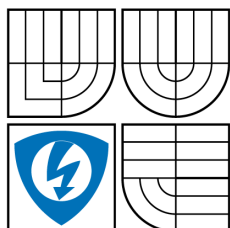


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

KOEXISTENCE MOBILNÍCH KOMUNIKAČNÍCH SYSTÉMŮ WLAN A BLUETOOTH

WLAN AND BLUETOOTH SYSTEMS COEXISTENCE

DOKTORSKÁ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. JAN MIKULKA

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

Jméno a příjmení: Ing. Jan Mikulka
Bytem: Teyschlova 1105/14, 63500, Brno - Bystrc
Narozen (datum a místo): 30.8.1981, Olomouc
(dále jen autor)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
.....
(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 WLAN
a Bluetooth
Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Ing. Stanislav Hanus, CSc.
Ústav: Ústav radioelektroniky
Datum obhajoby VŠKP: neuvedeno

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v¹:

- ☒ 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.

¹hodící se zaškrtněte

Čl. 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.

Čl. 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 problematikou vzájemného rušení bezdrátových standardů WLAN a Bluetooth. Standard Bluetooth pracuje v bezlicenčním frekvenčním pásmu 2,402 - 2,480 GHz, které je také využíváno zástupcem sítí WLAN - standardem IEEE 802.11b/g (Wi-Fi). Jelikož je toto frekvenční pásmo bezlicenční, může být využíváno zároveň několika standardy i různými zdroji průmyslového rušení, díky čemuž může docházet k interferencím.

V první části disertační práce je nejprve podán stručný přehled o využití frekvenčního pásma 2,402 - 2,480 GHz a o podmínkách pro provoz bezdrátových systémů v tomto pásmu. Dále jsou popsány fyzické vrstvy standardů Bluetooth a IEEE 802.11b/g a techniky používané pro předcházení kolizím. Hlavní část disertační práce je zaměřena na modelování vzájemného rušení na fyzických vrstvách standardů Bluetooth a IEEE 802.11b/g v prostředí Mathworks Matlab a jeho ověření v reálných podmínkách. Hlavním přínosem disertační práce je vytvoření nového modelu pro zkoumání koexistence standardů Bluetooth a Wi-Fi. Výsledky získané pomocí programu v prostředí Matlab Simulink byly ověřeny v reálných podmínkách pomocí moderního vektorového analyzátoru. Měřením byla ověřena také správnost použité metody a bezchybnost vytvořených modelů a výsledků simulací.

Dosažené výsledky jsou prezentovány ve formě grafů a součástí jednotlivých kapitol jsou i závěrečná shrnutí. Odpovídající tabulky vypočtených a naměřených hodnot jsou dostupné na přiloženém CD.

Abstract

The dissertation thesis deals with a WLAN and Bluetooth systems coexistence. A Bluetooth standard works in an unlicensed frequency band 2,402 – 2,480 GHz. This frequency band is also used by an IEEE 802.11b/g standard (Wi-Fi) which is the most extended representative of WLAN networks. Because Bluetooth and Wi-Fi systems operate in the same frequency band, a mutual signal degradation may appear, when devices are collocated in the same area.

In the first part of the dissertation thesis there is a brief summary of 2,402 - 2,480 GHz frequency band regulations and its usage. There are described physical layers of Bluetooth and IEEE 802.11b/g standards and techniques used for a collision avoidance. The main part of the dissertation thesis deals with a development of a new Matlab Simulink model for investigations of the Bluetooth and Wi-Fi standards coexistence. Physical layer models and results of the coexistence simulations are verified by a measurement in real conditions with a help of a modern vector signal analyzer.

The results are presented in a graphical form and a brief summary is attached at the end of each chapter. Corresponding tables of simulated and measured values are available in the enclosed CD.

Klíčová slova

Bluetooth, Wi-Fi, IEEE 802.11b/g, koexistence, WPAN, WLAN, Matlab, fyzická vrstva, základní pásmo, rádiové pásmo, AWGN kanál, únikový kanál, rušení, interference, rozprostřené spektrum, Matlab Simulink, EVM.

Keywords

Bluetooth, Wi-Fi, IEEE 802.11b/g, Coexistence, WPAN, WLAN, Matlab, Physical Layer, Base-band, Pass-band, AWGN channel, Fading channel, noise, interference, spread spectrum, Matlab Simulink, EVM.

Bibliografická citace

MIKULKA, J. *Koexistence mobilních komunikačních systémů WLAN a Bluetooth*. Brno, 2008. 107 s. Disertační práce na fakultě Elektrotechniky a komunikačních technologií na Ústavu radioelektroniky. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Stanislav Hanus, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou disertační práci na téma „Koexistence mobilních komunikačních systémů WLAN a Bluetooth“ 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 velmi užitečnou metodickou pomoc, cenné připomínky, nápady a motivaci k vědecké práci. Dále bych rád poděkoval Ing. Romanu Maršálkovi, Ph.D. za zájem a rady při řešení simulací koexistence v prostředí Matlab, Ing. Otto Vodvářkovi za zprostředkování zapůjčení moderního vektorového analyzátoru a WLAN testeru Rohde & Schwarz FSL a společnosti CESNET s projektem METACentrum za poskytnutí výpočetních zdrojů pro provádění paralelních výpočtů v prostředí Matlab. Velké poděkování patří také mým rodičům a manželce za podporu v průběhu doktorského studia.

V Brně dne

.....
(podpis autora)

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Současný stav	2
1.1.1	Bezlicenční frekvenční pásmo ISM 2,4 GHz	2
1.1.2	Rozprostřené spektrum	3
1.1.3	Dosavadní vývoj - měření v laboratorních podmínkách	4
1.1.4	Dosavadní vývoj - simulace a modelování na PC	4
1.1.5	Volba simulačního prostředí	5
1.1.6	Doporučení IEEE 802.15.2	6
1.2	Cíle disertace	8
2	Wi-Fi (IEEE 802.11b/g)	9
2.1	Dostupné rádiové frekvence	9
2.2	Přehled standardů podle IEEE 802.11	10
2.3	Fyzická vrstva	10
2.3.1	Fyzická vrstva DSSS	11
2.3.2	Fyzická vrstva HR/DSSS	14
2.3.3	Fyzická vrstva ERP	16
2.4	Simulace v základním pásmu	22
2.4.1	IEEE 802.11 - Barkerovo kódování	22
2.4.2	IEEE 802.11b - Komplementární kódování	22
2.4.3	IEEE 802.11g - OFDM	24
2.4.4	Okénkování OFDM signálu	24
2.4.5	Normování QAM signálů	26
2.4.6	Prokládání (Interleaving)	27
2.5	Závěr	29
3	Bluetooth (IEEE 802.15)	30
3.1	Topologie Bluetooth	30
3.2	Přehled standardů Bluetooth	31
3.3	Specifikace rádiové části	32
3.3.1	Povinný mód	33
3.3.2	Rozšířený mód	33
3.4	Specifikace systému Bluetooth v základním pásmu	34
3.4.1	Fyzický kanál	35
3.4.2	Provozní kanály	35
3.4.3	Adresování Bluetooth jednotek	36
3.4.4	Povinný mód (BR)	37
3.4.5	Rozšířený mód (EDR)	37
3.5	Skramblování dat	38

3.6	Detekce a oprava chyb na fyzické vrstvě	40
3.7	Adaptivní frekvenční skákání (AFH)	41
3.8	Přehled používaných paketů	42
3.9	Simulace v základním pásmu	43
3.9.1	Povinný mód	43
3.9.2	Rozšířený mód	45
3.10	Závěr	46
4	Simulace koexistence	47
4.1	Koexistence standardů Bluetooth a IEEE 802.11b	47
4.2	Koexistence standardů Bluetooth a IEEE 802.11g	54
4.3	Zkrácená simulace pro šířku pásma 22 MHz	61
4.4	Vliv prokládání a konvolučního kódování u IEEE 802.11g na výsledky simulací koexistence	63
4.5	Simulace koexistence při použití AFH	64
4.6	Závěr	65
5	Měření koexistence v reálných podmínkách	66
5.1	Měření EVM	66
5.2	Průběh měření	67
5.3	Přenos dat kanálem AWGN	68
5.3.1	IEEE 802.11b/g	68
5.3.2	Bluetooth	69
5.4	Měření koexistence standardů Bluetooth a Wi-Fi	71
5.4.1	IEEE 802.11b/g při rušení standardem Bluetooth	72
5.4.2	Bluetooth EDR při rušení standardem IEEE 802.11b/g	81
5.5	Závěr	83
6	Metodické pokyny pro minimalizaci vlivu vzájemného rušení	84
7	Závěr	85

Bezdrátové komunikace patří bezesporu k velmi rychle se vyvíjejícím průmyslovým odvětvím. V dnešní době tvoří bezdrátové služby velkou část z celkového obrátu za telekomunikační služby a na bezdrátové sítě jsou kladeny čím dál tím vyšší nároky co se týká bezpečnosti, přenosové rychlosti i latence. Mezi nejrozšířenější bezdrátovou technologií pro přístup do LAN (*Local Area Network*) patří standard IEEE 802.11b/g, celosvětově známý též pod označením Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) (kap. 2). Standard Wi-Fi se stal synonymem pro bezdrátový přístup k internetu v restauracích, na letištích, univerzitách, v nákupních centrech a na ostatních veřejných místech. Bezdrátová technologie Wi-Fi je standardním vybavením dnešních notebooků, PDA i některých mobilních telefonů.

Druhou velice rozšířenou technologií je standard Bluetooth, který je určený pro bezdrátový přenos na kratší vzdálenosti. Hlavní určením technologie Bluetooth je odstranění nutnosti pevného propojení PC s některými periferiemi pomocí kabelů, vyřešení problémů s různými typy konektů apod. Typickými aplikacemi systému Bluetooth je propojení PC, PDA nebo mobilních telefonů s různými periferiemi (bezdrátové sluchátko, bezdrátová tiskárna, externí GPS modul, bezdrátová klávesnice, myš apod.). Hlavními přednostmi standardu Bluetooth je nízká spotřeba, nízký vyzářený výkon, bezpečnost a robustnost přenosu dat (kap. 3). Systém Bluetooth je typickým představitelem sítí WPAN (*Wireless Personal Area Network*), které operují většinou do vzdálenosti 10 m.

Oba standardy (Bluetooth i Wi-Fi) využívají bezlicenční frekvenční pásmo ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) 2,4 GHz (2,402 - 2,480 GHz). Často jsou obě bezdrátové technologie integrovány do jednoho mobilního zařízení, což může přinášet problémy se vzájemným rušením obou standardů. Toto vzájemné rušení nastává i v případě používání zařízení Bluetooth a Wi-Fi na omezeném prostoru. V dnešní době, kdy je většina kanceláří vybavena Wi-Fi přístupovým bodem, jsou v hustě osídlených částech velkých měst velké problémy s rušením.

Problémy s rušením v pásmu ISM 2,4 GHz mohou být řešeny více způsoby. V dnešní době je snaha uvolnit toto frekvenční pásmo použitím standardu IEEE 802.11a (Wi-Fi5), který má větší kmitočtový příděl na frekvencích 5 GHz. Dalším způsobem řešení problému interferencí je používání nejnovějších specifikací standardu Bluetooth, které v sobě zahrnují mechanismus umožňující používat pro komunikaci pouze nezarušené kmitočty. Rušení v pásmu ISM 2,4 GHz je z velké části způsobeno také neznalostí uživatelů, kteří nepoužívají regulaci výkonu, mnohdy překračují limity na vysílání stanovené ČTÚ (více viz kap. 1.1.1), používají nevhodný typ antén a často tak zaruší velkou část území a plýtvají tak omezeným frekvenčním přídelem.

1.1 Současný stav

Koexistence systémů Bluetooth a Wi-Fi je stále velice diskutovaným problémem, který je řešen jak modelováním a simulacemi na počítači, tak také měřeními a testováním v laboratorních podmínkách. Popis současných výsledků měření a simulací pocházejících např. z pracovišť firem zabývajících se vývojem čipů pro Bluetooth či Wi-Fi je obsažen v kapitole 1.1.4 a 1.1.3.

1.1.1 Bezlicenční frekvenční pásmo ISM 2,4 GHz

Dříve byly bezdrátové komunikace využívány zejména pro přenos jednoduchých textů (telegraf) nebo hlasu. S nástupem moderních digitálních prostředků nabývá na významu bezdrátový přenos dat. Významnými aplikacemi se stávají jak bezdrátový přístup k lokálním počítačovým sítím, tak i datová komunikace autonomních zařízení. S rostoucím využitím bezdrátových přenosů je nutné při jejich použití zvažovat i problematiku obsazení rádiových frekvencí, neboť pásem, ve kterých lze bez licence provozovat bezdrátové komunikace, není mnoho. Jak už bylo napsáno v úvodu, pásmo ISM 2,4 GHz používají navzájem nekompatibilní zařízení Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee (4), bezšňůrové telefony, ale i běžné kuchyňské mikrovlnné trouby a průmyslová zařízení včetně lékařských diagnostických přístrojů. Jelikož dané pásmo není licencované, nelze při použití těchto technologií zaručit, že v dané lokalitě bude v daném pásmu „prostor“ pro další zařízení. Ačkoli moderní postupy pro omezení vlivu rušení používají adaptivní rychlé skokové změny frekvence (Frequency Hopping) a metodu přímo rozprostřeného spektra (DSSS), může další nárůst počtu zařízení pracujících v těchto nelicencovaných frekvenčních pásmech způsobit, že pásma nebudou rozumně použitelná pro aplikace, které vyžadují spolehlivý přenos dat (34).

Většina bezdrátových komunikačních technologií pro přenos hlasu pracuje v tzv. licencovaných frekvenčních pásmech o které se stará příslušný regulační úřad. V České republice se o přidělování kmitočtového spektra stará ČTÚ (*Český telekomunikační úřad*) a přiděluje například licence na provoz mobilních sítí (GSM, UMTS, CDMA), sítí určených pro terestriální vysílání (DVB-T, DVB-H), nebo mikrovlnné spoje. Za licencovaná frekvenční pásma je nutné platit poplatky ČTÚ a vysílání na těchto kmitočtech je silně regulované.

Naopak mezi bezdrátovými sítěmi pro přenos dat jsou nejrozšířenější bezdrátové technologie WLAN *Wireless Local Area Network* (Wi-Fi, Hiperlan a Hiperlan2), které používají bezlicenční frekvenční pásmo (33). Díky cenové politice se celosvětově prosadil zejména standard IEEE 802.11b/g alias Wi-Fi. Bezlicenční frekvenční pásmo může být bezplatně využíváno kýmkoli, pokud jsou dodrženy podmínky stanovené regulačním orgánem. Výhoda využití bezlicenčního pásma je zejména cena instalace zařízení. Na druhou stranu, bezlicenční pásmo ISM 2,4 GHz je v dnešní době přeplněné a ve větších aglomeracích je vysoké průmyslové rušení z ostatních zdrojů. Proto ČTÚ omezuje použití bezdrátových zařízení v pásmu ISM 2,4 GHz na maximální vyzářený výkon EIRP 100 mW a maximální výkonovou spektrální hustotu 10 dBm/1 MHz.

1.1.2 Rozprostřené spektrum

Technologie rozprostřeného spektra (SS - Spread Spectrum) se používá pro dosažení rychlých datových přenosů v moderních bezdrátových systémech. Tradiční rádiové technologie se soustředí na vměstnání co největšího počtu signálů do relativně úzkého pásma. Naproti tomu technologie rozprostřeného spektra využívá matematické funkce pro rozptýlení výkonu do širokého frekvenčního bloku. Příjímač provádí opačnou operaci a převede rozprostřený signál do klasického úzkopásmového signálu, se kterým pak dále pracuje.

Používání rozprostřeného spektra je požadavkem pro provoz nelicencovaných zařízení a vyplývá z nařízení regulátora. V pásmu ISM 2,4 GHz tedy nelze používat jiný typ přenosu (5). Používání rozprostřeného spektra ovšem nepřináší žádnou zvláštní odolnost proti zarušení - systémy s rozprostřeným spektrem mohou být rušeny dalšími podobnými systémy, ale i interferencemi a také provozem klasických vysílačů pracujících s úzkým rádiovým pásmem. Aby se tedy alespoň zčásti předešlo problémům s rušením, předepisují regulační orgány omezení týkající se maximálního vyzářeného výkonu (kap. 1.1.1).

Typy rozprostřeného spektra

Rádiová fyzická vrstva může využívat různé techniky rozprostřeného spektra.

Frekvenční skákání (Frequency Hopping - FH, FHSS) - Technika frekvenčního skákání má vojenský původ. Nosná vlna vysílače mění v pseudonáhodném pořadí frekvenci a na každé z nich vysílá krátký datový tok. Velice rozšířená technika v moderních bezdrátových sítích jako je GSM, Bluetooth, Wi-Fi, atd. Technika frekvenčního skákání využívá u Bluetooth i Wi-Fi shodně frekvenční šířku pásma 83,5 MHz (platí pro většinu zemí), která je rozdělena do 79 kanálů o šířce 1 MHz. Zbylých cca 4,5 MHz slouží jako „ochranné pásmo“ proti interferencím ze sousedního frekvenčního pásma. Rádiový signál skáče po těchto kanálech v pseudonáhodném pořadí rychlostí cca 1600 přeskoků za sekundu (pomalý Frequency Hopping). Podstatnou výhodou frekvenčního skákání je větší počet systémů pracujících najednou ve sdíleném frekvenčním pásmu.

Přímá sekvence (Direct Sequence - DS, DSSS) - Systém DSSS je využíván například standardem IEEE 802.11b/g, kde přímá sekvence rozprostírá za použití matematických operací vysílanou informaci po 22 MHz širokém frekvenčním pásmu. U standardu IEEE 802.11b/g jsou k dispozici tři taková široká pásma. Příjímač inverzním postupem signál dekoduje. Původní standard 802.11 definuje fyzickou vrstvu DS o rychlosti 1 a 2 Mbit/s, standard 802.11b pak přináší přímou sekvenci o vysoké rychlosti (HR/DSSS/PHY) až do 11 Mbit/s.

Ortogonalní frekvenční multiplex (OFDM) - OFDM je nejpoužívanější technikou pro rozprostírání signálu v moderních komunikačních technologiích. Ortogonalní multiplex s frekvenčním dělením se používá např. u systému digitální televize DVB-T, dále v metropolitních bezdrátových sítích WiMAX (IEEE 802.16), v osobních bezdrátových sítích UWB (*Ultra Wide Band*) a v neposlední řadě také ve standardu IEEE 802.11g a IEEE 802.11a. Systémy s ortogonalním frekvenčním multiplexem rozdělí přenosové pásmo na velké množství úzkých kanálů, data se v každém kanálu přenášejí relativně pomalu a signál je tak mnohem robustnější (5) a odolnější vůči vícecestnému šíření a jiným druhům rušení. OFDM byla přijata pro využití

standardem IEEE 802.11a, tedy pro pásmo ISM 5 GHz, v roce 2003 byla ale také adoptována pro pásmo ISM 2,4 GHz jako IEEE 802.11g. Ve výsledku je rychlost přenosu dat součtem všech kanálů (u 802.11g/a až 54 Mbit/s).

1.1.3 Dosavadní vývoj - měření v laboratorních podmínkách

Po roce 2000, kdy se na trhu s výpočetní technikou začal prosazovat standard pro bezdrátové sítě WLAN IEEE 802.11b a kdy se začíná pomalu rozšiřovat použití Bluetooth jako hlavního zástupce WPAN sítí, objevují se první výzkumy zabývající se koexistencí Bluetooth a Wi-Fi v pásmu ISM 2,4 GHz. Jeden z výzkumů zabývající se koexistencí v pásmu ISM 2,4 GHz provedla např. firma Texas Instruments (44). Výsledky testů ukázaly, že i při vzdálenosti několik metrů mezi vzájemně rušenými zařízeními dochází k významnému zvýšení chybovosti a tím snížení přenosové rychlosti. K podobným výsledkům došel ve své práci Tomasz Keller a Józef Modelski při zkoumání interferencí v pásmu 2,4 GHz (18). Měření koexistence je dále prezentováno v práci (19), kde je testován vliv AFH na vzájemné rušení. Vzájemné rušení standardů Bluetooth a IEEE 802.11b je měřeno také v práci (39).

Drtivá většina testů dostupných v odborné literatuře se zabývá koexistencí standardů IEEE 802.11b a Bluetooth 1.1. Standard IEEE 802.11b podporuje rychlosti pouze do 11 Mbit/s a systému Bluetooth do 1 Mbit/s.

Disertační práce je zaměřena na modelování a měření koexistence standardu IEEE 802.11g, který využívá OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) a dosahuje přenosových rychlostí až 54 Mbit/s a standardu Bluetooth 2.0 EDR, který zvyšuje maximální přenosovou rychlost na 3 Mbit/s a obsahuje implementaci adaptivního frekvenčního skákání (*AFH*), které umožňuje předcházet vzájemnému rušení.

Všechna zmíněná měření dostupná v odborné literatuře se zabývají koexistencí starší verze systému Bluetooth 1.1 bez podpory AFH a staršího standardu IEEE 802.11b. Disertační práce se zabývá měřením standardů IEEE 802.11g a Bluetooth 2.0 EDR, které bylo umožněno také díky zapůjčení moderního vektorového signálového analyzátoru a WLAN testeru FSL firmou Rohde & Schwarz.

1.1.4 Dosavadní vývoj - simulace a modelování na PC

V současné době existuje množství článků, zabývajících se vzájemným rušením systémů Bluetooth a Wi-Fi. Podrobně se tímto tématem zabývá např. N. Golmie ve své práci (9), která je zaměřená na simulování koexistence v prostředí OPNET Modeler. Práce je zaměřená na standard IEEE 802.11b a rychlosti do 11 Mbit/s.

Samotná simulace fyzické vrstvy IEEE 802.11g na AWGN kanálu je publikována v (2). V práci je popsána fyzická vrstva standardu IEEE 802.11g pro přenosovou rychlost 54 Mbit/s.

Tato disertační práce se zabývá modelováním novějších verzí specifikací Bluetooth 2.0 EDR a IEEE 802.11g v prostředí Matlab a Matlab Simulink. Byl vytvořen model fyzické vrstvy systému Bluetooth 2.0 EDR s podporou frekvenčního skákání a model fyzické vrstvy standardu IEEE 802.11g s podporou OFDM a přenosovou rychlostí až 54 Mbit/s. Oba modely fyzických vrstev jsou slučitelné a umožňují testování chybovosti v závislosti na přidávaném rušení a na vzájemné koexistenci (viz kapitola 4).

1.1.5 Volba simulačního prostředí

Pro modelování bezdrátových systémů na PC existuje více simulačních prostředí. Nejpožívanějšími nástroji pro simulace bezdrátových systémů jsou:

Mathworks Matlab - Hlavní výhodou prostředí Mathworks Matlab je množství dostupné literatury pro simulování bezdrátových systémů (38) (49) a také dostupná literatura i propracovaná nápověda prostředí Matlab. Další výhodou je možnost jednoduchého odlaďování vytvořených skriptů, jednoduchá práce s proměnnými a také možnost spouštět vytvořený kód v textovém režimu na vzdáleném počítači. Další výhodou je jednoduchá modifikace vestavěných funkcí a přidávání nových skriptů a nových funkcí.

Mathworks Matlab - Simulink - Výhodou modelování v Simulinku je jednoduchost, řada připravených bloků (Communication Blockset), efektivní práce s proměnnými a rychlost výpočtů. Hlavní nevýhodou je složitější odhalování chyb (bloková struktura modelů). Vytvořený model je možné spouštět na vzdáleném počítači nebo poli počítačů z příkazové řádky a výsledky ukládat do proměnných nebo souborů. Matlab Simulink umožňuje vytváření vlastních bloků, spouštění standardních skriptů (m-file) i spojování bloků do větších celků.

Ansoft Designer - Hlavní výhodou Ansoft Designeru je jednoduchost a názornost. Práce v grafickém prostředí je podobná práci s programem Matlab Simulink.

OPNET Modeler - Je součástí softwarového balíku OPNET (*Optimum Network Performance*). Je hierarchicky a objektově orientován, grafické prostředí odráží reálné rozmístění jednotlivých síťových komponent, a na nejnižší úrovni je chování jednotlivých komponent zapsáno v jazyce C/C++. Dále obsahuje široké možnosti v oblasti simulace a analýzy výsledků.

OPNET Modeler již v sobě obsahuje řadu knihoven jednotlivých síťových komponent převážně pro Ethernet, FDDI, TCP, ATM, HTTP atd. Tento nástroj je používán vedoucími firmami v oblasti vývoje síťových technologií.

IT++ - Volně dostupná C++ knihovna obsahující třídy a funkce pro zpracování signálů a různé matematické funkce. Její hlavní použití je při simulacích komunikačních systémů a provádění výzkumu v oblasti komunikací. Jádro knihovny je velice podobné programům Matlab nebo GNU Octave. Hlavní výhodou IT++ je volná dostupnost zdarma pod všeobecnou veřejnou licencí GNU GPL (*General Public License*) a možnost provozu na většině operačních systémů.

Jako hlavní simulační nástroj byl vybrán Mathworks Matlab zejména díky možnosti běhu programu v příkazové řádce na vzdáleném PC, využití paralelních výpočtů ve výpočetním centru (METACentrum) a také kvůli „průhlednosti“ programování skriptů (m-file) a jednoduchosti při odlaďování chyb samotných skriptů.

Později v průběhu prací na simulacích koexistence se však ukázalo jako výhodnější použití prostředí Matlab Simulink, které umožňuje rychlejší výpočty, efektivnější práci s pamětí počítače a obsahuje knihovny bloků pro použití při simulacích komunikačních systémů.

1.1.6 Doporučení IEEE 802.15.2

Skupina IEEE 802.15 vydala doporučení týkající se koexistence WPAN sítí a jiných bezdrátových systémů v bezlicenčním frekvenčním pásmu (15). Mimo jiné také obsahuje popis několika metod používaných pro potlačení vzájemných interferencí. Techniky se dělí na nekolaborativní a kolaborativní (41) metody viz dále.

Nekolaborativní techniky pro systém Bluetooth

Nekolaborativní metody jsou doporučeny pro předcházení kolizím bez vzájemné komunikace mezi standardy.

AFH (Adaptive Frequency Hopping)

Součástí standardu Bluetooth 1.2. Je to ale pouze částečné řešení, které řeší primárně interference, ne koexistenci. Testy navíc ukazují, že interference jsou eliminovány pouze při vzdálenosti větší než 2 m. Při menších vzdálenostech velice rychle roste chybovost. VoWLAN (*Voice over WLAN*) a Bluetooth SCO jsou techniky velice náchylné na zpoždění a potřebují vysokou kvalitu a spolehlivost bezdrátového spojení. Problém interference Bluetooth a Wi-Fi roste s nutností integrace obou technik bezdrátového přenosu na velice malé ploše (PCMCIA kombi karta, mobil, ...). Metoda AFH je blíže rozebrána v kapitole 3.7.

APSS (Adaptive Packet Selection and Scheduling)

Technika pracující na MAC vrstvě standardu Bluetooth. Jelikož Bluetooth používá více druhů paketů o různých délkách a různých dopředných ochranách (FEC), je možné adaptovat typ vysílaných dat podle aktuálních podmínek. Například používání kratších paketů snižuje nutnost přeposílání velkých bloků dat při vzniku interferencí a nutnosti opakovaného přenosu. Protože bitová chybovost při interferenci je z velké části způsobena kolizemi a ne šumem, můžeme úplně vypustit FEC kódování, které nás před kolizemi stejně neochrání. APSS technika může být implementována v MAC vrstvě protokolu, a proto není potřeba žádná hardwarová úprava zařízení. APSS snižuje celkový přenos dat čekáním na prázdný kanál, což ovšem v mnoha aplikacích nezpůsobí žádné problémy. Díky tomu ovšem APSS není možné použít pro SCO hlasové pakety, které nemůžou být zpožděny kvůli citlivosti hlasového přenosu na zpoždění.

UWB - Bluetooth 3.0

Skupina Bluetooth SIG plánuje přidání fyzické vrstvy, která používá UWB. V takovém případě by se úroveň vzájemného rušení podstatně snížila.

Nekolaborativní techniky pro systém Wi-Fi

AIM (Adaptive Interference Management)

Metoda předcházení kolizím vyvinutá společností InterDigital. Tento způsob funguje na principu přepínání kanálů Wi-Fi v závislosti na naměřených interferencích. Je implementován do přístupových bodů a v kombinaci s AIM anténou, která má v jednom směru téměř nulový vyzařovací diagram umožňuje aktivní snížení interferencí v síti a lepší využití funkce Bluetooth AFH.

