (ZS) a UE 70 dB.
- Piko buňky - určené pro lokální území s minimální vazební ztrátou mezi ZS a UE 45 dB. Typické využití je pro vnitřní a venkovní aktivní body. Maximální výkon je stanoven na 24 dBm
- Femto buňky - někdy také označované jako „domácí buňky“ s vazební ztrátou mezi ZS a UE 45 dB. Maximální výkon je stanoven na 20 dBm. [3] [14]

Základnová stanice eNode B je zodpovědná za následující funkce:

management rádiových zdrojů - zahrnuje všechny funkce s rádiovým kanálem, jako nosič. Například přidělování zdrojů, plánování, rádiové řízení mobility.

kompresi IP hlaviček - zajišťuje efektivnější využití rádiového rozhraní. Komprese se týká zejména malých paketů, jako je VoIP.

zabezpečení - šifrování dat, která jsou přenášena rádiovým kanálem.

Plánování rádiových zdrojů v eNode B je odlišné od uplinku a downlinku. V downlinku je zdrojové plánování omezeno celkovým přenosovým výkonem eNode B. Ale v uplinku je více závislé na vzájemném rušení mezi buňkami a výkonem UE.

4.3.5 LTE Protokol

Mezi základnovou stanicí a uživatelským terminálem jsou definovány následující čtyři vrstvy:

1. PDCP (Packet Data Convergence Protocol) - vykovává hlavičkovou kompresi dat přenášených rádiovým rozhraním. Je odpovědná za šifrování a handover.
2. RLC (Radio Link Control) - řídí členitost datových proudů pro PDCP vrstvu. Obsahuje SDU (Service Data Unit) a PDU (Packet Data Unit) rámce o dynamické velikosti pro konfiguraci a přenosu dat UE. Tím je možné dosáhnout různých přenosových rychlostí od několika kbit/s až do jednotek Gbit/s.
3. MAC (Medium Access Control) - zajišťuje HARQ, plánování pro downlink a uplink, přerozdělování datových toků uživatelům. Multiplexování logických kanálů a skrze ně poskytuje služby RLC vrstvě. Na MAC vrstvě jsou použity tyto transportní kanály pro:
downlink:

- PCH (Paging Channel) - zajišťuje přenos stránkových informací, podporuje nespojité přenos (kdy UE je v síti, ale nečinné)
- BCH (Broadcast Channel) - zajišťuje přenos MIB bloků (Master Information Block), přes které je zjištěna šířka přenosového pásma pro downlink
- DL-SCH (Downlink Shared Channel) - přenos dat na downlinku. Podporuje kanálové plánování, dynamické řízení přenosové rychlosti, HARQ
- MCH (Multicast Channel) - přenáší data o více buňkovém plánování a konfiguraci.

uplink:

- UL-SCH (Uplink Shared Channel) - podobně jako DL-SCH, ale pro uplink.
- RACH (Random-Access Channel) - je určen jako přenosový kanál, ale téměř nepřenáší žádné přenosové bloky.

4. PHY (fyzická vrstva) - na fyzické vrstvě je prováděno kanálové kódování, modulace, mapování více antén. Poskytuje služby MAC vrstvě ve formě přenosových kanálů pro:

downlink:

- PBCH (Physical Broadcast Channel) - přenos informací o broadcastovém vysílání. Na MA
- PDCCH (Physical Downlink Control Channel) - přenos řídicích informací
- PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) - přenos uživatelských dat
- PMCH (Physical Multicast Channel) - kanál pro MBMS
- PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel) - kanál pro dekódování uživatelských dat
- PHICH (Physical HARQ Indicator Channel) - řídicí informace pro HARQ (ACK/NACK)

uplink:

- PRACH (Physical Random Access Channel) - náhodný přístup do systému
- PUCCH (Physical Uplink Control Channel) - přenos řídicích informací
- PUSCH (Physical Uplink Shared Channel) - přenos uživatelských dat

5 LTE - ADVANCE

Do sítě čtvrté generace patří LTE-Advanced, která splňuje všechny požadavky IMT-Advanced pro 4G stanovené ITU. Vychází z předchozí verze LTE (Vydání 8 a 9) a dále ji vylepšuje. Podpora nejméně 40 MHz šířky pásma, maximální spektrální účinnost 15 bit/s/Hz pro downlink a 6,75 bit/s/Hz pro uplink, snížení zpoždění v řídicí a uživatelské rovině na méně než 10 ms, zpětná kompatibilita s Vydáním 8 a 9. Toto jsou základní požadavky od ITU, ovšem organizace 3GPP definovala své vlastní cíle, které v mnoha ohledech požadavky ITU převyšují.

