

Rozbor současného stavu v oblasti rádiových frekvencí pro mobilní telefonní sítě

Analysis of the Current Situation in the Field
of Radio Frequencies for Mobile Telephone Networks

Bc. Roman Stössel, DiS.

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	Bc. Roman Stössel, DiS.
Osobní číslo:	A11503
Studijní program:	N3902 Inženýrská informatika
Studijní obor:	Informační technologie
Forma studia:	kombinovaná
Téma práce:	Rozbor současného stavu v oblasti radiových frekvencí pro mobilní telefonní sítě
Téma anglicky:	Analysis of the Current Situation in the Field of Radio Frequencies for Mobile Telephone Networks

Zásady pro vypracování:

1. Charakterizujte teorii týkající se tématu.
2. Popište technické prostředky, které slouží k zajištění chodu mobilních sítí v České republice.
3. Analyzujte současný stav přidělených frekvencí a kanálů pro jednotlivé operátory v České republice.
4. Zhodnoťte celkovou datovou propustnost současných mobilních sítí.
5. Odhadněte možné další směry vývoje v oblasti mobilních sítí.
6. S pomocí programu Matlab nebo adekvátního softwarového prostředí proveďte srovnání vlastností aktuálně používaných modulací u systému GSM s perspektivními technologiemi, jejichž nasazení se předpokládá v budoucnosti.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. Moderní radiotechnika. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006, 767 s. ISBN 80-730-0132-2.
2. VLČEK, Karel. Komprese a kódová zabezpečení v multimediálních komunikacích. 2. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2004, 258 s. ISBN 80-730-0134-9.
3. HORAK, Ray. Telecommunications and data communications handbook. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2007, xxxviii, 791 p. ISBN 978-047-0396-070.
4. SLANINA, Martin. Moderní bezdrátová komunikace: přednášky. Vyd. 1. V Brně: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ústav radioelektroniky, 2010, 169 s. ISBN 978-80-214-4156-9.
5. PUŽMANOVÁ, Rita. Moderní komunikační sítě od A do Z. 2. aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2006, 430 s. ISBN 80-251-1278-0.
6. PROKOPEC, Jan. Systémy mobilních komunikací: sítě pro mobilní datové služby. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012, 186 s. ISBN 978-80-214-4498-0.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Pospíšilík, Ph.D.

Ústav počítačových a komunikačních systémů

Datum zadání diplomové práce:

6. února 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

15. května 2015

Ve Zlíně dne 6. února 2015



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.

děkan

L.S.



doc. Mgr. Roman Jašek, Ph.D.

ředitel ústavu

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá rozbořem současného stavu v oblasti rádiových frekvencí pro mobilní telefonní sítě v ČR. V teoretické části jsou popsány technické prostředky, které slouží k zajištění chodu mobilních sítí v ČR. Sem spadá popis vývoje prvních mobilních sítí, systému GSM a UMTS. Praktická část je rozdělena na čtyři části. První část je zaměřena na analýzu současného stavu přidělených frekvencí a kanálů pro jednotlivé operátory v ČR. Druhá část se zabývá zhodnocením celkové datové propustnosti současných mobilních sítí. Třetí část popisuje nové směry vývoje v oblasti mobilních sítí, konkrétně pro systém LTE a LTE-A. Poslední čtvrtá část je zaměřena na vytvoření simulací digitálních modulací v prostředí Wolfram Mathematica. Výsledky těchto simulací budou nakonec porovnány dle svých specifických vlastností.

Klíčová slova:

rádiové frekvence, GSM, UMTS, GPRS, EDGE, HSPA, LTE, LTE-A, digitální modulace, simulace modulací, GMSK, PSK, QAM, Wolfram Mathematica

ABSTRACT

The thesis deals with the analysis of the current state in the field of radio frequencies for mobile telephone networks in the Czech Republic. The theoretical part describes the technical means used to ensure the operation of mobile networks in the Czech Republic. This includes a description of the development of the first mobile networks of GSM and UMTS. The practical part is divided into four parts. The first part focuses on the analysis of the current state of allocated frequencies and channels for each of the operators in the Czech Republic. The second part deals with the evaluation of the overall data throughput rate of today's mobile networks. The third section describes new development trends in mobile networks, specifically for the LTE and LTE – A systems. The final part is focused on creating simulations of digital modulations in Wolfram Mathematica program. The results of these simulations are then compared with each other according to their specific properties.

Keywords:

radio frequency, GSM, UMTS, GPRS, EDGE, HSPA, LTE, LTE-A, digital modulation, simulation modulation, GMSK, PSK, QAM, Wolfram Mathematica

Děkuji panu Ing. Martinu Pospíšilíkovi, Ph.D. za odborné vedení, poskytování cenných rad a materiálových podkladů k práci. Dále bych chtěl poděkovat prof. Ing. Karlu Vlčkovi, CSc. za užitečné rady a poskytnuté materiály. V neposlední řadě děkuji také své rodině a přátelům za podporu a trpělivost při tvorbě diplomové práce.


Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně 15. května 2015


.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	12
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 HISTORIE A VÝVOJ MOBILNÍCH SÍTÍ.....	15
1.1 SÍŤ PRVNÍ GENERACE – 1G.....	15
1.2 SÍŤ DRUHÉ GENERACE – 2G.....	16
1.3 SÍŤ TŘETÍ GENERACE – 3G.....	16
1.4 SÍŤ ČTVRTÉ GENERACE – 4G	16
2 SYSTÉM GSM.....	17
2.1 HISTORIE SYSTÉMU GSM	17
2.2 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU V SYSTÉMU GSM	18
2.2.1 Kódování, prokládání a formátování burstů	18
2.2.2 Modulace GMSK.....	21
2.3 ZÁKLADNÍ KONCEPCE MOBILNÍCH STANIC	22
2.4 KMITOČTOVÁ PÁSMA, BUŇKOVÁ STRUKTURA SYSTÉMU GSM	23
2.4.1 Handover v buňkové síti GSM.....	24
2.5 SDÍLENÉ VYUŽITÍ FREKVENCÍ – ČASOVÝ MULTIPLEX, TDMA / FDMA.....	25
2.6 SLOTSY, RÁMCE, MULTIRÁMCE.....	26
2.7 DIGITALIZACE HLASU	27
2.8 GSM 1800 MHZ – ÚVOD, KMITOČTOVÁ PÁSMA	29
2.9 ARCHITEKTURA SÍŤE GSM	30
2.9.1 Subsystem základnových stanic BSS (Base Station Subsystem).....	30
2.9.2 Síťový a spínací subsystém – NSS (Network and Switching Subsystem)	31
2.9.3 Operační a podpůrný subsystém – OSS (Operation and Support Subsystem)	34
2.10 IDENTIFIKAČNÍ MODUL UŽIVATELE	34
2.11 LOKACE ÚČASTNÍKA.....	35
2.12 IDENTIFIKACE ÚČASTNÍKA A JEHO VYHLEDÁVÁNÍ.....	36
2.13 PŘENOS DAT V SYSTÉMU GSM	37
2.13.1 CSD (Circuit Switched Data) - přepojování okruhů	37
2.13.2 HSCSD (High Speed Circuit Switched Data).....	37
2.13.3 Technologie GPRS (General Packet Radio Service).....	38
2.13.4 Technologie EDGE a její modulace	41
2.14 SLUŽBY SYSTÉMU GSM	42
3 IMT – 2000	45
3.1 MOBILNÍ RÁDIOVÉ SÍŤE 3G.....	45
3.2 POŽADAVKY NA 3G.....	46
4 SYSTÉM UMTS.....	48

4.1	BUŇKA UMTS.....	48
4.2	KMITOČTOVÁ PÁSMA UMTS.....	49
4.3	ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU V SYSTÉMU UMTS.....	50
4.3.1	Zdrojové kódování.....	50
4.3.2	Kanálové kódování.....	51
4.3.3	Skramblování.....	52
4.3.4	Modulace.....	52
4.3.5	Přístupová technika v UMTS.....	53
4.4	STRUKTURA SYSTÉMU UMTS.....	54
4.4.1	Uživatelský terminál – ME.....	54
4.4.2	Přístupová síť – UTRAN.....	55
4.4.3	Páteřní síť – CN.....	56
4.5	TECHNOLOGIE HSDPA.....	57
4.6	TECHNOLOGIE HSUPA.....	58
4.7	TECHNOLOGIE HSPA+.....	58
4.7.1	Systemy MIMO (Multiple Input Output).....	59
II PRAKTICKÁ ČÁST.....		60
5	ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU PŘIDĚLENÝCH FREKVENCÍ A KANÁLŮ U MOBILNÍCH OPERÁTORŮ V ČR.....	61
5.1	ZÁKONY A NORMY.....	61
5.2	FREKVENČNÍ PŘIDĚL NA PÁSECH GSM, UMTS A LTE.....	61
5.2.1	GSM – přidělené kanály.....	61
5.2.1.1	GSM 900.....	62
5.2.1.2	DCS (GSM 1800).....	62
5.2.2	UMTS 2100.....	64
5.2.2.1	UMTS 2100 FDD.....	65
5.2.3	LTE800 DD.....	65
5.2.4	LTE 2600.....	66
5.3	AUKCE KMITOČTŮ PRO 4G SÍŤ.....	66
6	DATOVÁ PROPUSTNOST SOUČASNÝCH MOBILNÍCH SÍTÍ.....	67
6.1	GSM.....	67
6.1.1	GPRS.....	67
6.1.2	EDGE.....	68
6.2	UMTS.....	70
6.2.1	UMTS FDD.....	70
6.2.2	HSDPA.....	71
6.2.3	HSUPA.....	73
6.2.4	E-EDGE.....	74
6.2.5	HSPA+.....	76
6.2.5.1	Release 8.....	77
6.2.5.2	Release 9.....	78
6.2.5.3	Release 10.....	79
6.2.5.4	Release 11.....	79
6.2.6	LTE (3,9G).....	80

6.3	LTE-A.....	80
7	LTE.....	81
7.1	ROZDĚLENÍ KMITOČTOVÉHO PÁSMÁ.....	81
7.2	OFDM.....	83
7.3	RÁMCOVÁ STRUKTURA.....	86
7.4	FYZICKÉ KANÁLY A SIGNÁLY.....	89
7.5	TŘÍDY TERMINÁLŮ.....	91
7.6	PŘÍSTUPOVÁ TECHNIKA.....	92
7.6.1	OFDMA.....	92
7.6.2	SC-FDMA.....	93
7.7	ARCHITEKTURA SYSTÉMU LTE.....	94
7.7.1	E-UTRAN.....	95
7.7.2	EPC.....	96
7.7.3	UE (ME).....	97
7.8	REŽIMY V SYSTÉMU LTE.....	98
7.9	BUŇKOVÁ STRUKTURA V LTE.....	98
7.10	HANDOVER A VZÁJEMNÁ SPOLUPRÁCE V LTE.....	99
7.11	HARQ V LTE.....	99
7.12	TECHNIKA VÍCE ANTÉN V LTE.....	99
7.13	POKRYTÍ LTE VE SVĚTĚ.....	100
7.14	LTE A MOBILNÍ OPERÁTOŘI V ČR.....	101
7.14.1	O2 Telefonica.....	101
7.14.2	T-Mobile.....	101
7.14.3	Vodafone.....	102
7.15	PARAMETRY SYSTÉMU LTE.....	102
8	IMT – ADVANCED.....	104
8.1	LTE -ADVANCED.....	104
9	SIMULACE MODULACÍ VE WOLFRAM MATHEMATICA.....	108
9.1	PROSTŘEDÍ MATHEMATICA.....	108
9.1.1	Historie.....	108
9.1.2	Podstata.....	108
9.1.3	Notebook.....	108
9.1.4	Programovací jazyk.....	109
9.1.5	Využití.....	109
9.2	SOUHRNNÁ APLIKACE PRO MODULACE.....	110
9.2.1	Návrh řešení.....	110
9.2.2	Ukázka aplikace s modulací.....	111
9.2.3	Popis ovládacích oken, menu.....	111
9.3	MODULACE GSMK.....	114
9.3.1	Ovládání.....	114
9.3.2	Grafické výstupy modulace.....	115
9.4	MODULACE QPSK.....	116
9.4.1	Ovládání.....	116
9.4.2	Grafické výstupy modulace.....	117

9.5	MODULACE 16-QAM	118
9.5.1	Ovládání	119
9.5.2	Grafické výstupy modulace	119
9.6	CELKOVÉ POROVNÁNÍ MODULACÍ	120
9.6.1	Amplitudové charakteristiky souhrn	120
9.6.2	Frekvenční charakteristiky souhrn	121
9.6.3	Konstelační diagramy souhrn	122
ZÁVĚR		124
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ		125
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		126
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		127
SEZNAM OBRÁZKŮ		138
SEZNAM TABULEK		140
SEZNAM PŘÍLOH		141

ÚVOD

V současné době jsme svědky dynamického rozvoje v oboru telekomunikací, který senejvíce projevuje v oblasti rádiových komunikací. Tento rozvoj byl vynucen neustále rostoucí potřebou komunikace a výměny informací mezi dvěma nebo několika subjekty, které senacházejí na libovolném místě zemského povrchu nebo v jeho těsné blízkosti. Systémy rádiové komunikace svým účastníkům poskytují různé druhy služeb, jakonapříklad telefonní služby, přenos dat, videosignálů, přístup k Internetu, při zachování požadované mobility.

Zvoleným tématem diplomové práce je problematika rozboru a analýza současného stavu rádiových frekvencí pro mobilní telefonní sítě v ČR, resp. jedná se o popis analýzu souvisejících problémů. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V úvodu první kapitoly se práce zabývá vývojem a historií prvních mobilních sítí od prvopočátku. Dále popisuje rozdělení jednotlivých telekomunikačních systémů dle vývojových generací.

Druhá kapitola popisuje detailně systém GSM, kam spadá jeho historie, způsob zpracování signálu, frekvenční spektrum, architektura sítě, bezpečnost sítě, až po přenosy dat v síti.

Třetí kapitola pojednává o celosvětovém standardu IMT-2000, který uvádí do problematiky sítí 3. generace a jejich požadavků na tuto síť.

Čtvrtá kapitola vychází analogicky z předchozí třetí a popisuje tak systém UMTS, který je nejrozšířenější a nejpoužívanější síť Evropy. Obdobně jako systém GSM výše popsany, se zabývá historií, způsobem zpracování signálu, frekvenčním spektrem, architekturou sítě a přenosy dat.

Praktická část práce je rozčleněna do dalších sedmi kapitol, ve kterých jsou řešeny veškeré stanovené cíle, viz níže.

Kapitola pět analyzuje současný stav přidělených frekvencí a kanálů u mobilních operátorů v ČR, kam spadá společnost Vodafone, O₂ a T-Mobile.

Kapitola šest zhodnocuje datovou propustnost současných mobilních sítí, kam spadají technologie GPRS, EDGE, HSPA, HSPA+, LTE.

Kapitola sedm popisuje detailně nedávno zavedenou technologii LTE a její parametry.

Kapitola osm pouze okrajově hodnotí pozvolna nastupující technologii LTE-A, jelikož je tento systém u nás v ČR teprve v počátcích.

V kapitole devět je uveden popis a využití softwaru Wolfram Mathematica. Ten slouží k vytvoření daných simulací modulací : GMSK, QPSK, 16-QAM, které zde budou následně vytvořeny, popsány a poté vzájemně vyhodnoceny.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 HISTORIE A VÝVOJ MOBILNÍCH SÍTÍ

V Evropě se vývoj mobilních telefonů datuje od roku 1981. Jak první systém, který byl vyvinut, byla analogová buňková síť NMT 450 ve skandinávských zemích. Prvně byl provoz zahájen ve Švédsku, poté v Norsku, Finsku a Dánsku a následně se pak začal rozšiřovat do dalších zemí Evropy. Některé státy si, v této souvislosti, vyvinuly svoje vlastní systém, např. Velká Británie, toto byl systém TACS, rovněž Rakousko systémem C-Netz, Francie systémem RadioCom 2000 a jako poslední Itálie RTMS. Nedostatkem bylo to, že jednotlivé systémy nebyly vzájemně zaměnitelné, z uvedeného důvodu byl problém s mezinárodním roamingem, a rovněž byla nedostatečná kapacita. Následně na toto toto navázal výzkum v roce 1986 systémem NMT 900, který umožňuje provoz mobilní sítě na více kanálech.

V ČR se systém NMT poprvé použil v roce 1991, společnost Eurotel spustila komerční provoz v pásmu 450 MHz. V roce 1982 vznikla skupina GSM, jejímž úkolem bylo vyvinout v plné míře digitální síť pracující v pásmu 900 MHz. Obdobně se vyvíjely mobilní systémy ve světovém měřítku. Jako první komerční síť v USA byl systém AMPS, který pracoval v pásmu 800 MHz. Vývoj tohoto systému byl ukončený v roce 1978. Výzkum v USA byl zaměřen na oblast digitálních buňkových systémů. V roce 1991 byl zprovozněn systém IS-136, následně byl v roce 1993 uveden do života systém IS-95, který rozdílně od jiných systémů využíval mnohonásobného přístupu CDMA. [1]

1.1 Síť první generace – 1G

Počínaje rokem 1995 byl zaveden v USA systém GSM pod označením PCS 1900. V Japonsku se analogové buňkové systémy začaly využívat v roce 1979. Od roku 1991 jsou pak zavedeny digitální systémy PDC a IS-95. Jestliže hovoříme o generacích mobilních systémů, tak první generace mobilních systémů se vyznačuje analogovými systémy, které poskytují pouze hlasové služby. Systém NMT je hlavním systémem první generace, ale jako jediným systémem, který podporuje mezinárodní roaming. Analogové systémy používají přístupovou techniku FDMA. V tomto systému má každý uživatel vyhrazený vlastní rádiový kanál. [2]

1.2 Síť druhé generace – 2G

Druhá generace jsou mobilní systémy, které jsou plně digitální a hlavním systémem je GSM. Na počátku byly tyto systémy zaměřeny hlavně na přenos hlasu, poté se jejich použití rozšířilo i na datové služby. V porovnání s analogovými systémy mají GSM systémy vyšší kapacitu sítě. Používají digitální modulace a kódování stejně jako vysokou odolnost proti rušení a odposlechu. Systémy druhé generace používají přístupovou techniku FDMA/TDMA. Na jeden rádiový kanál je přiděleno několik uživatelů, kteří jsou rozděleni do jednotlivých timeslotů. Rozlišení systémů druhé generace umožňuje navýšení přenosové rychlosti. Toto bylo dosaženo zavedením paketového přenosu a později také přidáním dalších modulačních technik. [2]

1.3 Síť třetí generace – 3G

Systémy třetí generace se zaměřují především na přenos dat. V Evropě tyto systémy zastupují pouze UMTS, světovém měřítku jsou tyto systémy označovány jako IMT-2000. Jsou zvláštní tím, že systémy pracují v pásmu 2 MHz. Používá se zde přístupová technika CDMA, kde uživatelé používají stejné frekvenční pásmo ve stejný časový okamžik, jsou rozlišovány pseudonáhodným kódem. [2]

1.4 Síť čtvrté generace – 4G

Systémy čtvrté generace jsou všeobecně označovány jako IMT-Advanced, tyto jsou specifické pro systémy, které užívají přístupovou techniku OFDMA, která je založena na ortogonálním kmitočtovém multiplexu OFDM. Dělení systémů je souhrnně uvedeno v následující tabulce. [3]

1G	2G	2,5G	3G	3,5G	3,9G	4G
NMT	GSM	HSCSD	UMTS	HSDPA	LTE	LTE-A
AMPS	D-AMPS	GPRS	CDMA 2000	HSUPA	HSPA+	WiMAX
TACS	IS-95	EDGE				WiFi
C-Netz	PDC					WLAN
RadioCom 2000						HAPS
TRTMS						
NTT						

Tabulka 1: Generace mobilních systémů [3]

2 SYSTÉM GSM

2.1 Historie systému GSM

Během 80.tých let svět zaznamenal rychlý nárůst analogových celulárních systémů v Evropě, především pak ve Skandinávii, Velké Británii, Francii a Německu. Všechny tyto země vyvinuly svůj vlastní systém, který alenebyl kompatibilní s jakýmkoliv jiným systémem celulární komunikace. Nastal tedy problém ve formě nepoužitelnosti zařízení za hranicemi daných zemí a s tím souvisel i omezený trh v této oblasti. [9]

Z toho důvodu Konference evropských správ a pošt CEPT vytvořila v roce 1982 novou standardizační skupinu GSM (Groupe Spécial Mobile), která dostala za cíl vytvořit standardy pro nový digitální systém, který by byl kompatibilní v zemích celé Evropy, popřípadě světa.

Navržený systém měl splňovat tato kritéria :

- Špičková kvalita přenášené řeči
- Nízká cena vybavení a služeb
- Podpora mezinárodního roamingu
- Frekvenční úspornost
- Podporu ISDN
- Efektivitu v budoucnosti

V roce 1989 Evropský telekomunikační normalizační institut (ETSI) převzal odpovědnost za standardizaci tohoto systému a o rok později byla provedena specifikace fáze 1 sítě GSM. [9]

Komerční provoz první GSM sítě byl zahájen v polovině roku 1991 a už v roce 1993 existovalo 36 GSM sítí ve 22 zemích. GSM není jen evropský standard, ale například i Jižní Afrika, Austrálie a mnoho dalších zemí středního a dálného východu zvolily z hlediska kompatibility tento systém. Tato technologie byla s menším zpožděním zavedena i v USA, kde pod názvem PCS 1900 je provozována na odlišných frekvencích. Systém GSM tak existuje na všech kontinentech a zkratka GSM je označována jako "Global System for Mobile Communication", tedy "Globální systém pro mobilní komunikaci". Analogové buňkové systémy, kde spadají například AMPS v USA nebo TACS ve Velké Británii, začaly pomalu upadat. V květnu 2001 dosáhl počet

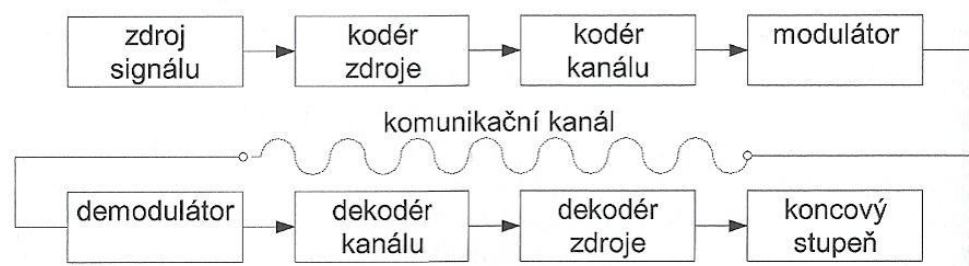
uživatelů GSM 900/1800/1900 na celém světě 500 miliónů. V ČR byl systém GSM po prvé spuštěn v roce 1996 společností Eurotel a následně společnostmi Radiomobil a Český mobil. [4]

2.2 Zpracování signálu v systému GSM

Systém GSM využívá k přenosu telefonních hovorových signálů a případně i datových signálů digitální modulaci ve spojení s určitými způsoby kódování. Tento systém je sice podstatně složitější než systém analogový, avšak v provozu disponuje řadou významných předností, např. dosahuje mnohem kvalitnějšího spojení v prostředí nepříznivých rádiových kanálů, efektivněji využívá přidělená frekvenční pásma, případně nežádoucí odposlech či jiné zneužití je zde téměř vyloučeno. [4]

Digitální forma přenášených signálů potom umožňuje značně rozšířit nabídku poskytovaných služeb a dosáhnout kompatibility s digitálními sítěmi s integrací služeb ISDN a to vše již ne v rámci pouze jediného státu nebo malé skupiny států, nýbrž v rámci celého kontinentu.

V této digitální formě přenášených signálů pak už není problém rozšířit nabídku poskytovaných služeb již pro území celého kontinentu. [4]



Obrázek 1 :Obecné schéma komunikačního systému [5]

2.2.1 Kódování, prokládání a formátování burstů

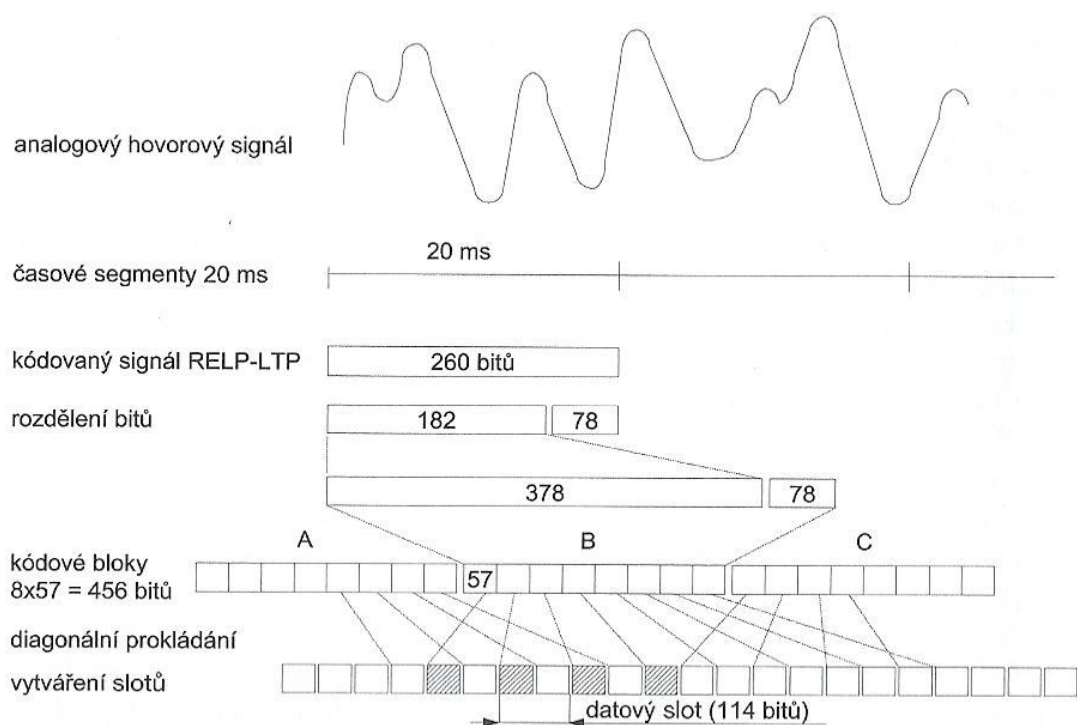
Předchozí obrázek č. 1 znázorňuje obecné schéma komunikačního systému, kde zdroj signálu prezentuje vstupní blok vysílací strany.

Do něj vstupují zprávy, jež mohou být v podobě elektrických signálů, ale i neelektrických veličin (obraz, zvuk, a jiné), nesoucí informaci. Elektrické signály jsou zde zesilovány

a frekvenčně korigovány, případně jsou podrobeny jiným lineárním operacím. Neelektrické signály jsou v tomto zdrojovém bloku převáděny na požadované elektrické průběhy. Dalším blokem v pořadí je kodér zdroje, který představuje převodník A/D, jenž zastává funkci přeměny analogových signálů na signály digitální. Kodér navíc vykonává i jiné funkce, zvláště pak zamezuje redundanci, což je nenadbytečná informace. Ta se nachází vždy v přenášeném signálu a je možné ji z tohoto signálu vyřadit, aniž by příjemce zaregistroval zhoršenou kvalitu příjmu.

Mezi hlavní úkol kodéru zdroje signálu patří převod analogového elektroakustického signálu, který vychází ze zdroje, což je mikrofon mobilní stanice, do digitální formy.

System GSM používá moderní parametrickou metodu kódování označovanou zkratkou RPE-LTP. Toto kódování je považováno za velmi složité, z toho důvodu zde budou uvedeny jen jeho základní principy. [6]



Obrázek 2 : Kódování zdroje signálu, kódování kanálu a prokládání v systému GSM [5]

Analogový elektroakustický signál je v kodéru vysílače členěn do časových segmentů o délce 20ms. Procesem kódování jsou následně tyto segmenty převedeny na digitální hovorové rámce po 260 bitech (viz obr. 2) s bitovou rychlostí 13 kbit/s (260 bitů/20ms). Každý rámeček obsahuje 188 bitů excitačního signálu, z kterého se v kodéru přijímače

rekonstruuje požadovaný výstupní signál. Dále je zde $2 \times 36 = 72$ bitů představující koeficienty digitálních filtrů LTP a LPC (Linear Prediction Coding), tyto jsou jedněmi z hlavních funkčních bloků kodéru i dekodéru. [5]

V kodéru se vstupní signál nejdříve segmentuje a ve filtru LPC se podrobuje lineárnímu prediktivnímu kódování. Potřebné koeficienty filtru LPC, které určují parametry, se získávají pomocí souběžně probíhající analýzy LPC. Tímto postupem se minimalizuje energie zpracovaného hovorového signálu, a to velice účinně, protože nekódovaný hovorový signál obsahuje silnou redundantní složku. V následujícím filtru LPT se sčítá výstupní signál z předchozího filtru LPC s vhodně zpožděnou a vynásobenou replikou tohoto signálu. Tato operace dále vylepšuje vlastnosti kodéru. Získaný zbytkový (residuální) signál je v kodéru s adaptivní modulací PCM (APCM) kódován, a tím je převeden na excitační signál o 188 bitech. Ten je v multiplexoru sdružován s digitálním signálem reprezentujícím parametry obou digitálních filtrů. Ten je v podobě hovorových rámců o 260 bitech potom kanálem přiváděn do kodéru a dalších obvodů vysílače. [7]

Popisované kódování typu RPE-LTP je velmi složité. Příslušné obvody zde musejí provádět asi 1,5 milionu elementárních operací (sčítání a násobení) za jednu sekundu, proto je naprosto nezbytné, aby byly realizovány jako digitální signálové procesory v technologii LSI. Účinnost kódování je však značná. Má-li totiž nekódovaný digitalizovaný telefonní signál obvyklou bitovou rychlost 64kbit/s (modulace PCM se vzorkováním 8 kHz a s 8bitovou digitální reprezentací vzorků), tentýž signál s kódováním RPE-LTP potom vystačí s bitovou rychlostí pouhých 13kbit/s, a to při prakticky stejné výsledné kvalitě přenosu. [7]

Aby bylo v systému GSM dosaženo co nejlepší odolnosti vůči rušivému působení shluků chyb, je konvoluční kódování kanálu doplněno ještě tzv. prokládáním (interleavingem). Princip tohoto velice účinného opatření je naznačeno v dolní části obr.2.

Každý kódový blok o 456 bitech, který je vytvořen předchozím kódováním kanálu, se dále dělí na 8 skupin po 57 bitech. Ty jsou potom metodou tzv. diagonálního prokládání proloženy s posledními čtyřmi 57bitovými skupinami bloku následujícího. V takto upraveném signálu však dvě sousední 57 bitové skupiny přísluší vždy nejen jedinému, nýbrž dvěma sousedním blokům (tedy např. první čtyři 57 bitové skupiny bloku B, vyznačené šrafováním, jsou proloženy se čtyřmi skupinami předchozího bloku A atd.). Aby se nenarušily „sousedské“ relace mezi po sobě následujícími bity, využívají bity bloku

A např. sudé pozice uvnitř určité dvojice proložených bitových skupin, bity bloku B zaujmají zase pozice liché atd. [5]

Dvě sousední bitové skupiny které přináležejí dvěma různým blokům obsahující celkem $2 \times 57 = 114$ bitů se označují termínem slot. Po doplnění 26 bity tzv. tréninkové sekvence, které se využívají pro účely ekvalizace a případně i demodulace, a několika dalšími bity mají sloty dobu trvání cca 0,577 ms. V této podobě, znázorněné na obr.15, ukazují základní jednotku přenosu v systému GSM. [5]

Z kodéru kanálu jde takto upravený modulační signál do modulátoru, kde se provádí jeho modulace na mikrovlnou sinusovou nosnou vlnu. Modulací sje zde rozum ovlivňování některého parametru nosné vlny v rytmu modulačního signálu. Jsou-li tyto signály analogové (tedy neobsahuje-li vysílací strana kodér zdroje a kodér kanálu), označují se tyto modulační způsoby termínem analogové. Jsou-li digitální, jedná se o modulaci digitální. Využití principu modulace má u radiokomunikačních systémů dva hlavní důvody. Předně umožňuje pomocí nosných vln s různými frekvencemi přenášet jediným radiokomunikačním kanálem značný počet nezávislých modulačních signálů. Mimo toho je možné volbou vhodného typu modulace co nejlépe přizpůsobit přenášený modulovaný signál parametrům radiokomunikačního kanálu

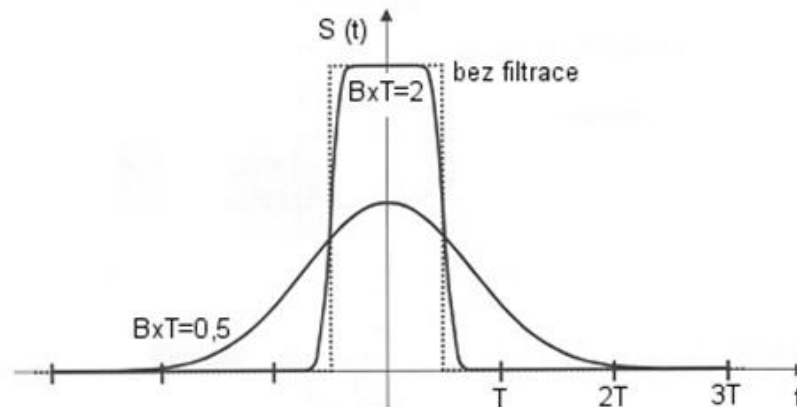
V rádiovém kanálu se šíří signál od vysílače k přijímači podobou elektromagnetických vln. Přitom dochází k jeho potlačení, přidává se k němu šum a interference, může být postižen únikem, fázovou disperzí a jinými rušivými vlivy. [7]

2.2.2 Modulace GMSK

Zakódovaný digitální modulační signál se přivede do modulátoru vysílače, v němž se moduluje nosná vlna. Pro radiotelefonní systém GSM byla jako nejlepší modulační metoda vybrána gaussovská modulace s minimálním zdvihem, která je značená zkratkou GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). Jde o upravenou variantu modulace MSK. Signál modulovaný metodou MSK zabírá relativně malé kmitočtové pásmo, nedostatkem však je nepříjemné vyzařování do sousedních pásem, jež nelze odstranit filtrací. [8]

Provádí se tedy předfiltrace datového signálu za pomoci gaussovské dolní propusti, od ní je název této modulace. Jelikož časový průběh filtrovaného signálu neobsahuje skokové změny, nemění se skokově ani vysílaný kmitočet. U této modulace je důležitý modulační index ($B \times T$), je to součin šířky pásma gaussovské propusti a doby trvání bitu. Pro malé

veličiny modulačního indexu klesají postranní laloky, ale roste mezisymbolová interference, pro velké hodnoty je tomu naopak. [8]



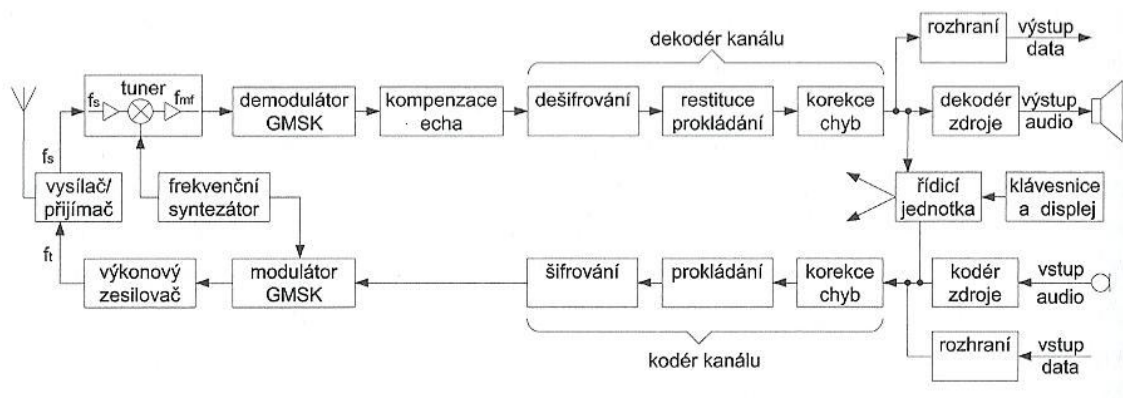
Obrázek 3: GMSK modulace [8]

2.3 Základní koncepce mobilních stanic

Mobilní stanice pro systémy GSM jsou vyráběny různými výrobci. Všechny z nich však musí splňovat příslušné články specifikací GSM. Ve vlastním řešení, např. obvodů vysílačů a přijímačů, nebo různých dalších doplňcích ke zvýšení pohodlí, se však vzájemně liší.

Blokové schéma zapojení typické mobilní stanice je na obr. 4. Na vysílací straně má tato mobilní stanice vstupy pro audio a data. Audiosignály jsou v kodéru zdroje kódovány systémem RPE-LTP. V kodéru zdroje jsou nejdříve podrobena konvolučnímu blokovému kódování, poté diagonálnímu prokládání a šifrování. Tím je zpracování modulačního signálu v základním pásmu zakončeno. Tímto signálem je následně modulována vysokofrekvenční nosná vlna (gaussovskou modulací s minimální fází GMSK). Modulovaný signál je výkonově zesilován a přes anténní sdružovač se přivádí k anténě. [3]

Na přijímací straně se signál zpracuje v podstatě inverzním postupem. Zdrojem nosné vlny pro vysílač a rovněž heterodynního signálu pro přijímač je frekvenční syntezátor. Ten má velkou frekvenční stabilitu a umožňuje provádět obtížné frekvenční operace vyžadované systémem GSM (frekvenční skoky nosné vlny SFH, rychlé přeladování při handoveru apod). [8]



Obrázek 4 : Typická koncepce mobilní účastnické stanice GSM [8]

2.4 Kmitočtová pásma, buňková struktura systému GSM

Mobilní telefonní síť používají ke své činnosti rádiové vlny. Frekvence, které jsou jim přiděleny, jsou přesně omezené a každý mobilní operátor jich získává jen nezbytně nutný počet. Dostává je přiděleny v rámci své licence, od státního orgánu, který je pověřen správou frekvenčního spektra. V České republice frekvence přiděluje Český telekomunikační úřad. Obecně se sice říká, že operátor GSM pracuje v pásmu 900 MHz, ale prakticky se jedná o kanály 890-915 MHz pro cestu od mobilní stanice k základnové (uplink) a kanály 935-960 MHz pro opačný směr (downlink) o šířce 200 kHz. V pásmu GSM 900 je tedy uvedeno 125 frekvencí v rozmezí 890-915 MHz pro uplink a 125 frekvencí v rozsahu 935-960 MHz pro downlink. Využívá se však pouze 124 frekvencí. Jedna frekvence se dělí na dvě části, kde každá část slouží k lepšímu oddělení od sousedních frekvencí mobilních pásem. [6]

Rozsahy frekvencí přidělené konkrétním operátorům, však nikdy nemohou stačit na to, aby operátor mohl přidělit každému probíhajícímu hovoru ve své síti, samostatný komunikační kanál (tj. samostatný rozsah frekvencí). Tento problém se vyřešil vícenásobným použitím stejných frekvencí, a to tak, aby různé hovory používaly stejné frekvence. Při tom je však nutné zajistit, aby se tyto různé hovory, které se vysílají na stejné frekvenci vzájemně neovlivňovaly. K tomu se v současnosti využívá buňkový (celulární) princip. Jeho řešením je rozdělení geografického území, na kterém příslušný operátor poskytuje své služby, na potřebně velké části zvané buňky. Pokud je v dané buňce použita konkrétní frekvence, v žádné v bezprostředně sousedících buňkách se tato frekvence nepoužívá (používá se jiná ze 123 zbývajících). V praxi by bylo nejlepší použít šestihrané

buňky, které by svým uspořádáním připomínaly plástev medu (viz následující Obr. 5). Nelze však poručit vlnám, aby se šířily v tomto tvaru. Proto se ve skutečnosti buňky musejí často překrývat. [6]

2.4.1 Handover v buňkové síti GSM

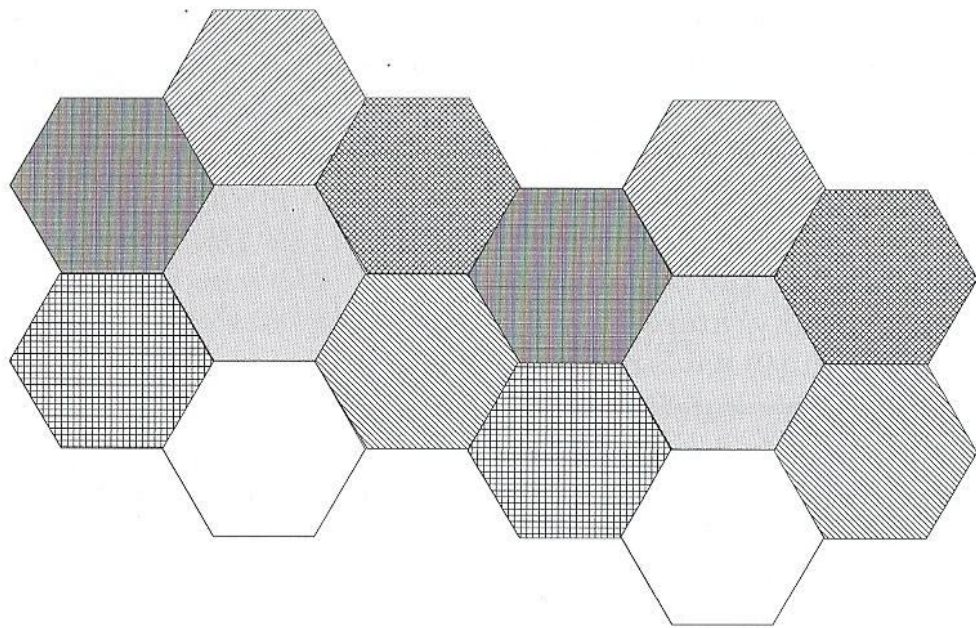
Systém GSM je tvořen typickými buňkami o velikosti 1-6 km v průměru. V oblastech se slabým provozem lze použít buňky o velikosti až 35 km. Naopak v centrech velkých měst (např. na Staroměstském náměstí) jsou vytvářeny mikrobuňky o rozměrech 300-500 metrů. Při použití takto malých buněk (ale i těch větších) často dochází k handoveru, tj. předávání hovoru z buňky na sousední buňku při vzdálení se z jejího dosahu. Dojde-li k přemístění mobilní stanice z jedné buňky do druhé v průběhu hovoru, ústředna jí přidělí nové hovorové kanály. Celý tento proces trvá velice krátce a během hovoru je nepostřehnutelný. Rozeznáváme: [4]

- Mezibuňkový handover – automatické přeladování mobilních stanic při přechodech přes hranice buněk se označuje pojmem inter-cell handover.
- Vnitrobuňkový handover – v moderních sítích se používá i způsob přeladování mobilní stanice v průběhu pohybu v rámci jedné buňky, protože se mohou objevit kanály zajišťující kvalitnější spojení než kanály původně přidělené. Tento proces se nazývá intra-cell handover.