Kolaborativní techniky

Kolaborativní techniky předcházení interferencím pracují na principu koordinovaného přístupu k médiu. Koexistenci bezdrátových zařízení se zabývá pracovní skupina IEEE 802.15.2, která vydala sadu doporučení pro předcházení kolizím (15), avšak žádný standardizovaný protokol, který by harmonizoval použití Bluetooth a Wi-Fi v jednom zařízení zatím neexistuje. Aktuální výzkum se odehrává především přímo u výrobců, kteří při implementaci obou standardů do jednoho zařízení často využívají své proprietární protokoly (Broadcom, Intel, STMicroelectronics, Texas Instruments).

AWMA (Alternating Wireless Media Access)

Metoda AWMA pracuje na jednoduchém principu přepínání vysílání Bluetooth a Wi-Fi. Jde vlastně o časový multiplex, kdy dochází k přepínání mezi Wi-Fi a Bluetooth čímž je zabráněno kolizím. Tato metoda předpokládá jeden společný Access Point, který je propojen s Bluetooth Master zařízením a je tedy možné provádět řízení přepínání vysílání. Tato metoda není schopná poskytnout garanci okamžitého přenosu Bluetooth SCO paketů a tak stejně jako APSS není vhodná pro přenos hlasu a jiných, na zpoždění citlivých dat.

PTA (Packet Traffic Arbitration)

PTA je jednou z technik podporujících přenos hlasu (SCO přenos). Pracuje na MAC vrstvě a k funkci potřebuje informace o prioritách jednotlivých paketů, používaných frekvencích atd. Metoda PTA může velkou měrou přispět ke snížení koexistencí v síti, avšak kvůli své komplexnosti je velice náročná na design. Metoda používá speciální signalizaci a pro svou složitost je implementace možná jen u čipů stejného výrobce.

1.2 Cíle disertace

Téma koexistence Bluetooth a Wi-Fi je velice diskutovanou problematikou. Většina měření a simulací, které jsou popsány v dostupné odborné literatuře se zabývají starší verzí standardu IEEE 802.11b a specifikací Bluetooth 1.1, která nepodporuje adaptivní frekvenční skákání pro předcházení kolizím v pásmu ISM 2,4.

Disertační práce je zaměřena na vytvoření modelu systémů Bluetooth 2.0 a Wi-Fi (IEEE 802.11g) v prostředí Mathworks Matlab. Cílem je zhodnocení vzájemné koexistence obou systémů v závislosti na poměrech výkonů, přítomnosti a typu kanálů s přihlédnutím k použití metod pro předcházení kolizím. Použité metody a výsledky simulací v prostředí Mathworks Matlab jsou zpracovány a ověřeny v reálných podmínkách měření. Je provedeno testování robustnosti jednotlivých systémů v závislosti na nastaveném výkonu i v závislosti na verzi použitého standardu.

Disertační práce je zaměřená zejména na dva nejrozšířenější bezdrátové systémy pro WLAN (Wi-Fi) a WPAN (Bluetooth). Do vytvořeného simulačního programu v prostředí MathWorks Matlab je implementován mechanismus pro předcházení vzájemnému rušení AFH, který je součástí novější verze standardu Bluetooth.

Cíle disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

- Posouzení odolnosti bezdrátových standardů v závislosti na rušení typu AWGN.
- Modelování vzájemné koexistence obou systémů.
- Porovnání výsledků vzájemného rušení v závislosti na použití metody pro předcházení a snižování interferencí.
- Ověření použité metody a vypočtených výsledků měření v laboratorních podmínkách.
- Metodické pokyny pro použití Bluetooth a Wi-Fi systémů s ohledem na vzájemnou koexistenci.

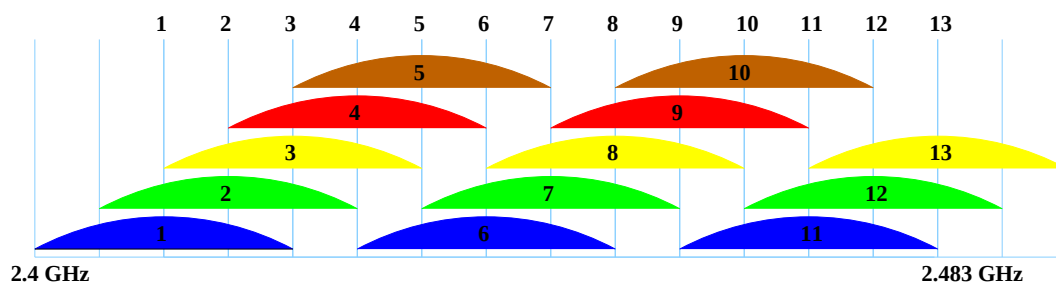
2.1 Dostupné rádiové frekvence

Zatímco standard IEEE 802.11b/g používá sdílené pásmo 2,4 GHz, u standardu IEEE 802.11a je použito frekvenční pásmo v oblasti 5 GHz a proto není v této práci podrobněji popisován. Disertační práce je zaměřena výhradně na standard IEEE 802.11b, který používá metodu DSSS a standard IEEE 802.11g, který je zpětně kompatibilní s IEEE 802.11b a je rozšířen o použití technologie OFDM pro přenosové rychlosti až 54 Mbit/s. Pro obě verze standardu jsou definovány frekvence v pásmu ISM 2,4 GHz podle tabulky 2.1. Označením frekvence se rozumí střed kanálu.

Tabulka 2.1: Nosné frekvence 802.11b (kanály 1 - 13).

Kanál [-]	1	2	3	4	5	6	...	11	12	13	14
Frekvence [GHz]	2,412	2,417	2,422	2,427	2,432	2,437	...	2,462	2,467	2,472	2,484

V pásmu 2,4 GHz je sice podle ETSI 13 povolených kanálů, avšak kanály jsou širší než rozestupy mezi nimi, a tak jsou ve skutečnosti k dispozici jen 3 vzájemně se nepřekrývající kanály (Obr. 2.1). V tabulce 2.2 je vidět, jaká je možnost použití pásma ISM v jednotlivých zemích.



Obrázek 2.1: Rozdělení kanálů IEEE 802.11b.

Tabulka 2.2: Použitelnost IEEE 802.11 v pásmu ISM je jednotlivých zemích.

Země	Kanály (frekvence)
USA a Kanada	1 - 11 (2,412 - 2,462 GHz)
Evropa mimo Francie a Španělska (ETSI konvence)	1 - 13 (2,412 - 2,472 GHz)
Francie	10 - 13 (2,457 - 2,472 GHz)
Španělsko	10 - 11 (2,457 - 2,462 GHz)
Japonsko	14 (2,484 GHz)

2.2 Přehled standardů podle IEEE 802.11

Standard IEEE 802.11 vznikl v roce 1997 jako alternativa k pevným „drátovým“ sítím na bázi Ethernetu (16). Standard poskytoval přenosové rychlosti 1 a 2 Mbit/s při použití DBPSK, DQPSK a Barkerova kódování. Kvůli malým přenosovým rychlostem původního standardu byl následně vypracován standard 802.11b v roce 1999 a standard 802.11g v roce 2003. Všechny verze standardu pracující v pásmu 2,4 GHz jsou zpětně kompatibilní. V roce 1999 vznikla verze 802.11a, která ovšem pracuje v pásmu 5 GHz a s 802.11b,g není kompatibilní. Přehled standardů je zobrazen v tabulce 2.3.

Tabulka 2.3: Přehled nejdůležitějších standardů pro WLAN podle IEEE.

standard	vznik	přenosové rychlosti	modulace	kódování
802.11	1997	1, 2 Mbit/s	DBPSK a DQPSK	Barkerovo k.
802.11b	1999	1, 2, 5.5, 11 Mbit/s	DBPSK a DQPSK	Barkerovo k., CCK
802.11g	2003	až 54 Mbit/s	DBPSK až 64QAM	OFDM
802.11a	1999	až 54 Mbit/s	BPSK až 64QAM	OFDM
802.11n	2007-8	až 540 Mbit/s	DBPSK až 64QAM	OFDM, MIMO

2.3 Fyzická vrstva

Fyzická vrstva (*PHY* - *Physical Layer*) je fyzickým rozhraním mezi zařízeními v síti. Jelikož se jedná o bezdrátový přenos dat, týká se fyzická vrstva způsobů přenosu signálu (modulace, kódování).

Specifikace standardu IEEE 802.11b/g/a (16) obsahuje definici několika typů fyzických vrstev:

- DSSS PHY (podporující rychlost 1 a 2 Mbit/s, r. 1997).
- HR/DSSS PHY (High Rate - podpora 5.5 a 11 Mbit/s, r. 1999).
- OFDM PHY - ERP PHY (až 54 Mbit/s, podpora OFDM - IEEE 802.11a/g, r. 2003).
- FHSS PHY (nepoužívá se, obdoba FHSS u Bluetooth, 1,2 Mbit/s, r. 1997).
- Infrared (IR) PHY (nepoužívá se, infračervený přenos, r. 1997).

V prvním vydání standardu 802.11 v roce 1997 byly standardizovány tři fyzické vrstvy (DSSS PHY, FHSS PHY a IR PHY). V roce 1999 byly tyto vrstvy při revizi standardu doplněny o další dvě vrstvy HR/DSSS PHY a OFDM PHY. V roce 2003 pak byla vrstva OFDM použita i pro další revizi standardu 802.11g (51; 16).

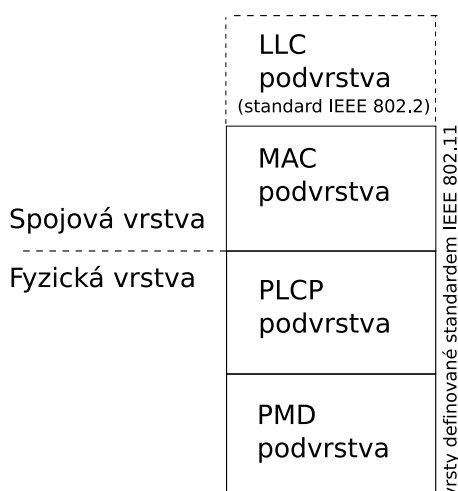
Standard IEEE 802.11b/g, kterým se v disertační práci zabývám, používá na fyzické vrstvě kromě OFDM a DSSS také frekvenční skákání (FHSS) a metodu infračerveného přenosu dat (IR - Infrared). Jelikož na trhu nejsou dostupná téměř žádná Wi-Fi zařízení, která by frekvenční skákání nebo infračervený přenos podporovala, je disertační práce zaměřena pouze na fyzickou vrstvu využívající přímo rozprostřené spektrum (IEEE 802.11b/g) a ortogonálního frekvenčního multiplexu (IEEE 802.11g) - DSSS PHY,

HR/DSSS PHY, OFDM PHY. Standardem IEEE 802.11a se v práci nezabývám, protože používá kmitočtové pásmo 5 GHz, ve kterém nedochází k takovým problémům s interferencemi jako ve volném pásmu ISM 2,4 GHz.

Fyzická vrstva standardu IEEE 802.11b/g je rozdělena do dvou podvrstev:

PMD podvrstva Stará se o kódování bezdrátového přenosu. Zajišťuje přenos jednotlivých bitů z PLCP vrstvy do „éteru“ pomocí antény.

PLCP podvrstva Představuje spojení mezi přenášenými rámci podvrstvy ovládání přístupu k médiu (MAC) a přenosovým médiem. Připojuje k přenášeným rámcům vlastní záhlaví v závislosti na tom, jaká bude použita metoda modulace. Přenášený rámec je tedy nezávislý na metodě použité modulace. Poskytuje také funkci Clear Channel Assessment (CCA), což je odezva pro podvrstvu MAC (viz Obr. 2.2), že přenosové médium je k dispozici. Díky CCA je možné pro standard 802.11 používat různá přenosová média. V dnešní době se používá téměř výhradně rádiové spektrum.



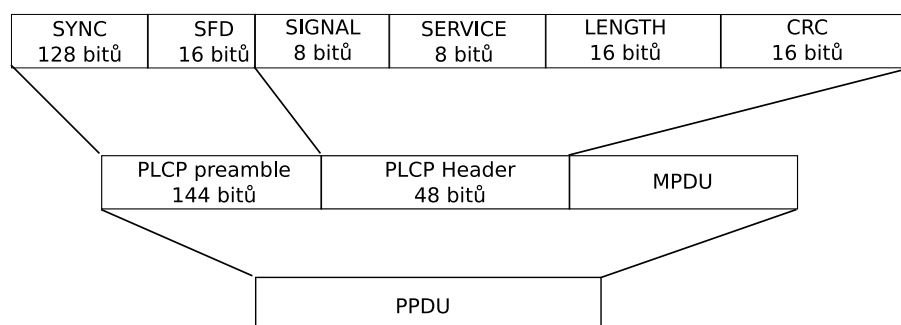
Obrázek 2.2: Rozdělení fyzické vrstvy IEEE 802.11.

2.3.1 Fyzická vrstva DSSS

Fyzická vrstva DSSS poskytuje standardu WLAN (IEEE 802.11) základní přenosové rychlosti užitečných dat 1 a 2 Mbit/s. Systém DSSS používá v základním pásmu modulační techniky DBPSK (1 Mbit/s) a DQPSK (2 Mbit/s).

Popis PLCP podvrstvy

PLCP (*Physical Layer Convergence Protocol*) je podvrstva sedmi vrstevného modelu OSI (51), která se stará o přenos MPDU (*MAC Protocol Data Unit*) a jejich převod z a do PPDU (*Physical Layer Data Unit*).

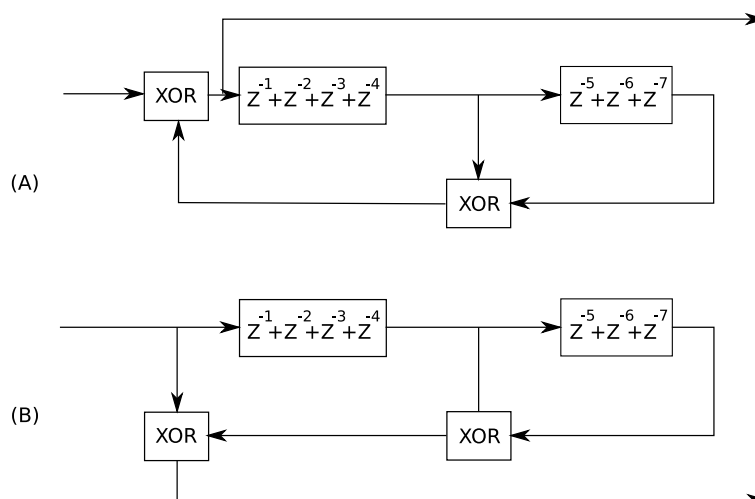


Obrázek 2.3: Formát PLCP rámce pro systém DSSS.

Formát PLCP rámce

Na obrázku 2.3 je vidět formát PLCP rámce pro fyzickou vrstvu DSSS.

PLCP hlavička je celá přenášena rychlostí 1 Mbit/s s modulací DBPSK. Všechny přenášené bity jsou skramblovány polynomem $G(z) = z^{-7} + z^{-4} + 1$ viz obrázek 2.4.



Obrázek 2.4: Skrambler (A) a Deskrambler (B) používaný na fyzické vrstvě IEEE 802.11.

Definice jednotlivých polí PLCP rámce

SYNC 128 bitů skramblovaných jedniček - synchronizace přijímače

SFD Start Frame Delimiter - oddělovač začátku rámce - 16 bitů „F3A0“ (1111001110100000)

SIGNAL 8 bitů - indikace použité modulace: „0A“ - DBPSK, „14“ - DQPSK

SERVICE 8 bitů - pro budoucí použití

LENGTH 16 bitů - počet mikrosekund trvání MPDU

CRC 16 CRC-16 FCS ochrana pro políčka SIGNAL, SERVICE, LENGTH

Zabezpečení CRC-16 FCS je definováno jako jedničkový doplněk ke zbytku po dělení modulo 2 zabezpečovaných PLCP políček polynomem $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$. Všechny zabezpečovací CRC výpočty jsou prováděné vždy ještě před skramblováním dat.

Popis PMD podvrstvy

Rozprostírací sekvence

K rozprostírání dat na fyzické vrstvě standardu IEEE 802.11 pro systém DSSS se používá 11 čipová sekvence, tzv. Barkerův kód:

+1,-1,+1,+1,-1,+1,+1,+1,-1,-1,-1.

Každý přenášený symbol je 11 čipů dlouhý a čipy se přenáší v pořadí zleva.

Modulace a přenosové rychlosti

Pro fyzickou vrstvu DSSS PHY jsou definovány dva přenosové formáty. Tzv. „*Basic Access Rate*“ je založen na rychlosti 1 Mbit/s a modulaci DBPSK (viz Tab. 2.4). Tzv. „*Enhanced Access Rate*“ je založen na rychlosti 2 Mbit/s a modulaci DQPSK (viz Tab. 2.5).

Tabulka 2.4: 1 Mbit/s - DBPSK.

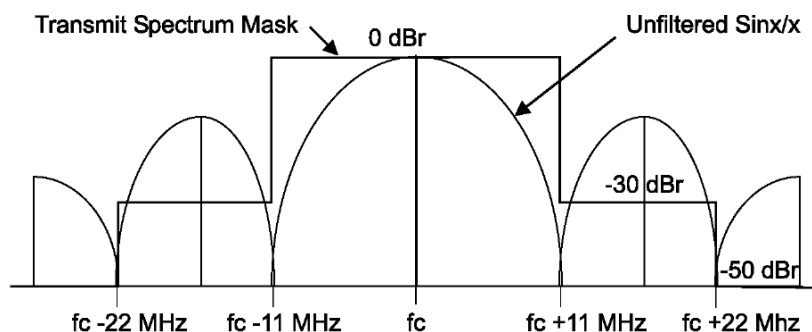
vstup	změna fáze ($+j\omega$)
0	0
1	π

Tabulka 2.5: 2 Mbit/s - DQPSK.

vstup	změna fáze ($+j\omega$)
00	0
01	$\pi/2$
11	π
10	$3\pi/2(-\pi/2)$

Spektrální maska

Na obrázku 2.5 je zobrazena spektrální maska definovaná pro systém DSSS standardu IEEE 802.11.



Obrázek 2.5: Spektrální maska pro systém DSSS (16).

2.3.2 Fyzická vrstva HR/DSSS

Fyzická vrstva High Rate DSSS (HR/DSSS PHY) je rozšířením vrstvy DSSS PHY a zvyšuje přenosové rychlosti poskytované na fyzické vrstvě a umožňuje zvýšit přenosovou rychlost užitečných dat (*Payload*) na 5,5 Mbit/s a 11 Mbit/s. Vyšších rychlostí bylo dosaženo díky použití metody 8 čipového komplementárního kódování (*CCK - Complementary Code Keying*). Čipová rychlost je 11 Mbit/s, tedy stejná jako u systému DSSS popisovaného v kapitole 2.3.1. Systém HR/DSSS používá díky stejné čipové rychlosti stejnou šířku pásma jako systém DSSS. Systém HR/DSSS se součástí standardu IEEE 802.11b, který rozšířil původní standard o vyšší rychlosti v roce 1999.

Tabulka 2.6: IEEE 802.11b - specifikace přenosových rychlostí DSSS.

Rychlost	Délka kódu	Mod.	Symbolová rychlost	Bits/Sym.	Systém
1 Mbit/s	11 (Barkerovo kódování)	DBPSK	1 MSps	1	DSSS
2 Mbit/s	11 (Barkerovo kódování)	DQPSK	1 MSps	2	DSSS
5.5 Mbit/s	4 (CCK)	DQPSK	1.375 MSps	4	HR/DSSS
11 Mbit/s	8 (CCK)	DQPSK	1.375 MSps	8	HR/DSSS

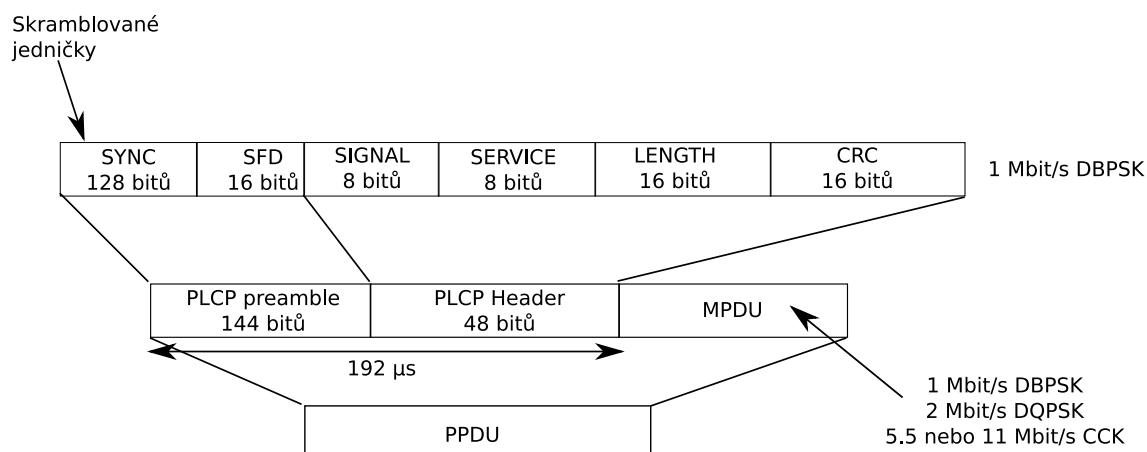
Oba systémy (HR/DSSS i DSSS) používají stejnou PLCP preamble i hlavičku a díky tomu jsou oba systémy kompatibilní.

Popis PLCP podvrstvy

Standard IEEE 802.11b obsahuje definici dvou typů hlavičky a preamble. Dlouhá verze, kompatibilní s původním standardem 802.11 je povinnou částí IEEE 802.11b, podporuje systém DSSS a rychlosti 1 Mbit/s a 2 Mbit/s. Krátká verze hlavičky je použita pro přenosové rychlosti 5,5 Mbit/s, 11 Mbit/s a používá se pokud všechny zařízení v BSS (*Basic Service Set*) podporují IEEE 802.11b rozšíření HR/DSSS.

Formát PLCP rámce - dlouhý

Na obrázku 2.6 je vidět formát PLCP rámce pro fyzickou vrstvu DSSS.



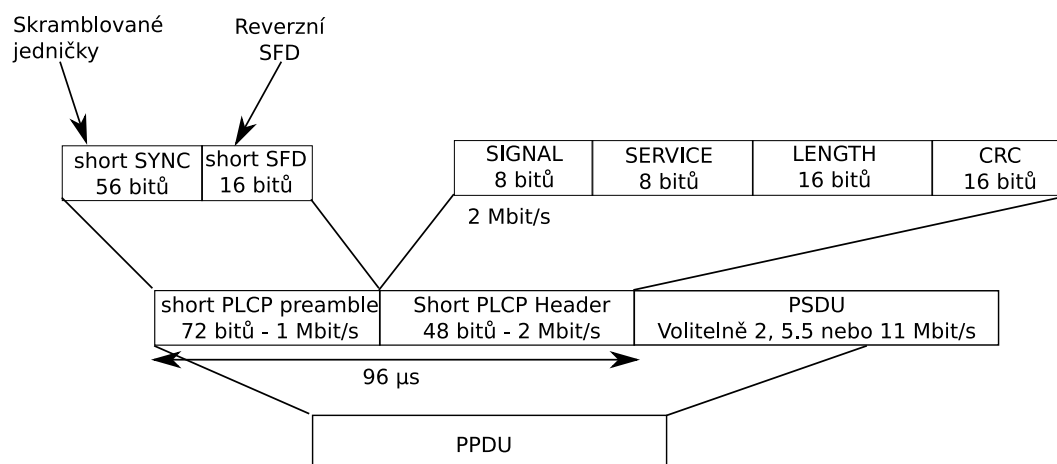
Obrázek 2.6: Formát PLCP rámce pro systém HR/DSSS - dlouhý.

Definice jednotlivých polí PLCP rámce - dlouhý HR/DSSS**SYNC** 128 bitů skramblovaných jedniček - synchronizace přijímače**SFD** Start Frame Delimiter - 1111 0011 1010 0000**SIGNAL** 8 bitů - indikace použité modulace: $0A^{HEX}$ - 1 Mbit/s, 14^{HEX} - 2 Mbit/s, 37^{HEX} - 5.5 Mbit/s, $6E^{HEX}$ - 11 Mbit/s**SERVICE** 8 bitů - část informace o použití PBCC, zbytek pro budoucí použití**LENGTH** 16 bitů - počet mikrosekund trvání MPDU**CRC** 16 CRC-16 FCS ochrana pro políčka SIGNAL, SERVICE, LENGTH

PLCP hlavička je celá přenášena rychlostí 1 Mbit/s s modulací DBPSK. Všechny přenášené bity jsou skramblovány polynomem $G(z) = z^{-7} + z^{-4} + 1$ viz obrázek 2.4. Políčka SIGNAL, SERVICE a LENGTH jsou podrobena CRC-16 FCS stejně jako v systému DSSS polynomem $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$.

Formát PLCP rámce - krátký

Na obrázku 2.7 je vidět formát PLCP rámce pro fyzickou vrstvu DSSS. Krátká preamble a hlavička je do standardu přidána jako možnost pro zvýšení efektivity přenosu užitečných dat vzhledem k přenášeným servisním informacím.



Obrázek 2.7: Formát PLCP rámce pro systém HR/DSSS - krátký.

Definice jednotlivých polí PLCP rámce - krátký HR/DSSS**SYNC** 56 bitů skramblovaných nul - synchronizace přijímače**SFD** 16 bitů - Start Frame Delimiter - 0000 0101 1100 1111, přijímač, který nepodporuje HR/DSSS není schopen detekovat tento SFD**SIGNAL** 8 bitů - indikace použité modulace: 14^{HEX} - 2 Mbit/s, 37^{HEX} - 5.5 Mbit/s, $6E^{HEX}$ - 11 Mbit/s

SERVICE 8 bitů - část informace o použití PBCC, zbytek pro budoucí použití

LENGTH 16 bitů - počet mikrosekund trvání MPDU

CRC 16 CRC-16 FCS ochrana pro políčka SIGNAL, SERVICE, LENGTH

Skramblování i cyklická redundantní kontrola platí stejně jako u dlouhého formátu PLCP rámce viz Obr. 2.4.

Popis PMD podvrstvy

Modulace a přenosové rychlosti pro 1 Mbit/s a 2 Mbit/s platí stejně jako u systému DSSS (viz Tab. 2.4 a Tab. 2.5). Pro rychlosti 5.5 Mbit/s a 11 Mbit/s je použito komplementární kódování CCK.

Komplementární kódování je modulační schéma používané ve specifikaci IEEE 802.11b. Jeho výhodou jsou větší přenosové rychlosti a zachování přibližně stejné šířky pásma jako u původního standardu. Komplementární kódování přenáší data v symbolech o délce 8 čipů, kdy každý čip je komplexní QPSK bitový pár při čipové rychlosti 5,5 a 11 Mčipů/s. Při přenosové rychlosti Wi-Fi 5,5 (11 Mbit/s) jsou každé 4 bity (8 bitů) modulovány na 8 čipů C_0 až C_7 , které se vypočítají rovnicí 2.1 (26)

$$c = \left\{ \begin{array}{l} e^{(j\varphi_1+j\varphi_2+j\varphi_3+j\varphi_4)}, e^{(j\varphi_1+j\varphi_3+j\varphi_4)}, \\ e^{(j\varphi_1+j\varphi_2+j\varphi_4)}, -e^{(j\varphi_1+j\varphi_4)}, \\ e^{(j\varphi_1+j\varphi_2+j\varphi_3)}, e^{(j\varphi_1+j\varphi_3)}, \\ -e^{(j\varphi_1+j\varphi_2)}, e^{(j\varphi_1)} \end{array} \right\}, \quad (2.1)$$

kde φ_1 až φ_4 jsou určeny stavy právě modulovaných bitů (symbolů). Na obrázku 2.15 je naznačený průběh kódování pro rychlost 11 Mbit/s. Při rychlosti 5,5 Mbit/s i 11 Mbit/s se posílají symboly rychlostí 1,375 MSamp/s. Modulace DQPSK používá 4 fáze (0, 90, 180 a 270 stupňů) pro zakódování 2 informačních bitů. Protože je v pásmu ISM omezený vysílaný výkon, lze použít komplementární kódování pouze pokud není přítomno žádné silné rušení. Ve zhoršených podmínkách se využívá původní metoda s Barkerovým kódováním a přenosovými rychlostmi 1 a 2 Mbit/s. Rychlost 1 Mbit/s se kvůli spolehlivosti používá také vždy pro přenos řídicích informací v síti 802.11b.

Spektrální maska systému HR/DSSS odpovídá obrázku 2.5 a systému DSSS.