V současné době je LTE-Advanced ve stavu testování, komerční spuštění je plánováno na rok 2013 - 2015. Výroba UE pro LTE-A je předpokládána koncem roku 2012.

5.1 Seskupování kmitočtového spektra

Maximální přenosová šířka pásma ve Vydání 8 a 9 je stanovena na 20 MHz. Vydání 10 představilo sdružování přenosového pásma s podporou FDD a TDD. Vícenásobné kmitočtové pásmo může být seskupené až z pěti kmitočtových pásem, každé s přenosovou šířkou 20 MHz, stanovené ve Vydání 8. Nové terminály pro LTE-A umožňují přenos souběžně na jednotlivých nosných kmitočtech. Celková šířka pásma může být až 100 MHz. Sdružování nosných kmitočtů probíhá na fyzické vrstvě. Terminály jsou zpětně kompatibilní i pro pásma s jedním nosným kmitočtem s šířkou pásma 20 MHz. Organizace 3GPP definovala 3 typy slučování přenosových pásem:

- Agregace uvnitř vedlejších nosných kmitočtových pásem - sdružené kmitočtové pásma mají podobné radio frekvenční vlastnosti.
- Agregace uvnitř různých nosných kmitočtových pásem - jen určité kombinace
- Agregace mimo kmitočtové pásmo

Terminál podporující seskupená kmitočtová pásma má jeden primární nosný kmitočet pro downlink a jeden primární nosný kmitočet pro uplink. Při připojování do sítě jsou nejprve stanoveny primární parametry pro primární kmitočtové pásmo. Jakmile jsou tyto parametry stanoveny, mohou být stanoveny sekundární parametry pro další kmitočtová pásma. Počet kmitočtových pásem vyhrazených pro downlink je větší, nebo roven počtu pásem pro uplink.

5.2 MIMO

Technika MIMO pro downlink je rozšířena na MIMO 8x8 za použití MU-MIMO, přenášející paralelní toky k různým UE s prostorovým dělením kde ke každé vysílací (eNode B) a přijímací (UE) anténě je přiřazena jedna přenosová vrstva, to umožňuje dosáhnout maximální spektrální účinnost 30 bit/s/Hz s maximální přenosovou rychlostí 3 Gb/s. V uplink je použita technika MIMO 4x4 za použití SU-MIMO. Přenášející paralelní toky od jednoho UE k jednomu eNode B. Je dosažena maximální spektrální účinnost 15 bit/s/Hz s přenosovou rychlostí 1,5 Gb/s.

5.3 Reléové stanice

Vysoké přenosové rychlosti se vzdáleností od eNode klesají, navíc působí na hranicích buněk interference. Tyto faktory jsou potlačeny do určité míry tzv. reléovými stanicemi RN (Relay Node), někdy také nazývané jako „opakovače“. Největší výhodou je zvětšení pokrytí,

zvýšení kvality rádiového spojení mezi eNode B a UE, a zvýšení kapacity sítě. Pro UE se reléové stanice jeví jako eNode B. Jsou definovány dva typy RN. První typ je určen na okraje buněk, pro rozšíření pokrytého území. Současně zajišťují přenos referenčních a řídicích informací. Druhý typ je určen do oblastí buněk pro zvýšení kapacity sítě. Nepřenášejí žádné referenční signály, ani řídicí informace. Spojení mezi eNode B a RN je rádiovým spojením. V budoucnu se počítá se spojením optickým kabelem a využitím cenného rádiového spektra pro UE. Pro downlink je použita nová metoda CoMP (Coordinated Multi-Point), která v podstatě mění mezibuňkové rušení na užitečný signál. Následně při použití CoMP je UE obsluhována současně dvěma, nebo více eNode B. [8] [14]

LTE-Advanced zavádí vylepšené femtobuňky, které bývají často označovány jako Home eNode B. Do systému jsou připojeny pomocí pevného internetového připojení a přes bránu HeGW (Home eNode B Gateway) do MME přes S1. Tento způsob připojení umožňuje HeNB začlenit do různých druhů sítí, jako např. GSM, UMTS. Femtobuňky mají poloměr pokrytí jednotky, maximálně pár desítek metrů. Vzhledem ke způsobu připojení a parametrům jsou navrženy pro domácnosti s nízkou kvalitou signálu, popř. jiných lokalit se špatnou kvalitou signálu. Mohou být také použity do hustě osídlených oblastí k dosažení větší kapacity, popř. vysokých přenosových rychlostí, pro tento případ je používán vyhrazený kanál. [8] [14]

5.4 UE pro LTE-Advance

Společenství 3GPP definuje nové třídy terminálů podporující vyšší přenosové rychlosti s použitím technologie MIMO 8x8, jak ukazuje Tab. 5.1.