Ve specifikaci sítí GSM je počítáno s handoverem až do rychlosti 390 km/h, což je pro běžný provoz naprosto dostačující.

V místech s velkou hustotou provozu se v případě potřeby kapacita sítě zvětšuje pomocí tzv. mikrobuněk. Ke zkvalitnění pokrytí území signálem slouží tzv. deštníkové buňky.

Trojice buněk obsluhovaných z jedné BTS (Base Transceiver Station) jsou uskupeny opět do trojic tak, že vytvářejí jakýsi buňkový hrozen, ve kterém se využijí všechny provozní kanály, aniž by se opakovaly nebo docházelo k jejich překrytí (rušení). Tato základní struktura se opakuje mnohonásobně v celé síti a umožňuje tak mnohonásobné opakování kmitočtů v buňkách od sebe dostatečně vzdálených, tím se výrazně zvyšuje kapacita sítě (viz Obr. 5). [4]



Obrázek 5 : Princip mnohonásobného využití frekvencí pro uskutečňování hovorů v síti GSM

S narůstajícím počtem uživatelů jsou operátoři nuceni svou síť „zahušťovat“, takže se není čemu divit, že výše uvedený počet přidělených kanálů přináší (zejména ve velkých městech) komplikace. V případě, že se v některém místě „srazí“ signály ze dvou či více BTS vysílajících na stejném kanále, je téměř pravděpodobné, že si zde buď nezavoláte, nebo zavoláte s velkými obtížemi. Telefon si prostě v takovém případě nedokáže vybrat, s kterou BTS má komunikovat. Je tedy na technicích, aby síť sladili a nastavili tak, aby k těmto jevům nedocházelo. Kromě zmenšení dosahu BTS (úprava downloadu, případně snížením vysílacího výkonu BTS) jsou v záloze i další technická řešení, tyto budou popsána později.

2.5 Sdílené využití frekvencí – časový multiplex, TDMA / FDMA

Ani opakované využití přidělených frekvencí v jednotlivých buňkách sítě stále ještě nepostačuje k tomu, aby byly všechny žádosti o hovor uspokojeny. Problémem je hlavně velký počet uživatelů v rámci buňky, který bývá často výrazně větší než počet rozsahů frekvencí, a tím možnost přidělení kanálů dostupných v dané buňce pro přenos jednotlivých hovorů. Z tohoto bylo nutné vícenásobně využít dostupné frekvence i v rámci jednotlivých buněk. [9]

Každý kanál se dělí do 8 časových úseků, ve kterých je provozováno 87 provozních kanálů. Jedná se o systém TDMA (Time Division Multiple Access, časově mnohonásobné rozdělení přístupu), za pomoci kterého tedy využíváme jeden přenosový kanál pro více hovorů. Můžeme si to představit tak, že každá z komunikujících dvojic využívá přenosový kanál jen po určitou dobu, potom jej předá další dvojici, a ta udělá totéž. A vše se opakuje, dokud se nevyčerpají všechny komunikující dvojice, které používají daný přenosový kanál. Pak se zase dostane na pořad první dvojice a cyklus se opakuje. Po jednom kanálu se tedy může vést současně 8 hovorů, kdy každý dostává tento přenosový kanál vždy na 1/8 určitého přenosového kvanta přidělen. Toto časové kvantum se označuje jako slot. Pro každý slot je vyhrazena doba 577 mikrosekund, z toho je patrné, že celá skupina má délku trvání 4,616 milisekund, každá dvojice se dostane ke slovu přibližně 217x za sekundu. Kratší čas se nazývá time slot, delší (osmi po sobě jdoucím time slotů) TDMA rámeček. [9]

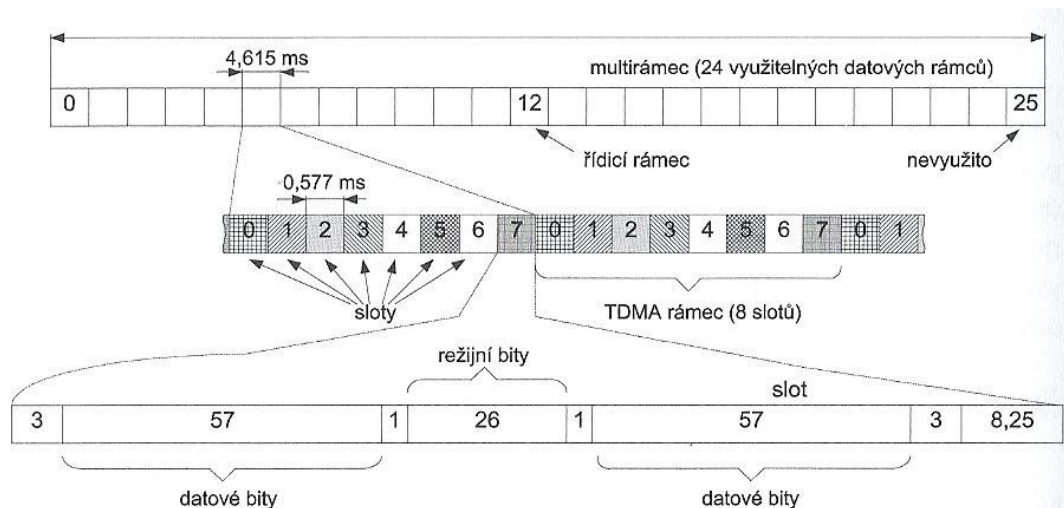
Kvůli tomuto způsobu využívání kanálů se hovoří o časovém multiplexu TDMA a jelikož jednotlivé nosné vlny (kanály) mají odstup 200 kHz, vytvářejí tzv. frekvenční multiplex FDMA. Na základě toho tedy síť GSM používá kombinovaný multiplex TDMA/FDMA, který umožňuje úsporu omezeného frekvenčního prostoru a také přispívá k dobré odolnosti přenosu modulovaného signálu. Tento způsob přenosu je jedním z podstatných důvodů, proč je hovory v síti GSM velmi obtížné odposlouchávat.

2.6 Sloty, rámce, multirámce

Každých 8 slotů, které lze přiřadit různým hovorům, dohromady tvoří TDMA rámeček (s časovou délkou 4,616 milisekund). Tyto jednotlivé rámce jsou pak seskupovány do skupin po 26 a jsou označovány jako tzv. multirámce. Časová délka jednoho multirámce je 120 milisekund. Jednotlivé multirámce jsou při přenosu od sebe odděleny časovým odstupem, odpovídající třem slotům. Z celého počtu 26 rámečků v multirámci je přitom 24 využito pro vlastní přenosy, jeden rámeček (12. v pořadí) je řídicí a zbývajících (25. v pořadí) je nevyužito (viz obr. 6). [9]

V rámci každého slotu jsou přenášeny dva bloky po 57 užitečných bitech. V jednom rámci je 8 takových slotů, tedy v multirámci je jich 24 (jeden řídicí a 1 nevyužitý). Na jeden slot v rámci celého multirámce je to $2 \times 57 \times 24 = 2736$ bitů. Tvá-li přenos jednoho multirámce 120 mikrosekund, potom je za jednu sekundu přeneseno 22 800 bitů. Z toho je patrné, že přenosová rychlost je 22,8 kbit/s.

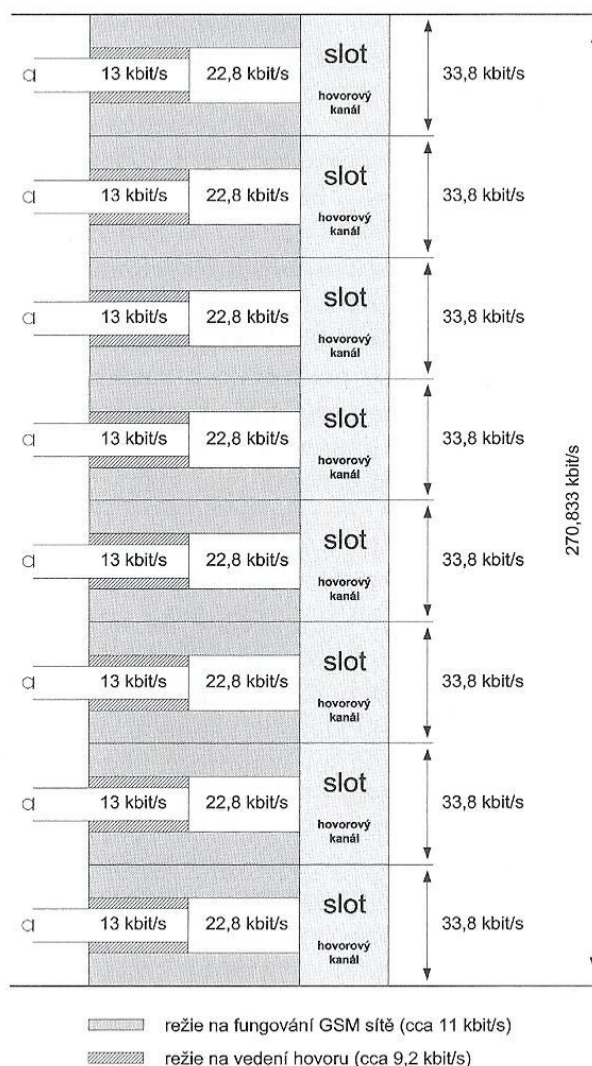
Musíme vzít na vědomí, že se jedná o přenosovou rychlost připadající na jeden slot, u které se však neuvažuje o vlivu režie (času) nutného pro fungování GSM přenosů. Tedy např. o komunikace mezi terminálem a základnovou stanicí, o režii spojenou s přechodem mezi jednotlivými buňkami (handover) dále k tomu, aby mobilní terminál ohlásil svou přítomnost základnové stanici, nebo aby si vyžádal přidělení hovorového kanálu apod. Každý slot přenáší celkem 156,25 bitů, v každém rámcu je 8 slotů a v každém multirámcu celkem 26 slotů. Celkem se tedy jedná o $156,25 \times 8 \times 26 = 32\,500$ bitů. Ty se přenesou za 120 milisekund – celková přenosová rychlost je tedy asi 270 833 bit/s. Pokud bychom tuto celkovou rychlost jednoho přenosového kanálu, tj. cca 271 kbit/s, rozpočítali na 8 hovorových kanálů (slotů), pak každý z nich má 33,8 kbit/s. Z toho vyplývá, že na režii zajišťující funkci GSM sítě připadne cca 11 kbit/s na každý hovorový kanál (slot). [9]



Obrázek 6 : Představa slotů, rámců a multirámečků [9]

2.7 Digitalizace hlasu

U pevné digitalizované sítě je kontrolován vzorek analogového signálu každých 125 mikrosekund, ten se zakóduje do 8bitového čísla a pro jednotlivý hovor tedy dostaneme 64 kbit/s. Sítě GSM vznikaly později, a z toho důvodu se zde používá daleko propracovanější systém digitalizace lidského hlasu, který generuje výrazně nižší objem dat, který se musí následně přenést. V GSM je používaná metoda, při které se snímá vzorek přenášeného hlasu každých 20 milisekund a kóduje se pomocí 260 bitů. To odpovídá 13 kilobitům dat generovaných za sekundu. [9]



Obrázek 7 : Přenos hlasu v sítích GSM [9]

V GSM se používají různé algoritmy kódování dle toho, zda je přenášen zdigitalizovaný lidský hlas nebo data. V případě hlasu se používá konvoluční kódování, toto k přenášeným datům přidává určitou míru redundance a dovoluje příjemci opravit některé chyby vzniklé při přenosu. Důsledkem toho se zvětšuje objemu dat, která je třeba přenést – ze vzorku o velikosti 260 bitů, který je generován každých 20 milisekund, se po tomto zakódování stává vzorek o velikosti 456 bitů (stále generovaný každých 20 milisekund). Za 120 milisekund je tak vygenerováno 6×456 bitů = 2736 bitů. To je přesně tolik, kolik obsahuje jeden slot v celém multirámci. Tedy také ze 13 kbit/s dat se stává 22,8 kbit/s, který plně vytíží přenosové schopnosti GSM kanálů. [9]

2.8 GSM 1800 MHz – úvod, kmitočtová pásma

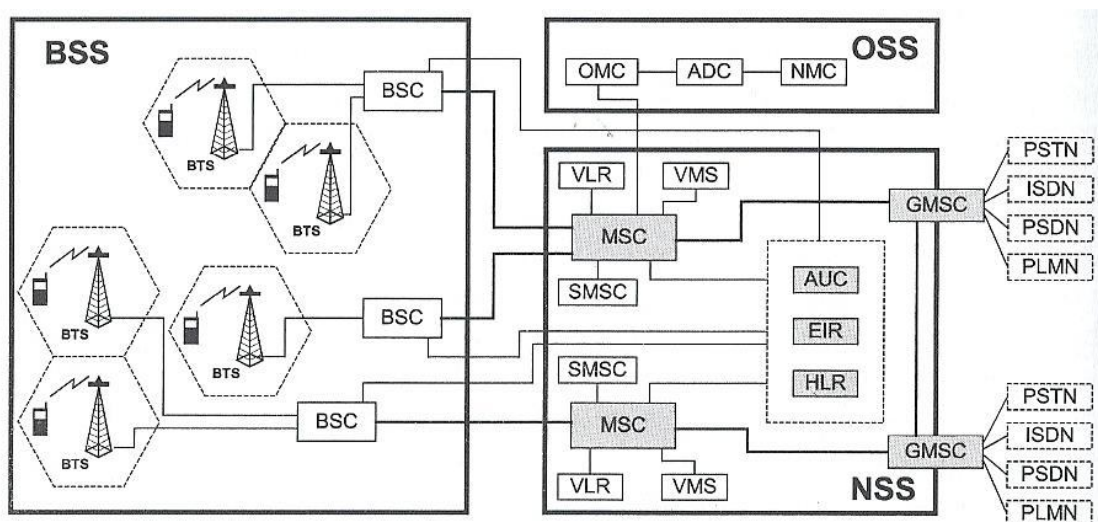
S nárůstem počtu uživatelů mobilního systému GSM bylo patrné, že kapacita systému dříve nebo později přestane stačit. V první fázi se problém nedostatečné kapacity neřešil přímo přechodem na další kmitočtové pásmo. Nejdříve se přikročilo k zvětšení systému GSM. Obsáhlejší verze se označuje jako EGSM (Extended GSM) a je od původního systému odlišná v tom, že dokrojením z oddělovacích pásem mezi směry uplink a downlink jsou získány navíc další uživatelské kanály. Tímto vylepšením získal systém k dobru jen padesát rádiových kanálů, to představuje zvýšení kapacity na 1392 uživatelských kanálů v jedné buče – původně $124 \times 8 = 992$, nyní $(124+50) \times 124 = 1392$. S přihlédnutím k poptávce o GSM bylo však patrné, že se jedná jen o dočasné řešení. Problém se poptávkou o GSM vyřešilo další frekvenční pásmo. Systém GSM 1800 je ve většině zásadních hledisek shodný s původní verzí. Používá stejné zpracování signálu i stejnou síťovou architekturu. Odlišnosti se týkají pouze několika zásadních vlastností, tyto více či méně souvisejí s vyššími použitými kmitočty. [40]

Základní výhodou systému GSM 1800 je podstatně vyšší kapacita, pokud se jedná o počet možných uživatelů. GSM 1800 používá kmitočtové pásmo 1710 MHz až 1785 MHz pro uplink (směr od telefonu k základně) a 1805 MHz až 1880 MHz pro downlink (směr od základny k telefonu). Kmitočtové pásmo šířky 75 MHz, toto může být rozděleno na uživatelské kanály, je v porovnání s původním pásmem PGSM trojnásobné. Uživatelské kanály jsou co do struktury a organizace totožné u obou verzí systému. Kapacita GSM 1800 je při osmi time slotech na rádiový kanál až 2992 nezávislých uživatelských kanálech. U systému GSM 900 (základní verze PGSM) je to 992 účastnických kanálů. Celková kapacita GSM 1800 je tedy zhruba trojnásobná oproti verzi PGSM, toto je zvýšení velice výrazné. Navíc plošná struktura systému GSM 1800 využívá buněk o menších poloměrech (v principu polovičních). Je to způsobeno jinými vlastnostmi signálu na vyšší frekvenci, pokud jde o šíření vzduchem (menší dosah vlivem útlumu). Menší buňky umožňují na stejné ploše častěji opakovat frekvenční pásma, která jsou přidělena buňkám. Tím se zvýší počet kanálů na jednotku plochy. Kanálem se tedy rozumí dvojice shodující se frekvencí uplink + downlink, na kterých probíhá komunikace mezi konkrétní BTS a konkrétním mobilním telefonem. Číslovány jsou 0-124 (GSM 900) a 512-885 (GSM 1800). [50]

System GSM tedy používá dvě kmitočtová pásma. Mobilní telefony, které pracují s oběma kmitočtovými pásmy, se nazývají jako duální. Dnes se začínáme setkávat s mobily, které jsou triální (jedná se o typ telefonu, který je kompatibilní ve třech pásmech – GSM 900/1800 a 1900 + případné UMTS 2100 MHz). Nyní se také objevují telefony pro čtyři kmitočtová pásma, tzv. kvadrální – GSM 900/1800, 850 a 1900 + UMTS 2100 MHz. [60]

2.9 Architektura sítě GSM

Složení sítě GSM lze dělit na tři základní části: subsystém základnových stanic BSS (Base Station Subsystem), síťový a spínací subsystém NSS (Network and Switching Subsystem) a operační a podpůrný subsystém OSS (Operation and Support Subsystem). Podrobné schéma architektury systému GSM je na následujícím obr. 8.



Obrázek 8 : Architektura sítě GSM [5]

2.9.1 Subsystém základnových stanic BSS (Base Station Subsystem)

Základním prvkem mobilní sítě je tedy rádiová buňka. Ta zahrnuje území o průměru přibližně 6 km. Každá buňka je osazena jedním nebo více transceivery (vysílač + přijímač + řídicí logická jednotka), které jsou umístěny na základnové stanici BTS (Base transceiver Station, základnová vysílací stanice)). V některých případech se tato základnová stanice označuje jako BS (Base Station). BTS můžeme nalézt na komínech, domech, na televizních vysílačích nebo na vlastních stožárech. Když se rozhlédnete po střechách domů (obzvláště paneláků), tak je najdete. Jsou to svislé bílé desky s nejobvyklejším úhlem vyzařování 120° a proto bývá anténní systém BTS nejčastěji složen ze tří antén,

čímž pokrývá celých 360°. Jsou to tzv. třísektorové BTS. Mohou se samozřejmě vyskytovat i dvousektorové s vyzařovacím úhlem antén 180° nebo jednosektorové buňky se směrovou anténou, použitou spíše pro doladění sítě v místech, kde je vysoké zatížení sítě, nebo s jednou tyčovou všesměrovou anténou. Antén někdy bývá dvojnásobný počet, např. třísektorová BTS má šest antén. Jsou v párech a každý pár směřuje jedním směrem (antény v páru bývají od sebe vzdáleny 3-4 metry, aby se neovlivňovaly). Důvod je jednoduchý: jedna je pro vysílání a druhá je pro příjem. Zajišťuje to kvalitnější pokrytí území signálem. Na BTS můžeme nalézt ještě jeden typ antény – kruhovou parabolickou anténu mikrovlnného spojení (většinou s krytem). Ta je používána k bezdrátovému propojení BTS s vlastní sítí. [70]

V případech, kdy je signál vysílán do všech směrů, mluvíme o všesměrové buňce, jejíž velikost je dána vysílacím výkonem vysílače. U sítě GSM se využívá obsluha třísektorových buněk z jedné BTS, která je osazena alespoň třemi transceivery vysílajícími do tří směrů. Použitím více transceiverů pracujících na různých kanálech se tedy zvyšuje kapacita buňky.

Systém těchto buněk umožňuje pokrýt celé požadované území signálem o potřebném výkonu. Jejich úkolem je komunikovat s mobilními telefony, které se právě nacházejí uvnitř příslušné buňky, a to na frekvencích, které jsou příslušné buňce přiděleny. V případě, že se mobilní telefon pohybuje (chůze, jízda autem) a přemístí se z jedné buňky do druhé, základnové stanice to poznají a komunikaci se zařízením si mezi sebou předají – dojde k předání, tzv. Handoveru. [80]

Jednotlivé základnové stanice musí být tedy mezi sebou propojeny a společně řízeny. V praxi obvykle několik z nich (12-30) sdílí společnou řídicí jednotku, která je označena jako řídicí stanice základnových stanic BSC (Base Station Controller), která má za úkol údržbu hovorů, jejich přepínání optimální buňky (tzv. handover) a optimalizaci výkonu mobilní stanice a základnové stanice tak, aby nedocházelo ke zbytečnému rušení a vybíjení baterií. V tomto systému dochází k neustálému kontrolování kvality přenosu hovorů. Je-li v některém volném kanále zjištěna lepší přenosová cesta, je do tohoto kanálu automaticky přepnut hovor z horšího kanálu. Struktura tohoto subsystému je znázorněna na obr. 8.

2.9.2 Síťový a spínací subsystém – NSS (Network and Switching Subsystem)

Soustava všech základnových stanic mobilní sítě je skrze své řídicí jednotky napojena na centrální ústřednu. Srdcem celého systému je soustava ústředen pro mobilní spojení

MSC (Mobile Switching Center), které zabezpečují nastavování, směrování, řízení, a ukončování hovorů, handover mezi MSC, doplňkové služby a přenos informací mezi MSC. Můžeme si ji představit jako analogii klasické telefonní ústředny u pevné sítě. Tato ústředna prostřednictvím tranzitní ústředny GMSC (Gateway Mobile Switching Center) dále umožňuje spojení sítě GSM s jinými sítěmi:

- PSTN (Public Switched Telephone Network) – veřejná komutovaná telefonní síť
- ISDN (Integrated Services Digital Network) – digitální síť s integrovanými službami
- PSDN (Packet Switched Data Network) – síť určená k přenosu dat založená na principu přepojování paketů (packet switching)
- PLMN (Public Land Mobile Network) – pozemní mobilní telekomunikační síť

V mobilní síti však musí být vzhledem k předpokládanému neustálému pohybu účastníků někde vedena evidence uživatelů příslušné sítě, eventuálně jejich návštěvníků (v rámci roamingu). Musí být též jednoznačně zřejmé, kde se kvůli vytvoření spojení příslušný účastník nachází (v které BSC). K tomu účelu slouží databáze, konkrétně domovský lokalizační registr HLR (Home Location Register). Je to databáze operátora, ve které jsou uložena data všech jeho uživatelů, jejich identifikační čísla IMSI (International Mobile Subscriber Identity), jejich MSISDN čísla služeb a momentální lokace sítě GSM. Ta je v podstatě analogií telefonní ústředny pevné sítě. NSS řídí komunikaci mezi uživateli sítě GSM a účastníky jiných telekomunikačních sítí. Z jedné strany je tedy napojen na stanice BSS a z druhé strany na všechny dostupné externí sítě, do nichž daná síť GSM umožňuje přístup. Přístup mezi těmito dvěma množinami sítí řídí mobilní spínací ústředna (MSC). Ta je obvykle uzpůsobena k zajištění provozu v dané oblasti (např. ve větším městě). Od klasických telefonních ústředen se NSS liší tzv. identifikačními bázemi. [90] Ty jsou nutné z důvodu mobility uživatelů sítě GSM. Existují tři typy identifikačních bází :

- domovský lokalizační registr (HLR) – databáze uschovávající všechny důležité informace o všech účastnících příslušejících do oblasti této HLR (povětšinou je v místě kde si uživatel koupil SIM kartu). Jsou zde obsaženy informace o předplacených službách, na něž má uživatel nárok, a tato databáze je kontrolována vždy, když o využití nějaké této služby uživatel požádá. Každý účastník je vždy registrován jen v jedné bázi HLR, aby se předešlo nežádoucím

chybám vyplývajícím z nesynchronizovaných údajů. Proto mohou ostatní ústředny systému MSC přistupovat do bází HLR ostatním MSC ústředn. Součástí báze HLR je i centrum autentičnosti (AUC), které zabezpečuje ochranu proti zneužití systému GSM (není to jediné opatření). I AUC je přístupné z ostatních MSC. [100]

- návštěvnický lokační registr (VLR, Visitor Location Register) – opět je většinou součástí každé ústředny MSC. V tomto registru jsou uloženy aktuální informace o mobilních účastnících, kteří se právě pohybují v oblasti spravované příslušnou MSC. V okamžiku, kdy účastník opustí danou oblast, jsou tato data zrušena. Důležité přitom je, že zde nejsou nikdy měněna, veškerá aktualizace dat je přípustná jen směrem od HLR k VLR, nikoliv naopak. VLR tedy vyžaduje data z domovského HLR účastníka, který vstoupil na území spravované danou MSC ústřednou.
- Registr mobilních stanic (EIR, Equipment Identity Register) - zaznamenává výhradně data, která se týkají mobilních stanic. V této databázi je každá oprávněná mobilní stanice registrována pod svým kódem IMEI (International Mobile Equipment Identity). Každý mobilní telefon, který komunikuje se sítí GSM má 15timístné číslo IMEI. Toto číslo musí být a je jedinečné na celém světě a nelze ho změnit. Struktura kódu schváleného typu (šest míst) + závěrečný montážní kód (dvě místa) + sériové číslo (šest míst) + rezervní číslo (jedno místo). Takže pokud někdo nějaký telefon ukradne, IMEI už nezjistí. Proto není možné, aby se z ukradeného telefonu mohlo v rámci celé sítě GSM telefonovat, a to zapsáním IMEI ukradeného telefonu na tzv. black list, který je podřízený pod EIR. [110]

Jakýkoliv vstup účastníka do sítě se uskutečňuje přes ověřovací centrum pro povolení přístupu AUC (Authentication Centre), které vytváří a ověřuje pomocí speciálních algoritmů z čísla IMSI a 4.číslo Ki (Authentication Key), uložených na SIM kartě a v HLR, triplety ověřovacích čísel RAND (Random Number), Kc (Cipher Key) a SRES (Signed Result). Pokud čísla odvozená z údajů na účastnické kartě odpovídají datům uložených v AUC, pak je uživateli povolen přístup do sítě.

Jak je patrné z obr. 8, subsystém NSS obsahuje dále jednotky:

- SMSC (Short Message Service Center) – služba, která umožňuje provozovat SMS služby nebo uskutečnit akce s hromadnou SMS komunikací (např. reklamní kampaně či spotřebitelské soutěže), které osloví velké množství uživatelů

v krátkém časovém intervalu. Tímto způsobem může zákazník odesílat nebo přijímat velmi vysoký počet SMS zpráv s vysokou spolehlivostí a garantovanou kapacitou.

- VMS (Virtual Managed Server) – služba, která je určena pro všechny uživatele, kterýmž již nevyhovuje běžný webhosting. VMS umožní provoz většího počtu domén na vyhrazeném serveru s garantovaným výkonem a dostupností. [120]

2.9.3 Operační a podpůrný subsystém – OSS (Operation and Support Subsystem)

Jedná se o část systému GSM, která má na starosti provoz a údržbu celého systému. Dále zajišťuje záležitosti finančního charakteru (tarifikace uživatelů sítě, evidence plateb apod.).

Tento subsystém se skládá ze tří podsystémů:

- provozní a servisní centrum (OMC, Operations and Maintenance Centre – řídí provoz a provádí údržbu technického zázemí ostatních subsystémů sítě GSM (NSS a BSS).
- centrum managementu sítě (NMC, Network Management Centre) – podílí se na správě mobilních stanic (monitoruje je, zjišťuje poruchy atd.) Zajišťuje celkové řízení toku informací v síti.
- Administrativní centrum (ADC, Administrative Centre) – podílí se na správě a managementu účastníků sítě GSM. Sleduje registrace, tarifování, placení účtů atd. [130]

2.10 Identifikační modul uživatele

SIMSIM (Subscriber Identity Module) je v podstatě mikroprocesorový čip, který umožňuje aktivaci mobilní stanice a nese nutné informace pro identifikace uživatele (IMSI číslo a Ki klíč) a další data umožňující uživateli vstup do sítě, vyhledání domácí sítě, vstup do dalších sítí, volbu jazyka uživatele a seznam služeb poskytovaných vlastní mobilní stanicí i operátorem GSM sítě. [9]

Data jsou uspořádána do adresářů jako u PC. V hlavním adresáři je vlastní identifikace SIM karty, podřazené adresáře jsou:

- adresář GSM (obsahuje informace o přístupu ke službám sítě GSM)
- adresář Telecom (obsahuje některé společné informace pro síť GSM a pevnou síť)

Na SIM kartu může uživatel ukládat vlastní data, nejčastěji volaná čísla, zkrácené volby, vstupy do sítí PLMN, zprávy SMS, provolaný čas atd.

Karty jsou dvojího formátu (velikosti), a to buď normální velikost, tzv. SIM CARD nebo ID-1, která odpovídá velikosti běžných telefonních nebo kreditních karet standardu ISO 7816, a používá se tehdy, chceme-li ji přenášet mezi různými mobilními terminály. Druhý typ zahrnuje v podstatě pouze vlastní čip o rozměrech 25x25 mm, nazývá se PLUG IN SIM a používá se u trvalých instalací do terminálu. [9]

Karta je uzamčena proti neoprávněnému používání pomocí PIN kódu, který je možno měnit (doporučuje se) nebo odstranit (nedoporučuje se).

Nejdůležitější informací, kterou nese SIM karta, je tzv. IMSI číslo (International Mobile Subscriber Identity), které se používá k identifikaci uživatele uvnitř sítě a umožňuje mu i případný vstup do dalších sítí. Je uloženo v domácí uživatelské databázi HLR. Na základě tohoto čísla AUC povolí uživateli vstup a využití služeb sítí GSM. [9]

2.11 Lokace účastníka

Aby nebyl problém s plynulým předáváním dat po síti a vždy a všude byl zabezpečen přístup uživatele, je proto síť rozdělena na jednotlivé oblasti výskytu LA (Location Area).

Tyto oblasti jsou řízeny příslušnými BSC a jejich identifikace LAI (location Area Identification) je uložena v registru VLR u nadřazeného MSC. Na stejném principu je založen i systém identifikace buněk CI (Cell Identification).

Ihned po tom, co mobilní stanice při vstupu do určité oblasti přijme signál LAI, posílá opětovné hlášení lokální registrace účastníka LR (Local Registration), v příslušném registru VLR je uložena jeho aktuální pozice a poslána do domovské sítě jako hlášení Location Updating. Toto hlášení přijme domovský registr HLR, který opětovně zašle údaje o účastníkovi do nového aktuálního VLR oblasti, ve které se aktuálně uživatel nachází (Insert Subscriber Data) a údaje ve „starém“ VLR jsou zrušeny (Location Cancellation). Uživatel má nyní novou lokaci. Tomuto procesu, kdy se přepíše stará lokace a zaznamenává nová do aktuálního VLR registru a domovského HLR registru, se říká roaming. [141]

2.12 Identifikace účastníka a jeho vyhledávání

Aby byla zajištěna diskrétnost údajů o uživateli a jeho lokaci se v systému nepřenáší vzduchem mezinárodní účastnické identifikační číslo IMSI, ale slouží jen k vnitřní komunikaci v síti a je uloženo v domovském lokalizačním registru (HLR) a na SIM kartě uživatele. Taktéž je uloženo v aktuálním lokalizačním registru návštěvníků (VLR), tam je přepisováno při každém roamingu a pracuje s ním ověřovací centrum pro povolení přístupu (AUC). [151]

Pro volání účastníka z veřejných telefonních sítí, datových sítí a k vlastnímu přístupu účastníka k povoleným službám slouží mezinárodní ISDN číslo mobilní stanice MSISDN (Mobile International ISDN Number), jež je pro každou službu jiné, tedy jeden uživatel může mít více MSISDN čísel.

K vyhledávání účastníka v síti slouží roamingové číslo mobilní stanice MSRN (mobile Station Roaming Number), které je vytvořeno AUC z identifikace oblasti výskytu (LAI) a vysíláno aktuálním lokalizačním registrem návštěvníků (VLR) po síti. Je to náhodné číslo, jež není možné napadnout zvenčí.

Dodatek :

Jakmile začnete volat z mobilního telefonu, mobilní systém se pokouší zjistit, zda jste opravdu tím, za koho se vydáváte. Spustí se proces autentifikace, který využívá systém Challenge-Response (výzva-odpověď). Autentifikační centrum (AUC) nejdříve vygeneruje náhodné 128bitové číslo (RAND) a pošle na váš mobilní telefon. Ten vypočítá 32bitovou odpověď (SRES) na základě kombinace přijatého RAND, autentifikačního algoritmu A3 a autentifikačního klíče Ki a odešle odpověď zpět do AUC, to provede stejný výpočet a srovná jej se SRES od Vašeho mobilního telefonu. Pokud jsou výsledky totožné, je telefon autentifikován a je mu povoleno pracovat v síti. V opačném případě je mobilní telefon informován o chybě a spojení je přerušeno. Mimochodem, rušení v rádiu či na monitoru, kterého jste si možná před vyzváněním telefonu všimli, je způsobeno procesem navazování spojení (autentifikací). Neprojevuje se při vlastním telefonováním.

2.13 Přenos dat v systému GSM

2.13.1 CSD (Circuit Switched Data) - přepojování okruhů

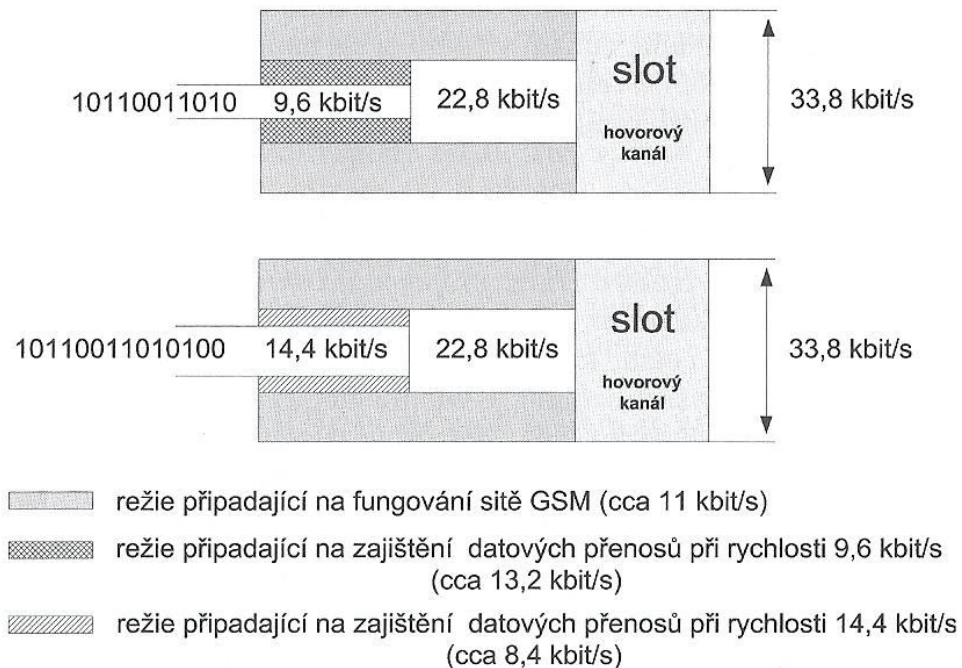
CSD byla první technologií přenosu dat, kterou využívaly mobilní sítě GSM. Při přenosu se používala stejná cesta, jako pro přenos hlasu. Chceme-li správně pochopit podstatu této technologie, je vhodné nejprve pochopit fungování hlasových přenosů v sítích GSM. Přenosové (frekvenční) kanály, které mají operátoři sítí GSM k dispozici, jsou rozděleny pomocí techniky časového multiplexu na tzv. sloty (časové úseky), tyto se pravidelně opakují. Po odečtení režie, která připadá na fungování GSM sítě jako takové, je každý slot schopen přenášet data rychlostí 22,8 kbit/s. Tuto rychlost však nelze plně využít pro přenos užitečných dat koncovými uživateli. Dále je nutné vzít v úvahu režii připadající na zajištění přenosů, především na kódování dat a ochranu proti chybám. Standardně po odečtení této režie je možné použít pro užitečná data jen 9,6kbit/s. To je také běžná přenosová rychlost pro první datové přenosy v rámci GSM. [162]

V praxi se ukázalo, že datové přenosy není potřeba kódovat tak důkladně jako hlas, proto se mohla přenosová rychlost zvýšit až na 14,4 kbit/s. To je už srovnatelné s nejpomalejšími analogovými modemy. Současně to ale klade vyšší požadavky na kvalitu signálu. Tato přenosová rychlost je již maximum v případě, kdy využíváme pro přenos dat jeden slot – tedy podobně jako při hlasových hovorech, pro které byla síť původně budována. Při zachování celkového způsobu fungování GSM sítě, a jejího rozdělení na sloty, vede cesta k dalšímu zrychlování jen přes současné použití více slotů. [172]

2.13.2 HSCSD (High Speed Circuit Switched Data)

Principem HSCSD je právě to, že se komunikující dvojici přidělí více slotů současně, a to po celou dobu existence jejich vzájemného spojení. HSCSD využívá maximálně čtyři sloty současně a umožňuje rychlost kolem 40 kbit/s. Zachovává vlastnosti prvotního způsobu přenosu dat (na principu přepojování okruhů) a přináší několikanásobné zrychlení. Umožňuje rovněž pracovat s asymetrickými přenosy: přenos směrem k uživateli může být rychlejší než přenos opačným směrem. Na straně zákazníka je potřeba mít mobilní terminál podporující tuto rychlost. [183]

Předností této technologie je to, že zaručuje uživateli jistou přenosovou kapacitu, nevýhodou je to, že zabírá místo pro telefonní hovory. Z našich operátorů poskytuje tento způsob přenosu dat jen O₂.