2.3.3 Fyzická vrstva ERP

ERP (*Extended Rate PLCP Sublayer*) je další rozšíření specifikace IEEE 802.11 pro pásmo ISM 2,4 GHz, známé jako IEEE 802.11g. Toto rozšíření je postaveno na systému DSSS pro přenosové rychlosti 1 Mbit/s a 2 Mbit/s, popsáném v kapitole 2.3.1 a HR/DSSS pro rychlosti 1 Mbit/s, 2 Mbit/s, 5.5 Mbit/s a 11 Mbit/s, popsáném v kapitole 2.3.2. Fyzická vrstva tohoto rozšíření je založena na OFDM a poskytuje přenosové rychlosti 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 a 54 Mbit/s. Dále standard obsahuje popis volitelného módu ERP-PBCC, který poskytuje přenosové rychlosti 22 a 33 Mbit/s a kterým se z důvodu méně časté implementace do zařízení v disertační práci nezabývám.

Zařízení podporující systém ERP by měly být schopny komunikovat v BSS i v tzv. kombinovaném módu. Například ERP BSS by měl být schopen poskytnout ERP-OFDM-only mód, smíšený ERP-OFDM a ERP-DSSS/CCK mód, nebo ERP-DSSS/CCK a NonERP mód.

Systém ERP obsahuje implementaci 4 základních módů:

ERP-DSSS/CCK Doplnění HR/DSSS kvůli interoperabilitě, podobný původní DSSS (1, 2, 5.5 a 11 Mbit/s)

ERP-OFDM Hlavní mód umožňující rychlosti až 54 Mbit/s s pomocí OFDM

ERP-PBCC Volitelný mód pro rychlosti 22 a 33 Mbit/s

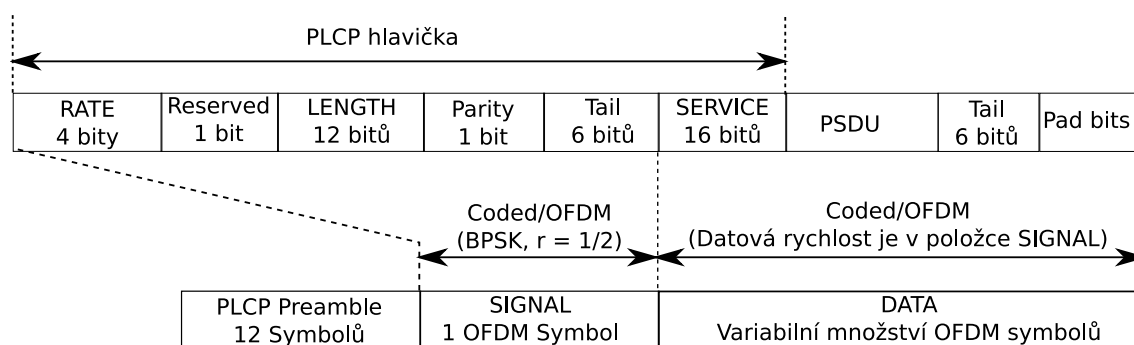
DSSS-OFDM Volitelný mód, hybridní mód kombinující DSSS preamble a hlavičku s užitečnými daty přenášenými pomocí OFDM

Popis PLCP podvrstvy

V disertaci se blíže zabývám a pro simulace používám jen mód ERP-DSSS/CCK a ERP-OFDM a DSSS-OFDM, proto mód ERP-PBCC blíže nepopisuji.

Formát PLCP rámce - mód ERP-OFDM

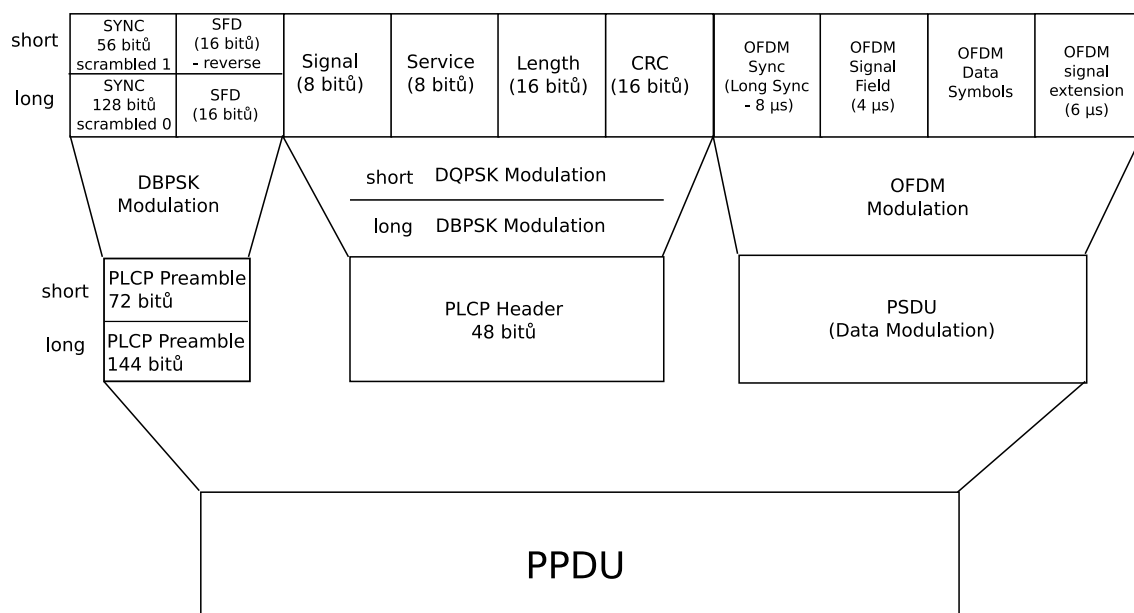
Na obrázku 2.8 je vidět formát PLCP rámce pro ERP-OFDM mód.



Obrázek 2.8: Formát PLCP rámce pro systém ERP-OFDM.

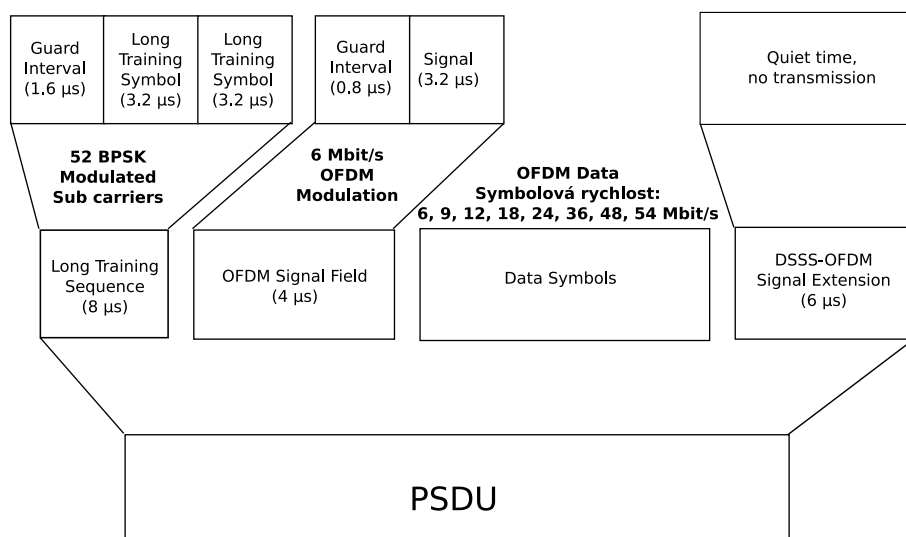
Formát PPDU - mód DSSS-OFDM

Na obrázku 2.9 je vidět formát PLCP rámce pro DSSS-OFDM mód.



Obrázek 2.9: Formát PPDU rámce pro mód DSSS-OFDM, pro krátkou i dlouhou verzi.

Formát DSSS-OFDM PSDU rámce



Obrázek 2.10: Formát PSDU rámce pro DSSS-OFDM mód.

Popis PMD podvrstvy

Standard 802.11g používá pro dosažení přenosové rychlosti 54 Mbit/s techniku ortogonálního multiplexu s kmitočtovým dělením OFDM (48). Součástí disertační práce je vytvoření modelu fyzické vrstvy pro specifikaci IEEE 802.11g, která je kromě zpětné podpory standardu IEEE 802.11b založena na modulaci OFDM a podporuje rychlosti 6 Mbit/s až 54 Mbit/s na fyzické vrstvě (Tab. 2.7).

Tabulka 2.7: IEEE 802.11g - specifikace přenosových rychlostí OFDM.

Datová rychlost	Modulace	Kódový poměr	Kódované bity na nosnou	Kódované bity na OFDM symbol	Datové bity na OFDM symbol
6 Mbit/s	BPSK	1/2	1	48	24
9 Mbit/s	BPSK	3/4	1	48	36
12 Mbit/s	QPSK	1/2	2	96	48
18 Mbit/s	QPSK	3/4	2	96	72
24 Mbit/s	16QAM	1/2	4	192	96
36 Mbit/s	16QAM	3/4	4	192	144
48 Mbit/s	64QAM	2/3	6	288	192
54 Mbit/s	64QAM	3/4	6	288	216

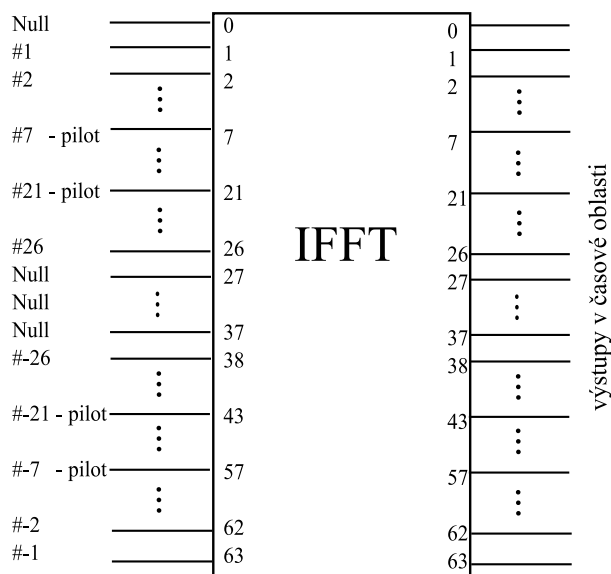
Popis časových parametrů IEEE 802.11g

Tabulka 2.8: Parametry IEEE 802.11g - OFDM.

Parametr	hodnota pro 20 MHz kanál
N_{SD} : počet datových subnosných	48
N_{SP} : počet pilotních subnosných	4
N_{ST} : celkový počet subnosných	52 ($N_{SD} + N_{SP}$)
Δ_F : vzdálenosti subnosných	0,3125 MHz (= 20 MHz / 64)
T_{FFT} : perioda FFT, IFFT	3,2 μ s ($1/\Delta_F$)
$T_{PREAMBLE}$: trvání preamble	16 μ s ($T_{SHORT} + T_{LONG}$)
T_{SIGNAL} : délka celého BPSK-OFDM symbolu	4 μ s ($T_{GI} + T_{FFT}$)
T_{GI} : délka ochranného intervalu	0,8 μ s ($T_{FFT}/4$)
T_{GI2} : délka GI tréninkové sekvence	1,6 μ s ($T_{FFT}/2$)
T_{SYM} : symbolová perioda	4 μ s ($T_{GI} + T_{FFT}$)
T_{SHORT} : délka trvání krátké tréninkové sekvence	8 μ s ($10 \times T_{FFT}/4$)
T_{LONG} : délka trvání dlouhé tréninkové sekvence	8 μ s ($T_{GI2} + 2 \times T_{FFT}$)

Implementace IFFT

Inverzní Fourierova transformace je jedním z hlavních stavebních prvků vysílače OFDM. Standard IEEE 802.11g využívá 64 bodové IFFT, kde koeficienty 1 až 26 vstupních dat jsou mapovány na vstupy bloku IFFT dle obrázku 2.11. Koeficienty -26 až -1 jsou kopírovány na vstupy IFFT 38 až 64. Ostatní vstupy 27 až 37 a 0 (dc) jsou nastaveny na hodnotu 0. Po provedení IFFT je výstup cyklicky prodloužen na požadovanou délku $4 \mu\text{s}$.



Obrázek 2.11: Vstupy a výstupy bloku IFFT.

Všechny subnosné jsou modulovány pomocí modulací BPSK, QPSK, 16QAM nebo 64QAM v závislosti na zvolené přenosové rychlosti. Vstupní data jsou do konstelačního diagramu mapována pomocí Grayova kódu. Konstelační diagram je normalizován parametrem K_{MOD} tak, aby bylo dosaženo stejného průměrného výkonu pro všechny 4 modulační typy. Parametr K_{MOD} je různý pro každý typ modulace a jeho hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 2.9.

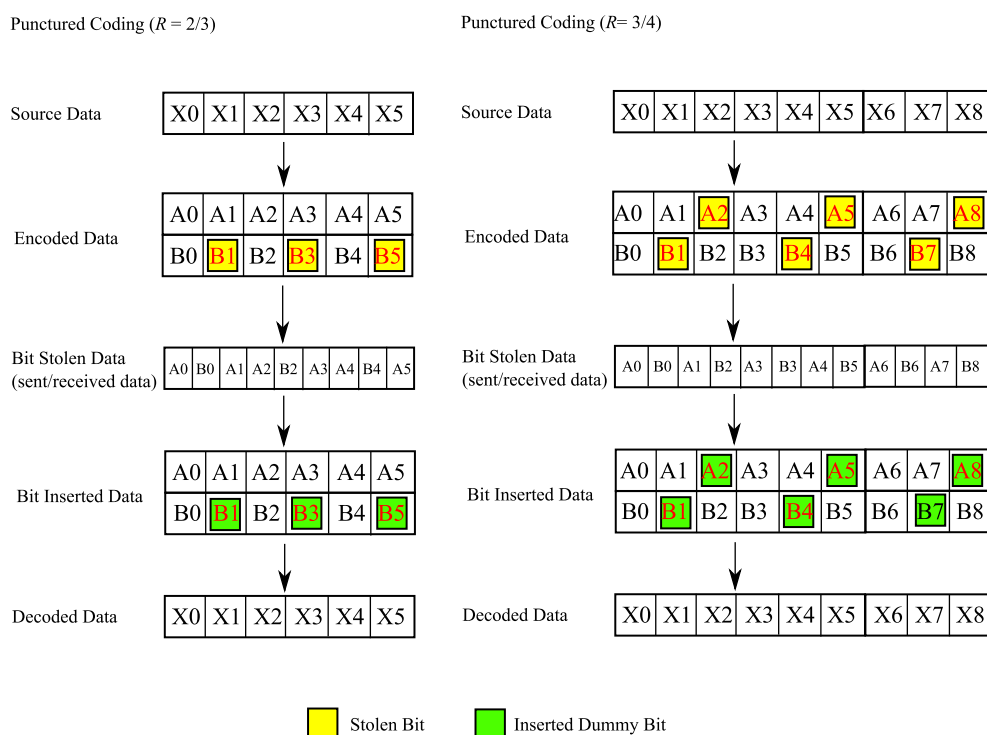
Tabulka 2.9: Závislost normalizačního parametru na typu modulace.

Modulace	K_{MOD}
BPSK	1
QPSK	$1/\sqrt{2}$
16QAM	$1/\sqrt{10}$
64QAM	$1/\sqrt{42}$

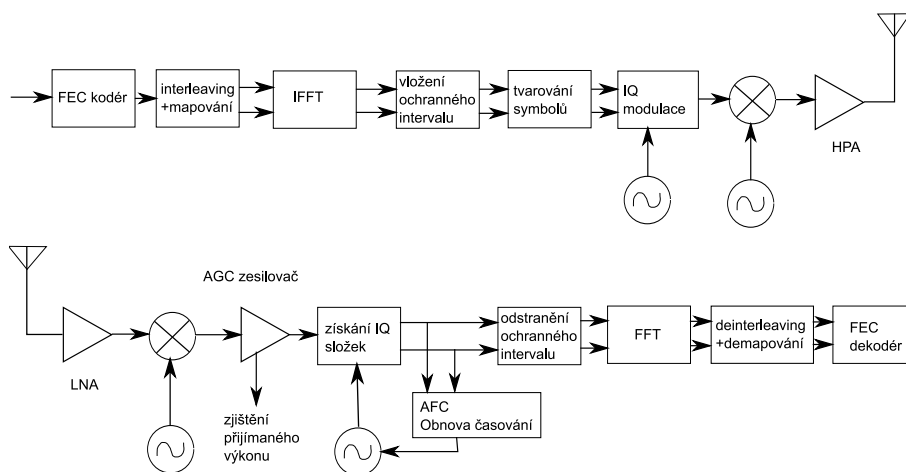
Vytečkování (Puncturing)

Vytečkování se používá ke snížení kódového poměru konvolučního kodéru. Vytečkování je použito u konvolučního kódování s kódovým poměrem $2/3$ a $3/4$. U kódového poměru $1/2$ není vytečkování použito a mezi povinné přenosové rychlosti patří právě rychlosti, u kterých není použito vytečkování (6, 12, 24 Mbit/s). Přenosové rychlosti využívající

konvolučního kódování s vytečkování jsou označeny jako volitelné a jejich implementace není povinná. Použití vytečkování je naznačeno na obrázku 2.12.



Obrázek 2.12: Konvoluční kódy 2/3 a 3/4 - vytečkování.



Obrázek 2.13: Blokový diagram vysílače a přijímače OFDM PHY.

Typické blokové zapojení vysílače a přijímače IEEE 802.11 OFDM je zobrazeno na obrázku 2.13.

2.4 Simulace v základním pásmu

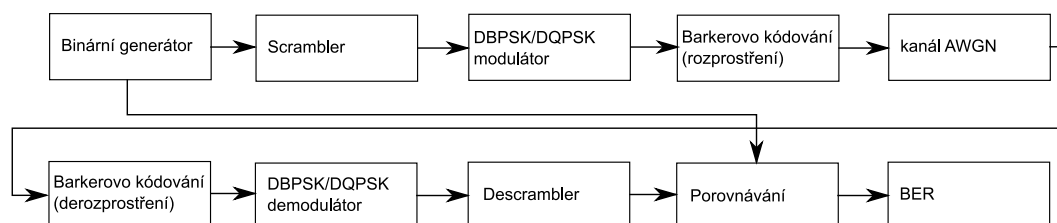
Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2, disertační práce je zaměřena na výzkum koexistence bezdrátových systémů pracujících v bezlicenčním pásmu ISM 2,4 GHz, zejména pak WLAN (Wi-Fi) (16) a systém Bluetooth (45).

Jako vhodný prostředek pro modelování bezdrátových sítí bylo zvoleno integrované prostředí pro technické výpočty, modelování a simulace MathWorks Matlab a jeho nádstavba pro simulaci a modelování dynamických systémů Matlab Simulink.

Tato část práce se zabývá vytvořením modelu fyzických vrstev jednotlivých standardů s jednoduchou simulací na AWGN kanálu. Přehled použitých kódování a modulačních technik u odpovídajících standardů Wi-Fi je zobrazen v tabulce 2.6 a 2.7. Simulace fyzické vrstvy Wi-Fi pro 1 až 11 Mbit/s byly prováděny v základním pásmu (Base-band) v programovém prostředí Mathworks Matlab.

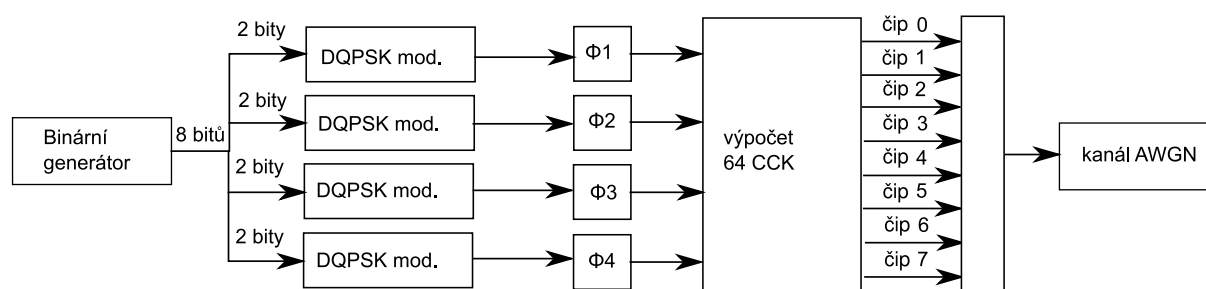
2.4.1 IEEE 802.11 - Barkerovo kódování

Standard IEEE 802.11b využívá pro přenos dat na fyzické vrstvě modulace DBPSK a DQPSK. K rozproštění signálu do 22 MHz širokého kanálu je používána Barkerova posloupnost $[1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0]$ pro rychlosti 1 a 2 Mbit/s (12). Na fyzické vrstvě s rychlostmi 5.5 a 11 Mbit/s je používáno komplementární kódování CCK (*Complementary Code Keying*). Blokové schéma simulace Barkerova kódování je zobrazeno na Obr. 2.14.

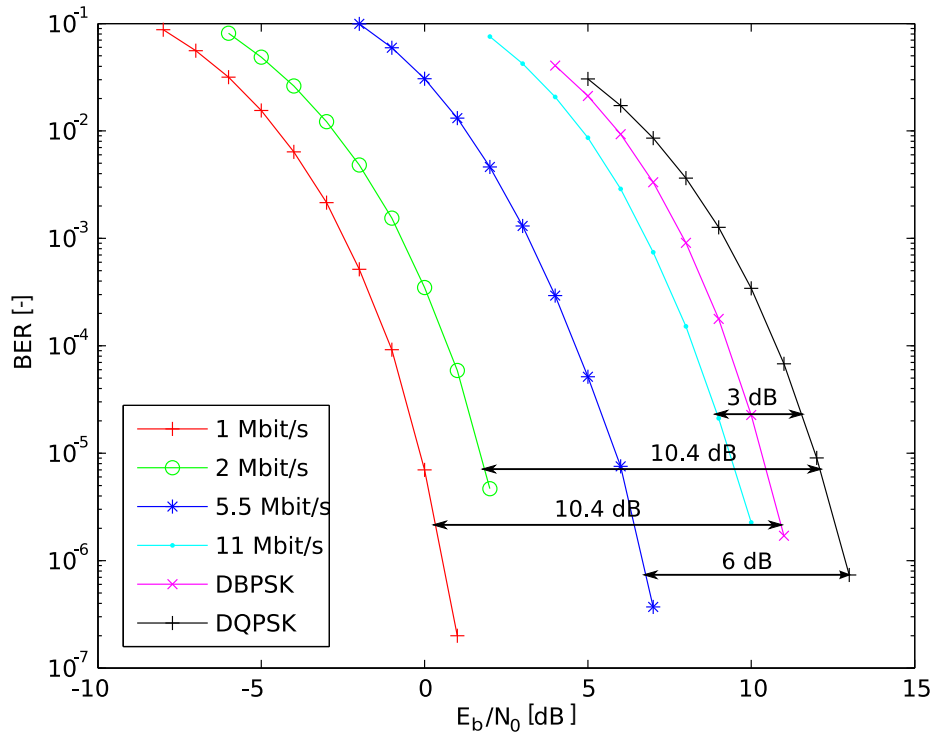


Obrázek 2.14: Blokové schéma simulace Barkerova kódování.

2.4.2 IEEE 802.11b - Komplementární kódování



Obrázek 2.15: Generování CCK čipů u standardu IEEE 802.11b (11 Mbit/s).



Obrázek 2.16: Porovnání přenosových rychlostí IEEE 802.11b.

Na obrázku 2.16 je vidět závislost chybovosti jednotlivých modulačních technik na poměru E_b/N_0 . Zobrazený graf je výstupem ze simulace fyzické vrstvy Wi-Fi pro 1, 2, 5.5 a 11 Mbit/s provedené v prostředí Matlab Simulink.

Kódový zisk systému Wi-Fi při použití Barkerova kódování se dá odvodit podle vztahu 2.2.

$$G = 10\log\left(\frac{\text{chipping_rate}}{\text{data_rate}}\right) = 10\log(11) = 10,4 \text{ dB}. \quad (2.2)$$

Kódový zisk 10,4 dB je dosahován u standardu Wi-Fi při použití přenosových rychlostí 1 a 2 Mbit/s při použití Barkerova kódování. Teoretický výpočet byl ověřen výsledky simulací, které jsou vidět v grafické podobě na obrázku 2.16. Kódový zisk dosažený při komplementárním kódování (5,5 a 11 Mbit/s) se dá odvodit pomocí vzorců:

$$\begin{aligned} G &= 10\log\left(\frac{\text{chipping_rate}}{\text{data_rate}}\right) + 10\log(2) \\ G_{cck5.5} &= 10\log(8/4) + 10\log(2) = 6 \text{ dB} \\ G_{cck11} &= 10\log(8/8) + 10\log(2) = 3 \text{ dB}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Vypočtené hodnoty kódového zisku komplementárního kódování jsou teoretické hodnoty vztahované k nekódovanému DQPSK signálu. Odpovídající výsledky jsou vidět na obrázku 2.16 jako závislosti chybovosti BER na normovaném poměru signálu ku šumu E_b/N_0 . Simulace byly prováděny pro $E_b/N_0 = -8 \text{ dB}$ až $E_b/N_0 = 10 \text{ dB}$. Normovaný poměr signálu ku šumu E_b/N_0 se spočítá z poměru signálu ku šumu SNR podle vztahu 2.4.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \cdot \left(\frac{W}{R} \right) = \frac{S}{N} \cdot (W \cdot T), \quad (2.4)$$

kde S/N je přijímaný SNR , R je rychlost kódování v bitech za sekundu, W je šířka kanálu v Hz a T je délka trvání bitové periody v sekundách.

2.4.3 IEEE 802.11g - OFDM

Simulace standardu IEEE 802.11g byla provedena v prostředí Matlab Simulink. Zjednodušené blokové schéma simulace je zobrazeno na obrázku 2.17. Vstupní bitový tok dat je generován pomocí bloku „Binární generátor“. Skramblování je pro zvýšení rychlosti simulace vynecháno, jelikož vysílaná data mají náhodný charakter a není je nutné tudíž skramblování používat. Dále je použit standardizovaný konvoluční kodér $g_0 = 133_8$ a $g_1 = 181_8$ s kódovými poměry $1/2$, $3/4$ a $2/3$. Při kódových poměrech $2/3$ a $3/4$ je použito vytečkování, které je blíže popsáno na obrázku 2.12.

Po použití konvolučního kodéru jsou data prokládána pomocí maticového a blokového prokládání a dále modulována pomocí BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM. Signály jsou normalizovány dle tabulky 2.9 tak, aby výsledný datový tok měl stejný průměrný výkon i při použití různých modulačních technik. Poté je provedena inverzní Fourierova transformace a výsledná data jsou rozšířena na délku $4 \mu s$ pomocí cyklického prefixu. Přesný popis implementace inverzní Fourierovy transformace je uveden v předchozí kapitole na obrázku 2.11. K přenášeným datům je přidán AWGN šum a na straně přijímače je analogickým způsobem demodulován (viz 2.17).

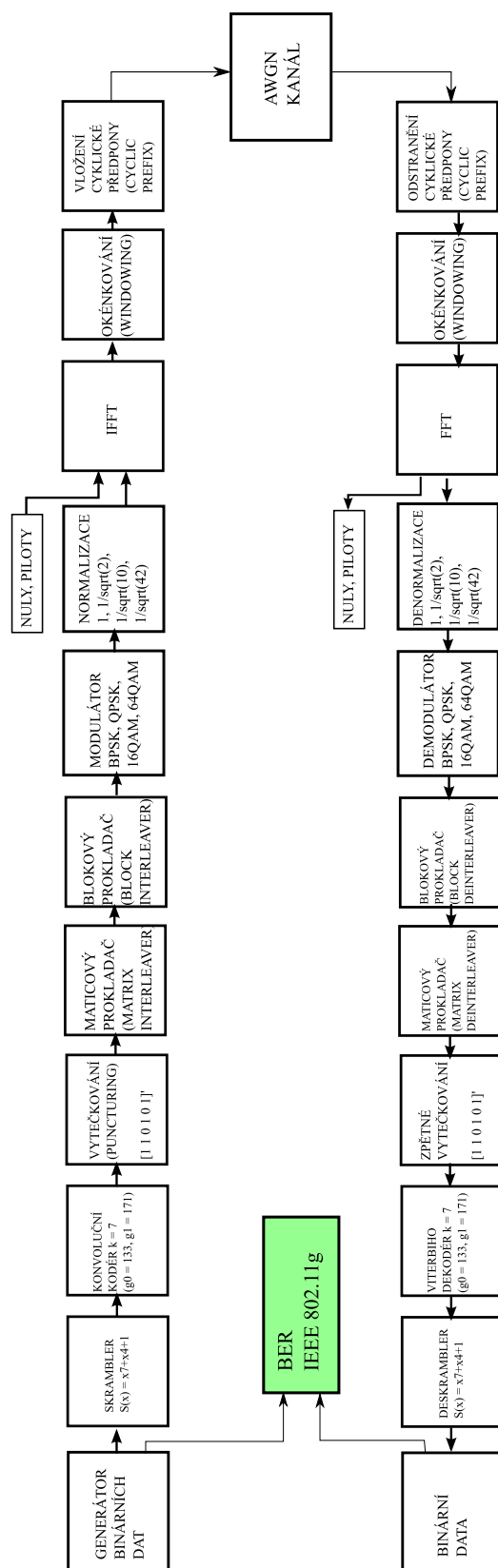
2.4.4 Okénkování OFDM signálu

Na obrázku 2.18 je zobrazen princip okénkování signálu v časové oblasti. Okénkování umožňuje plynulejší přechody mezi jednotlivými OFDM symboly, což vede ke snížení výkonu v postranních pásmech signálu IEEE 802.11g. Tímto dojde ke snížení interferencí v přilehlých kanálech.

