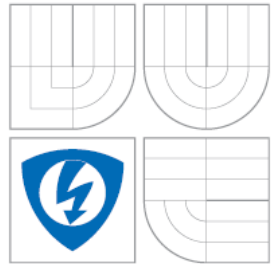


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

KOEXISTENCE MOBILNÍCH KOMUNIKAČNÍCH SYSTÉMŮ GSM-EDGE A UMTS

GSM-EDGE AND UMTS SYSTEMS COEXISTENCE

DOKTORSKÁ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. FILIP GLEISSNER

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. STANISLAV HANUS, CSc.

BRNO 2008

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Ing. Filip Gleissner
Bytem: Tučkova 17, 602 00, Brno - Veveří
Narozen/a (datum a místo): 26.5.1981, Brno
(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1
Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Koexistence mobilních komunikačních systémů GSM-EDGE
a UMTS

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Ing. Stanislav Hanus, CSc.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě – počet exemplářů 3
- elektronické formě – počet exemplářů 3

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Disertační práce se zabývá vyšetřováním koexistence systémů GSM – EDGE a UMTS se zaměřením na fyzickou vrstvu obou systémů. Cílem práce je stanovení souboru doporučení pro provoz systémů v praxi jak v odděleném pásmu, tak ve společném kmitočtovém pásmu. V úvodu je uveden detailní popis zpracování signálů obou systémů na fyzické vrstvě, na základě kterého byly vytvořeny modely obou systémů v prostředí MATLAB. Simulace prováděné na vytvořených modelech jsou zaměřeny na výpočet kvalitativních parametrů fyzické vrstvy, zejména na bitovou chybovost pro různý poměr výkonu užitečného signálu k výkonu šumu při přenosu v rádiovém kanálu. Dále je pomocí simulací zkoumána kvalita přijatého užitečného signálu při rušení signálem ze stejného i sousedního kanálu. Účelem je stanovení izolace mezi těmito sousedními kanály, kdy bitová chybovost užitečného signálu nepřesáhne určitou referenční hodnotu. Výsledky simulací jsou následně srovnány s výsledky dosaženými experimentálním měřením v laboratorních podmínkách. Před vlastním měřením je proveden rozbor možných druhů interferencí a ověření parametrů použité měřicí techniky. Výsledkem měření i simulací je návrh minimální a doporučené vzdálenosti nosných mezi oběma systémy za účelem efektivního využití přiděleného kmitočtového spektra, a dále nutná opatření pro provoz v odděleném i společném pásmu pro dosažení potřebné izolace a tím minimalizace interferencí mezi systémy.

Abstract

The dissertation thesis deals with the investigation of the coexistence of GSM–EDGE and UMTS systems with focus on the physical layer of the systems. The aim is to provide a set of recommendations for practical cooperation while the systems operate in both the separated and the common radio bands. A detailed description of signal processing of both the systems on the physical layer is presented. On the basis of this description, models of both systems were created and implemented in the MATLAB environment. The simulations are focused on the physical layer quality parameters, especially the bit error ratio evaluation for various ratios of useful signal power to noise power during the transmission over the radio channel. Simulation is also used to examine the quality of received useful signal while it is interfered by signals from the same and adjacent channels. The purpose is to determine the isolation between these adjacent channels, when the bit error ratio of the useful signal does not exceed a certain reference value. The simulation results are subsequently subjected to comparison with the results of the experimental measurements in laboratory conditions. Before the measurements are carried out, a study of possible interference types is performed. Consequently, the crucial parameters of the measuring equipment used are verified.

From the results of simulations and measurements, the proposal of a minimum and recommended carrier separation between both the systems is presented in order to efficiently utilize the assigned frequency spectrum. Furthermore, for the cooperation in both the separated and the common radio bands, the necessary precautions are given for reaching the required isolation and thereby inter-system interference minimization.

Klíčová slova

UMTS, GSM – EDGE, fyzická vrstva, zpracování signálu, kódování, modulace, rádiový kanál, simulace, koexistence, intermodulační produkty, rušení ze sousedního kanálu, rušení ve stejném kanálu, selektivita přijímače, bitová chybovost, odstup signálu od šumu, experimentální měření, chybový vektor EVM, nežádoucí emise, vazební útlum, šumová úroveň přijímače.

Keywords

UMTS, GSM – EDGE, physical layer, signal processing, data encoding, modulation, radio channel, simulation, coexistence, intermodulation products, adjacent channel interference, co-channel interference, receiver selectivity, bit error ratio, carrier to noise ratio, experimental measurement, error vector magnitude EVM, spurious emissions, coupling loss, receiver noise floor.

Bibliografická citace

GLEISSNER, F. *Koexistence mobilních komunikačních systémů GSM-EDGE a UMTS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 106 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Stanislav Hanus, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou disertační práci na téma „KOEXISTENCE MOBILNÍCH KOMUNIKAČNÍCH SYSTÉMŮ GSM-EDGE A UMTS“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího disertační práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu disertační práce prof. Ing. Stanislavu Hanusovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé disertační práce. Dále děkuji Ing. Romanu Maršálkovi, Ph.D za odborné rozpravy a věcné připomínky pro metodiku simulací a měření koexistence. V neposlední řadě děkuji celé mojí rodině za podporu v průběhu mého doktorského studia.

V Brně dne

.....

podpis autora

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Formulace problematiky	1
1.2 Dosavadní vývoj	2
1.3 Cíle disertace	4
2 Modely mobilních systémů	5
2.1 Společná koncepce modelů	5
2.2 Model rádiového kanálu	6
2.3 Model GSM – EDGE	9
2.3.1 Kódování dat v základním pásmu	9
2.3.2 Modulace, filtrace a vysílací část modelu	15
2.4 Model UMTS	19
2.4.1 Základní operace fyzické vrstvy	19
2.4.2 Zpracování dat v základním pásmu	21
2.4.3 Modulace a tvarování impulsů	26
2.5 Zhodnocení	28
3 Simulace na fyzické vrstvě	29
3.1 Vyhodnocení parametrů systému GSM – EDGE	29
3.2 Vyhodnocení parametrů systému UMTS	33
3.3 Zhodnocení	38
4 Koexistence systémů	39
4.1 Koncepce pro simulaci koexistence GSM – EDGE a UMTS	39
4.2 Simulace v základním pásmu	40
4.3 Simulace rušení ze sousedního kanálu	43
4.4 Zhodnocení	49
5 Ověření výsledků v laboratorním prostředí	50
5.1 Zapojení pracoviště pro experimentální měření	50
5.2 Měření hlavních parametrů	51
5.2.1 Požadavky na vysílač	52
5.2.2 Požadavky na přijímač	54
5.3 Rozbor možných druhů interferencí	55

5.3.1	<i>Možnosti potlačení intermodulačních produktů</i>	55
5.3.2	<i>Vliv průsaku energie signálu vysílače do sousedního kanálu (ACLR) a selektivity přijímače (ACS) na interference v systému</i>	56
5.4	<i>Kooperace stávajícího systému GSM se systémem UMTS</i>	57
5.4.1	<i>Minimální vazební útlum UMTS</i>	57
5.4.2	<i>Výpočet citlivosti přijímače UMTS (Link Budget)</i>	58
5.4.3	<i>Příčiny interferencí a nutné izolace mezi systémy GSM a UMTS</i>	60
5.5	<i>Měření referenčních parametrů GSM – EDGE</i>	62
5.6	<i>Měření referenčních parametrů UMTS</i>	66
5.7	<i>Měření koexistence v pásmu 900 MHz</i>	68
5.7.1	<i>Vzájemné interference v systému GSM – EDGE</i>	69
5.7.2	<i>Vzájemné interference v systému UMTS</i>	70
5.7.3	<i>Interference mezi systémy GSM – EDGE a UMTS</i>	73
5.7.4	<i>Měření vazebního útlumu (ACP) mezi sousedními kanály</i>	76
5.7.5	<i>Opatření pro koexistenci ve společném pásmu</i>	78
5.7.6	<i>Srovnání naměřených hodnot izolací s hodnotami získanými simulacemi</i>	82
5.8	<i>Zhodnocení</i>	82
6	Doporučení pro minimalizaci interferencí při praktickém provozu	84
7	Závěr	86
	Literatura	88
	Seznam obrázků	92
	Seznam tabulek	95

Seznam zkratek

8-PSK	Eight-state Phase Shift Keying
ACI	Adjacent Channel Interference
ACIR	Adjacent Channel Interference Ratio
ACLR	Adjacent Channel Leakage Ratio
ACP	Adjacent Channel Protection
ACS	Adjacent Channel Selectivity
AMR	Adaptive Multi-Rate
ARQ	Automatic Repeat reQuest
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BCS	Block Check Sequence
BER	Bit Error Ratio
BLER	Block Error Ratio
BTS	Base Transceiver Station
CCTrCH	Coded Composite Transport Channel
CNR	Carrier to Noise Ratio
CPM	Continuous Phase Modulation
CRC	Cyclic Redundancy Check
CW	Continuous Wave
DCH	Dedicated Channel
DL	Downlink
DPCCH	Dedicated Physical Control Channel
DPCH	Dedicated Physical Channel
DPDCH	Dedicated Physical Data Channel
DS-CDMA	Direct Sequence Code Division Multiple Access
DTX	Discontinuous Transmission
FEC	Forward Error Correction
EDGE	Enhanced Data rates for Global Evolution
EGPRS	Enhanced General Packet Radio Service
ESF	Extra Stealing Flag
EVM	Error Vector Magnitude
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GPRS	General Packet Radio Service
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GSM	Global System for Mobile communication
HCS	Header Check Sequence
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
IF-HO	Inter-Frequency Handover
IS-HO	Inter-System Handover
MAC	Media Access Control
MCL	Minimum Coupling Loss

MCS	Modulation and Coding Scheme
MS	Mobile Station
MSK	Minimum Shift Keying
NB	Narrow-Band
OVSF	Orthogonal Variable Spreading Factor
PhCH	Physical Channel
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RLC	Radio Link Control
RRC	Raised Root Cosine
SF	Spreading Factor (UMTS)
SF	Stealing Flag (GSM)
TB	Transport Block
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TF	Transport Format
TrCH	Traffic Channel
TS	Training Sequence
TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USF	Uplink State Flag
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

1 Úvod

1.1 Formulace problematiky

Systémy druhé generace (2G), zaváděné v devadesátých letech minulého století, umožnily mobilní bezdrátovou hlasovou komunikaci, avšak možnosti přenosu dat byly značně limitovány. Vyšší přenosové rychlosti, které umožní přenos obrazu a videa a zajistí rychlý přístup na internet, poskytnou až sítě využívající systémy třetí generace (3G), jenž se v současné době uvádí do plného komerčního provozu. Tyto systémy jsou nejčastěji označovány zkratkou UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*). Na rádiovém rozhraní v pásmu kolem 2 GHz se používá technika kódového dělení WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*), která má zcela odlišný charakter od systému 2G (GSM), jenž používá kombinaci kmitočtového a časového dělení kanálů (FDMA/TDMA).

Systém přenosu dat EDGE (*Enhanced Data rates for Global Evolution*) vznikl jako doplněk systému GSM pro rychlejší přenosy dat. Je založen na stejném principu, avšak zahrnuje několik odlišností, z nichž nejdůležitější je jiný typ použité modulace 8-PSK oproti původní GMSK. Tento systém pracuje v ČR v pásmech 900 a 1800 MHz. Je tu tedy možnost vzniku interferencí horního pásma EDGE s dolním pásmem UMTS (v okolí 1900 MHz). Tato problematika není v současnosti zcela důkladně vyřešena a významně publikována. Cílem této práce je tedy zkoumání možností interferencí a koexistence těchto dvou systémů.

Z důvodů složitosti komunikačních systémů je potřeba zvolit vhodný nástroj pro vlastní zkoumání. Jedním z nejdůležitějších prostředků pro analýzu, modelování a návrh těchto systémů jsou tzv. CAD nástroje. Tyto počítačem podporované techniky můžeme rozdělit do dvou kategorií: přístup na základě řešení vztahů a rovnic a přístup na základě provádění simulací, kdy pracujeme na úrovni tvaru vlny a časového průběhu signálu, který prochází systémem.

Přístup na základě řešení rovnic, které jsou založené na zjednodušených modelech, poskytuje významný náhled na vztahy mezi parametry systému a jeho výkonností, avšak většinou se používá v počátečních fázích návrhu systému a zkoumání jeho možností.

Simulačním přístupem lze systém modelovat na libovolné úrovni a pro zkoumání výkonnosti a chování poskytuje lepší prostředky. Tento druhý způsob je vhodnější (modelování a koexistence komunikačních systémů GSM – EDGE a UMTS) a v následující práci bude využit.

1.2 Dosavadní vývoj

Systém GSM – EDGE (ve standardech označován jako EGPRS) tvoří přímou evoluci systému GPRS (*General Packet Radio Service*). Používá stejný koncept a je založen na stejné architektuře – tzn. stejná šířka rádiového kanálu 200 kHz, přístupová technika FDMA/TDMA, časové dělení na sloty, rámce, multirámce, atd. Hlavní změny oproti GPRS jsou na rádiovém rozhraní. Nové modulační schéma umožňuje optimalizovat přenosovou rychlost s ohledem na podmínky rádiového prostředí. Rychlost přenosu dat (na vrstvě RLC [9]) začíná na 8,8 kb/s na jeden slot (pro nejhorší podmínky) a končí na 59,2 kb/s na jeden slot (pro nejlepší podmínky). Ostatní změny a vylepšení oproti GPRS jsou na vrstvě RLC/MAC, která již není předmětem této práce. Detaily lze najít např. v [5], [9] nebo [42].

Kvalitativní parametry a výkonnost systému EDGE je publikovaná v řadě odborných knih a článků, např. [9], [39], [40], [42], atd. Samotná koexistence s ostatními systémy je však zmiňována jen okrajově nebo vůbec ne. Tyto publikace se zabývají především měřením různých parametrů v závislosti na použitých kódovacích schématech, přenosové rychlosti, počtu uživatelů, kmitočtovému plánu, apod. Pro ověření výsledků a současně pro vytvoření referenčního modelu pro další potřeby byly provedeny simulace samotného systému EDGE (kapitola 3.1).

Systém UMTS je založen na přístupové metodě WCDMA – přímém rozprostření signálu kódovou sekvencí (DS-CDMA), tzn. uživatelské bity (úzkopásmový signál) jsou rozprostřeny do širokého pásma násobením Walshovou sekvencí bitů (nazývaných chipy) o mnohem větší bitové rychlosti. Chipová rychlost je konstantní a je stanovena na 3,84 Mchip/s, což vede k šířce pásma přibližně 5 MHz. Díky tomu můžeme získat mnohem vyšší přenosové rychlosti uživatelského signálu a další výhody, jako např. vícecestná diverzita, odolnost vůči úzkopásmovému i širokopásmovému rušení, atd.

Přístupová technika WCDMA podporuje variabilní přenosové rychlosti. Tyto rychlosti se mohou měnit každých 10 ms (u systému HSDPA již každé 2 ms), což je délka jednoho rámce. Změna rychlosti je založena na použití různé délky rozprostíracího kódu, jinými slovy je závislá na tzv. činiteli rozprostření SF (*Spreading Factor*). Jeho velikost je rovna poměru chipové a bitové rychlosti a je vždy mocninou čísla 2 (např. 4, 8, 16, 32...).

Technika WCDMA podporuje 2 módy: kmitočtově dělený duplex (FDD) a časově dělený duplex (TDD). V prvním případě jsou použity dva kanály o šířce 5 MHz pro směr uplink i downlink o určité rozteči duplexního páru, v druhém případě je použit pouze jeden 5 MHz široký kanál, který je časově rozdělen pro uplink a downlink. Uplink slouží pro komunikaci ve směru od mobilní stanice k základnové, downlink naopak [1–7]. V disertační práci se budeme zabývat módem FDD.

Samotným systémem UMTS se rovněž zabývá velké množství odborných článků a knižních publikací. Převážnou většinu tvoří měření výkonnosti přijímačů v přítomnosti více uživatelů a sdíleného společného přenosového kanálu (tzv. „multiuser detection“), např. [18], [37], [38]. Další velkou částí výzkumu v této oblasti jsou možnosti nových kódových schémat a adaptivních schémat pro optimalizaci opakovaného přenosu či velikosti vysílaných bloků (ARQ, TF), např. [17], [41]. Výkonností systému UMTS při přenosu přes rádiový kanál se také zabývá několik publikací, např. [35], [36]. Pro ověření těchto výsledků a současně pro vytvoření

referenčního modelu UMTS pro další potřeby byly provedeny simulace, kterými se zabývá kapitola 3.2.

Problémem, který může vznikat při součinnosti několika rádiových systémů v sousedních pásmech, jsou interference, které značně snižují kvalitu služeb a snižují kapacitu sítě a pokrytí. Příčinou potíží jsou nelinearity v samotných systémech. Může se jednat o harmonické zkreslení v případě, že nosné kmitočty jednoho systému jsou celistvým násobkem nosných interferujícího systému

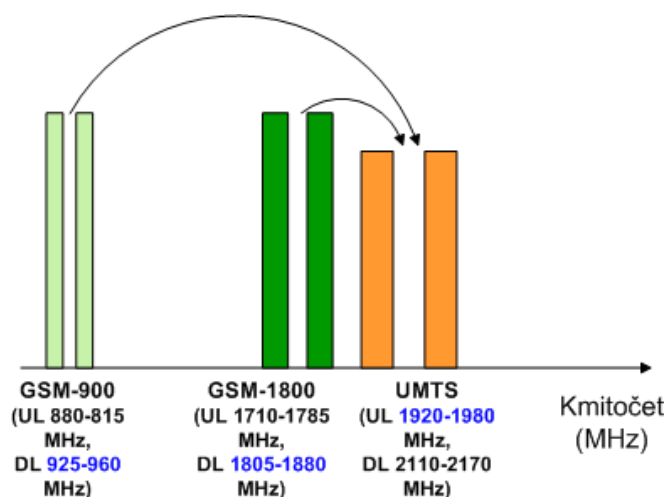
$$f_{HD} = mf_1, \quad (1.1)$$

kde f_{HD} je kmitočet m -té harmonické, m je kladné celé číslo a f_1 je základní kmitočet. Řád harmonického zkreslení je určen parametrem m .

Druhou oblastí jsou intermodulační produkty

$$f_{IMD} = nf_1 \pm mf_2, \quad (1.2)$$

kde f_{IMD} je intermodulační kmitočet, f_1 a f_2 jsou základní kmitočty, m a n jsou celá čísla. Řád intermodulačního produktu je určen součtem absolutních hodnot $|m| + |n|$. Nejvíce nebezpečné jsou produkty třetího řádu, které mají relativně velkou úroveň oproti produktům vyšších řádů a nacházejí se v blízkosti základních harmonických. Účinnou ochranou proti těmto nežádoucím efektům jsou kvalitní filtry. Přípustné úrovně rušení a hlubší analýzu můžeme najít např. v [5], [28] nebo [30].



Obr. 1.1. Možné rušení systému UMTS systémem GSM.

Poslední velkou skupinou je rušení systémů, které vedle sebe v rádiovém pásmu těsně sousedí. Zde je největším problémem nesplnění výkonových masek vysílačů a nedostatečná filtrace. Je nutné ověřit i části výkonů signálů, které prosakují do sousedních kanálů – tzv. ACLR (*Adjacent Channel Leakage Ratio*) a selektivitu přijímacích filtrů ACS (*Adjacent Channel Selectivity*).

V konkrétním případě námi uvažovaných systémů GSM-EDGE a UMTS je největší pravděpodobnost interferencí pro pásma UMTS-FDD 2100 MHz a GSM 1800 MHz – vysílač GSM interferuje s přijímačem UMTS. Ostatní případy jsou málo pravděpodobné [30]. Tato problematika bude zkoumána v kapitolách 4 a 5. V neposlední řadě bude ověřena i koexistence obou systémů při provozu ve sdíleném pásmu 900 MHz, jelikož se v poslední době zavádí systém UMTS do stávající sítě GSM900.

1.3 Cíle disertace

V současné době se uvádí do provozu stále více a více bezdrátových systémů. Jelikož kmitočtové spektrum vhodné pro rádiovou komunikaci není nekonečné, je potřeba, aby tyto systémy pracovaly bezproblémově vedle sebe ve svém přiděleném pásmu. Musí být tedy prakticky ověřeno, aby se systémy, fungující v sousedních kmitočtových pásmech, vzájemně nerušily nebo neomezovaly.

Mobilní systémy GSM-EDGE a UMTS jsou standardizovány a v dostupných informačních zdrojích podrobně popsány. Koexistenci se však moc veřejných článků a rozborů nevěnuje, případně jsou chráněné samotnými operátory.

Disertační práce se bude zabývat modely obou systémů a zkoumáním jejich vzájemného ovlivňování. V prvním kroku budou prováděny simulace na fyzické vrstvě každého systému zvlášť, dále pak simulace koexistence obou systémů ve společném rádiovém prostředí a nakonec bude provedeno měření koexistence obou systémů v laboratorním prostředí s pomocí dostupné technologie.

Cíle disertační práce lze tedy shrnout do těchto bodů:

- Vytvoření modelů fyzické vrstvy mobilních komunikačních systémů GSM-EDGE a UMTS ve vybraném prostředí.
- Simulace zpracování signálů na fyzické vrstvě každého systému zvlášť, vyhodnocení kvalitativních parametrů při přenosu na rádiovém kanálu (AWGN + úniky).
- Simulace koexistence obou systémů.
- Praktické ověření koexistence systémů v laboratorních podmínkách, vyvození závěrů a doporučení pro praxi.

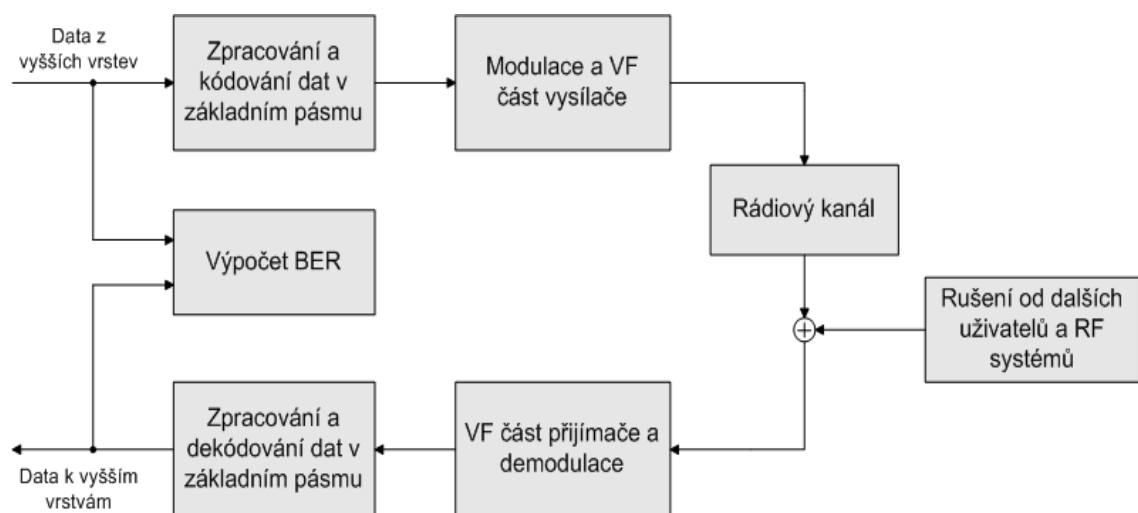
2 Modely mobilních systémů

V následujících kapitolách budou popsány základní parametry a operace fyzické vrstvy, zejména kódování a zpracování signálu v základním pásmu, použité modulace, bitové rychlosti, tvarování symbolů, apod., které následně využijeme pro vlastní modely a simulace v prostředí MATLAB. Toto prostředí bylo vybráno z důvodů jeho komplexnosti, existenci vhodné nástrojové sady (komunikační „toolbox“, „toolbox“ pro zpracování signálů), flexibility, možnosti krokování a ladění programu, uživatelského komfortu a předchozí znalosti prostředí. Kapitola 2.1 se věnuje společné koncepci modelů obou uvažovaných systémů, kapitola 2.2 se zabývá modelem rádiového kanálu, kapitola 2.3 popisuje systém GSM-EDGE, jeho modelování a simulace, kapitola 2.4 je věnována systému UMTS a jeho modelu.

2.1 Společná koncepce modelů

Modely fyzické vrstvy obou systémů jsou založeny na společném základu – obsahují bloky kódování a zpracování dat v základním pásmu, následují bloky digitálních modulací a nastavení vysílacího výkonu. Dále následuje rádiový kanál, který se skládá z únikového kanálu typu Rice (případně Rayleigh) a AWGN kanálu. Poté jsou přičteny interference od ostatních uživatelů.

Přijímač obsahuje bloky, které provádějí inverzní operace. Přijatý signál je demodulován do základního pásma, poté se data dekódují do původní podoby, srovnají se s vyslanými daty a je vypočtena bitová chybovost BER. Celý proces je přehledně zobrazen v podobě blokového schématu na obr. 2.1.



Obr. 2.1. Blokové schéma modelů (fyzická vrstva).

Postup operací systému GSM – EDGE je následující: blok zpracování a kódování dat v základním pásmu obdrží z vyšší vrstvy data. Ty se skládají z několika úseků – USF (*Uplink State Flag*), RLC/MAC záhlaví a samotná uživatelská data. Provede se zakódování USF, přidání CRC k záhlaví i datům. Následuje konvoluční kódování a vytečkování (*puncturing*). Výsledný blok musí mít definovanou velikost (456 bitů v případě modulace GMSK a 1384 bitů pro případ modulace 8-PSK). Poslední operace v této části jsou prokládání (*interleaving*) a vytváření burstů.

Následuje blok modulace (GMSK nebo 8-PSK) na nosnou vlnu a nastavení výstupního výkonu.

Rádiový kanál je detailně popsán v kapitole 2.2. Přijímač inverzními operacemi obnoví původní data, která se podrobí srovnání s vyslanými daty. Zpracování signálu systému GSM – EDGE je podrobně rozebráno v kapitole 2.3.

Postup operací v systému UMTS je obdobný: blok zpracování a kódování dat v základním pásmu obdrží v definovaných intervalech bloky dat. K těmto datům je přidáno CRC, pokud je potřeba, bloky jsou sloučeny nebo rozděleny tak, aby měly požadovanou velikost. Následuje kanálové kódování (konvoluční nebo turbo kódy podle typu transportního kanálu), přizpůsobení rychlosti (*rate matching*) na kapacitu fyzického kanálu, prokládání a mapování. Poslední dvě operace jsou velmi důležité – jedná se o rozprostření signálu (*channelization*) a jeho skramblování (*scrambling*).

Poté následuje tvarování impulsů RRC (*Raised Root Cosine*) filtrem, digitální modulace (QPSK) na nosnou harmonickou vlnu a nastavení výstupního výkonu.

Signál z vysílače je poté přenesen přes rádiový kanál, přijímač obnoví data do původní podoby a je opět provedeno srovnání a analýza. Detailní postup a rozbor je uveden v kapitole 2.4.

2.2 Model rádiového kanálu

Vícecestné šíření, způsobující úniky, je hlavní charakteristikou mobilního rádiového prostředí. Parametry tohoto prostředí se neustále mění v závislosti na pohybu objektů a mají významný vliv na kvalitu přijímaného signálu (vyjádřenou například bitovou chybovostí BER). Na základě mnoha měření a statistik bylo vytvořeno velké množství analytických modelů šíření vln pro několik typických druhů prostředí.

Mezi základní parametry každého modelu šíření vln patří:

- rozptyl časového zpoždění a jeho statistické parametry,
- charakter útlumu šířením,
- stínění,
- charakter vícecestného šíření (Rayleigh, Rice, tvar Dopplerova spektra...),
- kmitočtové pásmo.

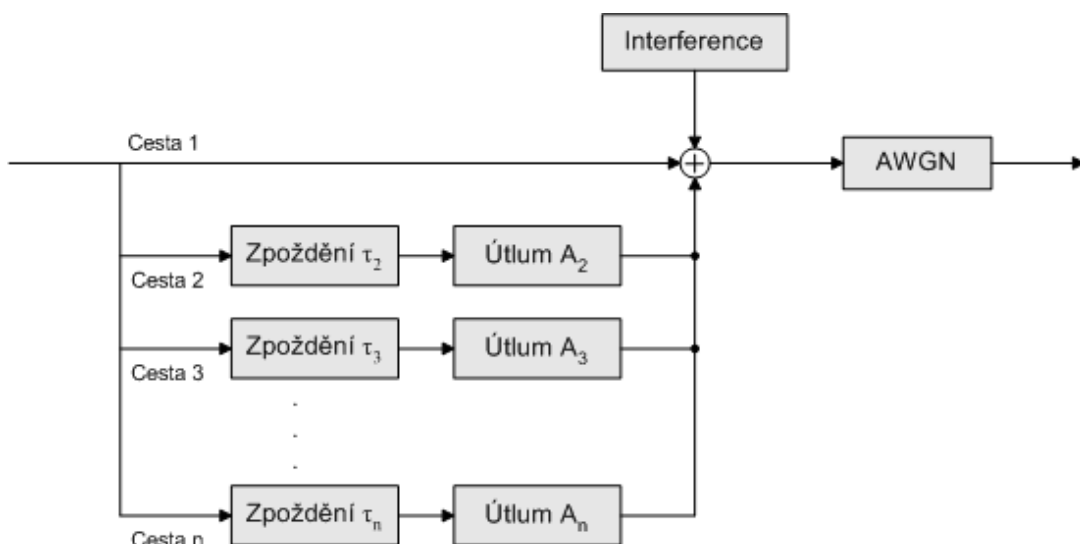
Model šíření uvnitř budov je charakterizován malým poloměrem buněk a malým vysílacím výkonem. Základnová stanice i uživatelé jsou uvnitř budovy. Útlum vln je způsoben rozptylem na zdech a podlahách a stíněním od překážejících objektů. Úniky jsou od typu Rice až po Rayleigh s relativně malým Dopplerovým posuvem (vzniká pohybem mobilní stanice – cca jednotky km/h).

Venkovní model šíření vln pro chodce zahrnuje buňky s poloměrem řádově stovek metrů a částečně větším vysílacím výkonem, než model pro budovy. Základnové stanice jsou umístěny venku, uživatelé se nacházejí buď venku na ulici, nebo uvnitř budov. Vlny se šíří na přímou viditelnost, případně nepřímo odrazy od budov, rozptylem a ohybem na překážkách. Rovněž nastává v některých případech stínění od velkých objektů. Úniky jsou obojího typu, navíc vznikají rychlé úniky díky pohybu okolních vozidel.

Venkovní model pro uživatele ve vozidlech je typický většími buňkami a větším vysílacím výkonem. Základnová stanice i uživatelé jsou pouze venku. Vlny se šíří především odrazy od okolních překážek. Úniky jsou rychlé typu Rayleigh, způsobené relativně rychlým pohybem vozidel, Dopplerův posuv má větší rozsah.

Navržený model únikového rádiového kanálu, který je použit v této práci, ukazuje obr. 2.2. Signál z vysílače je rozdělen do n různých cest. Jedna cesta má vždy nulové zpoždění během šíření k vysílači a není dodatečně utlumena (jedná se o přímou viditelnost). Ostatní cesty mají variabilní přenosové zpoždění a variabilní útlum (odrazy od okolních překážek). K signálu jsou pak přidány interference od ostatních uživatelů systému. Šumové pozadí je modelováno aditivním šumem (AWGN kanál).

Pro různé typy prostředí (uvnitř budov, v městské zástavbě, atd.) existují různé modely únikových kanálů. Mezi jejich klíčové parametry patří počet cest přenosu a zejména zpoždění a útlum každé cesty. V tab. 2.1 až 2.3 můžeme vidět parametry vybraných přenosových modelů (dle ITU [24]) pro tři různá prostředí – uvnitř budov I (*indoor model*), venkovní model pro chodce P (*outdoor pedestrian*) a venkovní model pro vozidla V (*outdoor vehicular*). V každé tabulce jsou uvedeny vždy případy pro dva různé kanály (A, B). Kanál A má malý rozptyl časových zpoždění, kanál B zahrnuje střední hodnoty rozptylu časových zpoždění. Oba případy v reálném prostředí nastávají poměrně často, jinými se nebudeme zabývat.



Obr. 2.2. Model únikového rádiového kanálu.

Časové zpoždění nabývá řádově hodnot od desítek po stovky nanosekund, v některých případech dokonce i tisícovek nanosekund. Nejmenší zpoždění je typicky u prostředí uvnitř budov, největší pro venkovní prostředí a rychle se pohybující objekty.

2 MODELY MOBILNÍCH SYSTÉMŮ

V této práci nás budou zajímat pouze zpoždění těch cest, která nejsou větší než 1 symbolová perioda u systému GSM – EDGE, tzn. do 3690 ns, u systému UMTS nás budou zajímat zpoždění menší než 1 chipová perioda – do 260 ns. Jedná se o nejhorší případ („worst case“). Tuto podmínku splňují modely IA, IB, PA, PB a VA pro systém GSM – EDGE. Cesty, které splňují podmínku pro UMTS, jsou v tabulkách 2.1 až 2.3 označeny kurzívou. S většími zpožděními se u systému GSM – EDGE vyrovnávají ekvalizační obvody a u UMTS přijímač typu „Rake“.

Tab. 2.1. Model I pro šíření uvnitř budov.

Cesta	Kanál A		Kanál B	
	Relativní zpoždění (ns)	Relativní útlum (dB)	Relativní zpoždění (ns)	Relativní útlum (dB)
1	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
2	<i>50</i>	<i>3,0</i>	<i>100</i>	<i>3,6</i>
3	<i>110</i>	<i>10,0</i>	<i>200</i>	<i>7,2</i>
4	<i>170</i>	<i>18,0</i>	<i>300</i>	<i>10,8</i>
5	<i>290</i>	<i>26,0</i>	<i>500</i>	<i>18,0</i>
6	<i>310</i>	<i>32,0</i>	<i>700</i>	<i>25,2</i>

Tab. 2.2. Venkovní model P pro chodce.

Cesta	Kanál A		Kanál B	
	Relativní zpoždění (ns)	Relativní útlum (dB)	Relativní zpoždění (ns)	Relativní útlum (dB)
1	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
2	<i>110</i>	<i>9,7</i>	<i>200</i>	<i>0,9</i>
3	<i>190</i>	<i>19,2</i>	<i>800</i>	<i>4,9</i>
4	<i>410</i>	<i>22,8</i>	<i>1200</i>	<i>8,0</i>
5	-	-	<i>2300</i>	<i>7,8</i>
6	-	-	<i>3700</i>	<i>23,9</i>

Tab. 2.3. Venkovní model V pro vozidla.

Cesta	Kanál A		Kanál B	
	Relativní zpoždění (ns)	Relativní útlum (dB)	Relativní zpoždění (ns)	Relativní útlum (dB)
1	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>2,5</i>
2	<i>310</i>	<i>1,0</i>	<i>300</i>	<i>0</i>
3	<i>710</i>	<i>9,0</i>	<i>8900</i>	<i>12,8</i>
4	<i>1090</i>	<i>10,0</i>	<i>12900</i>	<i>10,0</i>
5	<i>1730</i>	<i>15,0</i>	<i>17100</i>	<i>25,2</i>
6	<i>2510</i>	<i>20,0</i>	<i>20000</i>	<i>16,0</i>

2.3 Model GSM – EDGE

System EDGE (EGPRS) tvoří přímou evoluci systému GPRS. Používá stejný koncept a je založen na stejné architektuře [9]. Hlavní změny oproti GPRS jsou na rádiovém rozhraní. Nové modulační schéma umožňuje optimalizovat přenosovou rychlost s ohledem na podmínky rádiového prostředí. Rychlost přenosu dat (na vrstvě RLC [9]) začíná na 8,8 kb/s na jeden slot a končí na 59,2 kb/s na jeden slot – viz tab. 2.4.

Tab. 2.4. Vztah mezi přenosovou rychlostí a kódovacími schémata.

Kódovací schéma	Modulace	Přenosová rychlost na 1 slot (kb/s)
MCS-1	GMSK	8,8
MCS-2		11,2
MCS-3		14,8
MCS-4		17,6
MCS-5	8-PSK	22,4
MCS-6		29,6
MCS-7		44,8
MCS-8		54,4
MCS-9		59,2

V následujících kapitolách bude popsán postup a model pro zpracování signálu na fyzické vrstvě od obdržení dat z vyšší vrstvy (MAC) až po modulaci na nosnou vlnu.

2.3.1 Kódování dat v základním pásmu

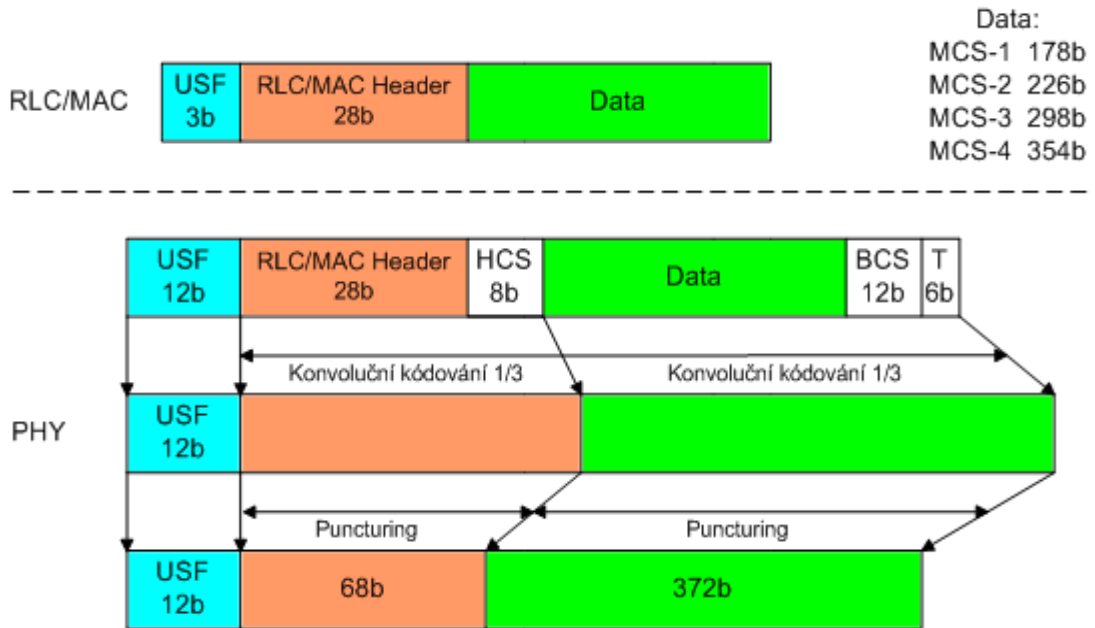
Data jsou přenášena pomocí RLC/MAC bloků, které tvoří základní stavební jednotku. Jeden takový blok je přenesen jedním rádiovým blokem pomocí burstů během 4 po sobě jdoucích TDMA rámcích.

Bloky RLC/MAC se skládají ze záhlaví a jedné nebo dvou datových částí, jak je možno vidět na obrázcích 2.3, 2.7 a 2.10. Hlavička a data nejsou zabezpečeny stejnou úrovní ochrany. Pro správné dekódování celého bloku je nejdůležitější právě hlavička, a proto je robustněji zabezpečena než zbytek dat.

Pro kódovací schémata MCS-1 až MCS-4 je postup zpracování dat následující: hlavička má vždy 28 bitů, k ní je přidáno 8 paritních bitů kontroly CRC (pro hlavičku označené jako HCS), datová část má variabilní velikost, přidává se 12 paritních bitů kontroly CRC (pro bloky dat označené jako BCS). Blok USF se vysílá v downlinku a slouží k multiplexování několika uživatelů (sdílení kanálu) pro vysílání v uplinku. Tento blok se ze 3 bitů kóduje na 12 bitů podle tabulky 2.5. Pro naše potřeby není bitová sekvence USF prozatím důležitá, a proto bude vždy nahrazena podle prvního řádku výše uvedené tabulky nulami.

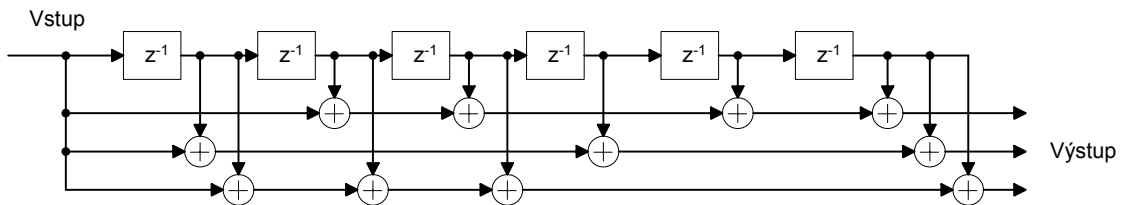
Druhý krok spočívá v konvolučním kódování hlavičky a datové části kóděrem s kódovým poměrem 1/3. Zapojení kóděru je znázorněno na obrázku 2.4, vytvářecí polynomy kódu jsou popsány pomocí rovnic (2.1) až (2.3).

2 MODELY MOBILNÍCH SYSTÉMŮ



Obr. 2.3. Kódování dat pro schémata MCS-1 až MCS-4.

Ze 36 bitů záhlaví včetně HCS je na výstupu kodéru 108 bitů, které jsou následně vytečkovány (puncturing) a výsledných 68 bitů je připojeno za USF. Vynechány jsou bity $C(2+3j)$ pro $j = 0,1,\dots,35$ a $C(k)$ pro $k = 34, 58, 82, 106$ [26]. Datová část včetně BCS a dalších přidávaných 6 nulových bitů (Tail) jsou přivedeny na stejný kodér a následně vytečkovány na příslušný počet bitů dle MCS. Výstupem je 372 bitů, které jsou přidány na konec bloku. Výsledkem je 452 bitů, ke kterým jsou přidány další 4 bity (Extra stealing flags) – jejich interpretace není pro nás důležitá, a proto budou opět nulové. Vše je přehledně zobrazeno na obr. 2.3.



Obr. 2.4. Konvoluční kodér systému GSM-EDGE (kódový poměr 1/3).

Vytvářecí polynomy konvolučního kodéru [31]:

$$G_1(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^5 + x^6, \quad (2.1)$$

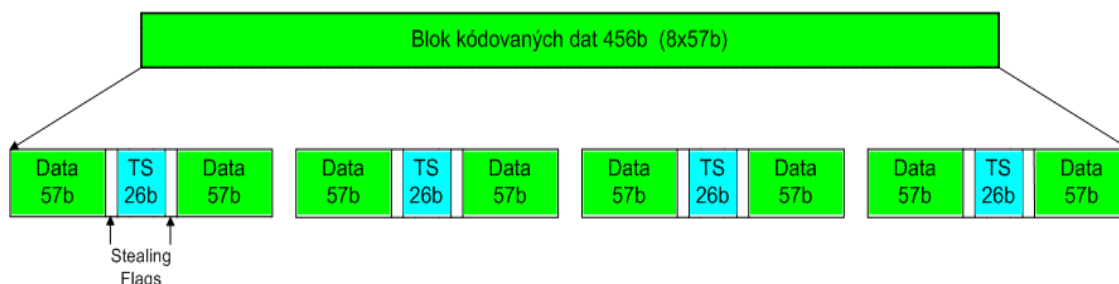
$$G_2(x) = 1 + x + x^4 + x^6, \quad (2.2)$$

$$G_3(x) = 1 + x + x^2 + x^3 + x^6. \quad (2.3)$$

Poté je celý blok 456 bitů podroben maticovému prokládání – bity jsou sériově načítány po řádcích a vyčítány po sloupcích (rozměry matice 57 x 8). Získáme tak jeden rádiový blok, který bude vyslán během 4 TDMA rámců, proto je potřeba vytvořit 4 bursty. Osm dílčích datových úseků po 57 bitech je podrobena druhému prokládání – vždy se čtveřicí předchozího rádiového bloku a se čtveřicí následujícího rádiového bloku. Každý burst pak tvoří dva úseky dat (114 bitů), tréninková posloupnost pro ekvalizaci (*Training Sequence*, 26 bitů), 2 bity *Stealing Flags* (pro rozlišení dat a signalizace, pro naše účely nejsou nezbytné, nastaveny opět na 0), 6 bitů určujících

2 MODELY MOBILNÍCH SYSTÉMŮ

začátek a konec burstu (*Tail bits*) a ochranný interval dlouhý 8,25 bitu. Celý burst má délku 156,25 bitu. Vytváření burstů pro rádiový blok je graficky znázorněno na obr. 2.5.



Obr. 2.5. Vytváření burstů (MCS-1 až MCS-4).

Schémata vytečkování po konvolučním kódování datové části jsou tato [26]:

MCS-1: bity $C(2+21j)$, $C(5+21j)$, $C(8+21j)$, $C(10+21j)$, $C(11+21j)$, $C(14+21j)$, $C(17+21j)$, $C(20+21j)$ pro $j = 0, 1, \dots, 27$ se vynechávají, kromě bitů $C(k)$ pro $k = 73, 136, 199, 262, 325, 388, 451, 514$, které se přenášejí.

MCS-2: bity $C(6j)$, $C(1+6j)$, $C(5+6j)$ pro $j = 0, 1, \dots, 121$, a bity $C(k)$ pro $k = 57, 171, 285, 399, 513, 627$ se přenášejí.

MCS-3: bity $C(18j)$, $C(1+18j)$, $C(3+18j)$, $C(6+18j)$, $C(10+18j)$, $C(14+18j)$, $C(17+18j)$ pro $j = 0, 1, \dots, 51$, a bity $C(k)$ pro $k = 241, 475, 709, 936, 937, 939, 942, 946$ se přenášejí.