Obrázek 9 : Datové přenosy CSD a HSCSD v GSM sítích o rychlosti 9,6 kbit/s a 14,4 kbit/s

2.13.3 Technologie GPRS (General Packet Radio Service)

PPřipojení k Internetu pomocí sítě GSM je uskutečněno dvěma způsoby – GPRS a HSCSD. GPRS je technologie určená pro přenos dat v mobilních sítích GSM. Je označována jako „2,5“, tzn. Technologie mezi druhou (2G) a třetí (3G) generací mobilních telefonů. [4]

Technologie GPRS je datová komunikace využívající podstatu spojování paketů (česky balíčků), které vzniknou rozdělením datového toku na malé části, které nesou samotnou informaci.

Většina současných datových přenosů v GSM probíhá tak, že jsou z telefonu nebo jiného terminálu data převáděna jako souvislý řetězec bitů vkládaných do jednotlivých time slotů putující do BSS, MSC a poté do vnější sítě (např. Internetu). Máte tedy pro svoji potřebu vyhrazený jakýsi okruh (jednu cestu), po kterém jsou data posílána.

Nevýhodou takových způsobů přenosů je dlouhá doba při čekání na spojení, malá rychlost přenosu dat (prakticky se využívaly volné time sloty) ale zejména to, že uživatel platí za čas připojení k síti a ne za objem přenesených dat. [4]

Doposud všechny stávající technologie pro přenos dat v GSM fungovaly na principu přepojování okruhů, GPRS funguje na principu přepojování paketů. Proto technologie GPRS vyžaduje poměrně značný zásah do existující mobilní sítě. Nasazení GPRS není levná záležitost, neboť již existující síť GSM musí projít určitou modernizací, které se v principu dotýká všech jejích částí. Mezi nové části patří zejména uzly SGSN a GGSN, dále směrovače paketů, name servery – servery pro službu DNS (Domain Name Systém), tato převádí doménové adresy na číselnou adresu a naopak. Tyto servery jsou nepostradatelné pro provoz všech uživatelských služeb Internetu. Je-li využita doménová adresa pro určení cíle nějakého přenosu (např. e-mailová adresa pro zaslání dopisu, URL pro získání dokumentu apod.), musí být domain name serverem přeložena do skutečné číselné adresy. Teprve poté následuje další sled kroků směřujících k vyřízení požadavku uživatele. Další novou částí jsou firewalls (chrání před nebezpečím z Internetu – filtr datových paketů, IP adres a webů) a další. [4]

Nová síť, která musí být „přeložena“ přes stávající síť, je tvořena dvěma novými druhy uzlů:

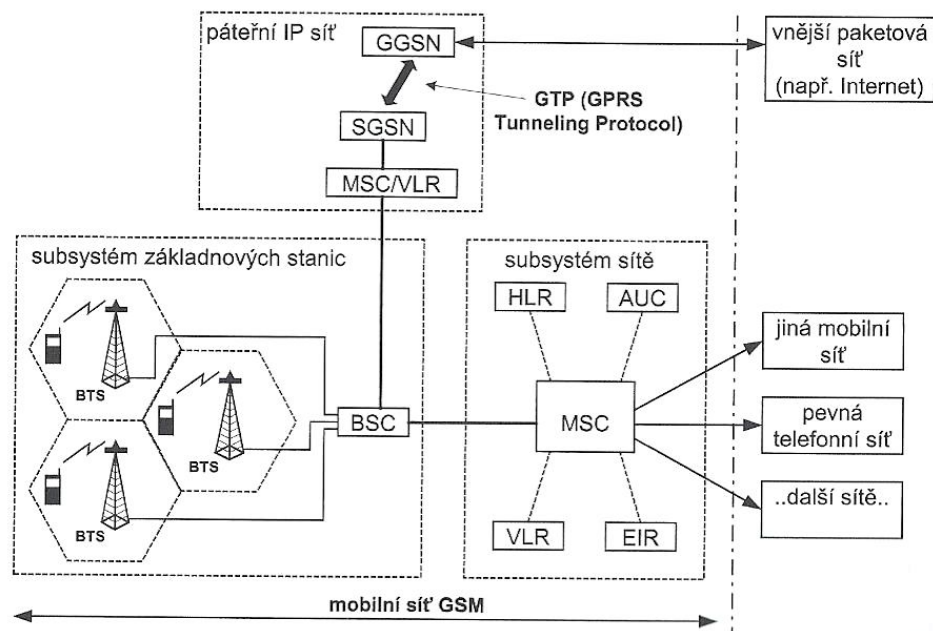
- uzly SGSN (Serving GPRS Support Node)
- uzly GGSN (Gateway GPRS Support Node)

Uzly SGSN si lze představit jako určité obdoby ústředěn MSC v původní síti. Mají na starosti doručování z/do terminálů v okruhu své působnosti, ale již jde o paketová data a ne zdigitalizovaný lidský hlas, přenášený na principu přepojování okruhů. Uzly SGSN jsou napojeny na základnové stanice (BTS) přes jejich radiče (respektive řídicí jednotky BSC), pomocí kterých je zajištěn přenos dat. Kromě toho, ale musí být vždy schopné zjistit, kde se příslušný terminál nachází, ověřit jeho pravost, zajistit řádné účtování za poskytnuté služby atd. [4]

Proto plní i další funkce spojené se získáváním informací tohoto typu (musí mít tedy mj. i přístup k některým registrům, např. HLR).

Uzly GGSN poskytují rozhraní mezi GPRS sítí a externími sítěmi pracujícími podle standardu IP (Internet Protocol, jedná se o nejpoužívanější protokol pro komunikaci v počítačových sítích a Internetu). Zajišťuje funkci brány mezi GSM a vnějšími sítěmi. V GGSN jsou také obsaženy funkce tzv. mobility managementu a plní rovněž funkci tzv. přístupového serveru. Z pohledu vnějších sítí je GGSN prvkem vlastním všechny IP adresy všech přihlášených uživatelů do sítě GPRS. Dalšími možnostmi GGSN je např.

směrování paketů na správný uzel SGSN nebo konverze protokolů mezi GPRS a vnějšími sítěmi. [4]



Obrázek 10 : Přenos dat v síti GSM pomocí GPRS [5]

V BTS (Base Transceiver System) jsou obsaženy nové protokoly podporující paketový přenos přes vzdušné rozhraní a funkce pro přidělování time slotů a kanálů (resource allocation)- BSC (Base Station Controller) které obsahují nové funkce pro kontrolu paketů. Tuto kontrolu má na starosti PCU (Packet Control Unit). Dále jsou tu nové GPRS funkce tzv. mobility managementu, které se týkají např. lokalizace, autentizace atd. Mezi BSC a SGSN je také nové provozní a signalizační rozhraní MSC/VLR (Mobile Switching Centre/Visitor Location Register). Toto rozhraní slouží ke koordinaci signalizace pro mobilní stanice, které jsou schopné používat oba druhy spojování (paketů i okruhů). [4]

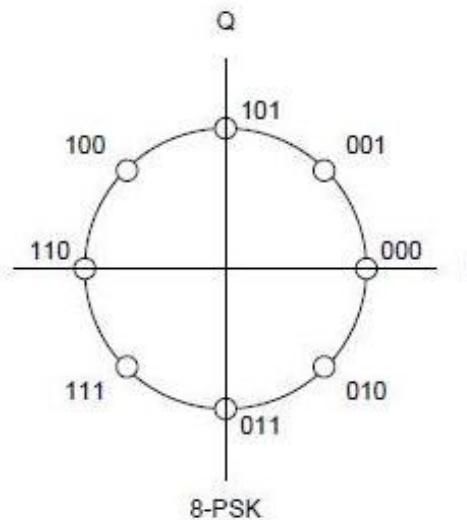
Rychlost spojení závisí na typu telefonu (jeho třídě GPRS), použitém schématu kódování, kvalitě signálu a momentálním zatížením sítě. Průměrná rychlost se pohybuje kolem 40 kbit/s. Maximální současná teoretická rychlost je 171,2 kbit/s.

Mobilní terminál, který chce používat služby GPRS, se musí nejprve zaevidovat do sítě u jejího SGSN uzlu, konkrétně provést tzv. GPRS attach. V rámci něj síť zjistí, zda uživatel terminálu má právo na požadované služby, ověří si jeho profil z HLR do SGSN a přiřadí terminálu dočasný paketový identifikátor (P-TMSI). V případě, že terminál

chce komunikovat s jiným uzlem v některé z externích datových sítí (tj. mimo danou mobilní síť), musí navíc získat i adresu přiřazenou této síti tak, aby se druhému účastníkovi jevil jako účastník jeho sítě s určitou konkrétní adresou. Jako příklad si uvedeme připojení k Internetu. Terminál musí získat vhodnou IP adresu (jako síťovou adresu používanou v Internetu). Tato adresa přitom může být přidělována buď staticky (tj. pokaždé stejná), nebo dynamicky (pokaždé jiná, záleží na momentální dostupnosti). Dále musí terminál získat tzv. PDP kontext (Packet Data Protocol Context), jehož součástí je mimo samotné adresy také adresa GGSN uzlu, ten slouží nejen jako brána do vnější sítě, ale tak jako specifikace dohodnuté [4] kvality služeb (QoA). Tento PDP kontext, který uzel získává při operaci GPRS attach, musí být ještě tzv. aktivován (jakoby naplněn) a právě touto aktivací se dotýčný terminál stává viditelným z vnější datové sítě a schopný komunikace s ní. V zásadě lze říci, že se stává plnohodnotným uzlem příslušné vnější sítě (např. Internetu) a jeho postavení se nijak principiálně neliší od postavení ostatních uzlů této sítě. Podmínkou je to, že mobilní terminál je stále mobilní, tj. může se libovolně pohybovat v dosahu mobilní sítě (a jeho mobilitu pokrývají uzly SGSN tak, že se tento pohyb na jeho schopnosti komunikovat s vnější sítí vůbec neprojevoval). [4]

2.13.4 Technologie EDGE a její modulace

EDGE (vylepšená propustnost pro globální evoluci) je jedna z novějších technologií mobilního připojení. Vznikla zlepšením technologie GPRS, ze které pochází a se kterou také souběžně spolupracuje. Umožňuje dosáhnout hospodárného přenosu dat a vysoké spektrální účinnosti v tomto úzkopásmovém buňkovém systému. Hlavní vylepšení spočívá v použití modulace 8-PSK (osmistavová fázová modulace), která umožňuje přenést tři informační bity pomocí jednoho symbolu na rádiové vrstvě. Naproti tomu, modulace GMSK, která je použita u GSM/GPRS, umožňuje přenést pouze jeden bit na jeden symbol na rádiové vrstvě. Dosahuje vyšších rychlostí stahování než GPRS – až 180 kbit/s (teoreticky až 250 kbit/s). Skutečná rychlost je však odvislá na vzdálenosti od základnové stanice a na jejím vytížení. Čím lepší je příjem, tím lepší se použije tzv. kódovací schéma, a čím méně je základnová stanice vytížena, tím více se může zabrat vysílacích kanálů (tzv. time slotů) a tím vyšší je i možná rychlost připojení. Kdykoliv budete používat datové připojení, telefon sám najde nejrychlejší možnost, tzn. nejvyšší možné kódovací schéma EDGE. Pokud to není dostupné, pak použije GPRS. Uživatel vyjma jiné rychlosti (a u některých telefonů i jiné ikonky na displeji) ani nepozná, co v ten daný okamžik používá. [191]



Obrázek 11 : Modulace 8-PSK [8]

2.14 Služby systému GSM

- Základní telefonní služby – jedná se o standardní služby umožňující spojení uživatele se všemi mobilními i pevnými sítěmi, domácími i mezinárodními.
- Tísňová volání – nejsou závislá na tom, zda byla do mobilního terminálu vložena SIM karta, a jsou aktivována přes standardní tísňové číslo 112.
- Přesměrování hovoru – umožňuje jednoduchou volbou směřovat všechny příchozí hovory na jakékoliv číslo mobilního i pevného telefonu, například na linku asistentky či na domácí telefonní číslo. [5]
- Blokování hovorů – zamezení příchozích a odchozích hovorů v zahraničí. V případě, že se účastník nachází na území operátora systému GSM v jiné zemi, dá se touto službou zamezit přijímání hovorů, které jsou účtovány jako volání mimo ČR (volající platí v tomto případě taxu, kterou by platil, kdyby volal v naší republice, volaný pak doplatí rozdíl mezi cenou naší a cizího státu. [5]
- Oddálení hovoru - pokud uživatel nemůže okamžitě hovor přijmout (jednání se zákazníkem, jednání u soudu, apod.), je k dispozici záznamová služba pro nepřetržitý příjem hovorů a záznam vzkazů volajících. Zprávy se ukládají do záznamové schránky na ústředně společnosti Eurotel pod bezpečnostním kódem. Ten zajišťuje absolutní diskretnost zpráv a brání vstupu nepovolaných osob do schránky. Přesměrování na záznamovou službu je možno volit jako okamžité

nebo podmíněné. Záznamová služba pak automaticky informuje uživatele o uložených zprávách. [5]

- Signalizace příchozího hovoru – upozorňuje na nový příchozí hovor během probíhajícího hovoru účastníka. V tom případě je možné se přepojit na nový příchozí hovor a díky službě přidržení spojení není potřeba skončit původní hovor. Pomocí této služby se lze střídavě propojovat se dvěma účastníky. [5]
- Konferenční hovor – umožňuje zapojení až šesti účastníků, kteří mohou být přizváni volající stranou. Tato služba přináší podstatnou výhodu v tom, že účastníci spolu mohou hovořit, jako by seděli společně u jednoho stolu. [5]
- Identifikace volajícího – na displeji mobilního telefonu se zobrazí číslo volaného.
- Služba roaming – je to jedna z nejpodstatnějších výhod systému GSM. Na základě propojovacích dohod s operátory GSM v jiných zemích může majitel mobilního telefonu GSM bez omezení volat, být volán a využít služeb celulárního systému i v jiných zemích. Telefon se automaticky přihlásí do místní sítě a její název se zobrazí na displeji. [5]
- Služba krátkých zpráv (SMS) – umožňují účastníkům systému přenášet z do bodu, tedy adresně, krátká sdělení nepřesahující 256 alfanumerických znaků. Sdělení mohou být zobrazena na displeji mobilní stanice, případně zaznamenána apod. S uvedenou službou souvisí také služba rozhlasového vysílání krátkých buňkových zpráv – její náplní mohou být např. zprávy o nových službách v dané síti, o soutěžích v oblasti, o počasí apod. [5]
- MMS pohlednice – pomocí mobilního telefonu s vestavěným digitálním fotoaparátem (mobil s podporou MMS a s aktivovanou službou MMS) můžeme poslat známému digitální fotografii např. z dovolené. To můžeme provést třemi způsoby. V první řadě má on sám mobilní telefon s podporou MMS. Dále ji můžeme poslat přes Internet na jeho PC nebo notebook do jeho osobní schránky. V tom případě dostane prostřednictvím SMS oznámení s přístupovým heslem k výběru uložené MMS pohlednice. V posledním případě máme možnost poslat tuto MMS pohlednici do centrály v Praze, kde je zpracována do formátu klasického pohledu a pak je poslána prostřednictvím pošty na příslušnou adresu (spolu se zasláním MMS však musíme zaslat i příslušnou poštovní adresu adresáta, můžeme přidat i případný doprovodný text). [5]

- GSM banking – s touto službou mohou zákazníci určitých bankovních ústavů prostřednictvím svého mobilního telefonu zjišťovat zůstatek na svém účtu, zadávat platební příkazy a využívat další služby podle aktuální nabídky daného peněžního ústavu. Tato služba je aktivována SMS zprávou. Veškerá komunikace je šifrována a nikdo kromě zákazníka nebo banky k ní nemá přístup. Operace na účtu jsou chráněny osobním BPIN kódem, který se zadává při každém vstupu do aplikace.
- WAP – brána do světa informací, zpráv, zábavy a užitečných služeb v mobilním telefonu. Pomocí WaPu lze surfovat po vlnách virtuální informační sítě podobně jako na Internetu. [5]
- CELL info (informace o buňce) – jedná se o informace, které obsahuje pouze jedna z buněk. V těchto informacích, které dojdou na mobil pohybující se v dané buňce, je možné se dozvědět o nabídkách slev v příslušném supermarketu, nabídce menu motorestu u dálnice atd. [5]

3 IMT – 2000

3.1 Mobilní rádiové sítě 3G

Mobilní buňková síť, která je pokrytá rádiovým signálem, umožňuje pohyb mobilního koncového zařízení na území pokrytém buňkami. Původní mobilní buňkové sítě využívaly analogovou frekvenční modulaci a sloužily převážně k pokrytí území určitého státu (sítě 1. generace). U buněk 2generace se již jednalo o digitální technologii s úzkopásmovým časovým multiplexem. Tato síť je dnes nazývána jako globální. Zavedením tohoto typu sítě se výrazně zvětšila mobilita uživatelů, a v důsledku toho se stal systém GSM na začátku 90. let prvním digitálním standardem v Evropě. [9]

Síť GSM byla postupně vylepšována – byly přidávány nové bloky, které umožnily využívat nové služby (zasílání SMS zpráv, hlasová schránka). Dále došlo k začlenění inteligentní sítě (IN, Intelligent Network) do stávající struktury GSM. IN umožnila operátorovi zavést další nové služby – předplacené. [9]

Nedostatkem mobilních 2G sítí jsou jejich malé přenosové rychlosti při datových přenosech (9,6kbit/s). Snížením počtu zabezpečovacích bitů se zvýšila přenosová rychlost na 14,4 kbit/s na jednom logickém kanálu (HSCSD). Následným sdružením až 4 time slotů byl vytvořen kanál s přenosovou rychlostí 57,6 kbit/s. Dalším stupněm je technologie paketových přenosů GPRS, která navýšila rychlost až na 112 kbit/s. Technologie EDGE umožnila zvýšení přenosové rychlosti tím, že se využilo všech 8 time slotů až na hodnotu 384 kbit/s. Sítě 2. generace (2G) využívající technologie, které zvyšují přenosovou rychlost, bývají označovány jako sítě 2,5. generace. [9]

Jelikož systém GSM začínal zaostávat za celosvětovým trendem multimediální komunikace, pracuje ITU od roku 1986 na definici nového systému. Ten umožňuje celosvětový roaming založený na existenci jedné univerzální mobilní sítě, používající všude stejné frekvenční pásmo. Tento systém se celosvětově nazývá IMT-2000. Evropská verze těchto systémů (3G) se nazývá UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Předností tohoto systému mimo jiné, je již zmíněná vysoká rychlost přenosu dat a služeb, které podporují Internet. [9]

Zavedené systémy 2,5. generace umožnily snadný přechod na síť 3. generace, a to přidáním nového hardwaru do současné mobilní sítě. Přidala se tak nová bezdrátová přístupová metoda (CDMA) a operátorům to umožnilo zavést další služby. Tyto služby jsou založeny

na principu paketového přenosu po IP sítích. Sítě 3. generace byly implementovány do existujících sítí 2G. Mimo Japonska by nikde jinde na světě neměla existovat pouze síť 3G bez předchozí funkční sítě druhé generace. [9]

3.2 Požadavky na 3G

Definice a standardy 3G byly telekomunikační unií vytvářeny na základě následujících požadavků:

a) Požadavky uživatelů na služby:

- zvýšení kvality hlasových služeb (až na úroveň CD kvality)
- poskytování datových kanálů s přenosovou rychlostí až 2Mbit/s
- poskytování služeb paketových sítí
- možnost posílat multimediální zprávy a velké objemy dat
- jednotný přístupový bod ke službám
- nízká cena služeb
- možnost platby za množství přenesených dat a za kvalitu poskytnutých služeb [5]

b) Požadavky uživatelů na vlastnosti systému:

- vysoké zabezpečení proti odposlechu a proti neoprávněnému získávání dat třetí osobou
- národní a mezinárodní roaming (mobilita terminálů)
- uživatelská mobilita – možnost přístupu do sítě přes libovolný vhodný terminál (založené na použití účastnických karet, podobné jako SIM v GSM)
- jeden společný účet pro různé služby [5]

c) Požadavky uživatelů na terminály:

- malá hmotnost a relativně nízká cena
- snížení vysílacího výkonu mobilních terminálů
- zvýšení doby hovoru a pohotovostního režimu na jedno nabití baterie

- schopnost pracovat s různými rádiovými rozhraními (vícepásmové)
- integrace různých elektronických zařízení (multimediální telefon s kamerou a obrazovkou, fax, GPS atd.)
- stejné uživatelské prostředí nezávislé na síti a poloze terminálu [5]

d) Požadavky operátorů a výrobců na systém:

- efektivnost využití spektra
- flexibilita systému při implementaci nových služeb
- možnost evoluce ze systémů 2G
- obousměrná kompatibilita jednotlivých standardů 3G [5]

4 SYSTÉM UMTS

Hlavním cílem systému GSM byl přenos hovorového signálu a mezinárodní roaming. Systém UMTS je v porovnání s tím zaměřen na multimediální služby a vysokorychlostní datové přenosy. Prvotní myšlenkou sítě UMTS bylo poskytnout tuto službu tam, kde se soustřeďují potenciální zájemci, a to je hlavně ve velkých městech a v hustě obydlených oblastech. Podmínkou pro tento přechod je implementovaná technologie GSM/GPRS.

Oproti GSM/GPRS systém UMTS přináší pro uživatele mnoho vylepšení. Mezi hlavní z nich patří podpora několika aktivních služeb současně. Uživatel může mít např. spuštěnu videokonferenci a souběžně si ze serveru stahovat své e-maily. Vlastnosti spojení na rádiovém rozhraní (rychlost, zpoždění, chybovost atd.) mohou být sjednány a optimalizovány dle konkrétní služby. Z tohoto důvodu jsou UMTS specifikace obecnějšího charakteru, které umožní podporu současných služeb a usnadní implementace nových služeb. [9]

Pro mobilní síť 3. Generace byla zvolena na rádiovém rozhraní technologie CDMA (Code Division Multiple Access). Pro UMTS je použita varianta WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access, širokopásmová přístupová metoda). W-CDMA je evropsko-japonský 3G standard sítě mobilních telefonů. Je součástí uskupení 3G standardů ITU-2000. Definiuje jak terestrickou (pozemní), tak satelitní mobilní službu. Té pozemní se říká UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access). Satelitní se nazývá S-UMTS nebo též USRA.

Dodatek :

UMTS, zatímco W-CDMA je technický název naznačující, že jde o širokopásmové CDMA, tedy WideBand CDMA. V CDMA neexistuje žádné časové dělení a všichni uživatelé používají přidělené frekvenční pásmo po celou dobu komunikace. K rozpoznání různých uživatelů, kteří používají jedno frekvenční pásmo současně, se používá binární kód přidělený uživateli.

4.1 Buňka UMTS

Přístupová síť má stejně jako GSM buňkovou strukturu. Využívá 4 typy obsluhovaných oblastí :

- pikobuňka (picocell) - představuje nejmenší oblast, o poloměru 10-50m, která se používá obvykle uvnitř budov a poskytne přenosovou rychlost do 2 Mbit/s
- mikrobuňka (microcell) – o poloměru 300-500 m, uvnitř městské zástavby poskytne přenosovou rychlost do 384 kbit/s. Mikrobuňka o poloměru 2-4 km poskytne služby s přenosovou rychlostí do 144 kbit/s.
- makrobuňka (macrocell) – o poloměru 5-6 km v příměstské oblasti poskytne služby do 144 kbit/s. [9]

4.2 Kmitočtová pásma UMTS

UUMTS se rozděluje na dva základní typy, a to podle způsobu řešení duplexního provozu. Prvním, významně rozšířenějším typem je FDD (Frequency Division Duplex), kde je pro uplink a downlink použit odlišný kanál. Druhý je pak TDD (Time Division Duplex), kde uplink i downlink používají jeden kanál, ve kterém se oba směry střídají v čase.

Varianta WCDMA-FDD používá frekvence:

2110 – 2170 MHz pro downlink (vysílání z BS na MS) – na obrázku 24 pásmo č.6

1920 – 1980 MHz pro uplink (vysílání z MS na BS) – na obrázku 24 pásmo č.3

Varianta WCDMA-TDD používá frekvence, které jsou umístěny po stranách pásma WCDMA-FDD pro uplink:

1900 – 1920 MHz – na obrázku 24 pásmo č.2 – šířka pásma 20 MHz

2010 – 2025 MHz - na obrázku 24 pásmo č.5 – šířka pásma 15 MHz

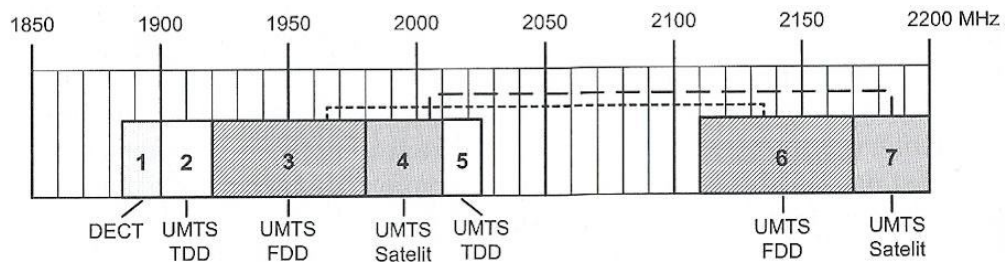
Část spektra je určena pro družicovou část systému UMTS-MSS (Mobile Satellite Service, mobilní družicová služba. Používá se také název Satelitní S-UMTS n

2170 – 2200 MHz - na obrázku 24 pásmo č.7

Pro systém DECT, který je v Evropě provozován, je rezervováno pásmo 1885 – 1900 MHz - na obrázku 13 pásmo č. 1.

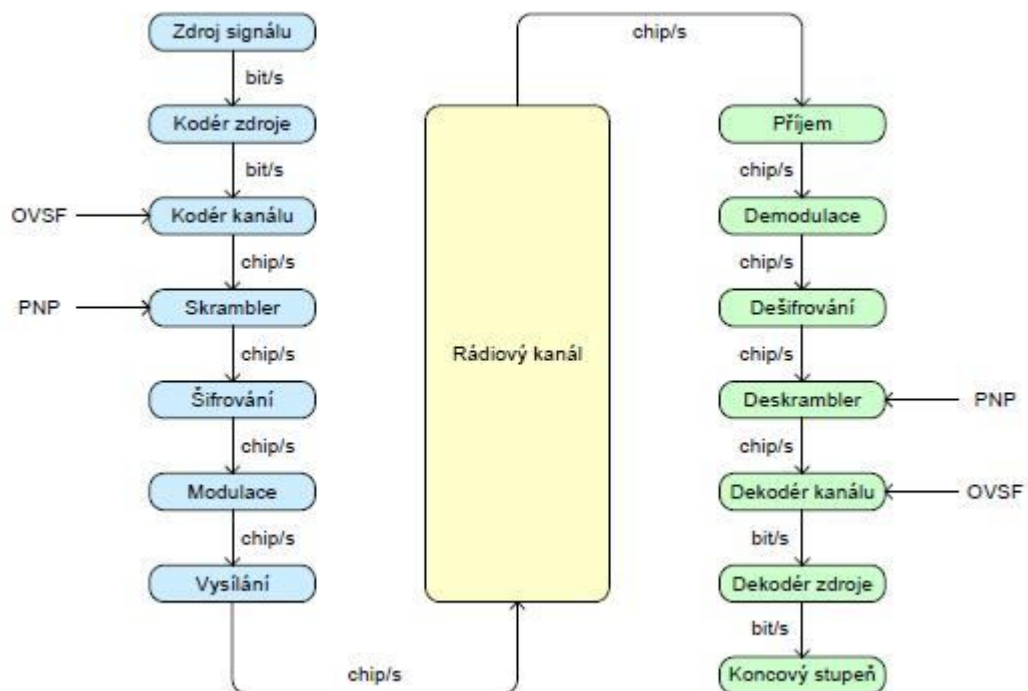
Duplexní techniky, které používají systém UMTS jsou vhodné pro různé druhy přenosu. Časově dělený duplex TDD (nepárová pásma) je výhodný pro asymetrické vysokorychlostní datové přenosy a pokrytí hlavně uvnitř budov. Frekvenční multiplex FDD (párová pásma) je zase vhodnější pro velkoplošné pokrytí a symetrické středně rychlé

datové služby. Je ale mnohem náročnější na regulaci výkonu na straně mobilního telefonu i základnové stanice. [5]



Obrázek 12 : Kmitočtová pásma systému UMTS [5]

4.3 Zpracování signálu v systému UMTS



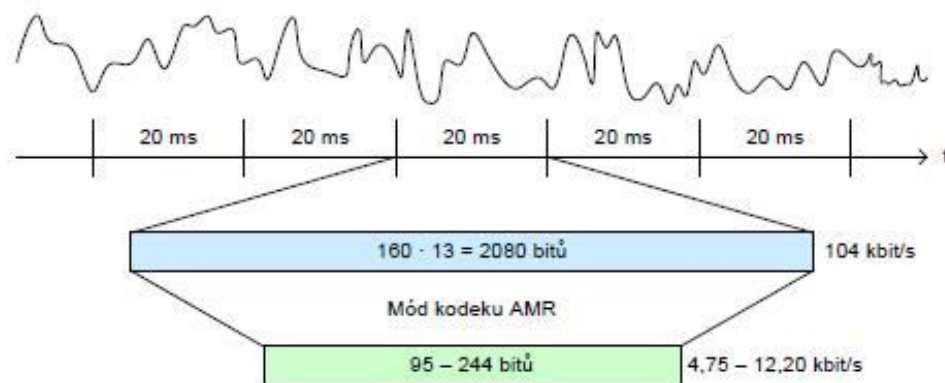
Obrázek 13 : Zpracování signálu v UMTS [200]

4.3.1 Zdrojové kódování

Pro zdrojové kódování řeči se využívá AMR (Adaptive Multi Rate). Jeho kodeky umožňují měnit výstupní přenosovou rychlost podle řečové aktivity mluvčího. Hlavní výhodou je zmenšení průměrné přenosové rychlosti signálu a snížení vysílacího výkonu. Mezi další

výhody AMR patří nespojitý přenos DTX (Discontinuous Transmission), dále detektor hlasové aktivity VAD (Voice activity detection) a samooprava chyb. Protože se jednotliví uživatelé během hovoru střídají, lze ušetřit pomocí nespojitého přenosu až padesát procent přenosové kapacity. Detektor hlasové aktivity určí, které rámce obsahují hovor, a proto v době kdy uživatel nemluví, přestane jeho MS vysílat, což vede k výraznému snížení jejího příkonu. Aby nenastalo nepřírozené ticho, vkládá VAD do rámců komfortní šum, ten je přenášen jen velmi malou přenosovou rychlostí. Nový způsob kódování umožňuje opravovat chyby, které vznikají při přenosu rádiovým kanálem. Ztracený nebo poškozený hovorový rámec je nahrazen jiným, z již dříve přenesených hovorových rámců, s co nejvíce podobným obsahem. Tím dochází ke zlepšení kvality hovoru v místech s horší úrovní signálu. [210]

Vstupní řečový analogový signál je vzorkovací frekvencí 8 kHz navzorkován a je rozdělen na úseky po 20 ms. Poté se v analogově-digitálním převodníku každý tento úsek rozdělí na 160 vzorků a kvantuje pomocí 13 bitů. Výsledkem zdrojového kódování je poníženi počtu bitů z 2080 na 95-244 bitů, podle použitého módu kodeku AMR (viz Obr. 14).



Obrázek 14: Zdrojové kódování v UMTS

4.3.2 Kanálové kódování

Pro kanálové kódování se využívají Walshovy kódy, tyto jsou ortogonální, normální a úplné, mají dobré korelační vlastnosti. Jednotlivé kódy z Walshova stromu se označují činitelem rozprostírání SF (Spreading Factor) a číslem kódu k (0 až SF-1). Jsou proto nazývány OVVSF kódy (Orthogonal Variable Spreading Factor). Ve sčítacích členech modulo 2 dochází k rozprostření spektra a změně bitové rychlosti datového signálu

na rychlost chipovou. Tato je u systému UMTS 3,84 Mchip/s. Pomocí kanálového kódování se rozlišují jednotlivé kanály jednoho uživatele s tím, že každý kanál musí používat jiný OVFSF kód. Současně slouží k rozlišení uživatelů využívající stejný timeslot. OVFSF kódy jsou uživatelům přidělovány před tím, než se uskuteční komunikace. [221]

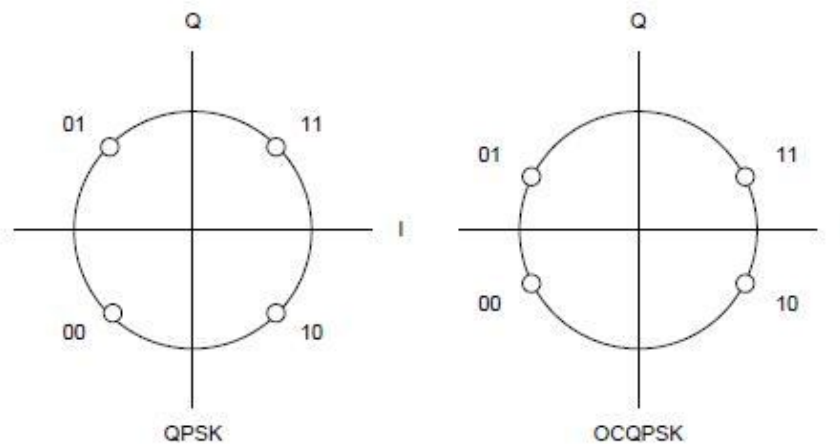
4.3.3 Skramblování

Pro skramblování se využívají pseudonáhodné posloupnosti PNP. Pomocí nich dochází k náhodné změně sekvence datového signálu, který se realizuje pomocí sčítacích členů modulo 2. Přes rádiový kanál se přenese sekvence bitů v odlišném pořadí a na přijímací straně se pomocí stejné pseudonáhodné posloupnosti datový signál obnoví. Obvykle dochází při použití pseudonáhodných posloupností současně k rozproštění spektra. Protože v systému UMTS je již datový signál rozprostřen kanálovým kódováním, rychlost datového signálu se nemění. Pseudonáhodné posloupnosti mají náhodný charakter, poměrně dobré autokorelační vlastnosti, jsou dobře generovatelné a musí být synchronizované na přijímací i vysílací straně. Pro oddělení uživatelů jedné buňky se v downlinku využívají dlouhé PNP posloupnosti. Tyto jsou odvozené s Goldových kódů, které mají délku 38 400 chipů a v uplinku dlouhé i krátké PNP posloupnosti odvozené z $S(2)$ kódů s délkou 256 chipů. Pro oddělení buněk se používají jen dlouhé PNP posloupnosti. Celkem je 218-1 pseudonáhodných posloupností, které se rozdělují do 512 skupin, neboli kódových sad. Každá sada obsahuje jeden primární a 15 sekundárních kódů. Každé buňce je přiřazen vždy jeden primární kód, a tím se určí její kódová sada. [231]

4.3.4 Modulace

V downlinku se používá modulace QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), což je čtyřstavové fázové klíčování. Mezi její přednosti patří především spektrální účinnost 2 bit/s/Hz i dobrá energetická účinnost. Hlavním nedostatkem modulace QPSK je však vznik parazitní amplitudové modulace, kdy při změně obou bitů v dibitu její výše dosahuje dokonce stoprocentní hloubky modulace (při průchodu nulou). Každý fázový stav nosné je vyjádřen pomocí dvou po sobě následujících chipů (Obr. 16). V downlinku jde tedy o časový multiplex QPSK. V uplinku se využívá modulace OCQPSK (Orthogonal Complex QPSK), která se často označuje jako HPSK (Hybrid Phase Shift Keying). Jedná se o digitální modulaci, která omezuje průchod signálu nulou, a tím dochází ke snížení vzniku parazitní amplitudové modulace. Každý fázový stav nosné je opět vyjádřen pomocí dvou chipů, kde je nyní jeden chip datový a druhý obsahuje pomocné řídicí informace

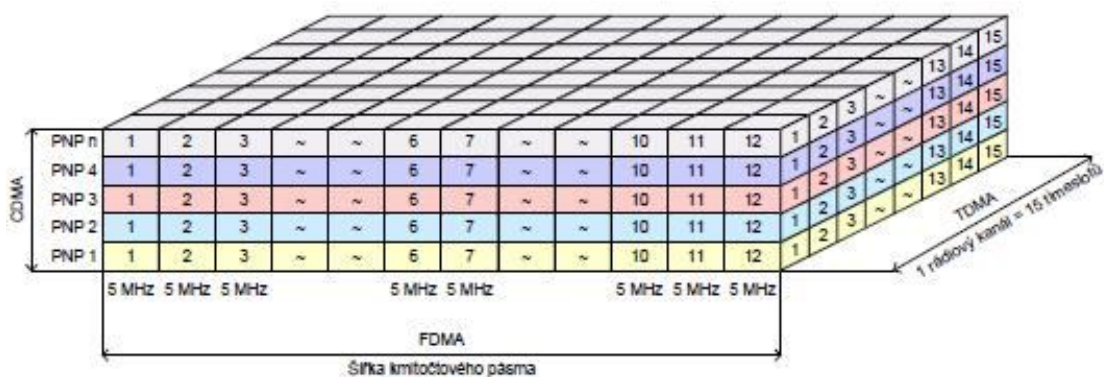
(Obr. 15). Modulace v uplinku se označuje za kódový multiplex QPSK. Z použitých způsobů modulace je patrné, že přenosová rychlost v downlinku může být dvojnásobná než v uplinku. [8]



Obrázek 15: Konstelační diagramy modulace QPSK a OCQPSK [8]

4.3.5 Přístupová technika v UMTS

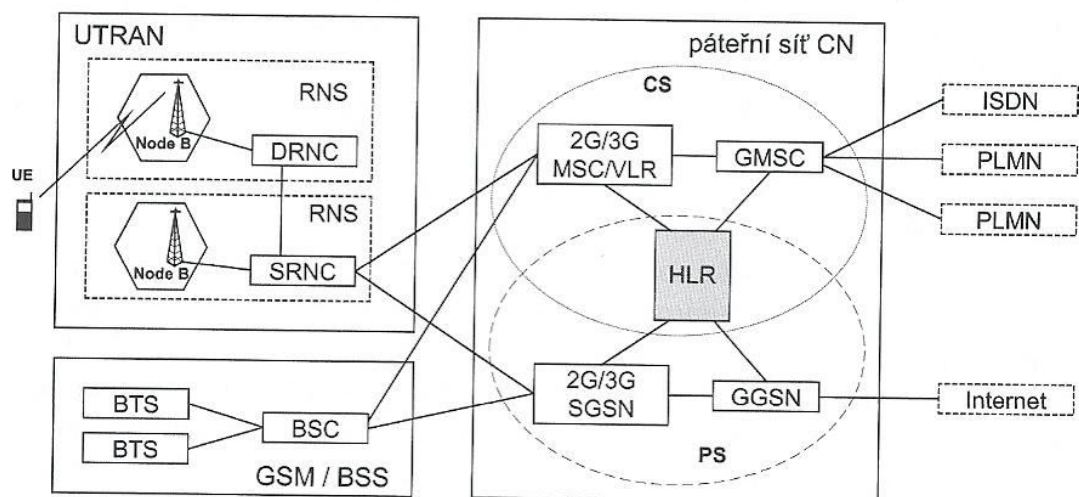
Systém UMTS využívá kombinované přístupové techniky FDMA/TDMA/CDMA (Obr. 17). Kmitočtové pásmo se technikou FDMA dělí na rádiové kanály o šířce 5 MHz, ty se dále technikou TDMA rozdělí na 15 timeslotů. Každý timeslot může obsahovat na rozdíl od systému GSM několik uživatelů, kteří jsou pomocí techniky CDMA rozlišení různými pseudonáhodnými posloupnostmi.



Obrázek 16: Přístupová technika FDMA/TDMA/CDMA [240]

4.4 Struktura systému UMTS

Uskupení systému UMTS se skládá ze dvou hlavních částí, a to rádiové přístupové sítě UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) a páteční sítě CN (Core Network), které jsou propojené pomocí přenosového protokolu ATM (Asynchronous Transfer Mode). Mobilní stanice, je zde definována jako uživatelský terminál, který je podobně jako v systému GSM samostatnou částí systému. Páteční síť CN umožňuje spojování hovorů, směrování paketů, obsahuje také potřebné databáze a zajišťuje funkci síťového managementu. V systému GSM mu odpovídá NSS a OSS. Pro komunikaci jednotlivých uživatelů se systémem slouží přístupová síť UTRAN která odpovídá subsystému BSS. Podrobné schéma architektury systému UMTS je na obr. 17. [5]



Obrázek 17 : Struktura sítě UMTS [5]

4.4.1 Uživatelský terminál – ME

ME (mobile Equipment, mobilní zařízení – obecně mobilní telefon nebo terminál, který má schopnost přístupu do sítě UMTS. Často je také využíván v původním určení standardů GSM mobilní terminál (MT) nebo Mobile Station (MS), všechny tyto tři pojmy jsou vzájemně zaměnitelné.