Tab. 5.1: Terminály pro LTE-A [14]

Třída	Downlink [Mbit/s]	Uplink [Mbit/s]	Nejvyšší modulace		MIMO
			downlink	uplink	
6	300	50	64-QAM	16-QAM	4 x 4
7	300	150	64-QAM	64-QAM	4 x 4
8	3000	1500	64-QAM	64-QAM	8 x 8

Ve Vydání 10 je představeno rozlišení pagingu přes S1 rozhraní pro zpracování multimediální přednostní služby (MPS) pro 12 uživatelů. V případě MME nebo LTE přetížení, je nutno ke stránce UE s vyšší prioritou během vytvoření mobilního ukončení hovoru MPS. V případě přetížení MME, může sám rozlišovat mezi MME pagingem zpráv a odstranit z nich nižší prioritu. V případě přetížení RAN v některých buňkách, mohou eNode B provést tuto diskriminaci na základě nového ukazatele Paging Priority zaslané MME. MME může signalizovat až osm hodnot těchto priorit do eNode B. V případě IMS MPS hovoru se ukončení UE dále nastavuje na RRC připojení se stejným eNodeB, který také dostane automaticky přednost. V případě nouzového hovoru CS, eNode B místo signálu na UE, který musí stanovit příčinu hodnoty "s vysokou prioritou odchozího hovoru", když se snaží zavést UMTS RRC připojení. [14]

6 PLÁNOVÁNÍ SÍTĚ

Vzhledem ke složitosti systému a celou řadu důležitých parametrů neexistuje universální míra výkonu sítě. Na jedné straně chtějí koncoví uživatelé maximální kvalitu služeb, na straně druhé, operátoři maximální zisky docílené agregací uživatelů na jednu buňku. LTE/LTE-Advanced má potenciál splnit oba požadavky. Maximální kvalita služeb je zajištěna pomocí protokolů QoS, snížení zpoždění v systému, vyšší spektrální účinnosti, použití techniky MIMO a vlastní optimalizace sítě zvyšuje počet aktivních uživatelů na buňku.

Při plánování sítě jsou brány v úvahy čtyři kategorie: kvalita služeb, velikost pokrytého území, kapacita systému a cena vybudování.

ITU - R definuje dva požadavky spojené s efektivitou rádiového rozhraní pro hodnocení výkonu. První je buněčná spektrální účinnost η (bit/s/Hz) definující operátorskou perspektivu:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{T \cdot \omega \cdot M}, \quad (6.1)$$

kde x_i (bit) je počet správně přijatých bitů pro uživatele v systému s N uživateli a M buňkami, ω (Hz) je kanálová šířka pásma a T (s) je doba za kterou jsou datové bity přijaté.

Druhým požadavkem je buněčná spektrální účinnost γ (bit/s/Hz), což je výkon všech uživatelů zprůměrovaný přes všechny buňky a dělený kanálovou šířkou pásma:

$$\gamma = \frac{x_i}{T_i \cdot \omega}, \quad (6.2)$$

kde T_i je aktivní doba uživatele i . [3]

6.1 Kanálový model

ITU - R stanovila kanálový model čtyř návrhů rozmístění, každý odpovídající jinému zkušebnímu prostředí jak ukazuje tab. První návrh je určen pro vnitřní pokrytí s vysokou hustotou UE, jako kanceláře, obchodní domy. Druhý návrh zahrnuje malé buňky pro vnitřní a venkovní využití. Třetí návrh je určen pro základní pokrytí městského prostředí s velkými buňkami. V návrhu je počítáno s vysokou rychlostí pohybu UE. Poslední návrh je určen pro velmi velké buňky s vysokou rychlostí pohybu UE.