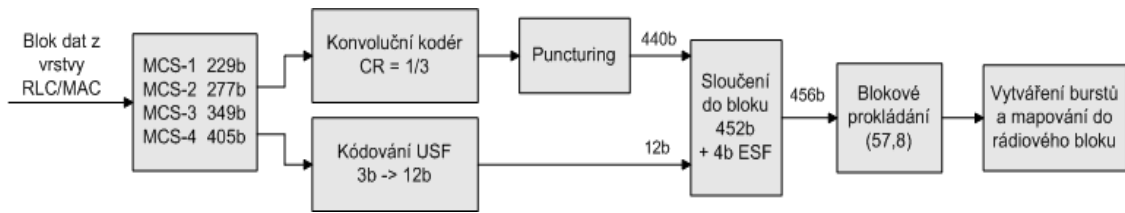
MCS-4: bity $C(3j)$ pro $j = 0, 1, \dots, 371$ se přenášejí.

Tab. 2.5. Kódování USF.

d(0), d(1), d(2)	u(0), u(1), ... u(11)
000	000 000 000 000
001	000 011 011 011
010	001 101 110 110
011	001 110 101 011
100	110 100 001 011
101	110 111 010 110
110	111 001 111 101
111	111 010 100 000

Podle výše popsaného postupu zpracování dat v základním pásmu byl navržen a vytvořen model v MATLABu pro MCS-1 až MCS-4, jehož blokové schéma je zobrazeno na obr. 2.6.

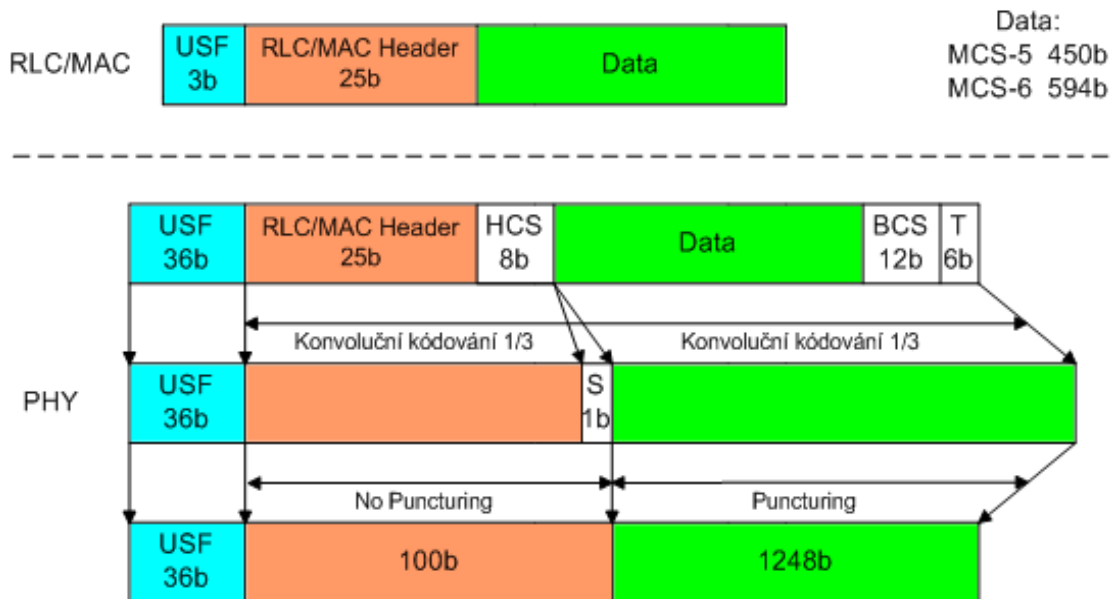
2 MODELY MOBILNÍCH SYSTÉMŮ



Obr. 2.6. Model kódování dat v základním pásmu (pro MCS-1 až MCS-4).

Pro kódovací schémata MCS-5 a MCS-6 je postup zpracování dat následující: hlavička má vždy 25 bitů, k ní je přidáno 8 paritních bitů HCS, datová část má variabilní velikost, přidává se 12 paritních bitů BCS. Blok USF se ze 3 bitů kóduje na 36 bitů. Pro naše potřeby bude vždy nahrazen nulami.

Druhý krok spočívá v konvolučním kódování hlavičky a datové části kódem s kódovým poměrem 1/3, je použit stejný kódér jako pro předchozí schémata MCS-1 až MCS-4. Ze 33 bitů záhlaví včetně HCS je na výstupu kódéru 99 bitů, které nejsou podrobeny vytečkování. Na konec je přidán jeden doplňující bit, který je stejný jako poslední bit zakódované hlavičky. Těchto 100 bitů je přidáno za USF. Datová část včetně BCS a dalších přidaných 6 nulových bitů (*Tail*) jsou přivedeny na stejný kódér a následně vytečkovány na příslušný počet bitů dle MCS. Výstupem je 1248 bitů, které jsou přidány na konec bloku. Výsledkem je 1384 bitů, celý postup je přehledně zobrazen na obr. 2.7.



Obr. 2.7. Kódování dat pro schémata MCS-5 a MCS-6.

Poté je celý blok 1384 bitů podroben maticovému prokládání (173 x 8). Rádiový blok bude opět vyslán během 4 TDMA rámců, proto je potřeba vytvořit 4 bursty. Osm dílčích datových úseků po 173 bitech je podrobeno druhému prokládání – vždy se čtveřicí předchozího rádiového bloku a se čtveřicí následujícího rádiového bloku. Každý burst pak tvoří dva úseky dat (346 bitů), tréninková posloupnost pro ekvalizaci (78 bitů), 2 bity Stealing Flags (pro rozlišení dat a signalizace, pro naše účely nejsou nezbytné, nastaveny opět na 0), 18 bitů určujících začátek a konec burstu a ochranný

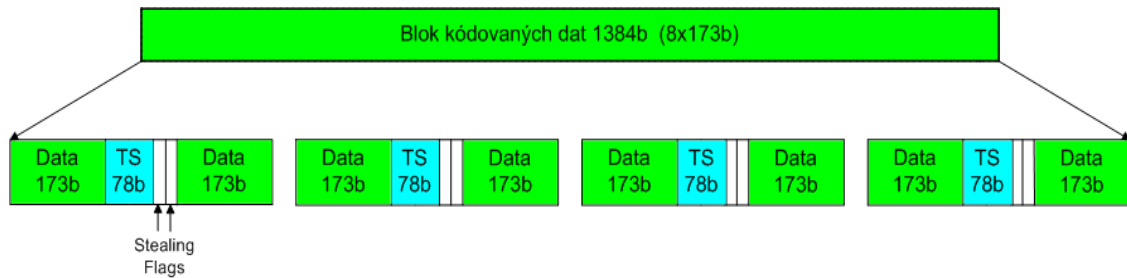
2 MODELY MOBILNÍCH SYSTÉMŮ

interval 24,75 bitu. Celý burst má délku 468,75 bitu, což je v modulaci 8-PSK přesně 156,25 symbolů. Vytváření burstů pro rádiový blok je graficky znázorněno na obr. 2.8.

Schémata vytečkování po konvolučním kódování datové části jsou tato [26]:

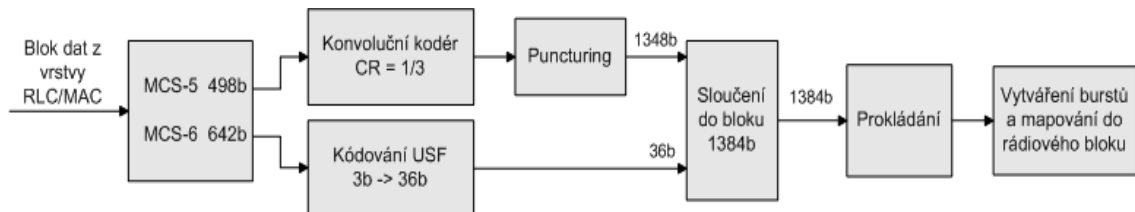
MCS-5: bity $C(2+9j)$ pro $j = 0,1,\dots,153$ a $C(1388+3j)$ pro $j = 0,1,\dots,5$ se vynechávají, kromě bitů $C(k)$ pro $k = 47, 371, 695, 1019$, které se přenášejí.

MCS-6: bity $C(2+3j)$ pro $j = 0,1,\dots,611$ se vynechávají, kromě bitů $C(k)$ pro $k = 32, 98, 164, 230, 296, 428, 494, 560, 626, 692, 824, 890, 956, 1022, 1088, 1220, 1286, 1352, 1418, 1484, 1616, 1682, 1748, 1814$, které se přenášejí.



Obr. 2.8. Vytváření burstů (MCS-5 až MCS-9).

Podle výše popsaného postupu zpracování dat v základním pásmu byl opět navržen a vytvořen model v MATLABu pro MCS-5 a MCS-6. Blokové schéma je zobrazeno na obr. 2.9.



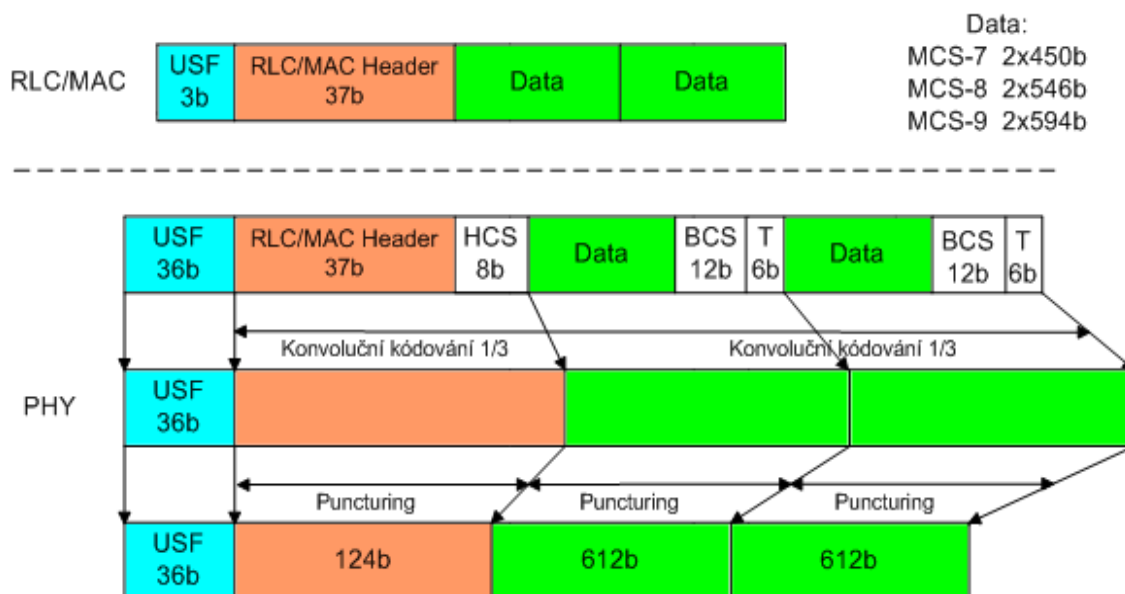
Obr. 2.9. Model kódování dat v základním pásmu (MCS-5 a MCS-6).

Pro kódovací schémata MCS-7 až MCS-9 je postup zpracování dat následující: hlavička má vždy 37 bitů, k ní je přidáno 8 paritních bitů HCS, datová část se skládá ze dvou bloků, oba jsou stejně velké (podle MCS), ke každé části se přidává 12 paritních bitů BCS. Blok USF se ze 3 bitů kóduje na 36 bitů. Pro naše potřeby bude vždy nahrazen samými nulami.

Druhý krok spočívá v konvolučním kódování hlavičky a datové části kóděrem s kódovým poměrem 1/3, je použit stejný kódér jako pro předchozí schémata. Ze 45 bitů záhlaví včetně HCS je na výstupu kóděru 135 bitů, které jsou následně vytečkovány, a výsledných 124 bitů je připojeno za USF. Vynechány jsou bity $C(k)$ pro $k = 14, 23, 33, 50, 59, 69, 86, 95, 105, 122, 131$ [26]. Každá datová část je zpracována stejně – data včetně BCS a dalších přidávaných 6 nulových bitů jsou přivedeny na konvoluční kódér a následně vytečkovány na příslušný počet bitů dle MCS. Výstupem je 612 bitů, které jsou přidány na konec bloku. Výsledkem je $36+124+2 \times 612 = 1384$ bitů, celý postup je přehledně zobrazen na obr. 2.10.

2 MODELY MOBILNÍCH SYSTÉMŮ

Celý blok 1384 bitů je podroben maticovému prokládání (173 x 8). Rádiový blok bude opět vyslán během 4 TDMA rámců, proto je potřeba vytvořit 4 bursty. Osm dílčích datových úseků po 173 bitech jsou podrobeny druhému prokládání – vždy se čtveřicí předchozího rádiového bloku a se čtveřicí následujícího rádiového bloku. Každý burst pak tvoří dva úseky dat (346 bitů), tréninková posloupnost pro ekvalizaci (78 bitů), 2 bity Stealing Flags (pro rozlišení dat a signalizace, pro naše účely nejsou nezbytné, nastaveny opět na 0), 18 bitů určujících začátek a konec burstu (Tail bits) a ochranný interval 24,75 bitu. Celý burst má délku 468,75 bitu, což je v modulaci 8-PSK přesně 156,25 symbolů. Vytváření burstů pro rádiový blok je graficky znázorněno na obr. 2.8.



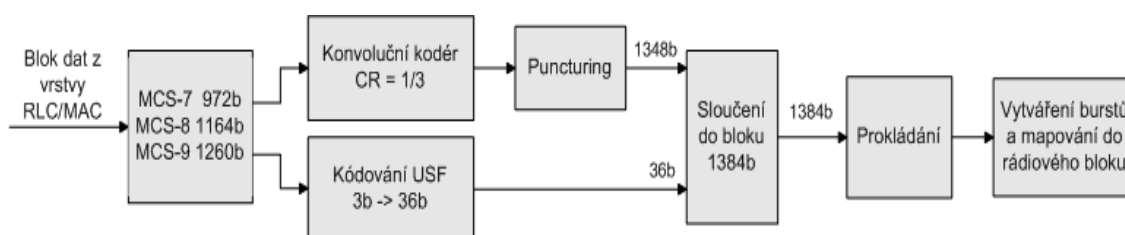
Obr. 2.10. Kódování dat pro schémata MCS-7 až MCS-9.

Schémat vytečkování po konvolučním kódování datové části jsou tato [26]:

MCS-7: bity $C(18j)$, $C(1+18j)$, $C(4+18j)$, $C(8+18j)$, $C(11+18j)$, $C(12+18j)$, $C(13+18j)$, $C(15+18j)$ pro $j = 0, 1, \dots, 77$ se přenáší, kromě bitů $C(k)$ pro $k = 1, 19, 37, 235, 415, 595, 775, 955, 1135, 1351, 1369, 1387$, které se vynechávají.

MCS-8: bity $C(36j)$, $C(2+36j)$, $C(5+36j)$, $C(6+36j)$, $C(10+36j)$, $C(13+36j)$, $C(16+36j)$, $C(20+36j)$, $C(23+36j)$, $C(24+36j)$, $C(27+36j)$, $C(31+36j)$, $C(35+36j)$ pro $j = 0, 1, \dots, 46$ a $C(845)$ se přenáší.

MCS-9: bity $C(3j)$ pro $j = 0, 1, \dots, 611$ se přenáší.



Obr. 2.11. Model kódování dat v základním pásmu (MCS-7 až MCS-9).

Na základě uvedeného postupu byl vytvořen model kódování dat pro schémata MCS-7 až MCS-9. Jeho blokové schéma je nakresleno na obr. 2.11.

2.3.2 Modulace, filtrace a vysílací část modelu

V této kapitole bude popsán druhý velký blok společného konceptu (viz obr. 2.1) – modulace. Po vytvoření burstů se provede digitální modulace (GMSK nebo 8-PSK) na harmonickou nosnou vlnu.

Modulace GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) patří do tzv. digitálních modulací s klíčováním fáze, konkrétně se jedná o modulaci se spojitou změnou fáze (CPM – *Continuous Phase Modulation*). Modulovaný signál CPM je vyjádřen touto rovnicí:

$$m(t) = A_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t)), \quad (2.4)$$

kde A_0 je amplituda signálu, která se nemění se vstupní bitovou posloupností, f_0 je kmitočet nosné a $\varphi(t)$ je fáze signálu, která nese modulační informaci. V daném časovém okamžiku je fáze rovna

$$\varphi(t) = 2\pi h \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \alpha_k q(t - kT), \quad (2.5)$$

kde $\alpha_k = \pm 1$ je k-tý vyslaný symbol (v případě modulace GMSK jeden bit), T je perioda symbolu, h je modulační index a $q(t)$ je integrál z obdélníkového impulsu $a(t)$:

$$q(t) = \int_0^t a(\tau) d\tau. \quad (2.6)$$

Modulace GMSK vznikla modifikací MSK (*Minimum Shift Keying*), a to tvarováním upraveného modulačního signálu tzv. Gaussovým filtrem. MSK patří do skupiny modulací se spojitou změnou fáze a platí, že $h=1/2$, tzn. fáze mezi dvěma následujícími symboly se změní o $\pm\pi/2$. Signál GMSK tedy můžeme vyjádřit následujícími rovnicemi [9], [21], [22]:

$$\begin{aligned} a(t) &= \text{rect}_T(t - T/2) * g(t), \\ g(t) &= \sqrt{\frac{2\pi}{\ln(2)}} B \exp\left(-\frac{2\pi^2 B^2}{\ln(2)} t^2\right), \\ \varphi(t) &= 2\pi h \int_{-\infty}^t \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \alpha_k a(\tau - kT) d\tau = \pi \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \alpha_k q(\tau - kT), \end{aligned} \quad (2.7)$$

kde rect_T je obdélníkový impuls šířky T (bitová perioda), výšky $1/2T$ a symetrický kolem časové osy $t=0$, $a(t)$ je konvoluce obdélníkového impulsu rect_T a impulsní charakteristiky $g(t)$ Gaussova filtru a B je šířka pásma filtru. Parametr B byl pro GSM zvolen tak, aby platilo $BT=0,3$ (součin BT bývá označován jako tzv. normalizovaná šířka pásma). Tato volba je kompromisem mezi dobrou spektrální účinností modulace a přijatelnou bitovou chybovostí BER na straně přijímače.

Modulace 8-PSK je vícestavová digitální modulace, kde je informace nesena fází nosné vlny. Modulovaný signál můžeme obecně vyjádřit rovnicí

$$m(t) = A_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t)), \quad (2.8)$$

kde A_0 je amplituda, f_0 je kmitočet nosné a modulační signál je vyjádřen vztahem

$$\varphi(t) = \sum_k \Phi_k \delta(t - kT). \quad (2.9)$$

Veličina T je doba trvání jednoho symbolového prvku, Φ_k je k -tý modulační symbol, který může nabývat M různých hodnot a to konkrétně následujících: $\Phi_k = \theta_0 + 2m\pi/M$, kde M je počet stavů modulace, $m \in [0, M-1]$, θ_0 je fázový posun (offset) a $\delta(t)$ je Diracův impuls. Každý symbol Φ_k nese tedy n informačních bitů, kde $n = \log_2 M$.

Dosazením (2.9) do vztahu (2.8) a úpravou získáme vztah pro modulovaný signál vyjádřený pomocí synfázní (I) a kvadrurní (Q) složky [9], [21]:

$$\begin{aligned} m(t) &= A_0 \cos\left(2\pi f_0 t + \sum_k \Phi_k \delta(t - kT)\right) = \\ &A_0 \sum_k [\cos(\Phi_k) \cos(2\pi f_0 t) - \sin(\Phi_k) \sin(2\pi f_0 t)] \delta(t - kT) = \\ &A_0 \sum_k [I_k \cos(2\pi f_0 t) - Q_k \sin(2\pi f_0 t)] \delta(t - kT), \end{aligned} \quad (2.10)$$

kde $I_k = \cos(\Phi_k)$ a $Q_k = \sin(\Phi_k)$ jsou synfázní a kvadrurní signály.

V případě systému GSM-EDGE se signál dále tvaruje filtrem s přesně danou charakteristikou za účelem potlačení postranních spektrálních laloků. Předem se ještě provede mapování symbolů do Grayova kódu z důvodu minimalizace bitové chybovosti, tzn. sousední symboly v konstelačním diagramu se liší pouze v jediném bitu.

Postup zpracování signálu pro modulaci GMSK je následující: datové bity $d_i \in [0,1]$ jsou diferenčně kódovány dle vztahu

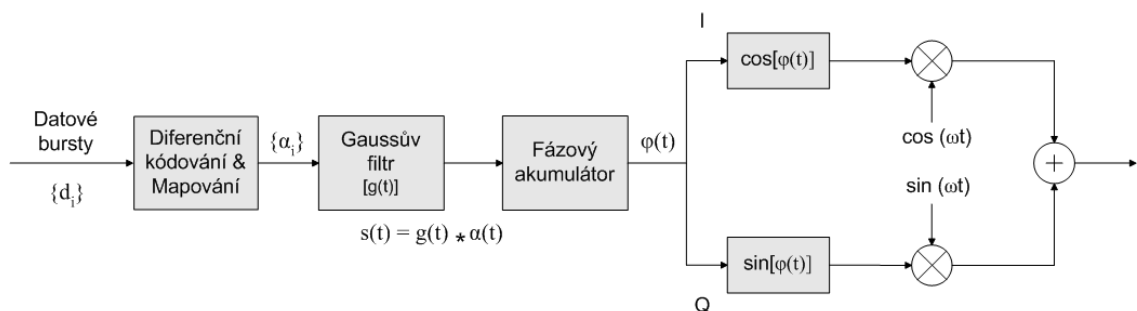
$$\alpha_i = 1 - 2\hat{d}_i, \quad (2.11)$$

kde

$$\hat{d}_i = d_i \oplus d_{i-1}, \quad (2.12)$$

symbol \oplus značí operaci součet modulo 2, $\alpha_i \in [-1,1]$ jsou modulační symboly [20].

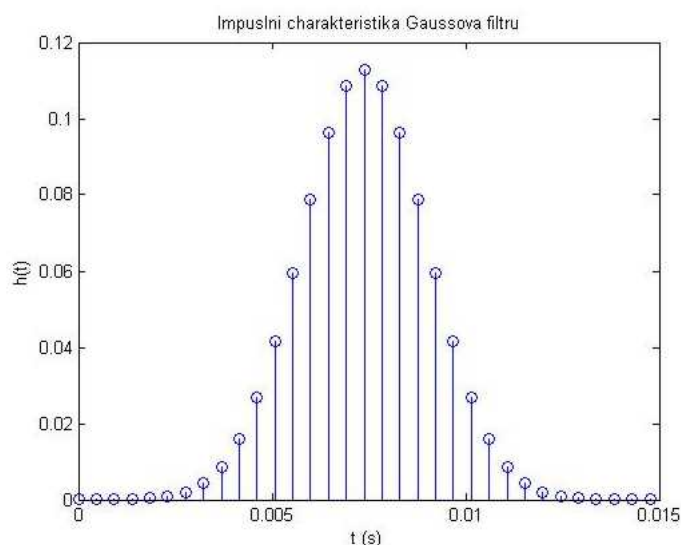
Následně jsou symboly filtrovány Gaussovým filtrem s parametrem $BT=0,3$. Impulsní charakteristika je popsána rovnicí (2.7), její časový průběh je na obr. 2.13, kmitočtová a fázová charakteristika je znázorněna na obr. 2.14. Výstup filtru je přiveden na digitální integrátor (fázový akumulátor). Za integrátorem dostáváme fázový modulační signál $\varphi(t)$ (2.5).



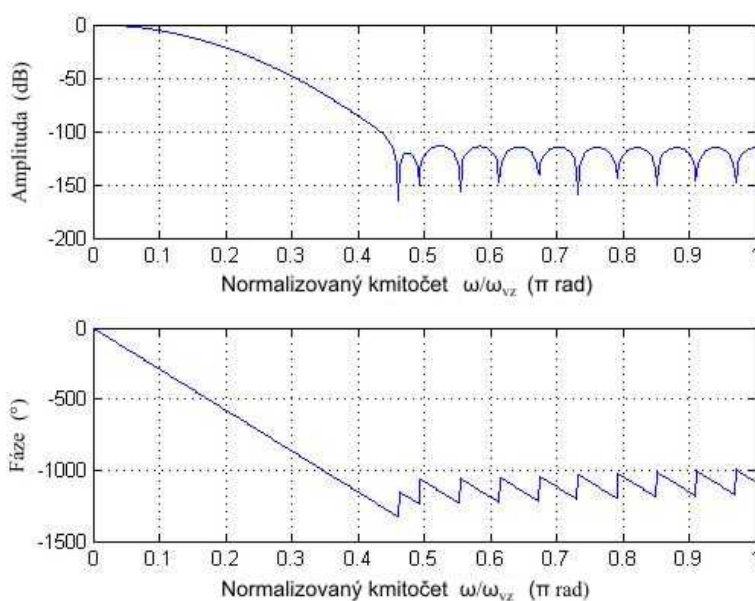
Obr. 2.12. Blokové schéma modulace GMSK systému GSM-EDGE.

Poté je signál přiveden do větví I a Q kvadraturního modulátoru. Modulační signál dosadíme jako argument do funkcí $\cos(\varphi(t))$ a $\sin(\varphi(t))$. Poslední operací je modulace signálu na harmonickou nosnou vlnu. Přehledně je celý postup znázorněn na obrázku 2.12.

Signál je poté přenesen přes rádiový únikový kanál (viz. kap. 2.2). Na straně přijímače je prvním blokem demodulátor, signál v základním pásmu je zpracován fázovým detektorem a diferenční dekodérem s pamětí hodnoty předchozího vzorku. Tyto bloky vyhodnocují změnu fáze současného a předchozího vzorku a podle její hodnoty se na výstupu objeví logická 0 nebo logická 1. Následuje zpracování dat v základním pásmu inverzním postupem. Nakonec je provedeno srovnání přijaté bitové sekvence s vyslanou (RLC/MAC bloky dat původní délky) a je vypočtena chybovost BER.



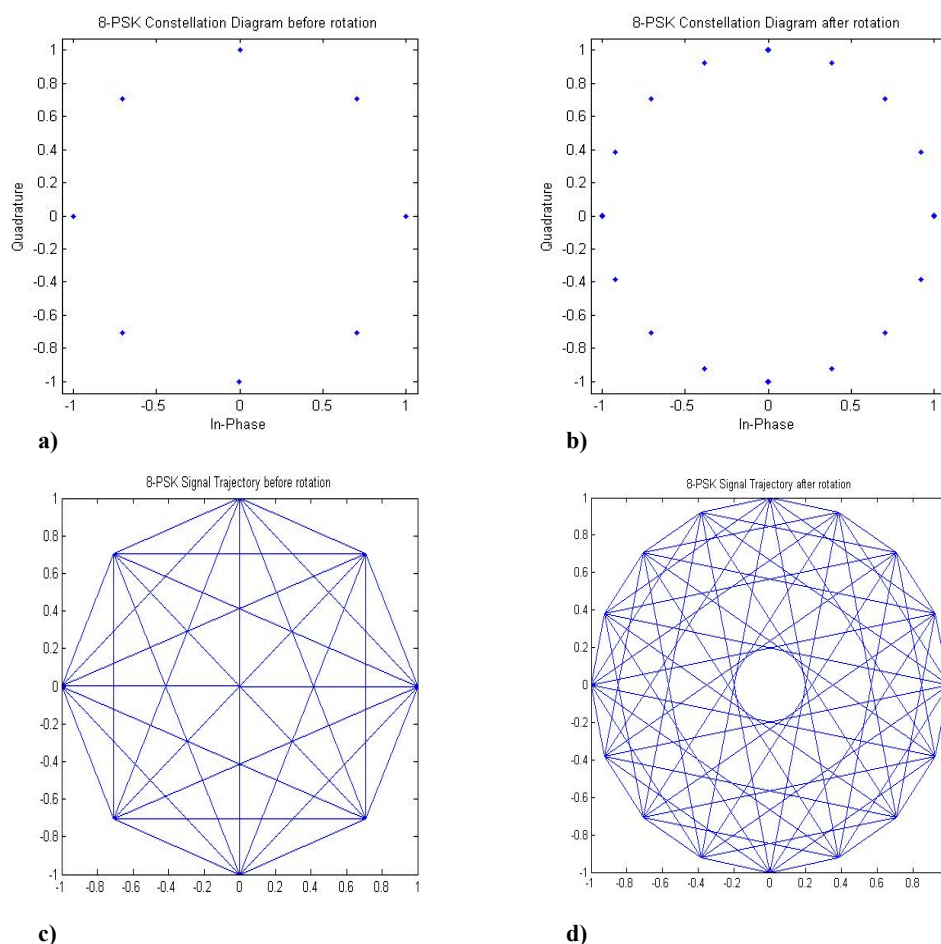
Obr. 2.13. Časový průběh impulsní charakteristiky použitého Gaussova filtru.



Obr. 2.14. Amplitudová a fázová charakteristika použitého Gaussova filtru.

Postup zpracování signálu pro modulaci 8-PSK: přichází datové bity (z vytvořených burstů) jsou ve skupinách po 3 bitech mapovány do Grayova kódu a je jim přiřazeno číslo l v osmičkové soustavě dle tabulky 2.6 [9], [20]. Grayův kód zajistí minimalizaci BER. Je-li symbol interpretován chybně jako sousední v konstelačním diagramu, dojde k chybě pouze v jednom bitu. Následuje modulace 8-PSK – symboly jsou získány pomocí následujícího vztahu

$$s_i = e^{j2\pi l/8} \quad (2.13)$$



Obr. 2.15. a) konstelační diagram klasické modulace 8-PSK, b) konstelační diagram modulace 8-PSK po rotaci $3\pi/8$, c) trajektorie signálu 8-PSK před rotací, d) trajektorie signálu po rotaci.

Symboly modulace 8-PSK jsou následně neustále rotovány o $3\pi/8$ radiánů a to takto [9]:

$$\hat{s}_i = s_i \cdot e^{ji3\pi/8} \quad (2.14)$$

Rotace symbolů o $3\pi/8$ zajišťuje, že modulační signál nikdy neprochází nulou, tudíž obálka vysílaného signálu rovněž nemůže být nulová. Takle vlastnost pomáhá snižovat poměr mezi špičkovou a průměrnou úrovní signálu PAPR („peak to average ratio”), [20].

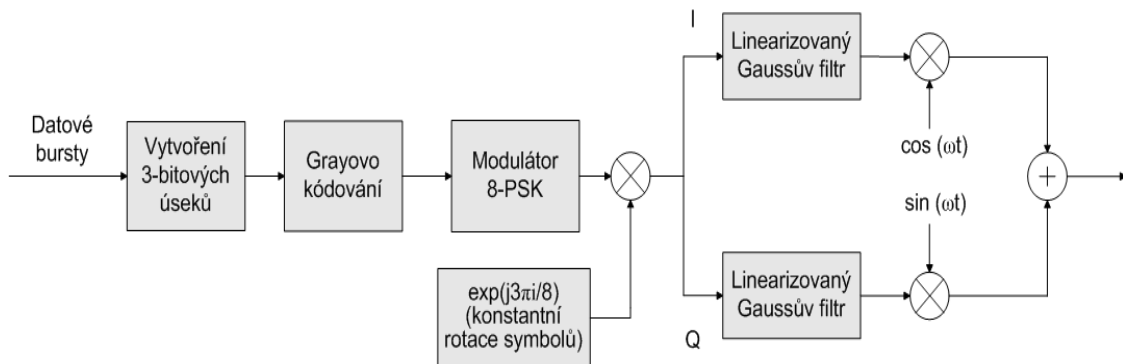
2 MODELY MOBILNÍCH SYSTÉMŮ

Tab. 2.6. Grayovo kódování bitových tripletů do osmičkové soustavy.

$d_{3n}, d_{3n+1}, d_{3n+2}$	0 0 0	0 0 1	0 1 0	0 1 1	1 0 0	1 0 1	1 1 0	1 1 1
1	3	4	2	1	6	5	7	0

Konstelační diagramy signálu a signálové trajektorie před a po rotaci symbolů ilustruje obrázek 2.15. Předposlední operací před vysláním je tvarování impulsů tzv. Gaussovým linearizovaným filtrem, jehož charakteristika je popsána např. v [9] nebo [20]. Poslední fázi zpracování signálu je modulace na harmonickou nosnou vlnu. Postup je znázorněn na obrázku 2.16.

Následně je signál přenesen přes rádiový únikový kanál. Na vstupu přijímače je provedena demodulace, poté je provedena derotace symbolů do jejich původní polohy. Za tímto blokem je rozhodovací obvod, který vybírá nejpřesnější odhad symbolu dle mapy rozhodovacích oblastí. Na jeho výstupu je trojice pravděpodobně vyslaných bitů. V poslední fázi se provede inverzní mapování symbolů z Grayova kódu, blok dat se zpracuje inverzně dle 2.3.1, srovná se přijatá a vyslaná sekvence bitů (původní bloky RLC/MAC) a vypočte se bitová chybovost BER.



Obr. 2.16. Blokové schéma modulace 8-PSK systému GSM-EDGE.

2.4 Model UMTS

2.4.1 Základní operace fyzické vrstvy

Mezi nejvýznamnější dvě operace patří rozprostření signálu a jeho skramblování. Signál je napřed rozprostřen OVSF (*Orthogonal Variable Spreading Factor*) kódem. V systému UMTS se používají Walshovy kódy (sekvence). Tato operace (v literatuře nazývaná *channelisation*) vede k rozšíření původně úzkopásmového signálu do kanálu širokého přibližně 5 MHz. Následně je provedeno skramblování pomocí Goldových kódů. Tato operace již nevede k dalšímu rozšíření spektra.

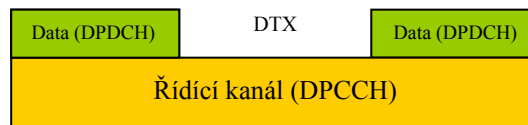
Dalším důležitým faktorem je způsob multiplexování jednotlivých kanálů. Ve směru uplink se používá tzv. I/Q kódový multiplex pro dva různé fyzické kanály.

2 MODELY MOBILNÍCH SYSTÉMŮ

Tab. 2.7. Použití a vlastnosti rozprostíracích a skramblovacích kódů [3].

	„Channelisation“ kód	Scramblovací kód
Použití	UL: Rozlišení fyzických datových (DPDCH) a řídicích kanálů (DPCCH) z jednoho terminálu DL: Rozlišení jednotlivých spojení uživatelů v jedné buňce	UL: Rozlišení jednotlivých terminálů DL: Rozlišení sektorů (buněk)
Délka kódu	4-256 chipů (v DL až 512)	10 ms = 38 400 chipů (pro UL i DL)
Počet kódů	Počet kódů pro jeden skramblovací kód = SF	UL: několik milionů DL: 512
Rodina kódu	OVSF kódy	Goldovy kódy
Rozprostření spektra	Ano	Ne

Řídicí kanál (přenáší informace o přenosovém formátu, o řízení výkonu a informace pro účely ekvalizace) je vysílán neustále (větev Q), zatímco uživatelský datový kanál je vysílán přerušovaně (jen v případě potřeby, větev I) – viz obr. 2.17. Účelem je minimalizace slyšitelného rušení od terminálu a maximalizace účinnosti koncového výkonového zesilovače.



Obr. 2.17. Multiplexování kanálů UMTS v uplinku .

Ve směru downlink se používá klasická modulace QPSK s časovým multiplexem – uživatelský datový kanál se pravidelně střídá s řídicími daty podle daných pravidel. Dochází tak k úspoře rozprostíracích kódů, které jsou v tomto směru omezené. Ve směru uplink se tato metoda nevyužívá z důvodu generace slyšitelného rušení v intervalech, kdy není nic vysíláno (časové intervaly DTX). V downlinku je toto rušení irelevantní, protože v každém okamžiku jsou ze základnové stanice vysílány řídicí informace nebo společné kanály [2].

Jedním z dalších hlavních parametrů fyzické vrstvy je přenosová rychlost. Tabulka 2.8 přehledně zobrazuje přenosové rychlosti ve vztahu s činitelem rozprostření (SF) pro uplink (UL) i downlink (DL).

Shrnutí ostatních operací fyzické vrstvy:

- Řetězení a segmentace datových bloků.
- Kanálové kódování (FEC).
- Přizpůsobení na přenosovou rychlost fyzického kanálu (*rate matching*).
- Interleaving.
- Slučování a mapování transportních kanálů.

Tab. 2.8. Přenosové rychlosti datových kanálů DPDCH.

Činitel rozprostření (SF)	Přenosová rychlost v kanálu DPDCH (Uplink)	Přenosová rychlost v kanálu DPDCH (Downlink)
512	-	15 kb/s
256	15 kb/s	30 kb/s
128	30 kb/s	60 kb/s
64	60 kb/s	120 kb/s
32	120 kb/s	240 kb/s
16	240 kb/s	480 kb/s
8	480 kb/s	960 kb/s
4	960 kb/s	1920 kb/s

2.4.2 Zpracování dat v základním pásmu

Procedura zpracování začíná dotazem fyzické vrstvy vždy na začátku každého časového intervalu TTI (*Transmission Time Interval*), zda-li jsou k dispozici data (transportní bloky TB) od nadřazené vrstvy (RLC/MAC). Těchto bloků může být podle konfigurace a pro každý transportní kanál od nuly po několik jednotek. Interval TTI je přesně definován – 10, 20, 40 nebo 80 ms podle druhu použité služby.

Pokud jsou nějaké bloky TB dostupné pro vysílání, fyzická vrstva provede procedury, které jsou v logické návaznosti zobrazeny na obr. 2.18.

Pro začátek se ke každému TB přidá kontrolní paritní sekvence CRC v délce 0, 8, 12, 16 nebo 24 bitů. Délka této sekvence je signalizována z vyšších vrstev. V případě více než jednoho TB (během jednoho TTI) následuje řetězení bloků za sebe.

Následuje kanálové kódování. V UMTS existují 2 možnosti pro vyhrazené kanály (DCH – *Dedicated Channels*) – konvoluční kódování pro přenosové rychlosti do 32 kb/s a turbo kódování pro přenosové rychlosti od 64 kb/s výše. Důvod je takový, že turbo kódy jsou efektivnější pro bloky dat větší než 1000 symbolů, což právě odpovídá přenosovým rychlostem od 64 kb/s [30]. V případě turbo kódování je poslední blok doplněn nulami, pokud nemá odpovídající délku.

Konvoluční kodér tvoří posuvný registr s osmi buňkami a poskytuje kódový poměr 1/2 nebo 1/3. Blokové schéma je znázorněno na obr. 2.19, vytvářecí polynomy pro R = 1/2 popisují rovnice (2.15) a (2.16), pro R = 1/3 rovnice (2.17) až (2.19) [31].

$$G_1(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^4 + x^8, \quad (2.15)$$

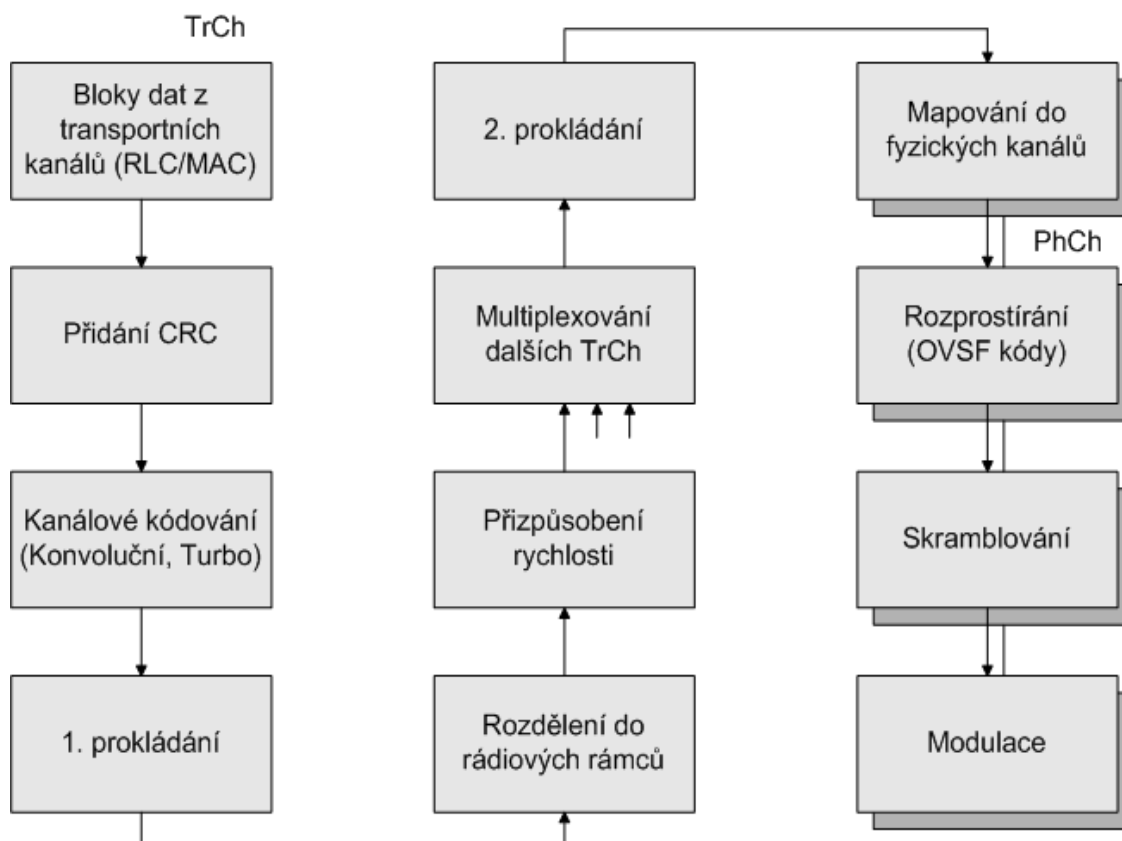
$$G_2(x) = 1 + x + x^2 + x^3 + x^5 + x^7 + x^8, \quad (2.16)$$

$$G_1(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^5 + x^6 + x^7 + x^8, \quad (2.17)$$

$$G_2(x) = 1 + x + x^3 + x^4 + x^7 + x^8, \quad (2.18)$$

$$G_2(x) = 1 + x + x^2 + x^5 + x^8. \quad (2.19)$$

Turbo kodér je složen ze dvou paralelně řazených 8-stavových rekurzivních kodérů oddělených vnitřním pseudonáhodným prokladačem. Výstupní zakódovaná data se skládají z originální sekvence vstupních bitů, následovaných paritními bity z obou dílčích kodérů. Blokové schéma je na obr. 2.20.



Obr. 2.18. Blokové schéma zpracování signálu systému UMTS.

Výstup kanálového kodéru je přiveden na 1. prokládací stupeň. Prokládání je provedeno následujícím způsobem:

1. Data se zapíší do matice řádek po řádku. Počet sloupců odpovídá $TTI/10$ ms, počet řádků je roven počtu bitů v transportním kanále za 10 ms.
2. Sloupce se přehází podle určitého pravidla.
3. Data se vyčítají z matice sloupec po sloupci (začíná se prvním sloupcem).

Pravidlo pro permutaci sloupců při prokládání je takové [31]:

$$TTI = 20 \text{ ms} \quad \gg \quad \langle 0, 1 \rangle ,$$

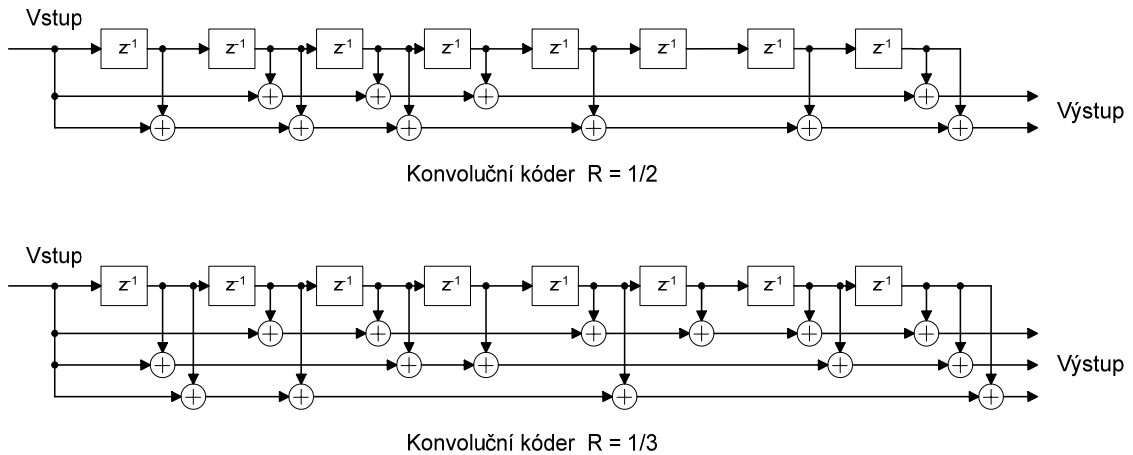
$$TTI = 40 \text{ ms} \quad \gg \quad \langle 0, 2, 1, 3 \rangle ,$$

$$TTI = 80 \text{ ms} \quad \gg \quad \langle 0, 4, 2, 6, 1, 5, 3, 7 \rangle .$$

Pokud je TTI větší než 10 ms, data transportního kanálu jsou rozdělena na úseky dlouhé právě 10 ms (blok rozdělení do rádiových rámců).

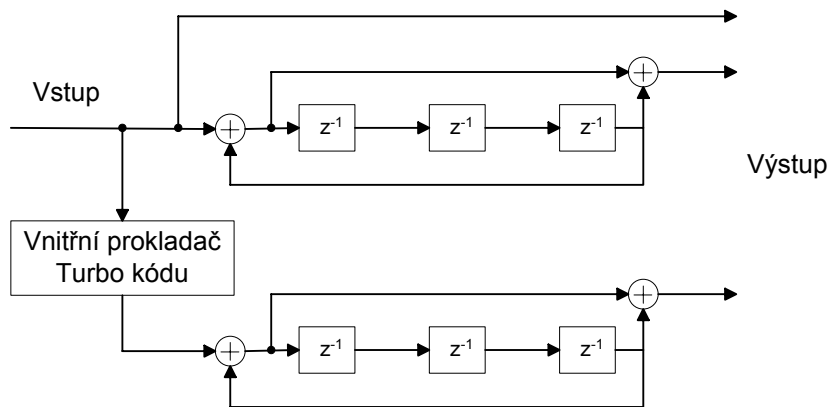
Blok přizpůsobení rychlosti zajišťuje, aby počet bitů v transportním kanálu odpovídal délce (kapacitě) rádiového rámce fyzického kanálu. Pokud je počet bitů větší než kapacita, tak se některé vynechávají (puncturing), pokud je bitů méně než je potřeba, tak se bity vloží opakováním některého úseku dat (repeating). Tento algoritmus je řízen signalizací z vyšších vrstev.