Pro oprávněný vstup do sítě GSM je potřeba karta SIM. V UMTS se značí jako USIM (UMTS Subscriber Identity Module). V rámci UMTS struktury uživatelský terminál nepatří do části UTRAN, jedná se o samostatnou součást systému UMTS. [5]

4.4.2 Přístupová síť – UTRAN

Přístupová síť (UTRAN) představuje část sítě, která umožňuje uživatelům přístup ke službám, které poskytují páteřní síť CN pomocí rádiového prostředí. V této souvislosti plní UTRAN dvě hlavní funkce:

- zprostředkování rádiového přenosu
- řízení a přidělování rádiových prostředků

Pro splnění těchto funkcí slouží dvě síťové jednotky (viz obr. 19):

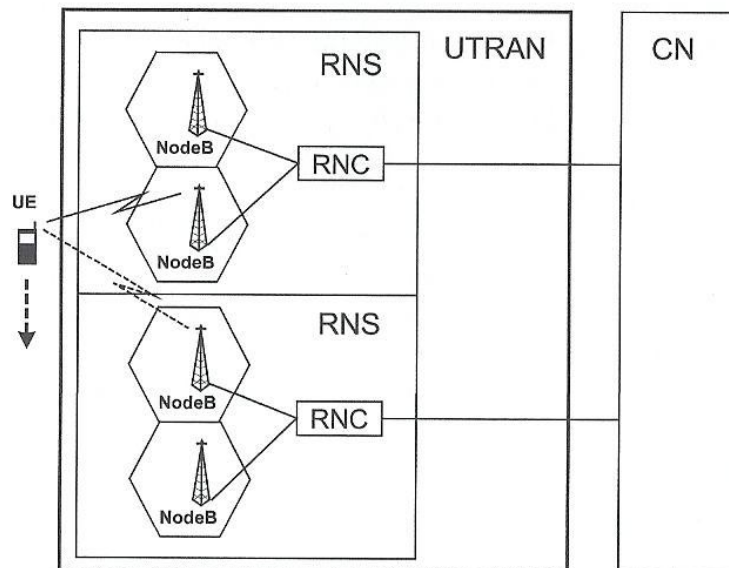
- Node B – jedná se o základnovou stanici systému UMTS (obdoba BTS v GSM)
- RNC (Radio Network Controller) – řídicí jednotka rádiové sítě (obdoba BSC v GSM)

Node B je základnová stanice systému UMTS (obdoba BTS v GSM), která obsahuje rádiové přijímače, vysílače a anténní systém obsahující jednu nebo více buněk. Slouží jako jednotka, která zprostředkuje přenos dat mezi rádiovým rozhraním na jedné straně a pozemskou pevnou sítí na straně druhé. Node B je také schopna podporovat různé přístupové techniky (W-CDMA, TD-CDMA). Základními funkcemi jednotky Node B jsou modulace a demodulace, vysílání a příjem, kódování fyzických kanálů, mikro diverzita (při handoveru je signál přijímán dvěma anténami, v činnosti je ta, která poskytuje lepší signál), ochrana proti chybám a řízení vysílacího výkonu. [5]

RNC sleduje funkčnost jedné nebo několika základnových stanic. Má v náplni přidělování rádiových prostředků (kódů, výkonu) a sledování pohybu (mobilitu) účastníka. Mezi povinnosti RNC patří řízení rádiových prostředků, přidělování rádiových kanálů, kontrola přístupu (zabezpečení), šifrování, řízení handoveru, řízení vysílacího výkonu, makrodiverzita, segmentace a zpětné slučování a bezchybný přenos dat. [5]

Síť UTRAN se skládá z jednoho nebo více subsystémů rádiových sítí RNS (Radio Network Subsystem). Každý tento subsystém řídí jednotka RNC, která je napojena na páteřní síť CN. Při každém uskutečněném spojení pracuje jeden RNC jako tzv. Serving RNC (SRNC). Jedná se o RNC, který v průběhu připojení komunikuje s páteřní sítí. V případě přechodu účastníka do oblasti jiného RNC slouží tento nový RNC jako tzv. Drift RNS (DRNC). V náplni DRNC je podpora pro SRNC tím, že poskytuje rádiové prostředky v době, kdy spojení mezi UTRAN a UE vyžaduje použití buněk kontrolovaných tímto

RNC. V případě, že DRNC má přímé připojení k CN, může později převzít úlohu SRNC. UTRAN je v UMTS ekvivalent GSM/BSS. [5]



Obrázek 18 : Struktura pozemní sítě UTRAN [5]

4.4.3 Páteří síť – CN

Páteří síť (CN, Core Network) , nebo-li jádro sítě UMTS zajišťuje spojovací funkce (propojení účastníků, směrování paketů). Udržuje a aktualizuje důležité uživatelské informace (poloha, bezpečnost, účtování) a zajišťuje propojení do externích sítí (ISDN, PSTN, Internet atd.). Jádro sítě UMTS se dělí na 2 domény – doména s přepojováním okruhů CS (Circuit Switched) a doména s přepojováním paketů PN (Packet Switched). Některé síťové jednotky tyto dvě domény sdílejí, jiné náleží pouze jedné doméně. Doména CS obsahuje telefonní ústředny MSC a GMSC, tyto mohou být s určitými změnami převzaty ze současných GSM sítí. [5]

Hlavním přínosem na cestě k UMTS je GPRS, toto dovoluje přenášet PS data přes CN a umožňuje tak přímý přístup mobilních terminálů do paketových sítí. GPRS umožňuje při přístupu přes GSM BSS přenášet data rychlostí až 115 kbit/s. Tato veličina je ale značně závislá na kvalitě signálu (vzdálenosti přístroje a BSS) a na počtu právě volných kanálů (časových slotů) v dané buňce. Také všechny terminály nemusí podporovat tuto rychlost. Důležité je to, že GPRS připravuje CN na přenos PS dat rychlostmi až 2 Mbit/s a to dovoluje stavět UMTS CN na tomto základě. UMTS CN se logicky dělí na 2 části. CS doménu a PS doménu. PS doménu tvoří rozšíření GSM standardu, GPRS přizpůsobené požadavkům UMTS. Tato doména obsahuje SGSN a GGSN,

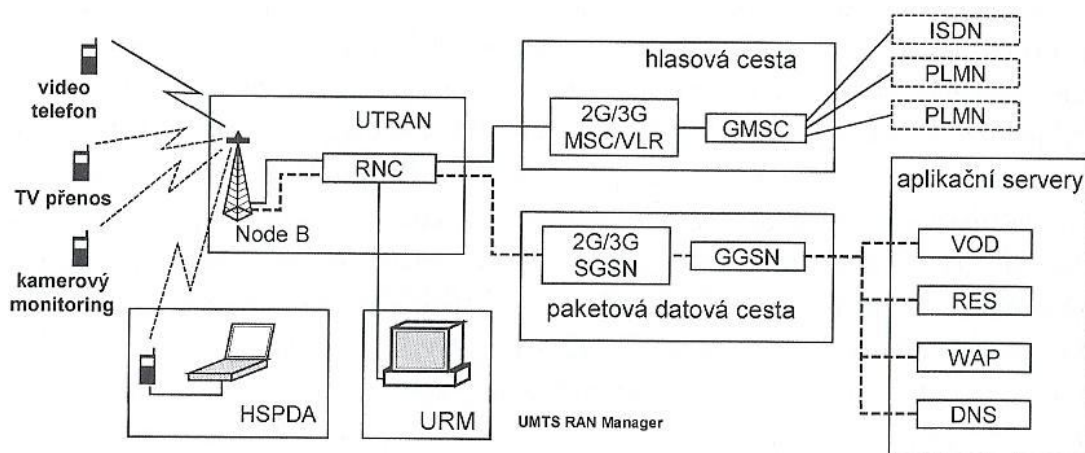
což jsou obdoby VMSC a GMSC. Na obrázku jsou SGSN a GGSN označené jako 2G/3G SGSN a GGSN, což znamená, že kromě GSM/GPRS komunikace je tato síť schopná podporovat i PS služby UMTS první fáze. Úkolem SGSN je nasměrování paketů k uživateli (routing). Tato PS data mohou mít původ v dané PLMN nebo v externí PDN (packet Data Network). V druhém případě jsou data nejprve směřovaná z externí PDN do GSN, který potom plní funkci rozhraní dané PLMN s těmito PDN. Odtud se všechny data přenáší do SGSN, kde jsou nasměrována přímo k uživateli podle jeho aktuální polohy (mobility management). Z toho je vidět, že podobně jako MSC i SGSN spolupracuje s HLR a jemu přidruženými funkčními jednotkami (Authentication Centre, Equipment Identity Register). [5]

4.5 Technologie HSDPA

HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access). Jedná se o technologii v mobilních sítích 3. generace (UMTS), která urychluje tok dat směrem k uživateli (download) až na 14,4 Mbit/s. Je to nejvyspělejší technologie využívaná v Česku. 1. generace této služby spuštěná též v ČR nabízí download až 1,8 Mbit/s. HSDPA je protokol mobilní telefonie označovaný také jako technologie 3,5G – tříapůltá generace. [251]

HSDPA je založeno na několika zlepšeních architektury sítě, díky nimž se dosahuje nižšího zpoždění, rychlejších reakcí na změnu kvality kanálu a zpracování H-ARQ (Hybrid Automatic Repeat Request, hybridní automatický požadavek na opakování přenosu).

Další změny jsou provedeny přímo na rádiové části sítě, tedy na RNC (Radio Network Controller) a Node B (základnová stanice). Nejdůležitější změnou, která přispívá ke zrychlení toku dat a odstranění zpoždění a rozptylu, je přemístění některých úkolů ze samotného RNC na Node B. Základnové stanice se nyní namísto RNC starají o plánování a řízení. V důsledku toho data urazí kratší trasu před tím, než se dekódují, a třeba se zjistí, že něco není s nimi v pořádku a že je potřeba poslat je znovu. Snižují se tím požadavky na dobu jejich přenosu, ale i RNC, naopak je potřeba výkonnější hardware Node B. [261]



Obrázek 19 : Technologie HSDPA [127]

4.6 Technologie HSUPA

HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access) je technologie v mobilních sítích 3. generace (UMTS), která zrychluje tok dat směrem od uživatele (upload) až na 5,76 Mbit/s.

UMTS/HSUPA router UR5i slouží k propojení různých zařízení s rozhraním Ethernet do Internetu nebo intranetu. Díky mimořádné rychlosti přenosu dat až 7,2 Mbit/s (download) a zejména pak uploadu až 2 Mbit/s je ideální pro bezdrátové připojení kamer dopravních a bezpečnostních systémů, jednotlivých počítačů nebo sítí LAN, bankomatů atd.

Využití v praxi:

- bezdrátový přenos dat z kamer (IP kamery, USB kamery)
- připojení bankomatů, výherních a platebních terminálů atd.
- propojení řídicích systémů a senzorů v průmyslu
- bezdrátové připojení různých mobilních zařízení s uvedenými rozhraními [128]

4.7 Technologie HSPA+

Vývoj HSUPA neskončil u dosažení přenosové rychlosti 14,4 Mbit/s. Tato technologie byla dále vylepšována, až vznikla nová technologie označovaná HSPA+. Jednou z možností, jak dosáhnout vyšších rychlostí, bylo použití dokonalejší a efektivnější modulace 64 QAM. To umožnilo zrychlit HSDPA ze 14 Mbit/s na 21,1 Mbit/s a HSUPA perspektivně až na 11,5 Mbit/s. Při použití techniky MIMO 2x2 může rychlost HSDPA dosáhnout až na 28 Mbit/s. V případě, že se použije varianty HSPA+ využívající MIMO

2x2, dosáhneme rychlosti na downlinku až 42,2 Mbit/s. Pokud použijeme ještě intenzivnější technologie MIMO, a to místo MIMO 2x2 provedení 4x4, můžeme dosáhnout ve směru k uživateli rychlost až 84 Mbit/s. Latence by se pak u systému HSPA+ měla pohybovat pod 25ms (latence vyjadřuje časovou prodlevu, tj. zpoždění, mezi iniciací jevu a jeho pozorovatelným projevem). [11]

4.7.1 Systémy MIMO (Multiple Input Output)

Převážná většina běžně používaných komunikačních systémů používá způsob přenosu rádiovým kanálem s jedním vstupem a jedním výstupem – tzv. SISO (Single Input Single Output). Některé současné komunikační systémy však již využívají pro zvýšení hospodárnosti využití přenosového kanálu a rádiového spektra tzv. systémů MIMO s více vstupy a výstupy. Tyto využívají principu časo-prostorového kódování (space-time coding). Použitím více antén a časo-prostorovým kódováním se dosáhne diversity (různosti), a tím i větší odolnosti přenosu vůči úniku signálu.

Systém MIMO je multi-anténní systém používaný v oblasti bezdrátové komunikace. V překladu „více vstupů více výstupů“. Pod tímto systémem si můžeme představit samostatné antény, či jen malé anténky a právě podle nich poznáme typické „zařízení MIMO“. Podstata věci je přitom taková, že nejde o více samostatných a na sobě nezávislých přenosů na různých frekvenčních kanálech v tom smyslu, že by každá dvojice antén „proti sobě“ komunikovala na samostatném frekvenčním kanále a tím se patřičně znásobovala celková přenosová kapacita. Systém MIMO je výhodný v tom, že nespoteřovává více frekvenčního spektra (více frekvenčních kanálů), ale usiluje o využití stejně velkého spektra efektivněji. A právě k tomu potřebuje více antén, které jsou rozmístěny v určité konkrétní vzdálenosti od sebe. Podle počtu použitých antén na komunikujících zařízeních se systémy označují například jako 2x2 nebo 4x4. Pro názornost si vše lze představit tak, že systémy MIMO dokáží pracovat i s různě odraženými signály, například od zdí, podlah či stropů apod. Díky více anténám umí správně interpretovat a vyhodnotit situaci (místo toho, aby tyto odrazy naopak zhoršovaly příjem, jako například známé „duchy“ u televizního vysílání). [291]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU PŘIDĚLENÝCH FREKVENCÍ A KANÁLŮ U MOBILNÍCH OPERÁTORŮ V ČR

5.1 Zákony a normy

Oblast bezdrátových komunikací v ČR má následující platné zákony a vyhlášky:

- Zákon č. 154/2000 Sb., o telekomunikacích a o změně dalších zákonů
- Zákon č. 127/2005 Sb., o elektronických komunikacích a o změně některých souvisejících zákonů
(zákon o elektronických komunikacích)
- Vyhlášku č. 105/2012 Sb., o plánu přidělení kmitočtových pásem, tj. národní kmitočtová tabulka. Tato upravuje podmínky pro přidělování frekvenčních pásem jednotlivým radiokomunikačním službám. Je uplatněním Radiokomunikačního řádu ITU pro ČR. [304]

5.2 Frekvenční přiděl na pásech GSM, UMTS a LTE

Poslední aukce kmitočtů proběhla pod záštitou ČTÚ v listopadu roku 2013, kde došlo k dalším významným změnám v oblasti přidělování frekvenčních pásem pro české mobilní operátory. Aukce byla zaměřená hlavně na přidělování frekvencí pro systémy LTE. [315]

5.2.1 GSM – přidělené kanály

Počty přidělených kanálů	GSM-R 955-974	E-GSM 975-1023,0	P-GSM (GSM 900) 1-124	DCS (GSM 1800) 512 -885
T-Mobile	-	15	47	100
O2	-	16	46	85
Vodafone	-	19	31	110
České dráhy	19	-	-	-
Nepřiděleno	1	0	0	79
Celkem	20	50	124	374

Tabulka 2: GSM – počty přidělených kanálů pro jednotlivé operátory [325]

5.2.1.1 GSM 900

Pásmo GSM-R (876-880/921-925 MHz), E-GSM (880-890/925-935 MHz) a P-GSM (890-915/935-960 MHz) na sebe plynule navazují. Odstup kanálů je 0,2 MHz. Duplexní odstup je 45 MHz. Kanál 955 má frekvenci 876,2/921,2 MHz, kanál 0 má frekvenci 890/935 MHz, kanál 124 má frekvenci 914,8/959,8 MHz, jak je vidět v následující tabulce 4. [335]

921		955	956	957	958	959	960	961	962	963
923	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973
925	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983
927	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993
929	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003
931	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013
933	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023
935	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
937	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
939	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
941	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
943	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
945	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
947	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
949	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
951	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
953	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
955	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109
957	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119
959	120	121	122	123	124					

Tabulka 3: GSM 900 – výčet všech kanálů pro jednotlivé operátory [345]

Na kanálech 985 až 999 provozuje Vodafone LTE 900 (Turbo internet).

5.2.1.2 DCS (GSM 1800)

Pásmo DCS nebo-li GSM 1800 se liší od pásma GSM 900 pouze frekvencí (1710-1785/1805-1880 MHz) a duplexním odstupem (95 MHz). První kanál 512 má frekvenci 1710,2/1805,2 MHz, poslední kanál 885 má frekvenci 1784,8/1879,8 MHz.

Světle označené kanály byly přiděleny po aukci v prosinci 2013, viz tabulka č. 5. [15]

1805		512	513	514	515	516	517	518	519	520
1807	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530
1809	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540
1811	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550
1813	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560
1815	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570
1817	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580
1819	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590
1821	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600
1823	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610
1825	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620
1827	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630
1829	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640
1831	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650
1833	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660
1835	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670
1837	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680
1839	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690
1841	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700
1843	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710
1845	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720
1847	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730
1849	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740
1851	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750
1853	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760
1855	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770
1857	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780
1859	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790
1861	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800
1863	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810
1865	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820
1867	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830
1869	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840
1871	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850
1873	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860
1875	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870
1877	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880
1879	881	882	883	884	885					

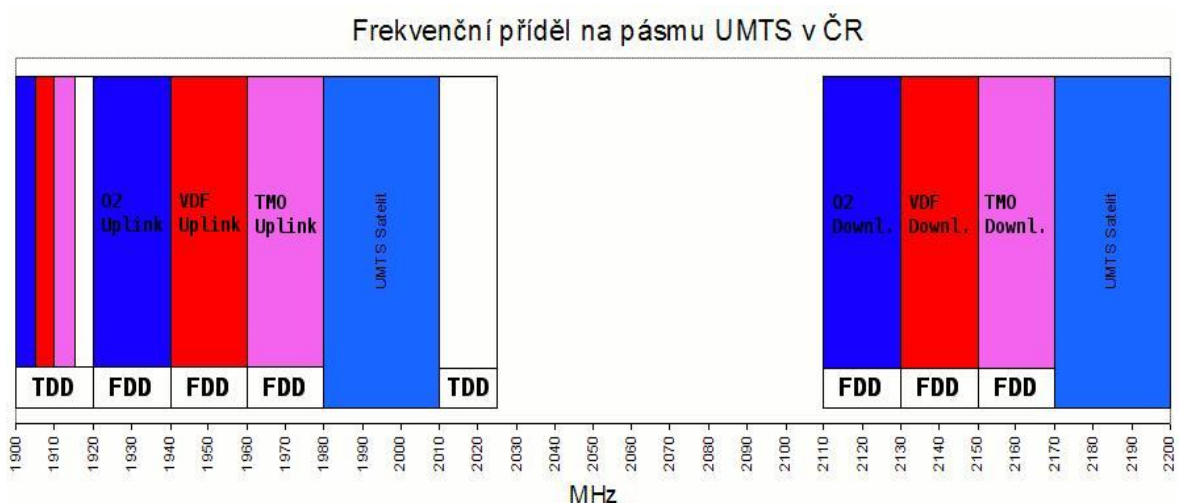
Tabulka 4: GSM 1800 – výčet kanálů pro jednotlivé operátory [355]

Na kanálech 513 až 587 včetně běží v síti O2 provoz LTE 1800 (EARFCN 1278, šířka 15 MHz). Na kanálech 620 až 684 běží LTE 1800 síť T-Mobile (EARFCN 1473, šířka 15 MHz) v Praze, v Mladé Boleslavi je na EARFCN 1498. Na kanálech 791 až 866 běží LTE 1800 síť Vodafone (EARFCN 1815) v Karlových Varech, na kanálech 814 až 864 běží LTE 1800 síť Vodafone (EARFCN 1857) ve Fuel café. [365]

5.2.2 UMTS 2100

Pásmo UMTS je rozděleno mezi tři různé UMTS standardy:

- UMTS Satellite je mrtvá technologie, nicméně má vyhrazeno 2x30 MHz (1980-2010 a 2170-2200 MHz) a na národní úrovni se zřejmě nepřiděluje. [375]
- UMTS TDD je málo rozšířená technologie. Nepárové spektrum má celkem 35 MHz (1900-1920 a 2010-2025MHz). U nás je přiděleno 3x5 MHz stávajícím GSM operátorům, ale síť provozoval pouze T-Mobile, od Q4 2005 do května 2012. Nepřidělený zbytek lze přidělit později. [385]
- UMTS FDD je hlavním proudem UMTS. Párové spektrum je široké 2x60 MHz, kdy 1920-1980 MHz je uplink, 2110-2170 je downlink a duplexní odstup je 190 MHz. V ČR je spektrum přiděleno celé mezi stávající GSM operátory, což znamená poměrně velkorysých 20 MHz na jednoho a možnost použít 4 nosné po 5 MHz. O2 spustilo svou FDD síť 1.12.2005 na jedné nosné, ostatní operátoři se přidali později. [395]



Obrázek 20: Frekvenční přiděl na pásmu UMTS v ČR

5.2.2.1 UMTS 2100 FDD

Každá nosná (carrier) je široká 5 MHz párového spektra. Pětimístné číslo ARFCN udává střed kanálu v pětinásobcích MHz, jak je vidět v tabulce 6. [405]

O2	10564	první celoplošná nosná
	10588	druhá kapacitní nosná, ve vybraných lokalitách
	10613	třetí kapacitní nosná, ve vybraných lokalitách
	10637	čtvrtá kapacitní nosná, ve vybraných lokalitách
Vodafone	10663	nosná pro indoory
	10687	druhá nosná (kapacitní nebo dual carrier), ve vybraných lokalitách
	10712	první celoplošná nosná
	10737	femtocelly
T-Mobile	10762	třetí nosná (kapacitní), ve vybraných lokalitách
	10787	nosná ve sdílené části sítě
	10812	druhá nosná (kapacitní nebo dual carrier), ve vybraných lokalitách
	10836	první nosná ve vlastní síti

Tabulka 5: UMTS 2100 FDD – přehled nosných pro jednotlivé operátory [415]

5.2.3 LTE800 DD

LTE pásmo 20 (800 Digital Dividend) zahrnuje 30 MHz párového spektra, netradičně s downlinkem umístěným níž než uplink. Downlink je na 791-821 MHz, uplink je na 832-864 MHz, viz tabulka 7. [425]

T-Mobile	791-796
	796-801
O2	801-806
	806-811
Vodafone	811-816
	816-821

Tabulka 6: LTE 800 DD – frekv. pásma [435]

5.2.4 LTE 2600

LTE pásmo 7 zahrnuje 70 MHz párového spektra, downlink 2620-2690 MHz, uplink 2500-2570 MHz, viz tabulka 8. [445]

O2	2620-2625
	2625-2630
	2630-2635
	2635-2640
T-Mobile	2640-2645
	2645-2650
	2650-2655
	2655-2660
Vodafone	2660-2665
	2665-2670
	2670-2675
	2675-2680
nepřiděleno	2680-2685
	2685-2690

Tabulka 7: LTE 2600 – frekv. pásma [455]

5.3 Aukce kmitočtů pro 4G sítě

Po více jak roce se Český telekomunikační úřad chystá v nejbližší době oznámit podmínky, za jakých hodlá dražit frekvence pro rychlejší připojení k internetu, takzvané 4G sítě. Důsledkem této nastávající aukce může být, že v Česku vznikne nový operátor. Tato akce by měla podle předběžných informací proběhnout ještě v první polovině letošního roku.

6 DATOVÁ PROPUSTNOST SOUČASNÝCH MOBILNÍCH SÍTÍ

Datovou propustností rozumíme maximální celkový průtok dat, který proteče přenosovým kanálem o určité šířce. Jinými slovy tedy hovoříme o přenosové rychlosti toku dat za jednotku času v daném přenosovém kanále. V následujících částech budou postupně popsány přenosové rychlosti současně používaných datových technologií u mobilních sítí.

6.1 GSM

6.1.1 GPRS

Technologie, která využívá pro přenos dat princip přepojování paketů. Tento lze realizovat dvěma způsoby, nespojovaný nebo spojovaný přenos. Systém přiděluje timesloty přednostně hovorům, poté datovým přenosům na bázi přepojování okruhů a na konec přenosu dat pomocí GPRS. Naopak dojde-li k přetížení sítě, nejdříve jsou odebírány timesloty MS připojené právě přes GPRS. Není tak sice zajištěna propustnost sítě, ale je efektivně využita její kapacita. Spojení se navazuje pouze, vznikne-li požadavek k přenosu dat. Pokud nepřenáší uživatel žádná data, přenosová cesta zůstane volná. Tímto způsobem jsou využity všechny volné timesloty, zpravidla jsou pro přenos GPRS rezervovány jeden až dva timesloty. Podobně jako u staršího systému HSCSD jsou podle počtu využívaných timeslotů definovány různé třídy. Nejvyšší třída 29 používá teoreticky 8 timeslotů, pak je výsledná maximální přenosová rychlost 171,2 kb/s. V praxi se však používají jen 4 timesloty o celkové rychlosti 85,6 kb/s. Rychlost přenosu není konstantní, je odvislá na kvalitě signálu i počtu přidělených timeslotů. Podle kvality signálu se volí způsob přenášených dat CS (Coding Scheme). GPRS využívá čtyři různá kódovací schémata, tyto určují teoretickou a uživatelskou přenosovou rychlost na jeden timeslot (Tabulka 8). Jaké schéma bude použito, je odvislé na možnostech sítě a aktuálním stavu MS, která toto schéma vybírá. [6]

Kódové schéma	Teoretická přenosová rychlost na 1 timeslot [kbit/s]	Třída
CS-1	9,05	C
CS-2	13,4	B
CS-3	15,6	A
CS-4	21,4	C

Tabulka 8: Kódová schémata GPRS [6]

Jak je uvedeno v tabulce 8 GPRS má nadefinovány tři třídy mobilních stanic:

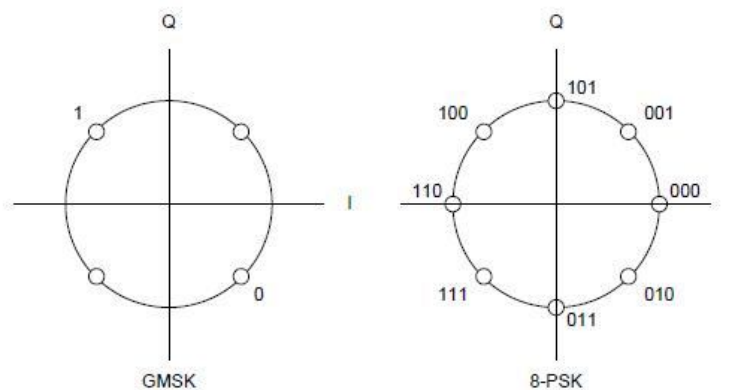
- A – jsou schopny současně ovládat služby jak na základě přepojování okruhů, tak na přepojování paketů, nezávisle na sobě (lze uskutečnit hovor i přenos dat současně)
- B – v danou chvíli jsou schopny ovládat pouze službu buď na základě přepojování okruhů, nebo přepojování paketů, lze však mezi nimi automaticky přecházet (lze uskutečnit přenos dat, přijmout hovor a poté pokračovat v přenosu dat)
- C – službu, kterou chce uživatel právě využívat, nejdříve je ji třeba nastavit (lze uskutečnit pouze hovor nebo přenos dat)

6.1.2 EDGE

Technologie EDGE rozšiřuje stávající systém GSM (GPRS), protože umožňuje zvýšení přenosové rychlosti jak na bázi přepojování okruhů, tak na bázi přepojování paketů. Navíc je jednou z posledních možností, jak maximálně využít přiděleného kmitočtového pásma s šířkou kanálu 200 kHz.

Systém GSM využívá dvoustavovou modulaci GMSK, což je klíčování frekvenčním zdvihem, kde je log. 0 a log. 1 vyjádřena posunutím frekvence nosné. Jeden symbol zde reprezentuje jeden bit (Obr.16). EDGE ji v některých případech využívá také, ale jak již bylo zmíněno, pro rychlé datové přenosy je třeba použít modulaci jinou. Byla zvolena 8-PSK (Eight-Phase Shift Keying), což je osmistavové klíčování změnou fáze. Modulátor namapuje tři po sobě jdoucí bity v jeden symbol, a tím je definováno osm stavů pro změnu fáze (Obr. 21).

Při zachování stejného počtu symbolů se přenese trojnásobný počet bitů. To má za následek efektivnější využití spektra, signál se tím ale stává náchylnější na zkreslení a šum. Zvýšení počtu stavů vede ke snížení odolnosti vůči interferencím. Je to způsobeno zmenšením vzdáleností mezi jednotlivými symboly a přijímač obtížněji detekuje jednotlivé stavy. Pro zavedení modulace 8-PSK je tedy potřeba vyšší kvalita přenášeného signálu. Přenosová rychlost se pomocí této modulace může zvýšit trojnásobně, ale je velmi závislá na vzdálenosti od BTS. Je-li MS v blízkosti BTS může se plně využít modulace 8-PSK a rychlost se zvýší oproti GPRS až třikrát. Na okrajích buňky se již kvalita přenášeného signálu snižuje, modulace se tím změří zpět na GMSK a přenosová rychlosti je srovnatelná s GPRS (Tab. 9). Tímto způsobem dochází k automatickému přepínání mezi uvedenými technologiemi. Kvalitě signálu odpovídá stejně jako u GPRS kódovací schéma a MS ho vybírá podle momentálních podmínek příjmu. Označují se MCS-1 až MCS-9 (Modulation and Coding Scheme), jejich popis je uveden v Tab. 10. MCS-1 až MCS-4 odpovídá CS-1 až CS-4 pro GPRS. Čím vyšší kódovací schéma je použito, tím vyšší přenosové rychlosti může být dosaženo. Je to však za cenu nižšího zabezpečení přenášených dat proti vzniku chyb. Obyčejně se volí nejprve schéma s vysokou přenosovou rychlostí, pokud se vyskytne určitý počet chyb, dochází ke snížení rychlosti, a tím k většímu zabezpečení. Teoreticky je možno při využití všech 8 timeslotů dosáhnout rychlosti 473,6 kbit/s, v praxi se to ale nevyužívá. Stejně jako u technologie GPRS jsou přidělovány maximálně čtyři timesloty, tomu odpovídá přenosová rychlost 236,8 kbit/s. Technologie EDGE se rovněž dělí podle počtu timeslotů do jednotlivých tříd, celkem dvaadvaceti. [6]



Obrázek 21: Konstelační diagramy GMSK a 8-PSK [8]

Modulace	GMSK	8-PSK
Počet stavů konstelačního diagramu	2	8
Počet bitů na symbol	1	3
Symbolová rychlost [kS/s]	270,833	270,833
Přenosová rychlost [kbit/s]	270,833	812,499
Počet přenesených užitečných dat [bit]	114	342
Přenosová rychlost na 1 timeslot [kbit/s]	21,4	59,2
Přenosová rychlost na 1 timeslot [kbit/s]	171,2	473,6

Tabulka 9: Srovnání modulace GMSK a 8-PSK

Modulační a kódové schéma	Teoretická přenosová rychlost na 1 timeslot [kbit/s]	Modulace	Třída
CS-1	8,8	GMSK	C
CS-2	11,2	GMSK	B
CS-3	14,8	GMSK	A
CS-4	17,6	GMSK	C
CS-5	22,4	8-PSK	B
CS-6	29,6	8-PSK	A
CS-7	44,8	8-PSK	B
CS-8	54,4	8-PSK	A
CS-9	59,2	8-PSK	A

Tabulka 10: Modulační a kódová schémata EDGE [6]

I technologie EDGE se dělí podle počtu timeslotů do jednotlivých tříd

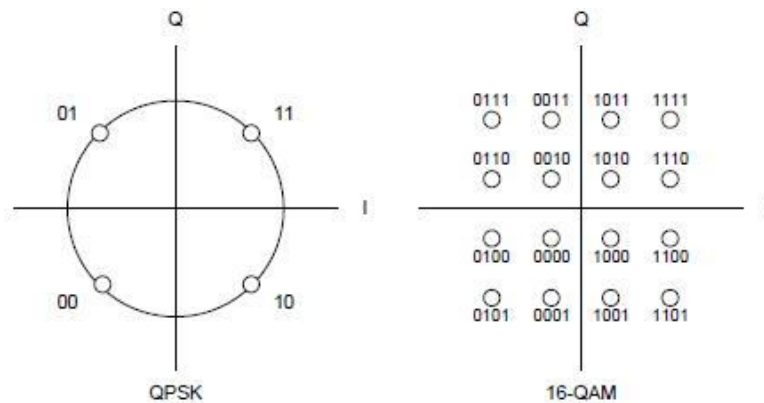
6.2 UMTS

6.2.1 UMTS FDD

Je síť 3. generace, která umožňuje hovory a datové přenosy současně. Maximální rychlost směrem k uživateli je 384 kb/s. Používá modulaci QPSK, šířka kanálu je 5 Mhz. Předností tohoto řešení je kompatibilita s 3G sítěmi v jiných zemích, a také podpora ze strany výrobců mobilních telefonů.

6.2.2 HSDPA

Technologie HSDPA je nadstavbou stávajícího systému UMTS FDD. Tato výrazně zvyšuje přenosovou rychlost v downlinku až na hodnotu 14,4 Mbit/s. Tato hodnota se opět uvádí na jednu buňku a v praxi by měl uživatel dosahovat rychlosti kolem 1,8 Mbit/s, což je pořád větší hodnota než 384 kbit/s pro UMTS. Reálná rychlost je odvislá na podmínkách příjmu, na kapacitě sítě i momentálnímu využití dané buňky ostatními uživateli. Technologie HSDPA se dá snadno implementovat, protože se jedná pouze o softwarovou úpravu. Hlavní změny, které vedou k dosažení vyšší přenosové rychlosti, jsou dány především využitím vícecestavové modulace, přidáním dalších přenosových kanálů, rychlým přidělováním rádiových prostředků, využitím hybridní metody automatické žádosti o opakování nebo zkrácení doby přenosu dat. Samozřejmostí je, že tuto technologii musí podporovat i mobilní terminál. V systému UMTS se přenosová rychlost měnila použitím různého SF (4-512), tedy rozdílným počtem chipů na jeden bit. Technologie HSDPA má činitel rozprostírání konstantní SF = 16, kde ke změně přenosové rychlosti se využívá AMC. Adaptivní modulace a kódování společně s rychlým plánováním, umožňují uživateli v rámci možností dosáhnout maximální přenosové rychlosti dat. Podle kvality rádiového kanálu dochází k dynamické změně modulačního a kódového schématu MCS (přibližně 500 krát za sekundu) při tom se zachová stejný vysílací výkon. Technologie HSDPA obdobně jako systém UMTS využívá modulaci QPSK, ale nově i 16-QAM. Modulace 16-QAM je kvadrurní amplitudová modulace, kde jeden symbol je vyjádřen čtyřmi bity. Oproti QPSK, kde je symbol vyjádřen dvěma bity, je tím pádem dvojnásobná přenosovou rychlost (Obr. 22). Každý symbol modulace 16-QAM je určován velikostí amplitudy a fáze a může mít 16 různých hodnot. Použitím více stavové modulace lze hospodárněji využít kmitočtové spektrum. Při zachování stejné šířky pásma lze zvýšit přenosovou rychlost. [6]



Obrázek 22: Konstelační diagramy QPSK a 16QAM [6]

V rámci HSDPA byly též definovány jednotlivé třídy, které se liší jednotlivými parametry a to způsobem kódování, přenosovou rychlostí, zabezpečením dat, modulací, viz Tab. 11.

Třída	Maximální počet přidělených kódů	Maximální přenosová rychlost [Mbit/s]	Typ HARQ	Minimální interval Inter-TTI	Modulace
1	5	1,2	SC	3	QPSK, 16QAM
2	5	1,2	IR	3	QPSK, 16QAM
3	5	1,8	SC	2	QPSK, 16QAM
4	5	1,8	IR	2	QPSK, 16QAM
5	5	3,6	SC	1	QPSK, 16QAM
6	5	3,6	IR	1	QPSK, 16QAM
7	10	7,2	SC	1	QPSK, 16QAM
8	10	7,2	IR	1	QPSK, 16QAM
9	15	10,2	SC	1	QPSK, 16QAM
10	15	14,4	IR	1	QPSK, 16QAM
11	5	0,9	SC	2	QPSK
12	5	1,8	SC	1	QPSK

Tabulka 11: Třídy HSDPA [466]

V rámci Release 5 byly stanoveny čtyři verze HSDPA, tyto se liší maximální přenosovou rychlostí: 1,8 Mbit/s, 3,6 Mbit/s, 7,2 Mbit/s a 14,4 Mbit/s. V ČR použila technologii HSDPA v dubnu 2006 společnost O2 s přenosovou rychlostí 1,8 Mbit/s, tuto však omezila na max. 1 Mbit/s. V současnosti nabízí přenosovou rychlost 3,6 Mbit/s a pokrývá Prahu a krajská města. Vodafone spustil HSDPA v březnu roku 2009 v Praze, a to pouze

jako testovací provoz. V dnešní době pokrývá kromě Prahy i Brno a Ostravu a nabízí rovněž přenosovou rychlost 3,6 Mbit/s. T-Mobile jako jediná společnost nenabízí služby HSDPA vůbec, protože vsadila na UMTS TDD, se kterou dosáhla stejných přenosových rychlostí až 1,5 Mbit/s. [476]

6.2.3 HSUPA

Tato technologie byla zavedena v rámci Release 6 a je dalším vylepšením systému UMTS FDD. Tato umožňuje zvýšení přenosové rychlosti v uplinku, to znamená odesílání dat směrem od uživatele rychlostí až 5,76 Mbit/s. Rovněž i tato hodnota je uváděna na jednu buňku a v praxi lze běžně dosáhnout rychlosti 1,4 Mbit/s, což je oproti dosavadní rychlosti 384 kbit/s stále podstatné zvýšení. Implementace technologie HSUPA do současného systému spočívá pouze v softwarové úpravě, a není tak potřeba žádné hardwarové změny. Problém však nastává u mobilních terminálů, kde po dosažení vyšších přenosových rychlostí, je třeba vyšší vysílací výkon, čímž se zvýší spotřeba UE, ale také hodnota SAR (Specific Absorption Rate). Ke zvýšení přenosové rychlosti jsou využity stejné úpravy jako v technologii HSDPA. Jedná se o navýšení počtu dalších přenosových kanálů, rychlé přidělování rádiových prostředků, využití hybridní metody automatické žádosti o opakování nebo zkrácení doby přenosu dat. V některých úpravách se vrací zpět k původnímu systému UMTS zejména ke změně přenosové rychlosti pomocí různého činitele rozprostírání, použití dlouhého intervalu TTI nebo podpora soft handoveru.