Tab. 6.1: Parametry kanálových modelů

Navrhované prostředí	vnitřní	mikro buňka	základní pokrytí	vysoká rychlost
Návrh rozmístění	hotspot	městská zástavba	městská zástavba	venkov
Nosná kmitočet [Ghz]	3,4	2,5	2,0	0,8
Poloměr [m]	60	200	500	1732
Rychlost UE [Km/h]	3	3	30	120
Uživatelské prostředí	100% uvnitř	50% uvnitř, 50% venku	100% venku	100% venku
Výška antény ZS [m]	6	10	25	35
Zisk antény ZS [dBi]	0	17	17	17

Výstupní výkon ZS [dBm/20 MHz]	21	44	49	49
Výstupní výkon UE [dBm]	21	24	24	24

6.2 Výstavba LTE/LTE-A a předchozí 3GPP systémy

LTE rádiové prostředky jsou navrženy pro spolupráci s předchozími 3GPP systémy, ale samotný návrh LTE prostředků nebude omezen těmito předchozími systémy. Proto přístupová síť LTE nepodporuje dřívější terminály z 2. generace a počátku 3. generace. Na druhou stranu podpora těchto aktivních starších terminálů po mnohem delší dobu současně s LTE sítí je úspěšná strategie společenství 3GPP. Vzhledem k tomu, že každá oblast (stát) má jiné požadavky, zpočátku bude nových terminálů jen malé množství. Samozřejmě s postupem času bude postupně přibývat i LTE terminálů. Velmi efektivní plynulý přechod směrem k LTE je možné zajistit s EPC, kdy je současně podporována technologie HSPA+, která je zpětně kompatibilní s předchozími generacemi 3GPP a samotnou LTE sítí. Současně LTE vychází z parametrů HSPA+ ve Vydání 7, což znamená určitou kompatibilitu. To umožní operátorům rozmístění eNode B pro LTE síť jen v oblastech, kde je to opodstatněné. Druhou možností je využití multi základnových stanic popsaných v části 4.3.4.

Ve WCDMA je používán kanál RACH, který plní funkci počátečního přístupu do sítě, časovací přesnost odhadu a krátký přenos zpráv. Obdobné využití tohoto kanálu je i u LTE, ale RACH nemůže nést žádná uživatelská data poslaná fyzickým sdíleným kanálem PUSCH. Základnová stanice eNode B se tak může vyhnout interferenci mezi RACH a řídicím kanálem uplinku PUCCH a sdíleným kanálem PUSCH. Kanál RACH je v LTE využit k časové synchronizaci EU pro uplinku. Jakmile je dosaženo synchronizace, může eNode B plánovat prostředky pro přenos.

Jak je patrné z Tab. 6.1 LTE/LTE-A pro vysoké přenosové rychlosti dat využívá malé buňky s nosným kmitočtem okolo 2 GHz, nebo vyšším a s nízkou pohybovou rychlostí UE. Naopak pro vysoké rychlosti UE (oblast na venkově) je využívána buňka s velkou oblastí pokrytí, kde nosný kmitočet je nižší, než pro malé buňky, okolo 1 GHz. Takto volené nosné kmitočty jsou z důvodu šíření rádiového signálu prostředím. Přístupová síť poskytuje základní pokrytí pro velké oblasti a současně oblasti s vysokou datovou rychlostí malými buňkami, v případě LTE-A také reléovými stanicemi. V takto pokrývaných oblastech je efektivně využíván výkon eNode B a tím sníženy interference.

LTE podporuje minimálně 200 aktivních terminálů na buňku s šířkou přenosového pásma do 5MHz. Se zvětšující se šířkou pásma stoupá počet UE téměř lineárně v idealizovaném prostředí. LTE-A této skutečnosti využívá a podporuje přenosovou šířku pásma až do 100 MHz.

7 NASAZENÍ SÍTĚ LTE PRO ŠIROKOU VEŘEJNOST

V minulém roce byl trh s mobilními komunikačními zařízeními ovládnán přibližně z 80% dodavateli GSM a UMTS. S rozšířením internetových služeb jsou kladeny stále větší nároky pro přenos dat také v oblasti mobilní komunikací. Důraz je kladen na cenu služeb pro koncového účastníka. Opožděné nasazení standardu EPS s přístupovou sítí E-UTRAN do komerčního provozu bylo následkem převedení domény obvodově přepínaných služeb do paketové domény, jak jsem uvedl v kapitole 2.3. Samotný problém byl především pro provozovatele starších buňkových systémů. Jejich přechod na 3G, respektive 3.5G s novou architekturou Evolved UMTS vyžadoval modernější hardware 2G sítě. Pro provozovatele to byly nákladné investice. Přechod na čistě paketově přepínanou síť umožnil snadné zavádění nových služeb s minimálními náklady pro samotné poskytovatele a vyhovující přenosovou rychlost pro datové služby. [9]