2 MODELY MOBILNÍCH SYSTÉMŮ



Obr. 2.19. Konvoluční kodéry systému UMTS.

Multiplexování transportních kanálů probíhá tak, že každých 10 ms se z každého TrCH vezme jeden ráiový blok dlouhý 10 ms a sériově se zařadí za sebe. Tak vznikne jeden multiplexovaný společný kanál CCTrCH s rámci dlouhými 10 ms. Proces je pro ilustraci znázorněn na obr. 2.21.



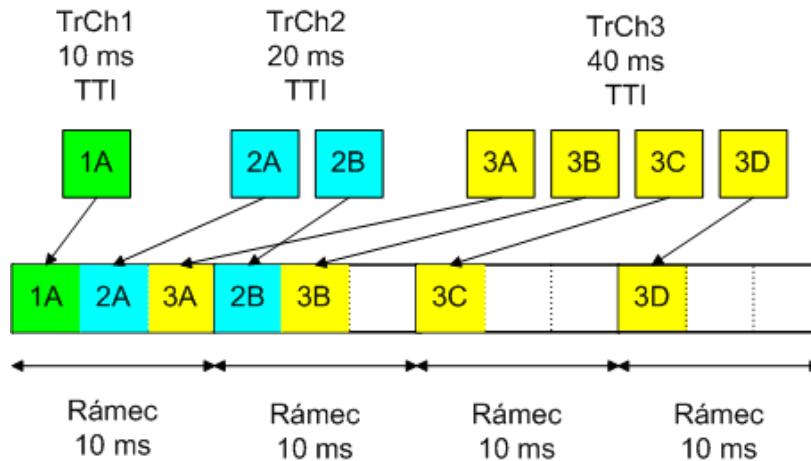
Obr. 2.20. Turbo kódér systému UMTS ($R = 1/3$).

Druhé prokládání je provedeno v případě, že je použito pro přenos dat více fyzických kanálů. Řekněme, že počet bitů v jednom 10 ms rámci kanálu CCTrCH je X , počet fyzických kanálů je P , pak počet bitů na jeden fyzický kanál je roven $U = X/P$. Prokládání je provedeno následujícím způsobem [30]:

1. Data U se zapíší do matice řádek po řádku. Počet sloupců je 30, poslední řádek se v případě potřeby doplní nulami.
2. Sloupce se přehází podle následujícího pravidla:
 $\langle 0,20,10,5,15,25,3,13,23,8,18,28,1,11,21,6,16,26,4,14,24,19,9,29,1,2,7,33,27,17 \rangle$.
3. Data se vyčítají z matice sloupec po sloupci (začíná se prvním sloupcem), vložené nuly z prvního kroku se odstraní.

Po 2. prokládání se 10 ms ráiové rámce z kanálu CCTrCH vkládají (mapují) na jeden nebo více vyhrazených DPCH kanálů. Graficky je celý proces od přijetí TB z vyšší vrstvy po mapování shrnut na obr. 2.23.

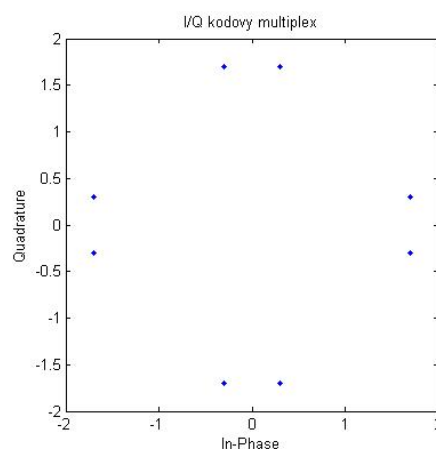
2 MODELY MOBILNÍCH SYSTÉMŮ



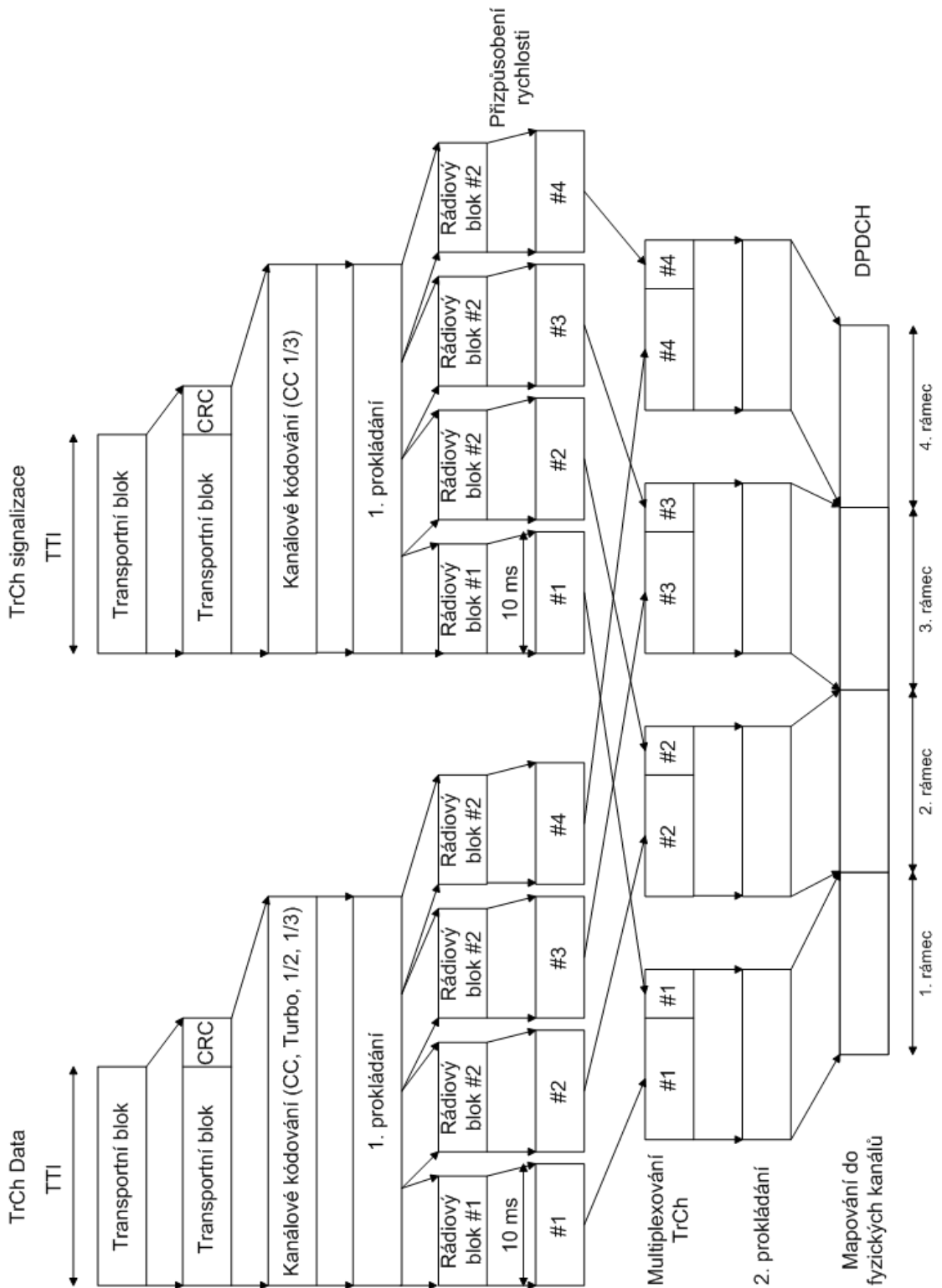
Obr. 2.21. Multiplexování transportních kanálů [30].

Poslední dvě operace v základním pásmu, avšak velmi důležité, jsou rozprostírání a skramblování dat. Rozprostření každého fyzického kanálu je provedeno pomocí individuálního OVFSF kódu o chipové rychlosti 3,84 Mchip/s. Ve směru uplink je signalizace (DPCCH) vždy ve větvi Q, data mohou být ve větvi I i Q (v případě použití více než jednoho fyzického kanálu) – tzv. I/Q kódový multiplex (obr. 2.22.).

Při přenosu pouze přes jeden fyzický kanál se pro větve I (DPDCH) použije kód $C_{Ch,SF,SF/4}$ s proměnným faktorem rozprostření SF od 4 do 256, ve větvi Q (DPCCH) se vždy použije kód $C_{C,256,0}$ s pevným SF = 256. V případě použití více fyzických kanálů DPDCH (2-6) je každý tento kanál rozprostřen faktorem SF = 4 a tyto kanály jsou rozděleny mezi větve I a Q. Datové bity jsou tak vynásobeny kódovou posloupností délky 4 – 256. Čím delší je rozprostírací posloupnost, tím nižší je bitová rychlost, ale získáme větší odolnost proti rušení a více použitelných kódů. Vztah mezi přenosovou rychlostí a SF je uveden v tabulce 2.8. Všechny kanály DPDCH a DPCCH jsou následně váhovány faktorem G – dochází k nastavení výkonových poměrů. Obě větve jsou poté sečteny a výsledkem je komplexní chipový tok. Nakonec se tento tok vynásobí stejným scramblovacím kódem $S_{ul,n}$, kde n je jeden ze 2^{24} použitelných kódů. Obrázek 2.24. ilustruje výše popsáný postup.



Obr. 2.22. I/Q kódový multiplex (hybridní QPSK) systému UMTS.



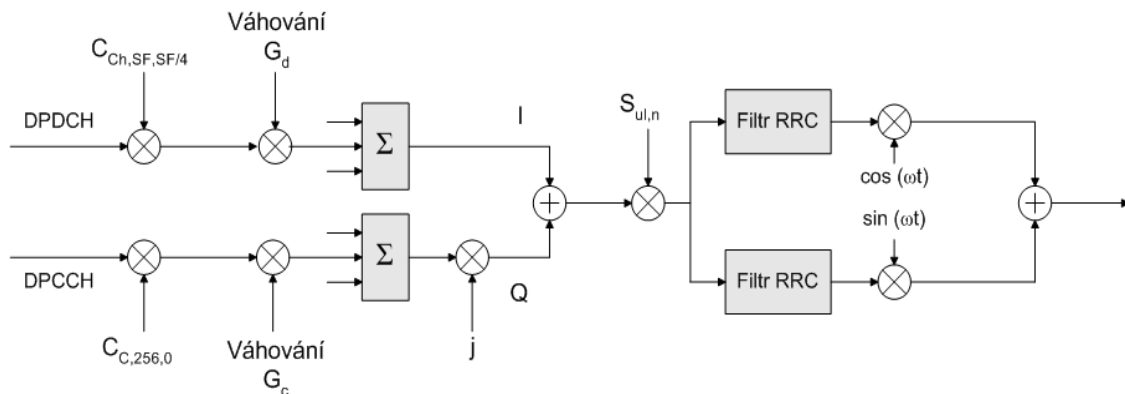
Obr. 2.23. Zpracování a kódování dat systému UMTS v základním pásmu.

Celý model UMTS, vytvořený v MATLABu, pracuje podle schématu na obr. 2.18, poslední 3 bloky jsou detailně vykresleny na obr. 2.24.

Pro zpracování v navrženém modelu UMTS jsou data ještě před rozprostíráním mapována: logická 0 na 1 a logická 1 na -1. Tato operace je provedena z čistě praktických důvodů, abychom mohli signály jednoduše násobit.

2.4.3 Modulace a tvarování impulsů

Modulace v uplinku je provedena přivedením uživatelského signálu (kanál DPDCH) do větve I (reálná část) a řídicího signálu (kanál DPCCH) do větve Q (imaginární část). Vzniká tak hybridní modulace QPSK označována jako I/Q kódový multiplex. Konstelační diagram je zobrazen na obr. 2.23 ($G_D = 0,7$; $G_C = 1$).



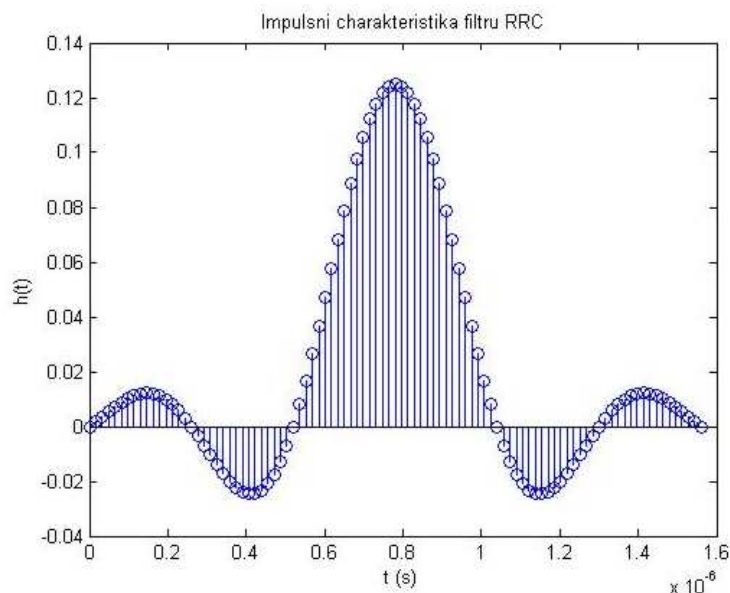
Obr. 2.24. Rozprostírání, slučování kanálů, skramblování a modulace UMTS v uplinku.

Před samotnou modulací na harmonickou nosnou vlnu dochází k tvarování impulsů pomocí RRC filtru („roll-off“ faktor 0,22). Impulsní charakteristika je popsána rovnicí (2.20), její časový průběh je graficky znázorněn na obr. 2.25, amplitudová a fázová charakteristika je na obr. 2.26.

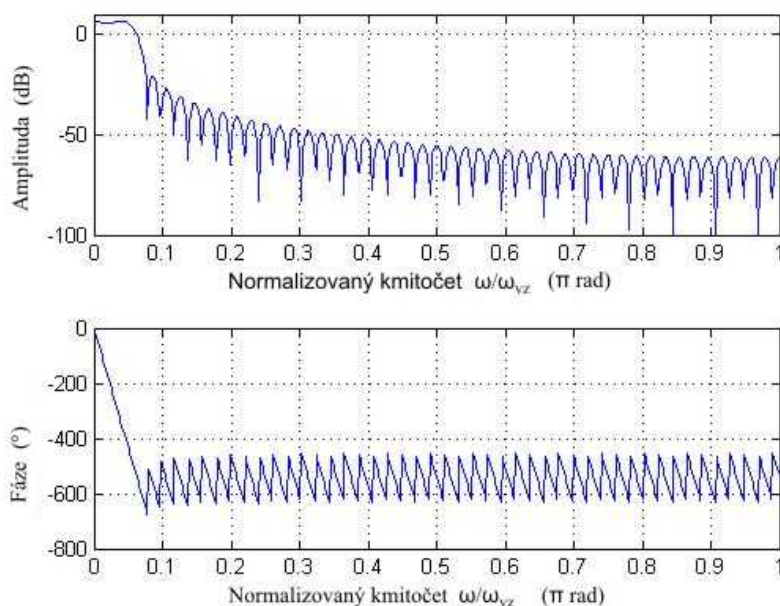
$$h(t) = \frac{\sin\left(\pi \frac{t}{T_C} (1 - \beta)\right) + 4\beta \frac{t}{T_C} \cos\left(\pi \frac{t}{T_C} (1 + \beta)\right)}{\pi \frac{t}{T_C} \left(1 - \left(4\beta \frac{t}{T_C}\right)^2\right)}, \quad (2.20)$$

kde $\beta = 0,22$ je „roll off“ faktor a $T_C = 1/3,84 \cdot 10^6 = 260$ ns je chipová perioda [32].

Rádiové rozhraní bylo modelováno AWGN kanálem (kap. 2.2). Na přijímací straně se provedou inverzní operace – demodulace do základního pásma, deskramblování a derozprostření (výběr požadovaného kanálu správným kódem). Původní fyzické kanály jsou obnoveny integrací a následnou komparací. Doba integrace je rovna činiteli rozprostření vynásobeného chipovou periodou ($SF \cdot T_C$). Inverzními postupy z obr. 2.22 získáme přijatý a dekódovaný transportní blok dat, který je srovnán s vyslaným TB a je vypočtena bitová chybovost BER.



Obr. 2.25. Impulsní charakteristika filtru RRC (roll-off faktor 0,22) systému UMTS.

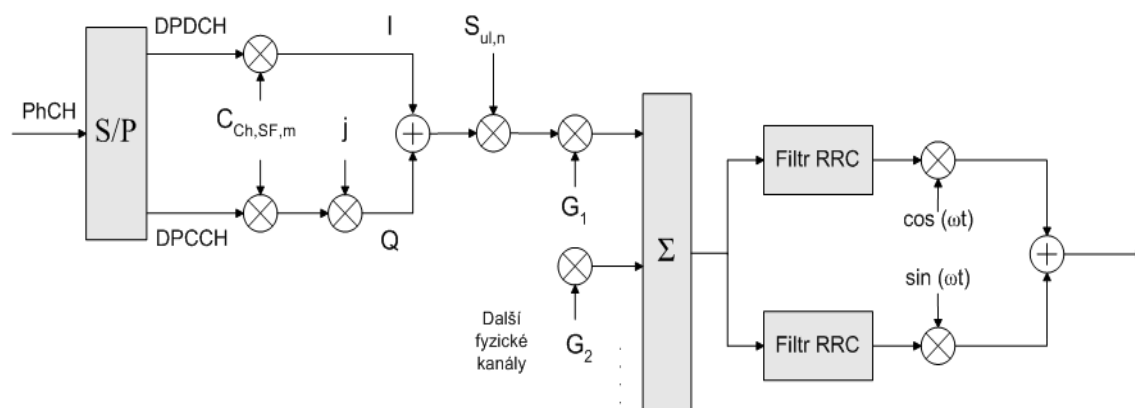


Obr. 2.26. Amplitudová a fázová charakteristika použitého RRC filtru.

Modulace v downlinku obsahuje několik změn oproti uplinku (obr. 2.27). Bitový tok PhCH je nejprve rozdělen do dvou paralelních větví. Symboly ve větvích I a Q jsou rozprostřeny na čipovou rychlost 3,84 Mchip/s stejným ortogonálním (Walshovým) rozprostřacím kódem $C_{ch, SF, m}$. Posloupnost ve větvi Q je pak násobena komplexní jednotkou j a sečtena s odpovídající posloupností z větve I. Výstupem je jedna komplexní čipová posloupnost. Rozprostřený komplexní signál fyzického kanálu je dále skramblován kódem $S_{dl, n}$.

Komplexní rozprostřený signál každého fyzického kanálu může být samostatně váhován váhovacím činitelem G_i . Poté jsou všechny kanály sloučeny použitím komplexního součtu. Modulace signálu se provádí stejně jako v uplinku pomocí

kvadraturního modulátoru. V obou větvích modulátoru je opět zařazen filtr RRC pro tvarování impulsů.



Obr. 2.27. Mapování, rozprostírání, skramblování, slučování kanálů a modulace UMTS v downlinku.

2.5 Zhodnocení

V této kapitole byly popsány modely fyzické vrstvy systémů GSM – EDGE a UMTS tak, jak je definují jejich příslušné standardy. Důraz byl kladen zejména na rozbor kódování a zpracování signálu v základním pásmu, použité modulace, bitové rychlosti, filtrování signálu, atd. Na základě těchto parametrů byly vytvořeny skripty v prostředí MATLAB a následně byly využity pro simulace uvedené v dalších kapitolách.

Skripty jsou součástí přílohy disertační práce na přiloženém médiu DVD.

3 Simulace na fyzické vrstvě

3.1 Vyhodnocení parametrů systému GSM – EDGE

Na základě modelu popsaného v kapitolách 2.3.1 a 2.3.2 byly provedeny simulace fyzické vrstvy pro kanál AWGN a pro únikový kanál typu Rice. Výsledky budou použity jako referenční modely pro pozdější vyšetřování koexistence. Dále se dají využít při adaptaci přenosové rychlosti v závislosti na kvalitě rádiového kanálu (kvalitativní parametr je odstup signál/šum CNR).

- Společné parametry simulace:

Počet přenesených rádiových bloků: 10 000 (tzn. 40 000 rámců)

Bitová rychlost na fyzické vrstvě: 270,8 kb/s

Odpovídající bitová rychlost na vrstvě RLC/MAC:

- Modulace GMSK:

MCS-1 » 12,73 kb/s

MCS-2 » 15,33 kb/s

MCS-3 » 19,23 kb/s

MCS-4 » 22,26 kb/s

- Modulace 8-PSK:

MCS-5 » 27,30 kb/s

MCS-6 » 35,10 kb/s

MCS-7 » 52,98 kb/s

MCS-8 » 63,38 kb/s

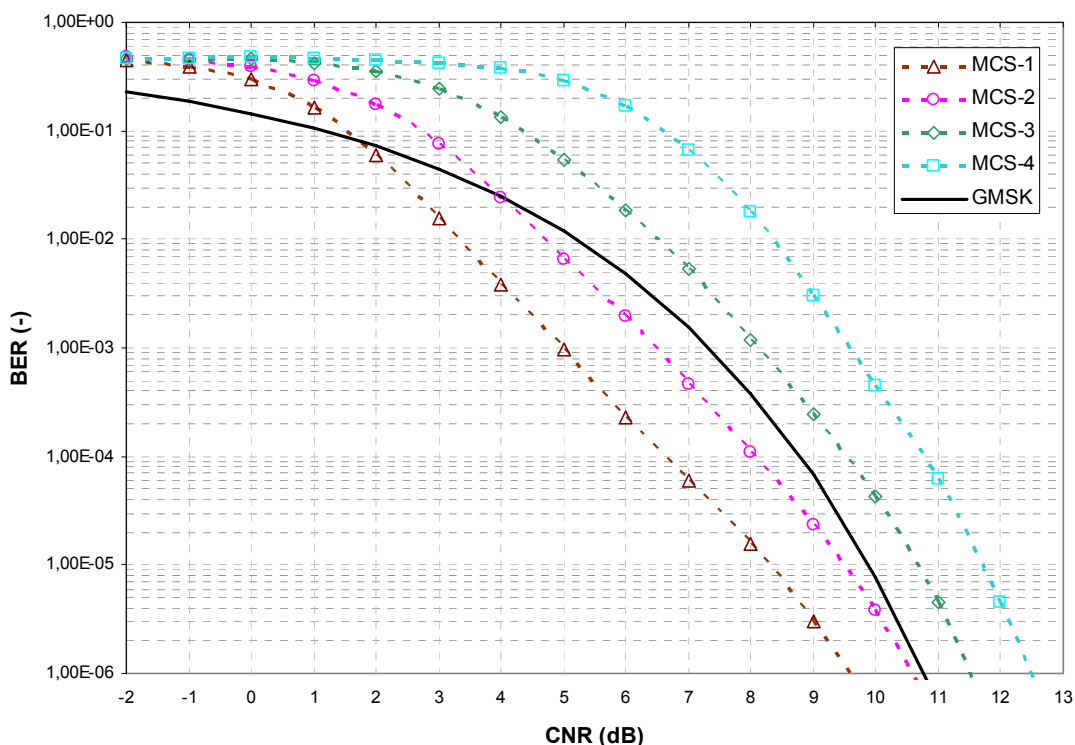
MCS-9 » 68,58 kb/s

Jako dostatečná bitová chybovost BER pro kvalitní komunikaci byla zvolena hodnota 10^{-6} [ETSI QoS, jedná se o bitovou chybovost po kanálovém dekódování].

Odstupy CNR byly odečteny z grafů na obr. 3.1. a 3.2. Pro modulaci GMSK jsou výkonové odstupy pro výše uvedenou BER přibližně 1 dB, zatímco pro modulaci 8-PSK cca 2 dB. Dále můžeme říci, že pro CNR větší než 12 dB je výhodnější použít kódové schéma MCS-6 než MCS-5.

Plnou čarou jsou znázorněny průběhy teoretických křivek pro modulace GMSK a 8-PSK. Kódovací schémata MCS-1 a MCS-2 vykazují oproti GMSK lepší výsledky již pro odstupy CNR větší než 2 dB (resp. 4 dB) díky zabezpečovacím mechanismům (kanálové kódování, prokládání, atd.).

3 SIMULACE NA FYZICKÉ VRSTVĚ



Obr. 3.1. Závislost bitové chybovosti BER na poměru CNR (MCS-1 až MCS-4, modulace GMSK, AWGN).

- Shrnutí výsledků pro AWGN kanál:

Zisk kódového schématu MCS-1 oproti MCS-4 pro chybovost 10^{-6} : 3 dB

Zisk kódového schématu MCS-5 oproti MCS-9 pro chybovost 10^{-6} : 5 dB

Zisk kódového schématu MCS-1 oproti MCS-9 pro chybovost 10^{-6} : 10,5 dB

Odstup CNR pro dosažení chybovosti 10^{-6} :

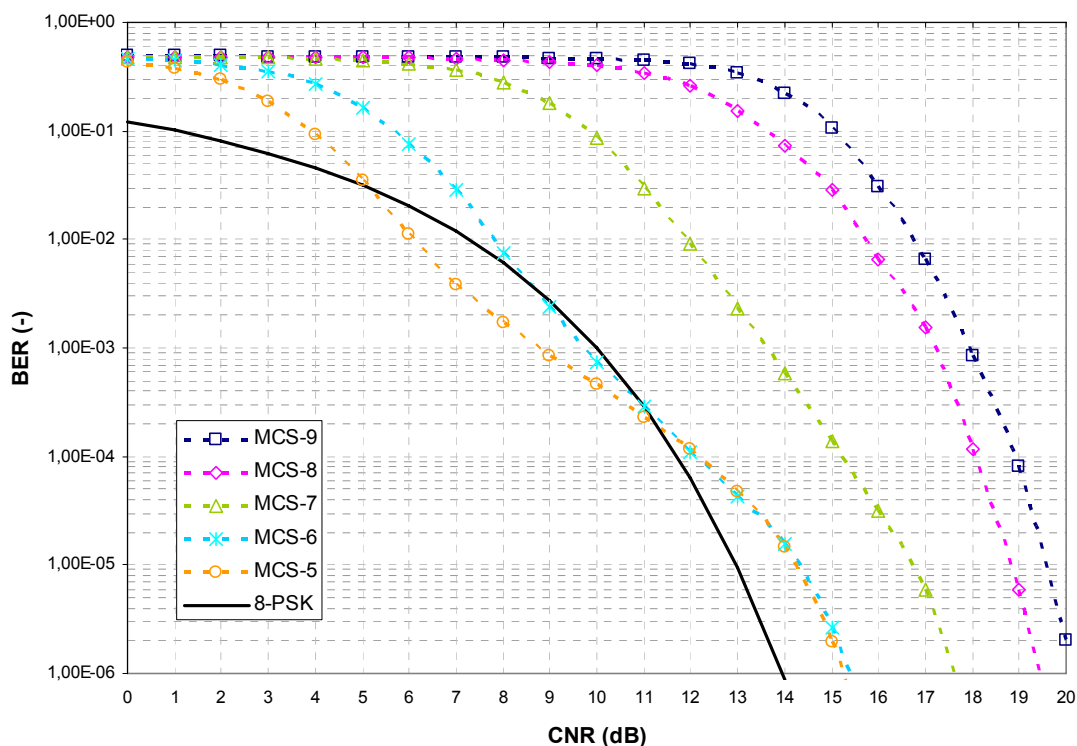
MCS-1	»	9,5 dB
MCS-2	»	10,5 dB
MCS-3	»	11,5 dB
MCS-4	»	12,5 dB
MCS-5	»	15,0 dB
MCS-6	»	15,5 dB
MCS-7	»	17,5 dB
MCS-8	»	19,5 dB
MCS-9	»	20,5 dB

Odstupy CNR pro únikový kanál byly odečteny z grafu na obr. 3.3. Schéma MCS-1 má na únikovém kanálu srovnatelný průběh BER jako na kanálu AWGN, tzn. dokáže se svým zabezpečením vyrovnat s vícecestným šířením, MCS-2 potřebuje pro dosažení stejné chybovosti jako na AWGN kanálu signál přibližně o 1 dB silnější, MCS-3 a MCS-4 potřebují přibližně o 2 dB silnější signál.

Pro modulaci 8-PSK a referenční chybovost jsou výkonové odstupy CNR cca 1 dB jak je možno vidět na obr. 3.4. Průběhy křivek chybovostí v závislosti na poměru CNR na únikovém kanálu pro kódovací schémata MCS-5 až MCS-9 jsou podobné jako

3 SIMULACE NA FYZICKÉ VRSTVĚ

na kanálu AWGN, je ale potřeba o 1,5 až 3 dB větší úroveň signálu pro dosažení stejné BER [34].



Obr. 3.2. Závislost bitové chybovosti BER na poměru CNR (MCS-5 až MCS-9, 8-PSK, AWGN).

- Shrnutí výsledků pro únikový kanál (Rice):

Model PA – venkovní pro chodce, kanál A, 4 cesty šíření vlny – 1 přímá, 3 odražené, parametry jsou uvedeny v tab. 2.2.

Zisk kódového schématu MCS-1 oproti MCS-4 pro chybovost 10^{-6} : 4 dB

Zisk kódového schématu MCS-5 oproti MCS-9 pro chybovost 10^{-6} : 3,7 dB

Zisk kódového schématu MCS-1 oproti MCS-9 pro chybovost 10^{-6} : 12,3 dB

Odstup CNR pro dosažení chybovosti 10^{-6} : MCS-1 » 9,7 dB

MCS-2 » 11,8 dB

MCS-3 » 13,3 dB

MCS-4 » 13,8 dB

MCS-5 » 18,3 dB

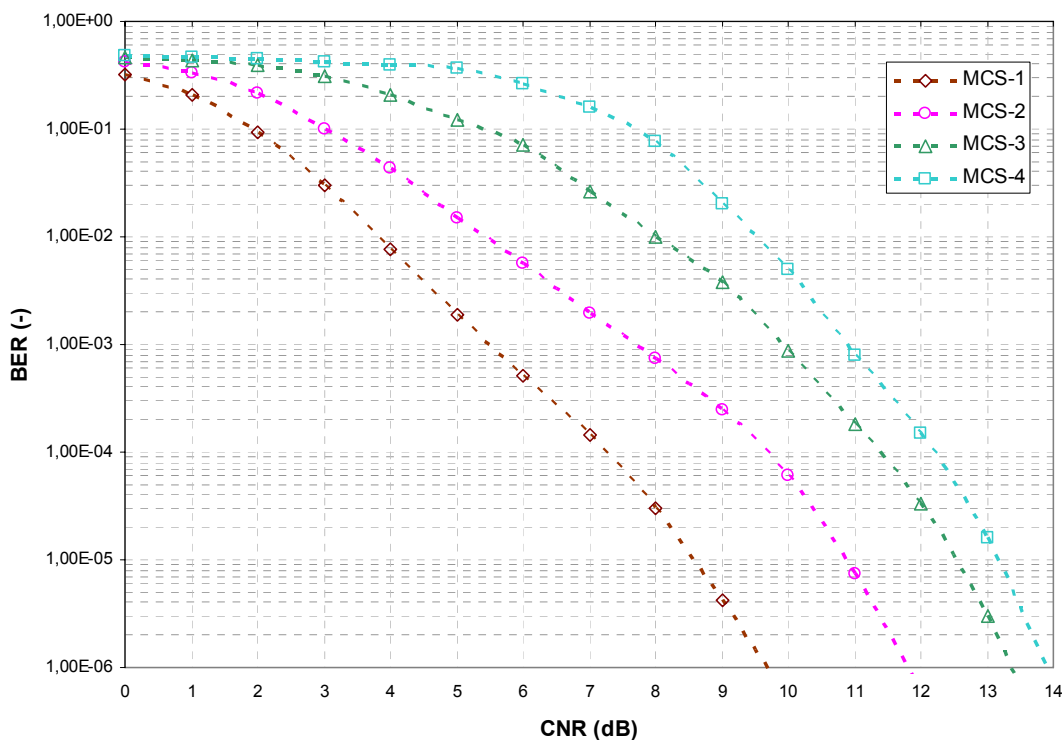
MCS-6 » 18,4 dB

MCS-7 » 20,0 dB

MCS-8 » 21,0 dB

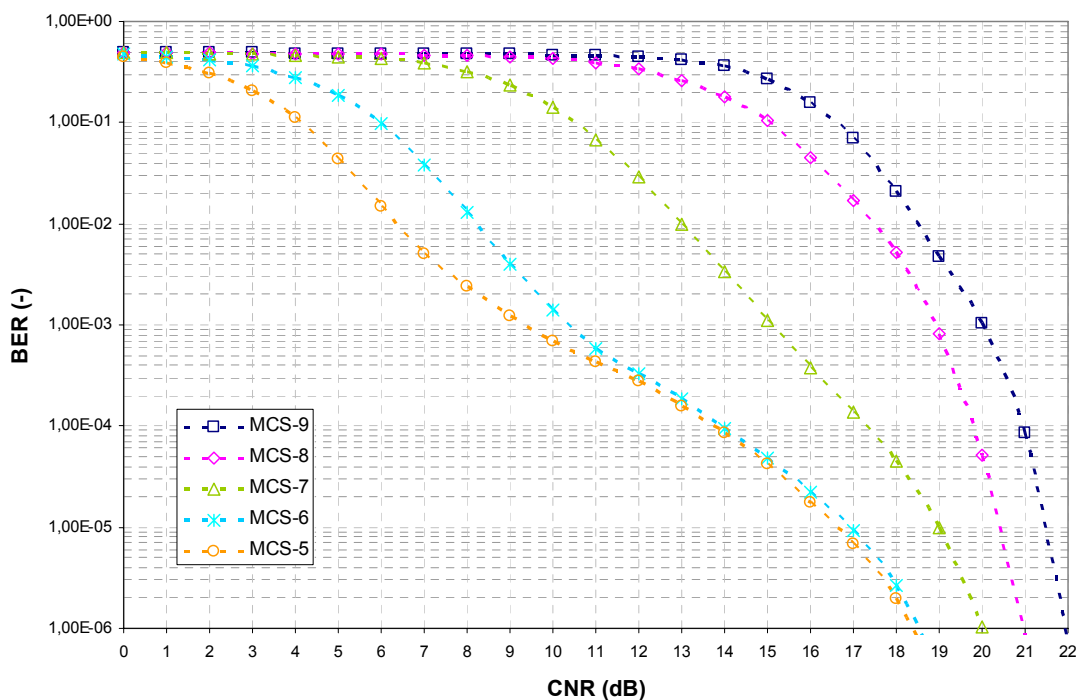
MCS-9 » 22,0 dB

3 SIMULACE NA FYZICKÉ VRSTVĚ



Obr. 3.3. Závislost bitové chybovosti BER na poměru CNR (MCS-1 až MCS-4, modulace GMSK, Rice).

Z těchto výsledků můžeme vyvodit závěr, že pro únikový kanál je potřeba uvažovat 3 dB výkonovou rezervu oproti statickému kanálu AWGN [34].



Obr. 3.4. Závislost bitové chybovosti BER na poměru CNR (MCS-5 až MCS-9, modulace 8-PSK, Rice).

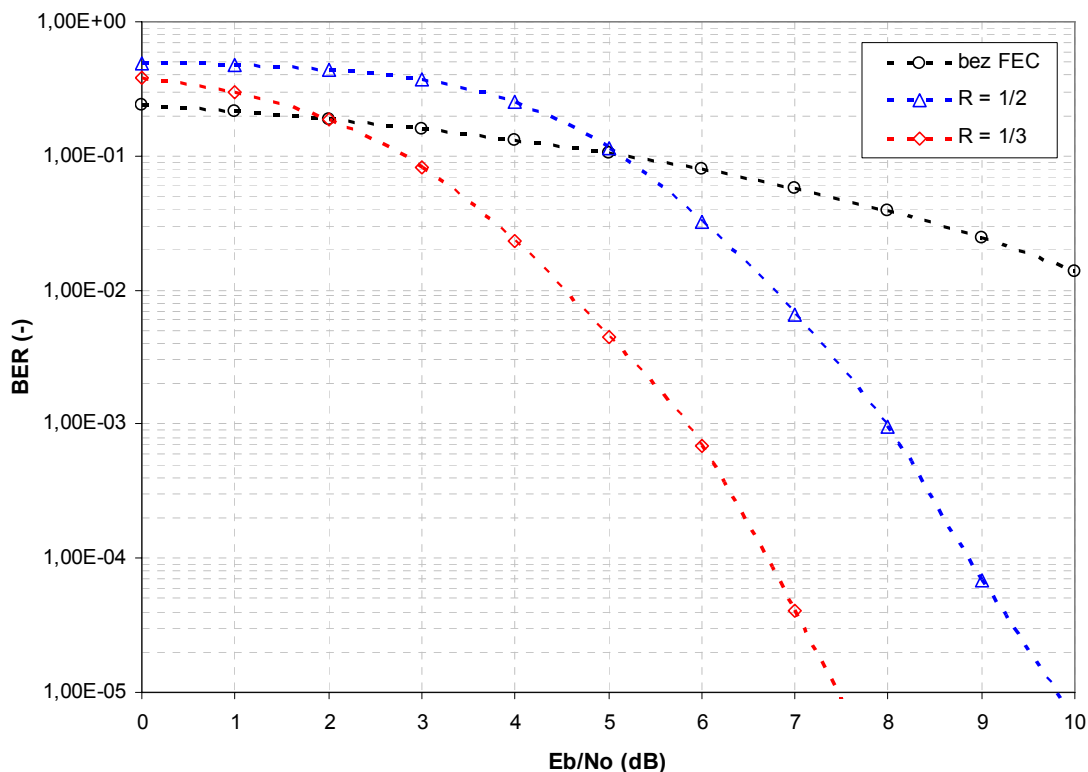
3.2 Vyhodnocení parametrů systému UMTS

Na základě modelu popsaného v kapitolách 2.4.2 a 2.4.3 byly provedeny simulace pro tyto parametry:

- Činitel rozptření SF: 4 - 256,
- konvoluční kódování: 1/2, 1/3, bez,
- poměr E_b/N_0 : 0 dB - 10 dB.

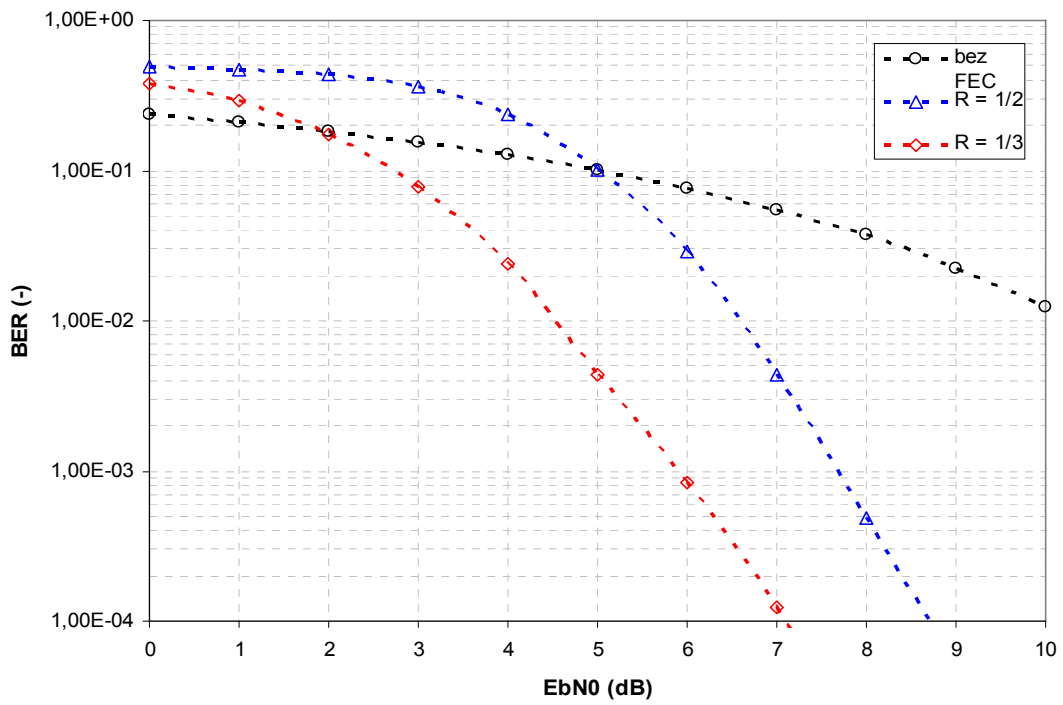
Pro každý činitel rozptření SF a pro každý poměr E_b/N_0 bylo přenášeno vždy 1000 rámců. Pro signály DPDCH a DPCCH byly vždy použity nezávislé Walshovy kódy, protože výběr správných kódů má nezanedbatelný vliv na bitovou chybovost. Dosažené výsledky závislosti bitové chybovosti BER na poměru E_b/N_0 pro různé kódové poměry konvolučního kódování, pro 1 uživatele a 1 kanál DPDCH jsou graficky zobrazeny na obrázcích 3.5. – 3.11.

Z těchto výsledků můžeme například usoudit, že pro přenos hovoru společně s řídicími daty (12,2 kb/s AMR, 3,4 kb/s DPCCH, SF 64 [5]) s použitím konvolučního kódu 1/3 potřebujeme poměr $E_b/N_0 = 5,5$ dB nebo lepší (BER < 0,001 [19]), což je poměrně uspokojivá hodnota [15], [33]. Potřebný poměr udávaný v literatuře je $E_b/N_0 = 5$ dB.

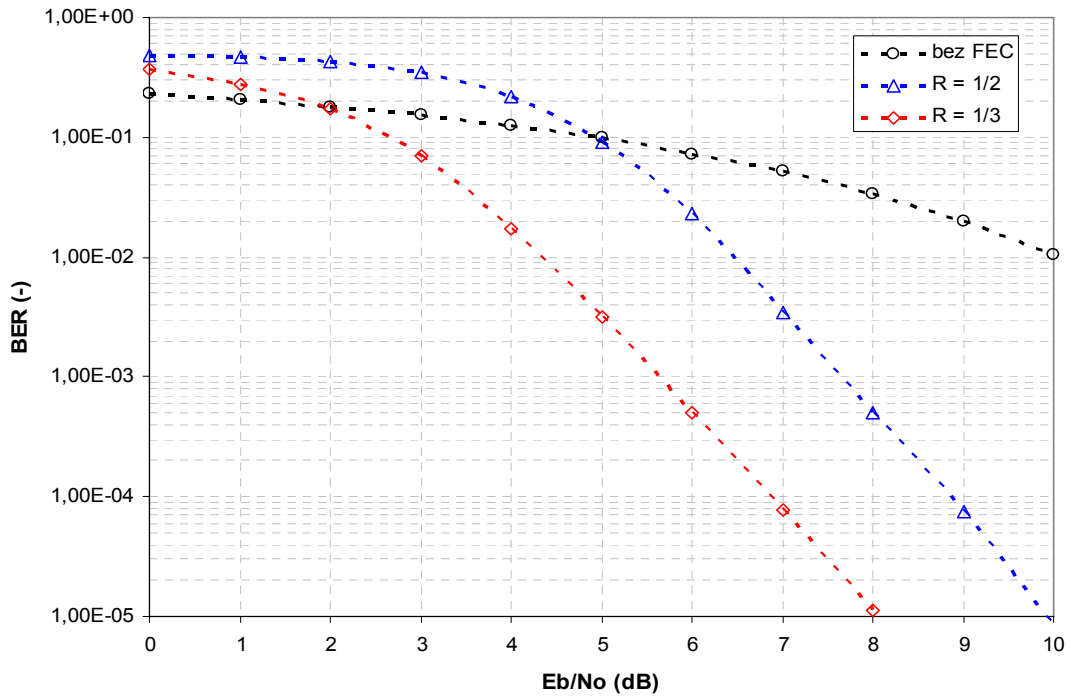


Obr. 3.5. Závislost BER na poměru E_b/N_0 pro různé kódové poměry, činitel rozptření SF = 4, 9600000 přenesených bitů.

3 SIMULACE NA FYZICKÉ VRSTVĚ

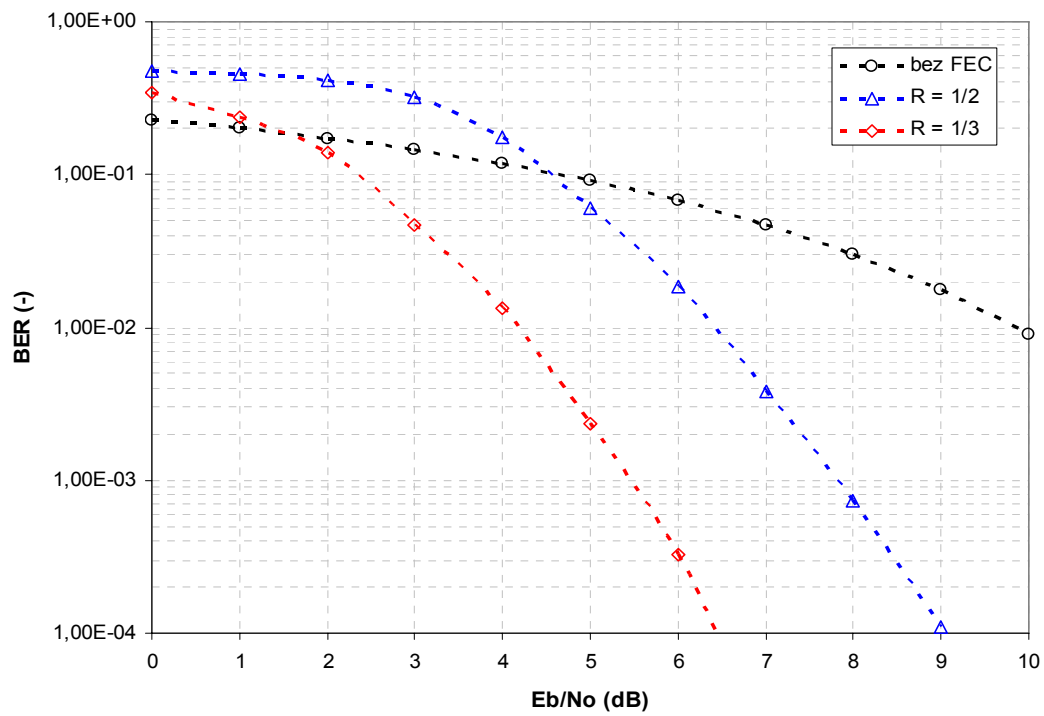


Obr. 3.6. Závislost BER na poměru E_b/N_0 pro různé kódové poměry, činitel rozprostření SF = 8, 4800000 přenesených bitů.