Technologie HSUPA využívá zkrácený interval $TTI = 2$ ms, pokud se zrovna nepřenášejí data vysokou rychlostí, využívá také $TTI = 10$ ms (Tab. 12). Tato hodnota se volí i v případě, že je uživatel na okraji buňky, protože rychlý přenos signalizace a dat by v této situaci výrazně ovlivnil spotřebu uživatelského terminálu. Snižuje se tím však přenosová rychlost, která dosahuje při využití $TTI = 10$ ms maximálně 2 Mbit/s. [487]

Třída	Maximální počet přidělených kódů	Maximální přenosová rychlost [Mbit/s]	Minimální SF	TTI [ms]
1	1	0,72	3	10
2	2	1,45	3	10
	2	1,45	2	2
3	2	1,45	2	10
4	2	2,00	1	10
	2	2,91	1	2

5	2	2,00	1	10
6	2+2	2,00	1	10
	2+2	5,76	1	2

Tabulka 12: Třídy HSUPA [17]

6.2.4 E-EDGE

Technologie EDGE vycházející z Release 98 byla v Release 7 předvedena v nové verzi E-EDGE (Evolved EDGE), někdy také označována jako EDGE Evolution nebo EDGE II. Možnosti technologie EDGE byly vyčerpány již v rámci systému GSM. Hlavním limitem byla malá šířka pásma, a protože poskytovatelé přidělovaly maximálně 4 timesloty, musely se k navýšení přenosové rychlosti hledat jiné řešení. Tímto řešením je použití dvou nosných pro downlink, na základě toho může poskytovatel přidělit uživateli dvojnásobný počet timeslotů, a zvýšit tak přenosovou rychlost. V porovnání se stávajícími technologiemi EDGE zavádí E-EDGE další vícestavové modulace, s podporou vyšších symbolových rychlostí a turbo kódů. Interval TTI je ponížěn z 20 ms na 10 ms a latence poklesla z 200 ms na 80 ms. Také efektivněji využívá kapacitu sítě, zvyšuje spektrální účinnost a navyšuje kvalitu služeb QoS pro Push To Talk a VoIP. Technologie E-EDGE je plně zaměnitelná se stávajícími systémy a její implementace spočívá pouze v softwarové úpravě. [498]

Technologie E-EDGE definuje nová modulační a kódová schémata, dělí se na úroveň A s maximální přenosovou rychlostí na jeden timeslot 98,4/76,8 kbit/s a úroveň B s rychlostí 118,4 kbit/s. Úroveň A pracuje s symbolovou rychlostí 270,833 kS/s, kdežto úroveň B pracuje s vyšší symbolovou rychlostí 325 kS/s. Každá úroveň se dále dělí na jednotlivé směry přenosu, kde se v downlinku využívají turbo kódy a v uplinku konvoluční kódování. Úroveň A používá v downlinku modulace 8-PSK, 16-QAM a 32-QAM (32-Quadrature Amplitude Modulation) (Tab. 13). V uplinku se používá pouze 16-QAM, ale podporuje také MCS-5 a MCS-6 s modulací 8-PSK (Tab. 14). Úroveň B používá v downlinku i v uplinku modulace QPSK, 16-QAM a 32-QAM (Tab. 15 a Tab. 16).

Použitím vícestavových modulací a dvou nosných se navyšuje přenosová rychlost ve středu buňky a nejbližším okolí. Naopak na okrajích buňky se využívá diverzifikačního příjmu k ponížení interferencí a turbo kódů a navýšení odolnosti proti chybám. Teoreticky je s technologií E-EDGE možné dosáhnout rychlosti 1,8944 Mbit/s v downlinku a 0,9472

Mbit/s v uplinku. V běžné praxi je uživatel schopen dosáhnout rychlosti 1 Mbit/s v downlinku a 0,5 Mbit/s v uplinku, což je srovnatelné s ADSL službami. [508]

Modulační a kódové schéma	Teoretická přenosová rychlost na 1 timeslot [kbit/s]	Modulace
DAS-5	22,4	8-PSK
DAS-6	27,2	8-PSK
DAS-7	32,8	8-PSK
DAS-8	44,8	16-QAM
DAS-9	54,4	16-QAM
DAS-10	65,5	32-QAM
DAS-11	81,6	32-QAM
DAS-12	98,4	32-QAM

Tabulka 13: Modulační a kódová schémata E-EDGE úroveň A, downlink [518]

Modulační a kódové schéma	Teoretická přenosová rychlost na 1 timeslot [kbit/s]	Modulace
MCS-5	22,4	8-PSK
MCS-6	29,6	8-PSK
UAS-7	44,8	16-QAM
UAS-8	51,2	16-QAM
UAS-9	59,2	16-QAM
UAS-10	67,2	16-QAM
UAS-11	76,8	16-QAM

Tabulka 14: Modulační a kódová schémata E-EDGE úroveň A, uplink [528]

Modulační a kódové schéma	Teoretická přenosová rychlost na 1 timeslot [kbit/s]	Modulace
DBS-5	22,4	QPSK
DBS-6	29,6	QPSK
DBS-7	44,8	16-QAM
DBS-8	59,2	16-QAM
DBS-9	67,2	16-QAM
DBS-10	88,8	32-QAM
DBS-11	108,8	32-QAM
DBS-12	118,4	32-QAM

Tabulka 15: Modulační a kódová schémata E-EDGE úroveň B, downlink [538]

Modulační a kódové schéma	Teoretická přenosová rychlost na 1 timeslot [kbit/s]	Modulace
UBS-5	22,4	QPSK
UBS-6	29,6	QPSK
UBS-7	44,8	16-QAM
UBS-8	59,2	16-QAM
UBS-9	67,2	16-QAM
UBS-10	88,8	32-QAM
UBS-11	108,8	32-QAM
UBS-12	118,4	32-QAM

Tabulka 16: Modulační a kódová schémata E-EDGE úroveň B, uplink [548]

6.2.5 HSPA+

Technologie HSDPA a HSUPA zlepšují downlink a uplink systému UMTS Release 99 a celkově se označují jako HSPA (High Speed Packet Access). I když mají tyto technologie mnoho společného, jsou zcela samostatné a na sobě nezávislé. V praxi je lze implementovat odděleně. Release 7 přináší technologii HSPA+, která využívá obě tyto technologie současně. Zároveň přidává další vylepšení pro dosažení vyšších přenosových rychlostí, a to např. použití účinnější modulace, techniky MIMO 2x2, nebo nespojitého příjmu a vysílání. [558]

Technologie HSPA+ využívá zatím všech vylepšení, které byly do UMTS implementovány. V downlinku je použita technologie HSPDA, která byla vymezena

v Release 5. Tato úprava spočívá v použité modulaci, kdy je 16-QAM rozšířena ještě o modulaci 64-QAM. Jedná se rovněž o kvadraturní amplitudovou modulaci, která se liší jen tím, že jeden symbol je reprezentován šesti bity. Ve srovnání s 16-QAM tedy dosahuje o polovinu vyšší přenosové rychlosti. Rovněž v tomto případě platí, že čím vyšší je počet stavů, tím více se snižuje odolnost vůči interferencím. Požadovaný odstup signálu od šumu je pro modulaci 16-QAM přibližně 21 dB, kdežto pro 64-QAM je potřeba alespoň 27 dB. Modulace 64-QAM se nedá z tohoto důvodu použít v celé buňce, ale převážně v blízkosti Node B, s dostatečně kvalitním signálem. Zavedením modulace 64-QAM se přenosová rychlost v downlinku navýší až na 21,6 Mbit/s. V uplinku se využívá technologie HSUPA, která byla definována v Release 6. Rovněž i zde je jedinou úpravou rozšíření modulace QPSK ještě o modulaci 16-QAM, a tím se přenosová rychlost v uplinku zvýší až na 11,5 Mbit/s. Technologie HSPA+ podporuje techniku MIMO, ale pouze v downlinku a jen s modulací QPSK nebo 16-QAM. Použitím MIMO 2x2 u technologie HSDPA se její přenosová rychlost navýší až na 28 Mbit/s. [568]

Třídy HSPA+ jsou rozděleny na downlink a uplink, protože v každém směru je použita jiná technologie. V downlinku odpovídají třídy 1-12 třídám definovaným pro technologii HSDPA s maximální přenosovou rychlostí je 14,4 Mbit/s. Dále jsou definovány třídy, které podporují modulaci 64-QAM, se kterými přenosová rychlost vzroste na 21,1 Mbit/s a třídy s podporou techniky MIMO 2x2, s maximální přenosovou rychlostí 28 Mbit/s. Kombinace modulace 64-QAM a techniky MIMO není v Release 7 definována. V uplinku je přidána pouze třída 7, ta podporuje modulaci 16-QAM, tím vzroste přenosová rychlost na 11,5 Mbit/s. Ostatní třídy odpovídají technologii HSUPA s maximální přenosovou rychlostí 5,76 Mbit/s. [578]

6.2.5.1 Release 8

Je dalším krokem ve vývoji HSPA+, jelikož umožňuje současné využití vícestavové modulace 64-QAM a techniky MIMO v downlinku. Dochází tím k navýšení přenosové rychlosti, ale rovněž k nutnosti zavedení dalších tříd terminálů HSPA+. Jedná se o třídy 19 a 20 s maximální přenosovou rychlostí 35,3 Mbit/s a 42,2 Mbit/s (Tab. 7.7). Rovněž zavádí Dual Carrier HSDPA. Podobně jako přináší Release 7 některé změny pro downlink, Release 8 je implementuje pro uplink. Především Flexible RLC, který dovoluje zvětšení RLC paketu, tedy snížení režie přenosu a kanál E-FACH pro rychlejší navázání spojení. Vylepšení se dočkal i režim TDD s chipovou rychlostí 1,28 Mchip/s, do kterého byla

nainstalována modulace 64-QAM a technika MIMO v downlinku, CPC, kanál E-FACH a další. [589]

HSDPA bylo představeno již v Release 5 a od té doby je průběžně vylepšováno použitím vícecestavových modulací, techniky MIMO a dalších úprav. Většina sítí UMTS má v rámci licence přidělenou šířku pásma alespoň 10 MHz, přitom šířka jednoho kanálu je 5 MHz. Využitím DC-HSDPA (Dual Carrier-HSDPA), které je někdy také označované jako Dual Cell-HSDPA, kde využitím dvou sousedních kanálů, lze dosáhnout dvojnásobné přenosové rychlosti. DC-HSDPA v kombinaci s modulací 64-QAM dosahuje obdobné přenosové rychlosti jako použití techniky MIMO, a to 42 Mbit/s. Na rozdíl od modulace 64-QAM a techniky MIMO, která se používá pro zvýšení přenosové rychlosti především ve středu buňky, DC-HSDPA lze využít i na okrajích buněk. Release 8 vymezuje nové třídy terminálů pro DC-HSDPA, přičemž třídy 21 a 22 podporují modulace QPSK a 16-QAM s maximální přenosovou rychlostí 23,4 Mbit/s a 28 Mbit/s. Třídy 23 a 24 podporují i modulaci 64-QAM, a mají tak rychlosti 25,3 Mbit/s a 42,2 Mbit/s. Kombinace DC-HSDPA a techniky MIMO není v tomto releasu podporována. [599]

6.2.5.2 Release 9

Release 7 přinesl techniku MIMO, která umožňuje zvýšit přenosovou rychlost až na dvojnásobek, ale protože nepodporovala modulaci 64-QAM, nemohla být plně využita. Release 8 přinesl DC-HSDPA, který přenosovou rychlost sice zvýšila dvakrát, ale zase nepodporoval techniku MIMO. Maximálního využití dosahuje Release 9, který zavedl kombinaci obou možností, a zvýšil tak přenosovou rychlost až na 84 Mbit/s. Release 9 tedy představuje nové třídy terminálů, kde třídy 25 a 26 podporují modulace QPSK a 16-QAM s maximální přenosovou rychlostí 46,7 Mbit/s a 55,9 Mbit/s. Třídy 27 a 28 podporují jak MIMO, DC-HSDPA, tak i 64-QAM s maximální přenosovou rychlostí 70,9 Mbit/s a 84,4 Mbit/s. Zatímco v Release 8 musely být dvě nosné sousední, Release 9 přinesl pro DC-HSDPA možnost využití nosných z různých frekvenčních pásem. Tím DB-DC-HSDPA (Dual Band-DC-HSDPA) vede k lepšímu využití frekvenčního spektra. Specifikace ovšem uvádí, některá omezení, tedy povolené kombinace pásem pro danou oblast (např. 900 MHz a 2100 MHz nebo 1500 MHz a 2100 MHz). [20]

V downlinku se již dosáhlo významného zvýšení přenosové rychlosti, především pomocí techniky MIMO a DC-HSDPA. Některá vylepšení se dají použít i v uplinku, a tím zvýšit přenosovou rychlost i směrem od uživatele. Release 9 představil DC-HSUPA (Dual

Carrier-HSUPA) , tedy využití dvou sousedních nosných pro přenos dat. Release 9 tak definuje nové třídy terminálů, kde třída 8 podporuje modulaci pouze QPSK s přenosovou rychlostí 11,5 Mbit/s a třída 9 podporuje modulace QPSK a 16-QAM, a tím maximální přenosová rychlost vzroste na 23,0 Mbit/s. [20]

6.2.5.3 Release 10

Protože se stále více zvyšují požadavky na přenosovou rychlost a nabízené služby, přináší Release 10 možnost využití více nosných neboli MC-HSPDA (Multi Carrier-HSDPA). Specifikace umožňuje využití tří nebo čtyř nosných současně. Přitom jednotlivé nosné musí být sousední. MC-HSDPA podporuje techniku MIMO a současně Release 9 Dual Band, přitom omezení na sousední nosné zůstává zachováno. Princip MC-HSDPA je totožný s DC-HSDPA. Jedinou podmínkou, kterou musí daný poskytovatel služeb splnit je ta, že musí mít k dispozici větší šířku pásma. Pro tři nosné 15 MHz a pro čtyři nosné dokonce 20 MHz. Release 10 vymezuje nové třídy terminálů, kde třídy 29 a 31 podporují modulace QPSK, 16-QAM i 64-QAM s maximální přenosovou rychlostí 70,9 Mbit/s a 84,4 Mbit/s. Třídy 30 a 32 podporují navíc techniku MIMO 2x2, a dosahují tak rychlosti 141,8 Mbit/s a 168,8 Mbit/s. [21]

Režim TDD s chipovou rychlostí 1,28 Mchip/s je rozšířen o další principy z režimu FDD. Použití opakovače umožňuje snížení výkonu UE, zkvalitnění poměru signálu k šumu, a tím zvýšení kapacity sítě. Použití opakovače je výhodné jak v místech s malou hustotou provozu, čímž se zvyšuje dosah, tak i v místech se špatným šířením signálu (tunely, metra, vlaky). Dále umožňuje použití dvou antén UE v downlinku pro HSPA a HSPA+, a tím lze dosáhnout významně vyšší přenosové rychlosti v downlinku využitím diverzifikačního příjmu. [260]

6.2.5.4 Release 11

Rozšiřuje současné technologie HSDPA a HSUPA o další možnosti a kombinace. V downlinku je MC-HSDPA v kombinaci s technikou MIMO 2x2 navýšeno na osm nosných s maximální přenosovou rychlostí 336 Mbit/s. Druhou možností je osm nosných v kombinaci s technikou MIMO 4x4 s maximální přenosovou rychlostí 672 Mbit/s. V uplinku bylo DC-HSUPA rozšířeno o podporu modulace 64-QAM a to společně v kombinaci s technikou MIMO 2x2 s maximální přenosovou rychlostí 70 Mbit/s. [22]

6.2.6 LTE (3,9G)

Tento systém byl představen jako převratná novinka v Release 8, který je podrobně popsán v kapitole 7. Při využití šířky pásma 20 Mhz a techniky MIMO 4x4 umožnil dosáhnout až 326 Mbit/s v downlinku a 86 Mbit/s v uplinku.

6.3 LTE-A

Tento systém je nástupcem technologie LTE a je teprve v začátcích. V současné době je pomalu zaváděn do praxe. Podrobněji je popsán v kapitole 8.

7 LTE

Systém LTE, který je součástí Release 8 a bývá často označován jako čtvrtá generace mobilních sítí. Avšak označení není zcela správné, jelikož systém LTE nesplňuje všechny požadavky na systémy 4G, které jsou stanovené Mezinárodní telekomunikační unií. Například požadavek na přenosovou rychlost 1 Gbit/s pro nepohybuující se UE a 100 Mbit/s u rychle se pohybujícího UE naplňuje až LTE Advanced, který je součástí Release 10. [611]

Vývoj systému LTE zajišťuje sdružení 3GPP, jeho hlavním cílem je z LTE udělat celosvětový standard, jakým byl po několik desetiletí systém GSM, jehož využívalo 80% světových mobilních sítí. Systém LTE zvyšuje přenosovou rychlost až na desítky Mbit/s, také snižuje latenci a efektivně využívá přidělené spektrum. Kromě toho zvyšuje kapacitu sítě, dosah, a tím i pokrytí oblastí s nízkou hustotou osídlení vysokorychlostními datovými přenosy. Naproti tomu umožňuje pokrýt stejné území s nižším počtem základnových stanic. Rovněž ho lze využít pro rychlý přenos dat, videohovory ve vysokém rozlišení, televizní vysílání, taktéž pro přenos hlasu a hlasových služeb. Nemalou výhodou systému LTE je jeho použití na jakékoliv frekvenci, protože pracuje jak v licencovaných, tak i v nelicencovaných pásmech od 700 MHz do 2,4 GHz. Nižší frekvence umožňují lepší šíření signálu, na vyšších frekvencích je naopak výhodou, že je k dispozici větší šířka pásma. Systém LTE je založen na protokolu IP, což zlepšuje spolupráci s dalšími mobilními, ale i pevnými sítěmi a tvoří základ AIPN sítí (All IP Networks) která je založena právě na transportním protokolu TCP/IP. Všechny internetové služby budou poté lépe dostupné nejen uživatelům pevných sítí, ale i uživatelům sítí mobilních. [23]

7.1 Rozdělení kmitočtového pásma

Specifikace 3GPP přidělila pro systém LTE 24 párových pásem pro režim FDD (Tab. 17) a 9 nepárových pásem pro režim TDD (Tab. 18). Některá pásma jsou v současnosti používána jinými systémy, to umožňuje, že LTE s nimi může pracovat společně. Výhodou začlenění systému LTE je flexibilní šířka pásma 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz a 20 MHz pro režim FDD a 1,6 MHz a 3,2 MHz pro režim TDD. Flexibilita šířky pásma umožňuje využití současných pásem, pro které se vyžaduje šířka pásma menší nebo rovna 5 MHz, a v tomto parametru je LTE srovnatelné s HSPA+. Výhodou je, že nově přidělená pásma mohou být využita pro širokopásmové možnosti až do 20 MHz, a tím tedy dosahovat vyšších přenosových rychlostí. LTE může v důsledku různé šířce

pásma využít veškeré volné frekvence, i tzv. digitální dividendy, to jsou kmitočty dnes již neexistujícího analogového vysílání. [621]

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	147,59-1500,9	1427,9-1452,9	25
12	728-746	698-716	18
13	746-756	777-787	10
16	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	31510-3600	3410-3500	90
23	2180-2200	2000-2020	20
24	1525-1559	1626,5-1660,5	34

Tabulka 17 : Rozdělení Kmitočtového pásma LTE FDD [163]

Pásmo	Downlink / Uplink [MHz]	Šířka pásma [Mhz]
33	1900-1920	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

Tabulka 18 : Rozdělení kmitočtového pásma LTE TDD [641]

7.2 OFDM

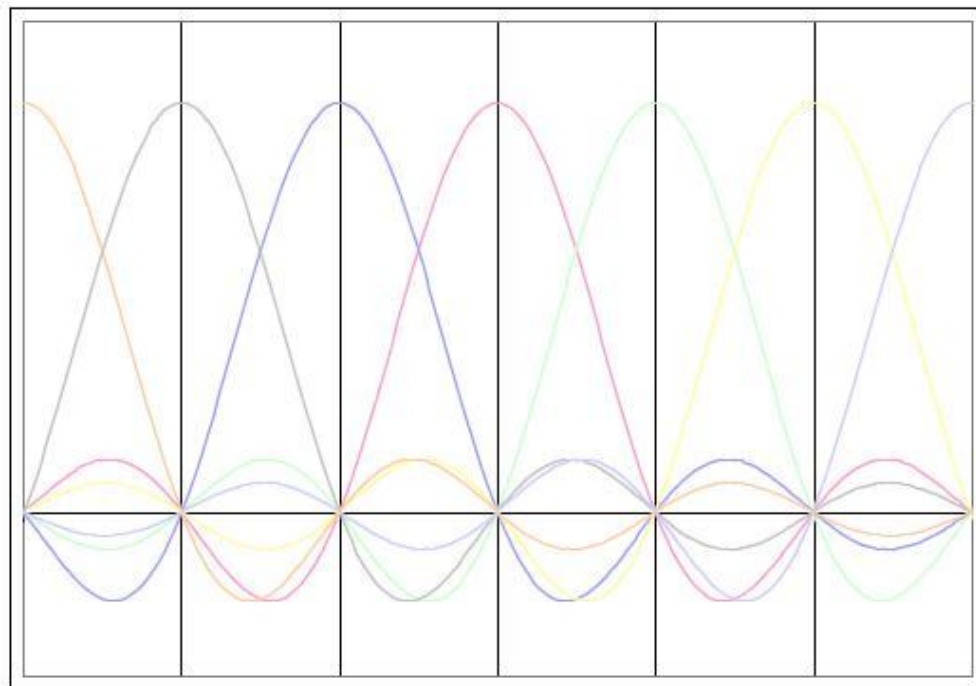
OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) neboli ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením pracuje na principu rozdělení jednoho vysokorychlostního sériového datového toku na několik stovek až tisíc paralelních toků s malou rychlostí. Každý tento tok využívá jiný nosný kmitočet. Čím větší je přenosový kanál, tím více subnosných je možné použít, a tím vyšší je přenosová rychlost. Z toho vyplývá, že pouze s šířkou kanálu 20 MHz lze dosáhnout maximálních přenosových rychlostí. Přenos dat s využitím více nosných, byl objeven již dříve, svého rozvoje se teprve dočkal až v současnosti, a to díky FFT/IFFT (Fast Fourier Transform/Inverse Fast Fourier Transform) a signálovým procesorům. OFDM se používá také pro přenos signálu v ADSL, bezdrátových standardech jako WiFi (Wireless Fidelity) či WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) i ve všech v současné době zaváděných variantách pozemního digitálního, televizního a rozhlasového vysílání. [23]

Vstupní data se pomocí kanálového kódování FEC a prokládání ochrání proti chybám při přenosu. Některou z modulací QPSK, 16-QAM nebo 64-QAM jsou zakódované bity namapovány do komplexních symbolů a v převodníku SPC (Serial to Parallel Converter) převedeny na paralelní toky. Dále jsou data mapována na jednotlivé subnosné. Modulátor OFDM je realizován signálovým procesorem, ten provádí výpočet inverzní rychlé Fourierovy transformace IFFT, a převádí tak signál z frekvenční oblasti do oblasti časové. Při přenosu dat pomocí více nosných, se nesmějí jednotlivé nosné vzájemně

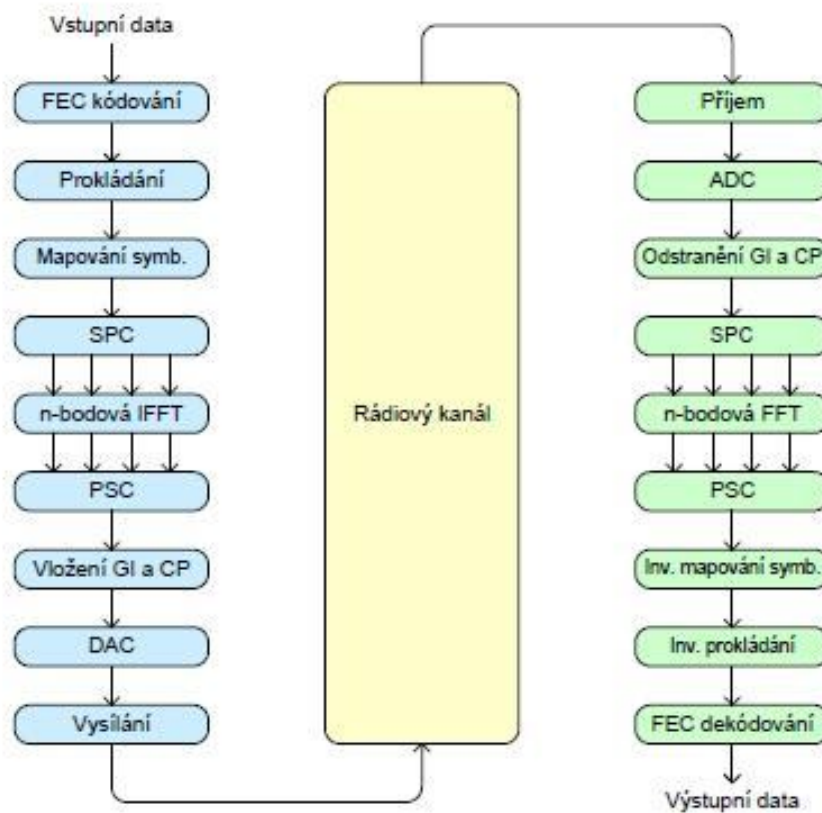
ovlivňovat, musí být proto odděleny. Jelikož u OFDM jsou nosné vzájemně ortogonální na sobě nezávislé, mohou se jejich spektra překrývat. [23]

Maximum jedné nosné se vždy překrývá s minimy ostatních nosných (Obr. 24), tím je dosaženo vysoké spektrální účinnosti. Jedná se o průběh $\sin(x)/x$ neboli funkce sinc.

Následně jsou data v PSC (Parallel to Serial Converter) převedena zpět na jeden sériový tok a doplněna o ochranný interval a cyklický prefix. Tím se eliminuje vznik ISI (Inter Symbol Interference) a ICI (Inter Carrier Interference). Aby nedocházelo k rušení sousedních kanálů, dochází k tvarování signálu, nejčastěji pomocí RC filtru (Raised Cosine). D/A (Digital to Analog Converter) převodník převede signál na analogový, který se poté výkonově zesílí a je vyzářen do prostoru. Na přijímací straně jsou inverzními postupy získána přenášená data. Po přijetí je analogový signál zesílen a v A/D převodníku převeden na digitální. Poté se obnoví spektrum a odstraní cyklický prefix. Ze sériového toku se vytvoří toky paralelní, tyto jsou pomocí FFT převedeny z časové oblasti do oblasti frekvenční a v převodníku PSC následně převedeny zpět na výsledný sériový tok. Inverzním mapováním jsou ze symbolů získány bity, které následně spolu s inverzním prokládáním a kanálovým dekódováním vytvářejí výstupní data. Blokové schéma vysílače a přijímače OFDM je na Obr. 23.



Obrázek 23 : Průběh funkce sinc



Obrázek 24 : Blokové schéma vysílače a přijímače OFDM [651]

Protože při přenosu rádiovým kanálem dochází k vícecestnému šíření, dochází také k mezisymbolovým interferencím, neboli ISI a interferencím mezi nosnými neboli ICI.

K omezení ISI se využívá ochranný interval GI (Guard Interval), po jehož dobu se před každým vyslaným OFDM symbolem nevysílá žádný signál. Tím je zajištěno, že zpozdí-li se předcházející symbol, nebude ovlivněn následně vyslaným symbolem. Doba trvání GI se mění v závislosti na parametrech přenosového kanálu. Omezení ICI je potřebné, protože dochází k narušení vzájemné ortogonality nosných. ICI se eliminuje pomocí cyklického prefixu CP (Cyclic Prefix), kdy na počátku každého vyslaného symbolu je přidána část konce daného symbolu o délce zvoleného ochranného intervalu GI. Čím delší je cyklický prefix, tím více se zvyšuje odolnost proti vícecestnému šíření, ale jen za cenu méně přenesených užitečných dat. Cyklický prefix tak vytvoří souběžně i ochranný interval, podmínky ortogonality budou dodrženy, a dochází tedy k eliminaci ICI a ISI zároveň. GI

s CP se vkládá mezi jednotlivé symboly a na přijímací straně se ochranný interval i cyklický prefix jednoduše odstraní. [24]

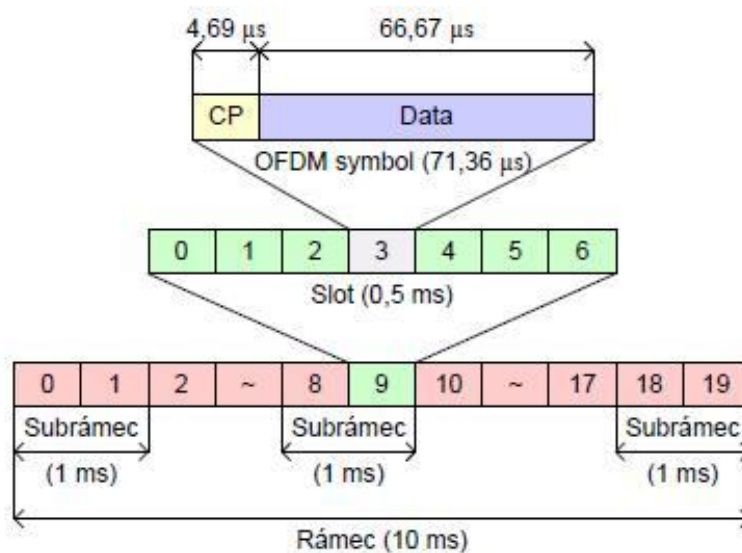
Výhody a nevýhody OFDM

Největší výhodou použití OFDM je přizpůsobení aktuálním podmínkám přenosu, protože podle dostupné šířky pásma je přidělován počet subnosných. Čím větší je šířka pásma, tím více subnosných se může použít, a tím i navýšit přenosovou rychlost. Použití OFDM rovněž umožňuje maximální míře využít přidělené spektrum, protože jsou subnosné umístěny velmi blízko sebe. OFDM je vysoce odolné proti mnohacestnému šíření, frekvenčně selektivnímu úniku, výrazně eliminuje ISI a ICI a vyznačuje se vysokou spektrální účinností. OFDM má také své nevýhody, které lze, ale v praxi minimalizovat. Největší nevýhodou je frekvenční offset neboli posunutí sousedních subnosných. Vlivem dopplerova jevu při vzájemném pohybu přijímače a vysílače. Offset poruší podmínky ortogonality a začne docházet ke vzniku ICI, které lze eliminovat pomocí CP. Rovněž je nevýhodné pro vysokou hodnotu PAPR (Peak to Average Power Ratio), což požaduje použití lineárních zesilovačů a způsobuje velké výkonové ztráty. Průběh signálů OFDM se blíží gaussovskému šumu, protože obálka není konstantní. Obtížné zpracování pomocí několika bitových převodníků je v praxi vyřešeno použitím signálových procesorů. [24]

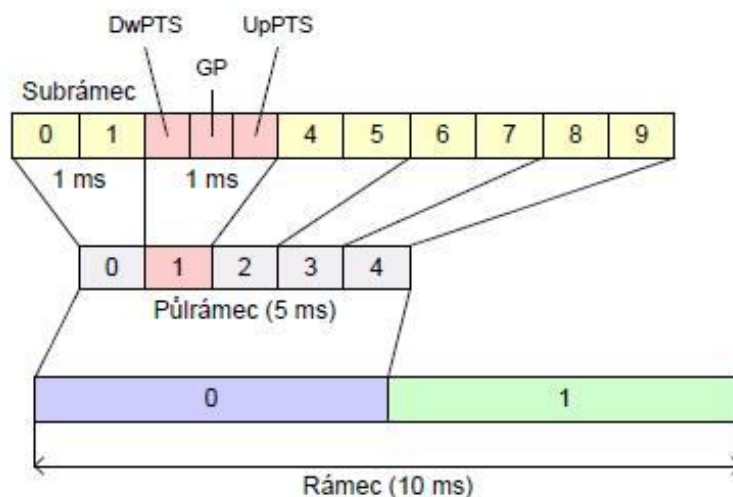
7.3 Rámcová struktura

Nejmenším prvkem je OFDM symbol, který se skládá z užitečných dat a cyklického prefixu. Při použití normálního (krátkého) cyklického prefixu tvoří jeden slot 7 OFDM symbolů o délce 0,5 ms, zatímco při rozšířeném (dlouhém) prefixu je v jednom slotu pouze 6 OFDM symbolů. Dva sloty vytvoří subrámeček s délkou 1 ms, což odpovídá intervalu TTI. Sloučením 10 subrámečků čili 20 slotů vznikne rámeček s délkou 10 ms. Takto vzniklý rámeček se označuje jako rámeček typu 1 (Obr. 26) a využívá se pro režim FDD a vždy je jeden celý rámeček použit pro downlink a jeden pro uplink. Downlink a uplink je oddělen frekvenčně. Pro režim TDD se využívá rámeček typu 2 (Obr. 27), který má opět rámeček s délkou 10 ms, ovšem ten je rozdělen na dva půlramečky o délce 5 ms. Každý půlrameček se skládá z pěti subrámečků po 1 ms, přičemž jeden ze subrámečků nepřenáší data, ale trojici polí definované k přepínání mezi downlinkem a uplinkem. Délka DwPTS (Downlink Pilot Timeslot) a UpPTS (Uplink Pilot Timeslot) se liší ovšem celkem i s GP (Guard Period) je to právě 1 ms. Standard zahrnuje celkem sedm uspořádání jednotlivých subrámečků s periodou přepínání buď 5ms, nebo 10 ms (Tab. 19). V případě přepnutí s periodou 5 ms se speciální

rámec použije v obou půlrámcích, zatímco při přepnutí s periodou 10 ms se využije pouze jednou, a to v prvním půlrámcí. Zároveň je pro všechny konfigurace stanoveno, že subrámece 0 a 5 jsou vždy vyhrazeny pro downlink, stejně jako, že vždy po speciálním subrámcí následuje subrámec vyhrazený pro uplink. [24]



Obrázek 25 : Rámec typu 1 pro LTE FDD [661]



Obrázek 26 : Rámec typu 2 pro LTE TDD [671]

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

D – downlink, U – uplink, S – speciální subrámec (DwPTS, GP, UpPTS)

Tabulka 19 : Uspořádání subrámců LTE TDD [681]

Normální cyklický prefix má délku 4,69 μs , a eliminuje tak všechny odražené signály, které jsou maximálně o 1,4 km delší než přímý signál. Dlouhý cyklický prefix má délku 16,67 μs , čímž eliminuje odražené signály až o 10 km delší než přímý signál a využívá se v buňkách větších rozměrů. Užitečná data mají vždy délku 66,67 μs , z čehož vyplývá délka trvání jednoho OFDM symbolu, která je při normálním cyklickém prefixu 71,36 μs a při rozšířeném 83,33 μs . Aby byla zajištěna délka jednoho slotu přesně 0,5 ms, je při normálním cyklickém prefixu využito 7 OFDM symbolů, zatímco při rozšířeném pouze 6 OFDM symbolů. U normálního cyklického prefixu je navíc první OFDM symbol s poněkud delším cyklickým prefixem, který má délku 5,21 μs a v tomto případě je délka OFDM symbolu 71,88 μs (Tab. 20). [691]

CP	Počet OFDM symbolů ve slotu	Doba trvání CP [μs]	Doba trvání užitečných dat [μs]	Délka OFDM symbolu [μs]
Normální	7	5,21 / 4,69	66,67	71,88 / 71,36
Rozšířený	6	16,67	66,67	83,33

Tabulka 20 : Druhy cyklického prefixu v systému LTE [701]

OFDM v systému LTE využívá až 2048 subnosných s odstupem 15 kHz. Počet použitých subnosných se odvíjí od dostupné šířky pásma, přičemž minimum je stanoveno na 72 subnosných. Základní jednotkou přenosu v systému LTE je resource blok, který se skládá z 12 subnosných o celkové šířce pásma 180 kHz. Každá subnosná přenáší podle

zvoleného cyklického prefixu buď 6, nebo 7 OFDM symbolů o délce 0,5 ms. Resource blok je tedy tvořen 72 nebo 84 resource elementy. [711]

Ne všechny nosné ovšem přenášejí užitečná data, ale je potřeba přenášet i různé řídicí informace. Například pro zajištění časové synchronizace a eliminaci frekvenčního offsetu se v každém resource bloku přenášejí tzv. pilotní nosné. Podle typu cyklického prefixu se mění jejich umístění, ale vždy se přenášejí v každé šesté subnosné. Při normálním cyklickém prefixu jsou v prvním a pátém OFDM symbolu a při dlouhém cyklickém prefixu v prvním a čtvrtém OFDM symbolu. [721]

7.4 Fyzické kanály a signály

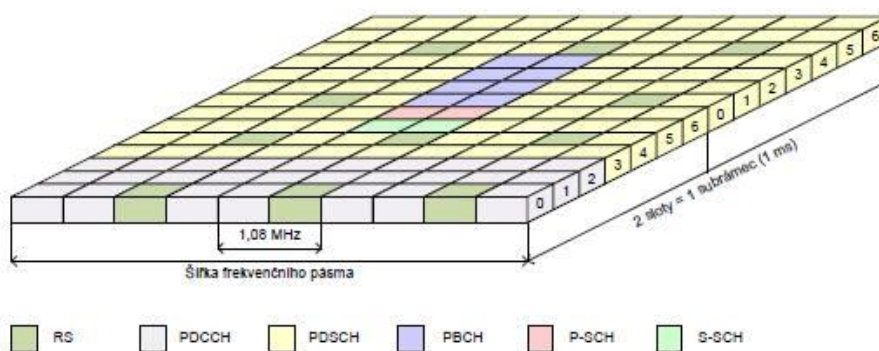
Referenční signály RS (Reference Signal) slouží pro předběžné výpočty parametrů přijatého signálu, především amplitudy a fáze. Využívají se jak v downlinku, tak v uplinku, kde navíc slouží k synchronizaci UE s kanálem. Synchronizační signály se používají k dekodování identifikace buňky, čímž umožňují UE synchronizaci se sítí. Identifikační číslo buňky je přenášeno pomocí dvou signálů P-SCH (Primary Synchronization Signal) a S-SCH (Secondary Synchronization Signal). [24]

Downlink:

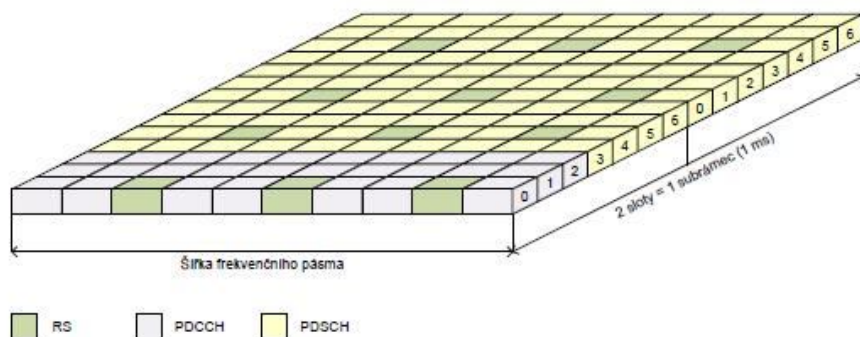
- PBCH (Physical Broadcast Channel) – přenos broadcastových informací o buňce, např. její identifikační číslo
- PDCCH (Physical Downlink Control Channel) – přenos řídicích informací
- PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) – přenos uživatelských dat
- PMCH (Physical Multicast Channel) – kanál pro MBMS
- PCFICH (Physical Control Format Control Channel) – přenos informací potřebných pro dekodování uživatelských dat
- PHICH (Physical HARQ Indicator Channel) – přenos řídicích informací pro HARQ (ACK/NACK) [24]

Jak již bylo zmíněno, každý rámeček se skládá z deseti subrámečků, každý subrámeček obsahuje dva sloty a každý slot 6 nebo 7 OFDM symbolů. Referenční signál RS se přenáší na každém nultém a čtvrtém OFDM symbolu v každém slotu. Umístění RS na jednotlivé nosné se liší pro každou anténu. Synchronizační signály P-SCH a S-SCH jsou přenášeny

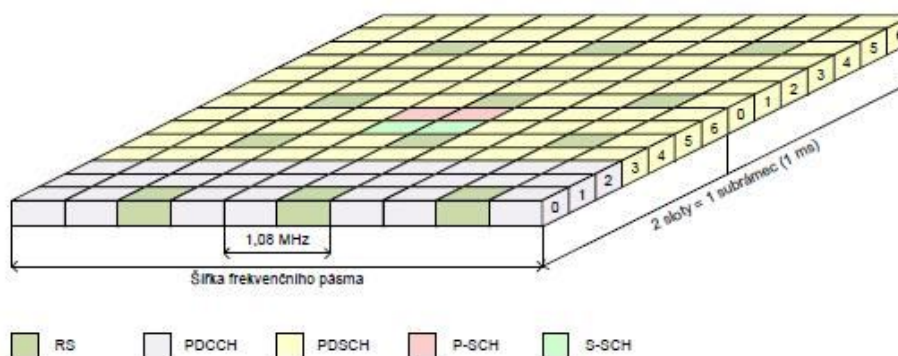
vždy v prvním slotu v nultém a pátém subrámcí a jsou rozmístěny na 62 nosných kolem středu přenášeného pásma. S-SCH je přenášen v pátém OFDMsymbolu a P-SCH v šestém OFDM symbolu. PBCH je přenášen v nultém až třetím OFDM symbolu v druhém slotu prvního subrámce a je rozmístěn v 72 nosných kolem středu přenášeného pásma. PDCCH je přenášen vždy v nultém až druhém OFDMsymbolu v prvním slotu každého subrámce. Řídicí kanály jsou rozmístěny kolem středu přenášeného pásma a zabírají vždy 1,08 MHz. Ostatní subnosné se použijí pro přenosuživatelských dat kanálem PDSCH (Obr. 27, Obr. 28, Obr. 29). [24]