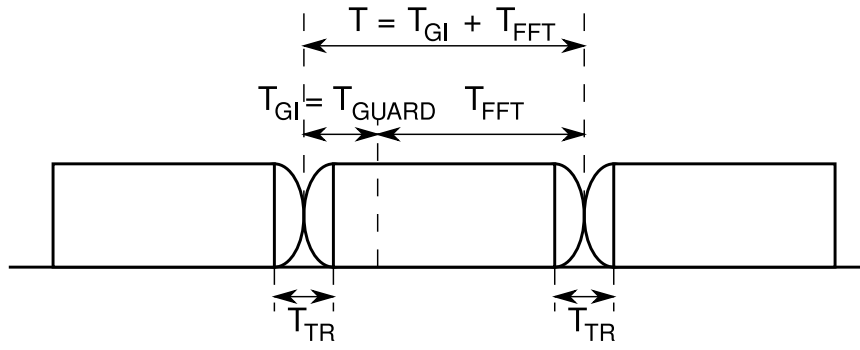
$$w_T(t) = \left\{ \begin{array}{ll} \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\left(0,5 + \frac{t}{T_{TR}}\right)\right) & (-T_{TR}/2 < t < T_{TR}/2) \\ 1 & (T_{TR}/2 \leq t < T - T_{TR}/2) \\ \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\left(0,5 - (t - T)\frac{t}{T_{TR}}\right)\right) & (T - T_{TR}/2 \leq t < T + T_{TR}/2) \end{array} \right\} \quad (2.5)$$

V simulaci je implementováno okénkování diskrétního signálu podle rovnice 2.5. Podrobnější popis okénkování je možno najít přímo ve specifikaci standardu IEEE 802.11g v kapitole 17.3.2.4 (16).

Jako příklad je uvedena okénková funkce pro parametry: délka OFDM symbolu $4 \mu s$ (512 vzorků), $T_{TR} = 100 \text{ ns}$ (12 vzorků). Je-li signál vzorkován rychlostí 20 MSym/s , je okénková funkce diskrétního signálu tedy popsána výrazem 2.6.



Obrázek 2.17: Blokové schéma fyzické vrstvy standardu IEEE 802.11g v prostředí Matlab Simulink.

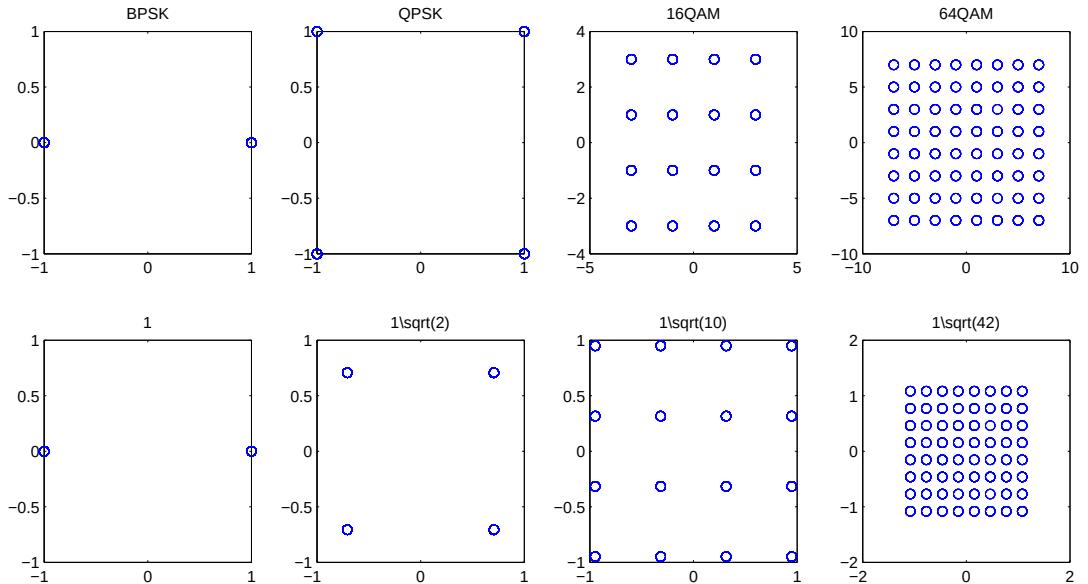


Obrázek 2.18: Okénkování.

$$w_T(n) = \left\{ \begin{array}{ll} \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\left(0,5 + \frac{n}{12}\right)\right) & 0 \leq n \leq 5 \\ 1 & 6 \leq n \leq 505 \\ \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\left(0,5 - (n - 512)\frac{n}{12}\right)\right) & 506 \leq n \leq 511 \end{array} \right\} \quad (2.6)$$

2.4.5 Normování QAM signálů

Signály jsou mapovány do konstelačního diagramu viz obrázek 2.19. Průměrný výkon při použití různých QAM modulací není konstantní. Proto se používá standardem předepsaná normalizace (viz 2.9), která upraví výkon QPSK, 16QAM a 64QAM tak, aby průměrný výkon všech modulačních technik byl stejný.



Obrázek 2.19: Normalizace konstelačních diagramů.

Výpočet normalizačního parametru

Při použití modulace QAM je často využíváno normalizace, která nastaví mapované symboly konstelačního diagramu tak, aby průměrná energie symbolů byla rovna jedné. Typické schéma pro mapování 16QAM je zobrazeno na obrázku 2.19 (horní řada). V horní řadě jsou zobrazeny typická schémata pro mapování symbolů BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM a ve spodní řadě jsou uvedeny normalizované konstelační diagramy včetně normalizačního faktoru.

Typické schéma 16QAM mapování je vyjádřeno výrazem 2.7.

$$\alpha_{16QAM} = \left\{ \begin{array}{l} \pm 1 + \pm j, \pm 1 + \pm 3j, \\ \pm 3 + \pm j, \pm 3 + \pm 3j \end{array} \right\} \quad (2.7)$$

Konstelační diagram lze rozdělit na 4 kvadranty se stejnou energií. Proto průměrná energie v jednom kvadrantu je stejná jako celková energie celého konstelačního diagramu. Průměrná energie může být tedy pro 16QAM spočítána ze $\frac{16}{4} = 4$ stavů. Abeceda použitá pro imaginární i reálnou osu je stejná. To znamená, že energie reálné a imaginární složky je stejná. Imaginární a reálná složka v jednom kvadrantu nabývá $\sqrt{\frac{16}{4}} = 2$ hodnot. Průměrná energie 16QAM mapovaných podle rovnice 2.7 může být spočítána podle rovnice 2.8.

$$\begin{aligned} E_{16QAM} &= E[|\alpha_{16QAM}|^2] \\ &= E[Re|\alpha_{16QAM}|^2] + E[Im|\alpha_{16QAM}|^2] \\ &= 2E[Re|\alpha_{16QAM}|^2] \\ &= \frac{2 \times 2}{4} \sum [1^2 + 3^2] \\ &= 10 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Průměrná energie 16QAM konstelačního diagramu podle 2.7 je 10. Proto je nutné mapované symboly konstelačního diagramu normovat koeficientem $\sqrt{10}$. Odvození je podobné pro QPSK i 64QAM a normalizační faktory jsou i předepsány standardem viz tabulka 2.9.

2.4.6 Prokládání (Interleaving)

Všechny datové bity jsou prokládány blokovým prokladačem s velikostí bloků vypočtenou podle délky OFDM symbolu N_{CBPS} rovnicemi 2.9 a 2.10. Prokladač je tvořen dvěma průchody. V první fázi dochází k přeskládání bitů v symbolu tak, aby sousední bity byly namapovány na nesousedící nosné a došlo k rozprostření možných shlukových chyb. V druhé fázi prokládání jsou sousedící kódované bity mapovány střídavě na MSB nebo LSB pozice, aby nebyly vytvářeny dlouhé úseky LSB bitů.

Kódované bity jsou označeny indexem k . Index i označuje pozici bitů po prvním prokladači a index j označuje bity pro druhé fázi prokládání. Poté jsou bity mapovány na BPSK, QPSK, 16QAM nebo 64QAM symboly.

První fázi prokládání popisuje rovnice

$$\begin{aligned} i &= (N_{CBPS}/16)(k \bmod 16) + \text{floor}(k/16), \\ k &= 0, 1, \dots, N_{CBPS} - 1. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Funkce $\text{floor}(\cdot)$ označuje nejvyšší přirozené číslo nepřesahující parametr v závorce.

Druhá fáze prokládání je definována pravidlem

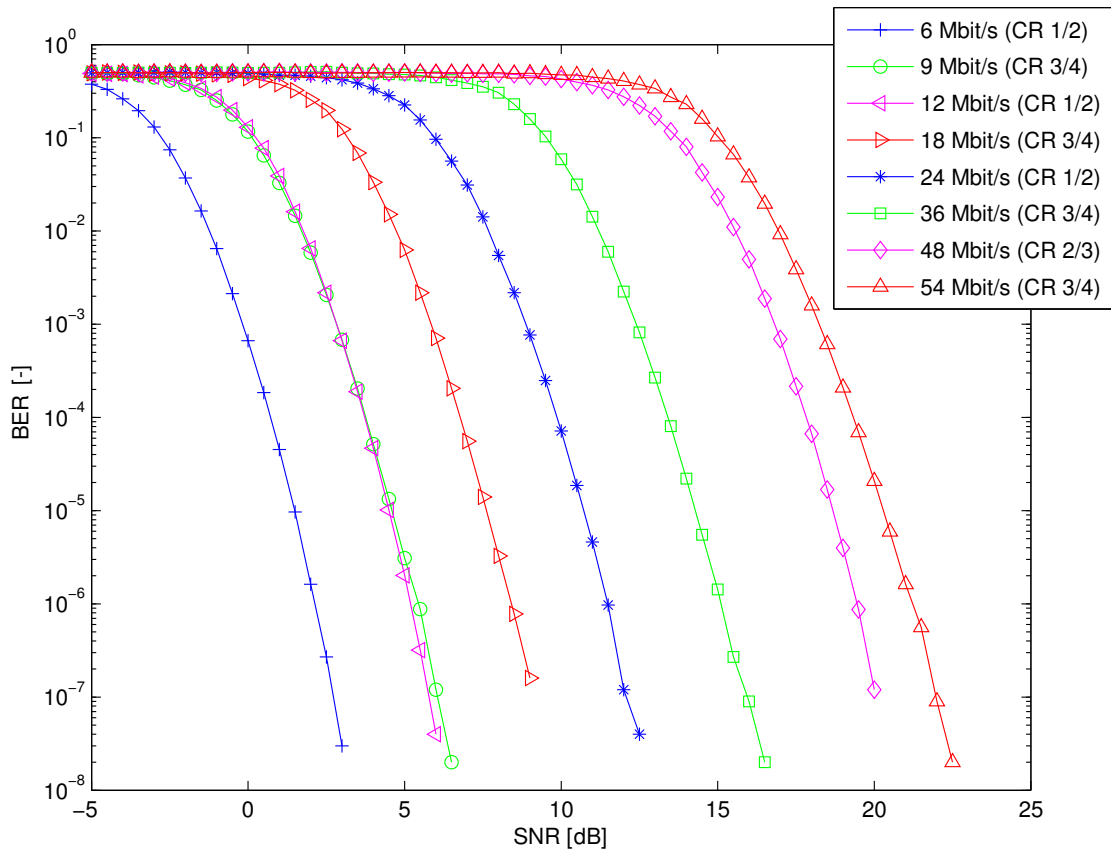
$$\begin{aligned}
 j &= s \times \text{floor}(i/s) + (i + N_{CBPS} - \text{floor}(16 \\
 &\quad \times i/N_{CBPS})) \bmod s) \\
 i &= 0, 1, \dots, N_{CBPS} - 1.
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

Hodnota s je vypočítána pomocí počtu kódovaných bitů na nosnou, N_{BPSC} , pomocí rovnice

$$s = \max(N_{BPSC}/2, 1). \tag{2.11}$$

Zpětné prokládání na přijímací straně je také prováděno ve dvou fázích pomocí inverzních operací (16). Blokové schéma simulace fyzické vrstvy IEEE 802.11g v prostředí Matlab Simulink je zobrazeno na Obr. 2.17.

Výsledky simulace fyzické vrstvy standardu IEEE 802.11g jsou zobrazeny na obrázku 2.20. Simulace jsou provedeny pro standardem povinně předepsané přenosové rychlosti 6, 12, 24 Mbit/s i volitelně implementovatelné rychlosti 9, 18, 36, 48 a 54 Mbit/s.



Obrázek 2.20: Porovnání přenosových rychlostí IEEE 802.11g.

2.5 Závěr

V této kapitole byl proveden teoretický popis standardu IEEE 802.11b a IEEE 802.11g nutný k popisu vytvořeného modelu fyzické vrstvy, který byl vytvořen na základě specifikace standardu (16). Práce týkající se simulací fyzické vrstvy standardu IEEE 802.11b v prostředí Matlab byla prezentována na konferencích (26), (27) a (28). Simulace standardu IEEE 802.11g byla prováděna v prostředí Matlab Simulink a výsledky byly publikovány na mezinárodní konferenci (29).

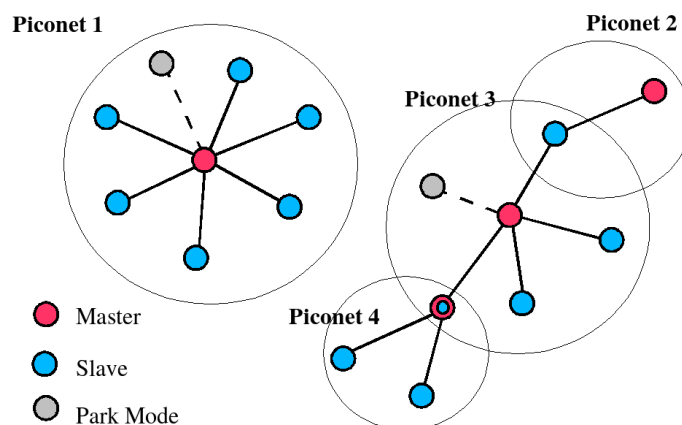
Bezdrátová technologie Bluetooth je definovaná standardem IEEE 802.15.1. Spadá do kategorie osobních počítačových sítí, tzv. WPAN (*Wireless Personal Area Network*). Maximální dosah činí 100 metrů (dle výkonové třídy), přičemž 2 i více (max. 7) zařízení na sebe při komunikaci nemusí „vidět“. V současné době je aktuální specifikace Bluetooth 2.1 EDR, která používá modulační techniky GFSK, $\pi/4$ -DQPSK, 8DPSK a zvyšuje tak datovou propustnost na trojnásobnou hodnotu oproti Bluetooth 1.2 (45).

Bluetooth využívá metody frekvenčního skákání (FHSS), kdy během jedné sekundy je provedeno 1 600 skoků (přeladění) mezi 80 frekvencemi s rozestupem 1 MHz. Je definováno několik výkonových úrovní (Tab. 3.2), s nimiž je umožněna komunikace do vzdálenosti cca 10 – 100 m. Bluetooth umožňuje vytvořit datový spoj symetrický, případně asymetrický, kdy přenosová rychlost při příjmu (downlink) je vyšší než při odesílání (uplink). Jednotlivá zařízení jsou identifikována pomocí své adresy BT_ADDR (BlueTooth Device Address), podobné jako je MAC adresa u Ethernetu.

Kapitoly 3.3 až 3.8 obsahují rozbor specifikace systému Bluetooth, který přímo souvisí s modelováním systému Bluetooth a na který je odkazováno v následujících kapitolách 3.9 až 3.10 týkajících se modelování technologie Bluetooth.

3.1 Topologie Bluetooth

Bluetooth podporuje jak dvoubodovou, tak mnohabodovou komunikaci. Pokud je více stanic propojeno do ad hoc sítě, tzv. pikosítě (*piconet*), jedna rádiová stanice působí jako hlavní (*master*) a může simultánně obsloužit až 7 podřízených (*slave*) zařízení. Všechna zařízení v pikosíti se synchronizují s taktem hlavní stanice a se způsobem přeskakování mezi kmitočty. Specifikace dovoluje simultánně použít až 10 pikosítí na ploše o dosahu 10 metrů. Pikosítě lze sdružovat do tzv. scatternets („rozprostřených“ sítí) (viz Obr. 3.1).



Obrázek 3.1: Topologie Bluetooth sítě.

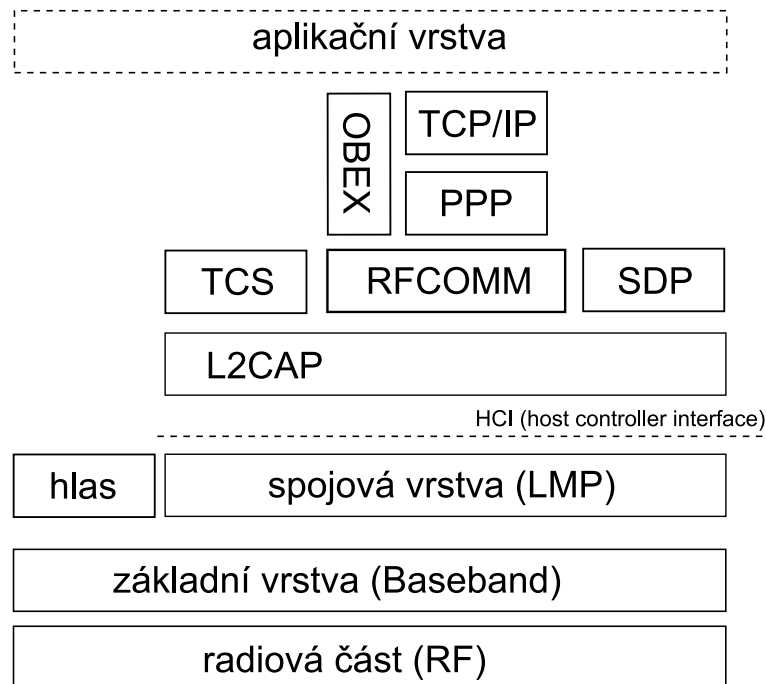
3.2 Přehled standardů Bluetooth

V následující tabulce je přehled klíčových verzí Bluetooth specifikace. Všechny novější verze standardu jsou vždy zpětně kompatibilní s předchozími verzemi.

Tabulka 3.1: Přehled nejdůležitějších verzí standardu Bluetooth.

verze	vznik	popis	parametry
0.7	19.10.1998	První verze standardu obsahující definici Base-bandu a Link Manager protokolu	FH, GFSK - 1 Mbit/s
1.0a	26.7.1999	První veřejně dostupná verze standardu, interoperability mezi výrobci	FH, GFSK - 1 Mbit/s
1.0b	1.12.1999	Problémy s interoperabilitou mezi různými výrobci, další rozšíření standardu	FH, GFSK - 1 Mbit/s
1.1	22.2.2001	Oprava většiny chyb z verze 1.0b, přidána podpora nešifrovaných kanálů, indikátor síly přijímaného signálu (RSSI), řízení výkonu	FH, GFSK - 1 Mbit/s
1.2	5.11.2003	Zvýšená odolnost proti nežádoucím interferencím, zvýšená kvalita přenosu zvuku v audio kanálech (systém eSCO)	FH/AFH, GFSK - 1 Mbit/s
2.0 + EDR	1.8.2004	Zvýšená rychlost přenosu dat při použití EDR	FH/AFH, GFSK - 1 Mbit/s, $\frac{pi}{4}$ -DQPSK - 2 Mbit/s, 8DPSK - 3 Mbit/s
2.1 + EDR	26.7.2007	Vylepšený proces párování, nižší spotřeba energie, podpora NFC (Near Field Communication)	FH/AFH, GFSK - 1 Mbit/s, $\frac{pi}{4}$ -DQPSK - 2 Mbit/s, 8DPSK - 3 Mbit/s

3.3 Specifikace rádiové části



Obrázek 3.2: Vrstvový model systému Bluetooth.

Rádiová vrstva systému Bluetooth definuje použité frekvenční pásmo, šířku rádiových kanálů a jejich organizaci. Dále specifikace rádiového rozhraní určuje typ použité modulace, modulační rychlost a charakteristiky přijímačů a vysílačů rádiového signálu.

Bluetooth zařízení používají bezlicenční ISM pásmo 2,4 GHz a vyrovnávají se s rušením a únikovými kanály pomocí technologie frekvenčního skákání.

Standard definuje dva módy. Povinný mód nazývaný také „Basic Rate“ používá GFSK klíčování a dosahuje teoretické celkové přenosové rychlosti 1 Mbit/s. Volitelné rozšíření standardu EDR používá klíčování PSK ve dvou variantách: $\frac{pi}{4}$ -DQPSK (2 Mbit/s) a 8DPSK (3 Mbit/s).

Oba módy umožňují plně duplexní přenos a používají techniku TDD (*Time Division Duplex*).

Systém Bluetooth pracuje v nelicencovaném frekvenčním pásmu ISM na frekvenci 2,4 GHz. Šířka frekvenčního pásma pro Bluetooth zařízení v Evropě a ve většině ostatních zemí je 2,4 až 2,4835 GHz. Pro nosné frekvence platí vztah 3.1.

$$f = 2402 + k[\text{MHz}], \quad k = 0, 1, 2, \dots, 78 \quad (3.1)$$

V tomto frekvenčním pásmu je tedy k dispozici 79 rádiových kanálů. Šířka rádiového kanálu je 1 MHz. Aby byly dodrženy limity mimo toto pásmo, jsou definována tzv. ochranná pásma. Dolní ochranné pásmo má šířku 2 MHz, horní ochranné pásmo 3,5 MHz.

V tabulce 3.2 jsou vyznačeny výkonnostní verze standardu Bluetooth. Vysílané výkony se vztahují k zařízení s pevnou anténou a ziskem 0 dBi. Zařízení používající výkonovou třídu 1 musí mít implementované řízení výkonu (*power control*) pro výkony vyšší než 4 dBm. Pro nižší výkony než 4 dBm je řízení výkonu volitelné a je používáno hlavně ke

snížení spotřeby Bluetooth zařízení. Výkon může zařízení měnit s minimálním krokem 2 dB a maximálním krokem 4 dB. K řízení výkonu se používají tzv. LMP (*Link Manager Protocol*) příkazy. Pokud jedno z komunikujících zařízení nepodporuje řízení výkonu (třídy 1 nebo 2), musí i druhé komunikující zařízení dodržovat maximální výkon 4 dBm.

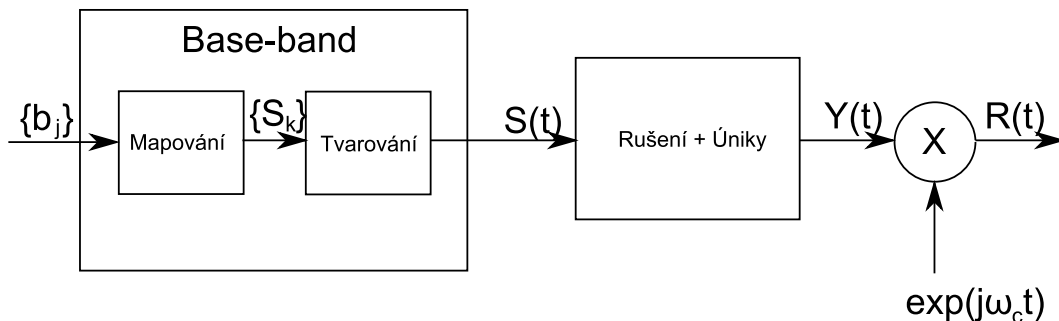
Tabulka 3.2: Výkonové třídy standardu Bluetooth.

třída	dosah [m]	výkon [dBm]
Class I	100	20
Class II	10	4
Class III	1	0

Na obrázku 3.3 je blokové schéma ideálního Bluetooth vysílače. Vstupní bitová posloupnost b_j je mapovaná do jednoho ze tří modulačních schémat (GFSK, $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK, 8DPSK) jako komplexní symboly S_k . Tyto komplexní symboly jsou následně tvarovány pomocí *Square-Root Raised Cosine* tvarovacího filtru s *Roll-off* faktorem 0,4 na signál v základním pásmu $S(t)$. Vztah mezi signálem v základním pásmu $S(t)$ a signálem v přeneseném pásmu $R(t)$ popisuje rovnice 3.2.

$$R(t) = \text{Re}[S(t) \cdot e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot F_c \cdot t}] \quad (3.2)$$

Signál obsahující zkreslení a rušení $Y(t)$ je dále pomocí směšovače přeložen do přeneseného pásma. Nosná frekvence má toleranci ± 75 kHz od F_c .



Obrázek 3.3: Blokové schéma zjednodušeného Bluetooth vysílače.

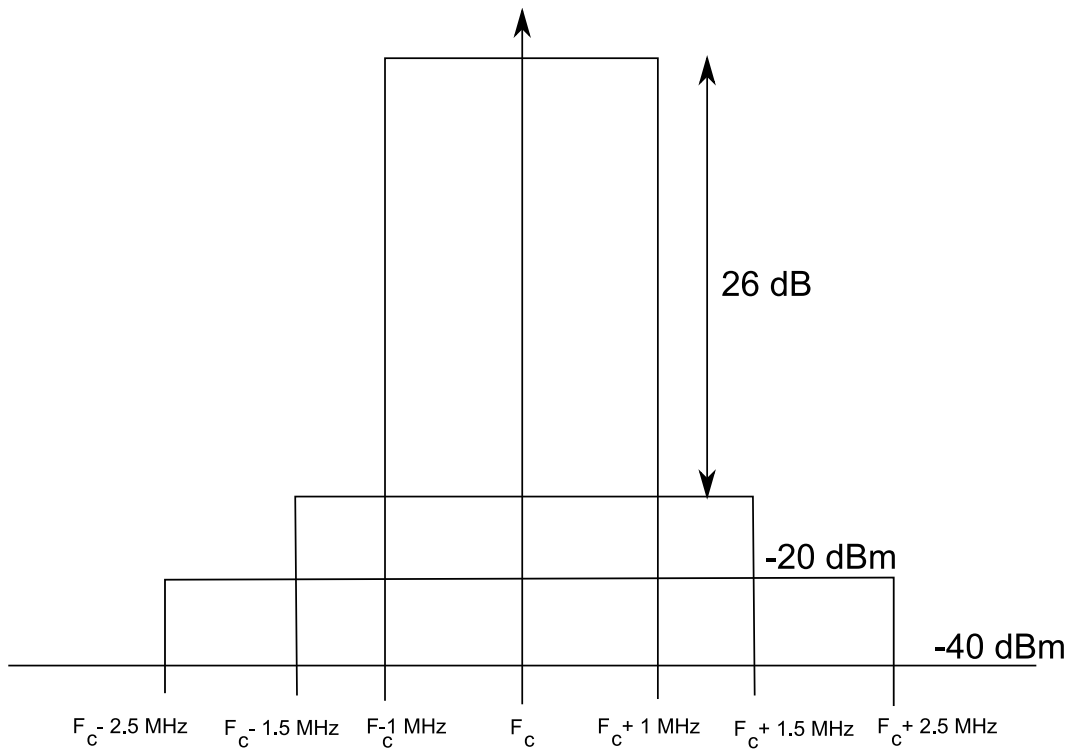
Na obrázku 3.4 je zobrazena spektrální maska systému Bluetooth.

3.3.1 Povinný mód

Povinný mód (*BR - Basic Rate*) je povinný mód specifikace Bluetooth používající modulaci GFSK (index modulace = $0.32 \pm 1\%$) s normovanou šířkou pásma $BT = 0.5 \pm 1\%$. Data jsou přenášena symbolovou rychlostí 1 MS/s.