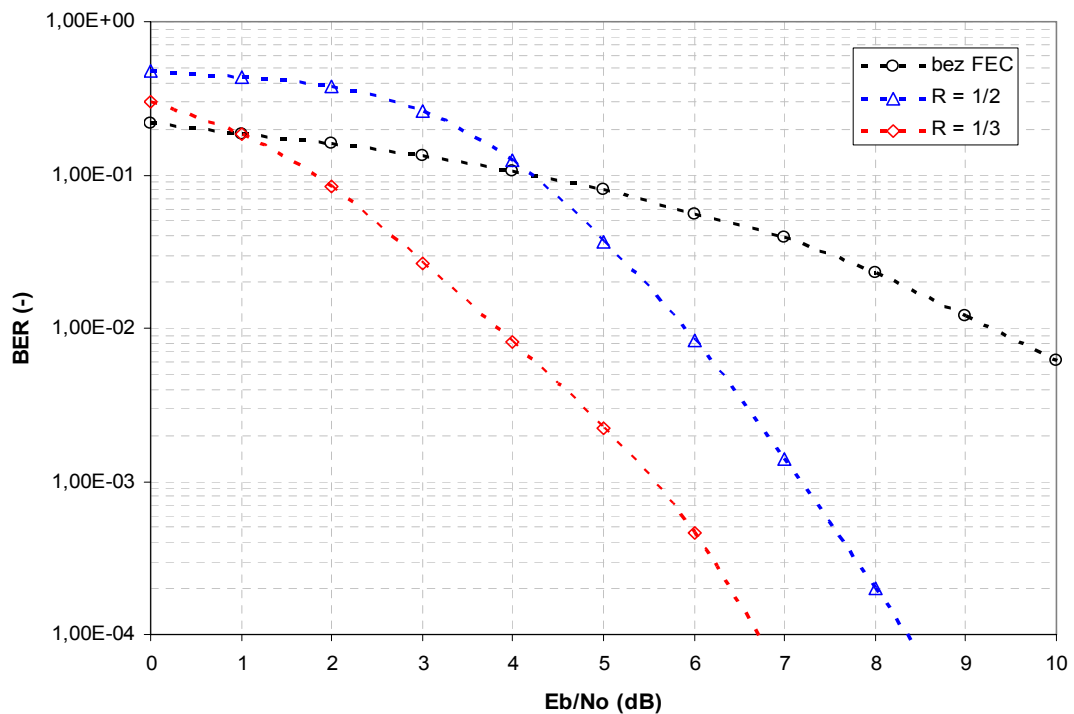


Obr. 3.7. Závislost BER na poměru E_b/N_0 pro různé kódové poměry, činitel rozprostření SF = 16, 2400000 přenesených bitů.

3 SIMULACE NA FYZIKÉ VRSTVĚ

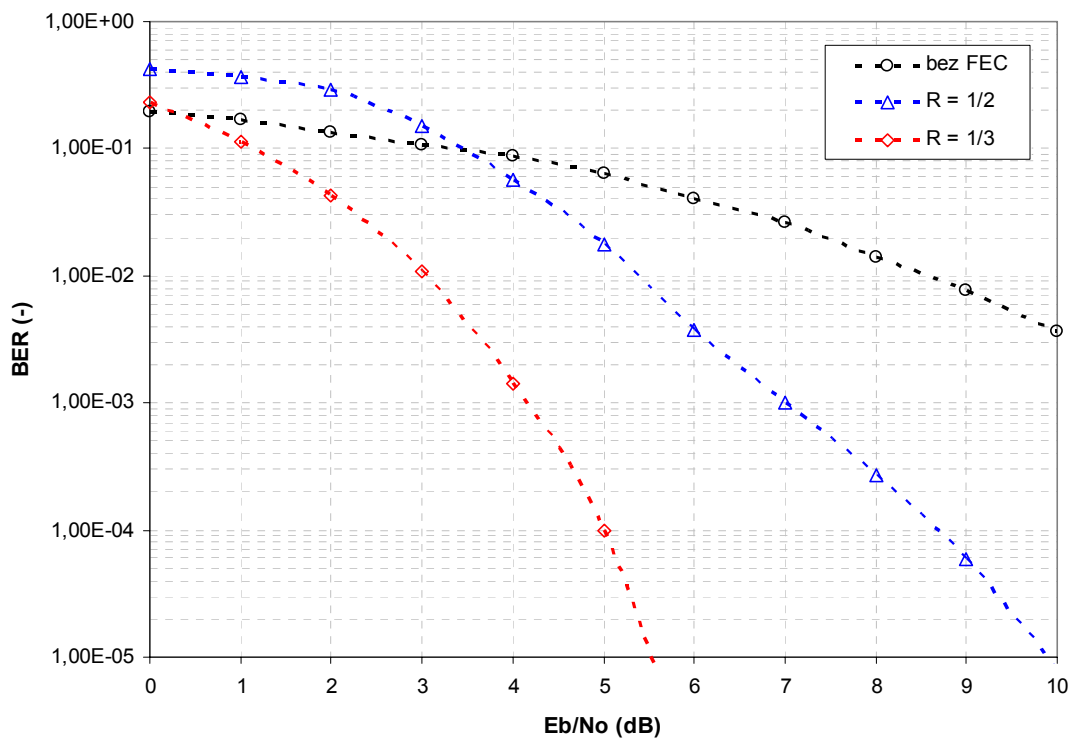


Obr. 3.8. Závislost BER na poměru E_b/N_0 pro různé kódové poměry, činitel rozptření SF = 32, 1200000 přenesených bitů.

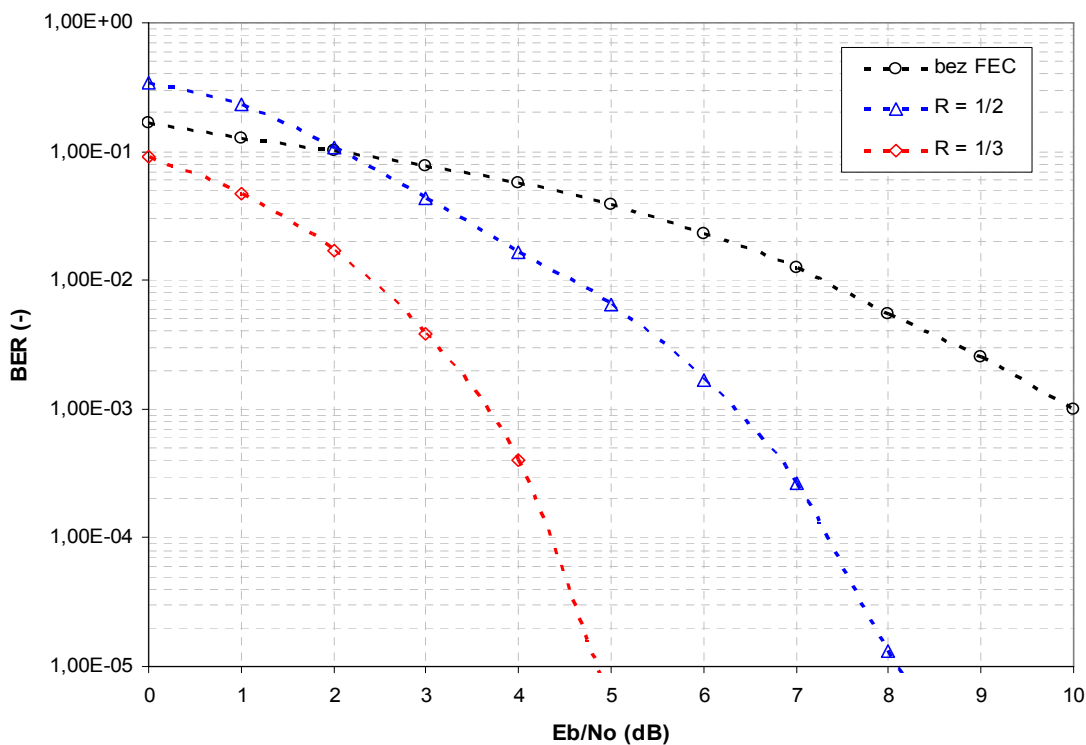


Obr. 3.9. Závislost BER na poměru E_b/N_0 pro různé kódové poměry, činitel rozptření SF = 64, 600000 přenesených bitů.

3 SIMULACE NA FYZIKÉ VRSTVĚ



Obr. 3.10. Závislost BER na poměru E_b/N_0 pro různé kódové poměry, činitel rozptření SF = 128, 300000 přenesených bitů.

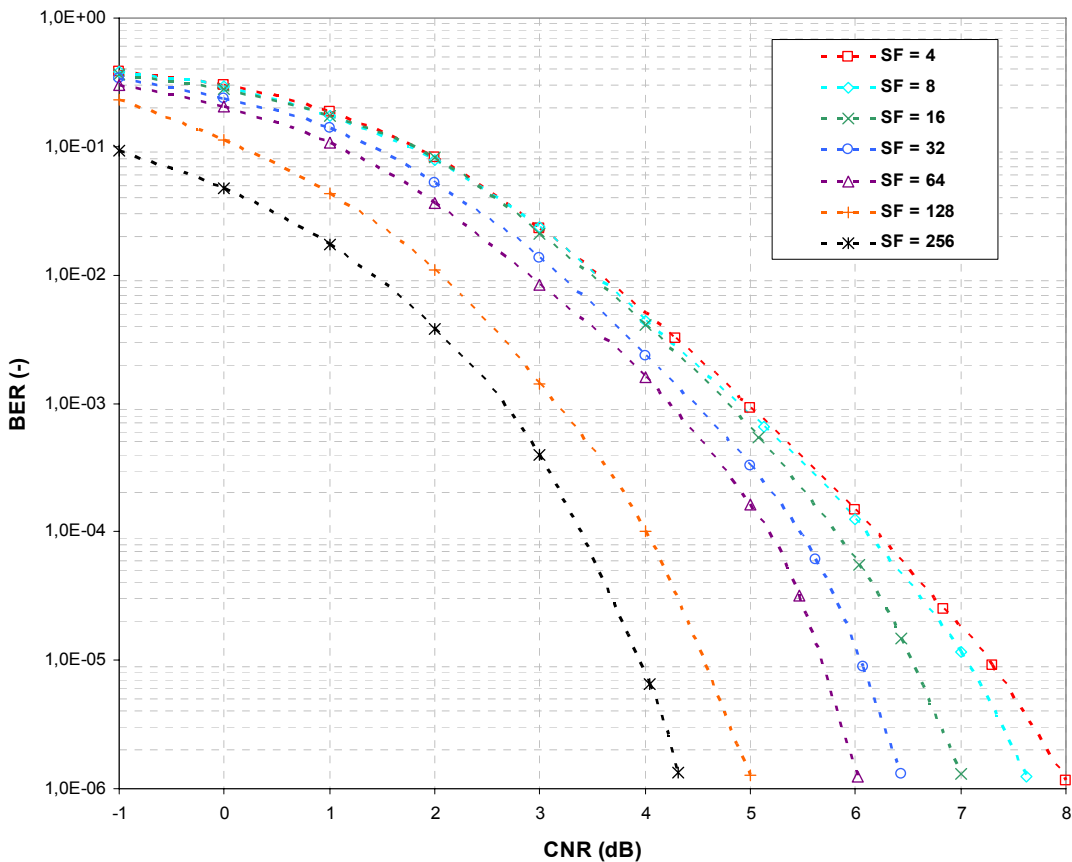


Obr. 3.11. Závislost BER na poměru E_b/N_0 pro různé kódové poměry, činitel rozptření SF = 256, 150000 přenesených bitů.

Z obrázků 3.5 až 3.11 je patrný vliv činitele rozptření i kanálového kódování – čím větší SF, tím menší chybovost, ale zároveň menší dosažená přenosová rychlost a naopak. Kanálové kódování zpočátku zvyšuje chybovost BER, ale pro větší poměr E_b/N_0 vykazuje významné zlepšení chybovosti přijatého signálu oproti nezabezpečenému signálu. Samozřejmě platí, že kódový poměr 1/3 vykazuje lepší zabezpečení než 1/2, avšak jeho nevýhodou je snížení uživatelské bitové rychlosti.

Rozdíl mezi dosaženými poměry E_b/N_0 při použití největšího činitele rozptření SF = 256 a nejmenšího SF = 4 a pro kódový poměr 1/3 je 2,5 dB (jako referenční BER je uvažována hodnota 10^{-3}) a 4 dB pro BER = 10^{-6} . Pro kódový poměr 1/2 je rozdíl cca 1,7 dB pro BER = 10^{-3} a pro nekódovaný signál je rozdíl v chybovosti ($E_b/N_0 = 10$ dB) při použití SF = 256 a SF = 4 přibližně jeden řád [33].

Srovnání všech činitelů rozptření a vybraného kódového poměru 1/3 je pro ilustraci uvedeno na obr. 3.12. Můžeme pozorovat vliv činitele rozptření na BER – čím vyšší SF, tím je potřeba pro dosažení určité chybovosti menší hodnota E_b/N_0 . Lze tedy vysílat s menším výkonem nebo při stejném výkonu pokrýt větší území. Z hlediska uživatele je však nevýhodou menší přenosová rychlost. Rozdíly poměru E_b/N_0 mezi jednotlivými SF jsou pro stejnou referenční chybovost (10^{-6} po kanálovém dekódování) cca 0,5 dB [43]. Zisk SF 256 oproti SF 4 pro referenční chybovost 10^{-6} je cca 3,7 dB. Pro srovnání se systémem GSM - EDGE byly hodnoty E_b/N_0 v obr. 3.12 přepočteny na CNR (rozdíly v dB zůstaly logicky zachovány) [43].



Obr. 3.12. Srovnání bitové chybovosti BER v závislosti na poměru CNR pro všechny činitele rozptření, kódový poměr 1/3, 1000 přenesených rámců.

Shrnutí poměrů E_b/N_0 pro dosažení referenční chybovosti 10^{-6} :

SF 256	»	5,3 dB
SF 128	»	6,0 dB
SF 64	»	7,0 dB
SF 32	»	7,4 dB
SF 16	»	8,0 dB
SF 8	»	8,6 dB
SF 4	»	9,0 dB

3.3 Zhodnocení

V této kapitole byly uvedeny výsledky simulací fyzické vrstvy systému GSM – EDGE pro kanál AWGN a pro únikový kanál typu Rice, a systému UMTS pro kanál AWGN. Pro tento systém byl navíc zkoumán vliv kanálového kódování. Všechny získané závislosti bitové chybovosti BER na poměru CNR (resp. E_b/N_0) byly sestaveny do grafů na obr. 3.1 až 3.12.

U systému GSM –EDGE byly odečteny zisky kódováním mezi jednotlivými kódovými schémata MCS pro referenční chybovost $BER = 10^{-6}$. Dále bylo vyvozeno, že pro únikový kanál je potřeba uvažovat 3 dB výkonovou rezervu oproti statickému kanálu AWGN.

Pro systém UMTS byly odečteny rovněž zisky kódováním mezi jednotlivými činiteli rozptřeni (SF) pro referenční chybovost $BER = 10^{-6}$. Byl pozorován významný vliv činitele rozptřeni i kanálového kódování. Ověřeným výsledkem je kompromis mezi přenosovou rychlostí a potřebnou bitovou chybovostí pro dané konkrétní podmínky na kanálu.

4 Koexistence systémů

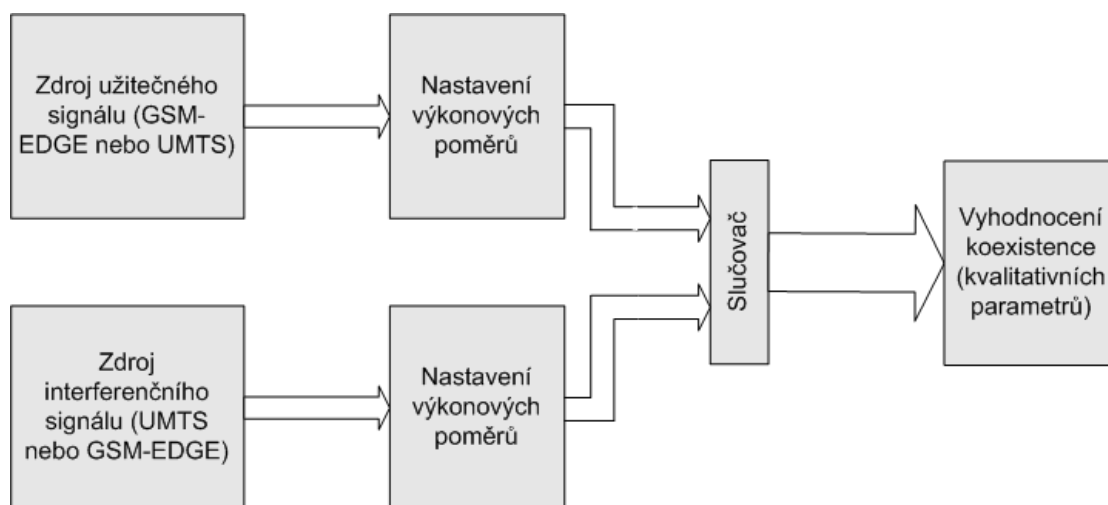
V této kapitole bude rozebrána základní koncepce pro modelování a simulaci koexistence systémů GSM – EDGE a UMTS ve společném pásmu. Následně budou rozlišeny dva případy – simulace v základním pásmu a simulace rušení ze sousedního kanálu. V prvním případě nebude ani jeden signál modulován na nosnou vlnu. Účelem bude vyšetření tzv. „co-channel interference“, tedy interference ve stejném kanálu. V druhém případě bude jeden ze signálů posunut (modulován) do sousedního kanálu za účelem vyšetření tzv. „adjacent channel interference“, tedy rušení ze sousedního kanálu. Parametrem bude v tomto případě vzdálenost nosných a její vliv na izolaci ACP.

4.1 Koncepce pro simulaci koexistence GSM – EDGE a UMTS

Vlastní vyhodnocení koexistence obou systémů bude provedeno dvěma způsoby.

- 1) Základní pásmo – signály obou systémů nebudou modulovány na nosnou vlnu, jedná se o nejhorší případ, kdy se budou systémy nejvíce ovlivňovat.
- 2) Rušení ze sousedního kanálu ACI (Adjacent Channel Interference) – signál systému UMTS zůstane zachován v základním pásmu, signál systému GSM - EDGE bude modulován kvadraturním modulátorem na nosnou vlnu do sousedního kanálu, proměnným parametrem bude vzdálenost signálu GSM - EDGE od nulového kmitočtu signálu UMTS a rozdíl výkonů obou signálů.

Tento případ byl zvolen z důvodu výpočetní náročnosti simulace s ohledem na použitý hardware (kapacita paměti RAM). Zkoumání koexistence v rádiovém pásmu není možné, protože dostupná výpočetní technika a softwarové vybavení neumožňuje uložit proměnné řádově s 10^9 vzorky.



Obr. 4.1. Obecná koncepce pro vyhodnocení koexistence systémů.

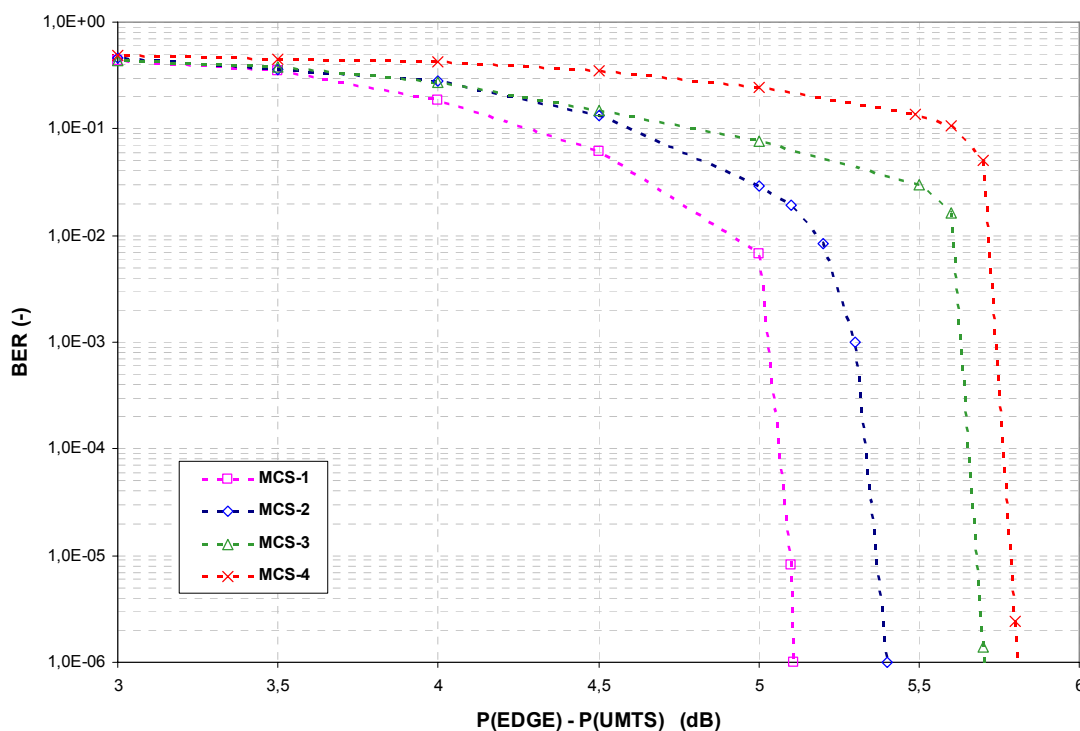
Koexistence bude vyhodnocena způsobem znázorněným na obr. 4.1. Užitečný signál GSM-EDGE (resp.UMTS) bude výkonově upraven a sloučen s interferujícím signálem UMTS (resp. GSM-EDGE), který bude rovněž výkonově upraven a to v široké škále poměrů výkonů signálů obou systémů. Následně budou oba signály sloučeny a přenášeny přes společný kanál. Na konci tohoto řetězce proběhne analýza přijatých signálů a budou vyhodnoceny kvalitativní parametry. Na základě tohoto vyhodnocení se stanoví závěry, které budou poté ověřeny experimentálním měřením (viz kapitola 5).

4.2 Simulace v základním pásmu

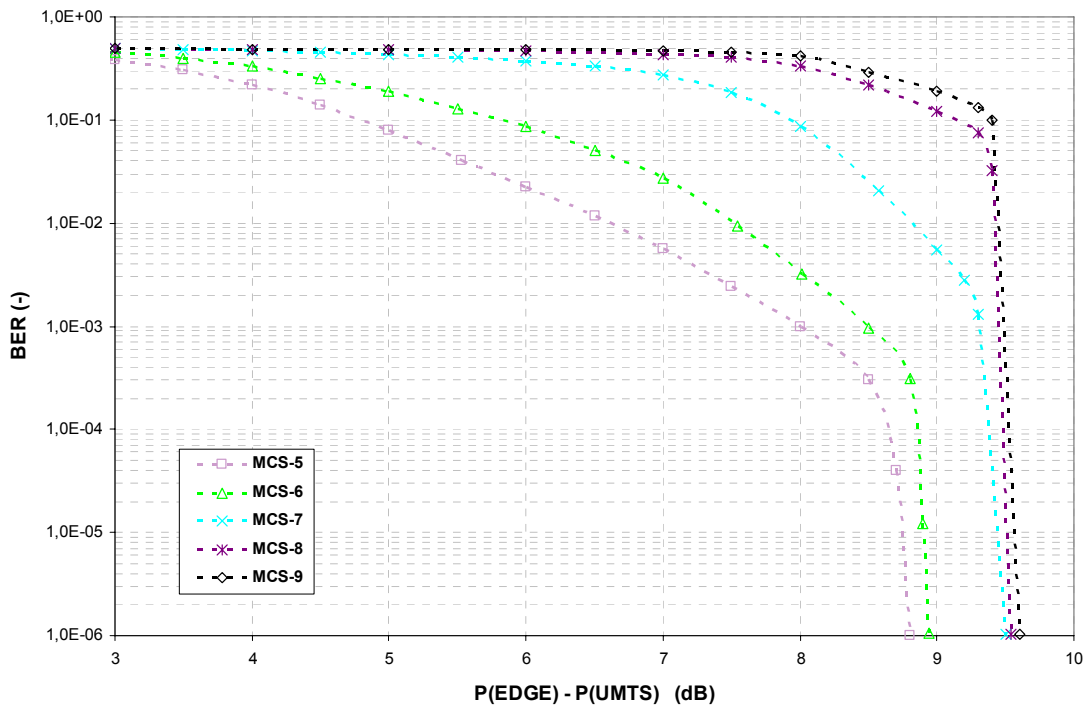
V prvním případě byl uvažován jako užitečný úzkopásmový signál GSM-EDGE a jako interferenční širokopásmový signál UMTS. Další rušení z vlastního systému (*intra-system interference*) nebo jiným druhem rušení (*inter-system interference*) nebyla uvažována – viz obr. 4.1.

Pro všechna kódovací schémata EDGE bylo přeneseno 1000 rámců na společném kanálu s rušícím signálem UMTS (použitý SF = 256). Zkoumaný rozdíl úrovní obou systémů $P_{EDGE} - P_{UMTS}$ byl v rozsahu 0 – 10 dB. Dosažené výsledky jsou zobrazeny pro schémata MCS-1 až MCS-4 a modulaci GMSK na obr. 4.2, pro schémata MCS-5 až MCS-9 a modulaci 8-PSK na obr. 4.3. K prudkému snižování BER dochází od 5 dB pro nejnižší kódovací schémata až po 9,5 dB pro nejvyšší kódovací schémata.

Zisk kódového schématu MCS-1 oproti MCS-9 pro chybovost 10^{-6} : 4,5 dB.



Obr. 4.2. Závislost bitové chybovosti BER na rozdílu úrovní užitečného signálu GSM-EDGE (MCS-1 až MCS-4) a rušícího signálu UMTS.



Obr. 4.3. Závislost bitové chybovosti BER na rozdílu úrovní užitečného signálu GSM-EDGE (MCS-5 až MCS-9) a rušícího signálu UMTS.

Rozdíl úrovní signálů $P_{EDGE} - P_{UMTS}$ pro dosažení chybovosti 10^{-6} :

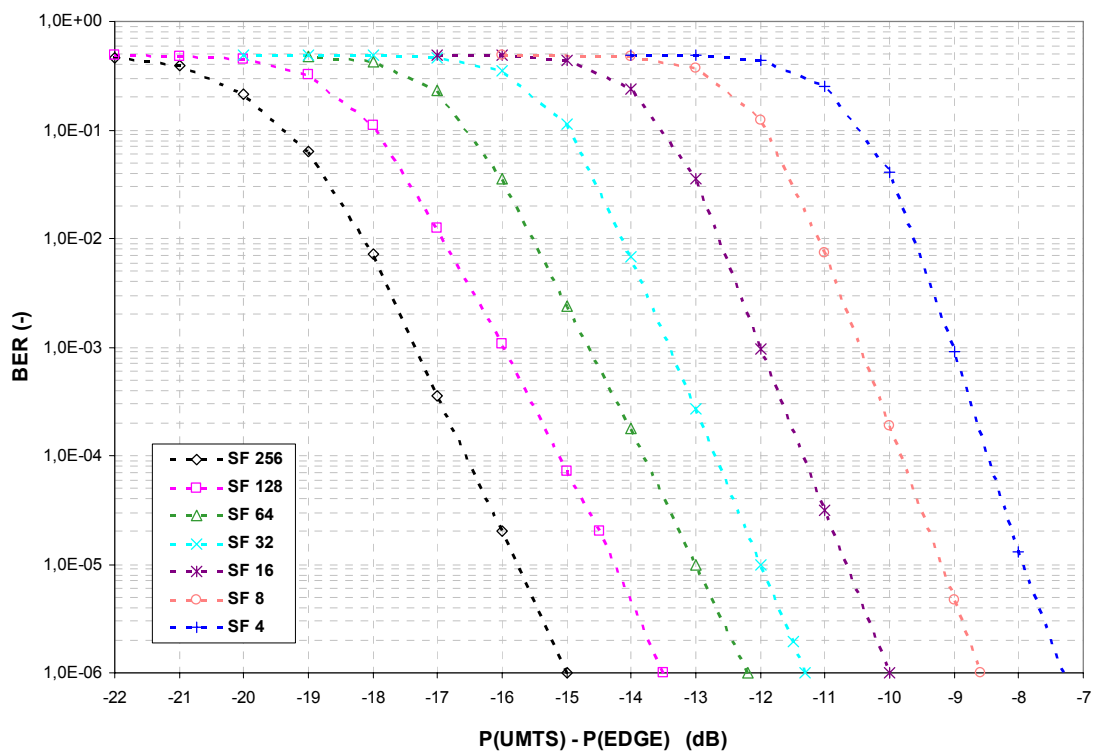
MCS-1	»	5,1 dB
MCS-2	»	5,4 dB
MCS-3	»	5,7 dB
MCS-4	»	5,8 dB
MCS-5	»	8,8 dB
MCS-6	»	8,9 dB
MCS-7	»	9,5 dB
MCS-8	»	9,5 dB
MCS-9	»	9,6 dB

Opět je viditelný rozdíl ve výkonovém odstupu mezi modulacemi GMSK a 8-PSK, stejně jako v kapitole 3.1, a dále podobnost průběhů schémat MCS-5,6 a MCS-7,8,9 díky rozdílům v kódování (jiné zpracování RLC bloků – větší zabezpečení a menší vytečkování u 5 a 6) [58].

V druhém případě byl uvažován jako užitečný širokopásmový signál UMTS a jako interferenční úzkopásmový signál GSM-EDGE (obr. 4.1). Další rušení nebyla uvažována stejně jako v předchozím případě.

Pro všechny činitele rozprostření systému UMTS proběhl přenos 1000 rámců na společném kanálu s rušícím signálem GSM-EDGE (použité kódovací schéma MCS-1). Zkoumaný rozdíl úrovní signálů $P_{UMTS} - P_{EDGE}$ byl v rozsahu -25 až -5 dB. Dosažené výsledky jsou zobrazeny na obr. 4.4. K prudkému snižování BER dochází od -20 dB pro nejvyšší SF = 256 až po -10 dB pro nejnižší SF = 4.

Zisk činitele rozprostření SF = 256 oproti SF = 4 pro chybovost 10^{-6} : 7,7 dB.



Obr. 4.4. Závislost bitové chybovosti BER na rozdílu úrovní užitečného signálu UMTS (SF 4 až SF 256) a rušícího signálu GSM-EDGE.

Rozdíly úrovní signálů $P_{UMTS} - P_{EDGE}$ pro dosažení chybovosti 10^{-6} [58]:

SF 256	»	- 15,0 dB
SF 128	»	- 13,5 dB
SF 64	»	- 12,2 dB
SF 32	»	- 11,3 dB
SF 16	»	- 10,0 dB
SF 8	»	- 8,6 dB
SF 4	»	- 7,3 dB

Srovnání s teoretickým ziskem kódování vypočteným podle vztahu

$$G = 10 \log(SF), \quad (4.1)$$

kde SF je činitel rozprostření, je uvedeno v tabulce 4.1.

Tab. 4.1. Kódový zisk.

SF	G (dB)
256	24
128	21
64	18
32	15
16	12
8	9
4	6

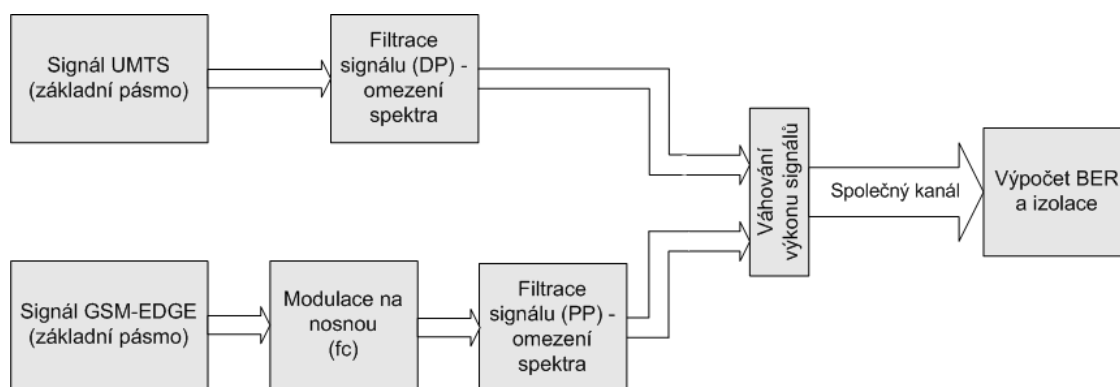
4.3 Simulace rušení ze sousedního kanálu

Simulace rušení ze sousedního kanálu (Adjacent Channel Interference) byla provedena za účelem srovnání s naměřenými hodnotami, které jsou uvedeny v kapitole 5. Hlavním parametrem, získaným ze simulací, byla hodnota izolace ACP mezi sousedními kanály, kdy signál systému UMTS byl uvažován jako užitečný a signál systému GSM-EDGE byl uvažován jako interferenční. Následně byly ze simulací sestaveny charakteristiky závislosti bitové chybovosti BER na rozdílu úrovní signálů $P(\text{EDGE}) - P(\text{UMTS})$ v dB, parametrem byla vzdálenost nosných.

Simulace opačného stavu, kdy signál systému UMTS byl uvažován jako interferenční a signál systému GSM – EDGE jako užitečný, nebyly provedeny. Měření totiž ukázala, že hodnoty izolací ACP jsou téměř stejné pro minimální doporučenou vzdálenost 2,4 MHz a vyšší jako pro předchozí případ [52].

Jelikož simulace signálů na nosných kmitočtech řádově v MHz není možná z důvodů velké náročnosti na paměť RAM, byly šířky pásem obou signálů zmenšeny ve stejném poměru 1:100 a stejně tak vzdálenost nosných byla ve stejném měřítku zmenšena. Šířka pásma signálu UMTS byla tedy zmenšena z 5 MHz na 50 kHz a šířka pásma signálu GSM byla zmenšena z 200 kHz na 2 kHz. Vzdálenost nosných byla v rozmezí 24 – 30 kHz (původně 2,4 – 3 MHz). Poměrné energie obou signálů tak zůstaly zachovány.

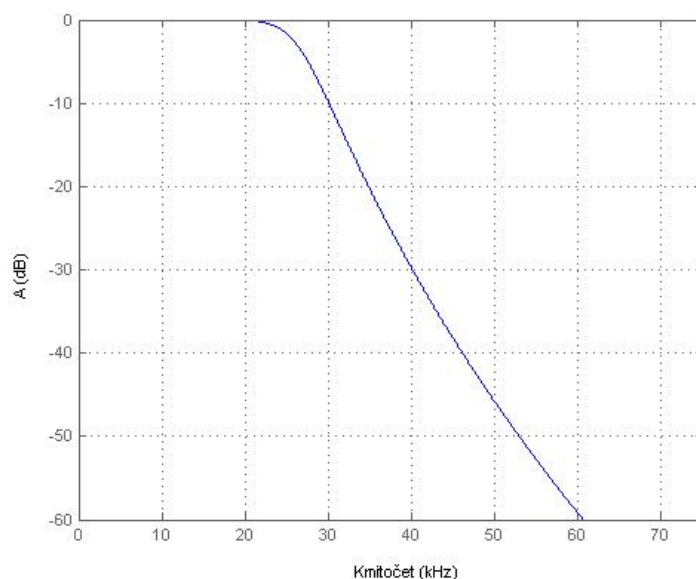
Postup zpracování signálů v simulacích byl následující (viz obr. 4.5): signál systému UMTS byl zpracován dle kapitoly 2.4.3, zůstal však zachován v základním pásmu a spektrum signálu z vysílače bylo omezeno výstupním filtrem typu dolní propust (DP) s mezním kmitočtem 25 kHz (polovina šířky pásma signálu UMTS 1:100). Amplitudová charakteristika použitého filtru je na obr. 4.6. Kanálové kódování a další zabezpečení nebylo provedeno, protože bylo potřeba získat jen hrubou bitovou chybovost BER fyzické vrstvy (pro srovnání s měřenými hodnotami, kde lze měřit pouze hrubou bitovou chybovost). Signál systému GSM - EDGE byl zpracován podle kapitoly 2.3.2, zabezpečení bylo v tomto případě rovněž irelevantní. Následně byl tento signál modulován kvadraturním modulátorem na nosnou vlnu do sousedního kanálu, kde proměnným parametrem byla vzdálenost nosné signálu GSM - EDGE od nulového kmitočtu signálu UMTS a rozdíl úrovní obou signálů. Výstupní signál z vysílače GSM byl rovněž filtrován a to filtrem typu pásmová propust (PP) se středním kmitočtem rovným vzdálenosti nosných mezi signály, potlačením 30 dB pro šířku pásma 2 kHz a 60 dB pro šířku pásma 4 kHz. Amplitudová charakteristika je zobrazena na obr. 4.7.



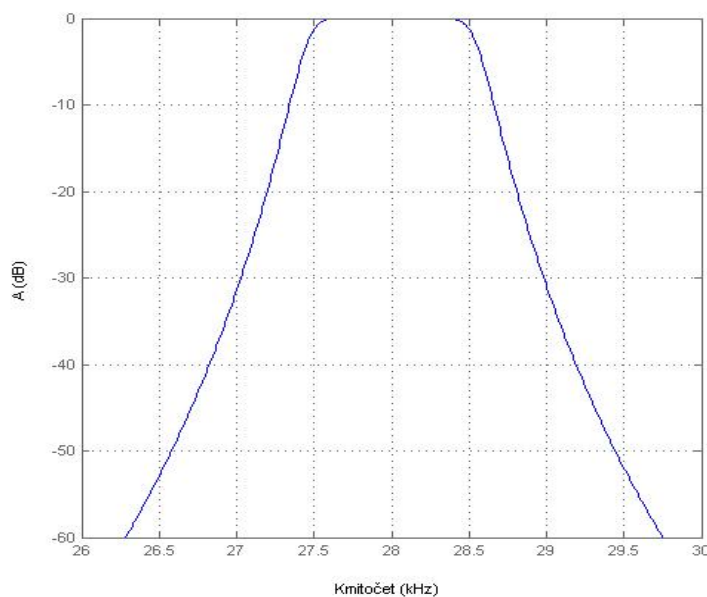
Obr. 4.5. Blokové schéma simulace pro vyhodnocení ACI.

4 KOEXISTENCE SYSTÉMŮ

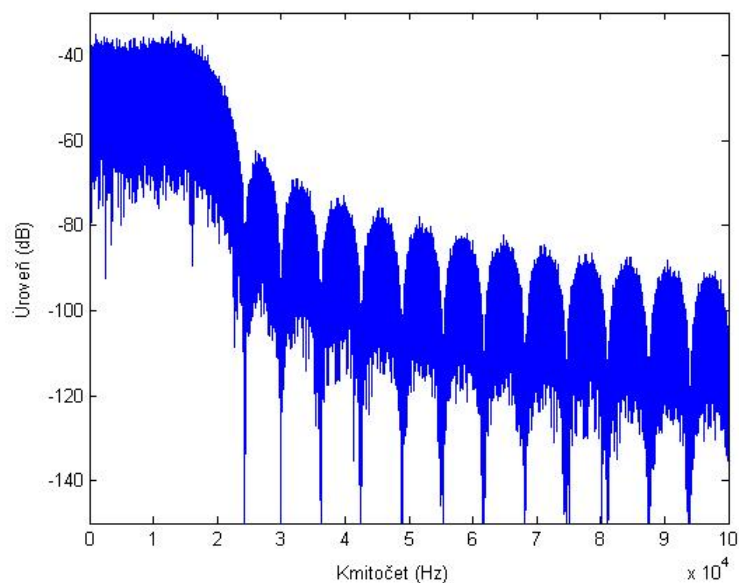
Uvedené filtry byly použity za účelem dodržení tzv. výkonové toleranční masky vysílače (omezení prosakování energie signálu do sousedních kanálů [28], [32]). Obr. 4.8 až 4.11 zobrazují pro ilustrační účely spektra nefiltrovaných i filtrovaných výstupních signálů z vysílačů obou systémů. Po filtraci jsou signály obou systémů výkonově váhovány, sečteny vzorek po vzorku a přenášeny po společném kanálu bez dalšího rušení. Na vstupu přijímače UMTS je tedy aditivní směs obou signálů, užitečného UMTS a interferenčního GSM - EDGE. Užitečný signál je získán filtrací vstupním filtrem typu RRC, deskramblováním, derozprostřením, integrací a následnou komparací. Bitová chybovost BER je získána srovnáním přijatého signálů s originálními daty vysílače. Pro BER 10^{-3} je odečtena hodnota izolace mezi sousedními kanály ACP.



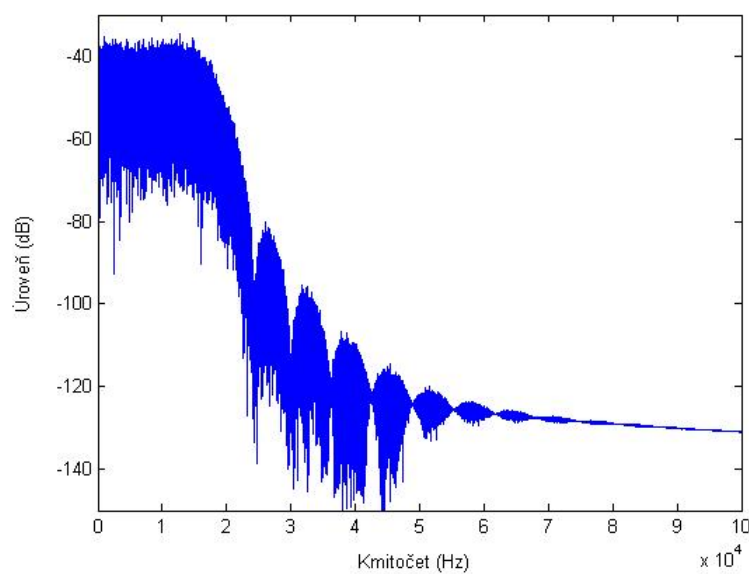
Obr. 4.6. Amplitudová charakteristika filtru DP s mezním kmitočtem 25 kHz pro signál UMTS.



Obr. 4.7. Amplitudová charakteristika filtru PP se středním kmitočtem 28 kHz pro signál GSM - EDGE.



Obr. 4.8. Spektrum signálu UMTS před filtrací.

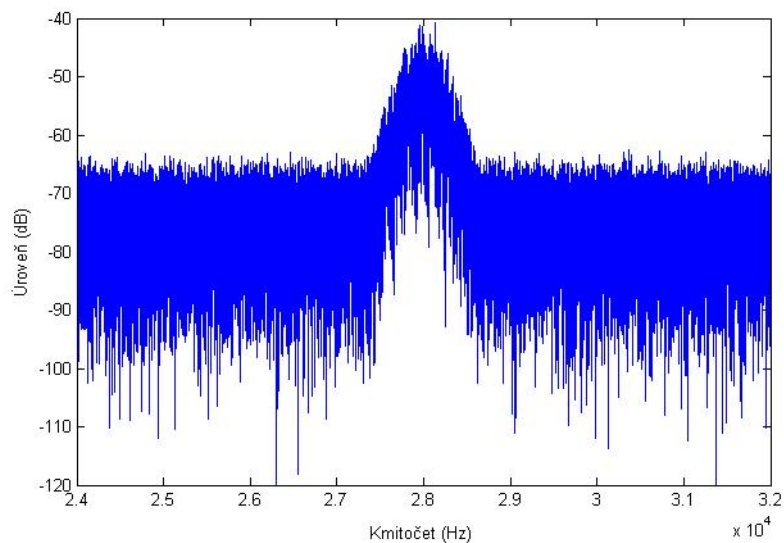


Obr. 4.9. Spektrum signálu UMTS po filtraci DP.

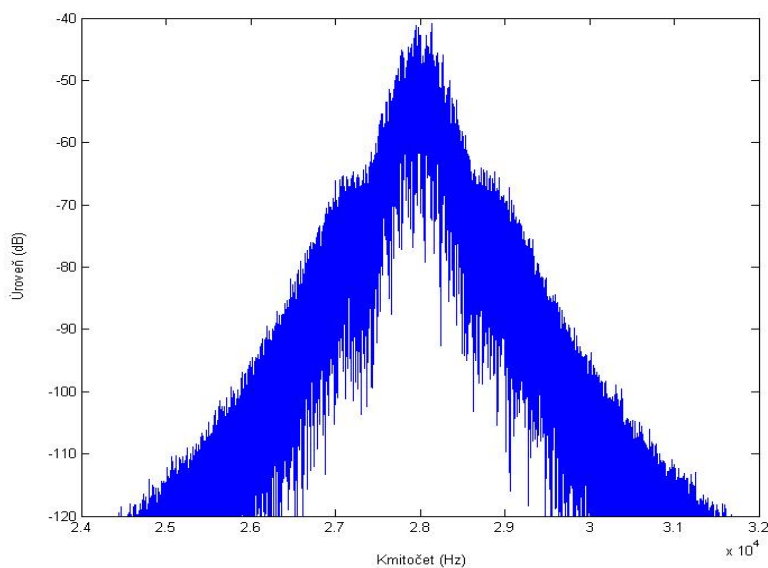
Hodnoty izolací byly odečteny z obr. 4.13 až 4.16 pro referenční bitovou chybovost $BER = 10^{-3}$.