Obrázek 27 : Downlink LTE – 0. Subrámec



Obrázek 28 : Downlink LTE – 1.-4.6.-9. subrámec

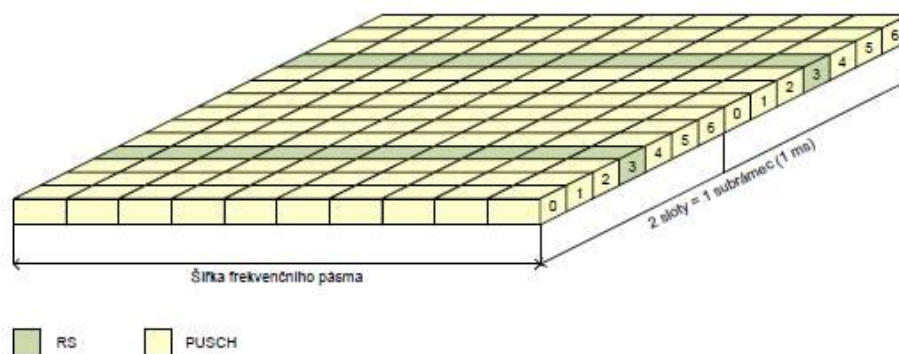


Obrázek 29 : Downlink LTE – 5. subrámec

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

Rámcová struktura uplinku je stejná se strukturou v downlinku, počet SC-FDMA(Single Carrier FDMA) symbolů opět závisí na použitém cyklickém prefixu. Referenční signály RS se přenáší vždy na všech nosných ve třetím SC-FDMA symbolu každého slotu (Obr. 30). [24]



Obrázek 30 : Uplink LTE – subrámeček

7.5 Třídy terminálů

Všechny třídy terminálů musí být schopny pracovat s šířkou pásma 1,4 MHz až 20 MHz. V downlinku jsou podporovány modulace QPSK a kvadrurní amplitudové modulace 16-QAM a 64-QAM. V uplinku jsou podporovány stejné modulace jako v downlinku, ovšem podobně jako u systému HSPA, modulaci QPSK a 16-QAM podporují všechny uživatelské terminály, zatímco podpora modulace 64-QAM v uplinku je pouze pro nejvyšší třídu. Třída 1 techniku MIMO nepodporuje vůbec, zatímco třída 5 podporuje techniku MIMO 4x4 (Tab. 21). [24]

Třída	Downlink [MHz]	Uplink [MHz]	Modulace downlink	Modulace uplink	MIMO
1	10	5	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16-QAM	1x1

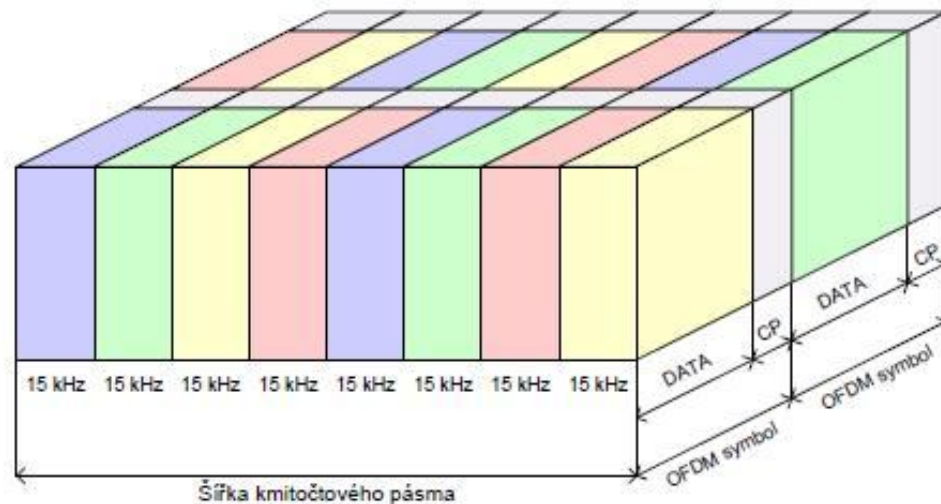
2	50	25	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16 QAM	2x2
3	100	50	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16 QAM	2x2
4	150	50	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16 QAM	2x2
5	300	75	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16 QAM, 64-QAM	4x4

Tabulka 21 : Třídy terminálů LTE

7.6 Přístupová technika

7.6.1 OFDMA

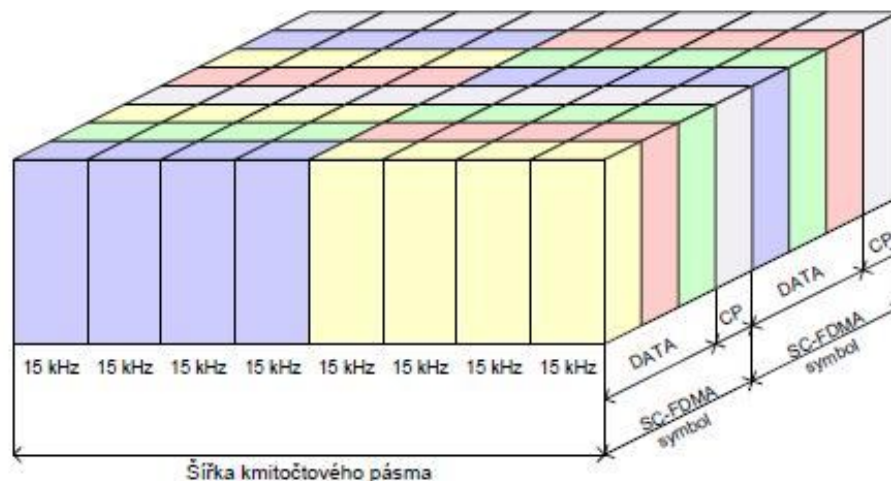
System LTE používá v downlinku mnohonásobný přístup OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), který využívá ortogonální frekvenční multiplex OFDM, přičemž všechny subnosné se rozdělí mezi jednotlivé uživatele (Obr. 31). Přidělování subnosných není náhodné, ale tzv. lokalizované, tedy všechny subnosné jednoho uživatele jsou umístěny do bloku (přeneseny za sebou). Nevýhodou lokalizovaného mapování na subnosné je možnost ztráty celého bloku při frekvenčně selektivním úniku. Výhodou OFDMA je flexibilita v počtu přidělených subnosných, čímž lze měnit přenosovou rychlost podle požadavků a potřeb každého z uživatelů. OFDMA přejímá výhody OFDM a odstraňuje některé nevýhody, jako např. složitou synchronizaci v přijímači. Umožňuje implementaci více antén jak ve vysílači, tak i v přijímači založené na prostorovém multiplexu nebo prostorové diverzitě. [23]



Obrázek 31 : OFDMA

7.6.2 SC-FDMA

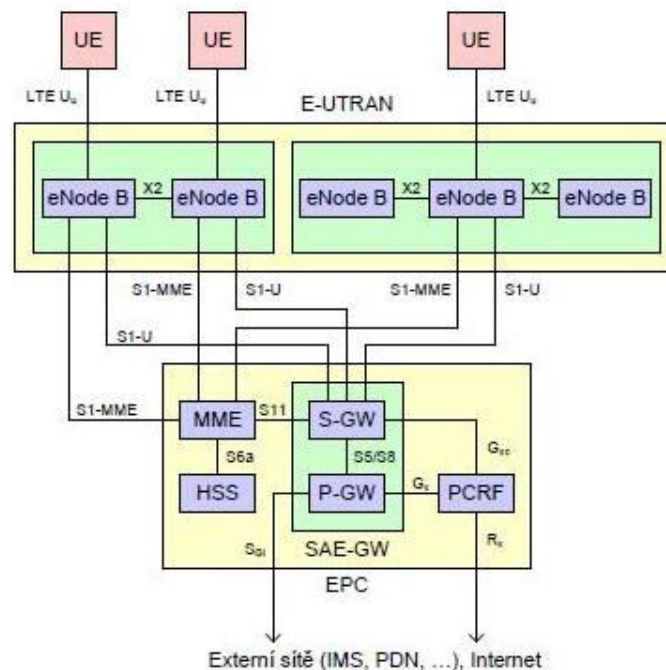
Symbole vzniklé po modulaci mají sice náhodný charakter, ale během sobolové periody se mohou některé symboly shodovat. Shodují-li se současně i fáze příslušných subnosných, dojde k výraznému zvýšení výkonu signálu. Určujícím parametrem je PAPR, což je poměr špičkového výkonu k průměrnému výkonu. Pro OFDM je hodnota PAPR vysoká, čímž se snižuje energetická účinnost, což pro uplink, kde je výkon UE omezen velikostí baterie není příliš vhodné. Využije se OFDM s rozprostíráním signálu pomocí diskrétní Fourierovy transformace DFTS-OFDM (Discrete Fourier Transform Spread OFDM). Úprava spočívá v předřazení signálového procesoru, který bude provádět výpočet rychlé Fourierovy transformace FFT čili převod z časové oblasti do oblasti frekvenční. Každý symbol je tak rozprostřen ve všech subnosných (Obr. 33), čímž je při zpracování zamezeno vzniku stejných symbolů, a tedy i zvyšování PAPR. Jeho hodnota se bude blížit hodnotě při využití jedné nosné, odkud označení SC-FDMA. Na přijímací straně je rovněž přidán pouze signálový procesor, který bude provádět výpočet IFFT. [731]



Obrázek 32 : SC-FDMA

7.7 Architektura systému LTE

Architektura systému LTE neboli SAE (System Architecture Evolution) je založena na čistě paketovém spojení a nijak nepodporuje přepojování okruhů. Systém LTE využívá plochou architekturu, která byla přestavena v rámci Release 7 pro HSPA+. Sloučením funkcí jednotlivých bloků a oddělením řídicích informací od přenosu dat, lze výrazně snížit latenci a zvýšit přenosovou rychlost. Architektura systému LTE se skládá z rádiové přístupové sítě E-UTRAN (Evolved-UTRAN), která slouží ke komunikaci uživatelů se systémem a paketové sítě EPC (Evolved Packet Core), jenž odpovídá páteřní síti CN v systému UMTS. Uživatelský terminál je opět samostatnou součástí systému. Všechny tyto části spolu komunikují pomocí protokolu IP a na tomto protokolu budou také založeny všechny poskytované služby. Systém LTE využívá doménu IMS, především k podpoře hlasových služeb, jelikož poskytuje např. VoIP a spojení s doménou CS nebo externími sítěmi (PSTN, ISDN). [741]



Obrázek 33 : Architektura systému LTE [24]

UE (User Equipment) – uživatelský terminál

eNode B – základnová stanice

MME (Mobility Management Entity)

HSS (Home Subscriber Server) – domácí uživatelský server

S-GW (Serving Gateway) – servisní brána

P-GW (Packet Data Network-Gateway) – brána paketové datové sítě

PCRF (Policy and Charging Rules Function)

G_x, G_{xc}, LTE U_s, R_x, S1-MME, S1-U, S11, S5/S8, S6a, S_Gi, X2 – rozhraní

7.7.1 E-UTRAN

Rádiová přístupová síť E-UTRAN poskytuje uživatelům přístup ke službám, které poskytuje paketová síť EPC čili zajišťuje spojení mezi UE a EPC. Obsahuje pouze základnové stanice eNode B, které tak tvoří celou pevnou část systému a plní funkce jak základnové stanice, tak i řídicí jednotky rádiové sítě. Každá eNode B zajišťuje rádiové zdroje, pokrytí dané oblasti E-UTRAN rádiovým signálem a přiděluje jednotlivé rádiové

kanály podle stanovených priorit a požadované kvality služeb QoS. Provádí měření signálu a společně s hodnotami od UE rozhoduje o handoveru. Jednotlivé eNode B jsou mezi sebou propojeny rozhraním X2, které se využívá při Hannoveru a s EPC jsou spojeny přes rozhraní S1. Každá eNode B může obsluhovat několik UE, přitom jedno UE může být obsluhováno současně pouze jednou eNode B. UE je vždy propojeno s jedním MME (Mobility Management Entity) a S-GW (Serving Gateway), a eNodeB musí proto toto spojení sledovat. Po připojení UE do sítě přes nové eNode B, zajistí toto eNode B směrování k MME, se kterým bylo UE naposledy spojeno. V případě že není MME k dispozici nebo chybí směrovací informace, vybere eNode B nové MME. Odpovídá také za bezpečnost, jelikož kontroluje přístup do systému, provádí šifrování a dešifrování dat a kompresi a dekompresi IP hlaviček. Důležitou funkcí je i mobility management čili sledování pohybu účastníka v síti. [751]

7.7.2 EPC

Největší změnou v paketové síti EPC oproti původní páteřní síti CN je, že neobsahuje CS doménu, ani žádné přímé spojení s okruhově spínanými sítěmi, jako např. ISDN nebo PSTN. Je tvořena pouze paketově spínanou doménou, tato odpovídá klasické PS doméně v existujících 3GPP sítích. EPC se skládá z několika částí, a to MME, SAE-GW (System Architecture Evolution-Gateway), PRCF (Policy and Charging Rules Function) a HSS. Hlavním řídicím prvkem LTE je MME, přes který nejdou žádná uživatelská data a může obsluhovat několik UE, eNode B a S-GW. Mezi jeho hlavní funkce patří ověření totožnosti, kdy srovnáním odezvy od UE a od HSS povolí účastníkovi přístup do systému a ochrana komunikace proti odposlechu výpočtem šifrovacího klíče a klíče integrity. MME také zajišťuje důvěryhodnost a přiděluje každé UE dočasnou identifikaci, zde nazývanou GUTI (Globally Unique Temporary Identity), aby se IMSI přenášelo přes rádiové rozhraní co nejméně. GUTI může být přidělováno opakovaně, aby se předešlo sledování UE. MME sleduje pohyb všech účastníků v dané oblasti a po přihlášení UE do sítě, zašle jeho polohu do HSS. MME nadále sleduje polohu UE buď na úrovni eNode B, jestliže je UE aktivní, nebo v rámci sledované oblasti v případě, že je UE neaktivní. Neaktivní UE oznamuje svoji polohu pravidelně nebo přesunem do oblasti jiné MME. Dále je MME zodpovědné za získání uživatelského profilu z HSS, který má v patrnosti po celou dobu obsluhy UE. V databázi profilů HSS jsou uloženy informace o všech uživatelských sítích včetně služeb, ke kterým mají přístup, dovolených PDN (Packet Data Network) spojeních a roamingu v rámci jiných sítí. Součástí HSS je i AuC,

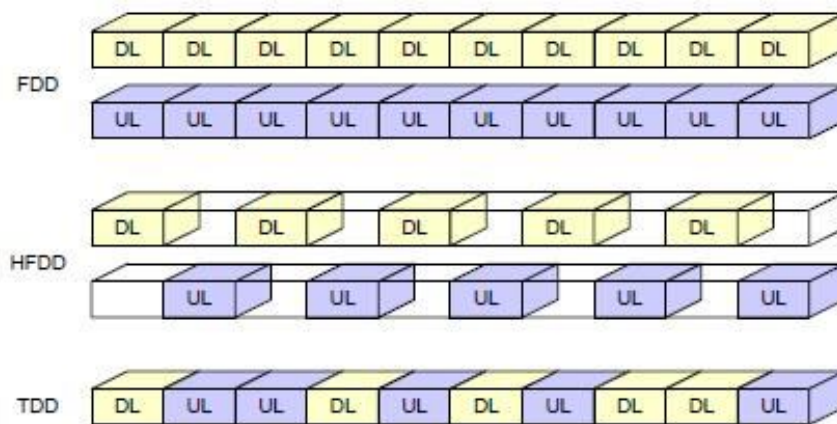
kteřé obsahuje klíč pro ověření totožnosti, šifrovací klíč a klíč integrity. HSS je spojeno se všemi MME v síti. Každé MME obdrží od HSS kopie uživatelských profilů všech obsluhovaných UE. V případě, že UE přejde pod jiné MME, je kopie uživatelského profilu smazána a zaslána nové MME. Všechna uživatelská data procházejí bránou SAE-GW, která se skládá ze servisní brány S-GW a brány paketové datové sítě P-GW (Packet Data Network-Gateway). S-GW řídí tok uživatelských a řídicích dat a je spojena s bránou P-GW rozhraním S5/S8. Pokud rozhraní S5/S8 využívá GTP, nemusí být S-GW spojeno s PCRF, jelikož se mapování IP služeb provádí v P-GW. Pokud ale rozhraní S5/S8 využívá PMIP (Proxy Mobile IP), S-GW provádí mapování mezi IP službami, a musí být tedy připojeno k PCRF. P-GW někdy označované jako PDN-GW (Packet Data Network-Gateway) je směrovač mezi EPS a vnějšími paketovými sítěmi (např. IMS doména, PDN, Internet). Spolupracuje s DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) serverem, a přiděluje tak uživatelským terminálům IP adresy. Zároveň je spojen s PCRF, což je síťový prvek zodpovědný za PCC (Policy and Charging Control) služby. Sleduje tok poskytovaných služeb a kontroluje, zda kvalita služeb QoS odpovídá uživatelskému profilu, zodpovídá také za vyúčtování. Pro aplikace, které požadují kontrolu a účtování v reálném čase, může být použit další síťový prvek AF (Applications Function). [761]

7.7.3 UE (ME)

Uživatelský terminál UE je složen ze dvou základních částí, a to koncového zařízení TE (Terminal Equipment) a identifikačního modulu USIM. TE které slouží ke komunikaci na rádiovém rozhraní a poskytuje uživatelské rozhraní pro aplikace, např. VoIP. Zajišťuje také funkce mobility managementu, například handover a informace o umístění terminálu. USIM slouží k identifikaci a ověření totožnosti uživatele a obsahuje autorizační a šifrovací klíče pro zabezpečení při přenosu přes rádiové rozhraní. Uživatelským terminálem může být stejně jako v sítích GSM a UMTS mobilní telefon nebo datová karta, tato může být i součástí notebooku. [771]

7.8 Režimy v systému LTE

LTE používá stejně jako UMTS režim FDD pro párová pásma a TDD pro nepárová pásma. Frekvenční duplex FDD může být navíc poloduplexní čili HFDD (Half FDD). V tomto případě probíhá komunikace vždy pouze v jednom směru, přičemž downlink a uplink se střídají (Obr. 34). Režim FDD využije většina světových poskytovatelů pro upgrade svých 3G sítí, zatímco režim TDD využijí převážně provozovatelé UMTS TDD a TD-SCDMA. [23]



Obrázek 34 : Režimy systému LTE [23]

7.9 Buňková struktura v LTE

Systém LTE také využívá buňkovou strukturu. Jednotlivé buňky jsou rozděleny nejčastěji do tří sektorů. Každý sektor obsluhuje jedna směrová anténa základnové stanice. Při sektorizaci se využívá činitel opakování frekvence roven jedné nebo počtu sektorů. Pro FRF = 1 (Frequency Reuse Factor) mají všechny sektory buňky společné kanály, tím se zvyšuje spektrální účinnost, výrazně se tím ale zvyšují i interference na hranicích buněk. Druhou možností je, že se pro tři sektory využije FRF = 3, což znamená, že každý sektor má přidělené určité kanály, se kterými pracuje. Jelikož spolu nesousedí sektory a vlastně ani buňky se stejnými kanály, interference se výrazně sníží. Buňky se opět dělí podle poloměru, a to na malé do 5 km, střední do 30 km a velké do 100 km. [781]

7.10 Handover a vzájemná spolupráce v LTE

Handover se v rámci systému LTE dělí na vnitřní a vnější. Vnitřní handover nastává mezi dvěma základnovými stanicemi eNode B jako bezešvý, a proto nedochází k přerušení spojení. Vnitřní handover zajišťuje rozhraní X2 mezi jednotlivými eNode B, přes tyto se posílají informace týkající se handoveru a pakety, které ještě nestihly být odeslány UE před handoverem. Zároveň se přenáší informace o naposledy navštívených buňkách UE, aby nedocházelo k neustálému přepojování mezi dvěma buňkami. Vnější handover nastává mezi jednotlivými sítěmi 3GPP jako tvrdý, čímž vzniká chvilkové přerušení spojení. Vnější handover je zajímavý v místech, kde zatím není pokrytí sítí LTE, takže mají uživatelé i nadále přístup k základním hovorovým a datovým službám. Systém LTE umožňuje spolupráci jak s předchozími systémy 3GPP (GSM, GPRS, EDGE, UMTS nebo HSPA), tak i ostatními systémy (CDMA2000, WiFi, WiMAX) a dokonce i systémy z pevných sítí (např. ADSL). [791]

7.11 HARQ v LTE

Pro zabezpečení dat proti chybám při přenosu přes rádiový kanál se využívá hybridní metoda automatické žádosti o opakování HARQ. Přenášená data jsou doplněna kódem CRC, který zaznamenává chyby vzniklé při přenosu a zabezpečené kódem FEC, který dokáže určitý počet chyb opravit. Čím větší počet bitů dokáže FEC opravit, tím nižší je přenosová rychlost, protože je přenášeno méně užitečných dat. V systému LTE se používá HARQ v kombinaci inkrementální redundance a soft combining. Při opětovném přenosu se zvyšuje ochrana FEC (IR), ovšem přenesená data se uloží do paměti, kde jsou skombinovány se znovu přijatými daty (SC). [801]

7.12 Technika více antén v LTE

Pro zlepšení parametrů přenosu, jako např. zvýšení kapacity sítě, dosahu nebo kvality přenosu lze použít více antén. Využitím prostorové diverzity, ať už příjmové SIMO (Single Input Multiple Output) nebo vysílací MISO (Multiple Input Single Output) se sice navýší redundance přenosu, ale zvýší se i odolnost vůči frekvenčně selektivním únikům a interferencím. Při příjmové diverzitě SIMO se buď ze všech signálů na přijímací anténě vybere ten s největším poměrem SNR, tento se dále zpracovává a ostatní se neuvažují, nebo se přijaté signály zkombinují principem MRC. Tím se získá maximální poměr signálu k šumu. Vysílací diverzita MISO se dělí na dva druhy. Při otevřené smyčce vysílač nezná

parametry přenosového kanálu, a proto vysílá stejná data na všech anténách na stejné frekvenci, přičemž data jsou rozlišena pomocí kódování. Při uzavřené smyčce zná vysílač parametry přenosového kanálu, na základě kterých nastavuje optimální parametry vysílání. Použití uzavřené smyčky je účinnější, ale složitější. Další možností je prostorový multiplex. Ten využívá několik od sebe přesně vzdálených přijímacích a vysílacích antén současně, neboli MIMO. Výběr techniky více antén závisí především na poměru SNR a SIR. V praxi je provádí základnová stanice, která podle podmínek volí nejlepší variantu. Na okrajích buněk je výhodné použít prostorovou diverzitu, tím se zvýší přenosová rychlost a poníží se interference. Naopak ve středu buněk, nebo v menších buňkách, kde je limitujícím faktorem šířka pásma je výhodnější použít prostorový multiplex. Ten umožňuje při stejné šířce pásma i vysílacím výkonu několikrát navýšit přenosovou kapacitu oproti prostorové diverzitě. Poslední možností jsou tzv. chytré antény (smart antennas), které jsou schopny měnit směrový diagram řízením amplitudy a fáze signálů jednotlivých antén. Toho se využívá jak u vysílačů, které mohou signál směřovat na konkrétní přijímač, tak i u přijímačů, které tím zamezují přijímat signály z ostatních směrů. Chytré antény zvyšují poměr SIR, a tedy i kapacitu sítě. Nemusí mít, na rozdíl od předchozích antén, pevně stanovenou vzdálenost mezi anténami, musí však pracovat formou uzavřené smyčky. [811]

V systému LTE se v downlinku využívá přijímová diverzita SIMO typu MRC a vysílací diverzita MISO s otevřenou smyčkou. Je možné využít i diverzitu s cyklickým zpožděním, při které je přes každou anténu signál vyslán s určitým měnícím se zpožděním, to vede k eliminaci úniků. V downlinku je také podporována technika MIMO 2x2, MIMO 4x2 nebo MIMO 4x4 a využívá se jak otevřená, tak i uzavřená smyčka. V uplinku se využívá MU-MIMO (Multi User-MIMO), to znamená, že každý UE má dvě antény. Mezi nimi lze přepínat, a vysílat tak na té, která poskytuje kvalitnější přenosový kanál k dané eNode B. LTE využívá i chytré antény. [821]

7.13 Pokrytí LTE ve světě

Jako první po praktické stránce, testovala systém LTE společnost T-Mobile v říjnu roku 2008 v Bonnu, s maximální přenosovou rychlostí 50 Mbit/s. Průměrně dosahoval systém LTE během rychlé jízdy autem rychlosti 30 Mbit/s v downlinku a 19 Mbit/s v uplinku. První dvě sítě LTE spustila společnost TeliaSonera v roce 2009 ve švédském Stockholmu

a norském Oslu s rychlostí 50 Mbit/s, později se zvýšením na 80 Mbit/s. V současné době běží přibližně v 55 zemích světa. [23]

7.14 LTE a mobilní operátoři v ČR

Situace v České republice ohledně LTE je problematická. Ve srovnání s ostatními státy se v ČR opozdilo nasazování různých technologií: ať šlo o pevné připojení přes ADSL, nebo třeba i výstavbu mobilních 3G sítí. Výstavba 3G sítí u nás byla podmíněna potřebou trhu, protože docházelo k situacím, kdy například operátoři měli v nabídce smartphony pro 3G sítě, ovšem neměli funkční použitelnou 3G síť. I když pokrytí z geografického hlediska bylo stále slabé, byla v roce 2012 přerušena výstavba těchto sítí, protože pro operátory další investice do výstavby 3G sítí v méně osídlených oblastech nebyla finančně lukrativní. Dalším z důvodů bylo také nutnost budoucích investic do LTE, které má mnoho výhod, včetně hustšího geografického pokrytí na vysílač.

7.14.1 O2 Telefonica

V létě 2012 byla u nás zprovozněna síť LTE společností Telefónica Czech Republic. Pilotní a následně první komerční provoz LTE byl spuštěn v obci Jesenice v okrese Praha-Západ. LTE bylo předvedeno i návštěvníkům obchodního centra Chodov v Praze. [25] V květnu 2013 zprovoznila Telefónica další vysílače na území Prahy (části Prahy 1, Prahy 2, Prahy 4 a Prahy 10). Operátor deklaroval maximální rychlost stahování 75Mbit /s a odesílání 38 Mbit/s. O rok později, v roce 2014 zrychlilo O2 sítě v některých lokalitách až na 112,5 Mbit/s (LTE-A). Uživatel však musí počítat s tím, že reálná rychlost je nižší a je ovlivněna mnoha faktory, např. vytížením sítě, silou signálu apod. LTE se stalo součástí běžných nabídek mobilního připojení, což znamená, že klienti v dosahu LTE sítí nemusí platit vyšší tarif. [25]

7.14.2 T-Mobile

Zanedlouho po O2 (Telefónice) zahájil pilotní provoz LTE sítě i konkureční T-Mobile, a to v červenci – listopadu 2012 v Mladé Boleslavi. 1.července 2013 byl pilotní provoz ukončen a T-Mobile zahájil na některých místech Prahy zkušební provoz sítí s rychlostí až 100 Mbit/s ve směru k účastníkovi (downlink) a až 37,5 Mbit/s směrem od něj (uplink). [26] Od roku 2014 je síť dostupná v největších českých městech i jiných, geograficky méně dostupných lokalitách.

7.14.3 Vodafone

Společnost Vodafone zahájila testovací provoz počátkem června 2013 v Karlových Varech na 20 vysílačích. Tuto lokalitu operátor zvolil kvůli Mezinárodnímu filmovému festivalu. Komerční provoz LTE byl spuštěn 1. července téhož roku. LTE-A začal Vodafone nasazovat v roce 2014. LTE-A od Vodafonu umožňuje přenosové rychlosti až 225 Mbit/s. Díky vhodnému spojení frekvenčních pásem 1800 MHz (s šířkou 20MHz) a 800 MHz (o šířce 10MHz) je dosaženo vyšší propustnosti. LTE na frekvenci 800 MHz umožňuje signálem pokrýt rozsáhlejší plochy, než je tomu frekvencích vyšších, ovšem za cenu nižší přenosové rychlosti. [27]

7.15 Parametry systému LTE

Šířka pásma FDD	1,4; 3; 5; 10; 15; 20 MHz
Šířka pásma TDD	1,6; 3,2 MHz
Přenosová rychlost downlink	326,4 Mbit/s
Přenosová rychlost uplink	86,4 Mbit/s
Latence	10 ms
Spektrální účinnost	5 bit/s/Hz
Režimy	FDD, HFDD, TDD
Modulace	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Přístupová technika v downlinku	OFDMA
Přístupová technika v uplinku	SC-FDMA
Max. velikost buňky	100 km
Max. rychlost pohybu UE	500 km/h
Délka rámce	10 ms
Délka slotu	0,5 ms
Délka užitečných dat	66,67 μ s
Délka cyklického prefixu	4,69 / 16,67 μ s
Délka OFDM symbolu	71,36 / 83,33 μ s
Odstup subnosných	15 KHz
Počet subnosných	72, 144, 300, 600, 900, 1200
Přidělování subnosných	Lokalizované
Pčet subnosných v resourse bloku	12
Délka resourse bloku	0,5 ms
Kódování FEC	Konvoluční s R=1/3, Turbo kódy s R=1/3

Tabulka 22 : Parametry systému LTE

Šířka pásma rádiového kanálu [MHz]	1,4	3	5	10	15	20
Maximální přenosová rychlost downlink [MHz]	16,6	47,7	80,3	161,9	243,5	325,1
Maximální přenosová rychlost uplink [MHz]	5,2	13	21,6	43,2	64,8	86,4

Tabulka 23 : Závislost maximální přenosové rychlosti na šířce pásma v systému LTE

8 IMT – ADVANCED

Stejně jako vytvořila ITU skupinu 3G standardů pod označením IMT-2000, byla v říjnu roku 2009 vytvořena skupina 4G standardů pod označením IMT-Advanced. Z původních šesti návrhů (802.16e Mobile WiMAX, 802.16m Mobile WiMAX, LTE-Advanced, UMB (Ultra Mobile Broadband), 802.20 MBWA (Mobile Broadband Wireless Access) a Flash-OFDM) byly nakonec schváleny pouze dva, a to LTE-Advanced a 802.16m Mobile WiMAX. Stejně jako ve třetí generaci není UMTS slučitelná s CDMA2000, nejsou slučitelné ani tyto dva systémy. Aby se mohl nějaký systém zařadit ke čtvrté generaci, musí před tím splnit podmínku vysoké přenosové rychlosti, a to 100 Mbit/s pro rychle se pohybující UE a 1 Gbit/s pro nepohybující se UE. Dále musí spolupracovat se službami standardů IMT-2000 i pevných sítí a spolupracovat s jinými systémy a technologiemi. Celý systém musí mít základ založený na přepojování paketů a pracovat na protokolu IP. Také musí zajišťovat vysokou kvalitu služeb QoS v celé ploše buňky. Nevýhodou vysokorychlostních datových přenosů v řádu stovek Mbit/s je vysoká energetická náročnost na výdrž baterií UE, která v kombinaci se 100 MHz šířkou pásma je až v desetinásobcích oproti HSPA+.[24]

8.1 LTE -ADVANCED

Skupina 3GPP vytvořila standard pro čtvrtou generaci, který vyhověl požadavkům IMT-Advanced a nazvala ho LTE-Advanced. Ten je součástí Release 10 a jeho komerční využití bylo plánováno na rok 2013-2015 . Tento projekt je rovněž podporován z prostředků Evropské unie.

Systém LTE-Advanced je zpětně kompatibilní s LTE Release 8 i Release 9. V praxi to znamená, že uživatelské terminály Release 8 mohou pracovat v síti LTE-Advanced, tedy Release 10 a naopak. Oproti LTE má trojnásobnou spektrální účinnost, která je v downlinku 30 bit/s/Hz a v uplinku 15 bit/s/Hz a poloviční latenci, jejíž hodnota klesla na 5 ms. Rovněž využívá přístupové techniky OFDMA a SC-FDMA a podporuje flexibilní šířku pásma. Techniku MIMO rozšiřuje v downlinku na 8x8 s využitím MU-MIMO, kde jsou souběžné toky přenášeny k různým UE prostorově odděleny. V uplinku je technika MIMO rozšířena na 4x4 s využitím SU-MIMO (Single User-MIMO), kde jsou všechny souběžné toky posílány k jedné UE. V systému LTE-Advanced lze dosahovat v downlinku rychlosti 1 Gbit/s a v uplinku 0,5 Gbit/s při pohybu UE do 15 km/h. Maximální rychlost pohybu UE je stanovena až na 500 km/h. [23]

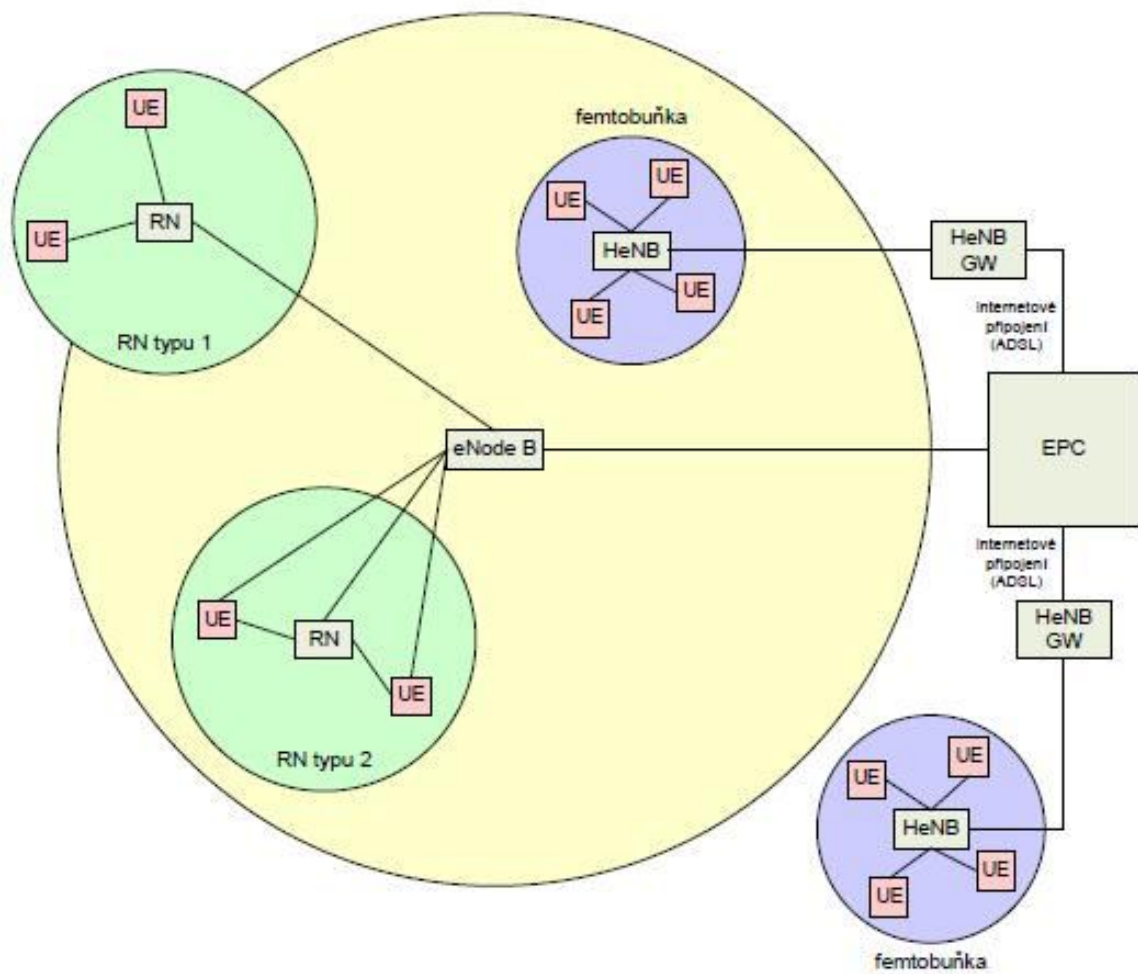
Pro dosažení vysokých přenosových rychlostí je nutná především dostatečná šířka pásma. LTE Advanced ji navyšuje použitím metody sdružování nosných, někdy je také označována jako kanálové sdružování. Sdružování nosných probíhá na fyzické vrstvě, kde jednotlivá pásma jsou sloučena do jednoho výsledného pásma. Využívají se i nesousední pásma, ale stejně jako u Multi-band HSPA+ s omezením na určité kombinace. Například pro Evropu byla stanovena kombinace 1800 MHz a 2600 MHz, později bude rozšířena o 800 MHz. Na základě toho, zda jsou využívána sousední nebo nesousední pásma se sdružování nosných dělí na Intra-band a Inter-band. Sloučením dvou pásem se šířka pásma zvětší na 40 Mhz. Sloučením pásem v kombinaci s technikou MIMO 8x8, umožní dosáhnout přenosové rychlosti 1,2 Gbit/s v downlinku a v uplinku 600 Mbit/s, s technikou MIMO 4x4. Maximálně lze sloučit pět pásem, tím vznikne šířka pásma 100 MHz a přenosová rychlost se navýší v downlinku až na 3 Gbit/s a v uplinku na 1,5 Gbit/s. [23]

V blízkosti základnových stanic je dosažení vysokých přenosových rychlostí poměrně snadné, ale pokud se vzdálenost zvyšuje, přenosová rychlost se snižuje. Pokud se UE blíží k okraji buňky, snižuje se úroveň signálu a naopak roste úroveň interferencí ze sousedních eNode B. LTE Advanced využívá v downlinku metodu CoMP (Coordinated Multi-Point), která je založena na vysílání a příjmu signálu UE od několika základnových stanic. V podstatě mění mezibuňkové interference na užitečný signál, hlavně na hranicích jednotlivých buněk, zlepšuje pokrytí, výkon a spektrální účinnost. Použitím CoMP může být UE na okraji buňky obsloužena dvěma nebo více eNode B, tím se nejen zlepší kvalita signálu, ale zvýší se i propustnost. CoMP využívá rozhraní X2 mezi jednotlivými eNode B a představuje tak rozšířenou podobu makrodiverzity. Hlavní funkcí CoMP je sloučení přenosu uživatelských dat z několika eNode B k danému UE, a současně usnadňuje kombinaci dat a handover. [23]

System LTE-Advanced využívá tzv. reléové stanice RN (Relay Nodes) neboli opakovače s více skoky MR (Multihop Relay). Použití těchto stanic je výhodné, protože dochází ke zvětšení pokrytí, zvýšení kapacity sítě i zlepšení kvality spojení mezi eNode B a UE. Největší výhodou je právě navýšení pokrytí, jelikož RN pokryjí oblasti se špatnou kvalitou signálu, okrajové oblasti buněk a rozšíří pokrytí dokonce i na oblasti za jejich hranicemi. Z pohledu uživatelského terminálu Release 8 se jeví reléová stanice jako běžná základnová stanice. Release 8. RN se dělí na dva druhy (Obr. 36). RN typu 1 jsou umístěny na okrajích buněk a využívají se pro zvětšení pokrytí signálu eNode B, tím zpřístupňují signál eNode

B i vzdálenějším UE. Přenášejí jak referenční signály, tak i řídicí informace, přitom UE nemá přímé spojení s eNode B. Vytvářejí jakési vlastní buňky, které odpovídají eNode B Release 8, které tak zajišťují zpětnou kompatibilitu. RN typu 2 jsou umístěny v ploše buňky a využívají se pro navýšení kapacity sítě a dosažení vyšší kvality přenosu. Nepřenášejí žádné referenční signály ani řídicí informace, avšak UE má v tomto případě přímé spojení s eNode B. Slouží k dosažení vícecestné diverzity. [24]

System LTE-Advanced využívá k rozšíření pokrytí i femtobuňky, které se označují také jako Home eNode B (Obr. 35). Femtobuňky vznikly v roce 2007 a mohou být včleněny i do jakékoliv sítě druhé a třetí generace (GSM, UMTS, CDMA2000). Jako první nabídl femtobuňky v září 2007 ve 2G síti americký operátor Sprint, v listopadu 2008 byly poprvé také použity v 3G síti singapurského operátora Star Hub. Femtobuňky jsou buňky s poloměrem jednotek maximálně několik desítek metrů, obsluhují tak malou oblast uvnitř velké buňky. Na rozdíl od reléové stanice se nevyužívají ke spojení se sítí rádiových zdrojů uvnitř buňky, ale k pevnému internetovému připojení například pomocí ADSL a jsou připojeny přes bránu HeNB GW (Home eNode B Gateway). Femtobuňky se mohou využívat pro pokrytí domácností ve venkovských oblastech, nebo místech se špatnou kvalitou signálu a používají sdílený kanál. Další možností je využití v hustě osídlených oblastech k dosažení vysokých přenosových rychlostí a zvýšení kapacity, v tomto případě je použit vyhrazený kanál. [24]



Obrázek 35 : RN a femtočlánky v systému LTE-Advanced [23]

9 SIMULACE MODULACÍ VE WOLFRAM MATHEMATICA

9.1 Prostředí Mathematica

Software Mathematica je jedním z prostředí, které spojuje nástroje pro numerickou a symbolickou matematiku, grafický a dokumentační systém a zabezpečuje pokročilé propojení s dalšími aplikacemi. [28]

9.1.1 Historie

V roce 1987 založil Stephen Wolfram společnost Wolfram Research, Inc., kde tento program vznikl a je i dále vyvíjen. První verze softwaru Mathematica vznikla v roce 1988. Tento softwar měl zásadní význam pro způsob využívání počítačů v různých technických i jiných odvětvích. Má se za to, že právě vydáním software Mathematica začal nový věk tzv. technical computing. Od 60. let 20. století byly k dispozici samostatné sady, tyto byly vhodné vždy jen pro určité specifické úlohy (numerické, algebraické, grafické). Mathematica představuje předěl v tom, že vše integruje do jednoho produktu. [28]

9.1.2 Podstata

Základní myšlenkou vzniku softwaru Mathematica je podstata objevení nového symbolického jazyka. Symbolické programování umožňuje prezentaci dat, funkcí, grafů apod. stejným způsobem, tj. symbolickým výrazem. Například výraz $f[x]$ může v Mathematice vyjadřovat matematickou funkci, grafický prvek, zvuk nebo celý dokument. Současně může fungovat jako vstup nebo výstup jiné funkce. To sebou nese nespočet výhod: stručnější a jednodušší kódování, jednodušší rozšiřování funkce atd. [28]

9.1.3 Notebook

Mathematica využívá interakční dokumentační systém, který se nazývá notebook. Ukázka prostředí Mathematica je zobrazeno na obrázku Obr. 36. Toto notebookové rozhraní se skládá z buněk, tyto jsou řazeny pod sebe. Buňky pohledově i funkčně oddělují vstupy, výstupy, text, grafiku. Všechny části jsou však stále jednoduchými výrazy a jsou tedy snadno přizpůsobitelné, snadno upravitelné a rozšiřitelné. Notebook je možné převést do jiných formátů, např. PDF, TeX, HTML. [28]



Obrázek 36 : Ukázka z prostředí Wolfram Mathematica

9.1.4 Programovací jazyk

Programový kód Mathematica umí odrážet specifčnost problému a to jej dělá kratším a přehlednějším. Tato skutečnost umožňuje snadnější přechod z jiného programovacího jazyka a také je přijatelnější pro ty, co předtím nikdy neprogramovali. Není třeba předem určovat typ proměnných, dimenzi matic, nebo překládat program. Obsahuje mnoho vestavěných procedur – řazení, vyhledávání, práce se soubory. Programy napsané v Mathematice jsou tak mnohem hospodárnější v množství napsaného kódu ve srovnání s jinými programovacími jazyky.[28]

9.1.5 Využití

Mathematica je velmi ucelený nástroj a je možné ji použít pro řadu úkolů, jakými jsou například:

- zpracování komplexních symbolických výpočtů, které obsahují velké množství členů
- zavádění, analýza a vizualizace dat
- řešení rovnic, diferenciálních rovnic a minimalizace problémů numericky nebo symbolicky
- provádění numerických modelů a simulací, od jednoduchých regulačních systémů po srážku galaxií, finančních, složitých biologických systémů, chemických reakcí či vlivů na prostředí

- výroba profesionálně kvalitních, interaktivních technických dokumentů pro elektronickou distribuci či tisk
- ilustrace matematických nebo vědeckých konceptů pro studenty
- sazba technických informací
- provádění odborných prezentací a seminářů
- usnadnění rychlého rozvoje engineeringových společností a finančních institucí [28]

9.2 Souhrnná aplikace pro modulace

Posledním úkolem praktické části diplomové práce bylo provést srovnání modulací systému GSM s novými perspektivními modulacemi v prostředí Matlab či jiném adekvátním prostředí. Pro tvorbu tohoto úkolu jsem zvolil výše popsané prostředí softwaru Wolfram Mathematica. Po domluvě s vedoucím práce byly vybrány modulace GMSK, QPSK a 16-QAM, případně její další násobky. Definice těchto modulací byly popsány v teoretické části práce.