3.3.2 Rozšířený mód

Rozšířený mód (*EDR - Enhanced Data Rate*) je volitelný mód specifikace Bluetooth, používající modulační techniky $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK a 8DPSK pro dosažení přenosových rychlostí



Obrázek 3.4: Spektrální maska systému Bluetooth.

2 a 3 Mbit/s. Data jsou vždy přenášeny symbolovou rychlostí 1 MS/s. Signál v základním pásmu je filtrován *square-root raised cosine* filtrem s Roll-off faktorem $\beta = 0,4$.

V systému EDR jsou přístupový kód a hlavička přenášeny základní rychlostí 1 Mbit/s GFSK a synchronizační sekvence, užitečná data a tréninková sekvence jsou přenášeny rychlostí $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK nebo 8DPSK (viz Obr. 3.9).

DPSK kódování

Binární signály b_j jsou mapovány do stavů S_k pomocí vzorců 3.3 a 3.4,

$$S_k = S_{k-1} \cdot e^{j \cdot \phi \cdot k}, \quad (3.3)$$

kde $k = 1, 2, \dots N/\log_2(M)$.

$$S_0 = e^{j \cdot \phi}, \quad (3.4)$$

kde $\phi = 0, 2\pi$.

Pro mapování je použit Grayův kód dle tabulky 3.3 (2 Mbit/s) a 3.4 (3 Mbit/s).

3.4 Specifikace systému Bluetooth v základním pásmu

Specifikace základní vrstvy definuje fyzické a provozní kanály používané v systému Bluetooth. Jednotlivé kanály jsou provozovány různými typy paketů podle požadované pře-

Tabulka 3.3: $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK mapování.

b_{2k-1}	b_{2k}	ϕ_k
0	0	$\frac{\pi}{4}$
0	1	$\frac{3\pi}{4}$
1	1	$-\frac{3\pi}{4}$
1	0	$-\frac{\pi}{4}$

Tabulka 3.4: 8DPSK mapování.

b_{3k-2}	b_{3k-1}	b_{3k}	ϕ_k
0	0	0	0
0	0	1	$\frac{\pi}{4}$
0	1	1	$\frac{\pi}{2}$
0	1	0	$\frac{3\pi}{4}$
1	1	0	π
1	1	1	$-\frac{3\pi}{4}$
1	0	1	$-\frac{\pi}{2}$
1	0	0	$-\frac{\pi}{4}$

nosové rychlosti (hlas, FTP, HTTP) a typu použitého kanálu. Base-band vrstva definuje také různé provozní stavy systému Bluetooth.

3.4.1 Fyzický kanál

Fyzický kanál tvoří pseudonáhodná posloupnost skoků přes 79 rádiových kanálů. Sekvence frekvenčního skákání je unikátní pro každou pikosít' (*piconet*) a vypočítává se pomocí adresy řídicí jednotky a vnitřních hodin řídicího zařízení (*master*). Nominální rychlost je 1600 přeskoků za sekundu. Podřízené jednotky (*slave*) tvoří pikosít' a jsou časově a skokově synchronizované na fyzický kanál, který je rozdělený do časových úseků (*timeslotů*). Časové úseky jsou číslovány podle vnitřních hodin řídicí jednotky (*master*) 0 až $2^{27} - 1$. Každý úsek je vyslán na jiné nosné frekvenci a délka jednoho úseku může být 1, 3 nebo 5 timeslotů (viz Obr. 3.6). Řídicí (*master*) a řízená (*slave*) jednotka Bluetooth vysílají střídavě tak, že řídicí jednotka vysílá pouze na začátku sudých timeslotů, podřízená jednotka naopak na začátku lichých timeslotů viz Obr. 3.5.

3.4.2 Provozní kanály

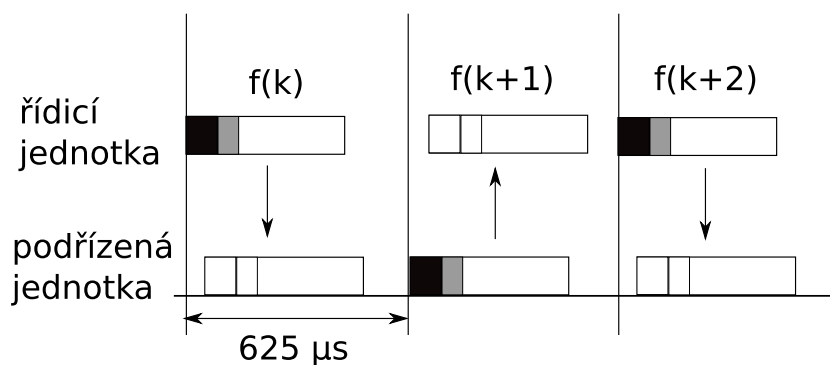
Mezi řídicí a podřízenou jednotkou mohou vznikat dva druhy provozních kanálů:

synchronní spojově orientovaný (SCO - Synchronous Connection-Oriented)

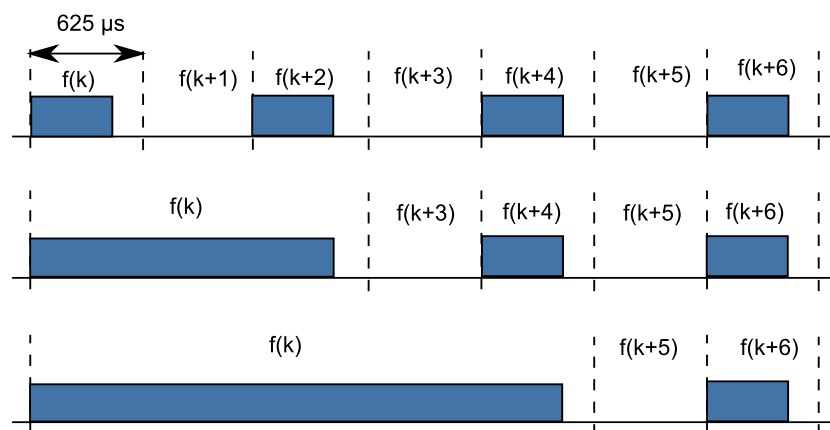
Symetrický kanál typu bod-bod mezi řídicí a podřízenou jednotkou. Pakety SCO jsou vysílány v rezervovaných intervalech s přesně danou periodou, proto jsou vhodné pro přenos časově kritických informací (hlas). Každá Bluetooth jednotka je schopna obsloužit naráz až 3 SCO kanály.

asynchronní bezspojově orientovaný (ACL - Asynchronous Connectionless)

Provozní kanál ACL je vyslán v časových úsecích, které nejsou určeny pro pře-



Obrázek 3.5: Výměna informace mezi řídící a podřízenou jednotkou.

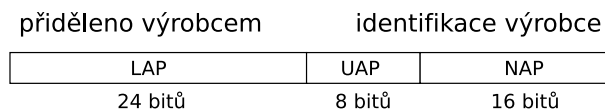


Obrázek 3.6: Délky timeslotů v systému Bluetooth.

nos SCO kanálu. Poskytuje paketově orientované asynchronní spojení a je vhodný pro přenos větších datových toků, které nejsou citlivé na časové zpoždění. Přenos souborů (OBEX), FTP atd...

3.4.3 Adresování Bluetooth jednotek

Každá jednotka Bluetooth obsahuje tzv BD_ADDR (*Bluetooth Device Address*), což je 48 bitová unikátní adresa. Tato adresa vychází ze standardu IEEE 802 a je rozdělena na tři základní části viz obrázek 3.7.



Obrázek 3.7: Struktura adresy Bluetooth jednotky.

Celá adresa Bluetooth jednotky se dělí na 24 bitovou dolní část adresy LAP (*Lower Address Part*), 8 bitovou horní část adresy UAP (*Upper Address part*) a NAP (*Non-significant Address Part*).

3.4.4 Povinný mód (BR)

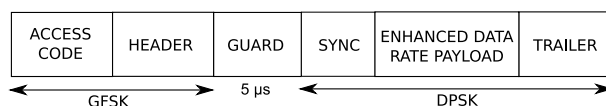
Data jsou přenášena pomocí paketů. Symbolová rychlost je 1 Ms/s pro povinný mód „Basic Rate“ i pro volitelné rozšíření „Enhanced Data Rate“. Blokové schéma paketu pro základní mód „Basic Rate“ je zobrazen na obrázku 3.8.



Obrázek 3.8: Blokové schéma Bluetooth paketu pro BR mód.

3.4.5 Rozšířený mód (EDR)

Blokové schéma paketu pro mód EDR je zobrazeno na obrázku 3.9.



Obrázek 3.9: Blokové schéma Bluetooth paketu pro EDR mód.

Hlavička paketu

Hlavička paketu se skládá z šesti políček viz Obr. 3.10:

LT_ADDR 3 bitová transportní adresa.

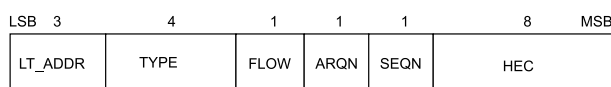
TYPE Označení jednoho z 16 typů paketu.

FLOW Bit označující stav bufferu přijímajícího zařízení (uplatňuje při komunikaci pomocí ACL -Asynchronous Connectionless). $FLOW = 0$ znamená stop vysílání pro vysílací zařízení. Při uvolnění bufferu a možnosti příjmu zařízení je vyslán paket se značkou $FLOW = 1$.

ARQN Bit potvrzující správné přijetí užitečných dat a CRC. $ACK=1$ (Acknowledge), $NAK=0$ (Negative Acknowledge).

SEQN Sekvenční číslování. Bit $SEQN$ poskytuje sekvenční číslování proudu paketů. Každý nový paket zabezpečený cyklickým kódem, má tento bit invertovaný.

HEC Header Error Check - zabezpečení záhlaví - 8 bitů vygenerovaných pomocí polynomu $x^8 + x^7 + x^5 + x^2 + x + 1$.

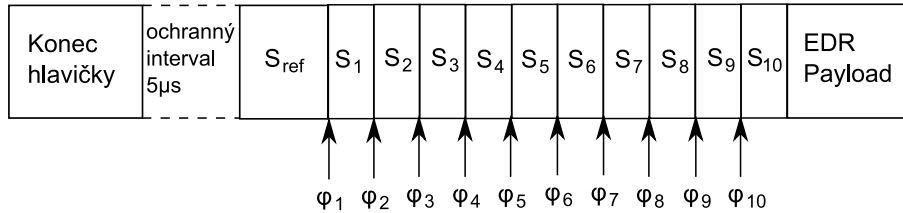


Obrázek 3.10: Formát Bluetooth hlavičky.

Synchronizační sekvence (SYNC)

Délka synchronizační sekvence v paketu EDR (Obr. 3.9) je $11 \mu\text{s}$ (11 DPSK symbolů) a skládá se z referenčního symbolu (s libovolnou fází) a 10 DPSK symbolů, které jsou:

$$\{\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5, \phi_6, \phi_7, \phi_8, \phi_9, \phi_{10}\} = \left\{ \frac{3\pi}{4}, -\frac{3\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, -\frac{3\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, -\frac{3\pi}{4}, -\frac{3\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{3\pi}{4} \right\}. \quad (3.5)$$



Obrázek 3.11: Synchronizační sekvence.

Data používaná ke generování synchronizační sekvence jsou pro $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK $\{0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\}$ a pro 8DPSK $\{0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\}$.

Tréninková sekvence (TRAILER)

Tréninková sekvence pro paket EDR (Obr. 3.9) se skládá ze dvou symbolů a přidává se za užitečná data v paketu EDR. Bity tréninkové sekvence obsahují samé nuly, např.: $\{00,00\}$ pro $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK a $\{000,000\}$ pro 8DPSK.

Formát paketů

Data jsou v systému Bluetooth přenášena prostřednictvím paketů v timeslotech, které trvají $625 \mu\text{s}$ (podle typu paketu může paket zabírat i více timeslotů). Pakety mohou mít v systému Bluetooth jen přesně definovanou délku, která může být 1 timeslot ($625 \mu\text{s}$), 3 timesloty ($1,875 \text{ ms}$) nebo 5 timeslotů ($3,125 \text{ ms}$) viz obrázek 3.6.

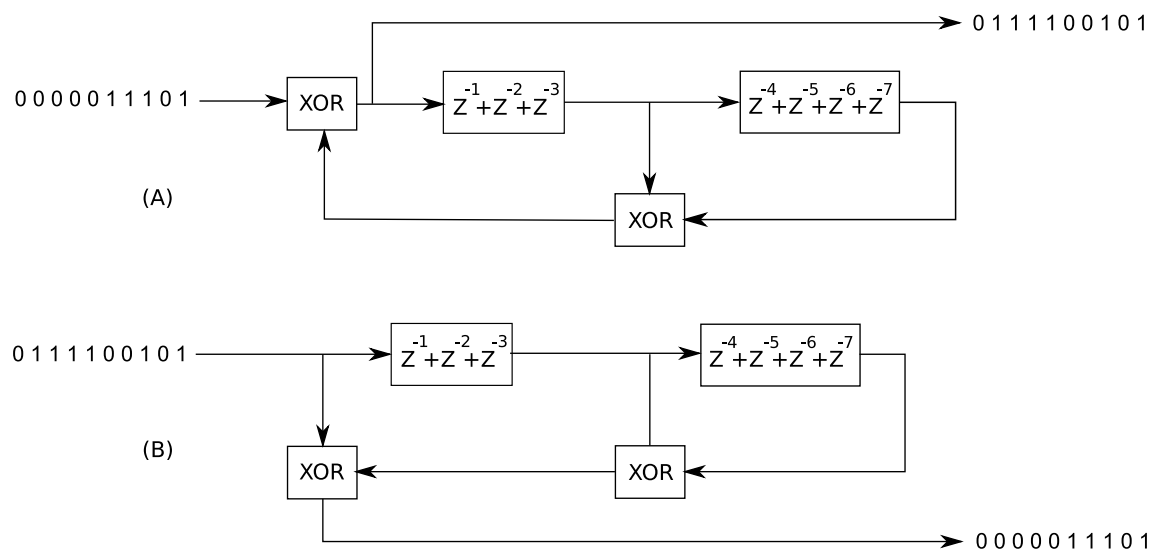
3.5 Skramblování dat

Hlavička a užitečná data (payload včetně CRC) každého paketu v systému Bluetooth jsou skramblována pomocí polynomu

$$G(z) = z^{-7} + z^{-3} + 1 \quad (3.6)$$

viz obrázek 3.12. Skramblování je prováděno na straně vysílače vždy před FEC kódováním. Před každým skramblováním nového paketu je posuvný registr (LFSR) naplněn bity, které se určí z hodin (CLK6-1) zařízení *master* a jsou doplněny jedničkou na místě MSB. Bit MSB zajistí korektní skramblování i pro případ, že se na vstupu skrambleru objeví dlouhý řetězec nul, který by byl v případě nulových registrů skramblován na samé nuly. Na začátku skramblování užitečných dat je LFSR naplněn ze skramblování bloku

HEC a plynule se pokračuje ve skramblování užitečných dat (nedochází k reinicializaci registrů skrambleru). Příklad skramblování bitů na obrázku 3.12 předpokládá registr inicializovaný řetězcem $[1010101]_{MSB}$. U EDR paketů nedochází ke skramblování bloků: GUARD, SYNC a TRAILER (viz Obr. 3.9) a posouvání LFSR je na tuto dobu přerušeno.



Obrázek 3.12: Skrambler (A) a Deskrambler (B) používaný na fyzické vrstvě Bluetooth.

3.6 Detekce a oprava chyb na fyzické vrstvě

Pro Bluetooth jsou definovány tři způsoby pro detekci a opravu chyb. Jsou to:

1/3 dopředná kontrola chyb (FEC)

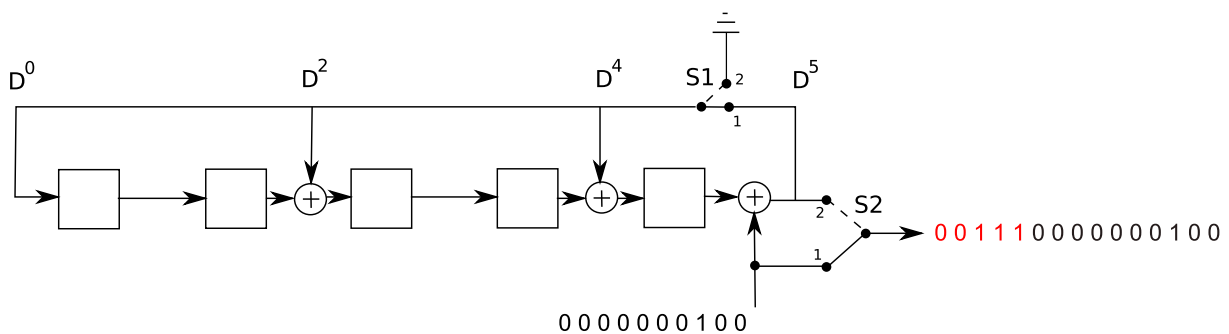
Při kódování FEC 1/3 dochází k trojnásobnému opakování každého informačního bitu. Hlavička paketu je vždy chráněna kódováním FEC 1/3. Bity jsou opakovány následujícím způsobem: $b_0b_0b_0b_1b_1b_1b_2b_2b_2b_3b_3b_3\dots atd.$

2/3 dopředná kontrola chyb (FEC)

Druhý používaný typ dopředné kontroly je zkrácený Hammingův kód (15,10). Funkce LFSR registru s přepínači S1 a S2 je znázorněna na obrázku 3.13. Při tomto kódování se zabezpečují skupiny deseti bitů a vytvářejí se z nich 15 bitová slova pomocí generačního polynomu $(x+1).(x^4+x+1)$. Pokud délka zabezpečené části není trojnásobkem desíti, připojí se patřičný počet nulových bitů. Standardní Hammingův kód (15,11) je schopen opravit jednu chybu. Zkrácená verze (15,10) je schopna opravit jednu chybu a detekovat dvě chyby v dané skupině.

rozhodovací zpětná vazba (ARQ)

Při použití rozhodovací zpětné vazby je paket posílán tak dlouho, dokud není přijato potvrzení o úspěšném příjmu paketu. K tomu slouží položka ARQN v záhlaví paketu, ve které se indikuje, zda poslední paket posílaný v protějším směru byl v pořádku či ne. Tento princip může pracovat pouze tehdy, pokud je obsah (konkrétně informační část paketu) opatřena detekčním kódem. Pokud tedy zařízení úspěšně přijme CRC, je bit ARQN nastaven na hodnotu 1. Pokud dojde k chybné kontrole HEC, CRC, nebo není detekován Access Code, je ARQN bit nastaven na hodnotu 0. Systém Bluetooth používá 16 bitový cyklický kód CRC s generačním polynomem $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$.



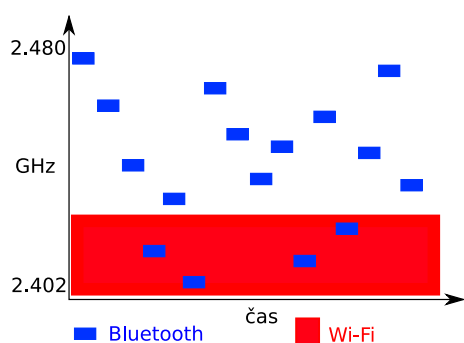
Obrázek 3.13: Dopředný ochranný kód - FEC 2/3.

Kódování FEC je zavedeno z důvodu omezení počtu paketů, které musí být opakovaně přenášeny. V případě, že chybovost v daném prostředí je taková, že kódování FEC není nutné a naopak snižuje propustnost kanálu, je možné zvolit takový typ paketu, ve kterém se toto kódování nepoužívá.

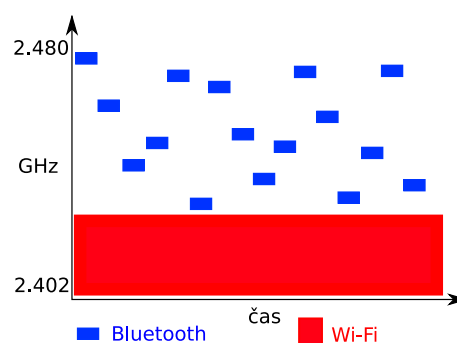
3.7 Adaptivní frekvenční skákání (AFH)

Standard Bluetooth ve své původní verzi z roku 1999 neobsahoval žádný mechanismus umožňující předcházet kolizím při zarušení sdíleného frekvenčního pásma. Díky komerčnímu úspěchu obou bezdrátových technologií (Bluetooth i Wi-Fi) a jejich velkému rozšíření do všech odvětví výpočetní techniky se začala objevovat nutnost řešit vzájemnou „koexistenci“ bezdrátových standardů v bezlicenčním pásmu ISM 2,4 GHz. Vzájemné rušení se týká zejména nejrozšířenějšího Wi-Fi jako hlavního zástupce WLAN sítí a technologie Bluetooth, která spadá pod tzv. WPAN sítě. Bezdrátová technologie přenosu dat Wi-Fi používá přímo rozprostřené spektrum DSSS a také princip OFDM, kdy bezdrátový přenos je realizován v 22 MHz širokém frekvenčním pásmu. Naproti tomu Bluetooth používá frekvenčního skákání v pásmu 2,402 - 2,480 GHz tak, že vždy vysílá jen na jednom ze 79 radiových 1 MHz širokých frekvenčních kanálů. Ke změně frekvence tzv. frekvenčnímu skákání dochází 1600x za sekundu.

Aby bylo možné efektivně navrhnout zařízení (mobil, PDA, ...), které bude schopné přenášet data pomocí Bluetooth i Wi-Fi zároveň, bylo vytvořeno několik metod jak rušení mezi Bluetooth a Wi-Fi předcházet. Přehled metod umožňujících vzájemnou koexistenci Bluetooth a Wi-Fi je uveden v kapitole 1.1.6.



Obrázek 3.14: Bluetooth 1.1 - bez AFH.



Obrázek 3.15: Bluetooth 1.2 - použití AFH.

AFH (*Adaptive Frequency Hopping*) je metoda předcházení kolizím v pásmu ISM 2,4 GHz, která je od roku 2003 součástí standardu Bluetooth (verze 1.2 a vyšší). Při použití standardu, který nepodporuje AFH je pro přenos dat používáno všech 79 nosných kmitočtů. Výběr matice frekvencí pro Frequency Hopping je uskutečňován pomocí algoritmu, který má pseudonáhodný charakter a je vypočítáván z hodin (*clock*) a adresy Bluetooth zařízení. Pokud ve stejném pásmu vysílá například Wi-Fi, dochází k náhodným kolizím dle Obr. 3.14. Bez použití AFH není možné předejít případným kolizím, je-li v pásmu ISM přítomno rušení nebo jiný bezdrátový standard. Obrázek 3.15 zobrazuje situaci, kdy systém Bluetooth používá AFH a je tak schopný se efektivně „vyhýbat“ případnému statickému rušení.

Adaptivní frekvenční skákání (AFH) funguje tak, že Bluetooth zařízení identifikuje zarušené kanály, vytvoří matici těchto zarušených kanálů a ty jsou následně vyloučeny z listu povolených kanálů. Při tomto „přemapování“ posloupnosti frekvenčního skákání dochází ke snížení počtu používaných kanálů, přičemž Bluetooth specifikace požaduje minimálně 20 kanálů použitých pro AFH.

Způsob identifikace zarušených kanálů není součástí Bluetooth specifikace, takže implementace závisí čistě na výrobci. Nejrozšířenější metody pro odhad kanálu (*Channel Assessment*) pro AFH využívají RSSI (*Received Signal Strength Indication*) a PER (*Packet Error Rate*).

U frekvenčního skákání v systému Bluetooth podřízené zařízení (*Slave*) používalo jiný kanál pro odpověď řídicímu zařízení (*Master*). Naproti tomu v systému AFH podřízené zařízení „odpovídá“ vždy na stejné frekvenci na jaké vysílalo řídicí zařízení. Díky tomu se sníží pravděpodobnost, že vznikne situace, kdy řídicí zařízení vyšle data na „dobrém“ kanálu a podřízené zařízení odpoví na kanálu zarušeném. Protože zařízení *Slave* odpovídá vždy na stejné frekvenci, na jaké vysílalo *Master* zařízení, dochází k přeskokům jen 800x za sekundu.

3.8 Přehled používaných paketů

V tabulce 3.8 jsou zobrazeny nejčastěji používané typy Bluetooth paketů.

Typ paketu	Hlavička paketu [bytů]	Užitečná data [bytů]	FEC	CRC	maximální přenosová rychlost [kbit/s]
ACL					
DM1	1	0-17	2/3	ano	108.8
DH1	1	0-27	ne	ano	172
DM3	2	0-121	2/3	ano	387
DH3	2	0-183	ne	ano	585.6
DM5	2	0-224	2/3	ano	477.8
DH5	2	0-339	ne	ano	723.2
AUX1	1	0-29	ne	ne	185.6
2-DH1	2	0-54	ne	ano	345.6
2-DH3	2	0-367	ne	ano	1174.4
2-DH5	2	0-679	ne	ano	1448.5
3-DH1	2	0-83	ne	ano	531.2
3-DH3	2	0-552	ne	ano	1766.4
3-DH5	2	0-1021	ne	ano	2178.1
SCO					
HV1	-	10	1/3	ne	64.0
HV2	-	20	2/3	ne	64.0
HV3	-	30	ne	ne	64.0
DV ¹	1D	10+(0-9) D	2/3 D	yes D	64,0+57,6 D
EV3	-	1-30	ne	ano	96
EV4	-	1-120	2/3	ano	192
EV5	-	1-180	ne	ano	288
2-EV3	-	1-60	ne	ano	192
2-EV5	-	1-360	ne	ano	576
3-EV3	-	1-90	ne	ano	288
3-EV5	-	1-540	ne	ano	864

Tabulka 3.5: Přehled typů paketů standardu Bluetooth.

¹Položky s D se týkají pouze datového pole

3.9 Simulace v základním pásmu

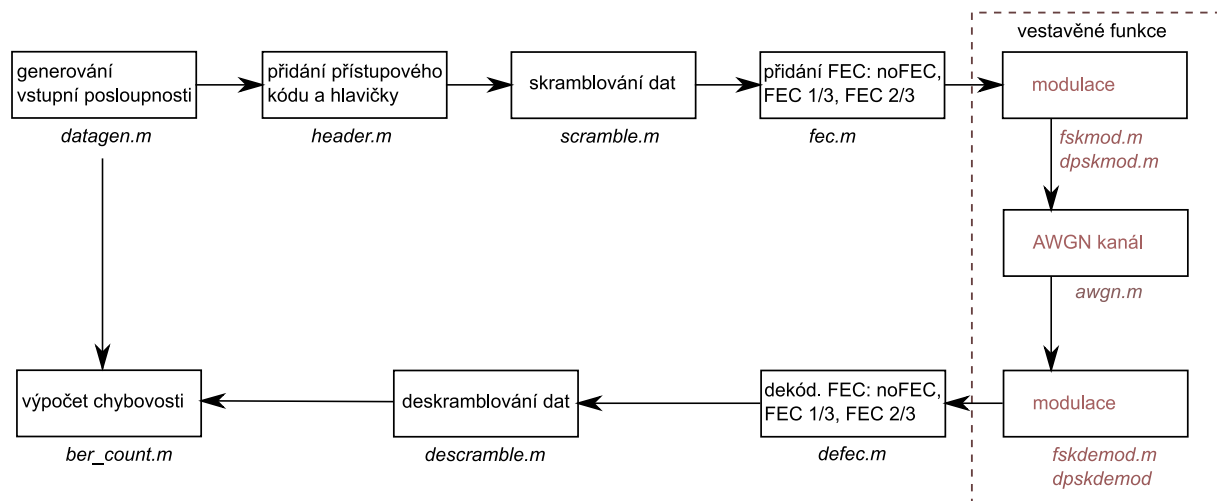
Z důvodu výpočtové náročnosti simulace na rychlost procesoru a velikost operační paměti, byly všechny výpočty prováděny vzdáleně pomocí SSH na METACentru společnosti CESNET, které poskytuje mnohonásobnou výpočtovou kapacitu oproti standardní simulaci na běžném PC. Pro potřeby METACentra byla simulace rozdělena na výpočty jednotlivých přenosových rychlostí zvlášť a každý a v každém cyklu simulace je prováděn výpočet chybovosti při délce dat 100 paketů. Díky tomu, že jsou simulace spouštěny na různých strojích paralelně, je možné provádět i výpočty pro stejnou přenosovou rychlost na několika různých strojích zároveň. Výsledky jsou ukládány do .MAT souborů.