Tab. 4.2. Hodnoty izolací sousedních kanálů, rušení systému UMTS systémem GSM (simulace).

Vzdálenost nosných (kHz)	24	26	28	30
ACP (dB), $BER < 10^{-3}$, 12,2 kb/s	28	42	45	67
ACP (dB), $BER < 10^{-3}$, 64 kb/s	25	33	38	52
ACP (dB), $BER < 10^{-3}$, 144 kb/s	22	31	34	53
ACP (dB), $BER < 10^{-3}$, 384 kb/s	18	27	30	53



Obr. 4.10. Spektrum signálu GSM - EDGE před filtrací.

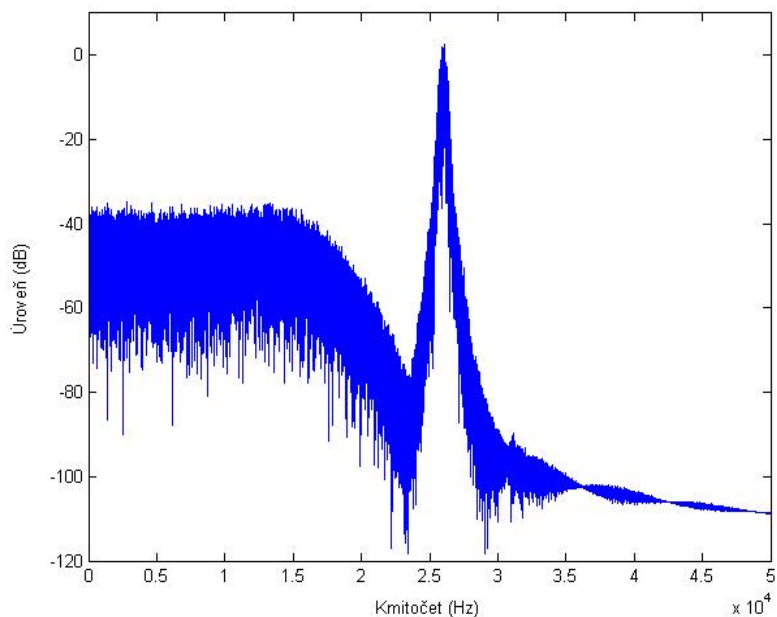


Obr. 4.11. Spektrum signálu GSM - EDGE po filtraci PP (střední kmitočet 28 kHz).

Pro vzdálenost nosných 30 kHz a více je izolace přibližně stejná, zisk kódováním signálu UMTS nemá vliv na izolaci, pouze prosakování energie signálu z vysílače do sousedních kanálů. Pro menší vzdálenosti nosných hraje zisk kódováním roli, rozdíl mezi referenčními kanály je cca v rozmezí rozdílů zisků kódováním jednotlivých přenosových rychlostí v dB (viz (4.2)) – rozdíl mezi 64 kb/s a 12,2 kb/s v průměru cca 6,5 dB (teoreticky 7 dB), rozdíl mezi 144 kb/s a 64 kb/s cca 3 dB (teoreticky 3,5 dB), rozdíl mezi 384 kb/s a 144 kb/s v průměru cca 4 dB (teoreticky také 4 dB).

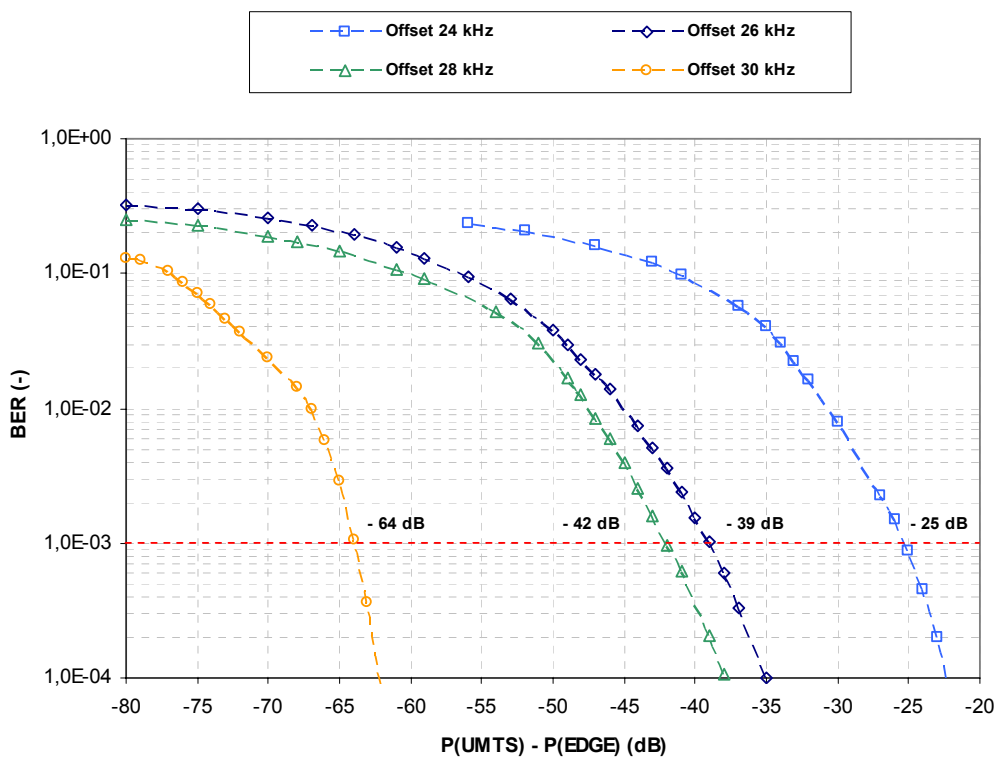
$$TG = G_1 - G_2 = 10 \log(R_{b1} / R_{b2}), \quad (4.2)$$

kde R_{b1} a R_{b2} jsou uživatelské bitové rychlosti v referenčním kanálu.



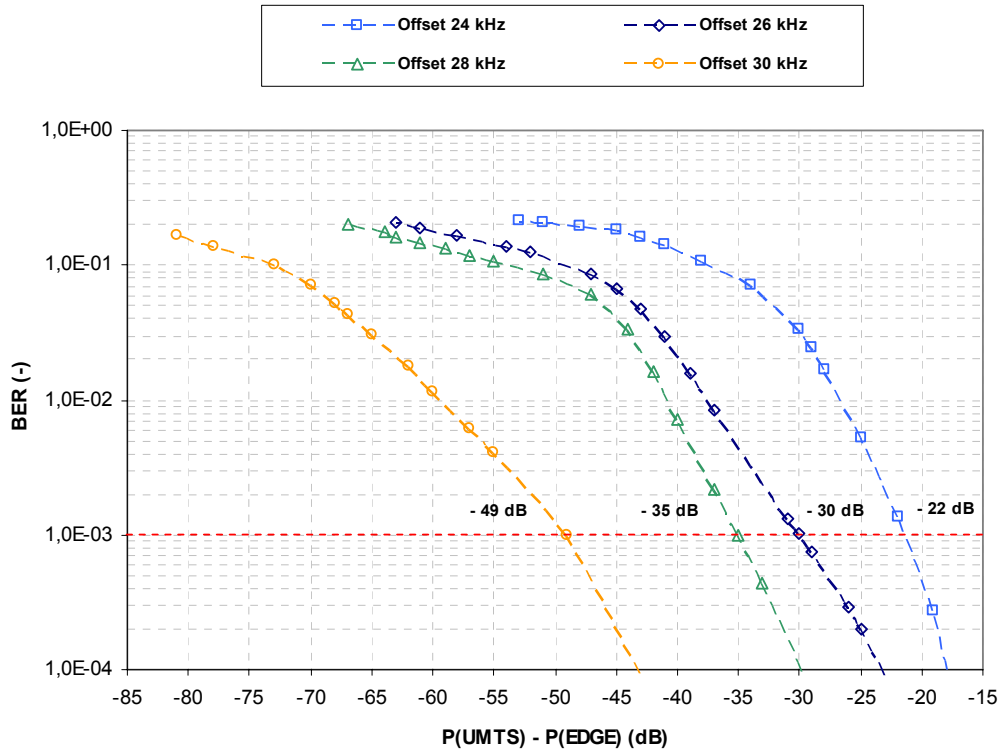
Obr. 4.12. Společné spektrum obou systémů získané simulací, vzdálenost nosných 26 kHz, rozdíl úrovní signálů cca 42 dB.

Hodnoty v grafech na obr. 4.13 až 4.16 byly získány rozdílem špičkových hodnot úrovní signálů UMTS a GSM, v tabulce 4.2 jsou uvedeny hodnoty izolací ACP o 3 dB menší (vznikly průměrem na celou šířku pásma signálů).

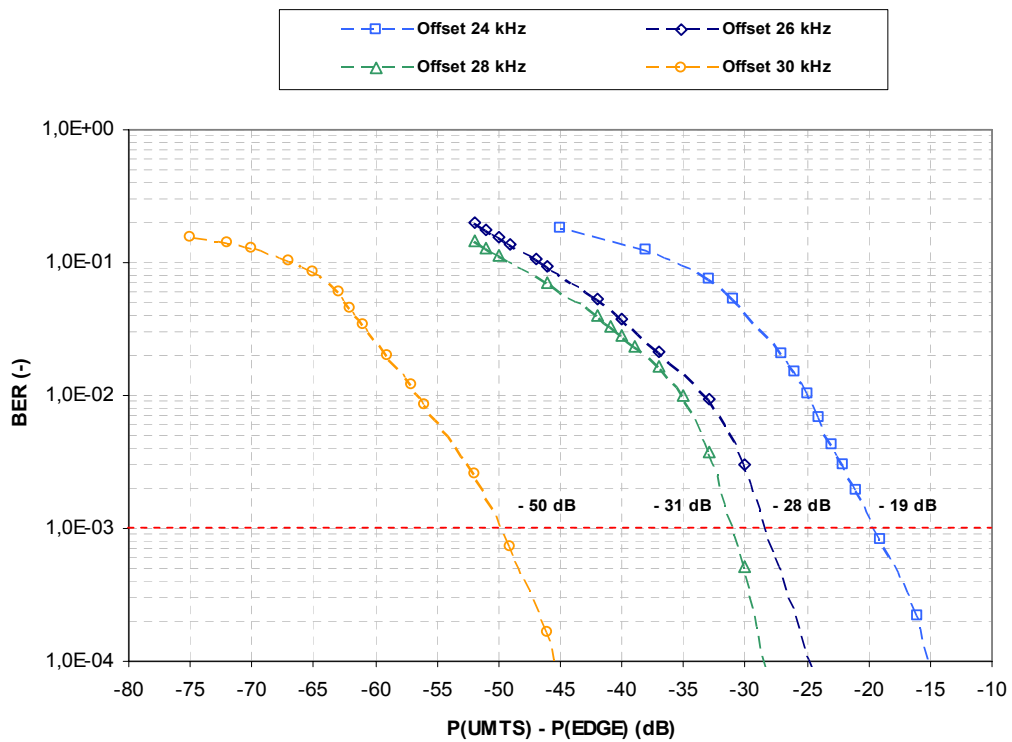


Obr. 4.13. Závislost bitové chybovosti BER na rozdílu úrovní užitečného signálu UMTS (referenční kanál 12,2 kb/s) a rušícího signálu GSM-EDGE a na vzdálenosti nosných.

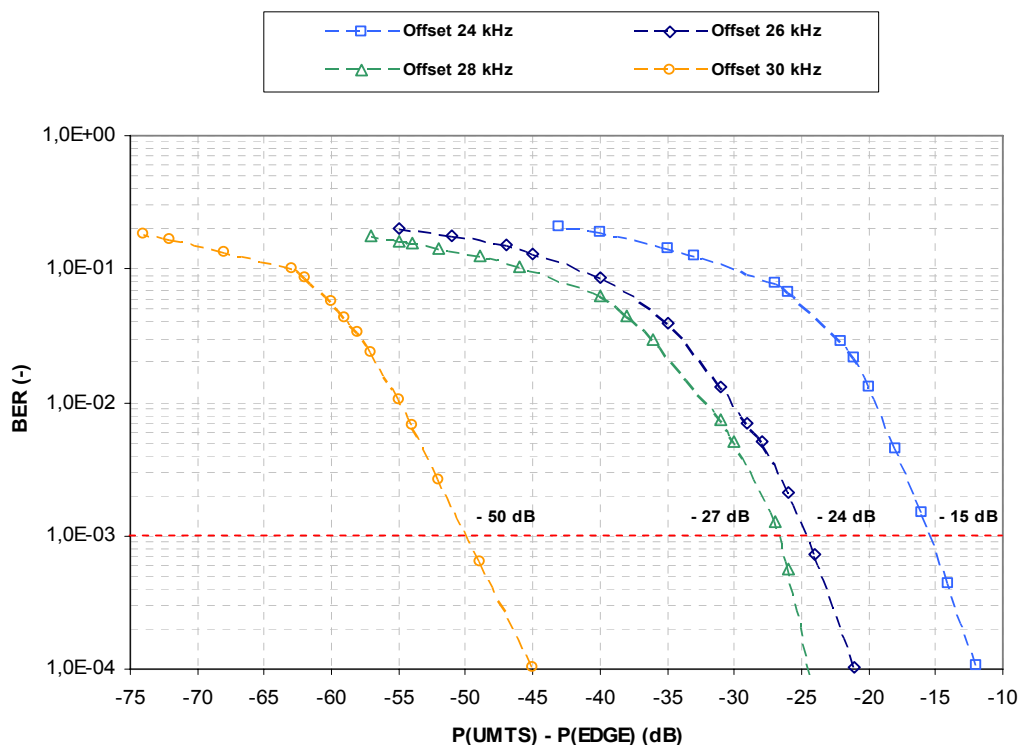
4 KOEXISTENCE SYSTÉMŮ



Obr. 4.14. Závislost bitové chybovosti BER na rozdílu úrovní užitečného signálu UMTS (referenční kanál 64 kb/s) a rušícího signálu GSM-EDGE a na vzdálenosti nosných.



Obr. 4.15. Závislost bitové chybovosti BER na rozdílu úrovní užitečného signálu UMTS (referenční kanál 144 kb/s) a rušícího signálu GSM-EDGE a na vzdálenosti nosných.



Obr. 4.16. Závislost bitové chybovosti BER na rozdílu úrovní užitečného signálu UMTS (referenční kanál 384 kb/s) a rušícího signálu GSM-EDGE a na vzdálenosti nosných.

Hodnoty potřebných izolací jsou tedy závislé jak na vzdálenosti nosných, tak na kódovém zisku. Pro menší vzdálenosti nosných je vhodné použít kanály s menší uživatelskou bitovou rychlostí a větším kódovým ziskem, protože se projevuje vyšší úroveň interferenčního signálu (prosakování) ze sousedního kanálu. Pro větší vzdálenosti nosných je možné použít kanály s vyšší uživatelskou bitovou rychlostí, protože úroveň signálu ze sousedního kanálu má menší hodnotu.

4.4 Zhodnocení

V této kapitole byly popsány výsledky provedených simulací koexistence systémů GSM – EDGE a UMTS ve společném pásmu. V rámci dostupné výpočetní techniky byly vyhodnoceny dva případy – simulace v základním pásmu a simulace rušení ze sousedního kanálu.

Simulace v základním pásmu ukazují potřebný poměr CNR (resp. E_b/N_0) při rušení signálem ve stejném kanálu (na stejné nosné). Úzkopásmový signál GSM – EDGE potřebuje poměr CNR v rozmezí 5,1 až 9,6 dB (dle MCS). Širokopásmový signál UMTS potřebuje poměr E_b/N_0 v rozmezí -7,3 až -15 dB. Je tedy patrný vliv odolnosti signálu díky rozprostření (kódový zisk).

Simulace rušení ze sousedního kanálu ACI byla provedena za účelem získání hodnot izolací ACP mezi sousedními kanály, kdy signál systému UMTS byl uvažován jako užitečný a signál systému GSM-EDGE byl uvažován jako interferenční. Výsledky slouží ke srovnání s naměřenými hodnotami izolací v následující kapitole. Významně patrná je závislost ACP na vzdálenosti nosných a na kódovém zisku.

5 Ověření výsledků v laboratorním prostředí

Řešení popsaná v předchozích kapitolách byly v rámci dostupných prostředků ověřeny experimentálním měřením v laboratoři. Dosažené výsledky jsou dále srovnány s výsledky dosaženými simulacemi a jsou uvedena opatření pro koexistenci systémů GSM-EDGE a UMTS ve společném pásmu.

5.1 Zapojení pracoviště pro experimentální měření

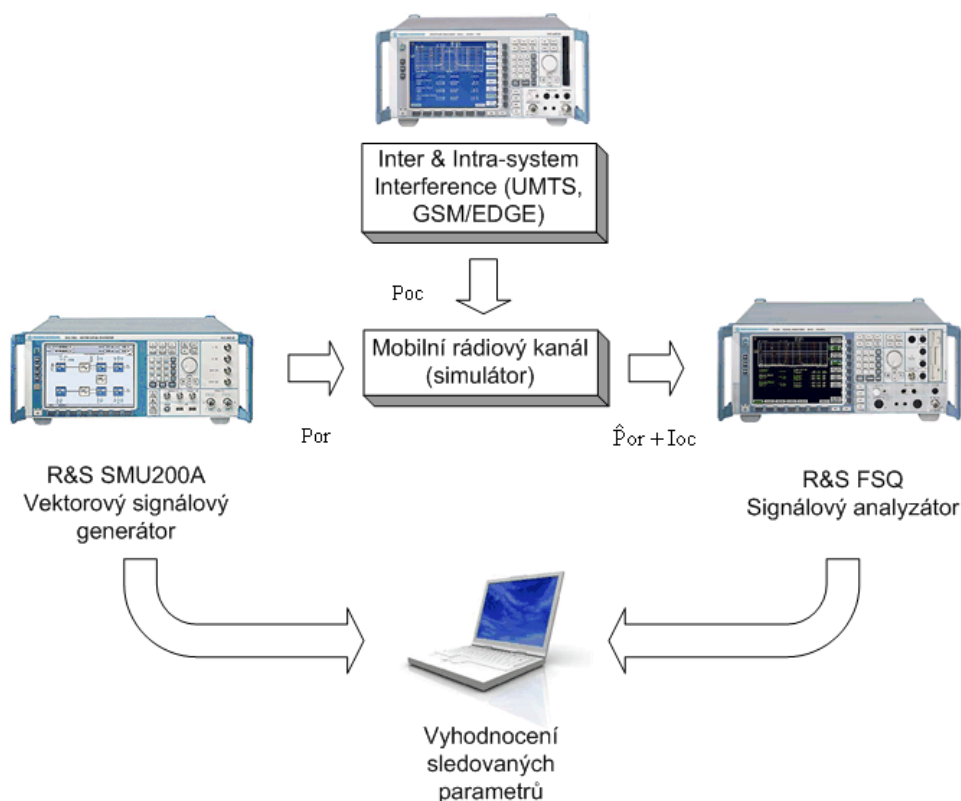
Je velmi důležité rozlišovat měření v laboratorních podmínkách a měření prováděné na základnové stanici v provozu přímo v terénu. V laboratoři máme jasně stanovené pevné testovací podmínky, chování rádiového kanálu je simulováno deterministicky. Tento způsob je vhodný potřebujeme-li postupy pro opakované testování, zatímco při měření v reálné síti se projeví, zda-li systém pracuje opravdu správně a podle požadavků, a dále nám umožní síť monitorovat a dále optimalizovat. Tento způsob však vyžaduje přenosnou měřicí techniku a přímý přístup do sítě.

Experimentální měření a ověření výsledků získaných simulacemi budou provedena v laboratorních podmínkách. Měření v reálné mobilní síti není uskutečnitelné, protože síť UMTS-FDD v ČR provozuje pouze společnost Telefónica O2 Czech Republic, a.s. Přístup k jejím technologiím a možnost měření a nastavení potřebných parametrů není možný.

Schéma zapojení pracoviště pro ověření koexistence systémů GSM-EDGE a UMTS je uvedeno na obr. 5.1. Signálový generátor R&S SMU200A zastupuje užitečné vysílací zařízení, tj. UE na uplinku nebo BTS (resp. Node B) na downlinku. Všechny potřebné parametry i výstupní výkon budou nastaveny na samotném generátoru. Zdrojem interferencí byl další signálový generátor R&S SMIQ 02B. Rádiový kanál je simulován přímo na generátoru R&S SMU200A.

Užitečný i interferující signál budou sloučeny a vedeny pomocí společného kabelu k přijímači, před přijímačem a analyzátozem budou opět rozděleny. Signálový analyzátor R&S FSQ3 zastupuje přijímač užitečného signálu, tj. BTS (Node B) na uplinku nebo UE na downlinku. Vysílaný i přijímaný užitečný signál bude podroben analýze a poté se vyhodnotí kvalitativní parametry.

Pozn. Na obr. 5.1. je P_{or} výkon vysílaný mobilní stanicí, \hat{P}_{or} je výkon snižený o útlum rádiového kanálu, P_{oc} je výkon interferujících okolních MS v systému, celkový přijímaný výkon (bez uvažování tepelného šumu přijímače) je $P_o = \hat{P}_{or} + P_{oc}$.



Obr. 5.1. Zapojení pracoviště pro ověření a vyhodnocení koexistence systémů GSM - EDGE a UMTS.

5.2 Měření hlavních parametrů

Za účelem vytvoření reprodukovatelných testů je nutné stanovit testovací postupy. Systém UMTS nabízí spoustu variant podoby jeho signálů, které jsou závislé na použitém činiteli rozptřeni, počtu časových slotů, počtu použitých kódů apod. Proto byly definovány tzv. referenční měřicí kanály pro oba směry (DL a UL).

Prvním kanálem, který musí MS podporovat, je datový kanál o rychlosti 12,2 kb/s (pro hlasovou komunikaci). Další kanály, zejména pro přenos dat, mají bitovou uživatelskou rychlost 64, 144 a 384 kb/s. Přesné detaily parametrů fyzické vrstvy těchto kanálů jsou uvedeny v [32] a [44], přehledově je ukazuje tabulka 5.1.

Tab. 5.1. Testovací kanály systému UMTS (UL).

Parametr	Kanál 1	Kanál 2	Kanál 3	Kanál 4
Uživatelská rychlost	12,2 kb/s	64 kb/s	144 kb/s	384 kb/s
DPDCH	60 kb/s	240 kb/s	480 kb/s	960 kb/s
DPCCH	15 kb/s	15 kb/s	15 kb/s	15 kb/s
Činitel rozptřeni DPDCH/DPCCH	64/256	16/256	8/256	4/256

Testovací kanály pro systém GSM - EDGE nejsou definovány, proto bude použit signál rozlišený jen modulací (kanálové kódování a „puncturing“ nehraje roli), symbolová rychlost je konstantní a to 270,833 kS/s.

5.2.1 Požadavky na vysílač

Maximální výkon vysílače MS (UMTS) závisí na jeho třídě a je uveden v tab. 5.2. Minimální výkon vysílače je – 50 dBm, takže celkový dynamický rozsah je až 83 dB.

Tab. 5.2. Maximální vysílací výkon UE (UMTS) [32].

Třída	Úroveň (dBm)
1	33
2	27
3	24
4	21

U systému GSM je dynamický rozsah pouze 34 dB, minimální vysílací výkon je 5 dBm (pro pásmo 900 MHz) a 0 dBm (pro pásmo 1800 MHz), tab. 5.3. Dynamický rozsah přijímače UMTS je cca -25 až – 106 dBm, je tedy rovněž větší než 80 dB stejně jako u vysílače, a tyto rozsahy se dokonce překrývají v rozmezí 25 dB. U GSM je dynamický rozsah přijímače cca 60 dB, závisí na typu MS, minimální úroveň citlivosti je cca -104 dBm.

Tab. 5.3. Maximální vysílací výkon MS (GSM) [28].

Třída	Úroveň (dBm) GSM900	Úroveň (dBm) GSM1800
1	-----	30
2	39	24
3	37	-----
4	33	-----
5	29	-----

Jedním z důležitých faktorů je omezení spektra signálu, aby nezasahoval do sousedních pásem a nezpůsobil interference. Šířka spektra signálu UMTS je závislá především na chipové rychlosti, která je u tohoto systému 3,84 Mchip/s. Potřebná šířka pásma je tedy asi 3,84 MHz. Filtr RRC, který tvaruje impulzy v základním pásmu a potlačuje mezisymbolové interference ISI, zvyšuje tuto šířku pásma o 22% („roll-off“ faktor je roven 0,22) na cca 4,6 MHz. Vymezená šířka je podle standardů 5 MHz.

Šířka spektra signálu GSM - EDGE vychází ze symbolové rychlosti 270,833 kS/s a použitého Gaussova filtru (BT = 0,3), zabírá přibližně 400 kHz. Vzdálenost nosných sousedních kanálů je 200 kHz. Použitím vhodného filtru je však potlačení sousední nosné vzdálené o 200 kHz cca 30 dB a nosné vzdálené 400 kHz cca 60 dB.

V reálném systému však působí několik vlivů, které nám nedovolí vytvořit ideální signál s definovaným spektrem. Jsou to především nelineární prvky, které způsobují, že část energie signálu prosákne i do sousedních kanálů. Pro potřeby měření je tedy nutné ověřit i části výkonů signálů, které spadají do sousedních kanálů – tzv. ACLR (*Adjacent Channel Leakage Ratio*). Měří se výkon vztažený na dva sousední kanály (resp. na kmitočtech nosných dvou sousedních kanálů). Potlačení spektrálního výkonu pro BTS v kanálu vzdáleném o 5 MHz musí být více než 45 dB, v kanálu vzdáleném o 10 MHz

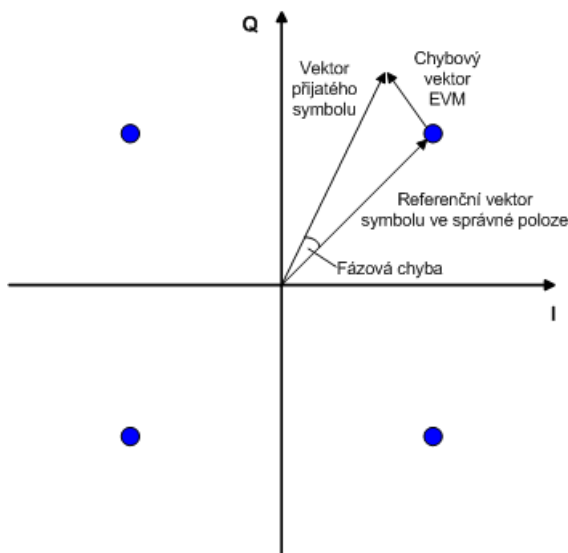
5 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ V LABORATORNÍM PROSTŘEDÍ

musí být toto potlačení větší než 50 dB. Parametry pro mobilní stanice jsou uvedeny v tab. 5.4. Dostatečný dynamický rozsah měřicího zařízení je tedy nezbytný.

Tab. 5.4. Limity ACLR pro MS [44].

Třída	Vzdálenost sousedního kanálu	Limit ACLR
1-4	± 5 MHz	33 dB
1-4	± 10 MHz	43 dB

Oba systémy GSM - EDGE i UMTS používají fázovou modulaci (GMSK a 8-PSK, resp. QPSK). Bitová chybovost se při měření na analyzátoch nahrazuje měřením tzv. chybového vektoru EVM (*Error Vector Magnitude*). V našem případě tedy nezměříme přímo BER, ale fázovou odchylku přijatého symbolu od jeho správné polohy v konstelačním diagramu (obr. 5.2).



Obr. 5.2. Konstelační diagram modulace QPSK, definice EVM.

EVM lze analyticky vyjádřit pomocí rovnice

$$EVM = \frac{|\vec{S}_{ch}|}{|\vec{S}_r|} = \frac{|\vec{S}_p - \vec{S}_r|}{|\vec{S}_r|}, \quad (5.1)$$

kde \vec{S}_r je referenční vektor, \vec{S}_p je vektor přijatého symbolu a \vec{S}_{ch} je chybový vektor. Pravděpodobnou bitovou chybovost BER musíme následně vypočítat ze změřeného vektoru EVM.

Chybovost lze vyjádřit pomocí chybové funkce [10]

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right), \quad x \geq 0. \quad (5.2)$$

Mezi parametry CNR (E_b/N_0) a EVM platí dále vztah

$$CNR = \frac{1}{EVM^2}. \quad (5.3)$$

Pro výpočet chybovosti modulace QPSK a GMSK platí vztah

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}}{\sqrt{2}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{EVM} \right). \quad (5.4)$$

Pro výpočet chybovosti modulace 8-PSK platí následující vztah

$$\begin{aligned} BER &= \frac{2}{2n} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\frac{2nE_b}{N_0}} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right)}{\sqrt{2}} \right) = \frac{2}{2 \cdot 3} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{\frac{2 \cdot 3E_b}{N_0}} \sin\left(\frac{\pi}{8}\right)}{\sqrt{2}} \right) = \\ &= \frac{1}{3} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{3} \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) \frac{1}{EVM} \right), \end{aligned} \quad (5.5)$$

kde $n = \log_2 M$, M je počet stavů modulace.

Shrnutí nutných měření vysílače:

- EVM, konstelační diagram,
- celkový vysílaný a přijímaný výkon (musí splnit podmínky dané tab. 5.2 a 5.3),
- šířka pásma signálu,
- „prosáknutí“ výkonu do sousedních kanálů (ACLR).

5.2.2 Požadavky na přijímač

U přijímače musíme zajistit spolehlivou práci v definovaném rozmezí vstupních výkonů. Úroveň tepelného šumu na vstupu přijímače je definována jako

$$N = kTB = N_0 B, \quad (5.6)$$

kde k je Boltzmannova konstanta, T je teplota okolí v Kelvinech a B je šumová šířka pásma. Po přepočtu do logaritmického měřítka (dB) a při teplotě $T = 290$ K dostáváme $N_0 = -173,8$ dBm/Hz, je-li $B = 3,84$ MHz (UMTS), pak

$$N = N_0 + 10 \log(3,84 \cdot 10^6) = -173,8 + 65,8 = -108 \text{ dBm}. \quad (5.7)$$

Maximální povolená vstupní úroveň je -25 dBm.

Pro systém GSM - EDGE, kde $B = 200$ kHz, dostáváme minimální spektrální úroveň šumu na vstupu přijímače

$$N = N_0 + 10 \log(2 \cdot 10^5) = -173,8 + 53 = -120,8 \text{ dBm}. \quad (5.8)$$

Jak již bylo zmíněno výše, citlivost přijímače GSM - EDGE je -104 dBm a leží tak nad touto minimální spektrální úrovní šumu. Maximální povolená vstupní úroveň je cca -40 dBm.

Další požadovanou vlastností je selektivita přijímače (ACS – *Adjacent Channel Selectivity*) a potlačení okolních pásem, jinými slovy je nutné zjistit, jak je ovlivněna kvalita přenosu signálu, je-li v sousedních pásmech přítomen rušivý signál. Selektivita přijímače ACS je měřítko schopnosti přijmout užitečný signál na určitém kmitočtu, je-li v sousedním kanálu přítomný další signál. Je to tedy schopnost filtru přijímače potlačit sousední kanály. Minimální útlum takového filtru musí být 33 dB (za předpokladu že výkon signálu v sousedním kanálu nepřekročí -25 dBm).

5.3 Rozbor možných druhů interferencí

V kapitole 1 byly nastíněny možnosti vzájemného rušení mezi uvažovanými systémy – intermodulační produkty, nesplnění výkonových masek, nedostatečná filtrace a provoz ve sdíleném pásmu. Tyto klíčové vlivy budou v následujících odstavcích podrobněji rozebrány.

Systémy CDMA jsou náchylné k tzv. „near-far“ efektu ve směru uplink. Jedna mobilní stanice vysílající s velkým výkonem může blokovat ostatní MS. Díky porušení ortogonality kódů v uplinku asynchronním přenosem pak základnová stanice nedokáže tento signál identifikovat a považuje jej za šum. Proto je u takového systému velmi důležité rychlé řízení výkonu. Toto řízení výkonu se snaží kompenzovat ztráty způsobené rádiovým kanálem a zachovat tak potřebný výkon pro spojení, avšak jen v mezích, které nezpůsobí rušení okolních stanic. Proto se systém snaží zachovávat pouze minimální nutný výkon vysílaného signálu.

5.3.1 Možnosti potlačení intermodulačních produktů

Intermodulační rušení může vzniknout na obou stranách, jak na straně užitečného systému tak na straně interferujícího systému. Nejvíce nebezpečné rušení vzniká v nelineárních aktivních prvcích. Úroveň intermodulačních produktů (IMP) třetího řádu lze vyjádřit vztahem [49]

$$P_{IMD3} = 3G_{dB} + 3P_{indBm} - 2IP_{3dBm} \quad (5.9)$$

kde P_{indBm} je úroveň dvou vstupních signálů (přepokládáme stejnou úroveň), G_{dB} je zisk aktivního prvku, IP_{3dBm} je úroveň pro bod zahrazení, který je definován jako průsečík charakteristik základního signálu a intermodulační složky 3. řádu. Typické úrovně intermodulačních produktů koncových zesilovačů jsou zhruba -30 až -50 dB.

Kmitočty systému GSM900 v downlinku jsou v rozmezí 935 – 960 MHz. Druhé harmonické mohou zasahovat do spodního pásma systému UMTS TDD 1900 – 1920 MHz. Tyto složky je možné filtrovat na výstupu vysílače základnové stanice.

Produkty 3. řádu systému GSM1800 mohou ovlivnit pásmo uplinku systému UMTS FDD 1920 – 1980, uvažujeme-li kmitočty z downlinku GSM1800, tzn. pásmo 1805-1880 MHz ($f_{IM3} = 2f_1 - f_2$). Tyto produkty mohou být opět filtrovány na výstupu vysílače. Produkty, které však vznikají v přijímači UMTS, nemohou být odfiltrovány, protože interferující signály se nacházejí přímo v pásmu užitečného signálu. Nebezpečí hrozí především kmitočtovému rozmezí 1920 – 1955 MHz, uvažujeme-li základní kmitočty v rozmezí $f_1 \in \langle 1862,2; 1879,8 \rangle$ MHz a $f_2 \in \langle 1805,2; 1839,6 \rangle$ MHz. Jedinou metodou pro vyloučení vlivu IMP je filtrace signálu z vysílače GSM1800 s dostatečným útlumem filtru v pásmu 1920 – 1980 MHz. Konkrétní hodnoty na požadované filtry jsou ale závislé na použitých nelineárních prvcích a jejich úrovni IMP. Tato úroveň by

dle standardů však neměla překročit nežádoucí emise vysílače (out-of-bound, spurious emissions, [28], [32]), a proto tedy představují menší nebo maximálně stejné riziko. Na IMP lze tedy aplikovat stejná řešení, jak na rušení ze sousedního kanálu, a dále proto nebudou rozebírány.

5.3.2 Vliv průsaku energie signálu vysílače do sousedního kanálu (ACLR) a selektivity přijímače (ACS) na interference v systému

Interference nastávají v okamžiku, kdy jsou dva signály v blízkých či přímo sousedních pásmech. Specifikace 3GPP 25.101 [44] a 25.104 [32] poskytují detaily kvalitativních parametrů použitých filtrů k omezení těchto nežádoucích efektů.

Celkové interference lze tedy vyjádřit pomocí parametru ACIR (*Adjacent Channel Interference Ratio*), který je definován pomocí ACLR a ACS vztahem

$$ACIR = \frac{1}{\frac{1}{ACLR} + \frac{1}{ACS}}. \quad (5.10)$$

K tomuto jevu dochází jak v uplinku tak v downlinku. A jelikož jsou na UE kladeny menší nároky než na BTS, tak jsou v tomto směru určující parametry UE – v uplinku rozhoduje ACLR mobilní stanice, v downlinku rozhoduje ACS mobilní stanice – viz následující rovnice

$$ACIR_{UL} = \frac{1}{\frac{1}{ACLR_{UE}} + \frac{1}{ACS_{BTS}}} \cong ACLR_{UE}, \quad (5.11)$$

$$ACIR_{DL} = \frac{1}{\frac{1}{ACLR_{BTS}} + \frac{1}{ACS_{UE}}} \cong ACS_{UE}. \quad (5.12)$$

ACLR MS a ACS BTS v uplinku lze nahradit jedním filtrem [5]

$$aci_{UL} = -10 \log \left(10^{-\frac{ACLR-MS}{10}} + 10^{-\frac{ACS-BS}{10}} \right) \cong ACLR - MS \quad (5.13)$$

s výslednou filtrací, která je rovna hodnotě ACLR vysílače MS. Stejný vztah platí i pro downlink, s tím, že zaměníme ACLR-MS za ACLR-BTS a ACS-BTS za ACS-MS. Výsledná filtrace je rovna ACS-MS.

Interference mezi systémy či dokonce uvnitř systému (sousední nosné) vytváří tzv. mrtvé zóny. Nejčastější je případ, kdy se UE nachází na okraji servisní buňky a zároveň se nachází v blízkosti základnové stanice vysílající na sousedním kmitočtu. Úroveň vlastního signálu klesá, zatímco úroveň interferujícího roste, až dojde k výpadku spojení. V uplinku pak dochází k nárůstu interferencí díky zvyšujícímu se výkonu MS pro zachování spojení. Tyto problémy se dají minimalizovat vhodným kmitočtovým plánováním a vhodným umístěním základnových stanic. Dobré řešení poskytuje umístění nosné systému UMTS mezi existující nosné systému GSM (stejného operátora), případně při použití více nosných UMTS je vhodné tyto nosné umístit na společnou základnovou stanici. Samozřejmostí je dodržení minimální izolace mezi systémy GSM a UMTS na společné BTS [49].

5.4 Kooperace stávajícího systému GSM se systémem UMTS

Interference ze sousedního kanálu ACI (*Adjacent Channel Interference*) vlastní sítě nejsou kritický problém, protože plánovací techniky a handover z jednoho kanálu do druhého tyto problémy zmírňuje. Zatímco ACI mezi operátory může způsobit závažné problémy, protože zvětšení ochranných pásem je z důvodu omezenosti zdrojů a přidělení malého úseku kmitočtového pásma nešetrné. Jiným řešením je zavedení přísnějších požadavků na filtry vysílačů a přijímačů (ACLR a ACS), což může být problém z hlediska nákladů na zařízení a jeho rozměry.

Z hlediska ACI mohou nastat dva scénáře:

- 1) MS prvního operátora se nachází na kraji servisní buňky a v blízkosti BTS druhého operátora. Svým vysílacím výkonem tak může blokovat tuto cizí BTS.
- 2) BTS druhého operátora vysílá s plným výkonem a může v určité blízké oblasti blokovat všechny MS prvního operátora, vznikají tzv. mrtvé zóny.

Mezi zdroje ACI patří následující složky:

- 1) Vysílání mimo pásmo (*out-of-band emissions*) – nechtěné emise do bezprostředně sousedních kanálů, které vznikají díky procesu modulace,
- 2) Nežádoucí emise (*spurious emissions*) – způsobené nežádoucími efekty vysílače, zejména vyšší harmonické složky a intermodulační produkty.

5.4.1 Minimální vazební útlum UMTS

Pro potřeby definic izolací a potřebných vazebních útlumů mezi interferujícími signály je nutné definovat tzv. minimální vazební útlum MCL (*Minimum Coupling Loss*). Útlum MCL je definován jako nejmenší útlum vlny šířením, který je mezi vysílačem a přijímačem BTS a MS – nastává v případě, kdy se MS přiblíží na co nejmenší možnou vzdálenost k BTS, tak že vysílá právě s minimálním vysílacím výkonem. Přiblíží-li se MS ještě blíže, tak vysílá se zbytečným výkonem navíc a zvyšuje tak úroveň interferencí v síti [5]. Uvažujeme-li citlivost přijímače BTS -103 dBm (-174 dBm/Hz + 10log(3,84MHz) dB + 5 dB (šumové číslo) – viz dále link budget) a minimální vysílací výkon MS -50 dBm, pak je MCL rovno

$$-50 \text{ dBm} - (-103 \text{ dBm}) = 53 \text{ dB}. \quad (5.14)$$

Při dodržení této podmínky generuje MS zanedbatelný přídatný šum do sítě.

Vazební útlum mezi sousedními nosnými vychází z rovnice (5.13) a je dán požadavky na MS a BTS

$$aciUL, DL = -10 \log \left(10^{\frac{45}{10}} + 10^{\frac{33}{10}} \right) \cong 33 \text{ dB}. \quad (5.15)$$

Jinými slovy to znamená, že vysílají-li dvě stanice bezprostředně vedle sebe na sousedních nosných, tak je úroveň interferencí do sousedního kanálu o 33 dB menší než do vlastního. Nejhorší případ nastává v okamžiku, kdy MS vysílá na okraji servisní buňky s plným výkonem a je ve vzdálenosti MCL od BTS, která pracuje na sousední nosné. V tom případě je úroveň výkonu signálu v sousedním kanálu

$$P_{ACI,UL} = P_T - MCL - C = 21 \text{ dBm} - 53 \text{ dB} - 33 \text{ dB} = -65 \text{ dBm}, \quad (5.16)$$

kde P_T je maximální úroveň vysílaného výkonu MS (nejmenší třída IV), MCL je minimální vazební útlum a C je minimální vazební útlum mezi sousedními kanály. Pokud uvážíme, že citlivost přijímače je -103 dBm, dochází tím k nárůstu přídavného rušení o 38 dB a tím k blokování ostatních MS, jejichž výkon na přijímači BTS je pod úrovní -65 dBm.

Pro downlink stanovíme úroveň interferencí v sousedním kanálu stejným výpočtem, jedinou změnou je maximální úroveň vysílaného výkonu, a to 27 dBm.

$$P_{ACI,DL} = 27 \text{ dBm} - 53 \text{ dB} - 33 \text{ dB} = -59 \text{ dBm}. \quad (5.17)$$

Chceme-li zjistit, jakým výkonem by musela BTS vysílat, aby MS neblokovala ostatní uživatele, provedeme výpočet následovně: maximální ztráta šířením vlny mezi MS a BTS (MS je na hranici buňky) je

$$\begin{aligned} L_p = P_T - E_b/N_0 + PG - N - I &= 21 \text{ dBm} - 5 \text{ dB} + 25 \text{ dB} - (-103 \text{ dBm} + 3 \text{ dB}) = \\ &= 141 \text{ dB}, \end{aligned} \quad (5.18)$$

kde E_b/N_0 je požadovaná hodnota poměru energie jednoho bitu signálu ku spektrální hustotě šumu (hlasová služba 12,2 kb/s cca 5 dB pro uplink, 8 dB pro downlink [5]), PG je zisk rozprostřením ($10\log(W/R)$), N je citlivost přijímače, I je rezerva na interference.

Pak je potřebná úroveň výkonu vysílaného signálu BTS rovna

$$P_{TP} = P_{ACI,DL} + E_b/N_0 - PG + L_p = -59 \text{ dBm} + 8 \text{ dB} - 25 \text{ dB} + 141 \text{ dB} = 65 \text{ dBm}. \quad (5.19)$$

Základnová stanice by potřebovala tedy přídavný výkon $65 - 27 = 38 \text{ dB}$ nad rámec svých možností.

Doporučovaná řešení:

- 1) Jedná-li se o sousední kanály jednoho operátora, pak je vhodným řešením měření úrovně pilotních signálů na sousedních nosných a případné provedení mezifrekvenčního handoveru (*Inter-Frequency Handover*, IF-HO).
- 2) Jedná-li se o dva rozdílné operátory, pak je vhodným řešením umístění základnových stanic na stejné místo, případně lze sdílet i vybavení. Dojde pak k úspoře nákladů na vybudování sítě a zároveň k omezení rušení (ACI) a vzniku mrtvých zón. Při umístění na společném místě lze dostatečnou izolaci (vazební útlum) zajistit vhodným rozmístěním antén (prostorové a směrové dělení), optimální vyzařovací charakteristikou, atd.

5.4.2 Výpočet citlivosti přijímače UMTS (Link Budget)

Výpočet je proveden způsobem podle [5] a výsledky jsou uvedeny v tabulce 5.5.

Interferenční rezervu získáme na základě předpokládaného zatížení buňky

$$-10\log(1 - N/N_{MAX}), \quad (5.20)$$

kde poměr N/N_{MAX} je vlastní předpokládané zatížení (uvažujeme 50%), N je počet aktivních uživatelů v buňce a N_{MAX} je maximální kapacita buňky (*pole capacity*) [5].

$$N = \frac{\frac{W}{R}}{\frac{E_b}{I_0}(\alpha(1+\beta))} + 1 - FN_{th} \frac{W}{S(\alpha(1+\beta))}, \quad (5.21)$$

5 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ V LABORATORNÍM PROSTŘEDÍ

kde W je chipová rychlost 3,84 Mchip/s, R je bitová rychlost (dle služby), E_b/I_0 je poměr energie jednoho bitu k spektrální výkonové hustotě teplotního šumu včetně interference (požadavek dle služby), α je faktor aktivity kanálu, β je faktor poměru interference z cizích buněk a servisní buňky, F je šumové číslo přijímače BTS, N_{th} je hustota výkonu tepelného šumu a S je úroveň výkonu přijatého signálu. Maximální hodnotu N_{MAX} získáme, je-li pravý člen rovnice roven nule, tzn. veličina S dosáhne nekonečné hodnoty. N_{MAX} pak vyjádříme vztahem

$$N_{MAX} = \frac{\frac{W}{R}}{\frac{E_b}{I_0}(\alpha(1 + \beta))} + 1. \quad (5.22)$$

Tab. 5.5. Výpočet citlivosti přijímače UMTS

		Uplink	Downlink
Hustota výkonu tepelného šumu (dBm/Hz)	a	-174	-174
Šumové číslo přijímače (dB)	b	5	8
Výkonová hustota šumu na vstupu přijímače (dBm/Hz)	$c = a + b$	-169	-166
Rezerva na interference (dB)	d	3	10
Hustota výkonu šumu na vstupu přijímače vztažená na efektivní šířku pásma (dBm)	$e = c + 10\log(W)$	-103	-100
Potřebná úroveň signálu na přijímači (dBm)	$f = e + d$	-100	-90

Potřebná úroveň signálu na vstupu přijímače podle typu služby (referenčního kanálu) v uplinku je uvedena v tabulce 5.6.