Byla tedy vytvořena jedna souhrnná aplikace, která má v sobě zaimplementovány všechny výše zmíněné modulace. V této aplikaci je možné vybrat konkrétní modulaci, nastavit její vstupní parametry a provést celkový výpočet, který bude zobrazen ve formě výstupu na obrazovce v podobě více grafů různých funkcí.

V této kapitole je dále podrobněji popsána tato aplikace, dá se říci ve stylu manuálu od zadávání vstupních parametrů až po výstup a vyhodnocení daných modulací. Po úvodním seznámení s programem jsou následně v této kapitole vytvořeny a popsány konkrétní tři typy modulací a jejich specifik.

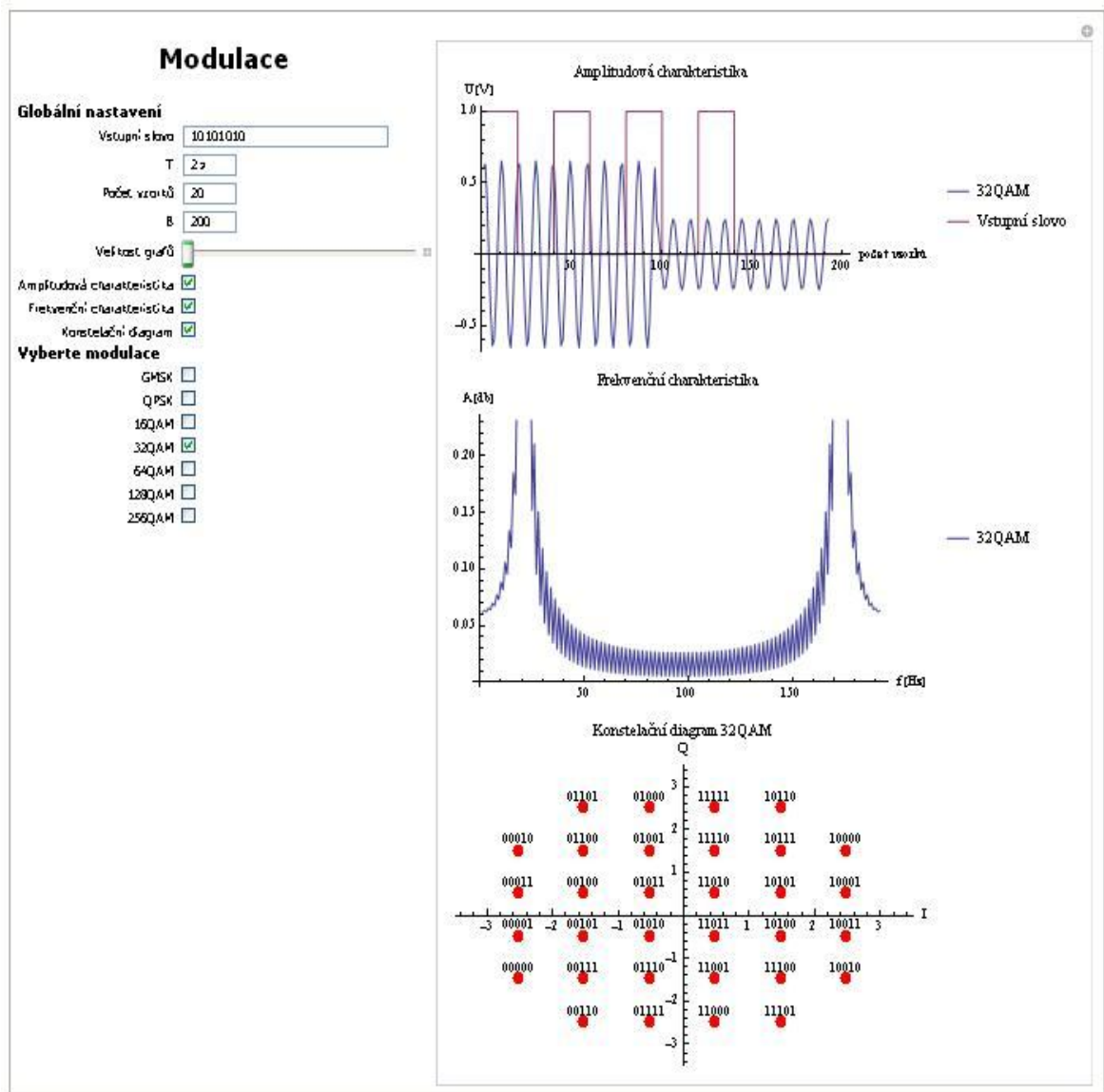
Aplikace s modulacemi je součástí přílohy na CD a též i v textové podobě zdrojového kódu v příloze na konci diplomové práce.

9.2.1 Návrh řešení

Aplikace pro modulace je napsána jako vlastní funkce s lokálními proměnnými (příkaz Module). Funkce se následně volá s definovanými argumenty. Volání je prováděno s příkazem Manipulate, což umožňuje dynamicky měnit argumenty vstupující do funkce.

9.2.2 Ukázka aplikace s modulací

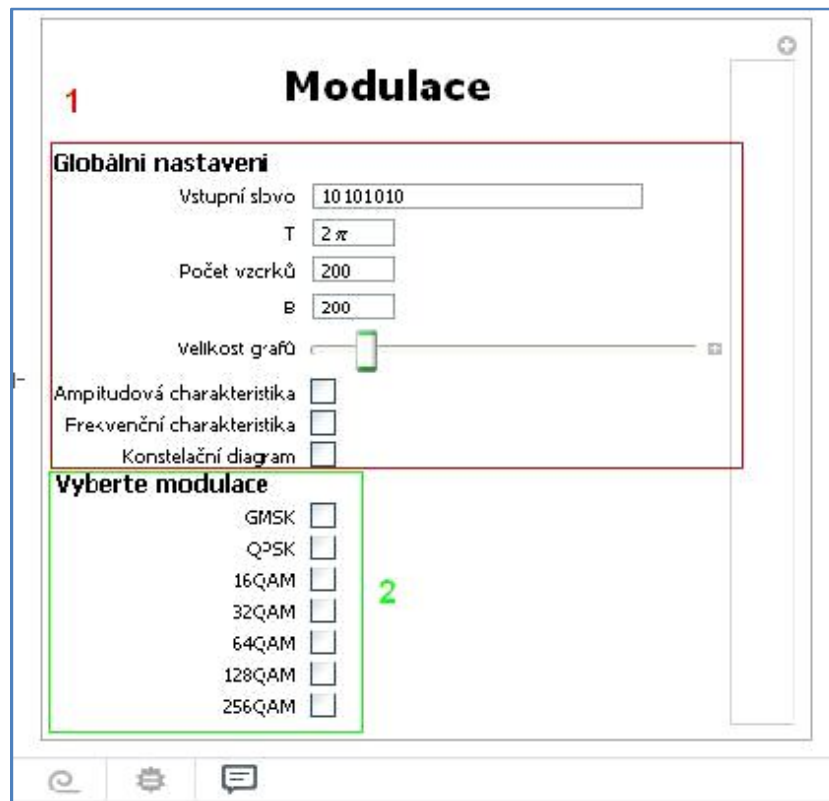
Na následujícím Obr. 37 vidíme ukázkou spuštěné aplikace s konkrétní modulací s nastavenými parametry a výstupem ve formě grafů na obrazovku :



Obrázek 37 : Aplikace s modulacemi – úvodní okno

9.2.3 Popis ovládacích oken, menu

Na následujícím Obr. 38 je vidět úvodní menu s možností nastavení různých parametrů a výběru typu modulace.



Obrázek 38 : Úvodní menu s parametry nastavení

Dle obrázku je patrné, že menu se skládá ze dvou částí, které zde si podrobněji popíšeme níže.

Okénko 1 = Globální nastavení, obsahuje parametry :

- Vstupní slovo = vstupní bity, můžeme zadat slet pouze čísel 1 nebo 0 v neomezeném množství a kombinacích těchto hodnot
- T = perioda – můžeme nastavit v rozmezí od $1 - X / \pi$
- Počet vzorků = $0 - X$
- B = šířka pásma = $0 - X$
- Velikost grafů = myší pohyblivý posuvník, který vizuálně zvětšuje či zmenšuje zobrazení grafů výstupů modulace na obrazovce
- Amplitudová charakteristika – po zatržení aktivuje zobrazení a výpočet této funkce pro danou modulaci ve formě grafu
- Frekvenční charakteristika - po zatržení aktivuje zobrazení a výpočet této funkce pro danou modulaci ve formě grafu

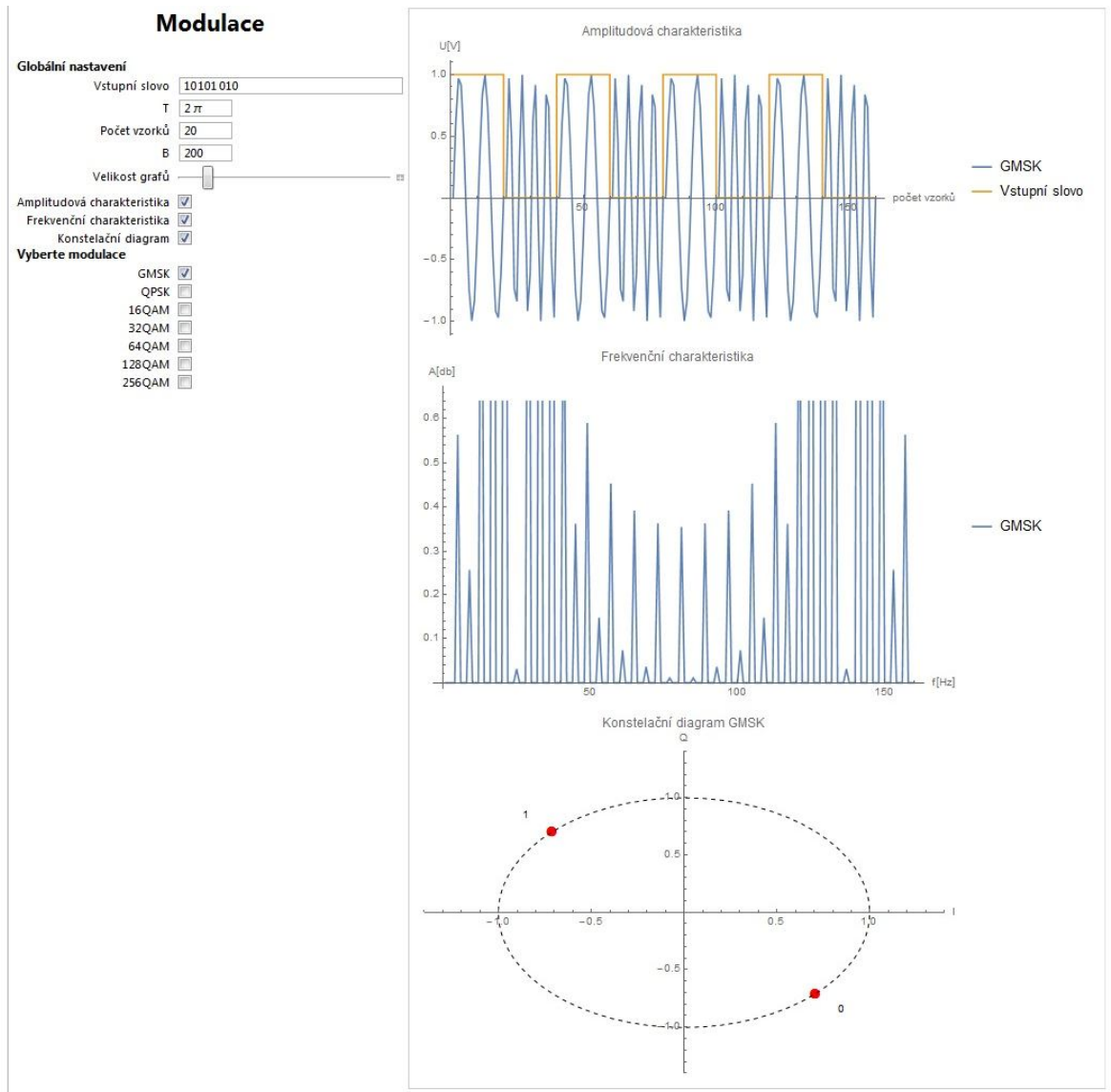
- Konstelační diagram - po zatržení aktivuje zobrazení a výpočet této funkce pro danou modulaci též ve formě grafu

Okénko 2 = Zatržení políčka umožňuje výběr konkrétní modulační, případně více modulací najednou, které pak budou spuštěny, vypočítány a zobrazeny ve formě grafů, pod podmínkou zadání nejdříve vstupních parametrů v předchozím okénku 1.

V následující části budou podrobněji popsány a zobrazeny modulační GMSK, QPSK, 16-QAM.

9.3 Modulace GSMK

Na následujícím Obr. 39 je vidět ukázka modulace GSMK :



Obrázek 39 : Modulace GSMK

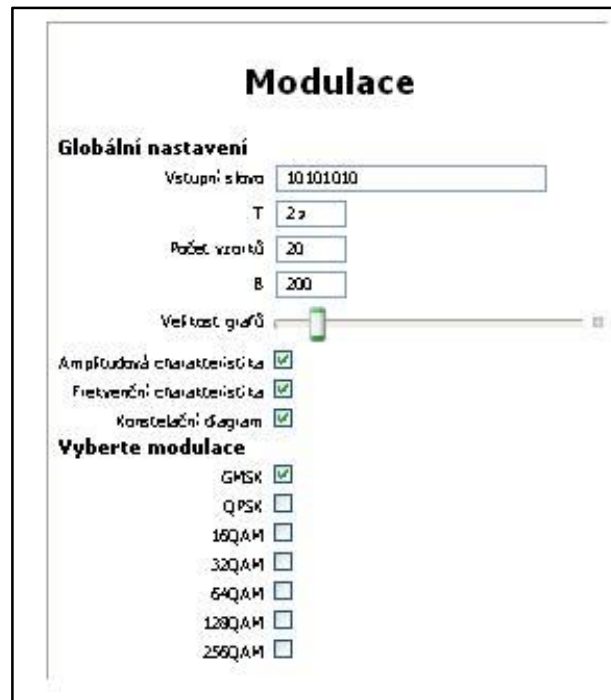
9.3.1 Ovládání

V kapitole 9.2.3 byl podrobně rozebrán popis menu a jeho parametrů. Pro spuštění a výpočet modulace GSMK byly nastaveny tyto konkrétní hodnoty vstupních parametrů :

- Vstupní slovo : 10101010
- Perioda T : 2π
- Počet vzorků : 20

- Šířka pásma B : 200

Samozřejmostí bylo zapnutí funkce amplitudové a frekvenční charakteristiky, konstelačního diagramu a výběru políčka GMSK modulace, viz následující Obr. 40.



Obrázek 40 : Ovládání modulace GMSK

9.3.2 Grafické výstupy modulace

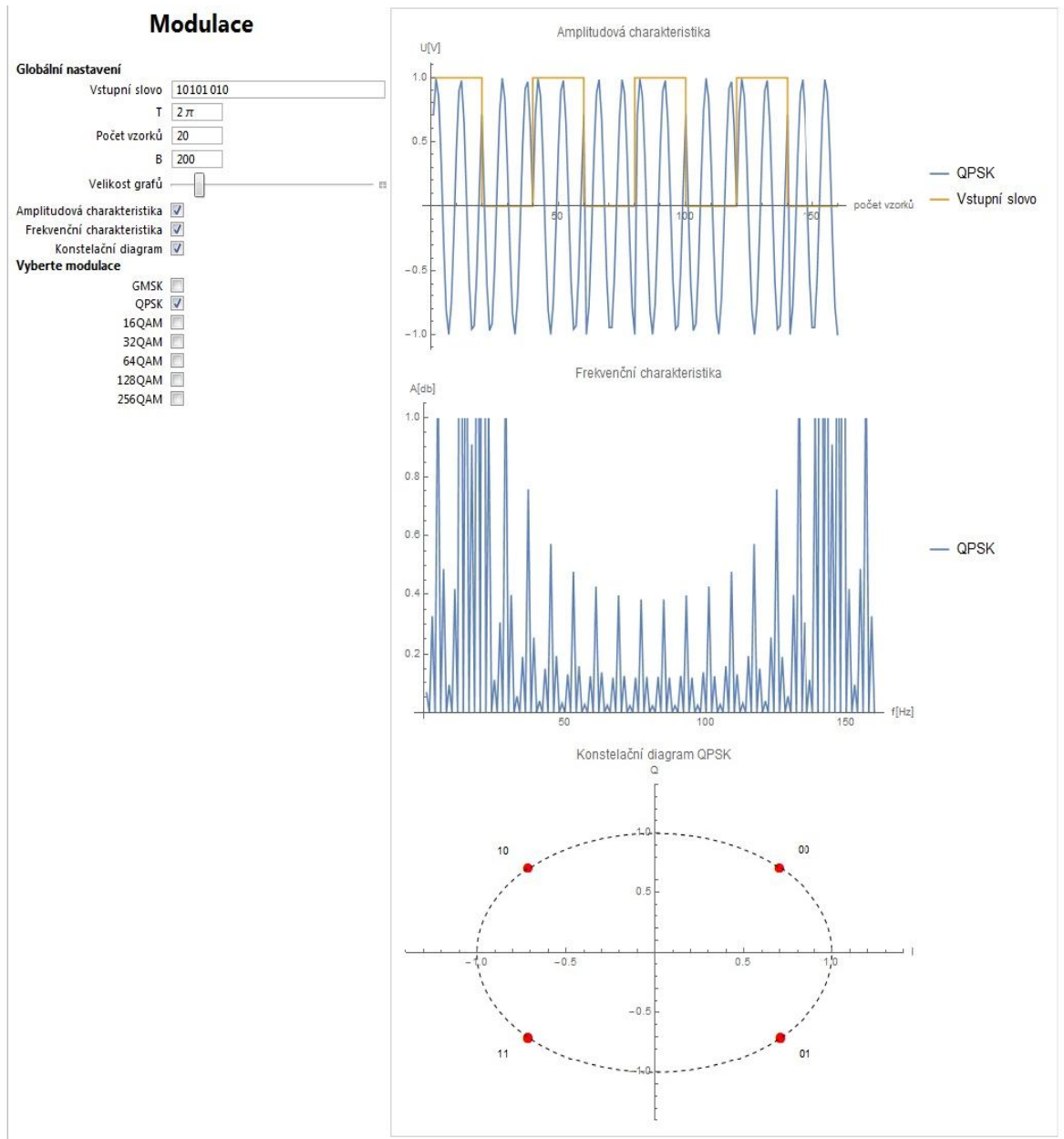
Na prvním grafu modulace vidíme amplitudovou charakteristiku modulovaného signálu ve formě sinusových křivek při periodě $T = 2\pi$. Ta vznikla z původních zadaných vstupních bitů, tj. vstupního slova, ze kterého se vygeneroval časový průběh signálu, je značen červenou čarou.

Na druhém grafu vidíme vygenerované frekvenční spektrum modulovaného signálu.

Na třetím grafu je vidět vygenerovaný konstelační diagram, tedy graf, který prezentuje 1 stav-symbol (graficky bod) modulace, který přenesou pouze jeden bit a to v hodnotě 1 nebo 0.

9.4 Modulace QPSK

Na následujícím Obr. 41 je zobrazena ukázka modulace QPSK :



Obrázek 41: Modulace QPSK

9.4.1 Ovládání

Ovládání a parametry pro tuto modulaci jsou shodné s nastavením modulace GMSK, viz kapitola 9.3.1, s tím rozdílem, že byla analogicky zatržena pouze kolonka QPSK.

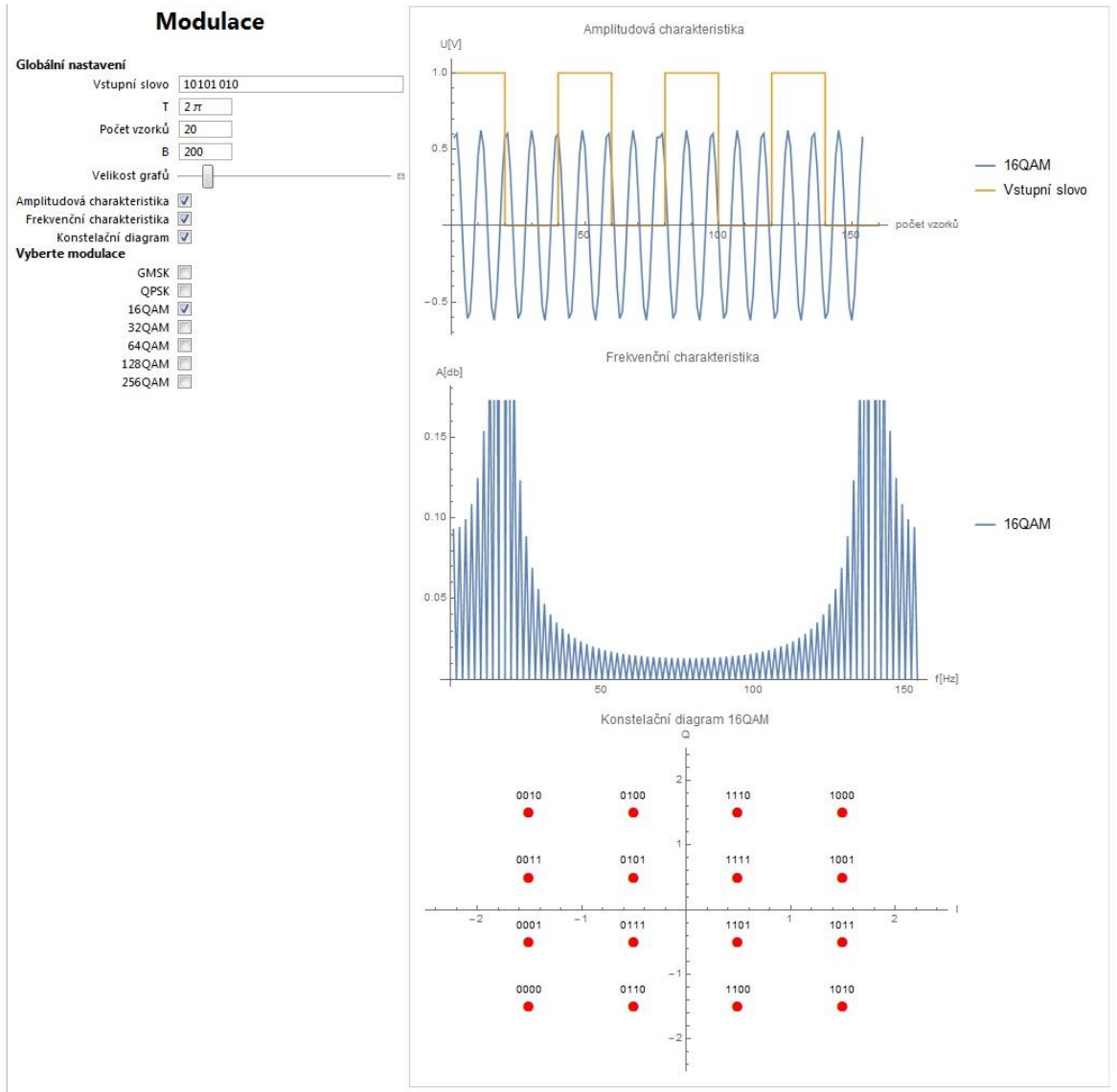
9.4.2 Grafické výstupy modulace

Amplitudová charakteristika QPSK je trochu odlišná v průběhu sinus signálu v porovnání s GMSK modulací. Co se týče frekvenční charakteristiky, tak dosahuje oproti GMSK nižší hodnoty amplitudy a také disponuje mnohem častějšími výskyty kolísání amplitudy.

Na třetím grafu je vidět vygenerovaný konstelační diagram, který používá čtyřstavové klíčování fázovým zdvihem, kde každý stav (symbol) přenáší současně 2 bity. Oproti modulaci GMSK se tedy jedná o progresivnější modulaci, která přenese dvojnásobnou bitovou informaci.

9.5 Modulace 16-QAM

Na následujícím Obr. 42 je zobrazena ukázka modulace 16-QAM :



Obrázek 42 : Modulace 16-QAM

9.5.1 Ovládání

Ovládání a parametry pro tuto modulaci jsou shodné s nastavením modulace GSMK i QPSK viz kapitola 9.3.1 s 9.4.1 s tím rozdílem, že byla analogicky zatržena pouze kolonka 16-QAM.

9.5.2 Grafické výstupy modulace

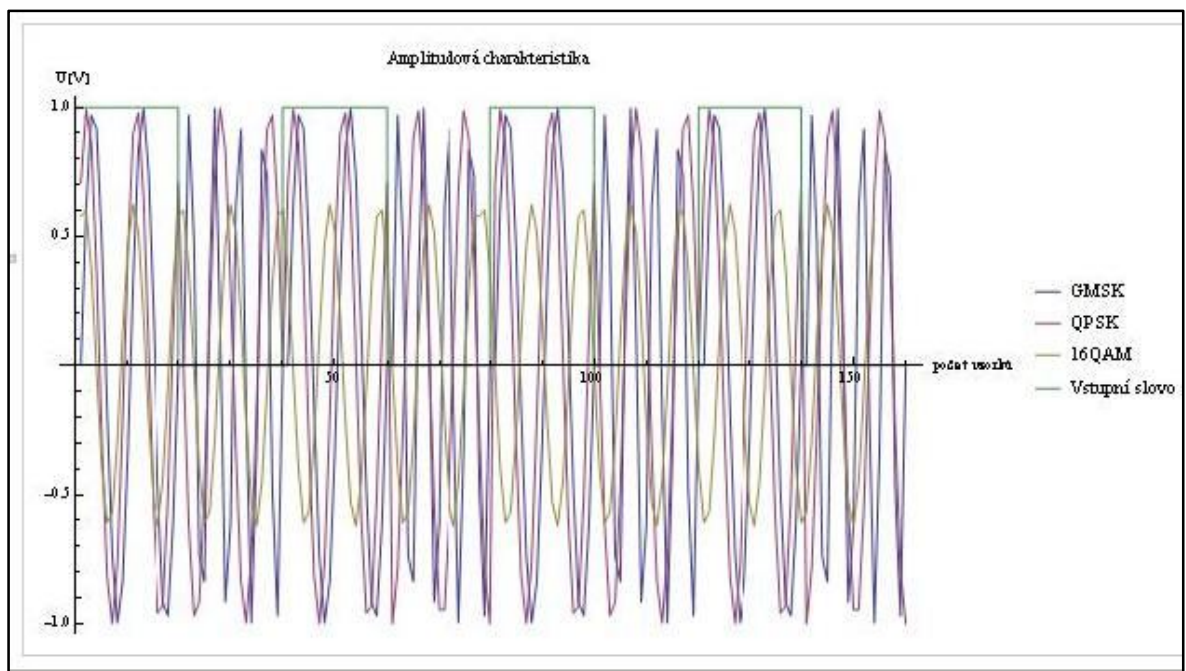
Amplitudová charakteristika modulace 16-QAM se liší od předchozích dvou poloviční hodnotou amplitudy signálu. Co se týče frekvenční charakteristiky, tak dosahuje mnohem stabilnějšího průběhu bez frekvenčních výkyvů a kolísání amplitud než předchozí dvě modulace.

Na třetím grafu je vidět vygenerovaný konstelační diagram, který používá kvadraturní amplitudovou modulaci, kde jeden symbol prezentuje čtyři bity a může mít 16 různých hodnot. V porovnání s modulací QPSK a QAM, ve kterých je symbol vyjádřen dvěma bity, je tím pádem dvojnásobná přenosová rychlost .

9.6 Celkové porovnání modulací

9.6.1 Amplitudové charakteristiky souhrn

Na následujícím Obr. 43 jsou uvedeny amplitudové charakteristiky všech tří modulací v jednom grafu. Pro všechny tyto modulace byly použity stejné vstupní parametry.



Obrázek 43 : Amplitudové charakteristiky modulací GMSK, QPSK, 16-QAM

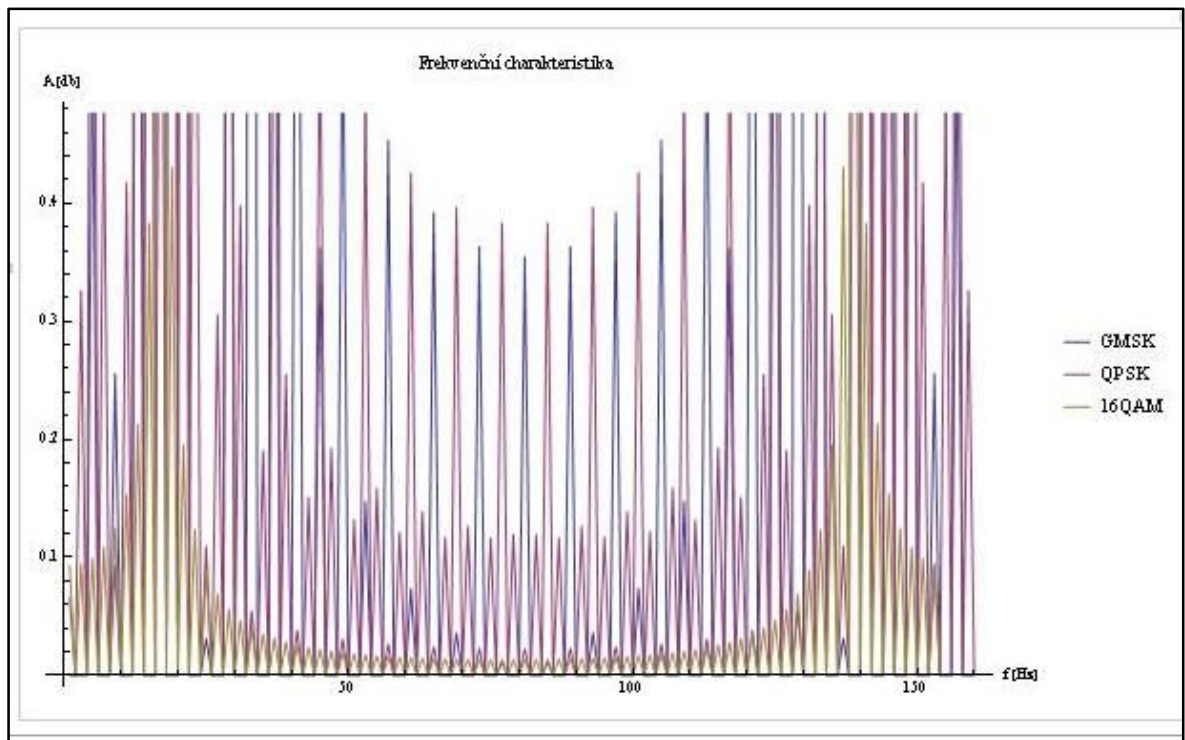
V legendě na obrázku souhrnného grafu vidíme vstupní slovo, tedy sekvenci bitů, které reprezentuje průběh původního nedomulovaného signálu.

Amplitudová charakteristika QPSK je vizuálně jen lehce odlišná v průběhu sinus signálu v porovnání s GMSK modulací.

Amplitudová charakteristika modulace 16-QAM se liší od předchozích dvou poloviční hodnotou amplitudy signálu.

9.6.2 Frekvenční charakteristiky souhrn

Na následujícím Obr. 44 jsou uvedeny frekvenční charakteristiky všech modulací v jednom grafu. Pro všechny tyto modulační metody byly použity stejné vstupní parametry.



Obrázek 44 : Frekvenční charakteristiky modulací GMSK, QPSK, 16-QAM

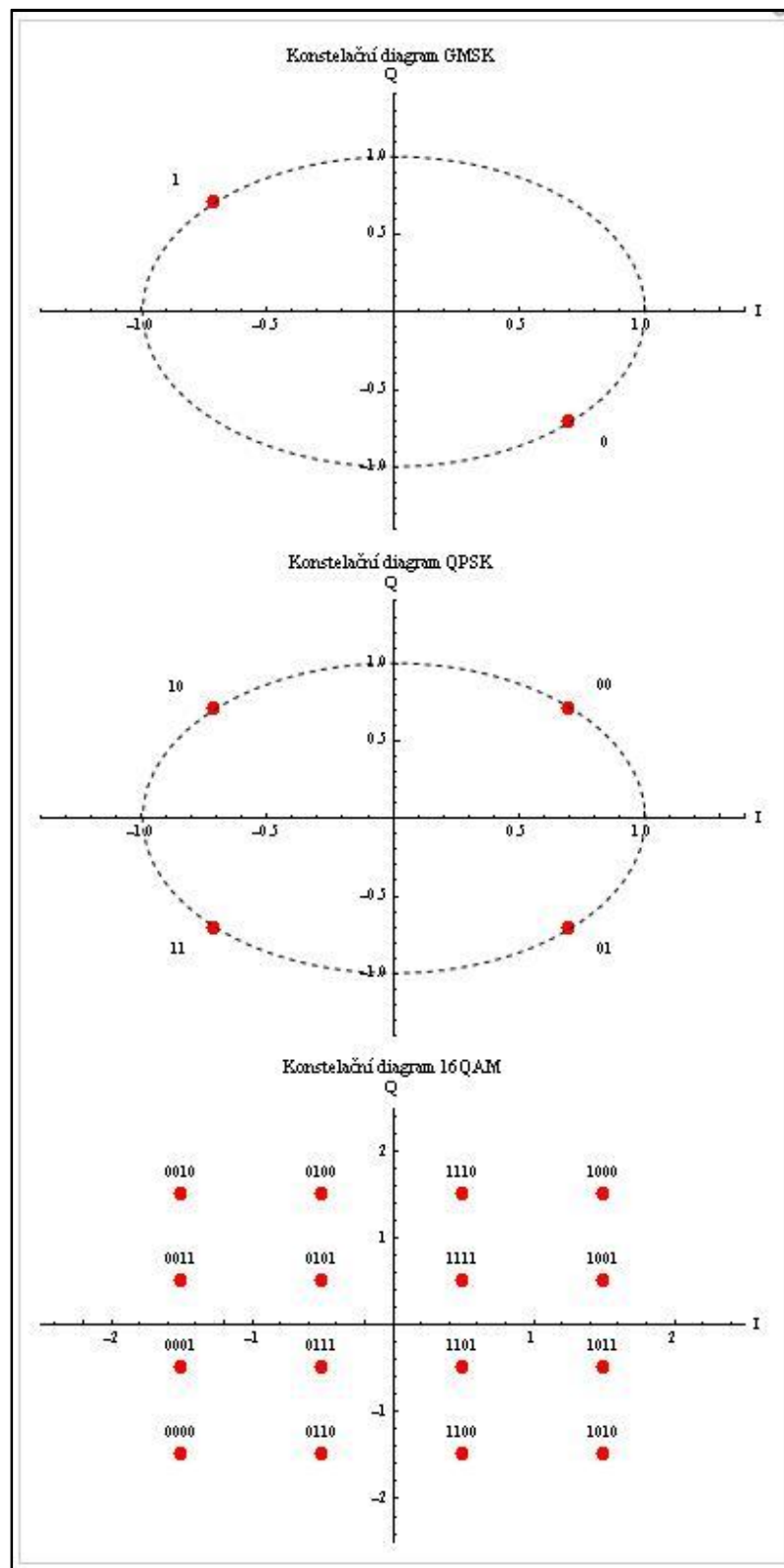
Modulace GMSK dosahuje ve frekvenčním spektru oproti modulaci QPSK o něco vyšší hodnoty amplitudy.

Modulace QPSK, dosahuje ve frekvenčním spektru oproti modulaci GMSK nižší hodnoty amplitudy, ale také disponuje mnohem častějšími výskyty kolísání amplitudy.

Modulace 16-QAM oproti modulacím GMSK a QPSK tak dosahuje mnohem stabilnějšího průběhu bez frekvenčních výkyvů a kolísání amplitud.