Nastupující technologie EPS s přístupovou sítí LTE je navržena pro zachování zpětné kompatibility se staršími generacemi telekomunikačních mobilních sítí. Pro operátory je tedy LTE logický upgrade těchto sítí a širokopásmových datových služeb HSPA, HSPA+. Navíc celosvětové rozšíření tohoto standardu je umocněno podporou volného sdružení telekomunikačních společností. Právě prosazení jednotného standardu zastřešeného 3GPP, který splňuje různé technologické požadavky, jako: jednotný roaming, zpětnou kompatibilitu pro 2G a 3G sítě i podporu non-3GPP systémů vedou k rychlému nástupu LTE na telekomunikační trh. Operátoři mají nové možnosti na poli datově náročných aplikací, přenosu dat v reálném čase, videokonferencí, implementace internetových služeb a programů do telefonů pracujících s 4G sítí. Jak uvádí autor článku v Computer Worldu Filip Brůcha: „Obecně se od nových podnikových aplikací očekává, že budou stejné jako dnes, akorát mnohem rychlejší a silnější. Výhody technologie 4G se však neprojeví jen tak přes noc. Vývojáři vyčkávají na okamžik, kdy bude připojení 4G všudypřítomné. Teprve pak jsou ochotni investovat do vývoje nových aplikací.“ [2]

Zjednodušená plochá architektura je levněji realizovatelná. Zlepšení celé řady technických parametrů, především snížení zpoždění přenosu, přispívá k integraci širokého spektra služeb a tím také k nižším nákladům provozovatelů na provoz sítě. Další výhodou jak pro operátory, tak pro koncové zákazníky, je dostatečný počet výrobců hardwarového řešení a vysoká konkurence mezi nimi. Což má za následek vyšší podporu mezi poskytovateli samotných LTE služeb, nižším cenám koncových terminálů a jejich rychlejší vývoj, než u konkurenční technologie WiMAX. [13]

Samozřejmě každá nová technologie má i své nedostatky, které jsou postupně odstraňovány. Pro technologie LTE mezi jinými patří nejednotnost kmitočtového spektra v celosvětovém měřítku. Právě jednotný roaming, který musí být plně funkční již při prvním spuštění LTE sítě netrápí ani tak samotné operátory, jako výrobce koncových terminálů. Jak uvádí hlavní technický ředitel T-Mobile International Joachim Horn: “Prostě se budeme setkávat s terminály, které budou schopny fungovat s 8, 10 nebo 12 různými frekvencemi. A když v současné době mluvíme se zástupci výrobců, víme, že pro tu počáteční fázi budeme muset přednostně určit, které frekvence budou důležité“. [15]

Technicky vyspělá severní Evropa na sebe nenechala dlouho čekat. První veřejně dostupná datová LTE služba byla spuštěna společností TeliaSonera 14. prosince 2009 ve dvou skandinávských městech Stockholmu a Oslu. Dodavateli zařízení byly společnosti Huawei a Ericsson. Uživatelské terminály ve formě USB modemů dodala společnost Samsung. USB modemy se potýkají s nekompatibilitou s 3G sítěmi, která má být během provozu odstraněna. [19]

8 LABORATORNÍ ÚLOHA

Přenosová kapacita radiokomunikačního systému je stanovena Shannonovým - Hartleyovým vztahem:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (8.1)$$

kde C je maximální dosažitelná rychlost při přenosu informace radiovým kanálem (b/s), B udává šířka radiokomunikačního kanálu (MHz), S je střední hodnoty výkonu signálu (dB), N je střední hodnota výkonu šumu (dBm) [3]

Pro zvýšení přenosové kapacity LTE jsou použity různé techniky, jednou z nich je také MIMO. Se zvyšujícím se počtem antén téměř lineárně roste i přenosová kapacita systému. Potom rovnice 8.1 je upravena na:

$$C = F \cdot B \cdot N_L \cdot \log_2 \left(1 + \frac{N_R}{N_L} \cdot \frac{S}{N} \right), \quad (8.2)$$

kde N_L jsou paralelní kanály se sníženým poměrem signál - šum, $N_L = \min \{ N_T, N_R \}$, N_R udává hodnotu zisku přijímací antény (dB) a N_T hodnotu zisku vysílací antény (dB). [3]