Tab. 5.6. Potřebná úroveň signálu dle referenčního kanálu.

		12,2 kb/s	144 kb/s	384 kb/s
Požadovaná hodnota E_b/I_0 (dB)	g	5,45	2,25	1,80
Zisk rozprostřením (dB)	$h = 10\log(W/R)$	25	14,25	10
Potřebná úroveň signálu na přijímači (dBm)	$i = g - h + f$	-119,55	-112	-108,20

Ve směru downlink je tento výpočet proveden obdobně, ale pro potřeby pokrytí není relevantní, jelikož pokrytí je určeno rozpočtem výkonových úrovní v uplinku (maximální možný útlum vlny mezi BTS a MS, kdy ještě nedojde k výpadku služby).

5.4.3 Příčiny interferencí a nutné izolace mezi systémy GSM a UMTS

Mezi hlavní příčiny tzv. inter-system interferencí lze zařadit:

- 1) nežádoucí emise (*spurious emissions*) – vznikají nedokonalým filtrováním výstupního signálu vysílače,
- 2) intermodulační produkty – vznikají působením nelineárních prvků.

Dále je třeba zvážit i blokování přijímače – vzniká nedokonalým filtrováním signálu na vstupu přijímače.

V těchto případech je nutné rozlišit dvě varianty – základnové stanice obou systémů se nachází na odlišném místě a nebo základnová stanice UMTS je přidána na společné místo k existující základnové stanici GSM. Pro obě možnosti je nutné zajistit dostatečnou izolaci VF signálů mezi oběma systémy, ale s různě definovanými podmínkami.

Specifikace [28] a [32] uvádějí horní limit nežádoucích emisí BTS systému GSM i UMTS do ostatních pásem – tabulky 5.7 a 5.8. Stejně tak uvádějí limity na blokování stanic – charakteristika blokování je definována jako schopnost přijímače přijmout užitečný signál na určitém kmitočtu za přítomnosti nechtěného rušivého signálu na kmitočtech jiných, než jsou ty ze sousedních kanálů. Hodnoty pro blokování jsou uvedeny v tabulkách 5.9 a 5.10.

Za těchto podmínek mohou vzniknout následující 4 případy.

Rušení přijímače UMTS vysílačem GSM

Vzniká nedostatečnou izolací mezi kanály. Požadavky na vysílač GSM 900/1800 jsou uvedeny v tabulce 5.7.

Tab. 5.7. Limity nežádoucích emisí vysílačů GSM 900/1800.

Stav	Ovlivněné pásmo	Maximální přípustný výkon
Základnové stanice na společném místě	1920 – 1980 MHz (UMTS uplink)	-96 dBm/100 kHz (-79 dBm/5 MHz)
Základnové stanice na jiném místě		-62 dBm/100 kHz (-45 dBm/5 MHz)

Uvažujeme-li opět hustotu výkonu šumu na vstupu přijímače UMTS -103 dBm, pak je nutné zajistit minimální izolaci $-96 + 10\log(5 \cdot 10^6 / 10^5) - (-103) = -79 + 103 = 24$ dB pro umístění BTS na společném místě a 58 dB při umístění BTS na odlišném místě.

Rušení přijímače GSM vysílačem UMTS

Požadavky na vysílač UMTS jsou uvedeny v tabulce 5.8.

Tab. 5.8. Limity nežádoucích emisí vysílačů UMTS.

Stav	Ovlivněné pásmo	Maximální přípustná úroveň
Základnové stanice na společném místě	876 – 915 MHz (GSM 900 uplink) 1710 – 1785 MHz (GSM 1800 uplink)	-98 dBm/100 kHz (-95 dBm/200 kHz)
Základnové stanice na jiném místě		-61 dBm/100 kHz (-58 dBm/200 kHz)

Uvažujeme-li hustotu výkonu šumu na vstupu přijímače GSM -120 dBm, pak je nutné zajistit minimální izolaci $-98 + 10\log(2 \cdot 10^5 / 10^5) - (-120) = -95 + 120 = 25$ dB (respektive 62 dB).

Blokování přijímače UMTS

Úroveň výkonu vysílače základnové stanice GSM 900/1800 se obvykle pohybuje v rozmezí 33 až 43 dBm. Potřebná izolace je tedy minimálně $43 - 16 = 27$ dB (respektive 58 dB). Tyto požadavky jsou obdobné jako pro nežádoucí emise GSM vysílače. Je uvažován typ rušení stálou vlnou CW (*Continuous Wave*).

Tab. 5.9. Limity pro blokování přijímače UMTS.

Stav	Rušení z pásma	Maximální přípustná úroveň
Základnové stanice na společném místě	921 – 960 MHz (GSM900 downlink)	16 dBm
Základnové stanice na jiném místě	1805 – 1880 MHz (GSM1800 downlink)	-15 dBm

Blokování přijímače GSM

Uvažujeme-li úroveň výkonu vysílače UMTS 43 dBm, pak jsou potřebné izolace 35 dB (pro systém GSM 900) a 43 dB (pro systém GSM 1800).

Tab. 5.10. Limity pro blokování přijímače GSM.

Blokovaný systém	Rušené pásmo	Maximální přípustná úroveň
GSM 900	921 – 12750 MHz	8 dBm
GSM 1800	1805 – 12750 MHz	0 dBm

Shrnutí potřebných izolací je uvedeno v tabulce 5.11. Pro spolehlivou činnost přijímače je potřebné ještě zvýšit tyto hodnoty o 3 dB, jinými slovy úroveň rušení by měla být 3 dB pod šumovou úrovní přijímače. Tabulka 5.11 proto zahrnuje už tyto přísnější limity izolace.

Tab. 5.11. Shrnutí izolací mezi systémy, limitní vypočtené hodnoty.

	BTS na společném místě	BTS na odděleném místě
Nežádoucí emise GSM	27 dB	61 dB
Nežádoucí emise UMTS	28 dB	65 dB
Blokování UMTS	30 dB	61 dB
Blokování GSM 900	38 dB	38 dB
GSM 1800	46 dB	46 dB

Z tabulky 5.11 vyplývá, že minimální potřebné izolace včetně rezervy jsou 46 dB pro případ umístění základnových stanic na stejné místo a 65 dB v případě umístění na oddělené místo. Druhý případ udává sice přísnější podmínku, ale vezmeme-li v potaz vzdálenost mezi stanicemi a útlum vlny šířením, pak oněch 20 dB rozdílu dosáhneme

velmi snadno. Proto je potřeba v prvním případě zajistit izolaci systémů na společném místě – a to buď použitím kvalitních duplexerů s útlumem mezi jednotlivými pásmy alespoň 50 dB [53], [56] při společné anténě, nebo v případě vybavení pro každý systém zvlášť jejich vhodnou polohou (0,5 m vertikálně (5.27), 5 m horizontálně (5.26), nutno korigovat podle zisku antén v daném směru). Pokud budeme uvažovat COST231 – Walfisch – Ikegami model šíření vln v mikrobuňce [47] a nejhorší případ přímé viditelnosti (LOS), tak potřebná izolace 65 dB oddělení prostorem pro případ umístění na odlišném místě, bez dalších přídatných opatření, odpovídá vzdálenosti interferujících BTS systému UMTS a GSM cca 20 m (na kmitočtu 2100 MHz, nežádoucí emise UMTS). Pro kmitočet 1800 MHz by to odpovídalo cca 25 m, pro kmitočet 900 MHz cca 40 m. Tuto vzdálenost lze minimalizovat na jednotky metrů použitím jednoho přídatného filtru s útlumem v požadovaném pásmu cca 40 až 50 dB. To znamená instalaci filtru na straně vysílače UMTS s potlačením nežádoucích složek alespoň 40 dB v pásmech 880 – 960 MHz (GSM900) a 1710 – 1880 MHz (GSM1800) a stejně tak přídatný filtr na straně vysílače s potlačením nežádoucích složek pro pásmo 1920 – 2170 MHz (UMTS).

Všechny výpočty pro citlivost přijímače UMTS nebraly v úvahu typ použité služby a počítaly s citlivostí pro obecný signál s šířkou pásma 3,84 MHz, tzn. -103 dBm ve směru uplink (viz. tab. 5.5, bez interferenční rezervy). Pro konkrétní službu (definovanou referenčním kanálem) je potřeba příslušnou izolaci zvětšit. Vycházíme z tabulky 5.6, tzn. že pro službu s uživatelskou rychlostí 12,2 kb/s potřebujeme izolaci cca o $-103 - (-120) = 17$ dB větší, pro kanál s rychlostí 144 kb/s potřebujeme izolaci o 9 dB větší a konečně pro kanál s rychlostí 384 kb/s o 5 dB větší.

5.5 Měření referenčních parametrů GSM – EDGE

V této kapitole se zaměříme na ověření sledovaných parametrů z kapitoly 5.2 systému GSM - EDGE.

Měření vysílaného a přijímaného výkonu signálu je pro tyto referenční modely prozatím irelevantní, jelikož měření probíhalo bez přídatného útlumu vlny přímo po kabelovém vedení. Vysílaný výkon se dal regulovat přímo vektorovým signálovým generátorem.

Důležitým bodem měření bylo zjistit zejména šířku pásma signálu a tedy jeho případný vliv na sousední kanály.

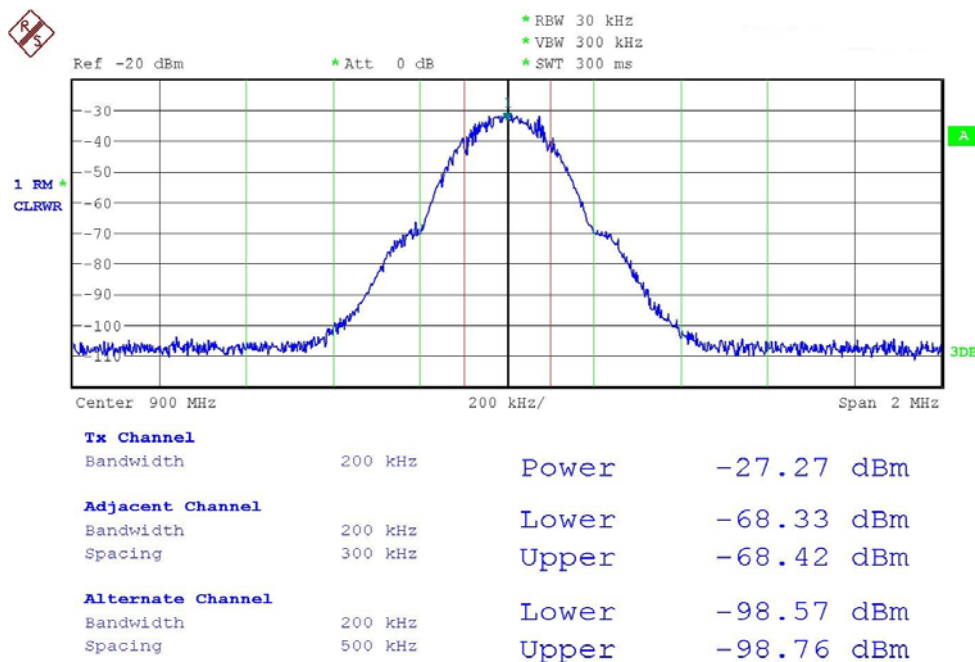
Tab. 5.12. Hodnoty ACLR pro modulaci GMSK.

Vzdálenost sousedního kanálu	Změřené ACLR (absolutní hodnota)	Limit ACI
+200 kHz	40,72 dB	33 dB
- 200 kHz	40,53 dB	33 dB
+ 400 kHz	71,06 dB	43 dB
- 400 kHz	70,87 dB	43 dB

Na obr. 5.3 můžeme vidět spektrum signálu GSM - EDGE pro kódová schémata MCS-1 až 4 používající modulaci GMSK (pouze jedna křivka, spektrum závisí na symbolové rychlosti, modulaci a použitým filtru, všechny tyto parametry jsou pro MCS-

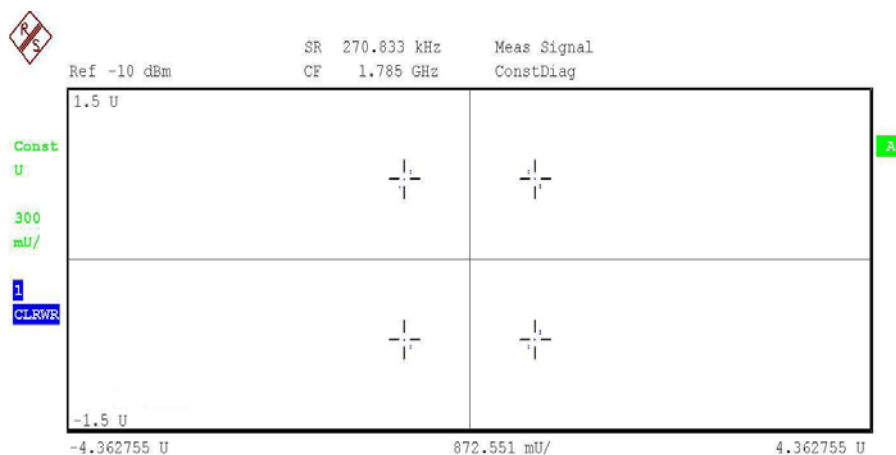
5 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ V LABORATORNÍM PROSTŘEDÍ

1 až 4 stejné) včetně změřených úrovní výkonu zasahujících do sousedních kanálů. Hodnoty jsou přehledně uvedeny v tab. 5.12.



Obr. 5.3. Měření ACLR GSM - EDGE (modulace GMSK, MCS-1 až 4).

Hodnoty jsou tedy vyhovující a dokonce i významně převyšují minimální limit (tab. 5.12). Druhým nutným měřením bylo ověření konstelačního diagramu, z něho vycházelo zjištění vektoru EVM a následný výpočet BER.



Obr. 5.4. Konstelační diagram GSM - EDGE (modulace GMSK), bez přítomnosti šumu.

Konstelační diagram (obr. 5.4) splňuje požadavky dané modulace včetně maximální chyby vektoru EVM bez přítomnosti šumu. Pro AWGN kanál, který byl přímo simulován signálovým generátorem, bylo provedeno měření závislosti EVM na poměru CNR a přepočteno na BER dle (5.4). Výsledné křivky jsou uvedeny na obr. 5.5.

Pro srovnání byly přidány křivky závislosti BER na CNR získané simulacemi v kapitole 3. Konkrétně se jedná o teoretický průběh modulace GMSK na AWGN, a dále průběhy kódovacích schémat MCS-1 a MCS-4. Rozdíl mezi teoretickým a

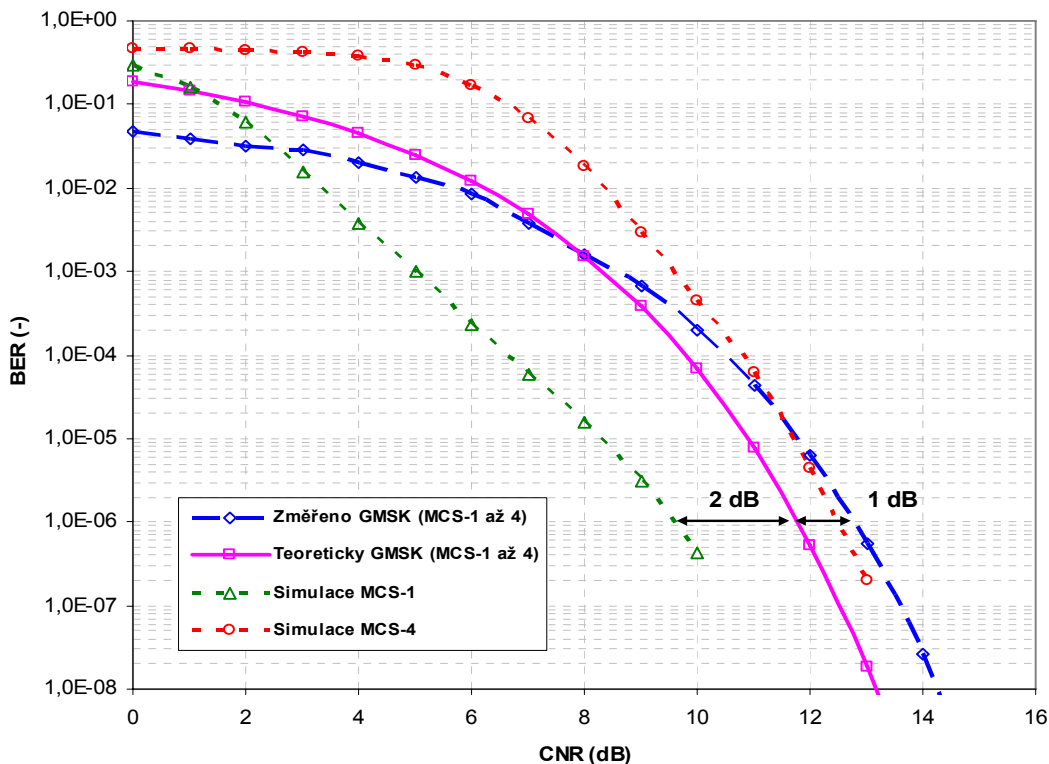
5 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ V LABORATORNÍM PROSTŘEDÍ

změřeným průběhem činí 1 dB pro referenční chybovost 10^{-6} a od hodnoty $\text{CNR} \geq 8$ dB vykazuje stejný spád křivky. Požadovaná hodnota CNR je 9 dB pro hrubou bitovou chybovost 10^{-3} , v našem případě jí dosáhneme zhruba v hodnotě 8,5 dB. Kódové schéma MCS-1 vykazuje zisk 3 dB na referenční chybovosti oproti změřené křivce i schématu MCS-4 díky většímu zabezpečení signálu proti chybám. Schéma MCS-4 kopíruje od $\text{CNR} = 11$ dB změřený průběh a potvrzuje tak svůj charakter, kde díky malému zabezpečení na nízkých hodnotách CNR vykazuje velkou chybovost, ale na vyšších hodnotách se projeví jako výhoda malá redundance a shodnost průběhu se změřeným signálem [52].

Na obr. 5.6 můžeme vidět spektrum signálu GSM - EDGE pro pět nejvyšších kódových schémat MCS-5 až 9 používajících modulaci $3\pi/8$ 8-PSK (opět jedna křivka, důvody byly uvedeny u schémat používajících modulaci GMSK) včetně změřených úrovní výkonu zasahujících do sousedních kanálů. Hodnoty jsou přehledně uvedeny v tab. 5.13.

Tab. 5.13. Hodnoty ACLR pro modulaci 8-PSK.

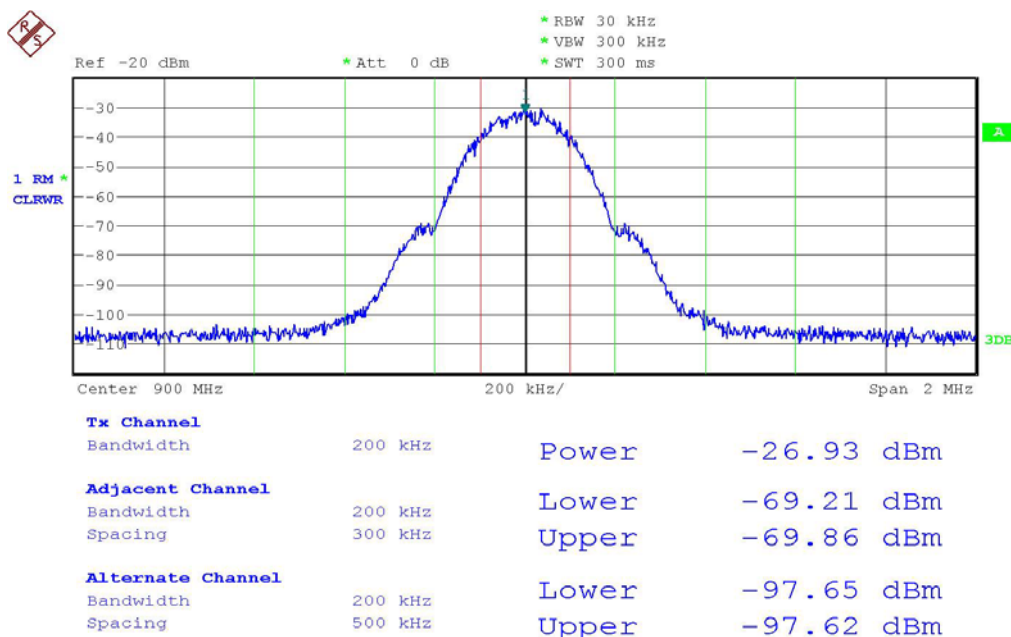
Vzdálenost sousedního kanálu	Změřené ACLR (absolutní hodnota)	Limit ACI
+200 kHz	42,93 dB	33 dB
- 200 kHz	42,28 dB	33 dB
+ 400 kHz	70,69 dB	43 dB
- 400 kHz	70,72 dB	43 dB



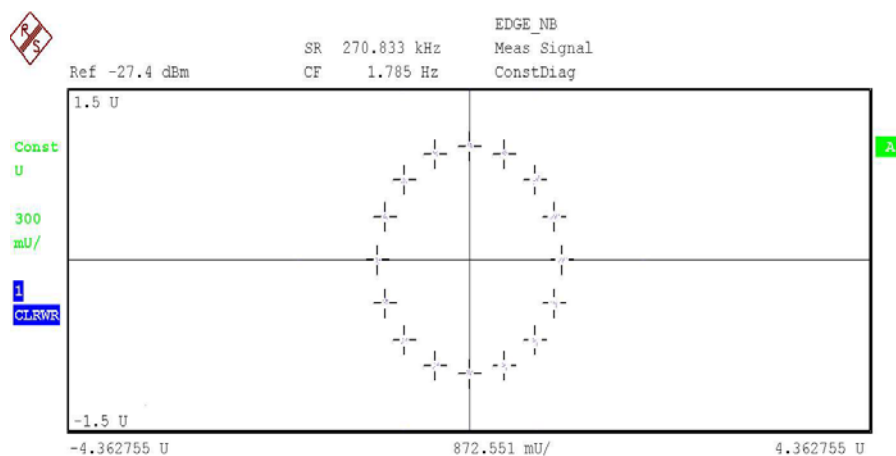
Obr. 5.5. Srovnání změřených a simulovaných hodnot závislosti BER na CNR, modulace GMSK, kanál AWGN.

5 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ V LABORATORNÍM PROSTŘEDÍ

Hodnoty jsou opět vyhovující, v prvním sousedním kanálu se dostávají o cca 2 dB nad minimální limit (tab. 5.13), v druhém sousedním kanálu mají velkou rezervu díky modifikovanému filtru. Dále následuje rovněž ověření konstelačního diagramu, měření vektoru EVM a výpočet BER.



Obr. 5.6. Měření ACLR GSM - EDGE (modulace 8-PSK, MCS-5 – 9).

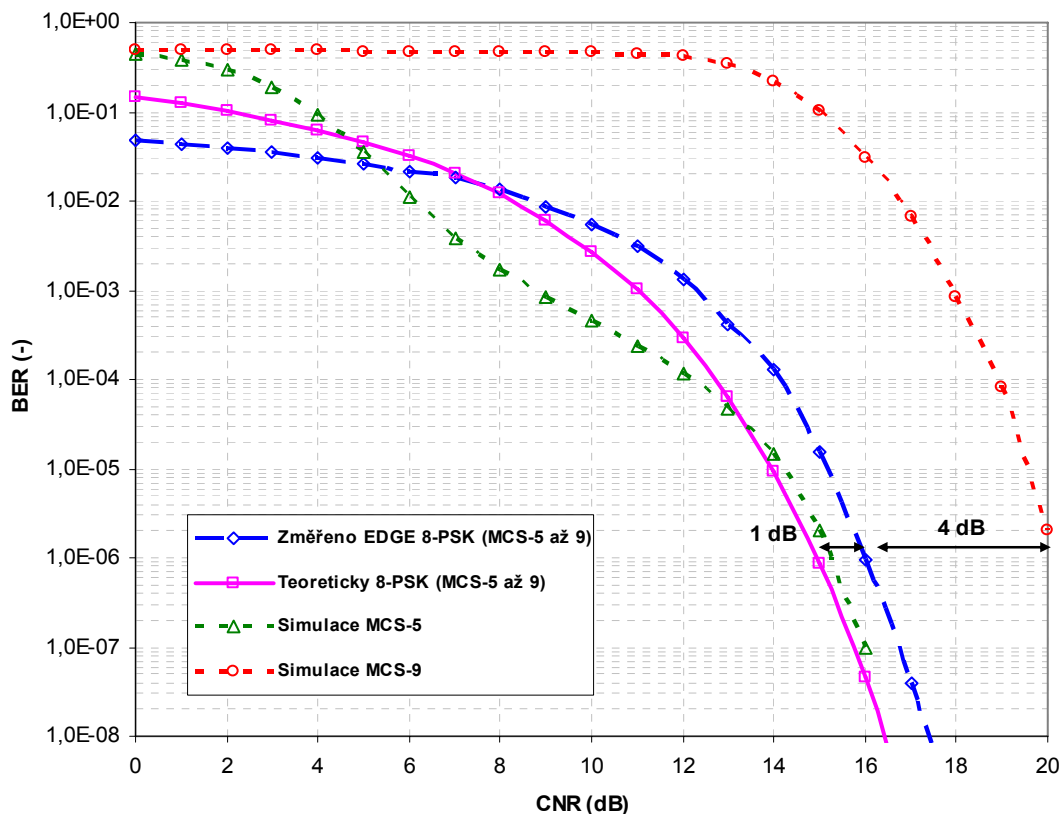


Obr. 5.7. Konstelační diagram GSM - EDGE (modulace $3\pi/8$ 8-PSK), bez přítomnosti šumu.

Konstelační diagram (obr. 5.7) splňuje požadavky dané modulace včetně maximálního limitu chybového vektoru EVM bez přítomnosti šumu. Křivky změřených a vypočítaných hodnot závislosti chybového vektoru EVM na poměru CNR, resp. BER podle (5.5) na CNR jsou uvedeny na obr. 5.8.

V grafu můžeme opět srovnat průběh změřených hodnot s výsledky získanými simulacemi – teoretický průběh modulace 8-PSK na kanálu AWGN a průběhy kódovacích schémat MCS-5 a MCS-9. Rozdíl mezi teoretickým a změřeným průběhem činí znovu 1 dB pro referenční chybovost 10^{-6} a od hodnoty CNR ≥ 8 dB vykazuje stejný spád křivky. Kódové schéma MCS-5 vykazuje zisk 1 dB na referenční

chybovosti oproti změřené křivce a od $CNR = 13$ dB kopíruje teoretický průběh. Schéma MCS-9 má oproti změřeným hodnotám ztrátu -4 dB na referenční chybovosti. Je to způsobeno především vysokým stupněm „vytečkování“ (*puncturing*) po konvolučním kódování, kdy se 2/3 dat vynechávají [52].



Obr. 5.8. Srovnání změřených a simulovaných hodnot závislosti BER na CNR, modulace 8-PSK, kanál AWGN

5.6 Měření referenčních parametrů UMTS

Tato kapitola se věnuje, stejně jako předchozí, ověření sledovaných parametrů z kapitoly 5.2 avšak u systému UMTS.

Měření vysílaného a přijímaného výkonu signálu rovněž zatím nebylo bráno v potaz. Toto bude důležité až při měření vlastní koexistence. Hlavním bodem měření bylo tedy zjistit opět šířku pásma signálu, výkon v sousedních pásmech (ACLR), ověření konstelačního diagramu a odečtení vektoru EVM pro kanál AWGN.

Na obr. 5.9 je zobrazeno spektrum signálu UMTS používající modulaci QPSK včetně změřených úrovní výkonu zasahujících do sousedních kanálů. Změřené hodnoty společně s limity jsou uvedeny v tab. 5.14.

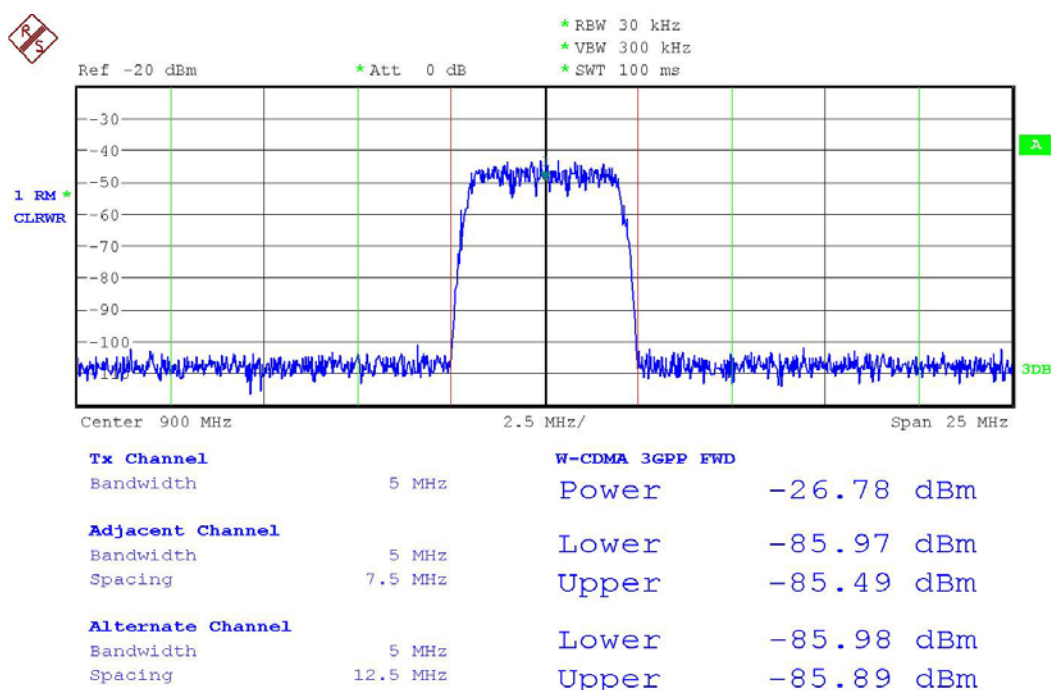
I zde nedochází k žádným problémům, limity jsou splněny s dostatečnou rezervou (tab. 5.14). Je to především díky vzdálenostem sousedních kanálů, které jsou 5 MHz, zatímco šířka samotného signálu UMTS je zhruba 4,6 MHz.

5 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ V LABORATORNÍM PROSTŘEDÍ

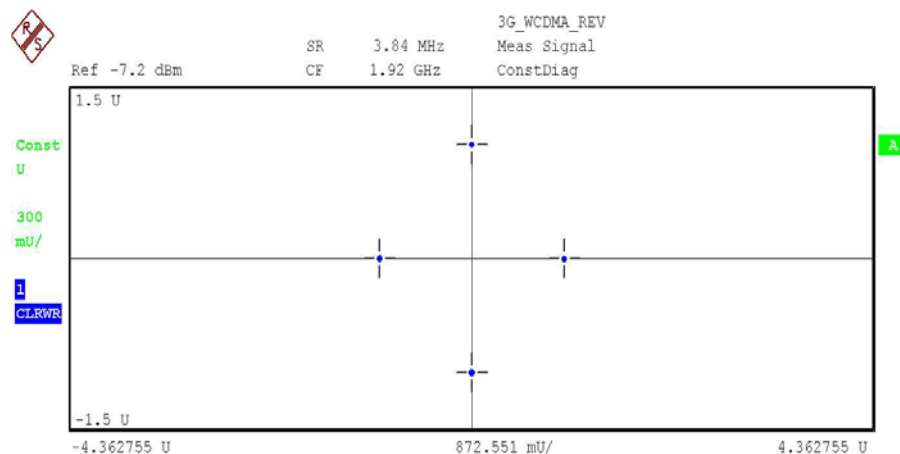
Tab. 5.14. Hodnoty ACLR pro signál UMTS.

Vzdálenost sousedního kanálu	Změřené ACLR (absolutní hodnota)	Limit ACI
+5 MHz	58,71 dB	33 dB
- 5 MHz	59,19 dB	33 dB
+ 10 MHz	59,11 dB	43 dB
- 10 MHz	59,20 dB	43 dB

Konstelační diagram (obr. 5.10) je velmi přesný, samotný vysílač nezavádí téměř zkreslení (do 1%), splňuje požadavky dané modulace včetně maximální odchylky vektoru EVM bez přítomnosti šumu. Otočení o 45° oproti klasické modulaci QPSK je způsobeno skramblováním signálu. Závislost BER podle (5.4) na CNR, získaná ze změřeného vektoru EVM, je zobrazena na obr. 5.11.

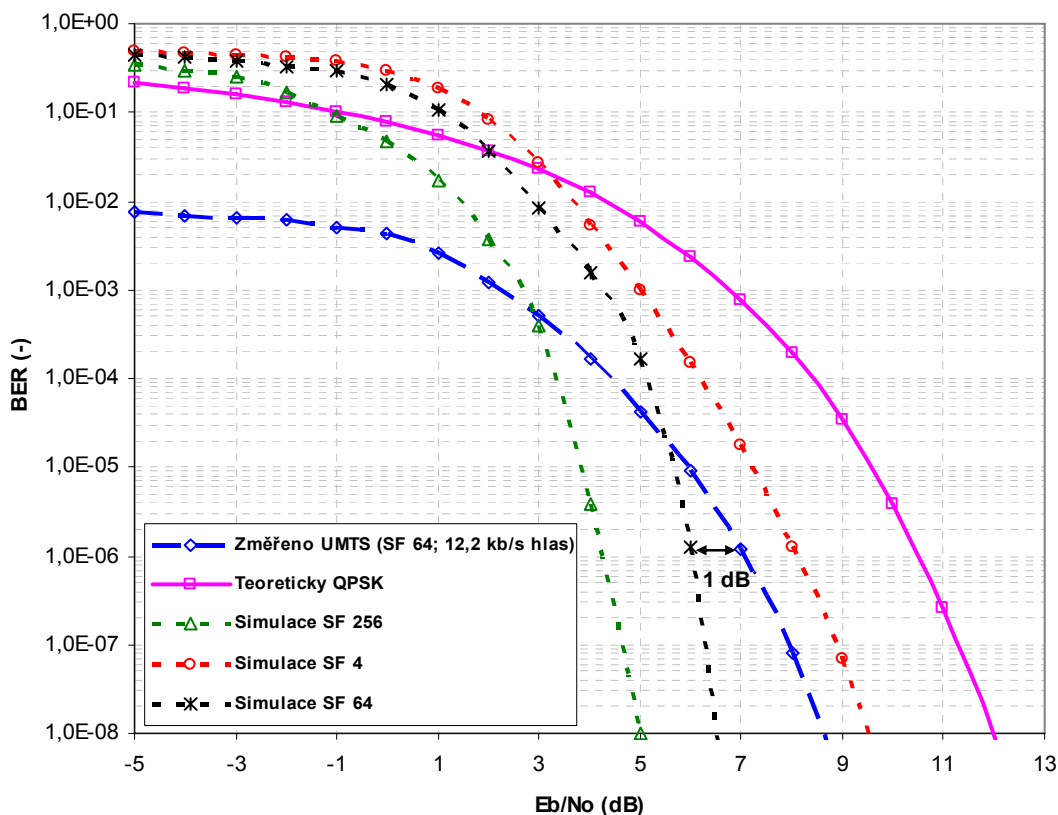


Obr. 5.9. Měření ACLR signálu UMTS.



Obr. 5.10. Konstelační diagram UMTS (QPSK), bez přítomnosti šumu.

Srovnání naměřených výsledků se simulacemi opět nepřináší velké rozdíly. Měřený referenční kanál 12,2 kb/s (SF 64) potřebuje na referenční chybovosti 10^{-6} oproti simulovanému kanálu se stejným činitelem rozptřeni SF = 64 o 1 dB větší poměr E_b/N_0 . Oba dva průběhy jsou v rozmezí nejmenšího (SF = 4) a největšího (SF = 256) činitele rozptřeni. Pro hrubou bitovou chybovost 10^{-3} a referenční kanál 12,2 kb/s je stanovena potřebná hodnota poměru $E_b/N_0 = 5$ dB, což oba srovnávané kanály splňují. Odlišný průběh je způsoben zabezpečením simulovaného signálu proti chybám (FEC), kdy zpočátku pro slabý signál je bitová chybovost velká, ale pak významně klesá. Od hodnoty cca $E_b/N_0 = 5,5$ dB vykazuje simulovaný zabezpečený signál menší chybovost. Pro měřený signál se jedná o hrubou chybovost bez zabezpečovacích mechanismů [52].



Obr. 5.11. Srovnání změřených a simulovaných hodnot závislosti BER na E_b/N_0 , modulace QPSK, kanál AWGN.

5.7 Měření koexistence v pásmu 900 MHz

V současné době je rádiové spektrum velmi hustě obsazené, proto je klíčovou otázkou dobré kmitočtové plánování a management. Výkonnost dnešních bezdrátových systémů je především závislá na interferencích.

Systém WCDMA je odolný proti rušení úzkopásmovým (NB) signálem, jehož šířka pásma je mnohem menší a je s užitečným signálem nekorelován. Přijatý úzkopásmový signál je přijímačem rozptřen a jeho výkonová spektrální hustota je zmenšena. Toto zmenšení je závislé na chipové rychlosti a na šířce pásma NB signálu.

Následná filtrace ještě zmenší úroveň rozprostřeného nežádoucího signálu, který proniká do následujících obvodů přijímače. Odolnost širokopásmového signálu vůči úzkopásmovému rušení lze vyjádřit pomocí následujících vztahů [49] před (B) a po (A) rozprostření

$$\left(\frac{C}{I}\right)_B = \frac{P_U}{P_I}, \quad (5.23)$$

$$\left(\frac{C}{I}\right)_A = \frac{P_U}{P_I} \frac{BW}{W}, \quad (5.24)$$

kde P_U a P_I jsou výkony užitečného a interferujícího signálu, BW je šířka pásma užitečného signálu a W je chipová rychlost. Poměr W/BW je jinými slovy zisk rozprostřením (*processing gain*). Systém UMTS ale není vždy odolný, zvláště když signál GSM ze sousedního kanálu významně překročí určitou výkonovou hranici. Potom může tento rušivý signál zastínit užitečný signál a znemožnit tak jeho dekódování.

5.7.1 Vzájemné interference v systému GSM – EDGE

Tato kapitola popisuje výkonnost systému GSM - EDGE při rušení užitečného signálu interferujícím signálem ze stejného systému a to buď na stejném nosném kmitočtu (tzv. *Co-channel Interference*) a nebo na sousedních nosných kmitočtech (tzv. *Adjacent Channel Interference*). Odtud tedy název „intra-system interference“.

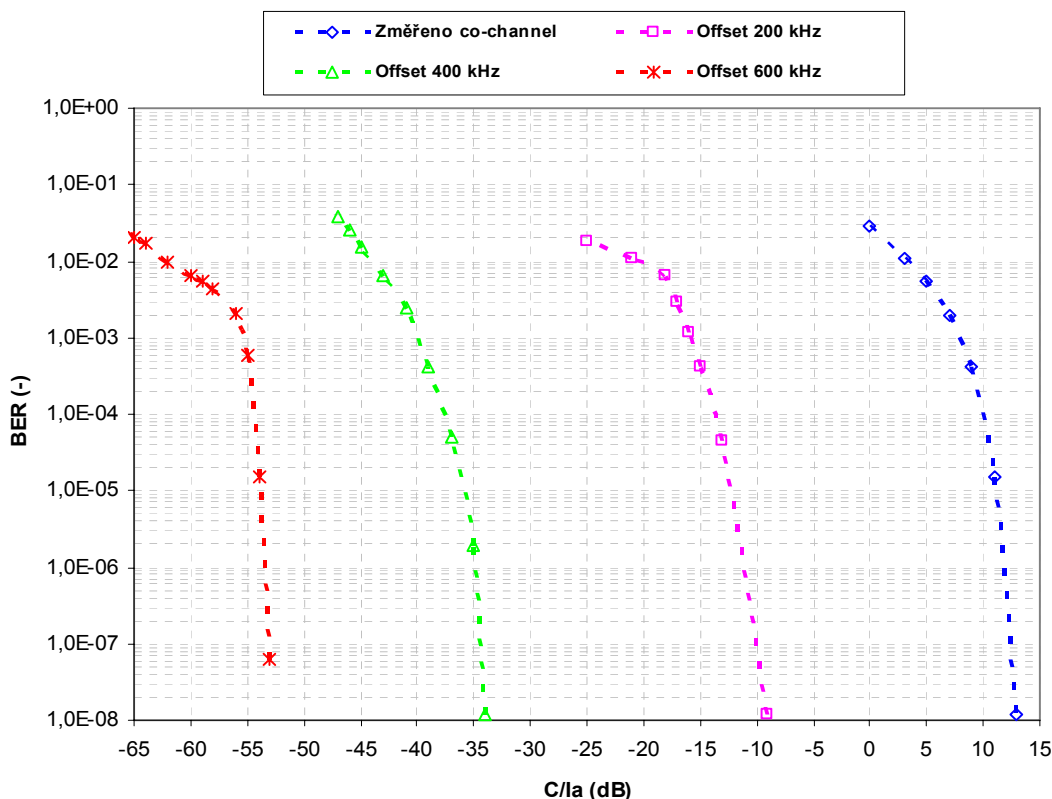
Hlavní parametry testovacích signálů byly symbolová rychlost 270,833 kS/s, modulace GMSK a 8-PSK a šířka pásma 200 kHz. Ostatní parametry byly pro měření interferencí irelevantní. Měření byla provedena pro vzdálenost nosných 200, 400 a 600 kHz. Vyšší vzdálenosti nosných nemá smysl vyšetřovat, protože dynamický rozsah přijímače je asi 80 dB. Užitečný signál byl na společném kanálu rušen pouze silným interferujícím signálem, jiný druh rušení nebyl uvažován. Přijímač provedl vyhodnocení hrubé bitové chybovosti užitečného signálu v závislosti na poměru úrovní užitečného a rušivého signálu C/I_a (*Carrier to Adjacent channel interference power ratio*). Dosažené výsledky společně s požadovanými hodnotami minimálního poměru C/I_a pro dosažení nominální hrubé chybovosti $BER = 10^{-3}$ jsou uvedeny v tabulce 5.15. Hodnoty byly odečteny z grafu na obr. 5.12.

Z tabulky 5.15 je vidět, že požadavky byly splněny, někde dokonce s větší rezervou. Jedinou výjimkou je vzdálenost nosných 400 kHz, kde se požadavky se změřenou hodnotou liší o 1 dB v neprospěch měřené hodnoty.

Tab. 5.15. Srovnání požadavků na C/I_a a změřených hodnot pro systém GSM - EDGE.

Vzdálenost nosných (kHz)	Minimální hodnoty C/I_a dle standardu (dB)	Změřené hodnoty C/I_a (dB)
0	9	8
200	- 9	-16
400	- 41	- 40
600	- 49	- 55

U rušení na stejném kmitočtu byla nominální hodnota chybovosti dosažena už pro 8 dB. Pro offsety 200 a 600 kHz vychází rezerva 6 až 7 dB. Na obr. 5.13 je pro ilustraci uveden mezní případ pro vzdálenost nosných 600 kHz a $BER = 10^{-3}$.



Obr. 5.12. Vliv úrovně interferujícího signálu na bitovou chybovost užitečného signálu systému GSM - EDGE v závislosti na vzdálenosti nosných kmitočtů.

Dobré filtrování přijatého signálu je tedy základní nástroj v boji proti rušení ze sousedních kanálů. Zlepšení výkonnosti lze dosáhnout pouze s rychlým řízením výkonu. Největší riziko nastává, jsou-li dvě mobilní stanice v blízkosti a pracují-li v bezprostředně sousedních kanálech (200 kHz offset) každá připojená na jinou základnovou stanici. Díky nedostatečné výkonové izolaci se mohou tyto stanice navzájem blokovat. Rušení na stejném kmitočtu se dá minimalizovat vhodným kmitočtovým plánem [52].

5.7.2 Vzájemné interference v systému UMTS

Tato kapitola popisuje výkonnost systému UMTS při rušení užitečného signálu interferujícím signálem ze stejného systému a to buď na stejném nosném kmitočtu a nebo na sousedních nosných kmitočtech.

Hlavní parametry testovacích signálů byly chipová rychlost 3,84 Mchip/s, modulace QPSK a šířka pásma 5 MHz, jako referenční měřicí signál byl použit kanál o rychlosti 12,2 kb/s.