9.6.3 Konstelační diagramy souhrn

Na následujícím Obr. 45 jsou uvedeny konstelační diagramy všech modulací :



Obrázek 45 : Konstelační diagramy modulací GMSK, QPSK, 16-QAM

První obrázek zobrazuje konstelační diagram modulace GMSK, který vyjadřuje 1 stav - symbol, který je schopen přenést pouze 1 bit, a to z hodnot 1 či 0. V dnešní době se jedná o již zastaralý způsob modulace, ale na druhé straně se stále se používá u starší technologie GPRS v systému GSM.

Druhý obrázek prezentuje konstelační diagram modulace QPSK, ta používá čtyřstavové klíčování fázovým zdvihem, kde každý stav (symbol) přenáší současně 2 bity. Oproti modulaci GMSK se tedy jedná o progresivnější modulaci, která přenese dvojnásobnou bitovou informaci. Tato modulace se používá u hlasových a hlavně datových technologiích v systému UMTS.

Posledním obrázek v pořadí popisuje konstelační diagram modulace 16-QAM, která používá kvadraturní amplitudovou modulaci, kde jeden symbol vyjadřuje čtyři bity a může nabývat právě 16 různým hodnotám. V porovnání s modulací QPSK a QAM, ve kterých je symbol vyjádřen dvěma bity, je tím pádem dvojnásobná přenosová rychlost. Spolu s touto modulací jsou v praxi používány i její násobky, jako jsou např. 32-QAM, 64-QAM. Tyto modulace se používají v nejnovějších technologiích systému UMTS, kam spadá technologie HSPA+ či LTE, LTE-A.

ZÁVĚR

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část popisuje historii prvních mobilních sítí, které pak rozčleňuje do vývojových generací. V dalších následujících kapitolách je podrobně popsán systém GSM a UMTS, které jsou nezbytné k získání technických poznatků pro realizaci praktické části práce.

Praktická část je rozdělena do několika samostatných kapitol, ve kterých je postupně řešeno několik požadovaných cílů.

Prvním cílem bylo provedení analýzy současného stavu přidělených frekvencí a kanálů u mobilních operátorů v ČR, kam spadají tři velké společnosti, což jsou Vodafone, O2, T-Mobile.

Druhým cílem bylo zhodnocení celkové datové propustnosti současných mobilních sítí, do které spadají technologie GPRS, EDGE, HSPA, HSPA+, LTE, hojně využívané zákazníky.

Třetí cíl byl zaměřen na detailní analýzu nedávno do praxe zavedenou a rychle se rozvíjející technologii LTE. Práce se zabývala i jejím budoucím nástupcem, tedy technologií LTE-A, která je v současné době v ČR teprve v počátcích.

Poslední čtvrtý cíl byl zaměřen na srovnání modulace u systému GSM s novými perspektivními modulacemi budoucnosti. Toto srovnání bylo provedeno v programu Wolfram Mathematica. Byla vytvořena jedna aplikace, která obsahuje tři simulace modulací, kterými jsou GMSK, QPSK a 16-QAM, které byly vybrány po vzájemné domluvě s vedoucím práce.

Po otevření samotné aplikace se nám nabízí nejprve možnost volby požadované modulace. Po výběru konkrétní modulace můžeme nastavit řadu parametrů a hodnot, například periodu, počet vstupních bitů, počet vzorků. Po provedení výpočtu programem jsou následně zobrazeny grafy časového průběhu vstupního signálu, amplitudové charakteristiky a frekvenční charakteristiky modulovaného signálu a příslušného typu konstelačního diagramu.

Aplikace s modulacemi je umístěna na přiloženém CD.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The thesis is divided into theoretical and practical part. The theoretical part describes the history of the first mobile networks, which are then divided into evolutionary generations. In the following chapters, there is a detailed description of GSM and UMTS systems, which are crucial for acquiring technical knowledge for the implementation of the practical part of the thesis.

The practical part is divided into several independent chapters, which gradually solve several desired goals.

The first objective was to analyze the current state of allocated frequencies and channels for mobile operators in the Czech Republic, which includes three large companies, namely Vodafone, O2, and T-Mobile.

The third objective was focused on a detailed analysis of a rapidly developing LTE technology, recently implemented in practice. The thesis also dealt with its future successor, i.e. LTE-A, which is currently in the Czech Republic in its early stages.

Finally, the fourth objective was focused on the comparison of the modulation in the GSM system with new prospective modulations of the future. This comparison was made in Wolfram Mathematica program. One application was created, containing three modulation simulations, namely GMSK, 8PSK and 16QAM, which were selected after the mutual agreement with the thesis supervisor.

After opening the application itself, the first option offered to us is the choice of desired modulation. After selecting a particular modulation, we can set a variety of parameters and values, for example, period, a number of input bits and number of samples. After the calculation by the program, waveform graphs of the input signal, an amplitude characteristic and frequency characteristic a modulated signal and the relevant type of the constellation diagram were displayed.

The application with modulations is located on the enclosed CD.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [83] PUŽMANOVÁ, Rita. *Širokopásmový Internet: přístupové a domácí sítě*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2004, 377 s. ISBN 80-251-0139-8.
- [2] PUŽMANOVÁ, Rita. *Bezpečnost bezdrátové komunikace: jak zabezpečit wi-fi, bluetooth, GPRS či 3G*. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2005, 179 s. ISBN 80-251-0791-4.
- [3] PUŽMANOVÁ, Rita. *Moderní komunikační sítě od A do Z*. 2. aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2006, 430 s. ISBN 80-251-1278-0.
- [4] HANUS, Stanislav. *Bezdrátové a mobilní komunikace*. 1. vyd. Brno: VUT, 2001, 134 s. ISBN 80-214-1833-8.
- [5] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika III: [učebnice]*. 2., přeprac. vyd. České Budějovice: Kopp, 2012, 281 s. ISBN 978-80-7232-437-8.
- [6] HANUS, Stanislav. *Bezdrátové a mobilní komunikace II*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2005, 171 s. ISBN 80-214-2817-1.
- [7] VLČEK, Karel. *Kompresce a kódová zabezpečení v multimediálních komunikacích*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 258 s. ISBN 80-730-0134-9.
- [8] DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. *Moderní radiotechnika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 767 s. ISBN 80-730-0132-2.
- [9] PROKOPEC, Jan a Stanislav HANUS. *Systémy mobilních komunikací*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2008, 134 s. ISBN 978-80-214-3791-3.
- [840] SLANINA, Martin. *Moderní bezdrátová komunikace: přednášky*. Vyd. 1. V Brně: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ústav radioelektroniky, 2010, 169 s. ISBN 978-80-214-4156-9.
- [851] PROKOPEC, Jan. *Systémy mobilních komunikací: sítě pro mobilní datové služby*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012, 186 s. ISBN 978-80-214-4498-0.
- [862] SCHILLER, Jochen. *Mobile communications*. 2nd ed. Boston: Addison-Wesley, 2003, xviii, 492 s. ISBN 03-211-2381-6.

- [873] HORAK, Ray. *Telecommunications and data communications handbook*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2007, xxxviii, 791 p. ISBN 978-047-0396-070.
- [24] ŽALUD, Václav: Systém mobilní komunikace pro dlouhodobou evoluci LTE/SAE. In *Radiokomunikace 2009*. Pardubice: UNIT, 2009, s. 67-89.
- [28] CHRAMCOV, Bronislav. *Základy práce v prostředí Mathematica*. Vyd. 1. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2005, 122 s. ISBN 80-731-8268-8.

Internetové zdroje:

- [14] Český telekomunikační úřad: regulátor trhu e-komunikací a poštovních služeb. 2008. *Český telekomunikační úřad* [online]. [cit. 2015-04-1]. Dostupné z: <http://www.ctu.cz/>
- [885] BÍLÝ, Vladimír. Frekvenční přiděl na pásmech GSM, DCS, UMTS a LTE v České republice. [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.gsmweb.cz/clanky/freq2.htm>
- [896] Release 5. c 2014. *3GPP* [online]. [cit. 2014-11-14]. Dostupné z: <http://www.3gpp.org/specifications/releases/75-release-5>
- [907] Release 6. c 2014. *3GPP* [online]. [cit. 2014-11-14]. Dostupné z: <http://www.3gpp.org/specifications/releases/74-release-6>
- [918] Release 7. c 2014. *3GPP* [online]. [cit. 2014-11-14]. Dostupné z: <http://www.3gpp.org/specifications/releases/73-release-7>
- [929] Release 8. c 2014. *3GPP* [online]. [cit. 2014-11-14]. Dostupné z: <http://www.3gpp.org/specifications/releases/72-release-8>
- [20] Release 9. c 2014. *3GPP* [online]. [cit. 2014-11-14]. Dostupné z: <http://www.3gpp.org/specifications/releases/71-release-9>
- [21] Release 10. c 2014. *3GPP* [online]. [cit. 2014-11-14]. Dostupné z: <http://www.3gpp.org/specifications/releases/70-release-10>
- [22] Release 11. c 2014. *3GPP* [online]. [cit. 2014-11-14]. Dostupné z: <http://www.3gpp.org/specifications/releases/69-release-11>
- [23] HSPA & LTE Advancements. [online]. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2012/03/hspaltenhancementsgsmaperfeb2012final.pdf>

- [25] O2 Internet v mobilu. *O2* [online]. O2 Czech Republic a.s. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.o2.cz/osobni/internet/internet-v-mobilu.html>
- [26] Nejbezpečnější superrychlá síť LTE. 2015. *T-Mobile* [online]. T-Mobile Czech Republic a.s. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <https://www.t-mobile.cz/microsites/lte/index.html#>
- [27] Rychlost až 225 Mbit/s. 2015. *Vodafone* [online]. Vodafone [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://http://www.vodafone.cz/turbo/rychlost/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

16-QAM	Sixteen-Quadrature Amplitude Modulation, šestnáctistavová kvadrurní amplitudová modulace
1G	první generace
2G	druhá generace
32-QAM	32-Quadrature Amplitude Modulation, 32 stavová kvadrurní amplitudová modulace
3G	třetí generace
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	čtvrtá generace
64-QAM	64-Quadrature Amplitude Modulation, 64 stavová kvadrurní amplitudová modulace
8-PSK	Eight-Phase Shift Keying, osmistavová modulace s fázovým klíčováním
A /D	Analog to Digital Converter, analogově-digitální převodník
ACK /NACK	Positive/Negative ACKnowledgement
ADC	Administrative Centre, administrativní centrum
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AIPN	All IP Networks
AMC	Adaptive Modulation Coding, adaptivní modulace a kódování
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AMR	Adaptive Multi Rate, adaptivní kódování řeči
APCM	Adaptive Pulse Coded Modulation (PMC)
AuC	Authentication Centre, centrum autentičnosti
BS	Base Station, základnová stanice
BSC	Base Station Controller, základnová řídicí jednotka
BSS	Base Station Subsystem, subsystém základnových stanic
BTS	Base Transceiver Station, základnová rádiová stanice

CDMA	Code Division Multiple Access, mnohonásobný přístup s kódovým dělením
CEPT	Conférence des Administrations Européennes des Poste set Telecommunications, European Conference of Postal and Telecommunications Administrations, Evropská komise pro pošty a telekomunikace
CI	Cell Identity
CN	Core Network, páteřní síť
CoMP	Coordinated Multi-Point
CP	Cyclic Prefix, cyklický prefix
CRC	Cyclic Redundancy Code, kontrolní součet (funkce pro detekci chyb)
CS	Coding Scheme, kódovací schéma, Circuit Switching, přepojování okruhů
CSD	Circuit Switched Data
D /A	Digital to Analog Converter, digitálně-analogový převodník
D-AMPS	Digital Advanced Mobile Phone System
DC-HSDPA	Dual Carrier-HSDPA
DC-HSUPA	Dual Carrier-HSUPA
DCS	Digital Cellular System
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunication, systém pro bezšňůrové telefony 124
DFTS-OFDM	Discrete Fourier Transform Spread OFDM, OFDM s rozprostíráním signálu pomocí diskrétní Fourierovy transformace
DRNC	Drift RNC, podpůrné RNC
DTX	Discontinuous Transmission, nespojitý přenos
DwPTS	Downlink Pilot Timeslot
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
EIR	Equipment Identity Register, registr mobilních stanic
EPC	Evolved Packet Core

EPS	Evolved Packet System
ETSI	European Telecommunications Standards Institute, evropský institut pro normalizaci v telekomunikacích
E-UTRAN	Evolved-UTRAN
FDD	Frequency Division Duplex, frekvenční duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access, mnohonásobný přístup s frekvenčním dělením
FEC	Forward Error Correction, dopředná chybová korekce
FFT	Fast Fourier Transform, rychlá Fourierova transformace
FRF	Frequency Reuse Factor, činitel opakování frekvence
GGSN	Gateway GPRS Support Node, brána pro komunikaci GPRS s vnějšími sítěmi
GI	Guard Interval, ochranný interval
GMSC	Gateway Mobile Switching Centre, brána pro komunikaci GSM s vnějšími sítěmi
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying, Gaussovská modulace s minimálním zdvihem
GP	Guard Period, ochranná doba
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Groupe Spécial Mobile, Global System for Mobile Communications, globální systém pro mobilní komunikaci
GSM-R	GSM-Railway, GSM pro použití v železniční dopravě
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GTP	GPRS Tunneling Protocol
GUTI	Globally Unique Temporary Identity, dočasná identifikace uživatele v systému LTE
HAPS	High Altitude Platforms

HARQ	Hybrid Automatic Retransmission Query, hybridní metoda s automatickou žádostí o opakování přenosu
H-ARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HeNB GW	Home eNode B Gateway, brána Home eNode B
HFDD	Half FDD, frekvenční poloduplex
HLR	Home Location Register, domovský lokační registr
HPSK	Hybrid Phase Shift Keying, hybridní fázové klíčování
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSPA+	Evolved High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server, domácí uživatelský server 126
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
ICI	Inter Carrier Interference, interference mezi nosnými
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform, inverzní rychlá Fourierova transformace
IMEI	International Mobile Equipment Identity, jednoznačná identifikace mobilní stanice
IMSI	International Mobile Subscriber Identity, jednoznačná identifikace uživatele
IMT 2000	International Mobile Telecommunications for the Year 2000
IP	Internet Protocol
IS-136	Interim Standard
IS-95	Interim Standard
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISI	Inter Symbol Interference, mezisymbolové interference
ITU	International Telecommunication Union, mezinárodní telekomunikační unie
Kc	Ciphering Key, šifrovací klíč

Ki	Authentication Key, tajný ověřovací klíč
LA	Location Area
LPC	Linear Predictive Coding, lineární prediktivní kódování
LTE	Long Term Evolution
LTE – A	Long Term Evolution Advanced
LTP	Long Time Prediction
MC-HSDPA	Multi Carrier-HSDPA
MCS	Modulation and Coding Scheme, modulační a kódové schéma
ME	Mobile Equipment, mobilní zařízení
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
MME	Mobility Management Entity
MMS	Multimedia Messaging Service, multimediální zpráva
MR	Multihop Relay 127
MRC	Maximum Ratio Combining
MS	Mobile Station, mobilní stanice
MSC	Mobile Switching Centre, mobilní radiotelefonní ústředna
MSISDN	Mobile Subscriber Integrated Services Digital Network Number, telefonní číslo
MSK	Minimum Shift Keying, frekvenční klíčování s minimálním zdvihem
MU – MIMO	Multi User-MIMO, víceuživatelské MIMO
NMC	Network Management Centre, centrum managementu sítě
NMT 450	Nordic Mobile Telephone 450 MHz
NMT 900	Nordic Mobile Telephone 900 MHz
NSS	Network and Switching Subsystem, síťový a spínací subsystém
NTT	Nippon Telegraph and Telephone

OCQPSK	Orthogonal Complex QPSK, ortogonální komplexní QPSK
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex, ortogonální frekvenční multiplex
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access, mnohonásobný přístup s ortogonálním kmitočtovým dělením
OMC	Operational and Maintenance Centre, provozní a servisní centrum
OSS	Operation and Support Subsystem, operační a podpůrný subsystém
OVSF	Orthogonal Variable Spreading Factor, ortogonální kódy s proměnným činitelem rozprostírání
PAPR	Peak to Average Power Ratio, poměr špičkového výkonu k průměrnému výkonu
PBCH	Physical Broadcast Channel, fyzický kanál pro přenos broadcastových informací v downlinku v LTE
PCC	Policy and Charging Control
PCFICH	Physical Control Format Control Channel, fyzický kanál pro přenos řídicích informací v downlinku v LTE
PCM	Pulse Code Modulation, pulzně kódová modulace
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Association
PCS 1900	Personal Communications System, GSM 1900
PCU	Packet Control Unit, paketová řídicí jednotka
PDC	Personal Digital Cellular
PDCCH	Physical Downlink Control Channel, fyzický kanál pro přenos řídicích informací v downlinku v LTE
PDN	Packet Data Network, paketová datová síť
PDN-GW	Packet Data Network Gateway, brána paketové datové sítě 128
PDP	Packet Data Protocol
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel, fyzický kanál pro přenos uživatelských dat v downlinku v LTE

PHICH	Physical HARQ Indicator Channel, fyzický kanál pro přenos řídicích informací v downlinku v LTE
PLMN	Public Land Mobile Network
PMCH	Physical Multicast Channel, fyzický kanál pro přenos MBMS v downlinku v LTE
PMIP	Proxy Mobile IP
PNP	Pseudonáhodná posloupnost
PRACH	Physical Random Access Channel, fyzický kanál pro náhodný přístup do systému v uplinku v LTE
PRCF	Policy and Charging Rules Function
PS	Packet Switching, přepojování paketů
PSC	Parallel to Serial Converter, paralelně-sériový převodník
PSDN	Public Switched Data Network
P-SCH	Primary Synchronization Channel
PSTN	Public Switched Telephone Network
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel, fyzický kanál pro přenos uživatelských dat v uplinku v LTE
QoS	Quality of Service, kvalita služeb
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying, čtyřstavová modulace s fázovým klíčováním
RAND	Random Number, náhodné číslo
RN	Relay Nodes, reléová stanice
RNC	Radio Network Controller, řídicí jednotka rádiové sítě
RPE-LTP	Regular Pulse Excitation-Long Term Prediction, pravidelné pulzní buzení s dlouhodobou predikcí
RS	Reference Signal, referenční signál

RTMS	Radio Telephone Mobile System
SAE	System Architecture Evolution
SAE-GW	System Architecture Evolution-Gateway
SAR	Specific Absorption Rate, specifická míra pohlcení
SC-FDMA	Single Carrier FDMA, FDMA s jednou nosnou
SF	Spreading Factor, činitel rozprostírání
SGSN	Serving GPRS Support Node, mobilní radiotelefonní ústředna pro datové přenosy
SIM	Subscriber Identity Module
SIMO	Single Input Multiple Output
SIR	Signal to Interference Ratio, poměr signálu k interferencím
SISO	Signale-Input Signale-Output
SMS	Short Message Service, krátká textová zpráva
SMSC	Short Message Service Centre, Centrum pro řízení provozu krátkých textových zpráv
SNR	Signal to Noise Ratio, poměr signálu k šumu
SPC	Serial to Parallel Converter, sériově-paralelní převodník
SRES	Signed Response, odezva
SRNC	Serving RNC, obsluhující RNC
S-SCH	Secondary Synchronization Channel in UMTS
SU – MIMO	Single User-MIMO
TACS	Total Access Communication System
TCP /IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TD-CDMA	Time Division-CDMA
TDD	Time Division Duplex, časový duplex
TDMA	Time Division Multiple Access, mnohonásobný přístup s časovým dělením

TD-SCDMA	Time Division-Synchronous CDMA
TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment, uživatelské zařízení
UMB	Ultra Mobile Broadband
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System, univerzální mobilní telekomunikační systém
UpPTS	Uplink Pilot Timeslot
USIM	Universal Subscriber Identity Module
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
VAD	Voice activity detection, detektor hlasové aktivity
VLR	Visitor Location Register, návštěvnický lokační registr
VoIP	Voice over IP, přenos hlasu přes datovou síť
WAP	Wireless Application Protocol
W-CDMA	Wideband-CDMA, širokopásmové CDMA
W-CDMA-FDD	Wideband-CDMA Frequency-division duplexing
W-CDMA-TDD	Wideband-CDMA Time-division duplexing
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WWW	World Wide Web, celosvětová síť hypertextových dokumentů

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 :Obecné schéma komunikačního systému	18
Obrázek 2 : Kódování zdroje signálu, kódování kanálu a prokládání v systému GSM.....	19
Obrázek 3: GMSK modulace.....	22
Obrázek 4 : Typická koncepce mobilní účastnické stanice GSM.....	23
Obrázek 5 : Princip mnohonásobného využití frekvencí pro uskutečňování hovorů v síti GSM.....	25
Obrázek 6 : Představa slotů, rámců a multirámců.....	27
Obrázek 7 : Přenos hlasu v sítích GSM.....	28
Obrázek 8 : Architektura sítě GSM.....	30
Obrázek 9 : Datové přenosy CSD a HSCSD v GSM sítích o rychlosti 9,6 kbit/s a 14,4 kbit/s	38
Obrázek 10 : Přenos dat v síti GSM pomocí GPRS	40
Obrázek 11 : Modulace 8-PSK	42
Obrázek 12 : Kmitočtová pásma systému UMTS.....	50
Obrázek 13 : Zpracování signálu v UMTS.....	50
Obrázek 14: Zdrojové kódování v UMTS	51
Obrázek 15: Konstelační diagramy modulace QPSK a OCQPSK	53
Obrázek 16: Přístupová technika FDMA/TDMA/CDMA.....	53
Obrázek 17 : Struktura sítě UMTS.....	54
Obrázek 18 : Struktura pozemní sítě UTRAN.....	56
Obrázek 19 : Technologie HSDPA.....	58
Obrázek 20: Frekvenční přiděl na pásmu UMTS v ČR	64
Obrázek 21: Konstelační diagramy GMSK a 8-PSK	69
Obrázek 22: Konstelační diagramy QPSK a 16QAM.....	72
Obrázek 23 : Průběh funkce sinc	84
Obrázek 24 : Blokové schéma vysílače a přijímače OFDM.....	85
Obrázek 25 : Rámec typu 1 pro LTE FDD.....	87
Obrázek 26 : Rámec typu 2 pro LTE TDD.....	87
Obrázek 27 : Downlink LTE – 0. Subrámec	90
Obrázek 28 : Downlink LTE – 1.-4.6.-9. subrámec	90
Obrázek 29 : Downlink LTE – 5. subrámec	90
Obrázek 30 : Uplink LTE – subrámec.....	91

Obrázek 31 : OFDMA.....	93
Obrázek 32 : SC-FDMA.....	94
Obrázek 33 : Architektura systému LTE.....	95
Obrázek 34 : Režimy systému LTE	98
Obrázek 35 : RN a femtobuňky v systému LTE-Advanced.....	107
Obrázek 36 : Ukázka z prostředí Wolfram Mathematica	109
Obrázek 37 : Aplikace s modulacemi – úvodní okno	111
Obrázek 38 : Úvodní menu s parametry nastavení	112
Obrázek 39 : Modulace GMSK	114
Obrázek 40 : Ovládání modulace GMSK.....	115
Obrázek 41: Modulace QPSK.....	116
Obrázek 42 : Modulace 16-QAM	118
Obrázek 43 : Amplitudové charakteristiky modulací GMSK, QPSK, 16-QAM.....	120
Obrázek 44 : Frekvenční charakteristiky modulací GMSK, QPSK, 16-QAM.....	121
Obrázek 45 : Konstelační diagramy modulací.....	122

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Generace mobilních systémů	16
Tabulka 2: GSM – počty přidělených kanálů pro jednotlivé operátory	61
Tabulka 3: GSM 900 – výčet všech kanálů pro jednotlivé operátory	62
Tabulka 4: GSM 1800 – výčet kanálů pro jednotlivé operátory	63
Tabulka 5: UMTS 2100 FDD – přehled nosných pro jednotlivé operátory	65
Tabulka 6: LTE 800 DD – frev. pásma	65
Tabulka 7: LTE 2600 – frekv. pásma	66
Tabulka 8: Kódová schémata GPRS	68
Tabulka 9: Srovnání modulace GMSK a 8 –PSK	70
Tabulka 10: Modulační a kódová schémata EDGE	70
Tabulka 11: Třídy HSDPA	72
Tabulka 12: Třídy HSUPA	74
Tabulka 13: Modulační a kódová schémata E-EDGE úroveň A, downlink	75
Tabulka 14: Modulační a kódová schémata E-EDGE úroveň A, uplink	75
Tabulka 15: Modulační a kódová schémata E-EDGE úroveň B, downlink	76
Tabulka 16: Modulační a kódová schémata E-EDGE úroveň B, uplink	76
Tabulka 17 : Rozdělení Kmitočtového pásma LTE FDD	82
Tabulka 18 : Rozdělení kmitočtového pásma LTE TDD	83
Tabulka 19 : Uspořádání subrámců LTE TDD	88
Tabulka 20 : Druhy cyklického prefixu v systému LTE	88
Tabulka 21 : Třídy terminálů LTE	92
Tabulka 22 : Parametry systému LTE	103
Tabulka 23 : Závislost maximální přenosové rychlosti na šířce pásma v systému LTE	103

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Zdrojový kód aplikace pro tvorbu simulací modulací ve WOLFRAM

MATHEMATICA

Příloha 2: Aplikace s modulacemi umístěna na přiloženém CD.

PŘÍLOHA 1: ZDROJOVÝ KÓD APLIKACE PRO TVORBU SIMULACÍ MODULACÍ VE WOLFRAM MATHEMATICA

```

generujGraye[bitu_]:=Module[{gray},
  gray=#+2Abs[#-
Join[{Table[0,{bitu}],Rest[RotateRight[#]]]}&[IntegerDigits[BitXor[#,Int
egerPart[#/2]],2,bitu]&/@Range[0,-1+2^bitu]];
  Table[StringJoin[Table[If[gray[[g,p]]==1||
gray[[g,p]]==3,"1","0"],{p,1,bitu}]]
  ,{g,1,Length[gray]}]
];
konstelacniDiagram2bit[bitu_,velikost_,popisek_]:=Module[{bodu=2^bitu,i,u,u
hlovyKrok,list,leg,plot,rmax=1.4,rposun=1.2,gray,uhlovyPosun=-
45,posunLegendy},
  gray=generujGraye[bitu];
  uhlovyKrok=360/bodu;

list=Table[{Sin[(i*uhlovyKrok+uhlovyPosun)/360*6.28],Cos[(i*uhlovyKrok+uh
lovyPosun)/360*6.28]},{i,1,bodu}];

leg=Table[Text[gray[[u]},{rposun*Sin[(u*uhlovyKrok+uhlovyPosun)/360*6.28]
,rposun*Cos[(u*uhlovyKrok+uhlovyPosun)/360*6.28]},{u,1,bodu}];
  plot=ListPlot[list,PlotRange→{{-rmax,rmax},{-
rmax,rmax}},PlotStyle→Red,PlotMarkers→{●,15},ImageSize→velikost,PlotLabe
l→popisek,AxesLabel→{"I","Q"}];
  Show[
  plot,
  Graphics[{Dashed,Circle[{0,0},1],leg}]
  ]
];
konstelacniDiagram[bitu_,velikost_,popisek_]:=Module[{bodu=2^bitu,i,u,uhlov
yKrok,list,leg,points,plot,gray,graphic},
  If[bitu≤2,Return[konstelacniDiagram2bit[bitu,velikost,popisek]]];

Return[If[Mod[bitu,2]==0,konstelacniDiagramSude[bitu,velikost,popisek],ko
nstelacniDiagramLiche[bitu,velikost,popisek]]
];
konstelacniDiagramSude[bitu_,velikost_,popisek_]:=Module[{bodu=2^bitu,i,u,u
hlovyKrok,list,leg,points,plot,gray,graphic,rmax},
  pul=(bitu-1)/2;
  rmax=pul+1;
  points={};
  For[x=-pul,x≤pul,x++,
  For[y=-pul,y≤pul,y++,
  AppendTo[points,{x,y}];
  ];
];

plot=ListPlot[points,PlotStyle→Red,PlotMarkers→{●,15},ImageSize→velikost
,PlotRange→{{-rmax,rmax},{-
rmax,rmax}},PlotLabel→popisek,AxesLabel→{"I","Q"}];
graphic={Dashed};
(*For[i=1,i<bitu,i++,AppendTo[graphic,Circle[{0,0},i*0.75]]];*)
AppendTo[graphic,konstelacniDiagramGetGray[bitu,points]];
Show[
  plot,
  Graphics[graphic]
];
];

```

```

konstelacniDiagramLiche[bitu_, velikost_, popisek_] := Module[{bodu=2bitu, i, u,
uhlovyKrok, list, leg, points, plot, gray, graphic},
  pul = (bitu)/2;
  rmax=pul+1;
  points={};
  For[x=-pul, x<=pul, x++,
    For[y=-pul, y<=pul, y++,
      If[Abs[x]==pul&&Abs[y]==pul, Continue, AppendTo[points, {x,y}]]];
  ];
];

plot=ListPlot[points, PlotStyle->Red, PlotMarkers->{●, 15}, ImageSize->velikost,
, PlotRange->{{-rmax, rmax}, {-
rmax, rmax}}, PlotLabel->popisek, AxesLabel->{"I", "Q"}];
  graphic={Dashed};
  (*For[i=1, i< bitu, i++, AppendTo[graphic, Circle[{0,0}, i*0.75]]];*)
  AppendTo[graphic, konstelacniDiagramGetGray[bitu, points]];
  Show[
  plot,
  Graphics[graphic]
  ];
];

konstelacniDiagramGetGray[bitu_, vstup_] := Module[{legend={}, gray, u},
  gray=generujGraye[bitu];
  legend=Table[
    Text[gray[[u]], {vstup[[u,1]], vstup[[u,2]]+0.25}],
    {u, 1, Length[vstup]}];
  legend
  ];

doplnitBity[vstup_, pocetBitu_] := Module[{data, n},
  data=IntegerDigits[vstup]; (*přYedělblání vstupních hodnot do 1/0*)
  (*kontrola a doplnělní vstupu na rozdělnění do trojic*)
  n=Length[data];
  For[i=n, i<Ceiling[n/pocetBitu]*pocetBitu, i++, AppendTo[data, 0]];
  Return[data]
  ];

ModulaceGMSK[vstup_, B_, T_, vz_] := Module[{v, t, tvz, u, gauss, dataL, data, dataS,
s, filtered, filtered2, k, Q, J, sin, cos, nasQ, nasJ, sou, pocetBitu=1, i, n=5, x, graf,
graff},
  data=IntegerDigits[vstup];
  If[Mod[Length[data], 2]≠ 0, AppendTo[data, 0]];
  graf=Table[Sin[x*(2-data[[i]])], {i, 1, Length[data]}];
  graff={};
  For[i=1, i<=Length[graf], i++,
    sou=Table[graf[[i]], {x, 0, 2*T, (2T)/(vz-1)}];
    graff=Join[graff, sou]
  ];
  Return[{"GMSK", graff, Abs[Fourier[graff]], pocetBitu, data}
  ];

ModulaceQPSK[vstup_, B_, T_, pocVzorku_] := Module[{data, n, tvz, pom1, pom2, pom3,
pom4, pom5, pom6, tvz2, v, u, gausImp, dataVs, i, dataI, dataQ, dataIm, dataQm, ampl1,
ampl2, ss, ss1, sd, sd1, sou, pocetBitu=2},
  data=IntegerDigits[vstup];
  If[Mod[n, 2]≠0, data=AppendTo[data, 0]]; (*kontrola sudosti vstupních
bitů, doplnělní na sudé*)
  n=Length[data];
  tvz=T/(pocVzorku-1);
  pom1=T*0.5;
  pom2=1.5*T;
  tvz2=(pom1+pom2)/pocVzorku;

```

```

v=1/(2T);
u=B/(2T) * sqrt(Pi / Log[sqrt(2)]) * integral from -T to T of e^(-Pi^2 * B^2 / Log[sqrt(2)] * tau^2) d tau;
gausImp=Table[u, {t, -pom1, pom2, tvz2}];
(*vykreslení vstupních bitů*)
dataVs={};
For[i=1, i<Length[data]+1, i++,
  AppendTo[dataVs, {tvz*(i-1), data[[i]]}];
  AppendTo[dataVs, {tvz*i, data[[i]]}];
];
(*amplitudy Q a I, pro jednoduchost jsou totožné*)
dataI=dataQ=data;
For[i=1, i<Length[dataI]+1, i++,
  If[dataI[[i]]==0, dataI[[i]]=-1];
];
For[i=1, i<Length[dataQ]+1, i++,
  If[dataQ[[i]]==0, dataQ[[i]]=-1];
];
(*výpočty pro amplitudy*)
ampl1={};
ampl2={};
ss1=1;
sd1=0;
For[i=1, i<Length[dataI]+1, i++,
  ss=1/sqrt(2) * (ss1*dataI[[i]]-sd1*dataQ[[i]]);
  sd=1/sqrt(2) * (ss1*dataQ[[i]]+sd1*dataI[[i]]);
  AppendTo[ampl1, Abs[ss]];
  AppendTo[ampl2, Abs[sd]];
  ss1=ss;
  sd1=sd;
];
(*pomocné vzorce*)
pom3=Table[Cos[2x], {x, 0, T, tvz}];
pom4=Table[-Cos[2x], {x, 0, T, tvz}];
pom5=Table[Sin[2x], {x, 0, T, tvz}];
pom6=Table[-Sin[2x], {x, 0, T, tvz}];
(*generování signálů*)
dataIm={};
For[i=1, i<Length[dataI]+1, i++,
  If[dataI[[i]]==1,
    dataIm=Join[dataIm, ampl1[[i]]*pom3,
    dataIm=Join[dataIm, ampl1[[i]]*pom4];
];
];
dataQm={};
For[i=1, i<Length[dataQ]+1, i++,
  If[data[[i]]==1,
    dataQm=Join[dataQm, ampl2[[i]]*pom5,
    dataQm=Join[dataQm, ampl2[[i]]*pom6];
];
];
sou = dataIm+dataQm;
Return[{"QPSK", sou, Abs[Fourier[sou]], pocetBitu, data}];
];
ModulaceQAM[typQ_, vstup_, B_, T_, pocVzorku_]
:=Module[{asd, dsa, fp, n, data, data2, l, i, x, syn, graf, graff, ss1, ampStep, ampli
tuda},
  asd=2^typQ/2; (*maximální amplituda*)
  fp=2/2^typQ*(*6.28*)T;
  data=doplNitBity[vstup, typQ];

```

```

data2={};
l=1-typQ;
For[i=1,i<=Length[data]/typQ,i++,
  l=1+typQ;
  AppendTo[data2,data[[Range[1,l+typQ-1]]]]
];
ampStep=1/2typQ;
graf=Table[
  dsa=FromDigits[data2[[i]],2];
  amplituda = ampStep*dsa;
  amplituda*Sin[x+(fp+Mod[dsa,asd]*fp)/2],
  {i,1,Length[data2]}];
graff={};
ssl={};
For[i=1,i<=Length[graf],i++,
  ssl=Table[graf[[i]],{x,0,2*T*typQ,(2T)/(pocVzorku-1)}];
  graff=Join[graff,ssl]
];
Return[{ToString[2typQ]<"QAM",graff,Abs[Fourier[graff]],typQ,data}]
];
DigitPlot[data_,T_,pocVzorku_]:=Module[{tvz,dataVs},
  (*data=IntegerDigits[vstup];*)
  tvz=pocVzorku;
  dataVs={};
  For[i=1,i<Length[data]+1,i++,
    AppendTo[dataVs,{tvz*(i-1),data[[i]]}];
    AppendTo[dataVs,{tvz*i,data[[i]]}]]
];
Return[dataVs];
];
Render[globalVstup_,chars_,enables_,sett_]:=Module[{results={},krivkyAmplitudova
={},krivkyFrekvencni={},legends={},bity=1,vstupniSlovo
=globalVstup[[1]],nejdelsiSlovo=IntegerDigits[globalVstup[[1]]]},
  (*Výpočty modulací*)
  If[enables[[1]],AppendTo[results,ModulaceGMSK[vstupniSlovo
,Sequence@@sett]]];
  If[enables[[2]],AppendTo[results,ModulaceQPSK[vstupniSlovo
,Sequence@@sett]]];
  If[enables[[3]],AppendTo[results,ModulaceQAM[4,vstupniSlovo
,Sequence@@sett]]];
  If[enables[[4]],AppendTo[results,ModulaceQAM[5,vstupniSlovo
,Sequence@@sett]]];
  If[enables[[5]],AppendTo[results,ModulaceQAM[6,vstupniSlovo
,Sequence@@sett]]];
  If[enables[[6]],AppendTo[results,ModulaceQAM[7,vstupniSlovo
,Sequence@@sett]]];
  If[enables[[7]],AppendTo[results,ModulaceQAM[8,vstupniSlovo
,Sequence@@sett]]];
  (*Vyhledání nejdelšího vstupního slova*)
  Table[If[Length[nejdelsiSlovo]<
Length[results[[i,5]],nejdelsiSlovo=results[[i,5]],{i,1,Length[results]
}]];
  (*legendy*)
  Table[AppendTo[legends,results[[i,1]],{i,1,Length[results]}];
  grid={};
  (*Amplitudová charakteristika*)
  If[chars[[1]],
    Table[AppendTo[krivkyAmplitudova
,results[[i,2]],{i,1,Length[results]}];
    AppendTo[krivkyAmplitudova
,DigitPlot[nejdelsiSlovo,globalVstup[[2]],globalVstup[[3]]];

```

```

AppendTo[grid, {ListLinePlot[krivkyAmplitudova, PlotLabel->"Amplitudová
charakteristika", ImageSize->globalVstup[[4]], PlotLegends->Append[legends, "
Vstupní slovo"], AxesLabel->{"počet vzorků", "U[V"]}]}];
];
(*Frekvenční charakteristika*)
If[chars[[2]],
Table[AppendTo[krivkyFrekvencni
, results[[i, 3]], {i, 1, Length[results]}];
AppendTo[grid, {ListLinePlot[krivkyFrekvencni, PlotLabel->"Frekvenční
charakteristika", ImageSize->
globalVstup[[4]], PlotLegends->legends, AxesLabel->{"f[Hz]", "A[db]}]}];
];
(*Konstelační diagramy*)

If[chars[[3]] && (enables[[1]] || enables[[2]] || enables[[3]] || enables[[4]] || e
nables[[5]] || enables[[6]] || enables[[7]]),
Table[
AppendTo[grid, {
konstelacniDiagram[results[[i, 4]], globalVstup[[4]], "Konstelační
diagram "<>results[[i, 1]]
}],
{i, 1, Length[results]}];
];
(*Celkové vykreslení*)
Grid[grid, Alignment->Left, Spacings->{2, 1}]
];
Manipulate[
Render[
{vstup, gT, gVz, imageSize},
{charAmplitudova, charFrekvencni, charKonstelacni},
{eGMSK, eQPSK, e16QAM, e32QAM, e64QAM, e128QAM, e256QAM},
{gB, gT, gVz}
],
Item[Style["Modulace", FontSize->22, FontWeight->Bold], Alignment->Center],
Spacer[{20, 20}],
Style["Globální nastavení", Bold, Medium],
{{vstup, 10101010, "Vstupní slovo"}, FieldSize->20},
{{gT, 2Pi, "T"}, 12, FieldSize->4},
{{gVz, 200, "Počet vzorků"}, 12, FieldSize->4},
{{gB, 200, "B"}, 12, FieldSize->4},
{{imageSize, 500, "Velikost grafů"}, 400, 1200, 100},
{{charAmplitudova, True, "Amplitudová charakteristika"}, {True, False}},
{{charFrekvencni, False, "Frekvenční charakteristika"}, {True, False}},
{{charKonstelacni, False, "Konstelační diagram"}, {True, False}},
Style["Vyberte modulace", Bold, Medium],
{{eGMSK, False, "GMSK"}, {True, False}},
{{eQPSK, False, "QPSK"}, {True, False}},
{{e16QAM, False, "16QAM"}, {True, False}},
{{e32QAM, False, "32QAM"}, {True, False}},
{{e64QAM, False, "64QAM"}, {True, False}},
{{e128QAM, False, "128QAM"}, {True, False}},
{{e256QAM, False, "256QAM"}, {True, False}},
ControlPlacement->Left
]
];
(*Automatické skrytí zdrojů *)
If[FrontEnd != Failed, SelectionMove[EvaluationNotebook[], All, GeneratedCe
ll];
FrontEndTokenExecute["SelectionCloseUnselectedCells"]]

```