Protože při každém startu Matlabu je provedeno vyresetování náhodných generátorů vždy do stejného výchozího stavu a tudíž by jednotlivé simulace na různých výpočetních strojích měly úplně stejné výsledky, je před každým spuštěním simulace náhodně nastaven generátor náhodných čísel v Matlabu pomocí příkazu: „`rand('state', sum(100*clock)); randn('state', sum(100*clock))`“.

Simulace jednotlivých rychlostí byly celkem provedeny pro 10^8 přenesených bitů a výsledky chybovosti při kterých je počet chyb menší než 100 bitů byly vyřazeny. Simulace byly prováděny vždy pro celé pakety (hlavička i užitečná data) bez políčka *Access Code*.

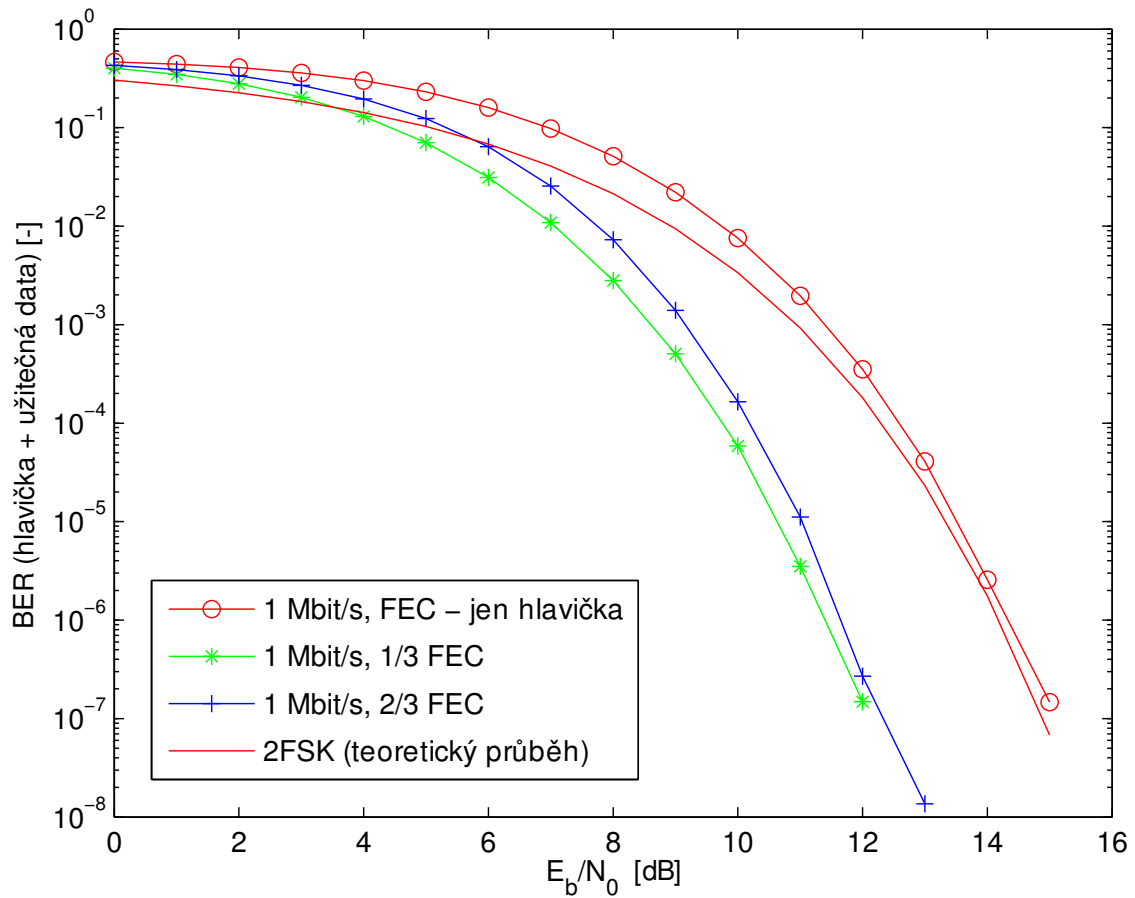
3.9.1 Povinný mód

Byla provedena simulace systému Bluetooth v základním pásmu bez použití frekvenčního skákání. Na obrázku 3.16 je zobrazeno blokové schéma simulace.



Obrázek 3.16: Blokové schéma simulace fyzické vrstvy Bluetooth pro 1 až 3 Mbit/s.

LFSR posuvný registr pro skramblování 3.12 je inicializován sekvencí [1 0 1 0 1 0 1] (viz kapitola 3.5). Byla změřena chybovost v závislosti na E_b/N_0 pro všechny tři přenosové rychlosti při použití různých druhů ochrany přenášených paketů. (Obr. 3.17, 3.19).

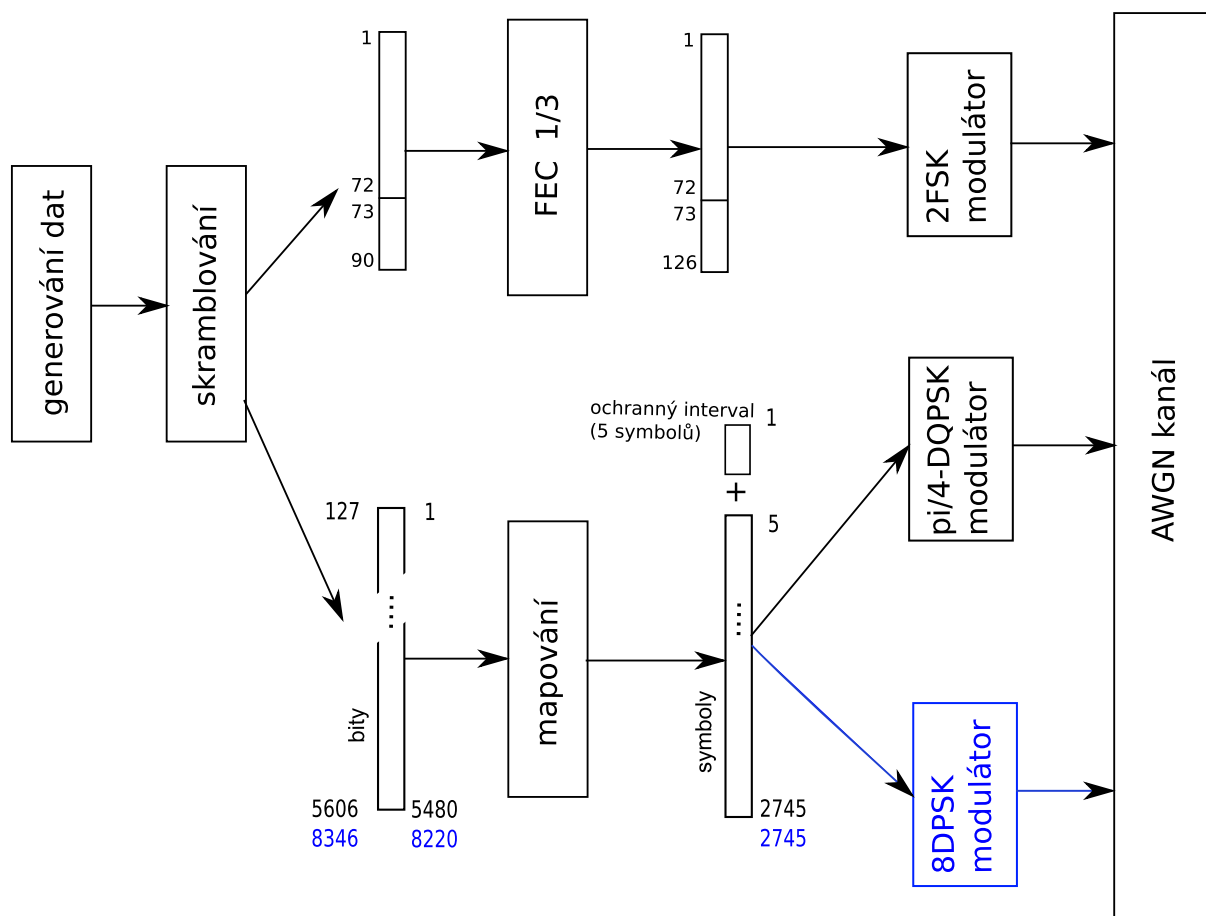


Obrázek 3.17: Simulace fyzické vrstvy Bluetooth 1 Mbit/s pro různé druhy FEC ochrany.

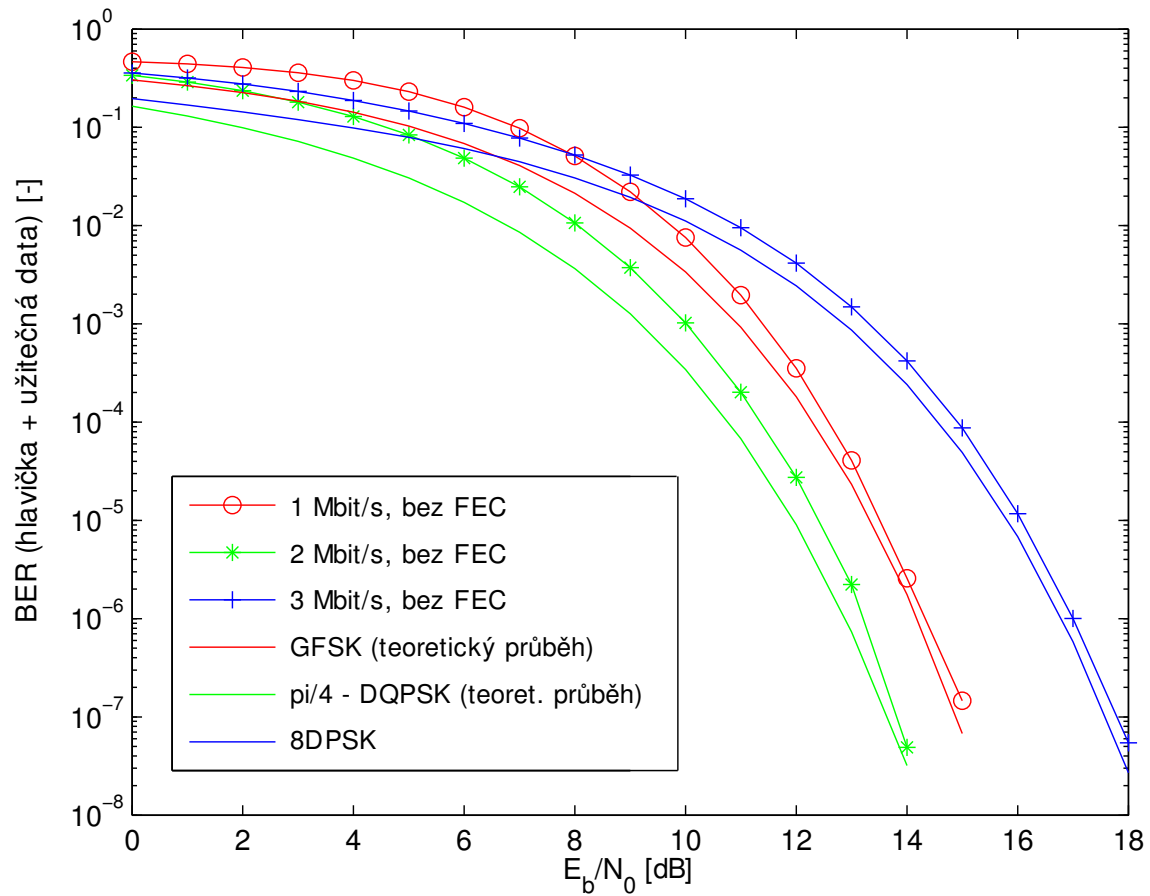
Použité ochranné kódování FEC 2/3 podle kapitoly 3.6 je implementováno jako klasický hammingův kód (15,11). Protože vždy známe vysílací i přijímací sekvenci dat a detekce 2 chyb není pro modelování klíčová, byl v simulaci použit klasický hammingův kód, který je schopný stejné opravy 1 bitu jako zkrácená verze. Z obrázku 3.9 je vidět, že dopředné kódování FEC 2/3 poskytuje pro nízké chybovosti téměř stejnou ochranu proti chybám jako FEC 1/3. To je způsobeno tím, že oba druhy kódování jsou schopné opravit stejný počet chyb a výhoda FEC 1/3 je pouze v možnosti opravit chybu v každé trojici bitů, na rozdíl od FEC 2/3, kdy jsou opravovány bloky 10 bitů.

3.9.2 Rozšířený mód

Modelování rozšířeného módu Bluetooth EDR je založeno na simulaci povinného módu s tím, že fyzická vrstva je rozšířená o 2 modulační techniky ($\pi/4$ -DQPSK a 8DPSK). Žádné pakety podporující mód EDR neumožňují použít FEC kódování. Dopředná kontrola FEC 1/3 je použita pouze v hlavičce, která je i u EDR přenášena pomocí modulace GFSK (viz Obr. 3.9). Blokové schéma části simulace rozšířeného módu je zobrazeno na obrázku 3.18. Výsledky simulace přenosu dat pro kanál AWGN a rozšířený přenosový mód EDR jsou zobrazeny na Obr. 3.19.



Obrázek 3.18: Blokové schéma simulace pro rozšířený mód EDR - 1, 2, 3 Mbit/s (bez FEC).



Obrázek 3.19: Porovnání přenosových rychlostí 1, 2, 3 Mbit/s (bez FEC).

3.10 Závěr

Modelování systému Bluetooth i teorie popisovaná v této kapitole vychází ze specifikace standardu Bluetooth (45). Práce týkající se modelování systému Bluetooth byla publikována na zahraniční konferenci: (31). V práci byla publikována simulace fyzické vrstvy Bluetooth pro rychlosti 1 až 3 Mbit/s a rušení AWGN kanálem.

Všechny simulace v této kapitole byly prováděny ve standardním skriptovacím jazyku užívaném v prostředí Matlab. Simulování pomocí skriptů přináší výhody v tom, že programy je možné spouštět z příkazové řádky i na vzdáleném počítači. Toho bylo využito tak, že byl vytvořen skript na vzdáleném Unixovém serveru (METACentrum), který obstarával dávkové spouštění paralelních kratších simulací v příkazové řádce prostředí Matlab. Simulace byly počítány pro 10^5 paketů a 10 simulací bylo spuštěno na několika strojích současně což umožnilo razantně zkrátit výpočtovou náročnost simulací. Výsledky byly ukládány do *.mat* souborů na vzdáleném počítači a konečné výsledky byly počítány na lokálním počítači.

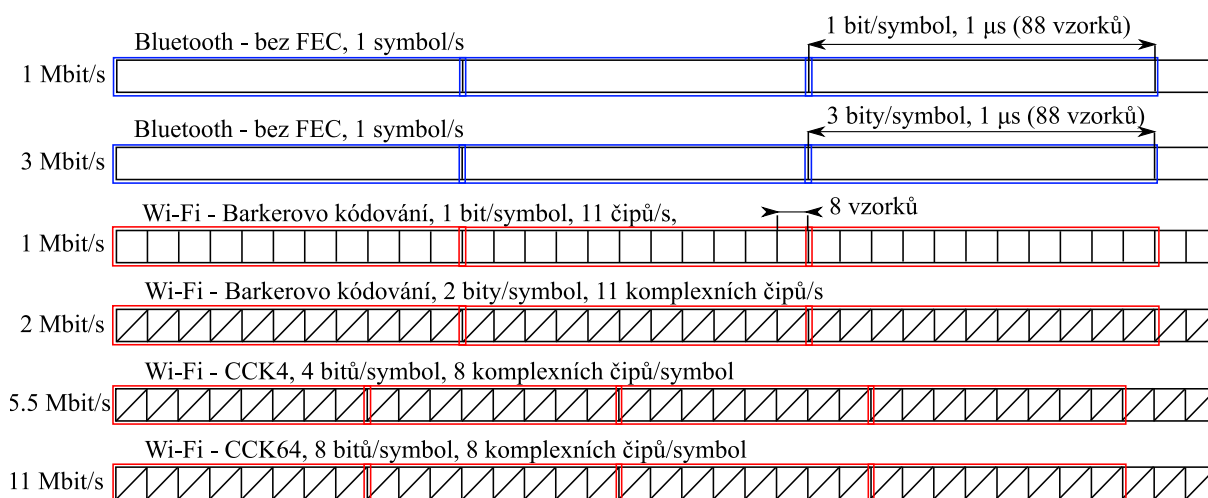
Simulace v rádiovém pásmu na frekvenci kolem 2,4 GHz jsou extrémně výpočtově náročné z důvodu nutnosti vzorkování vysokofrekvenční nosné vlny, a proto je výhodné nahrazení ekvivalentními simulacemi v základním pásmu s komplexní obálkou (49).

Simulace koexistence byly prováděny v prostředí Matlab Simulink na kmitočtech blízkých 0 MHz. Pro frekvenční skákání systému Bluetooth bylo využito kmitočtové pásmo v rozmezí -39 MHz až +39 MHz s rozestupy nosných 1 MHz. Simulace systému IEEE 802.11b/g využívá rozprostřené spektrum s šířkou pásma 22 MHz a simulace byly prováděny v základním pásmu.

Pro přehlednost jsou u výsledků simulací také zobrazeny výsledky měření, které budou dále popsány v kapitole 5.

4.1 Koexistence standardů Bluetooth a IEEE 802.11b

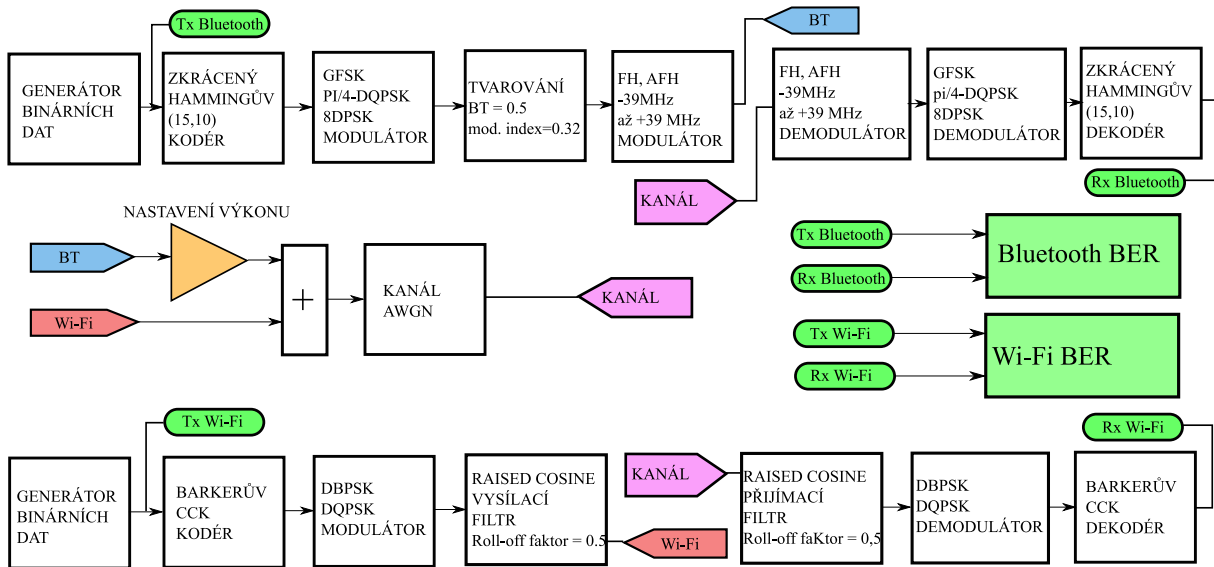
Při tvorbě modelu fyzické vrstvy systému Bluetooth v prostředí Matlab Simulink byl využit dostupný model fyzické vrstvy Bluetooth 1.0 (20), který byl doplněn o 3 základní používané typy FEC kódování a o fyzickou vrstvu pro vyšší přenosové rychlosti Bluetooth EDR 2 Mbit/s a 3 Mbit/s. Fyzická vrstva standardu IEEE 802.11b a IEEE 802.11g byla vytvořena podle specifikace (16) s pomocí modelu pro standard HiperLAN (20). Oba modely fyzických vrstev (Bluetooth i Wi-Fi) byly doplněny a rozšířeny takovým způsobem, aby bylo možné vzájemné slučování signálů obou systémů. Pro simulace byl využit Matlab Simulink Solver typu *Fixed-step, discrete* a vzorkovací rychlosti byly sjednoceny na $88 \cdot 10^6$ vz./s (viz Obr. 4.1).



Obrázek 4.1: Vzorkování signálů Bluetooth a Wi-Fi.

Simulace koexistence byly prováděny v prostředí Matlab Simulink s rozšířením Communication Blockset. Zjednodušené blokové schéma simulace koexistence Wi-Fi (IEEE 802.11b) a Bluetooth je zobrazeno na Obr. 4.2.

Simulace v pásmu -39 až +39 MHz přináší možnost zkoumání rušení při volbě různých kmitočtů nosných frekvencí Wi-Fi a při použití FH nebo AFH u systému Bluetooth.



Obrázek 4.2: Blokové schéma simulace koexistence Bluetooth a IEEE 802.11b.

Fyzická vrstva systému Wi-Fi (IEEE 802.11b) používá modulaci DBPSK a DQPSK, Barkerovo kódování a Komplementární kódování viz kapitola 2.3.2. Pro dodržení spektrální masky (viz Obr. 2.5) je signál tvarován vysílacím a přijímacím *Square-Root Raised Cosine* filtrem (Roll-off faktor 0,35). Použitá šířka kanálu systému Wi-Fi je 22 MHz.

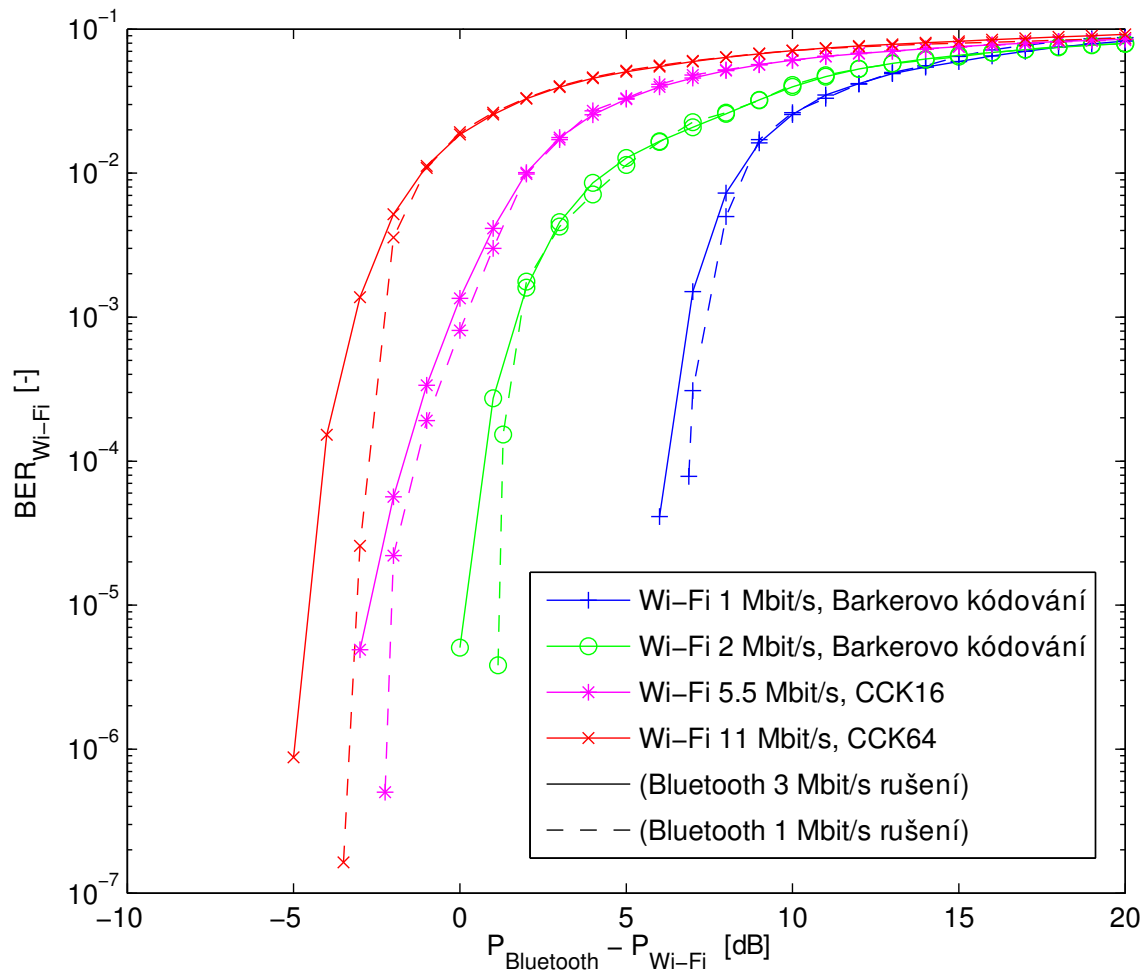
Tabulka 4.1: Základní modulační parametry různých přenosových rychlostí systém Bluetooth.

Přenosová rychlost	1 Mbit/s	2 Mbit/s	3 Mbit/s
Modulace	GFSK, $FSK_{DEV}=160\text{kHz}$	$\pi/4$ -DQPSK	8DPSK
Symbolová rychlost	1 MSym/s	1 MSym/s	1 MSym/s
Počet bitů na symbol	1 bit/sym.	2 bity/sym.	3 bity/sym.
Typ filtru	Gaussian	Square-Root Raised Cosine	Square-Root Raised Cosine
Parametry filtru	Index modulace = 0,3 BT produkt = 0,5	Roll-off faktor = 0,4	Roll-off faktor = 0,4

Fyzická vrstva systému Bluetooth verze 2.0 používá modulaci GFSK, $\pi/4$ -DQPSK a 8DPSK s parametry viz tabulka 4.1. Šířka všech 79 kanálů je 1 MHz a jsou v pásmu -39 MHz až 39 MHz rozprostřeny pomocí frekvenčního skákání. Frekvence nosných kmitočtů k systému Bluetooth jsou dány vztahem

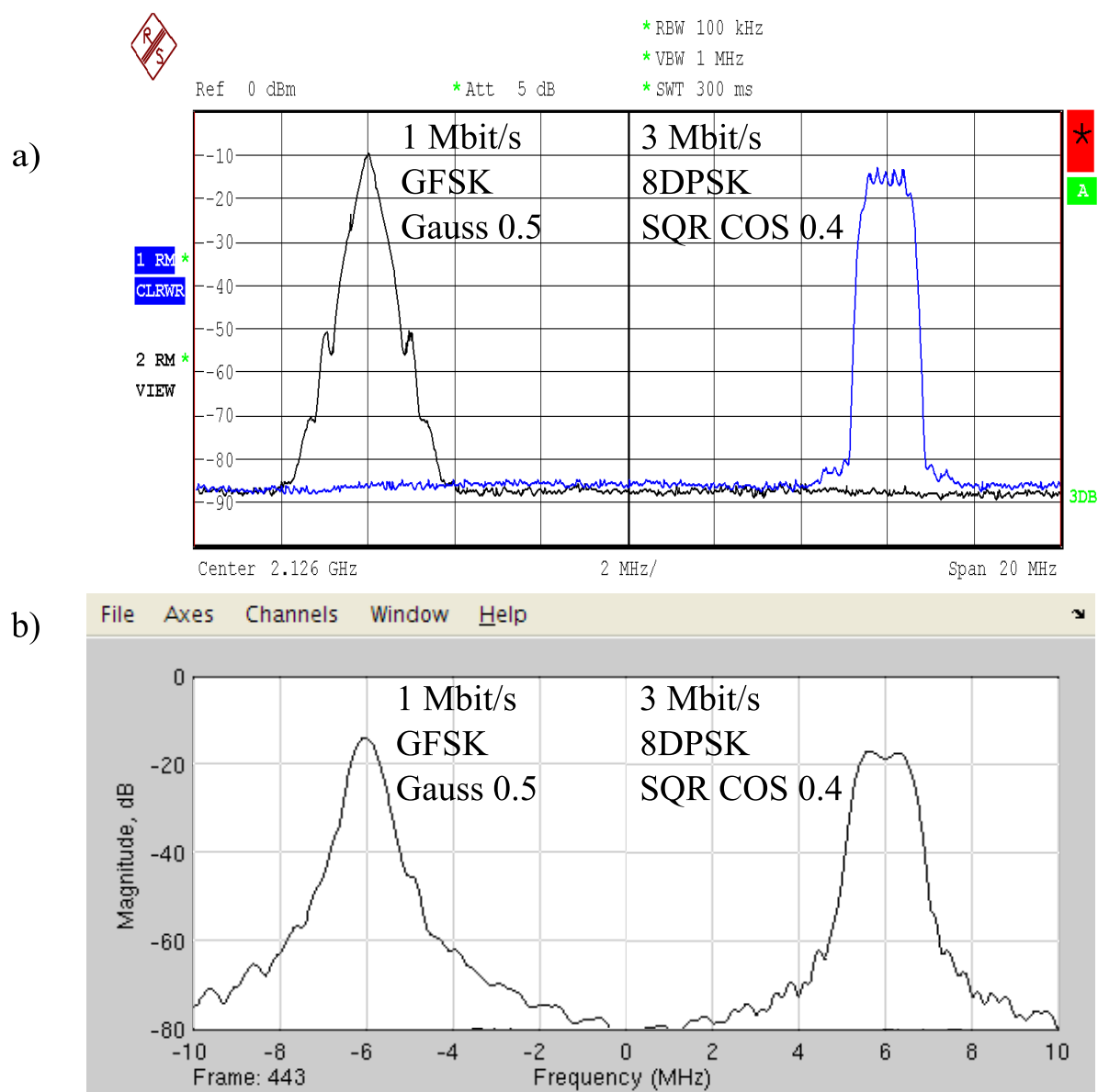
$$f = -39 + k \text{ MHz}, \quad k = 0, \dots, 78 \quad (4.1)$$

kde k je číslo kanálu v systému Bluetooth.