Měření byla provedena pro vzdálenost nosných 5 a 10 MHz. Vyšší vzdálenosti nosných nemá smysl vyšetřovat ze stejného důvodu, jak bylo uvedeno v předchozí kapitole. Užitečný signál byl na společném kanálu rušen pouze silným interferujícím signálem, jiný druh rušení nebyl uvažován. Výsledky vyhodnocení hrubé bitové

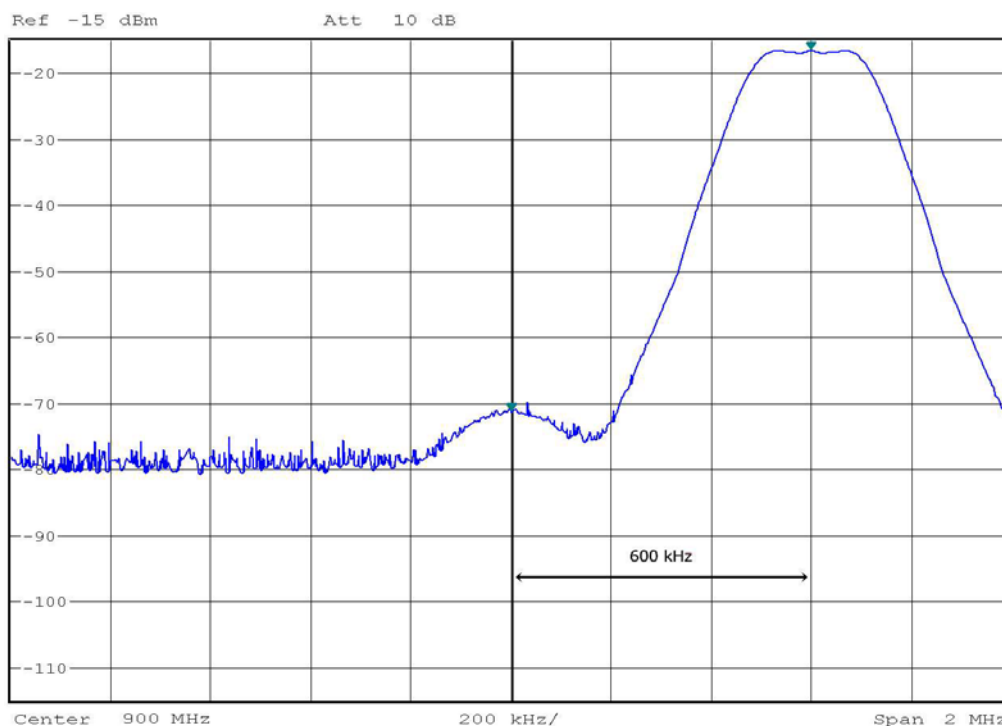
5 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ V LABORATORNÍM PROSTŘEDÍ

chybovosti užitečného signálu v závislosti na poměru úrovní užitečného a rušivého signálu C/Ia společně s požadovanými hodnotami minimálního poměru C/Ia pro dosažení nominální chybovosti 10^{-3} jsou uvedeny v tabulce 5.16 a graficky na obr. 5.14.

Tab. 5.16. Srovnání požadavků na C/Ia a změřených hodnot pro systém UMTS.

Vzdálenost nosných (MHz)	Hodnoty ACI (dB) (pro srovnání)	Změřené hodnoty C/Ia (dB)
0	---	6
5	- 33	- 39
10	- 43	- 52

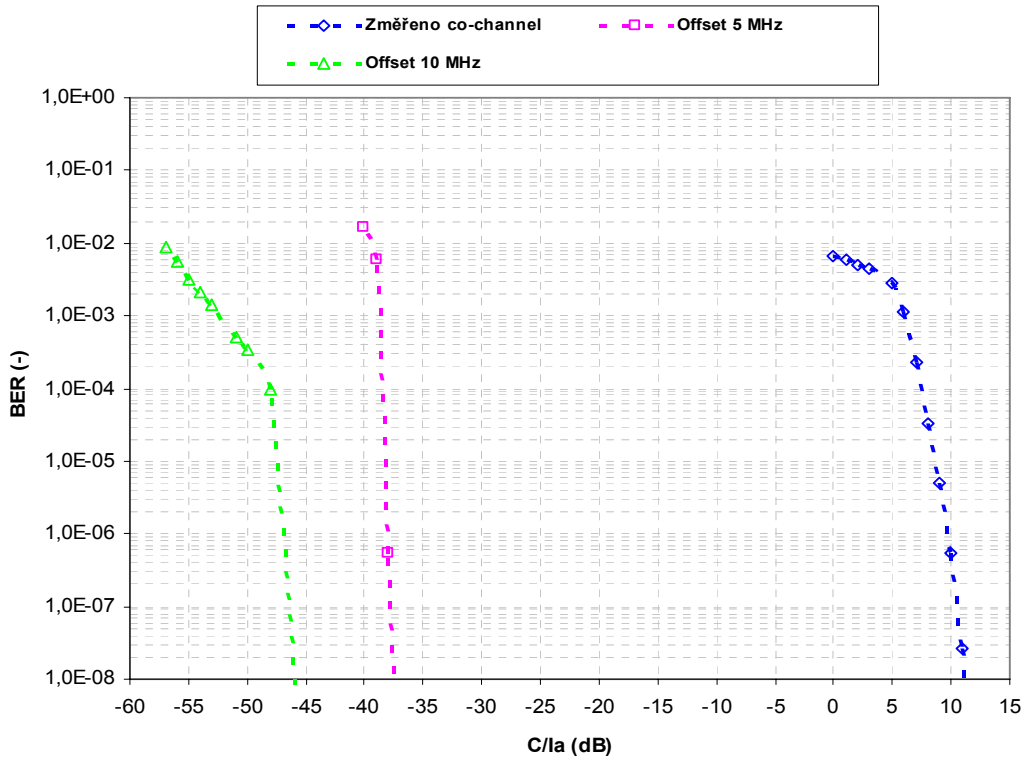
Naměřené hodnoty opět splňují požadavky s ohledem na parametr ACI (tab. 5.16). Rušení na stejném kmitočtu lze potlačit rychlým řízením výkonu. Potenciální nebezpečí je stejné – rušení na sousedním kmitočtu (5 MHz offset) – nachází-li se jedna mobilní stanice v blízkosti druhé mobilní stanice a jiné základnové stanice, která vysílá na tomto sousedním kmitočtu. Je potřeba zajistit nejméně 35 dB izolaci mezi interferujícími stanicemi, což odpovídá vzdálenosti asi 20 m, uvažujeme-li útlum volným šířením vlny, a nebo vzdálenosti 2 m, uvažujeme-li model COST231-Walfisch-Ikegami predikce útlumu vlny [47].



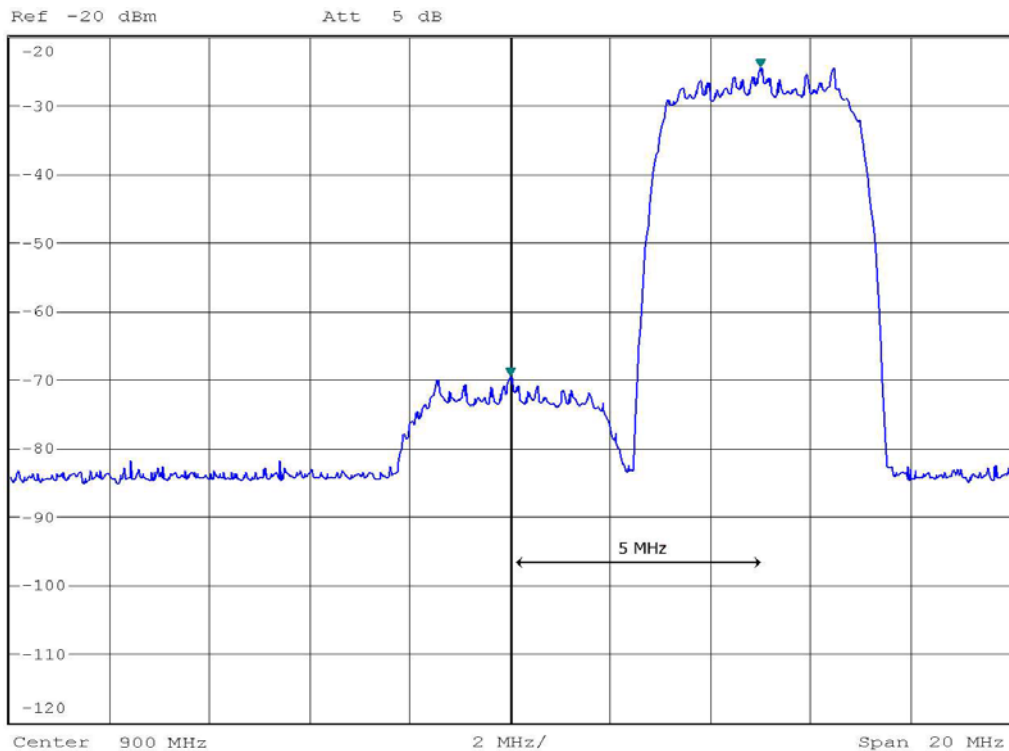
Obr. 5.13. Spektrum užitečného (vlevo) a silného interferujícího (vpravo) GSM - EDGE signálu na společném kanálu (Adjacent Channel Interference). Užitečný signál má minimální požadované CNR = 9 dB, interferenční signál je větší o 55 dB (hranice pro dosažení BER = 10^{-3}).

Tyto výsledky jsou platné i pro systém GSM - EDGE. Je totiž předpokládáno, že oba systémy pracují ve stejném pásmu 900 MHz, a že výška antény základnové stanice je asi 25 m a výška antény mobilní stanice je asi 1,5 m. Na obr. 5.15 je tato krajní situace znázorněna v podobě spektra obou sousedních signálů včetně výkonového odstupu.

5 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ V LABORATORNÍM PROSTŘEDÍ



Obr. 5.14. Vliv úrovně interferujícího signálu na bitovou chybovost užitečného signálu systému UMTS v závislosti na vzdálenosti nosných kmitočtů.



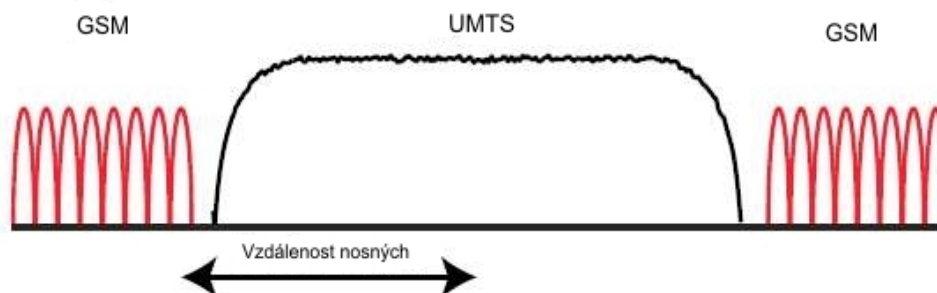
Obr. 5.15. Spektrum užitečného (vlevo) a silného interferujícího (vpravo) UMTS signálu na společném kanálu (Adjacent Channel Interference). Odstup C/Ia je asi 40 dB (hranice pro dosažení BER = 10⁻³).

5.7.3 Interference mezi systémy GSM – EDGE a UMTS

Cílem této kapitoly bude tedy zkoumání koexistence obou systémů, u kterých předpokládáme, že pracují ve společném pásmu 900 MHz. Hlavním pozorovaným aspektem bude vliv úrovně rušivého signálu, na stejném nebo sousedním kanálu, na bitovou chybovost BER užitečného signálu. Největší výhodou zavedení systému UMTS v pásmu 900 MHz je nižší nosný kmitočet, vlna na 900 MHz se bude šířit dále než její ekvivalent na kmitočtu 2100 MHz. Lepší podmínky k šíření však znamenají, že i interferující signály se budou šířit do větší vzdálenosti. Proto je potřeba vyšetřit možnost nárůstu úrovně interferencí díky tomuto lepšímu šíření vln.

Předpokládejme, že nosná systému UMTS je vložena mezi existující nosné systému GSM s dostatečnými ochrannými pásmy na obou krajích (tzv. „sandwich“). Tuto situaci znázorňuje obr. 5.16. Velikost těchto ochranných pásem je právě předmětem tohoto zkoumání, protože nedostatečná vzdálenost nosných může vést k degradaci kvality a kapacity systému díky ACI, tzv. rušení ze sousedního kanálu.

Běžná opatření pro ochranná pásma vycházejí z předpokladů o selektivitě přijímače (ACS) a kvalitě vysílače ve smyslu prosakování výkonu do sousedních pásem (ACLR). Bylo zjištěno, že dominantní ztrátu kapacity způsobují interference z uplinku systému GSM na uplink systému UMTS [46]. Použití adaptivních filtrů, které mají schopnost selektivně potlačit interferující signál GSM, na základnových stanicích (Node B) vede ke značnému snížení velikosti ochranných pásem.



Obr. 5.16. Kmitočtový plán typu „sandwich“ – vložení nosné systému UMTS mezi existující nosné systému GSM.

Schéma měření bylo opět podobné. Oba dva signály, jak užitečný GSM - EDGE tak interferující UMTS, byly přenášeny na společném kanálu. Výkony vysílačů obou signálů byly nastavovány odděleně, velikost kroku byla 1 dB. Přijímač byl přizpůsoben na užitečný signál GSM - EDGE a prováděl výpočty hrubé bitové chybovosti BER v závislosti na nastaveném výkonu obou signálů. Stejně měření bylo provedeno i pro opačný případ, kdy signál UMTS byl považován za užitečný a signál GSM - EDGE jako interferující. Dosažené výsledky jsou zobrazeny na obr. 5.18 a 5.19, tabulka 5.17 poskytuje shrnutí naměřených hodnot.

Jak lze vidět z obou obrázků, při vzdálenosti nosných obou systémů do 2,2 MHz včetně dochází k významnému nárůstu bitové chybovosti, má-li interferující signál jen o několik dB větší signál. Lze tedy říci, že v systému narůstá úroveň interferencí a dochází ke snížení výkonnosti systémů.

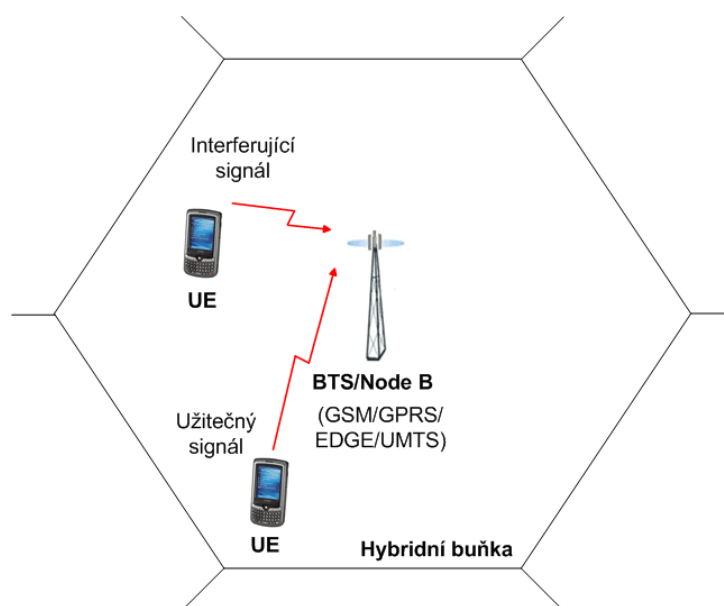
5 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ V LABORATORNÍM PROSTŘEDÍ

Tab. 5.17. Shrnutí vlivu vzdálenosti nosných na interference v systému.

Vzdálenost nosných (MHz)	UMTS jako užitečný signál	GSM - EDGE jako užitečný signál
do 2	Nedostatečná	Nedostatečná
2,2	Nedostatečná	Nedostatečná
2,4	Na hranici	Nedostatečná
2,6	Dostatečná	Na hranici

V prvním případě, kdy uvažujeme systém GSM - EDGE jako užitečný, není dostatečná vzdálenost nosných ani 2,4 MHz. Výkonová rezerva je pouhých 25 dB pro dosažení nominální chybovosti $BER = 10^{-3}$. Tato hodnota není dostatečná pro zajištění bezproblémového provozu a může způsobit snížení kvality systému. Pro vzdálenost nosných 2,6 MHz už lze dosáhnout lepšího výsledku, konkrétně výkonové rezervy 35 dB. Tuto hodnotu lze považovat za hraniční, kdy za splnění dalších podmínek je možné dosáhnout dostatečné kvality systému.

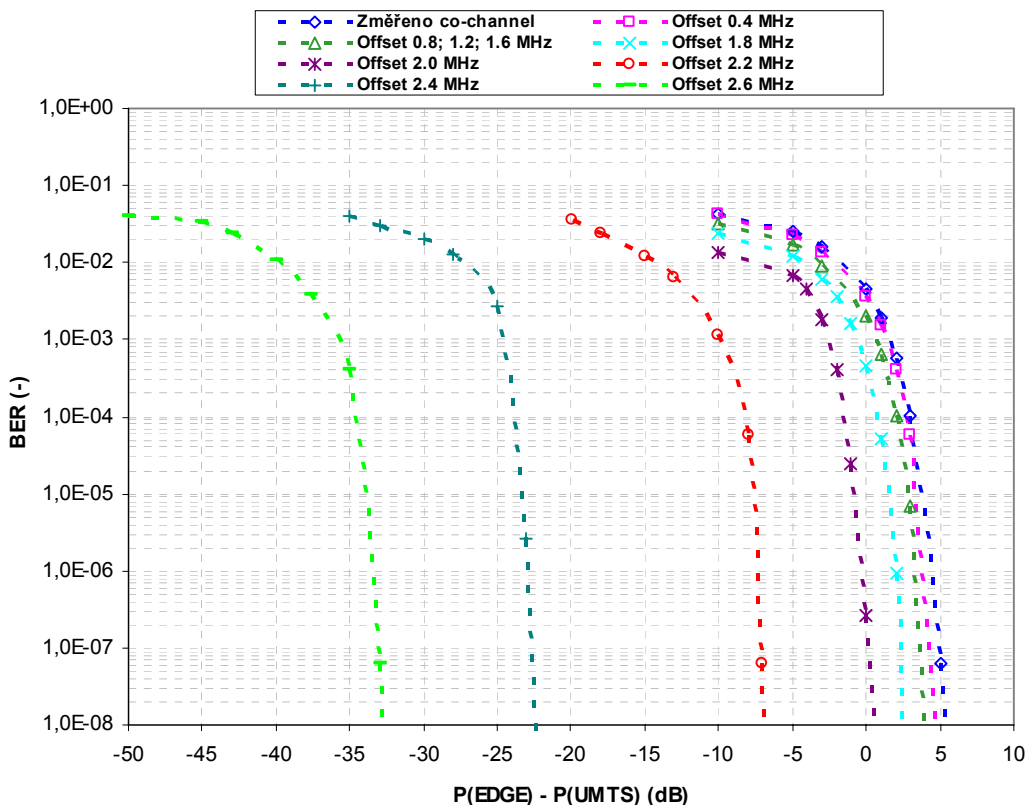
Ve druhém případě, kdy uvažujeme systém UMTS jako užitečný, se dostáváme na tuto hranici už pro kmitočtový odstup nosných 2,4 MHz. Zde je rezerva 37 dB. Pro vzdálenost nosných 2,6 MHz už je výkonová rezerva velmi významná a to skoro 48 dB. Tato hodnota už by neměla snižovat kvalitu ani kapacitu systému, nedojde k nárůstu úrovně interferencí. Lze tedy odvodit, že širokopásmový signál systému UMTS je více odolnější proti rušení v sousedním kanálu, než úzkopásmový signál systému GSM - EDGE.



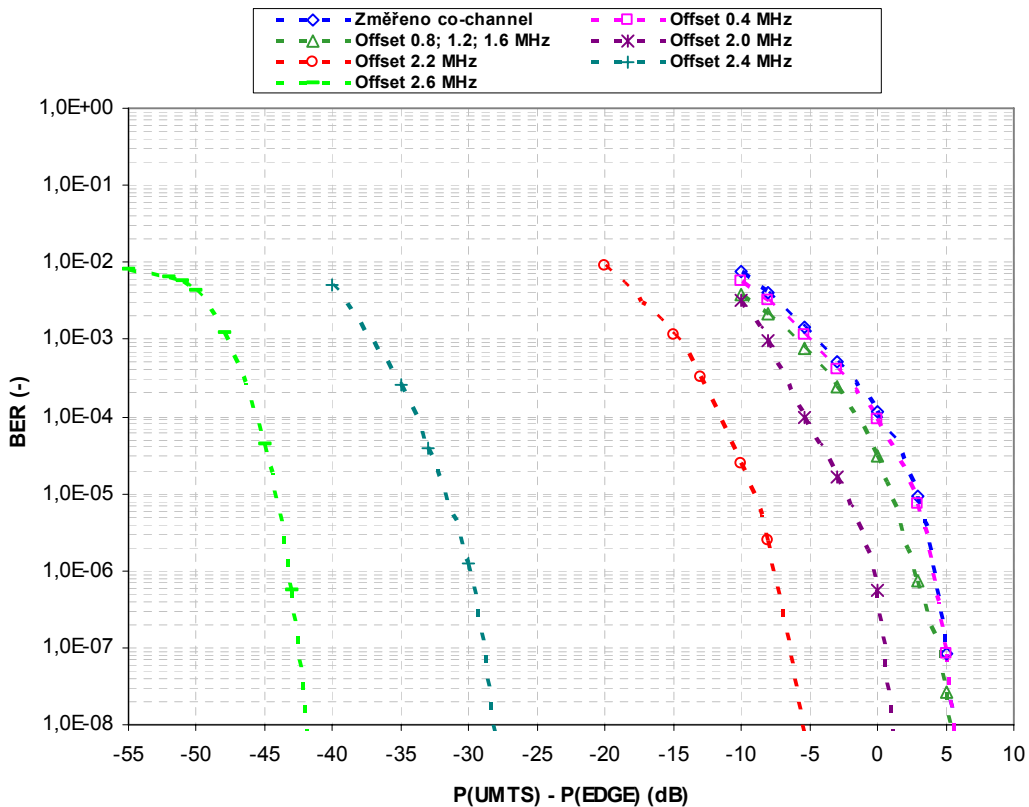
Obr. 5.17. Interferenční schéma (Inter-system Interference).

Obr. 5.17 ilustruje danou situaci, kdy silnější interferující signál může způsobit blokování užitečného signálu, pracují-li oba systémy ve společném rádiovém pásmu a sdílejí-li společně základnové stanice, případně nacházejí-li se základnové stanice obou systémů v dostatečné blízkosti.

5 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ V LABORATORNÍM PROSTŘEDÍ



Obr. 5.18. Vliv úrovně interferujícího signálu UMTS na bitovou chybovost užitečného signálu GSM - EDGE v závislosti na vzdálenosti nosných kmitočtů.



Obr. 5.19. Vliv úrovně interferujícího signálu GSM - EDGE na bitovou chybovost užitečného signálu UMTS v závislosti na vzdálenosti nosných kmitočtů.

Minimální hodnota vzdálenosti nosných obou systémů by tedy neměla být menší než 2,6 MHz, chceme-li bez nějaké další koordinace vložit nosnou systémů UMTS mezi existující nosné systémů GSM - EDGE v pásmu 900 MHz. Za hraniční hodnotu je považována vzdálenost 2,4 MHz. Menší vzdálenost může způsobit významné zvýšení úrovně interferencí v systému. Není tedy nezbytné využít celý přidělený kanál systému UMTS o šířce 5 MHz. Tím lze dosáhnout úspory v rádiovém spektru a dosáhnout tak větší efektivity při vhodném kmitočtovém plánování [52].

5.7.4 Měření vazebního útlumu (ACP) mezi sousedními kanály

Pro potřeby efektivnějšího kmitočtového plánování byly změřeny hodnoty izolace (schopnosti filtrů potlačit nežádoucí složky) mezi sousedními kanály v závislosti na vzdálenosti nosných. Oba vysílače, užitečný i interferující, vysílaly těsně vedle sebe (bez dodatečné izolace) a byly měřeny hodnoty ACP při různém výkonovém rozdílu obou signálů. Mezní limity izolací byly odečteny pro definované hrubé chybovosti BER 10^{-3} a 10^{-6} , a dále pro doporučenou BLER (*Block Error Ratio*) 10^{-2} ($\sim 10^{-3}$ BER pro UMTS a $0,5 \cdot 10^{-4}$ pro GSM). Limitem měření byl dynamický rozsah přijímače – maximální rozdíl výkonů, kdy ještě přijímač dokázal dekódovat signál, byl cca 60 dB. Naměřené hodnoty pro různé scénáře jsou v tabulkách 5.18 – 5.20.

Minimální nutná izolace mezi sousedními kanály vycházející z požadavků je určena vztahem (5.15) a její hodnota je 33 dB. Jak nám ukazují výsledky měření, skutečné hodnoty jsou o několik dB větší a splňují přísnější kritéria. Potřebné vazební útlumy, které byly vypočítány v kapitole 5.3, lze pak o tuto hodnotu rozdílu mezi požadavky a skutečnými hodnotami snížit.

Tab. 5.18. Hodnoty ACP při rušení mezi dvěma nosnými systémů UMTS.

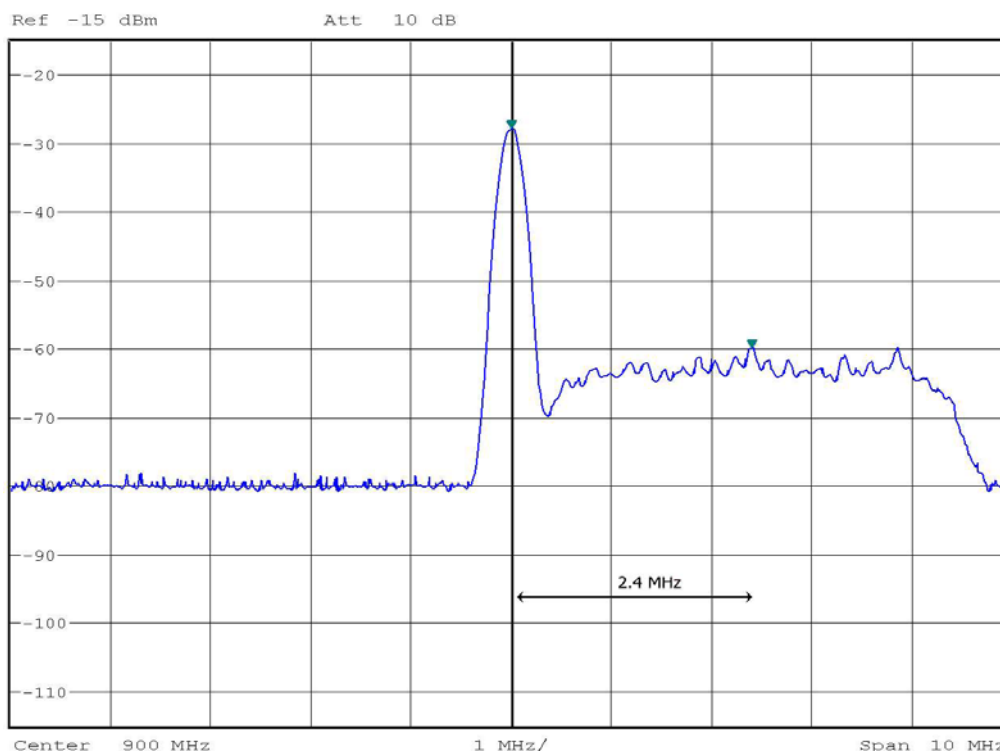
Vzdálenost nosných (MHz)	4,4	4,6	4,8 a více
ACP (dB), BER < 10^{-3}	36	49	51
ACP (dB), BER < 10^{-6}	31	45	46

Pro případ rušení mezi sousedními kanály systému UMTS jednoho operátora tedy stačí vzdálenost nosných 4,4 MHz pro dosažení hrubé chybovosti BER = 10^{-3} . Změřená hodnota izolace je 36 dB a je o 3 dB větší než minimální nutná. Případné rušení lze pak potlačit vhodným řízením výkonu a při přiblížení k interferující BTS lze provést handover na sousední nosnou (IF-HO).

V případě, že se jedná o sousední kanály různých operátorů, je vhodné mezi nosnými zavést ochranné pásmo a zvětšit tak vzdálenost nosných nad 5 MHz (obr. 5.21). Druhou variantou, která již byla zmíněna dříve, je umístění základnových stanic na společné místo.

V případě, kdy je užitečný signál systému UMTS rušen signálem GSM - EDGE stejného operátora, postačuje při splnění jistých podmínek vzdálenost nosných 2,4 MHz. Izolace je v tomto případě 25 dB. Zavedením dalších opatření lze izolaci zvýšit, zejména sdílí-li oba systémy společné vybavení (kvalitní duplexery), případně handoverem mezi samotnými systémy (IS-HO, *Inter-System Handover*). Pro ostatní případy je potřebný minimální odstup nosných 2,6 MHz a více (obr. 5.22). Změřené hodnoty izolací poskytuje tab. 5.19.

5 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ V LABORATORNÍM PROSTŘEDÍ



Obr. 5.20. Společné spektrum systému GSM - EDGE a UMTS, vzdálenost nosných mezi oběma systémy 2,4 MHz, minimální hranice, rozdíl úrovní výkonů je 35 dB.

Tab. 5.19. Hodnoty ACP při rušení systému UMTS systémem GSM - EDGE.

Vzdálenost nosných (MHz)	2,2	2,4	2,6	2,8 a více
ACP (dB), BER < 10 ⁻³	4	25	49	51
ACP (dB), BER < 10 ⁻⁶	1	23	45	46

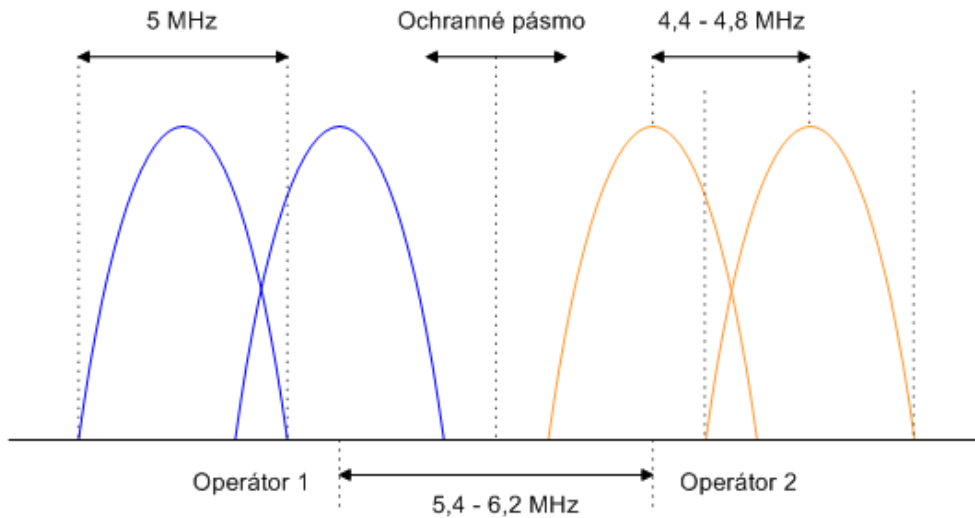
V případě, kdy je užitečný signál systému GSM - EDGE rušen signálem UMTS jakéhokoliv operátora (obr. 5.22), je vzdálenost nosných 2,4 MHz nedostatečná. Izolace je v tomto případě pouhých 18 dB. Systém GSM - EDGE je méně odolný vůči širokopásmovému signálu UMTS, naopak systém UMTS díky technice CDMA je více odolný vůči úzkopásmovému rušení GSM - EDGE. Minimální odstup nosných by tak měl být 2,6 MHz a více (viz. tab 5.20).

Tab. 5.20. Hodnoty ACP při rušení systému GSM - EDGE systémem UMTS.

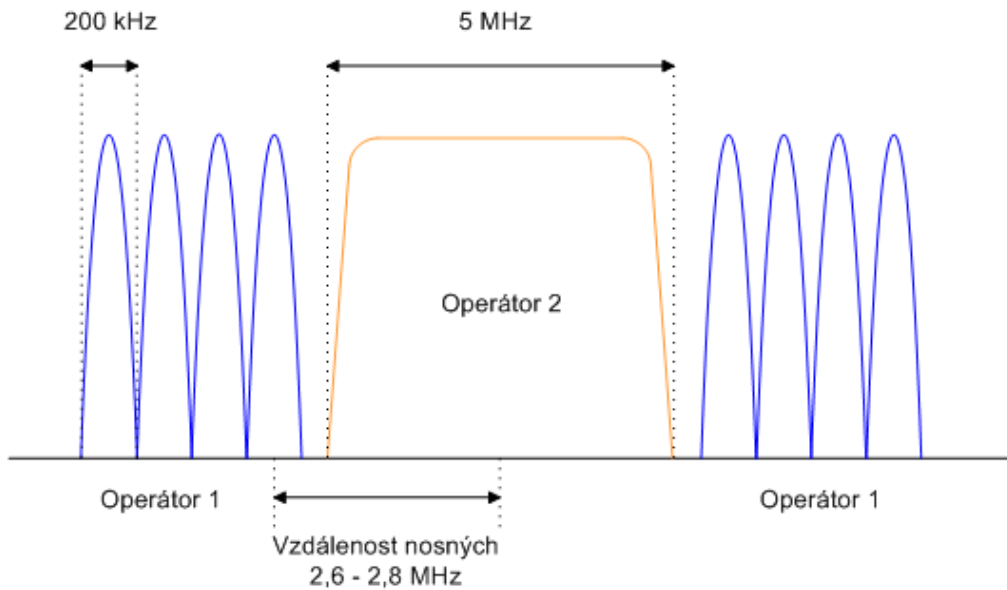
Vzdálenost nosných (MHz)	2,2	2,4	2,6 a více
ACP (dB), BER < 10 ⁻³	7	20	54
ACP (dB), BER < 5.10 ⁻⁴	6	18	52
ACP (dB), BER < 10 ⁻⁶	5	16	51

Vhodným odstupem nosných mezi sousedními kanály lze tedy účinně měnit potřebné izolace ACP a zvyšovat nebo snižovat potřebný vazební útlum. V případě jednoho operátora je vhodné vzdálenost nosných v rámci systému UMTS nebo mezi systémem UMTS a GSM měnit směrem dovnitř, tedy zmenšovat a potřebnou izolaci zajistit jinými metodami. V případě dvou a více operátorů je vhodné vzdálenost

nosných na hranici mezi operátory zvětšovat a tím tak dosáhnout potřebné izolace. Jiné možnosti totiž nemusí být proveditelné [52].



Obr. 5.21. Varianta pro dvojici operátorů UMTS při umístění v sousedním kanálu a zobrazení potřebného ochranného pásma.



Obr. 5.22. Varianta pro jednoho operátora UMTS, kdy je nosná umístěna mezi existující nosné systémy GSM druhého operátora.

5.7.5 Opatření pro koexistenci ve společném pásmu

V této kapitole bude rozebrán nejhorší případ, kdy budeme uvažovat minimální limity výkonových masek, parametrů ACLR a ACS, které jsou kladeny na vysíláče a přijímače obou systémů.

Jako hlavní opatření pro zvětšení potřebné izolace jsou uvažovány přídavné filtry (vysílací i přijímací), duplexery a oddělení antén interferujících systémů (horizontální, vertikální). Potřebná izolace se tedy dosáhne sečtením útlumu nebo selektivity všech výše zmíněných prvků

$$L_{\min} = L_{Tx,Rx} + L_{Dup} + L_P, \quad (5.25)$$

kde $L_{Tx,Rx}$ je útlum přídavných filtrů na nežádoucích kmitočtech, L_{Dup} je útlum duplexeru na nežádoucích kmitočtech a L_P je útlum vlny při prostorové separaci antén.

Rušení nežádoucími emisemi (Out-of-bound emissions)

1) Vysílač BTS systému UMTS ruší přijímač BTS systému UMTS v sousedním kanálu.

Limit výstupní úrovně výkonové masky vysílače UMTS pro vzdálenost nosných nad 3,5 MHz je -13dBm/1 MHz, což odpovídá -6 dBm/5 MHz (šířka kanálu UMTS, [32]). Pokud uvážíme, že rušivý signál by měl být alespoň 3 dB pod šumovou hranicí přijímače, pak je potřebná izolace rovna $-6 - (-106) = 100$ dB.

V případě vzdálenosti nosných 4,4 MHz dosahuje izolace mezi kanály hodnoty 36 dB (viz tab. 5.18). Je tedy nutné zajistit další přídavný útlum o velikosti 64 dB. První variantou je instalace přídavných pásmových filtrů se strmou charakteristikou mezi propustným a nepropustným pásmem. Dostupné jsou v současnosti filtry [53] – [57] s potlačením minimálně 40 dB, kdy vzdálenost mezi propustným a nepropustným pásmem je 1,5 MHz a více. Pokud takovýto filtr nainstalujeme do vysílače i přijímače, získáme tak minimálně 80 dB potřebného útlumu a díky vlastní selektivitě 36 dB dosáhneme izolace dostatečných 116 dB. Druhá varianta je použití jednoho filtru jen na straně vysílače a duplexeru, který poskytuje běžně 40 až 50 dB izolaci [53], [56], [57]. Poslední varianta je užití jednoho filtru nebo duplexeru, a prostorové oddělení antén. Potřebných 50 až 60 dB útlumu lze dosáhnout vertikálním nebo horizontálním oddělením. Pro horizontální oddělení použijeme opět rovnici pro útlum vlny v mikrobuňce (COST231 – Walfisch – Ikegami model [47])

$$L = 42,6 + 26 \log(d) + 20 \log(f), \quad (5.26)$$

kde d je horizontální vzdálenost v km a f je kmitočet v MHz. Pro kmitočet 900 MHz to znamená tedy minimální vzdálenost 5 m (je nutné korigovat o poměrný zisk obou antén). Pro vertikální oddělení použijeme vztah

$$L_v = 28 + 40 \log\left(\frac{h}{\lambda}\right), \quad (5.27)$$

kde h je vertikální vzdálenost obou antén nad sebou v m a λ je vlnová délka. Předpokladem je stejný sklon antén, resp. úhlový rozdíl jejich svislých os 180° . Pro kmitočet opět 900 MHz dostáváme minimální vzdálenost asi 0,7 m.

V případě nosných vzdálených 4,6 MHz (resp. 4,8 MHz) je dosažená izolace 49 dB (resp. 51 dB, viz tab. 5.18). V těchto případech je nutné další zvýšení o cca 50 dB. První variantou je instalace jednoho přídavného filtru, případně duplexeru, který nám zajistí požadovaných 50 dB. Druhá varianta spočívá jen ve vhodném umístění antén. Pro vertikální separaci stačí pouhých 1,2 m dle (5.27), pro horizontální je nutné minimálně 10 m dle (5.26). Opět je ale nutné počítat se ziskem antén a jejich natočením.

2) Vysílač BTS UMTS ruší přijímač BTS GSM - EDGE na sousedním kanálu.

Limit výstupní úrovně výkonové masky vysílače UMTS pro vzdálenost nosných od 2,5 do 2,7 MHz je -14 dBm/30 kHz [32], což odpovídá -6 dBm/200 kHz (šířka kanálu GSM). Pokud uvážíme, že rušivý signál by měl být alespoň 3 dB pod šumovou

hranicí přijímače, pak je potřebná izolace rovna $-6 - (-123) = 117$ dB. Pro vzdálenost nosných od 2,7 do 3,5 MHz je tento limit -7 dBm/200 kHz, tzn. izolaci 116 dB.

Pro vzdálenost 2,6 MHz byly naměřeny hodnoty potlačení sousední nosné přibližně 52 až 54 dB (tab. 5.20). Je tedy potřeba zajistit dalších $117 - 52 = 65$ dB potřebné izolace mezi oběma systémy. Možné varianty byly zmíněny výše. Jako nutné se tedy jeví buď použití dvou filtrů (přidaných jak na straně vysílače tak přijímače), případně jednoho filtru vysílače a duplexeru (při společném vybavení, *co-siting*) a nebo jednoho filtru a vhodné separace antén.

Řešení bez filtrů (a tedy přídavných nákladů) lze řešit jen vhodným umístěním antén, které ovšem nemusí být vždy dostupné. V tomto případě znamená útlum 65 dB horizontální oddělení antén minimálně 40 m (opět nutno korigovat podle zisku antén a vzájemného natočení, dle (5.26)) nebo vertikálnímu oddělení min. 2,8 m (5.27) pro kmitočtové pásmo kolem 900 MHz. Menší vzdálenost nosných než 2,6 MHz znamená velké náklady na kvalitní filtry. Naopak, vzdálenost nosných od 2,8 MHz výše lze řešit pravděpodobně pouze separací antén, ale přesné výsledky nemohou být uvedeny z důvodu nedostatečného dynamického rozsahu signálového analyzátoru a tedy nemožnosti změřit izolaci mezi sousedními kanály.

3) Vysílač GSM - EDGE ruší přijímač UMTS na sousedním kanálu

Limit výstupní úrovně výkonové masky vysílače GSM pro vzdálenost nosných od 1,8 do 6 MHz je -75 dBm/100 kHz ($P_T = 43$ dBm, [28]), což odpovídá -58 dBm/5 MHz (šířka kanálu UMTS). Pokud uvážíme, že rušivý signál by měl být alespoň 3 dB pod šumovou hranicí přijímače, pak je potřebná izolace rovna $-58 - (-106) = 48$ dB.

Tuto izolaci nám při vzdálenosti nosných od 2,6 MHz výše poskytuje samotná selektivita přijímače ACS (viz tab. 5.19) bez dalších přídavných opatření. Pro vzdálenost nosných 2,4 MHz je potřeba jednoho přídavného filtru. Lze tedy pozorovat, že vysílač GSM ruší přijímač UMTS v sousedním kanálu mnohem méně, než je tomu naopak. Pro provoz je tedy nutné splnit přísnější podmínku – doporučená minimální vzdálenost by měla být alespoň 2,6 MHz.

Blokování přijímače (Receiver blocking)

Rušení nežádoucími emisemi představuje větší nebezpečí a klade přísnější podmínky na izolaci než samotné blokování přijímače, a proto tedy blokování nebude podrobně řešeno. Blokování přijímače UMTS znamená 95 dB izolace při předpokladu, že maximální tolerovatelná úroveň signálu v sousedním kanálu je -52 dBm [32] a maximální úroveň vysílaného výkonu BTS je 43 dBm. Blokování přijímače GSM znamená 68 dB (76 dB) izolace při předpokladu, že maximální tolerovatelná úroveň signálu v sousedním kanálu je -25 dBm (-33 dBm) pro GSM1800 (resp. GSM900) podle [28] a maximální úroveň vysílaného výkonu BTS je rovněž 43 dBm.

Rušení mezi UE a BTS a mezi samotnými UE

Na tato rušení jsou opět kladeny menší požadavky, než na vzájemné rušení mezi základnovými stanicemi, ať už se jedná o nežádoucí emise nebo blokování přijímače.

Maximální úroveň vysílaného výkonu UE je řádově o 20 dB menší (uvažujeme zařízení třídy 3, která umožňuje maximální vysílací výkon 21 dBm a je schopna pracovat univerzálně s oběma systémy v pásmech GSM900, GSM1800 a UMTS) než u vysílače základnové stanice. Přijímač UE má navíc menší citlivost než přijímač BTS.

5 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ V LABORATORNÍM PROSTŘEDÍ

Mobilní stanice jsou umístěny náhodně v buňce, navíc v převážné většině případů je nepojí přímá viditelnost [47] a proto je interferující signál daleko více utlumen. Díky všem těmto faktorům je riziko interferencí mnohem menší než mezi BTS.

Stejně tak je riziko interferencí mezi BTS a MS, ať už v UL nebo DL, mnohem menší než mezi samotnými BTS díky MCL. Potřebné izolace jsou řádově o několik desítek dB menší.

Následující tabulky shrnují řešení pro dosažení potřebné izolace pro výše zmíněné případy.

Tab. 5.21. Návrh řešení při rušení mezi vysílačem a přijímačem BTS systému UMTS.

Vzdálenost nosných (MHz)	ACP (dB)	Útlum filtrů a duplexeru (dB)	Izolace antén (dB), Vzdálenost (m)		Dosažená izolace (dB)
4,4	36	80	-		116
	36	40	40	5 / 0,7	
4,6 – 4,8	50	50	-		100
		-	50	10 / 1,2	
Potřebná izolace (dB)	100				

Tab. 5.22. Návrh řešení při rušení mezi vysílačem BTS systému UMTS a přijímačem BTS systému GSM-EDGE

Vzdálenost nosných (MHz)	ACP (dB)	Útlum filtrů a duplexeru (dB)	Izolace antén (dB), Vzdálenost (m)		Dosažená izolace (dB)
2,6	52	65	-		117
	52	-	65	40 / 2,8	
	52	40	25	2 / 0,3	
2,8	> 52	< 65	-		117
		-	< 65	< 40 / 2,8	
Potřebná izolace (dB)	117				

Tab. 5.23. Návrh řešení při rušení mezi vysílačem BTS systému GSM-EDGE a přijímačem BTS systému UMTS.

Vzdálenost nosných (MHz)	ACP (dB)	Útlum filtrů a duplexeru (dB)	Izolace antén (dB), Vzdálenost (m)		Dosažená izolace (dB)
2,4	18	40	-		58
	18	-	40	5 / 0,7	
2,6	52	-	-		52
Potřebná izolace (dB)	48				

5.7.6 Srovnání naměřených hodnot izolací s hodnotami získanými simulacemi

Dostupná použitá měřicí technika umožnila pouze měření referenčního kanálu UMTS 12,2 kb/s, zatímco simulace (viz kapitola 4.3) byly provedeny pro všechny referenční testovací kanály (tab. 5.1). Jako referenční kanál systému GSM-EDGE byl zvolen kanál s modulací GMSK a konstantní symbolovou rychlostí 270,833 kS/s – z důvodu menšího potlačení úrovně výkonu v sousedních kanálech ACLR ve vzdálenosti 200 kHz od nosné (tab. 5.12). Zabezpečení signálů jako kanálové kódování, prokládání, apod., nebylo uvažováno, protože byla relevantní pouze hrubá bitová chybovost BER s referenční hodnotou 10^{-3} . Simulace pro poměrnou vzdálenost nosných 22 kHz a menší nebyla provedena, protože měření [52] ukázala, že tato vzdálenost poskytuje minimální izolaci. Naopak měření pro vzdálenost nosných 3 MHz nebylo provedeno z důvodu nedostatečné citlivosti analyzátoru.

Tab. 5.24. Srovnání izolací ACP získaných simulacemi a měřeními při rušení systému UMTS systémem GSM – EDGE, referenční kanál UMTS 12,2 kb/s.

Vzdálenost nosných (MHz) - měření	2,2	2,4	2,6	2,8	-
Poměrná vzdálenost nosných (kHz) - simulace	-	24	26	28	30
ACP (dB), BER < 10^{-3} - měření	4	25	49	51	-
ACP (dB), BER < 10^{-3} - simulace	-	28	42	45	67

Stejně tak nebyly provedeny simulace opačného stavu, kdy vysílač interferenčního signálu systému UMTS ruší přijímač užitečného signálu GSM – EDGE. Měření opět ukázala, že hodnoty izolací ACP jsou téměř stejné pro minimální doporučovanou vzdálenost 2,4 MHz a vyšší (viz tab. 5.19 a 5.20).