Šířka kmitočtového pásma je pro LTE dána vztahem $B \cdot F$:

$$B = \frac{N_{SC} \cdot N_S \cdot N_{RB}}{T_{SUB}}, \quad (8.3)$$

$$F = \frac{T_{rámec} - T_{CP}}{T_{rámec}} \cdot \frac{N_{SC} \cdot \frac{N_S}{2} - 4}{\frac{N_{SC}}{2} \cdot N_S}, \quad (8.4)$$

kde F je korekční faktor. Následně $T_{rámec}$ (ms) je trvání rámce v LTE, tedy 10 ms, T_{cp} (μ s) délka cyklického prefixu, N_{SC} určuje počet subnosných v jednom RB, N_s udává počet symbolů na jeden rámeček a N_{RB} určuje počet rámečků v přenosové šířce pásma za dobu pomocného rámce T_{sub} . [3]

9 ZÁVĚR

Systém EPS s přístupovou sítí LTE/LTE Advanced vychází z Vydání 7 (HSPA+), kde byla představena plochá architektura sítě. Jádro sítě pracuje čistě s IP protokolem, což představuje velkou flexibilitu pro nové služby. V přístupové síti LTE, která obsahuje jen eNode B, v případě LTE-A také reléové spoje, jsou řídicí data oddělena od uživatelských a tím je sníženo zpoždění pro řídicí i uživatelskou úroveň. Nové přístupové metody OFDMA a CS-OFDMA s vysokou spektrální účinností a současnou odolností signálu při šíření v zarušeném prostředí také výrazně přispěly k vysokým přenosovým rychlostem. Ovšem za cenu zpětné nekompatibility se staršími systémy jako GSM, nebo UMTS. Plynulý přechod ze starších 3GPP sítí na LTE je možné efektivně zajistit vylepšením na HSPA+ a následně na LTE, nutností je samozřejmě paketové jádro EPC. Další možnou variantou jsou multi základnové stanice pracující současně s dvěma různými technologiemi. Následně mohou pracovat v plnohodnotné síti LTE stále pracovat s dvěma různými kmitočty. Provozovatel původní radiokomunikační buňkové sítě má možnost při migraci na LTE nechat současně pracovat původní technologii a LTE s malou šířkou pásma, tak, aby nebyl omezen provoz v původní radiokomunikační síti.

Strategie plánování pro LTE je vůči předchozím sítím o trochu jiná. Jeden z důvodů jsou různé kmitočty s možností volitelné šířky pásma. Mikrobuňky ve většině případů operují s vyšším přenosovým kmitočtem umožňující vysoké přenosové rychlosti, než středně velké a velké buňky, ovšem za cenu nízké pohybovosti terminálu. Oblast pokrytí velké buňky doplňují mikrobuňkami tam, kde je vysoká koncentrovanost UE, nebo špatný signál. Pro samotné plánování jsou používány počítačové simulace a různé scénáře návrhů buněk, větší část převzata z HSPA+. LTE-Advanced zavádí HeNB připojované do sítě přes internetové rozhraní a Home eNode B bránu.