Obrázek 4.3: Simulace přenosu dat standardu IEEE 802.11b při rušení systémem Bluetooth (1 Mbit/s a 3 Mbit/s).

Na obrázku 4.3 je výsledek simulace přenosu dat pomocí standardu IEEE 802.11b při rušení systémem Bluetooth 1 Mbit/s a Bluetooth 3 Mbit/s. Maximální chybovost dosahuje pouze 10%, tedy pětiny z teoretické hranice 50%. To odpovídá skutečnosti, že systém Wi-Fi IEEE 802.11b je rušen zejména v 16 MHz širokém pásmu (pětina 80 MHz pásma). Šířka IEEE 802.11b kanálu je sice 22 MHz, ale nejvyšší výkonové úrovně dosahuje rozprostřený signál právě v pásmu 16 MHz. Největší kódový zisk má v souladu s teoretickými předpoklady standard IEEE 802.11b s přenosovou rychlostí 1 Mbit/s. Kódový zisk je způsoben rozptřením pomocí Barkerova kódu o délce 11 čipů, což odpovídá kódovému zisku 10,4 dB (viz rovnice 2.2 kap. 2.4).

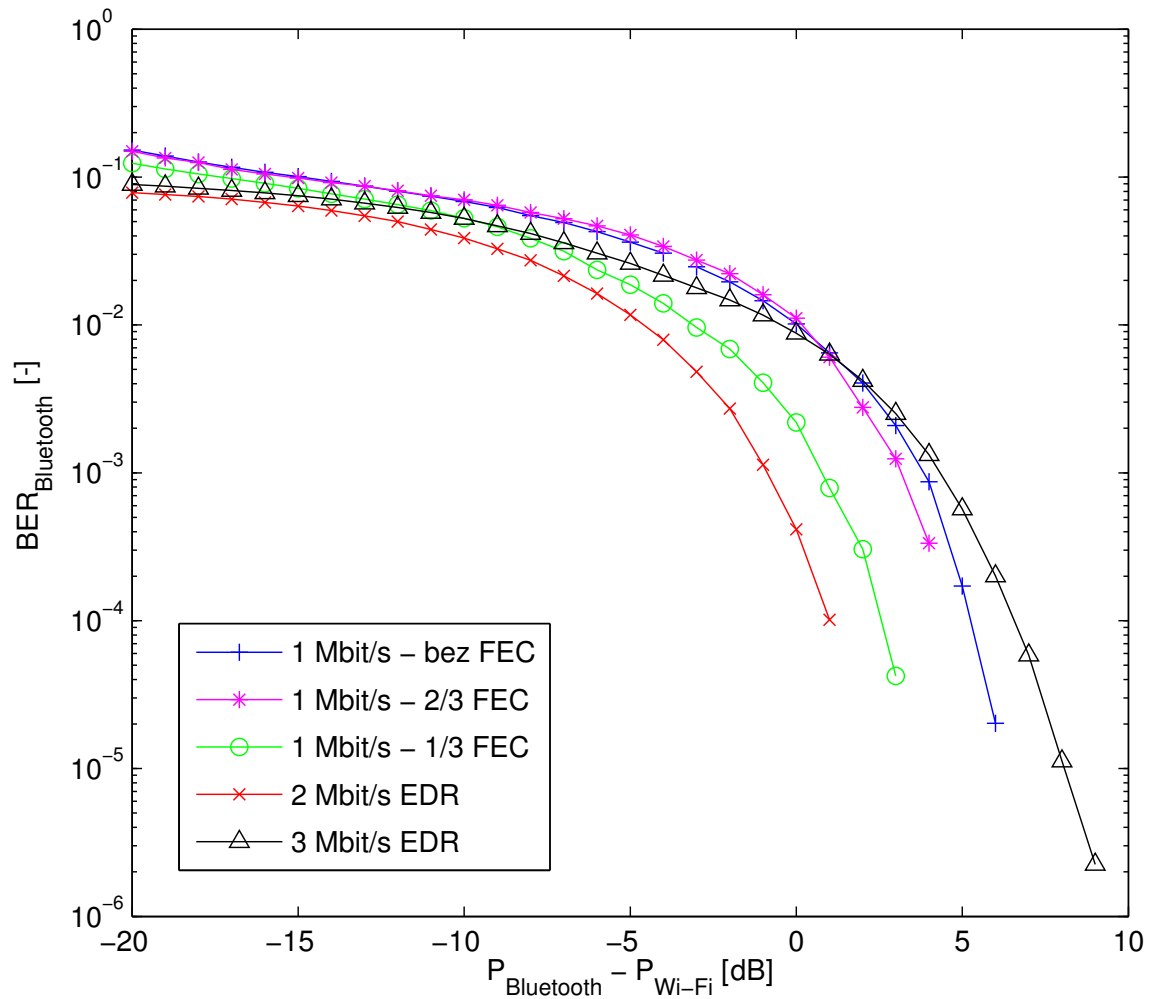


Obrázek 4.4: Porovnání spekter Bluetooth 1 Mbit/s a Bluetooth EDR 3 Mbit/s

a - měřené spektrum - spektrální analyzátor

b - spektrum - simulace v Matlabu.

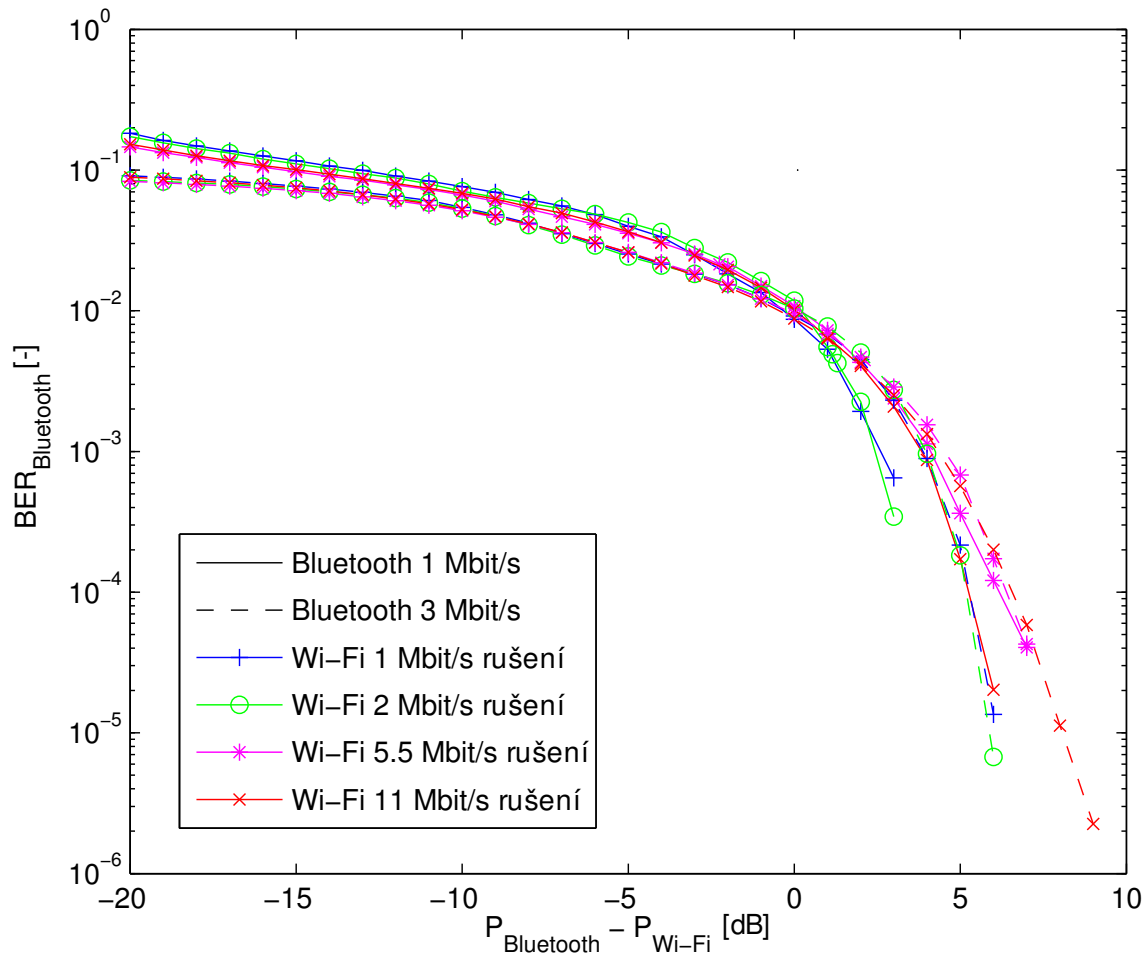
Na obrázku 4.3 je vidět rozdíl mezi chybovostí, kterou způsobuje rušení systémem Bluetooth 1 Mbit/s a Bluetooth 3 Mbit/s pro daný rozdíl výkonů v *dB*. Systém Bluetooth 1 Mbit/s využívající modulaci GFSK způsobuje menší interference než Bluetooth 3 Mbit/s, který využívá modulaci 8DPSK a tvarování pomocí *Square-Root Raised Cosine* filtru s *Roll-off* faktorem 0,4. Různý vliv rušení Bluetooth 1 Mbit/s a 3 Mbit/s je dán odlišným tvarem spekter. Tvary spekter jsou zobrazeny na obrázku 4.4 jak pro měřené výsledky, tak i pro výsledné spektrum vypočítané v prostředí Matlab Simulink. Základní parametry systému Bluetooth mající vliv na tvar spektra jsou shrnuty v tabulce 4.1.



Obrázek 4.5: Simulace přenosu dat systémem Bluetooth při rušení standardem IEEE 802.11b (11 Mbit/s).

Výsledky simulace chybovosti přenosu dat systémem Bluetooth při rušení signálem IEEE 802.11b jsou vidět na Obr. 4.5. Standard Bluetooth využívá 3 různé modulační techniky a 3 typy FEC. Z výsledků simulace na Obr. 4.5 je jasné vidět, že maximální chybovost dosahuje pro všechny varianty přenosových módů cca 10%. To odpovídá rušení pouze v jedné pětině použitých kmitočtů, tedy v pásmu 16 MHz. Pásmo 16 MHz odpovídá šířce pásma signálu IEEE 802.11b s nejvyšší výkonovou úrovní.

Nejmenší chybovosti systému Bluetooth je dosahováno při použití přenosové rychlosti 2 Mbit/s, což odpovídá teoretickým předpokladům, jelikož modulace $\pi/4$ -DQPSK je více odolná proti AWGN rušení než modulace 2FSK (50).

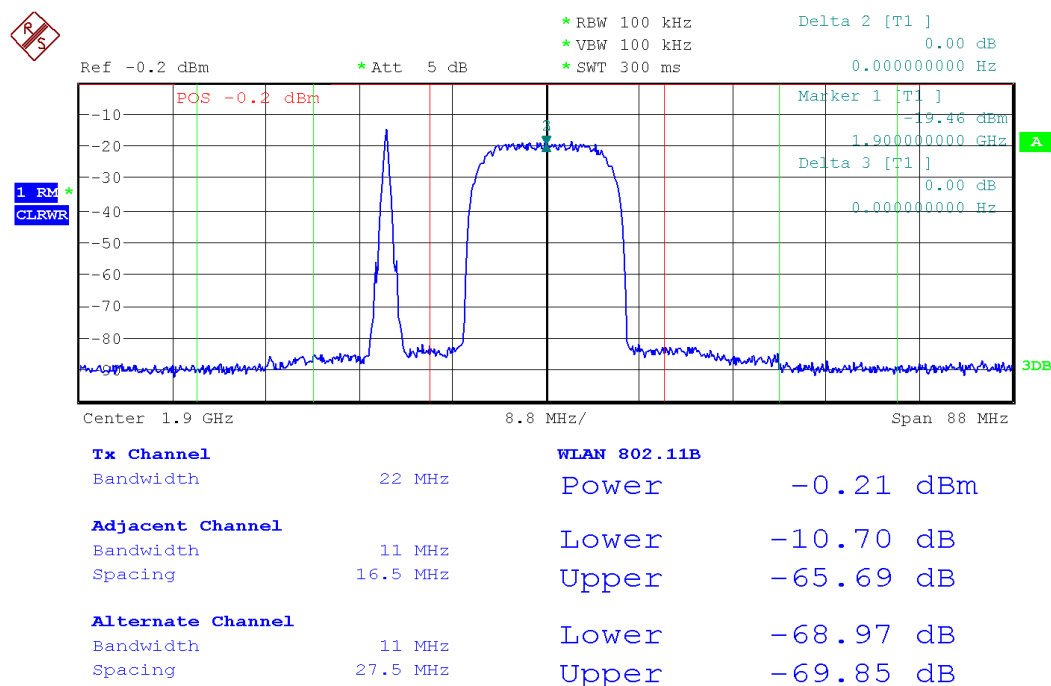


Obrázek 4.6: Simulace přenosu dat systémem Bluetooth s rychlostí 1 Mbit/s při rušení různými rychlostmi standardu IEEE 802.11b.

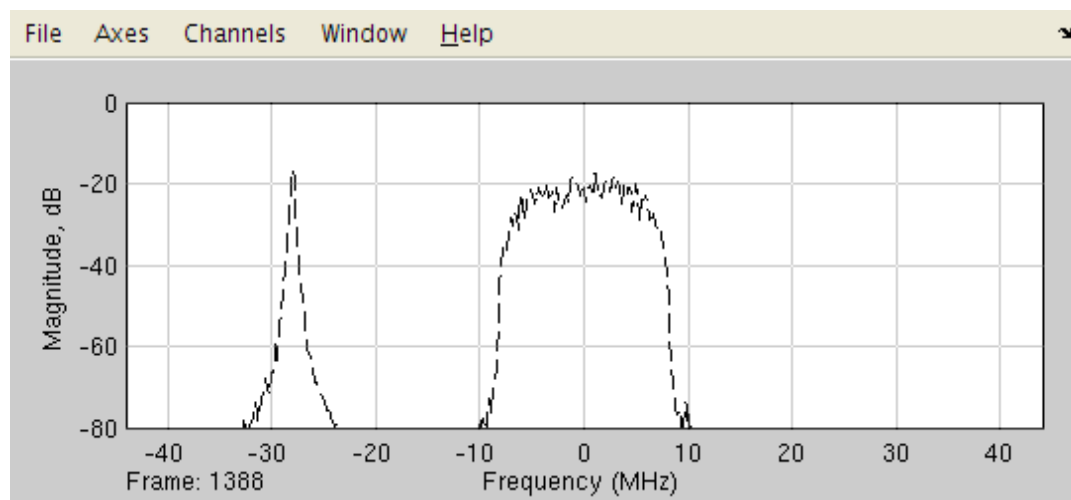
Z výsledků simulací přenosu Bluetooth pro rušení různými přenosovými rychlostmi IEEE 802.11b (Obr. 4.6) je patrné, že rušení systému Bluetooth není závislé na přenosové rychlosti rušícího standardu IEEE 802.11b. To vyplývá zejména z toho, že rychlosti 2, 5,5 i 11 Mbit/s používají stejnou modulační techniku DQPSK, mají stejnou délku trvání jednoho čipu (viz Obr. 4.1) a jejich signály mají tudíž stejný charakter v časové oblasti.

Bluetooth a Wi-Fi signály jsou slučovány s periodou vzorkování $1/88 \mu\text{s}$ (viz Obr. 4.2 a 4.1). Výkon systému IEEE 802.11b je nastaven po celou dobu simulace na 0 dBm, přičemž výkon signálu Bluetooth je nastavován v rozmezí od -20 dBm do 20 dBm. Výsledné spektrum sloučených signálů Bluetooth (1 Mbit/s) a Wi-Fi (11 Mbit/s) je vidět na Obr. 4.7. V obrázku je porovnáno spektrum získané ze simulace v prostředí Matlab Simulink se spektrem získaným ze spektrálního analyzátoru při stejném výkonovém poměru jako v simulaci.

a)



b)



Obrázek 4.7: Koexistence systémů Bluetooth 1 Mbit/s a Wi-Fi 11 Mbit/s (CCK64 kódování) - spektrální výkonová hustota:

$$P_{\text{Bluetooth}} = -10 \text{ dBm}; P_{\text{Wi-Fi}} = 0 \text{ dBm}$$

a - měřené spektrum - spektrální analyzátor

b - spektrum - simulace v Matlabu.

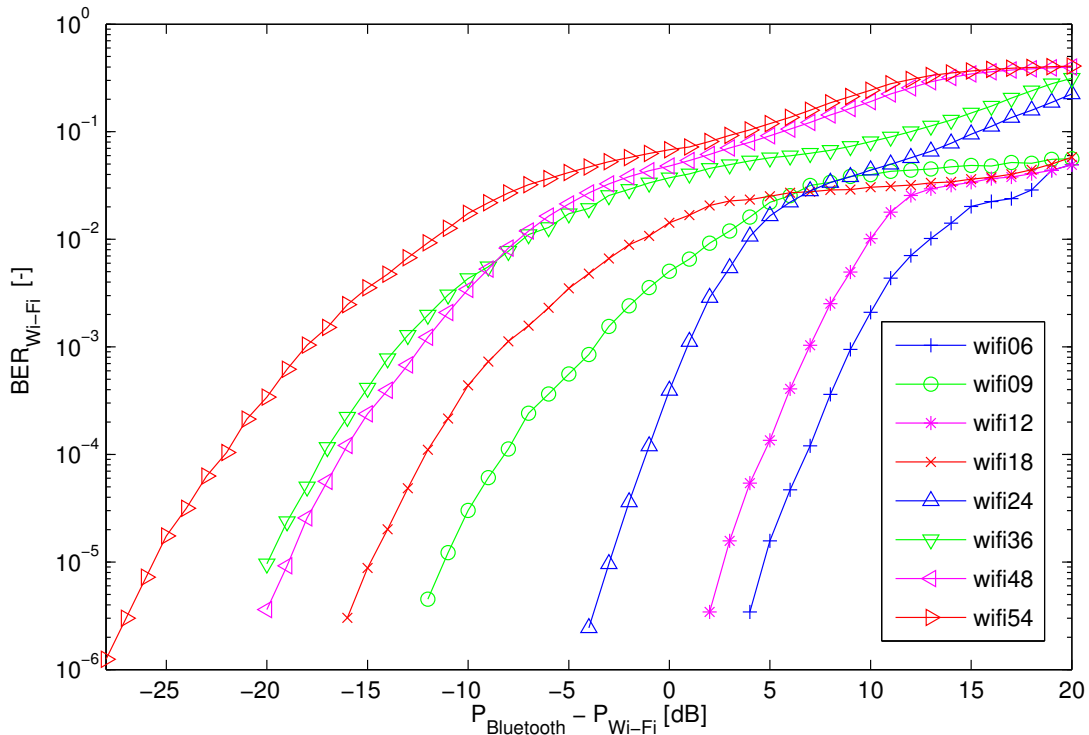
4.2 Koexistence standardů Bluetooth a IEEE 802.11g

Simulace koexistence standardů Bluetooth a IEEE 802.11g byla prováděna ve stejném frekvenčním pásmu jako simulace koexistence Bluetooth a IEEE 802.11b. Blokové schéma fyzické vrstvy standardu IEEE 802.11g, využívajícího modulace OFDM je zobrazeno na obrázku 2.17 v kapitole popisující fyzickou vrstvu IEEE 802.11g. Fyzická vrstva Bluetooth je modelována stejným způsobem jako v předchozí kapitole (viz obrázek 4.2) a liší se pouze jinou rychlostí vzorkování. Na obrázku 4.9 je zobrazeno zjednodušené schéma simulace koexistence standardu Bluetooth (3 Mbit/s) a IEEE 802.11g (54 Mbit/s) v prostředí Matlab Simulink. V kapitole 2.3.3 lze nalézt detailní popis fyzické vrstvy standardu IEEE 802.11g, na jehož základě byl vytvořen model fyzické vrstvy.

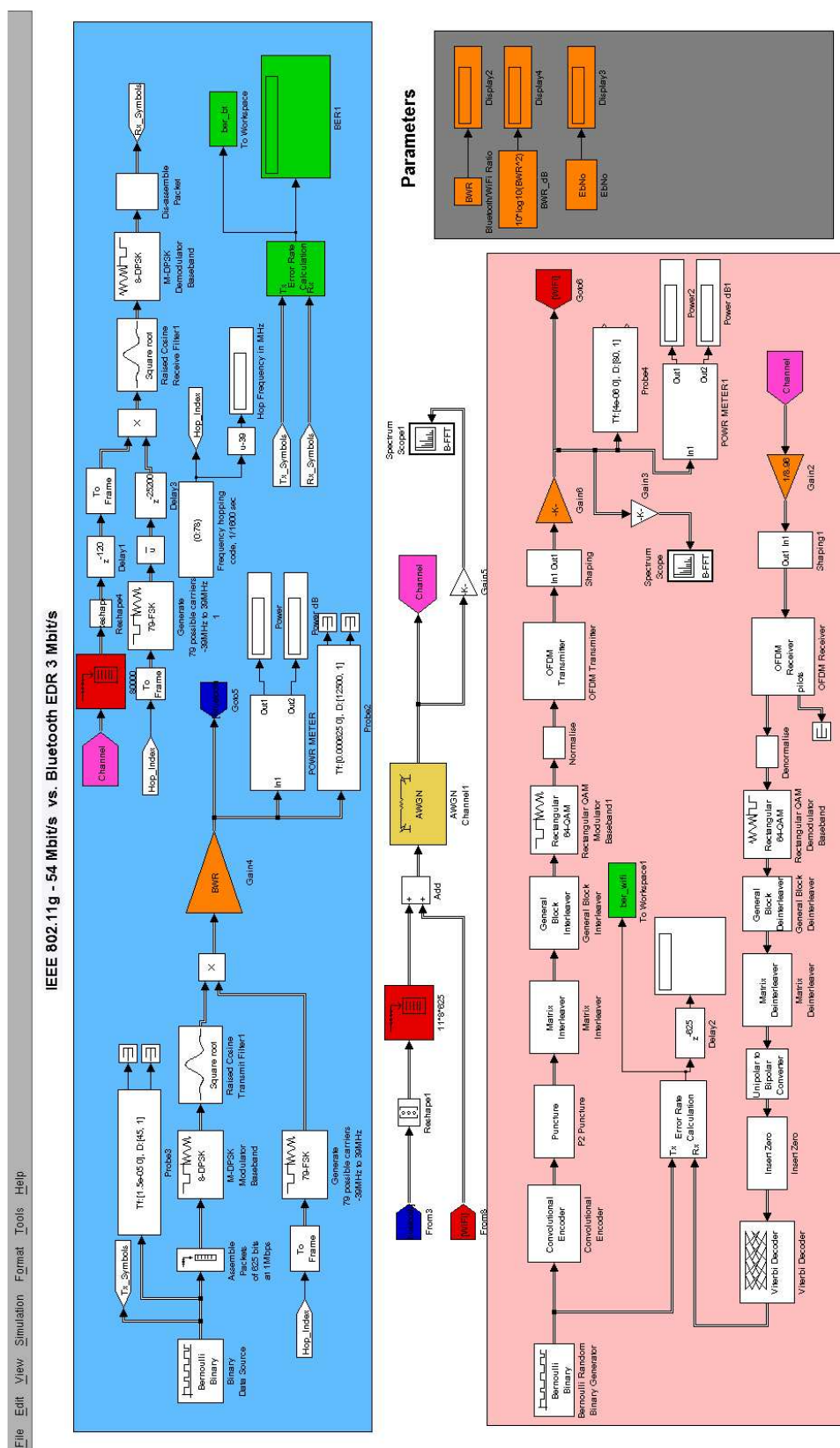
Aby bylo možné modelovat koexistenci systémů v pásmu -39 až +39 MHz, musí být signál Bluetooth i Wi-Fi převzorkován se stejnou vzorkovací frekvencí, která bude zároveň více než dvojnásobkem nejvyššího kmitočtu, aby byl splněn Shannonův teorém (5). Vzorkovací kmitočet byl zvolen 128 vzorků za 1 μ s. Délka OFDM symbolu je 4 μ s, a proto byla použita IFFT s 512 vzorky. Signál IEEE 802.11g je ve frekvenční oblasti doplněn nulami na délku 512 vzorků. Díky použití 512 bodové IFFT dojde ke snížení výkonu signálu v časové oblasti, a proto musí být výkon normován na jednotkový výkon. Výkon digitálního diskrétního signálu je možné vypočítat pomocí vzorce

$$P_d = \frac{1}{N} \sum_{n=N_1}^{N_1+N-1} (|x(n)|^2), \quad (4.2)$$

kde N je počet vzorků a $x(n)$ je amplituda jednotlivých vzorků.



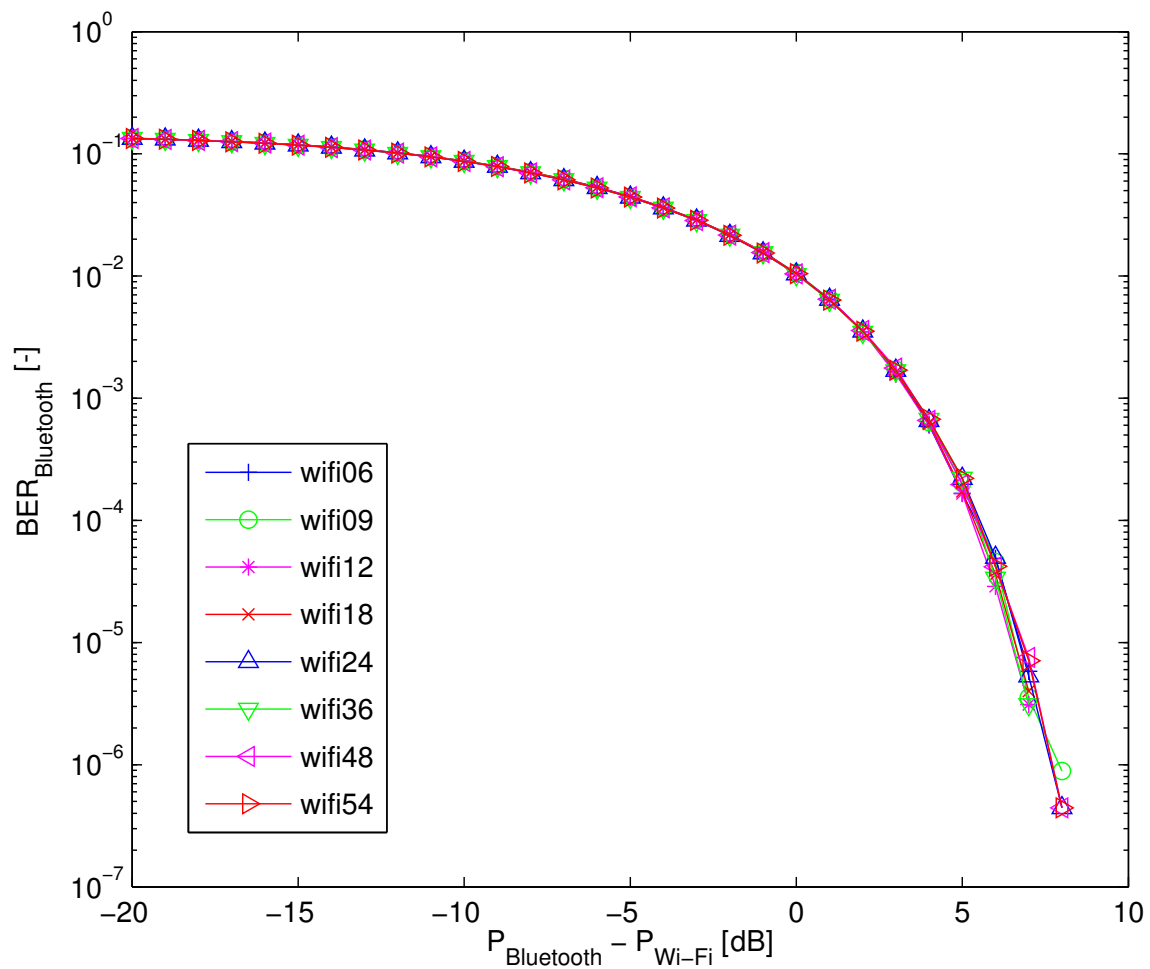
Obrázek 4.8: Přenos dat systémem IEEE 802.11g při rušení signálem Bluetooth 1 Mbit/s.