Tab. 5.24 uvádí srovnání výsledků dosažených simulacemi a měřeními. Izolace ACP mezi sousedními kanály je pro oba případy srovnatelná, liší se řádově v jednotkách dB. Lze tedy říci, že simulace byly provedeny s dostatečnou přesností, a pokud bychom z toho chtěli odvodit izolaci pro vzdálenost nosných 3 MHz, tak by se pohybovala kolem 70 dB. V tomto případě by pro zajištění bezpečného provozu stačilo pouze vhodné umístění a natočení antén. Rozhodující roli pro konkrétní hodnotu izolace mezi sousedními kanály má přesná charakteristika použitého filtru. Dále je potřeba izolaci korigovat podle použitého referenčního kanálu. Uvážíme-li referenční kanál 12,2 kb/s a 384 kb/s, pak je rozdíl izolací až 15 dB (viz tab. 4.2). Tento rozdíl je dán ziskem kódování a činí právě oněch 15 dB ($10 \log(384000/12200) = 15$ dB).

5.8 Zhodnocení

V této kapitole byly prezentovány výsledky experimentálních měření koexistence systémů GSM – EDGE a UMTS. Nutným předpokladem byl rozbor požadavků kladených na měření (zejména splnění klíčových parametrů vysílače a přijímače) a dále rozbor možných druhů interferencí. Jako hlavní příčiny interferencí byly uvedeny nežádoucí emise vysílače a intermodulační produkty 3. řádu. Důsledkem těchto jevů může vzniknout tzv. blokování přijímače.

Pro ověření byly testovány hlavní parametry signálů obou systémů, které mají vliv na interference, zejména šířka spektra a prosakování výkonu do sousedního kanálu

ACLR. Zkoumány byly i interference uvnitř samotných systémů při rušení ze sousedních kanálů pro zjištění vlastních izolací (potřebný poměr C/I_a pro zajištění kvalitního provozu).

Následně byly shrnuty potřebné izolace mezi vysílači a přijímači obou systémů pro bezproblémový provoz (potlačení interferencí) a to jak pro oddělená pásma GSM900, GSM1800 a UMTS, tak pro provoz ve společném pásmu 900 MHz. Byla navržena řešení, která tyto potřebné izolace splnila. Klíčovým bylo zejména měření izolací mezi sousedními kanály při provozu ve společném pásmu, což lze označit jako nejhorší případ. Na základě těchto měření byla po splnění některých opatření navržena minimální a doporučená vzdálenost nosných mezi oběma systémy. Účelem bylo efektivnější využití přiděleného kmitočtového pásma.

6 Doporučení pro minimalizaci interferencí při praktickém provozu

Pro shrnutí opatření za účelem minimalizace interferencí je třeba rozlišit dva případy – koexistence systémů v odděleném pásmu (v ČR používá systém GSM pásmo 900 a 1800 MHz, a systém UMTS pásmo kolem 2000 MHz) a koexistence systémů ve společném pásmu 900 MHz, což lze považovat za nejhorší případ. Výhody a nevýhody provozu ve společném pásmu byly zmíněny dříve (kapitola 5.7.3). Dále je nutné brát v úvahu, zda-li oba systémy mají BTS na společném místě nebo na odlišném místě, a zda-li sdílí společné vybavení (zejména vedení a antény). Standardy totiž kladou na tyto dva případy jiné požadavky.

Provoz v odděleném pásmu 900, 1800 a 2000 MHz:

- Předpokladem dosažení všech uvedených výsledků je dodržení minimálních limitů výkonových masek vysílačů a selektivity přijímačů dle standardů [28], [32].
- Umístění BTS na odlišném místě:
 - Největší vliv na interference v systému mají nežádoucí emise z vysílače signálu UMTS – nutnost izolace min. 65 dB (tab. 5.11).
 - Riziko blokování přijímače je opět větší u systému UMTS – nutná izolace min. 61 dB (tab. 5.11).
 - Pokud se interferující BTS nachází v relativně blízké oblasti, je vhodné použít přídavný vysílací nebo přijímací filtr s potlačením nežádoucího pásma alespoň 40 dB (kapitola 5.4.3).
 - Pokud se nacházejí ve vzdálenosti alespoň 20 až 40 m od sebe (dle kmitočtu), pak není nutný přídavný filtr. Izolaci nám zajistí samotný útlum vlny šířením (kapitola 5.4.3).
- Umístění na společném místě:
 - Největší riziko představuje v tomto případě blokování přijímače systému GSM1800. Nutná izolace je min. 46 dB (tab. 5.11).
 - Při společném vedení a anténě je velmi výhodné použít duplexer s potlačením nežádoucího pásma interferujícího signálu alespoň 50 dB. Duplexery s touto izolací jsou běžně dostupné [53], [56] a [57].
 - Pokud oba systémy používají oddělené vybavení, tak je řešením jeden přídavný filtr (nejlépe vysílače, min. útlum 40 až 50 dB), nebo dostatečná separace antén – 0,5 m vertikálně, 5 m horizontálně (korekce dle zisku v příslušném směru antén, kapitola 5.4.3).

Provoz ve společném pásmu 900 MHz:

- Předpokladem je opět dodržení minimálních limitů výkonových masek dle standardů. Hodnoty izolací mezi sousedními kanály ACP se předpokládají na takové úrovni, jako byly změřeny v kapitole 5.7.4. Pro koexistenci ve společném pásmu se nerozlišuje umístění stanic BTS, ale pouze potřebné izolace k zamezení interferencí.
- Stejně jako v případě koexistence v odděleném pásmu je největším rizikem rušení přijímače GSM vysílačem UMTS. Nutná min. izolace je 117 dB (kapitola 5.7.5).
- Řešení je závislé na konkrétní hodnotě vzdálenosti nosných mezi oběma systémy – viz tab. 5.21 až 5.23. Při sdílení vybavení je opět vhodné použití duplexerů s potlačením nežádoucích kmitočtů cca 50 dB, případně přidavných filtrů (útlum v nepropustném pásmu 40 až 50 dB). V případě řešení pouhou separací antén se minimální horizontální vzdálenosti pohybují v rozmezí 5 až 40 m a minimální vertikální vzdálenosti v rozmezí 0,7 až 2,8 m (dle vzdálenosti nosných). Samozřejmě je možný způsob řešení kombinací uvedených metod.
- Doporučované vzdálenosti nosných pro minimalizaci interferencí (detaily viz kapitola 5.7.4):
 - Interference uvnitř systému UMTS – minimální vzdálenost mezi nosnými jednoho operátora byla stanovena na 4,4 MHz. V tomto případě je ale nutné zavést přísná opatření. Doporučovaná vzdálenost je alespoň 4,6 MHz, kdy izolace mezi sousedními kanály dosahuje až 50 dB. V takovém případě lze ušetřit přidělené spektrum, které je možné využít na zvýšení kapacity sítě přidáním další nosné. V případě vzdálenosti nosných mezi jednotlivými operátory se doporučuje zavedení ochranného pásma – vzdálenost mezi nosnými od 5,4 MHz.
 - Interference mezi systémy GSM – EDGE a UMTS – minimální vzdálenost mezi nosnými obou systémů byla stanovena na 2,4 MHz. Tato vzdálenost se doporučuje jen pro případ, že oba systémy na sousedních nosných provozuje jeden operátor, který přidavnými opatřeními zvýší další potřebnou izolaci. Doporučená vzdálenost je 2,6 MHz, kdy izolace ACP mezi sousedními kanály dosahuje 50 dB a více.

Pro budoucí potřeby je dobré vyhnout se přidavným opatřením jak z hlediska ekonomického tak technického (kapacita, kvalita), a proto je vhodné zvýšit nároky na selektivitu filtrů (ACS) a na omezení prosakování nežádoucího výkonu signálu do sousedních kanálů (ACLR) – zvětšení strmosti přechodů filtrů z propustného do nepropustného pásma. Následně by bylo možné zmenšit nutnou vzdálenost nosných mezi systémy. Nové technologie se neustále vyvíjejí, je tedy jen otázkou času, kdy se na tyto opatření přistoupí.

7 Závěr

V současné době je zkoumání a ověření koexistence různých rádiových systémů velmi aktuální problematikou. Ke stávajícím sítím se uvádí do provozu stále nové bezdrátové systémy. Přidělené kmitočtové spektrum je velmi vzácné a omezené, proto je potřeba, aby tyto systémy pracovaly efektivně a bez vzájemného rušení vedle sebe.

Cílem této disertační práce bylo vytvoření modelů fyzické vrstvy mobilních systémů GSM – EDGE a UMTS, simulace a vyhodnocení kvalitativních parametrů při přenosu na rádiovém kanálu každého systému zvlášť (referenční hodnoty), simulace koexistence obou systémů při provozu ve společném pásmu (nejhorší případ) a experimentální měření a ověření koexistence obou systémů v laboratorních podmínkách. Na základě všech získaných výsledků byly shrnuty doporučení pro provoz v praxi.

Kapitola 2 popisuje fyzickou vrstvu obou systémů, tak jak je definována standardy, dále popisuje model použitého rádiového kanálu a následně se věnuje vytvoření matematických modelů fyzické vrstvy a jejich implementaci do prostředí MATLAB. Navržené modely zpracování signálu obou systémů jsou podrobně rozebrány a popsány pomocí funkčních blokových schémat.

Kapitola 3 se věnuje simulacím samotných systémů GSM – EDGE a UMTS při přenosu signálů na rádiovém kanálu (AWGN, úniky typu Rice). Účelem bylo získání referenčních hodnot bez rušení jiným systémem, zejména požadované poměry CNR (resp. E_b/N_0) pro různá kódovací schémata (resp. činitele rozprostření) a pro uvedené referenční bitové chybovosti BER. U každého systému jsou pro různé vstupní podmínky prezentovány výsledky provedených simulací včetně grafů a komentáře.

Vlastními simulacemi koexistence obou systémů ve společném pásmu se zabývá kapitola 4. Simulace byly rozděleny na dva případy rušení – v základním pásmu (bez modulace na nosnou vlnu) a rušení ze sousedního kanálu. V prvním případě bylo účelem vyhodnocení odolnosti a potřebných poměrů CNR (resp. E_b/N_0) obou systémů pro danou referenční chybovost BER při rušení ve stejném kanálu (co-channel interference). Výsledkem byly konkrétní hodnoty CNR pro signál systému GSM – EDGE při rušení širokopásmovým signálem systému UMTS a hodnoty E_b/N_0 pro signál UMTS (kódový zisk rozprostřením) při rušení úzkopásmovým signálem systému GSM – EDGE. V druhém případě bylo účelem získání hodnot izolací ACP při rušení signálu systému UMTS ze sousedního kanálu signálem systému GSM – EDGE, aby mohly být následně podrobeny srovnání s výsledky experimentálních měření.

Kapitola 5 popisuje vlastní výsledky experimentálních měření koexistence v laboratorních podmínkách. Důležitým předpokladem před samotným měřením byl rozbor možných druhů interferencí, postup měření, zapojení pracoviště, ověření potřebných parametrů použitého vybavení (výkonová maska ACLR, konstelační diagram, tvar a šířka spektra signálu) a jejich dodržení dle předepsaných standardů.

Následně byly vypočteny minimální hodnoty izolací pro provoz v oddělených pásmech (GSM 900 a 1800 MHz a UMTS 2000 MHz) a popsána opatření pro jejich dodržení. Bylo zjištěno, že největší problémy způsobují nežádoucí emise vysílače systému UMTS a blokování přijímače systému GSM – EDGE.

Při měření koexistence byly dále ověřeny tzv. „intra - system interference“, tedy rušení uvnitř samotných systémů. Výsledkem byly hodnoty maximálních úrovní signálů v sousedních kanálech tak, aby nedošlo k omezení užitečného signálu. Oba systémy předepsané parametry splnily (v nejhorším případě s odchylkou 1 dB pod požadovanou hodnotou, což lze připsat na vrub nepřesnosti měření).

Klíčovým měřením bylo zjištění hodnot izolací mezi sousedními kanály při provozu ve společném pásmu v závislosti na vzdálenosti nosných, a to jak uvnitř samotného systému UMTS, tak navzájem mezi oběma systémy. Uvnitř systému GSM měření nemělo smysl, protože umístění kanálů na kmitočtové ose je pevné, zatímco u systému UMTS se může měnit po 200 kHz. Na základě těchto měření byly stanoveny minimální a doporučené vzdálenosti mezi nosnými obou systémů včetně potřebných opatření (přídavné filtry, duplexery, prostorová separace antén, atd.). I v tomto případě bylo zjištěno, že největší nebezpečí představují nežádoucí emise vysílače UMTS a že k potlačení tohoto rušení je potřeba největší izolace. Závěrem byla shrnuta doporučení pro minimalizaci interferencí mezi oběma systémy GSM – EDGE a UMTS, a to jak pro případ provozu v oddělených pásmech, tak pro případ provozu ve společném pásmu, na který byl kladen největší důraz, jelikož představuje nejhorší variantu.

Problematika zkoumaná v disertační práci je součástí výzkumného úkolu řešeného v rámci spolupráce se společností T-Mobile Czech Republic a.s. Dále byla tato problematika řešena v rámci doktorského grantového projektu GA ČR 102/08/H027, s názvem Pokročilé metody, struktury a komponenty elektronické bezdrátové komunikace, výzkumného záměru MŠMT České republiky MSM 0021630513, Elektronické komunikační systémy a technologie nových generací (ELKOM) a grantového projektu GA ČR 102/07/1295, Modely mobilních sítí a jejich částí.

Literatura

- [1] SPRINGER, A., WEIGEL, R. *UMTS: The Universal Mobile Telecommunications Systems*. Springer, Berlin, 2002. ISBN 3-54042162-9.
- [2] BOSTELMANN, G. *UMTS Design Details & System Engineering*. INACON GmbH, Karlsruhe, 2002. ISBN 1-58053-577-1.
- [3] HOLMA, H., TOSKALA, A. *WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications*. John Wiley & Sons Ltd, England, 2005. ISBN 0-470-87096-6.
- [4] OJANPERA, T., PRASAD, R. *Wideband CDMA for Third Generation Mobile Communications*. Artech House, Inc. Boston – London, 1998. ISBN 0-89006-735-X.
- [5] LAIHO, J., WACKER, A., NOVOSAD, T. *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*. John Wiley & Sons Ltd, 2005. ISBN 0-470-01575-6.
- [6] NAWROCKI, M., DOHLER, M., AGHVAMI, H. *Understanding UMTS Radio Network Modelling, Planning and Automated Optimisation*. John Wiley & Sons Ltd, 2006. ISBN 0-470-01567-5.
- [7] ESMAILZADEH, R., NAKAGAWA, M. *TDD-CDMA for Wireless Communications*. Artech House Publishers, 2003. ISBN 1-58053-371-X.
- [8] STAVROULAKIS, P. *Interference Analysis and Reduction for Wireless Systems*. Artech House Publishers, 2003. ISBN 1-58053-316-7.
- [9] SEURRE, E., SAVELLI, P., PIETRI, P.-J. *EDGE for Mobile Internet*. Artech House Publishers, 2003. ISBN 1-58053-597-6.
- [10] JERUCHIM, M., BALABAN, P., SHANMUGAN, K. *Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology and Techniques, 2nd edition*. Springer, 2000. ISBN 0-306-46267-2.
- [11] TRANTER, W., SHANMUGAN, K., RAPPAPORT, T., KOSBAR, K. *Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications*. Prentice Hall, 2004. ISBN 0-13-494790-8.
- [12] GLISIC, S. *Advanced Wireless Communications (4G Technologies)*. John Wiley & Sons Ltd, 2005. ISBN 0-470-86776-0.
- [13] GLEISSNER, F., HANUS, S., MIKULKA, J. Optimalization of Interference in Mobile Network. *WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS*, ISSN 1109-2742, 2005, vol. 4, n. 2, p. 180 - 185.
- [14] GLEISSNER, F., HANUS, S. Interference analysis in 2.5G network. In *Proceedings of the 4th WSEAS Int. Conf. on Information Security, Communications and Computers*. 4th WSEAS International Conference on INFORMATION SECURITY, COMMUNICATIONS and COMPUTERS (ISCOCO '05). Tenerife, Spain, 2005, p. 531 – 534, ISBN 960-8457-39-4.
- [15] GLEISSNER, F., HANUS, S. The UMTS Uplink Performance in AWGN Channel Conditions. In *Proceedings of the 15th International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK 2006*. 15th Electrotechnical and Computer Science Conference ERK'2006. Slovenia Section IEEE, Ljubljana, Slovenia, 2006, p. 119 - 122, ISSN 1581-4572.
- [16] GLEISSNER, F., HANUS, S. Impact of Allocated Radio Channels on C/I Ratio in GSM Network. In *Proceedings of the 16th International Czech-Slovak Scientific Conference RADIOELEKTRONIKA 2006*. Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia, 2006, p. 94 - 97, ISBN 80-227-2388-6.

LITERATURA

- [17] CHENG, S.-T., WANG, CH.-Y., CHEN, I.-R. Filtering Strategies for TFC Selection Schemes in 3GPP W-CDMA Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. Vol. 5, no. 5, May 2006. ISSN 1536-1276.
- [18] DAWY, Z., DAVIDOVIC, S., SEEGER, A. The Coverage-Capacity Tradeoff in Multiservice WCDMA Cellular Systems with Serial Interference Cancellation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. Vol. 5, no. 4, April 2006. ISSN 1536-1276.
- [19] 3GPP, Technical Specification 25.215, *Physical Layer Measurements (FDD)*, v5.5.0.
- [20] VAUKKA, J. *Digital Synthesizers and Transmitters for Software Radio*. Springer, 2005. ISBN 978-1-4020-3194-6.
- [21] SÝKORA, J. *Teorie digitální komunikace*. Skriptum ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02478-4.
- [22] MEHROTRA, A. *GSM System Engineering*. Artech House Publishers, 1997. ISBN 0-89006-860-7.
- [23] ITU-R, Recommendation M.1225, *Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000*.
- [24] ETSI, Technical Specification 100 573 (3GPP TS 05.01), *Digital Cellular Telecommunications System; Physical Layer on the Radio Path*, v8.9.0.
- [25] ETSI, EN 300 908 (GSM 05.02), *Digital Cellular Telecommunications System; Multiplexing and Multiple Access on the Radio Path*, v8.5.1.
- [26] ETSI, Technical Specification 100 909 (3GPP TS 05.03), *Digital Cellular Telecommunications System; Channel Coding*, v8.9.0 (2005-01).
- [27] 3GPP, Technical Specification 05.04, *Digital Cellular Telecommunications System; Modulation*, v8.3.0.
- [28] ETSI, Technical Specification 100 910 (3GPP TS 05.05), *Digital Cellular Telecommunications System; Radio Transmission and Reception*, v8.20.0 (2005-11).
- [29] ETSI, Technical Specification 100 936 (3GPP TS 04.04), *Digital Cellular Telecommunications System; Layer 1 – General Requirements*, v8.1.2.
- [30] SU, S.-F. *The UMTS Air-Interface in RF Engineering: Design and Operation of UMTS Networks*. McGraw-Hill, 2007. ISBN 978-0-07-148866-2.
- [31] 3GPP, Technical Specification 25.212, *Multiplexing and Channel Coding (FDD)*, v5.4.0.
- [32] ETSI, Technical Specification 125 104 (3GPP TS 25.104), *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Base Station (BS) Radio Transmission and Reception (FDD)*, v7.2.0.
- [33] GLEISSNER, F., RŮŽIČKA, Z., HANUS, S. UMTS - Impact of Channel Coding on BER. *Proceedings of the 15th International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK 2007*, 16(1), p. 136 - 139. ISSN 1581-4572.
- [34] GLEISSNER, F., HANUS, S. The Comparison of GSM-EDGE Signal Transmission over AWGN and Rayleigh Fading Channel. In *Proceedings of the 18th International Conference RADIOELEKTRONIKA*, 2008. Praha, Czechoslovakia Section IEEE, 2008, p. 109-112. ISBN 978-1-4244-2087-2.
- [35] SASAMORI, F. et al. Approximate Equation of Average Bit-Error Rate in DS-CDMA Systems Over Fading Channels. *IEEE Transactions on Communications*. Vol. 51, no. 3, March 2003. ISSN 0090-6778.
- [36] SIM, M., CHUAH, H. Received Signal Statistics in DS-CDMA Channels With Flat Rayleigh Fading and Fast Closed-Loop Power Control. *IEEE Transactions on Communications*. Vol. 51, no. 7, July 2003. ISSN 0090-6778.
- [37] FAN, M., HOFFMANN, C., SIU, K.-Y. Error-Rate Analysis for Multirate DS-CDMA Transmission Schemes. *IEEE Transactions on Communications*. Vol. 51, no. 11, November 2003. ISSN 0090-6778.

LITERATURA

- [38] KIM, CH.-S., OH, D.-J., MILSTEIN, L. Statistical Modeling of W-CDMA Signals for Use Over Frequency-Selective Multipath Channels. *IEEE Transactions on Communications*. Vol. 52, no. 1, January 2004. ISSN 0090-6778.
- [39] PEDERSEN, K. et al. ARQ Considerations For The New GSM/EDGE Flexible Layer One. In *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Networks ICON 2003*. IEEE, 2003, p. 717 - 722, ISBN 0-7803-7788-5.
- [40] BELLIER, T., MOISIO, M., SÉBIRE, B. Speech Capacity Enhancements in the GSM/EDGE Radio Access Network (GERAN). In *Proceedings of International Conference on Telecommunications (ICT) 2002*.
- [41] CHENG, J.-F. Coding Performance of Hybrid ARQ Schemes. *IEEE Transactions on Communications*. Vol. 54, no. 6, June 2006. ISSN 0090-6778.
- [42] HALONEN, T., ROMERO, J., MELERO, J. *GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Towards 3G/UMTS*. John Wiley & Sons Ltd, England, 2003. ISBN 0-470-86694-2.
- [43] GLEISSNER, F., MIKULKA, J. Matlab Simulation of Wireless Communication Standards. In *Proceedings of 12th International Student Conference on Electrical Engineering POSTER 2008*. Praha, ČVUT, 2008.
- [44] ETSI, Technical Specification 125 101 (3GPP TS 25.101), *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception (FDD)*, v8.2.0.
- [45] KRUGER, R., MELLEIN, H. *UMTS: Introduction and Measurement*. Rohde&Schwarz GmbH&Co. KG, Germany, 2004.
- [46] ISCO International Technology and Systems Group. *Optimization of the Spectral Efficiency of 900 MHz Codeployments of UMTS and GSM*. Technical brief, November 2007. ISCO International.
- [47] COST 231, Final report. *Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems*. <http://www.lx.it.pt/cost231/final_report.htm>
- [48] FIGUEIREDO, D., MATOS, P., RODRIGUES, A. Impact of Adjacent Channel Interference on the Capacity of WCDMA/FDD Networks. In *Proceedings of International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications WPMC*, Abano Terme, Italy, Vol. 1, pp. 283 - 287, September, 2004.
- [49] RAHNEMA, M. *UMTS Network Planning, Optimization, and Inter-operation with GSM*. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, Singapore, 2008. ISBN 978-0-470-82301-9.
- [50] KREHER, R. *UMTS Performance Measurement: A Practical Guide to KPIs for the UTRAN Environment*. John Wiley & Sons Ltd, England, 2006. ISBN 978-0-470-03249-7.
- [51] THOMPSON, D., E. Modelling Adjacent Channel Interference in 3G Networks. In *Proceedings of 5th European Personal Mobile Communications Conference (EPMCC 2003)*. Glasgow, Scotland, 2003, p. 422 – 426. ISBN 0-85296-753-5.
- [52] GLEISSNER, F., HANUS, S. Co-channel and Adjacent Channel Interference Measurement of UMTS and GSM/EDGE Systems in 900 MHz Radio Band. *Radioengineering*. 2008. 17(3). ISSN 1210-2512. (v tisku)
- [53] Katalogové listy RF součástek společnosti TriQuint Semiconductor, Inc. URL <www.triquint.com/prodserv/types/filters/>
- [54] Katalogové listy RF součástek společnosti XiangYu Communication Technology Co.,Ltd. URL <www.rf-sky.com/products.asp>
- [55] Katalogové listy RF součástek společnosti K&L Microwave. URL <www.klmicrowave.com/products2.php?c1_id=11>
- [56] Katalogové listy RF součástek společnosti Universal Microwave Technology, Inc. URL <www.umd-tw.com>
- [57] Katalogové listy RF součástek společnosti Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. URL <www.panasonic.com/industrial/components/>

LITERATURA

- [58] GLEISSNER, F., HANUS, S. EGPRS and UMTS Coexistence Investigation and Evaluation of System Performance in the Shared Frequency Band. *Wireless Personal Communications*. Springer, 2008. ISSN 0929-6212. (v recenzním řízení)

Seznam obrázků

OBR. 1.1. MOŽNÉ RUŠENÍ SYSTÉMU UMTS SYSTÉMEM GSM.	3
OBR. 2.1. BLOKOVÉ SCHÉMA MODELŮ (FYZICKÁ VRSTVA)	5
OBR. 2.2. MODEL ÚNIKOVÉHO RÁDIOVÉHO KANÁLU	7
OBR. 2.3. KÓDOVÁNÍ DAT PRO SCHÉMATA MCS-1 AŽ MCS-4.	10
OBR. 2.4. KONVOLUČNÍ KODÉR SYSTÉMU GSM-EDGE (KÓDOVÝ POMĚR 1/3).	10
OBR. 2.5. VYTVÁŘENÍ BURSTŮ (MCS-1 AŽ MCS-4).	11
OBR. 2.6. MODEL KÓDOVÁNÍ DAT V ZÁKLADNÍM PÁSMU (PRO MCS-1 AŽ MCS-4).	12
OBR. 2.7. KÓDOVÁNÍ DAT PRO SCHÉMATA MCS-5 A MCS-6.	12
OBR. 2.8. VYTVÁŘENÍ BURSTŮ (MCS-5 AŽ MCS-9).	13
OBR. 2.9. MODEL KÓDOVÁNÍ DAT V ZÁKLADNÍM PÁSMU (MCS-5 A MCS-6).	13
OBR. 2.10. KÓDOVÁNÍ DAT PRO SCHÉMATA MCS-7 AŽ MCS-9.	14
OBR. 2.11. MODEL KÓDOVÁNÍ DAT V ZÁKLADNÍM PÁSMU (MCS-7 AŽ MCS-9).	14
OBR. 2.12. BLOKOVÉ SCHÉMA MODULACE GMSK SYSTÉMU GSM-EDGE.	16
OBR. 2.13. ČASOVÝ PRŮBĚH IMPULSNÍ CHARAKTERISTIKY POUŽITÉHO GAUSSOVA FILTRU.	17
OBR. 2.14. AMPLITUDOVÁ A FÁZOVÁ CHARAKTERISTIKA POUŽITÉHO GAUSSOVA FILTRU.	17
OBR. 2.15. A) KONSTELAČNÍ DIAGRAM KLASICKÉ MODULACE 8-PSK, B) KONSTELAČNÍ DIAGRAM MODULACE 8-PSK PO ROTACI $3\pi/8$, C) TRAJEKTORIE SIGNÁLU 8-PSK PŘED ROTACÍ, D) TRAJEKTORIE SIGNÁLU PO ROTACI.	18
OBR. 2.16. BLOKOVÉ SCHÉMA MODULACE 8-PSK SYSTÉMU GSM-EDGE.	19
OBR. 2.17. MULTIPLEXOVÁNÍ KANÁLŮ UMTS V UPLINKU.	20
OBR. 2.18. BLOKOVÉ SCHÉMA ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU SYSTÉMU UMTS.	22
OBR. 2.19. KONVOLUČNÍ KODÉRY SYSTÉMU UMTS.	23
OBR. 2.20. TURBO KODÉR SYSTÉMU UMTS ($R = 1/3$).	23
OBR. 2.21. MULTIPLEXOVÁNÍ TRANSPORTNÍCH KANÁLŮ [30].	24
OBR. 2.22. I/Q KÓDOVÝ MULTIPLEX (HYBRIDNÍ QPSK) SYSTÉMU UMTS.	24
OBR. 2.23. ZPRACOVÁNÍ A KÓDOVÁNÍ DAT SYSTÉMU UMTS V ZÁKLADNÍM PÁSMU.	25
OBR. 2.24. ROZPROSTÍRÁNÍ, SLUČOVÁNÍ KANÁLŮ, SKRAMBLOVÁNÍ A MODULACE UMTS V UPLINKU.	26
OBR. 2.25. IMPULSNÍ CHARAKTERISTIKA FILTRU RRC (ROLL-OFF FAKTOR 0,22) SYSTÉMU UMTS.	27
OBR. 2.26. AMPLITUDOVÁ A FÁZOVÁ CHARAKTERISTIKA POUŽITÉHO RRC FILTRU.	27
OBR. 2.27. MAPOVÁNÍ, ROZPROSTÍRÁNÍ, SKRAMBLOVÁNÍ, SLUČOVÁNÍ KANÁLŮ A MODULACE UMTS V DOWNLINKU.	28
OBR. 3.1. ZÁVISLOST BITOVÉ CHYBOVOSTI BER NA POMĚRU CNR (MCS-1 AŽ MCS-4, MODULACE GMSK, AWGN).	30
OBR. 3.2. ZÁVISLOST BITOVÉ CHYBOVOSTI BER NA POMĚRU CNR (MCS-5 AŽ MCS-9, 8-PSK, AWGN).	31
OBR. 3.3. ZÁVISLOST BITOVÉ CHYBOVOSTI BER NA POMĚRU CNR (MCS-1 AŽ MCS-4, MODULACE GMSK, RICE).	32
OBR. 3.4. ZÁVISLOST BITOVÉ CHYBOVOSTI BER NA POMĚRU CNR (MCS-5 AŽ MCS-9, MODULACE 8-PSK, RICE).	32
OBR. 3.5. ZÁVISLOST BER NA POMĚRU E_b/N_0 PRO RŮZNÉ KÓDOVÉ POMĚRY, ČINITEL ROZPROSTŘENÍ $SF =$ 4, 9600000 PŘENESENÝCH BITŮ.	33
OBR. 3.6. ZÁVISLOST BER NA POMĚRU E_b/N_0 PRO RŮZNÉ KÓDOVÉ POMĚRY, ČINITEL ROZPROSTŘENÍ $SF =$ 8, 4800000 PŘENESENÝCH BITŮ.	34
OBR. 3.7. ZÁVISLOST BER NA POMĚRU E_b/N_0 PRO RŮZNÉ KÓDOVÉ POMĚRY, ČINITEL ROZPROSTŘENÍ $SF =$ 16, 2400000 PŘENESENÝCH BITŮ.	34
OBR. 3.8. ZÁVISLOST BER NA POMĚRU E_b/N_0 PRO RŮZNÉ KÓDOVÉ POMĚRY, ČINITEL ROZPROSTŘENÍ $SF =$ 32, 1200000 PŘENESENÝCH BITŮ.	35
OBR. 3.9. ZÁVISLOST BER NA POMĚRU E_b/N_0 PRO RŮZNÉ KÓDOVÉ POMĚRY, ČINITEL ROZPROSTŘENÍ $SF =$ 64, 600000 PŘENESENÝCH BITŮ.	35
OBR. 3.10. ZÁVISLOST BER NA POMĚRU E_b/N_0 PRO RŮZNÉ KÓDOVÉ POMĚRY, ČINITEL ROZPROSTŘENÍ $SF =$ 128, 300000 PŘENESENÝCH BITŮ.	36

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 3.11. ZÁVISLOST BER NA POMĚRU E_b/N_0 PRO RŮZNÉ KÓDOVÉ POMĚRY, ČINITEL ROZPROSTŘENÍ SF = 256, 150000 PŘENESENÝCH BITŮ.....	36
OBR. 3.12. SROVNÁNÍ BITOVÉ CHYBOVOSTI BER V ZÁVISLOSTI NA POMĚRU CNR PRO VŠECHNY ČINITELE ROZPROSTŘENÍ, KÓDOVÝ POMĚR 1/3, 1000 PŘENESENÝCH RÁMČŮ.....	37
OBR. 4.1. OBECNÁ KONCEPCE PRO VYHODNOCENÍ KOEXISTENCE SYSTÉMŮ.....	39
OBR. 4.2. ZÁVISLOST BITOVÉ CHYBOVOSTI BER NA ROZDÍLU ÚROVNÍ UŽITEČNÉHO SIGNÁLU GSM-EDGE (MCS-1 AŽ MCS-4) A RUŠÍČÍHO SIGNÁLU UMTS.....	40
OBR. 4.3. ZÁVISLOST BITOVÉ CHYBOVOSTI BER NA ROZDÍLU ÚROVNÍ UŽITEČNÉHO SIGNÁLU GSM-EDGE (MCS-5 AŽ MCS-9) A RUŠÍČÍHO SIGNÁLU UMTS.....	41
OBR. 4.4. ZÁVISLOST BITOVÉ CHYBOVOSTI BER NA ROZDÍLU ÚROVNÍ UŽITEČNÉHO SIGNÁLU UMTS (SF 4 AŽ SF 256) A RUŠÍČÍHO SIGNÁLU GSM-EDGE.....	42
OBR. 4.5. BLOKOVÉ SCHÉMA SIMULACE PRO VYHODNOCENÍ ACI.....	43
OBR. 4.6. AMPLITUDOVÁ CHARAKTERISTIKA FILTRU DP S MEZNÍM KMITOČTEM 25 KHz PRO SIGNÁL UMTS.....	44
OBR. 4.7. AMPLITUDOVÁ CHARAKTERISTIKA FILTRU PP SE STŘEDNÍM KMITOČTEM 28 KHz PRO SIGNÁL GSM - EDGE.....	44
OBR. 4.8. SPEKTRUM SIGNÁLU UMTS PŘED FILTRACÍ.....	45
OBR. 4.9. SPEKTRUM SIGNÁLU UMTS PO FILTRACI DP.....	45
OBR. 4.10. SPEKTRUM SIGNÁLU GSM - EDGE PŘED FILTRACÍ.....	46
OBR. 4.11. SPEKTRUM SIGNÁLU GSM - EDGE PO FILTRACI PP (STŘEDNÍ KMITOČET 28 KHz).....	46
OBR. 4.12. SPOLEČNÉ SPEKTRUM OBOU SYSTÉMŮ ZÍSKANÉ SIMULACÍ, VZDÁLENOST NOSNÝCH 26 KHz, ROZDÍL ÚROVNÍ SIGNÁLŮ CCA 42 dB.....	47
OBR. 4.13. ZÁVISLOST BITOVÉ CHYBOVOSTI BER NA ROZDÍLU ÚROVNÍ UŽITEČNÉHO SIGNÁLU UMTS (REFERENČNÍ KANÁL 12,2 KB/S) A RUŠÍČÍHO SIGNÁLU GSM-EDGE A NA VZDÁLENOSTI NOSNÝCH... ..	47
OBR. 4.14. ZÁVISLOST BITOVÉ CHYBOVOSTI BER NA ROZDÍLU ÚROVNÍ UŽITEČNÉHO SIGNÁLU UMTS (REFERENČNÍ KANÁL 64 KB/S) A RUŠÍČÍHO SIGNÁLU GSM-EDGE A NA VZDÁLENOSTI NOSNÝCH.....	48
OBR. 4.15. ZÁVISLOST BITOVÉ CHYBOVOSTI BER NA ROZDÍLU ÚROVNÍ UŽITEČNÉHO SIGNÁLU UMTS (REFERENČNÍ KANÁL 144 KB/S) A RUŠÍČÍHO SIGNÁLU GSM-EDGE A NA VZDÁLENOSTI NOSNÝCH.....	48
OBR. 4.16. ZÁVISLOST BITOVÉ CHYBOVOSTI BER NA ROZDÍLU ÚROVNÍ UŽITEČNÉHO SIGNÁLU UMTS (REFERENČNÍ KANÁL 384 KB/S) A RUŠÍČÍHO SIGNÁLU GSM-EDGE A NA VZDÁLENOSTI NOSNÝCH.....	49
OBR. 5.1. ZAPOJENÍ PRACOVIŠTĚ PRO OVĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ KOEXISTENCE SYSTÉMŮ GSM - EDGE A UMTS.....	51
OBR. 5.2. KONSTELAČNÍ DIAGRAM MODULACE QPSK, DEFINICE EVM.....	53
OBR. 5.3. MĚŘENÍ ACLR GSM - EDGE (MODULACE GMSK, MCS-1 AŽ 4).....	63
OBR. 5.4. KONSTELAČNÍ DIAGRAM GSM - EDGE (MODULACE GMSK), BEZ PŘÍTOMNOSTI ŠUMU.....	63
OBR. 5.5. SROVNÁNÍ ZMĚŘENÝCH A SIMULOVANÝCH HODNOT ZÁVISLOSTÍ BER NA CNR, MODULACE GMSK, KANÁL AWGN.....	64
OBR. 5.6. MĚŘENÍ ACLR GSM - EDGE (MODULACE 8-PSK, MCS-5 – 9).....	65
OBR. 5.7. KONSTELAČNÍ DIAGRAM GSM - EDGE (MODULACE $3\pi/8$ 8-PSK), BEZ PŘÍTOMNOSTI ŠUMU.....	65
OBR. 5.8. SROVNÁNÍ ZMĚŘENÝCH A SIMULOVANÝCH HODNOT ZÁVISLOSTÍ BER NA CNR, MODULACE 8-PSK, KANÁL AWGN.....	66
OBR. 5.9. MĚŘENÍ ACLR SIGNÁLU UMTS.....	67
OBR. 5.10. KONSTELAČNÍ DIAGRAM UMTS (QPSK), BEZ PŘÍTOMNOSTI ŠUMU.....	67
OBR. 5.11. SROVNÁNÍ ZMĚŘENÝCH A SIMULOVANÝCH HODNOT ZÁVISLOSTÍ BER NA E_b/N_0 , MODULACE QPSK, KANÁL AWGN.....	68
OBR. 5.12. VLIV ÚROVNĚ INTERFERUJÍCÍHO SIGNÁLU NA BITOVOU CHYBOVOST UŽITEČNÉHO SIGNÁLU SYSTÉMU GSM - EDGE V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI NOSNÝCH KMITOČTŮ.....	70
OBR. 5.13. SPEKTRUM UŽITEČNÉHO (VLEVO) A SILNÉHO INTERFERUJÍCÍHO (VPRAVO) GSM - EDGE SIGNÁLU NA SPOLEČNÉM KANÁLU (ADJACENT CHANNEL INTERFERENCE). UŽITEČNÝ SIGNÁL MÁ MINIMÁLNÍ POŽADOVANÉ CNR = 9 dB, INTERFERENCEČNÍ SIGNÁL JE VĚTŠÍ O 55 dB (HRANICE PRO DOSAŽENÍ BER = 10^{-3}).....	71
OBR. 5.14. VLIV ÚROVNĚ INTERFERUJÍCÍHO SIGNÁLU NA BITOVOU CHYBOVOST UŽITEČNÉHO SIGNÁLU SYSTÉMU UMTS V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI NOSNÝCH KMITOČTŮ.....	72
OBR. 5.15. SPEKTRUM UŽITEČNÉHO (VLEVO) A SILNÉHO INTERFERUJÍCÍHO (VPRAVO) UMTS SIGNÁLU NA SPOLEČNÉM KANÁLU (ADJACENT CHANNEL INTERFERENCE). ODSUP C/IA JE ASI 40 dB (HRANICE PRO DOSAŽENÍ BER = 10^{-3}).....	72
OBR. 5.16. KMITOČTOVÝ PLÁN TYPU „SANDWICH“ – VLOŽENÍ NOSNÉ SYSTÉMU UMTS MEZI EXISTUJÍCÍ NOSNÉ SYSTÉMU GSM.....	73
OBR. 5.17. INTERFERENCEČNÍ SCHÉMA (INTER-SYSTEM INTERFERENCE).....	74

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 5.18. VLIV ÚROVNĚ INTERFERUJÍCÍHO SIGNÁLU UMTS NA BITOVOU CHYBOVOST UŽITEČNÉHO SIGNÁLU GSM - EDGE V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI NOSNÝCH KMITOČTŮ.	75
OBR. 5.19. VLIV ÚROVNĚ INTERFERUJÍCÍHO SIGNÁLU GSM - EDGE NA BITOVOU CHYBOVOST UŽITEČNÉHO SIGNÁLU UMTS V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI NOSNÝCH KMITOČTŮ.	75
OBR. 5.20. SPOLEČNÉ SPEKTRUM SYSTÉMU GSM - EDGE A UMTS, VZDÁLENOST NOSNÝCH MEZI OBĚMA SYSTÉMY 2,4 MHz, MINIMÁLNÍ HRANICE, ROZDÍL ÚROVNÍ VÝKONŮ JE 35 dB.	77
OBR. 5.21. VARIANTA PRO DVOJICI OPERÁTORŮ UMTS PŘI UMÍSTĚNÍ V SOUSEDNÍM KANÁLU A ZOBRAZENÍ POTŘEBNÉHO OCHRANNÉHO PÁSMU.	78
OBR. 5.22. VARIANTA PRO JEDNOHO OPERÁTORA UMTS, KDY JE NOSNÁ UMÍSTĚNA MEZI EXISTUJÍCÍ NOSNÉ SYSTÉMU GSM DRUHÉHO OPERÁTORA.	78

Seznam tabulek

TAB. 2.1. MODEL I PRO ŠÍŘENÍ UVNITŘ BUDOV.....	8
TAB. 2.2. VENKOVNÍ MODEL P PRO CHODCE.....	8
TAB. 2.3. VENKOVNÍ MODEL V PRO VOZIDLA.....	8
TAB. 2.4. VZTAH MEZI PŘENOSOVOU RYCHLOSTÍ A KÓDOVACÍMI SCHÉMATY.....	9
TAB. 2.5. KÓDOVÁNÍ USF.....	11
TAB. 2.6. GRAYOVO KÓDOVÁNÍ BITOVÝCH TRIPLETŮ DO OSMIČKOVÉ SOUSTAVY.....	19
TAB. 2.7. POUŽITÍ A VLASTNOSTI ROZPROSTÍRACÍCH A SKRAMBLOVACÍCH KÓDŮ [3].....	20
TAB. 2.8. PŘENOSOVÉ RYCHLOSTI DATOVÝCH KANÁLŮ DPDCH.....	21
TAB. 4.1. KÓDOVÝ ZISK.....	42
TAB. 4.2. HODNOTY IZOLACÍ SOUSEDNÍCH KANÁLŮ, RUŠENÍ SYSTÉMU UMTS SYSTÉMEM GSM (SIMULACE).....	45
TAB. 5.1. TESTOVACÍ KANÁLY SYSTÉMU UMTS (UL).....	51
TAB. 5.2. MAXIMÁLNÍ VYSÍLACÍ VÝKON UE (UMTS) [32].....	52
TAB. 5.3. MAXIMÁLNÍ VYSÍLACÍ VÝKON MS (GSM) [28].....	52
TAB. 5.4. LIMITY ALCR PRO MS [44].....	53
TAB. 5.5. VÝPOČET CITLIVOSTI PŘIJÍMAČE UMTS.....	59
TAB. 5.6. POTŘEBNÁ ÚROVEŇ SIGNÁLU DLE REFERENČNÍHO KANÁLU.....	59
TAB. 5.7. LIMITY NEŽÁDOUCÍCH EMISÍ VYSÍLAČŮ GSM 900/1800.....	60
TAB. 5.8. LIMITY NEŽÁDOUCÍCH EMISÍ VYSÍLAČŮ UMTS.....	60
TAB. 5.9. LIMITY PRO BLOKOVÁNÍ PŘIJÍMAČE UMTS.....	61
TAB. 5.10. LIMITY PRO BLOKOVÁNÍ PŘIJÍMAČE GSM.....	61
TAB. 5.11. SHRUTÍ IZOLACÍ MEZI SYSTÉMY, LIMITNÍ VYPOČTENÉ HODNOTY.....	61
TAB. 5.12. HODNOTY ACLR PRO MODULACI GMSK.....	62
TAB. 5.13. HODNOTY ACLR PRO MODULACI 8-PSK.....	64
TAB. 5.14. HODNOTY ACLR PRO SIGNÁL UMTS.....	67
TAB. 5.15. SROVNÁNÍ POŽADAVKŮ NA C/I _a A ZMĚŘENÝCH HODNOT PRO SYSTÉM GSM - EDGE.....	69
TAB. 5.16. SROVNÁNÍ POŽADAVKŮ NA C/I _a A ZMĚŘENÝCH HODNOT PRO SYSTÉM UMTS.....	71
TAB. 5.17. SHRUTÍ VLIVU VZDÁLENOSTI NOSNÝCH NA INTERFERENCE V SYSTÉMU.....	74
TAB. 5.18. HODNOTY ACP PŘI RUŠENÍ MEZI DVĚMA NOSNÝMI SYSTÉMU UMTS.....	76
TAB. 5.19. HODNOTY ACP PŘI RUŠENÍ SYSTÉMU UMTS SYSTÉMEM GSM - EDGE.....	77
TAB. 5.20. HODNOTY ACP PŘI RUŠENÍ SYSTÉMU GSM - EDGE SYSTÉMEM UMTS.....	77
TAB. 5.21. NÁVRH ŘEŠENÍ PŘI RUŠENÍ MEZI VYSÍLAČEM A PŘIJÍMAČEM BTS SYSTÉMU UMTS.....	81
TAB. 5.22. NÁVRH ŘEŠENÍ PŘI RUŠENÍ MEZI VYSÍLAČEM BTS SYSTÉMU UMTS A PŘIJÍMAČEM BTS SYSTÉMU GSM-EDGE.....	81
TAB. 5.23. NÁVRH ŘEŠENÍ PŘI RUŠENÍ MEZI VYSÍLAČEM BTS SYSTÉMU GSM-EDGE A PŘIJÍMAČEM BTS SYSTÉMU UMTS.....	81
TAB. 5.24. SROVNÁNÍ IZOLACÍ ACP ZÍSKANÝCH SIMULACEMI A MĚŘENÍM PŘI RUŠENÍ SYSTÉMU UMTS SYSTÉMEM GSM – EDGE, REFERENČNÍ KANÁL UMTS 12,2 KB/S.....	82