Systém EPS s přístupovou sítí LTE-Advanced je velmi perspektivní vzhledem k nabízeným možnostem služeb, kvality a ceny pro koncového účastníka a současně i pro provozovatele tohoto systému.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] 3GPP© The Mobile Broadband Standard: LTE Advanced [online]. 2010 [cit. 20.11.2010]. Dostupné z internetu: <<http://www.3gpp.org/LTE-Advanced>>
- [2] BRŮCHA, F. 4G Sítě umožní vytvářet lepší a výkonnější aplikace. *Computer World* [online]. 8.3.2010 [cit. 29.11.2010]. Dostupné z internetu: <<http://computerworld.cz/software/4g-site-umozni-vytvaret-lepsi-a-vykonnejsi-aplikace-5847>>
- [3] DAHLMAN E.; PARKVALL S.; SKÖLD J. *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Elsevier, 2011, ISBN 978-0-12-385489-6
- [4] DAHLMAN E.; PARKVALL S.; SKÖLD J.; BEMING P. *3G Evolution:HSPA and LTE for Mobile Broadband. Second edition*. Elsevier, 2008, ISBN 978-0-12-374538-5
- [5] HANUS, S. *Bezdrátové a mobilní komunikace: skripta*. Druhé přepracované a rozšířené vydání. Brno: FEKT VUT v Brně, 2012.132s.
- [6] HANUS, S.; FENCL, J.; ŠTENCEL, V. *Rádiové a mobilní komunikace II: skripta*. Druhé přepracované a rozšířené vydání. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010. 172s.
- [7] HOLMA, H.; TOSKALA, A. *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*, 2009, ISBN 978-0-470-99401-6
- [8] JEHLIČKOVÁ, L. Diplomová práce: *Základy mobilního internetu* [online]. 20.5.2011 [cit. 15.3.2012]. Dostupné z internetu: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=37158>
- [9] LESCUYER, P.; LUCIDARME, T. *Evolved Packet System (EPS): the LTE and SEA evolution of 3G UMTS*. WILEY, 2008, ISBN 978-0-470-05976-0
- [10] MATYÁŠ, J. Diplomová práce: *Možnosti potenciálu nově dostupných služeb v sítích Long Term Evolution* [online]. 7.6.2010 [cit. 29.10.2010]. Dostupné z internetu: <http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/14423/matyas_2010_dp.pdf?sequence=1>
- [11] PETERKA, J. Počítačové sítě, v. 3.4. [online] 2010. [cit. 10.1.2012]. Dostupné na internetu <<http://www.earchiv.cz/l222/gifs/S3523print.pdf>>
- [12] RAMBOUSEK, A. *Historie mobilní komunikace* [online]. aktualizováno 2003 [cit. 13.10.2010]. Dostupné z internetu: <http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2003/xrambous_index.htm>
- [13] SESIA, S.; TOUFIK, I.; BAKER, M. *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. WILEY, 2009, ISBN 978-0-470-69716-0
- [14] SESIA, S.; TOUFIK, I.; BAKER, M. *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Second Edition WILEY, 2011, ISBN 978-0-470-66025-6

- [15] VOKÁČ, L. Cesta k sítím čtvrté generace je spleťitá, prozradili experti na LTE. *Mobil.cz* [online]. 24.11.2008 [cit. 29.10.2010]. Dostupné z internetu: <http://mobil.idnes.cz/cesta-k-sitim-ctvrte-generace-je-spletita-prozradili-experti-na-lte-1pz-/mob_tech.asp?c=A081102_173556_mob_tech_vok>
- [16] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: 2.5G [online]. 2005 [cit. 15.11.2010]. Dostupné z internetu: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/2.5G>>
- [17] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: 3G [online]. 2010 [cit. 20.11.2010]. Dostupné z internetu: <<http://en.wikipedia.org/wiki/3G>>
- [18] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: E-UTRA [online]. 2010 [cit. 2.12.2010]. Dostupné z internetu: <<http://en.wikipedia.org/wiki/E-UTRA>>
- [19] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Long Term Evolution [online]. 2010 [cit. 22.11.2010]. Dostupné z internetu: <http://en.wikipedia.org/wiki/3GPP_Long_Term_Evolution>
- [20] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: LTE Advanced [online]. 2010 [cit. 20.11.2010]. Dostupné z internetu: <http://en.wikipedia.org/wiki/LTE_Advanced>
- [21] ŽALUD, V. Radiokomunikace 2009. *Systém mobilní komunikace pro dlouhodobou evoluci LTE/SEA*, Pardubice: Unit Pardubice spol. s.r.o., [online]. 2009 [cit. 17.11.2010]. Dostupné z internetu: <http://www.stech.cz/download.php?id_document=401156986&at=1>

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

16-QAM	16-Quadrature Amplitude Modulation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
8-PSK	Eight-Phase Shift Keying
ACK	Acknowledge
ADC	Administrative Centre
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AuC	Authentication Centre
BG	Border Gateway
BCH	Broadcast Channel
BSC	Base Station Controller
BTS	Base Transceiver Station
BW	šířka radiokomunikačního kanálu (MHz)
C	maximální rychlost při přenosu informace radiovým kanálem (b/s)
CDMA	Code Division Multiple Access
CG	Charging Gateway
CoMP	Coordinated Multi-Point
CP	Packet Switched
CS	Coding Scheme
CS	Circuit Switched
CSD	Circuit Switched Data
DB-DC-HSDPA	Dual Band DC-HSDPA
DC-HSDPA	Dual Carrier HSDPA
DCS 1800	Digital Cellular System 1800
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunication
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DwPTS	Downlink Pilot Timeslot
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
E-EDGE	Evolved EDGE
E-FACH	Enhanced Forward Access Channel
E-GSM	Extended GSM
EIR	Equipment Identity Register
eNode B	Evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
E-UTRA	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access
FCC	Federal Communications Commission
FD-CDMA	Frequency Division -CDMA
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Duplex Access
FEC	Forward Error Correction

FFT	Fast Fourier Transform
FPS	Fast Packet Scheduling
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GP	Guard Period
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
GTP	GPRS Tunnel Protocol
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HeGW	Home eNode B Gateway
HLR	Home Location Register
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High-Speed Packet Access
HSPA+	High-Speed Packet Access Evolution
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
ICI	Iner Carrier Interference
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMEI	Mobile Equipment Identity
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IMT- Advanced	International Mobile Subscriber Identity
IP	Internet Protokol
ITU-R	International Telecommunication Union Radiocommunication sector
IWF	Interworking Function
J-TACS	Japan Total Access Communication System
LIG	Legal Intercetion Gateway
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MAC	Medium Access Control
MAHO	Mobile Assisted Handover
MC-HSPDA	Multi Carrier-HSDPA
MGCF	Media Gateway Control Function
MGW	Media Getway
MCH	Multicst Channel
MIB	Master Information Block
MIMO	Multiple Input - Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MPS	Multimedia Priority Service
MRC	Maximal Ratio Combining
MS	Mobile Station
MSC	Mobile Switching Centre
MU-MIMO	Multi User-MIMO
N	střední hodnota výkonu šumu (dBm)
NACK	Not Acknowledge

NAS	Non Access Stratum
N_L	matice paralelních kanálů se sníženým poměrem signál-šum $N_L = \min \{ N_T, N_R \}$
NMC	Network Management Center
NMT	Nordic Mobile Telephone System
N_R	zisk přijímací antény (dB)
OCQPSK	Orthogonal Complex QPSK
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OMC	Operational and Maintenance Centre
P/I/S-CSCF	Proxy/Interrogating/Serving Call Session Control Function
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PCRF	Policy Control and charging Rules Function
PCS 1900	Digital Cellular System 1900
PCU	Packet Control Unit
PDA	Personal Digital Assistant
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PDU	Packet Data Unit
P-GSM	Primary GSM
P-GW	Packet Data Network Gateway
PHICH	Physical HARQ Indicator Channel
PHY	Physical Layer
PCH	Paging Channel
PMCH	Physical Multicast Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
PSC	Parallel to Serial Converter
PSS	Primary Synchronization Signal
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QoS	Quality of Services
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RACH	Random Access Channel
RAN	Random Access Network
RB	Resource Block
RE	Resource Element
RLC	Radio Link Control
RN	Reley Node
RNC	Radio Network Controller
RRC	Root Raised Cosine
S	střední hodnoty výkonu signálu (dB)

SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single Carrier FDMA
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SDU	Service Data Unit
SGSN	Serving GPRS Support Node
S-GW	Serving Gateway
SIB	System Information Block
SIM	Subscriber Identity Module
SIP	Session Initiation Protocol
SMS	Short Message Service
SMSC	Short Message Service Centre
SPC	Serial to Parallel Converter
SSS	Secondary Synchronization Signal
SU-MIMO	Single User-MIMO
T	doba za kterou jsou datové bity přijaté
TACS	Total Access Communication System
TD-CDMA	Time Division-CDMA
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Duplex Access
T_i	aktivní doba uživatele i
TRAU	Transcoder and Rate Adaption Unit
TS	Time Slot
TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment
UE	User Equipment
UL-SCH	Uplink Shared Channel
UMTS	Universal Mobile Telecommunications system
UpPTS	Uplink Pilot Timeslot
UTRA	UMTS Terrestrial Radio Access
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VLR	Visitor Location Register
VoIP	Voice over IP
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
x_i	je počet správně přijatých bitů pro uživatele v systému s N uživateli a M buňkami (bit)
ZS	Základnová Stanice
H	spektrální účinnost η (bit/s/Hz)
Ω	je kanálová šířka pásma (Hz)
Rozhraní	X2, S1-MME, S1-U, S1, S5/S8