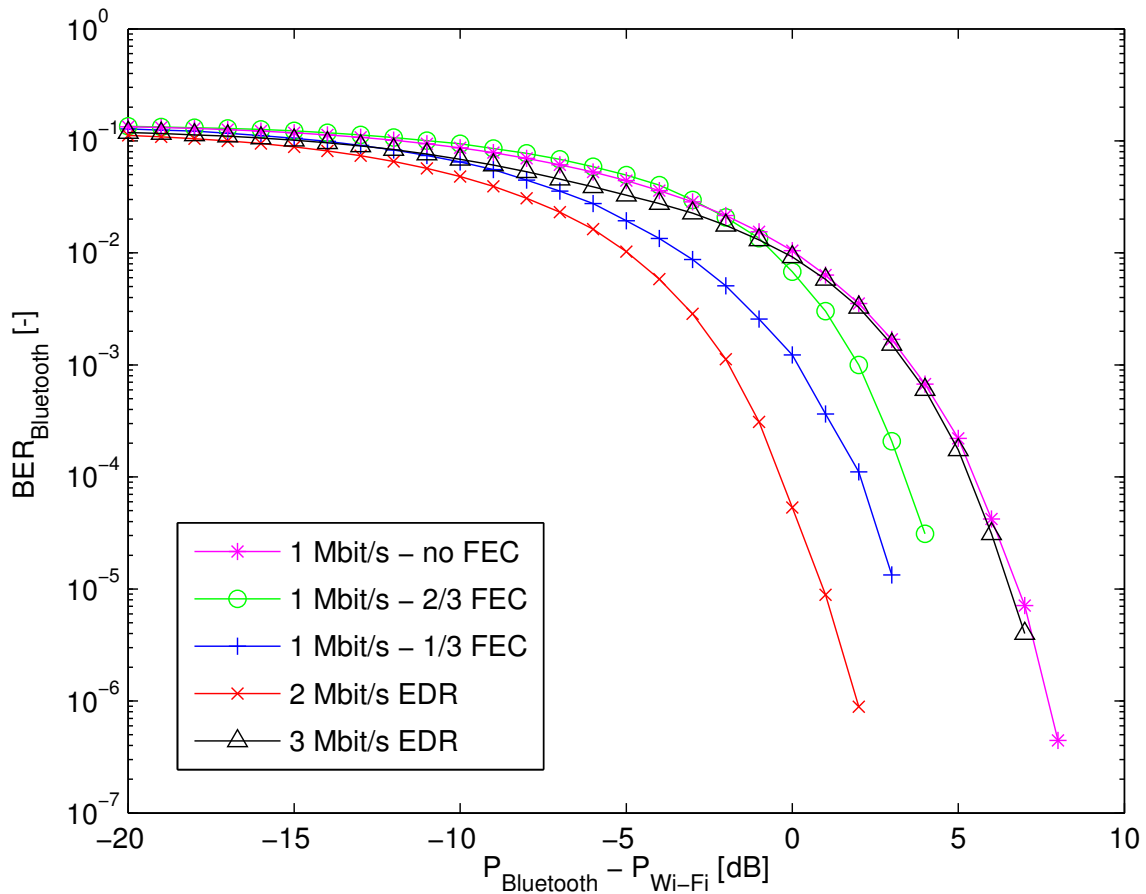
Obrázek 4.9: Zjednodušené blokové schéma koexistence systémů IEEE 802.11g a Bluetooth v prostředí Matlab Simulink.

Na obrázku 4.8 je zobrazen výsledek simulace přenosu dat systémem IEEE 802.11g při rušení standardem Bluetooth o rychlosti 1 Mbit/s. Z výsledků je patrné, že nejvíce odolné jsou tři standardem povinně předepsané rychlosti 6, 12 a 24 Mbit/s. Tyto rychlosti používají pouze konvoluční kódy bez vytečkování. Naproti tomu přenosové rychlosti 9, 18, 36, 48, 54 Mbit/s, které standard předepisuje jako volitelné, používají vytečkové konvoluční kódy a při rušení systémem Bluetooth vykazují mnohem vyšší chybovost.

Na obrázku 4.10 je zobrazen vliv různých přenosových rychlostí rušícího IEEE 802.11g na systém Bluetooth 1 Mbit/s. Z obrázku je vidět, že systém Bluetooth je rušen systémem IEEE 802.11g (OFDM) nezávisle na přenosové rychlosti.



Obrázek 4.10: Přenos dat systémem Bluetooth 1 Mbit/s při rušení IEEE 802.11g.

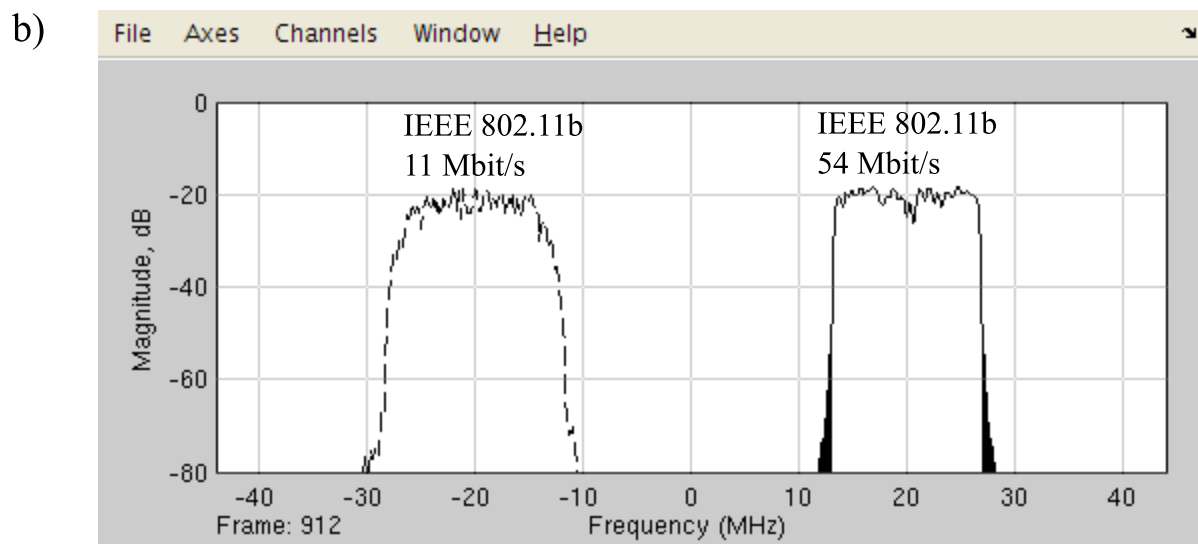
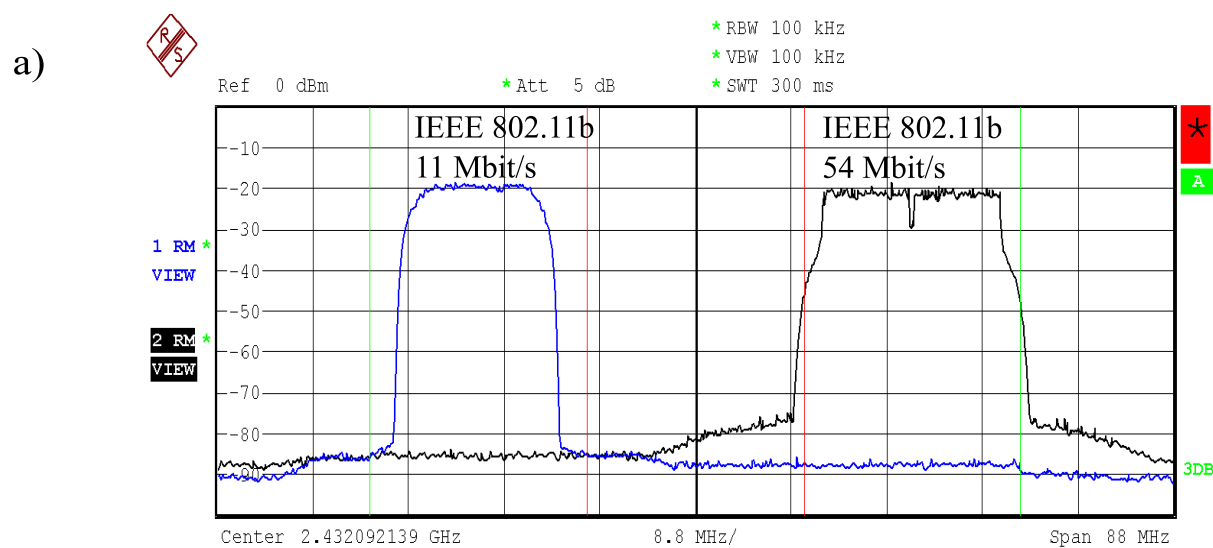


Obrázek 4.11: Přenos dat systémem Bluetooth při rušení standardem IEEE 802.11g (54 Mbit/s).

Na obrázku 4.11 je zobrazen vliv rušení IEEE 802.11g s přenosovou rychlostí 54 Mbit/s na přenos dat různými rychlostmi systému Bluetooth. Na obrázku 4.12 je možné porovnat vzhled frekvenčního spektra systému IEEE 802.11b a IEEE 802.11g. Protože IEEE 802.11b používá rozprostírání pomocí přímé sekvence (Direct Sequence Spread Spectrum), má jeho spektrum jiný charakter než u standardu IEEE 802.11g, který využívá k obsazení 22 MHz širokého kanálu metodu OFDM. Seznam parametrů, které mají vliv na výsledný tvar spekter IEEE 802.11b a IEEE 802.11g, lze najít v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2: Porovnání základních modulačních parametrů systému IEEE 802.11b a IEEE 802.11g.

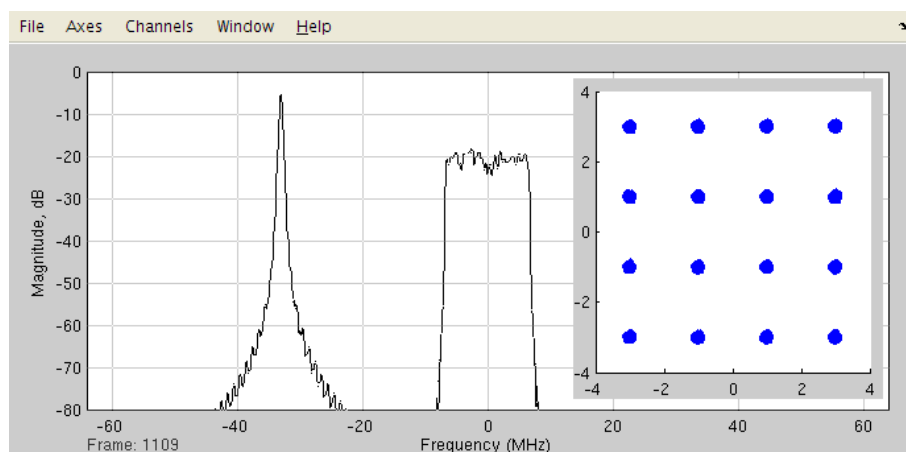
Přenosová rychlost	11 Mbit/s	54 Mbit/s
Modulace	DQPSK, Komplementární kódování	64QAM, OFDM
Faktor rozprostření	11	-
Kódování	-	Konvoluční kódování $R = 3/4$
Tvarování	Raised Cosine 0,35	Okénkování, Rectangle
Počet subnosných	-	52
Rozteč subnosných	-	0,3125 MHz
Šířka pásma	$2 \times 11 = 22$ MHz	$52 \times 0,3125 = 16,25$ MHz



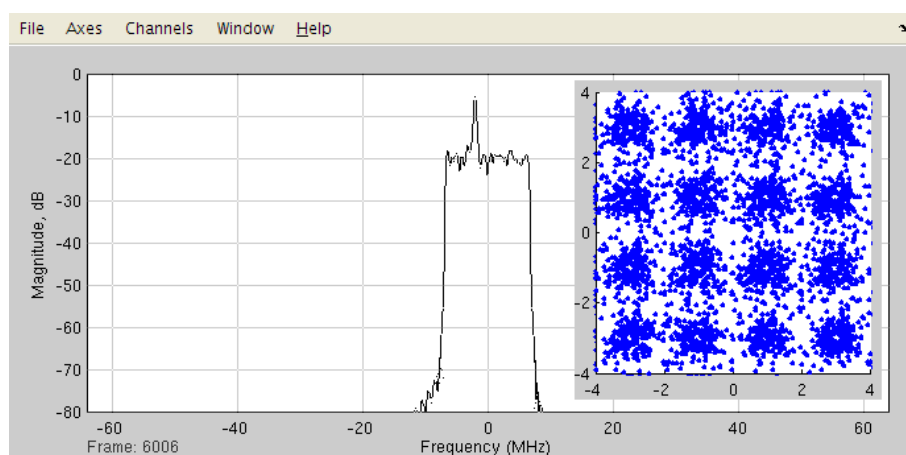
Date: 10.JUL.2008 13:54:46

Obrázek 4.12: Porovnání spekter IEEE 802.11b (11 Mbit/s) a IEEE 802.11g (54 Mbit/s)
 a - měřené spektrum - spektrální analyzátor
 b - spektrum - simulace v Matlabu.

Na následujících obrázcích 4.13 a 4.14 je zobrazen průběh simulace koexistence při výskytu kolize mezi IEEE 802.11g a Bluetooth a při nekolizním stavu. Z výsledků je jasně vidět, že pokud systém Bluetooth využívá frekvence neobsazené systémem Wi-Fi, nedochází ani ke vzájemnému rušení. Toho využívá metoda pro předcházení kolizím AFH, kdy po „proskenování“ celého frekvenčního pásma od 2,402 do 2,480 GHz jsou z kmitočtů používaných pro frekvenční skákání vyřazeny ty, které jsou obsazeny jiným systémem.

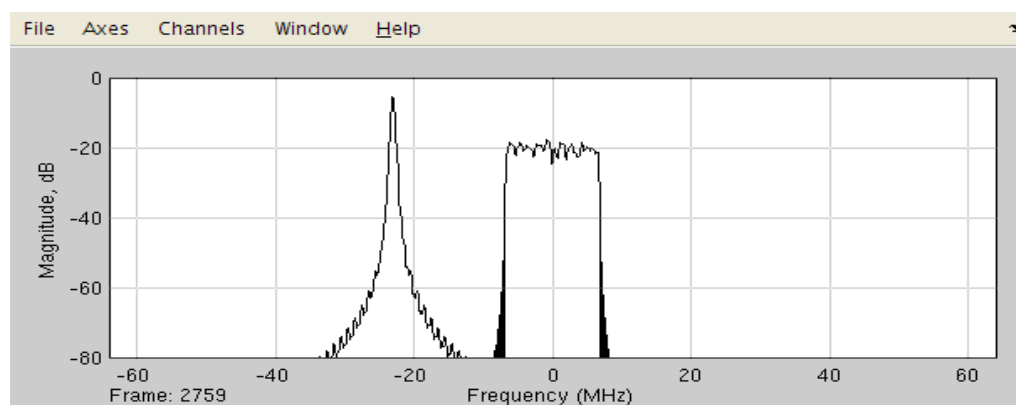
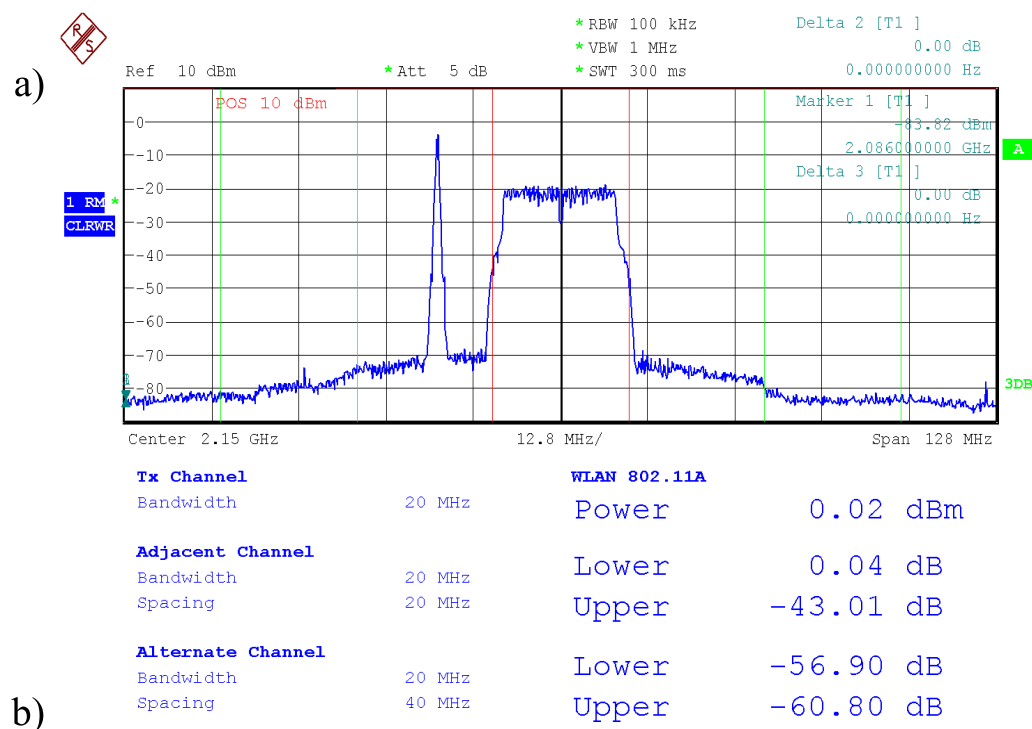


Obrázek 4.13: Koexistence systémů IEEE 802.11g a Bluetooth (1 Mbit/s) - bez kolize, $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi} = 0dB$.



Obrázek 4.14: Koexistence systémů IEEE 802.11g a Bluetooth (1 Mbit/s) - kolizní stav, $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi} = 0dB$.

Na obrázku 4.15 je zobrazeno spektrum koexistence systémů Bluetooth 1 Mbit/s a IEEE 802.11g 54 Mbit/s. V části *a* je snímek obrazovky ze spektrálního analyzátoru a v části *b* je zobrazen snímek z programu Matlab Simulink. Na obrázku 4.16 jsou zobrazeny stejné průběhy pro simulaci koexistence standardu IEEE 802.11g a Bluetooth EDR 3 Mbit/s. Na obrázku je patrný odlišný tvar spektra Bluetooth 3 Mbit/s. Bližší porovnání spekter Bluetooth 1 Mbit/s a 3 Mbit/s je zobrazeno v předchozím textu na obrázku 4.4.

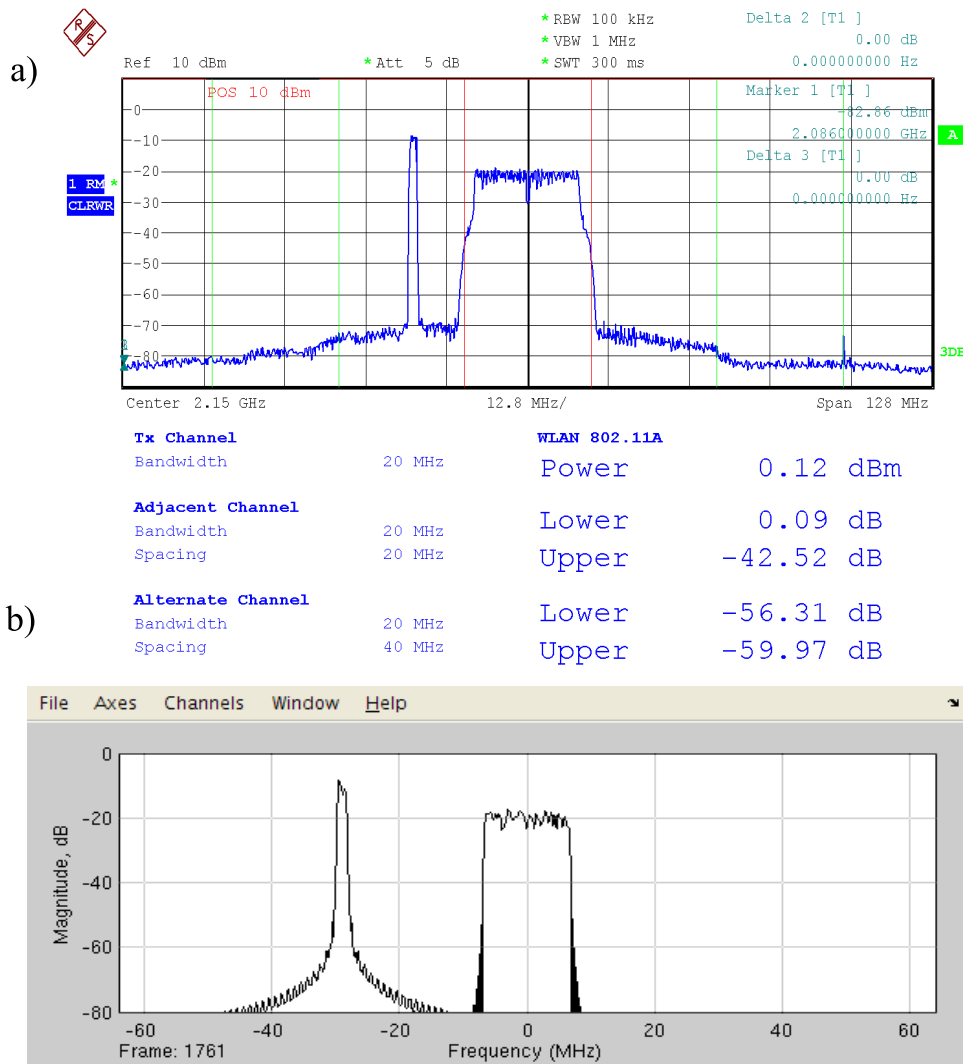


Obrázek 4.15: Koexistence systémů Bluetooth 1 Mbit/s a Wi-Fi 54 Mbit/s - spektrální výkonová hustota:

$$P_{\text{Bluetooth}} = -10 \text{ dBm}; P_{\text{Wi-Fi}} = 0 \text{ dBm}$$

a - měřené spektrum - spektrální analyzátor

b - spektrum - simulace v Matlabu.



Obrázek 4.16: Koexistence systémů Bluetooth 3 Mbit/s a Wi-Fi 54 Mbit/s - spektrální výkonová hustota:

$$P_{\text{Bluetooth}} = -10 \text{ dBm}; P_{\text{Wi-Fi}} = 0 \text{ dBm}$$

a - měřené spektrum - spektrální analyzátor

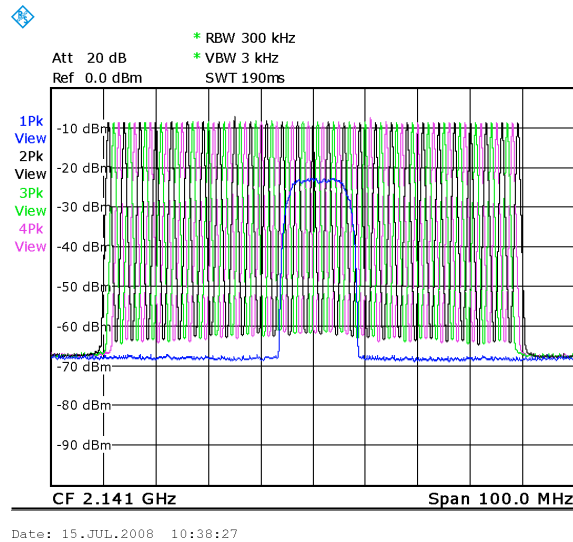
b - spektrum - simulace v Matlabu.

4.3 Zkrácená simulace pro šířku pásma 22 MHz

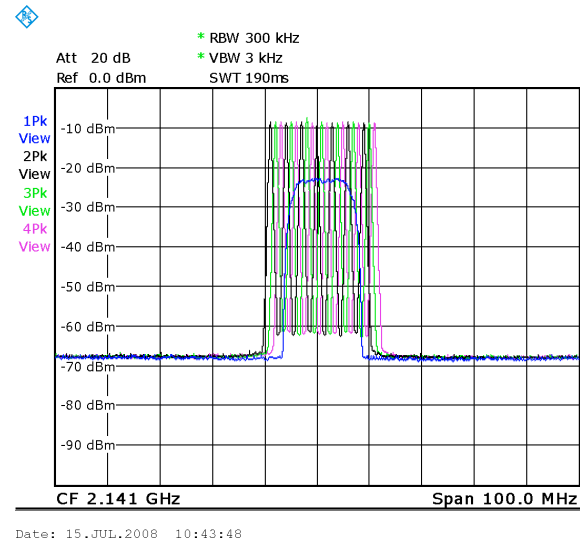
Z výsledků simulací vyplývá, že pokud nedochází k přímé kolizi obou systémů na stejné frekvenci, mohou oba systémy pracovat bez vzájemného rušení. Toho lze využít pro zrychlení simulace koexistence. Simulaci lze potom počítat pro frekvenční skákání systému Bluetooth pouze na frekvencích, které odpovídají 22 MHz širokému kanálu signálu IEEE 802.11b/g. Výsledky chybovostí vypočítané redukovanou simulací je poté nutné přepočítat na celou šířku pásma 80 MHz. Skutečná chybovost se tedy vypočítá podle vztahu

$$BER_{79} = BER_{21} * \frac{21}{79}, \quad (4.3)$$

kde BER_{21} je chybovost vypočítaná pro simulaci na 22 MHz širokém kanálu a BER_{79} je chybovost přepočítaná na rušení pro celé 80 MHz široké pásmo. Kanály jsou širší než je rozstup nosných, a proto 21 nosných zabírá cca pásmo 22 MHz.



Date: 15.JUL.2008 10:38:27

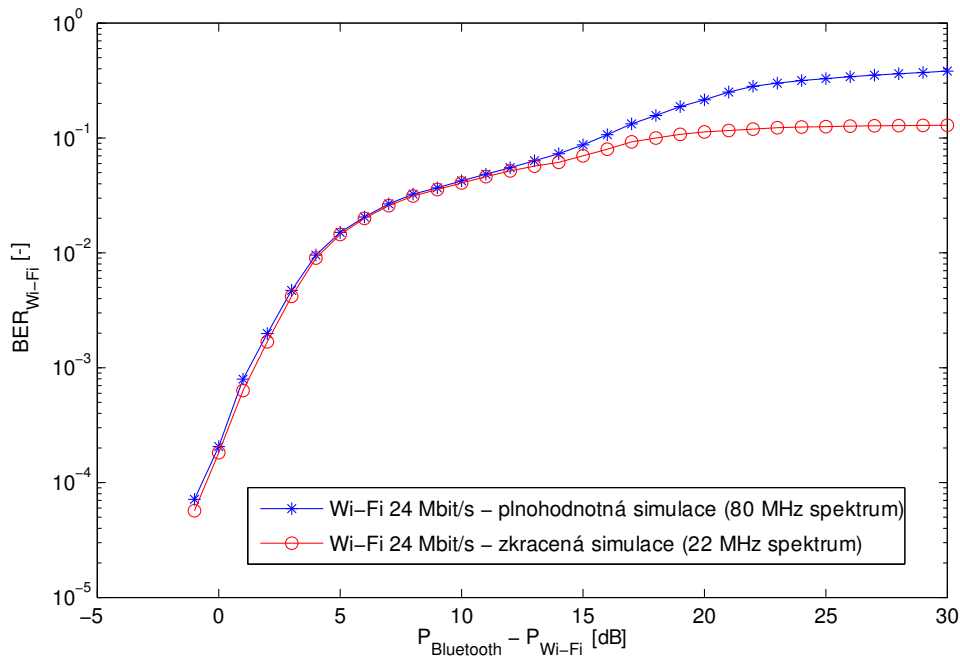


Date: 15.JUL.2008 10:43:48

Obrázek 4.17: Simulace přes celé frekvenční pásmo.

Obrázek 4.18: Zkrácená simulace.

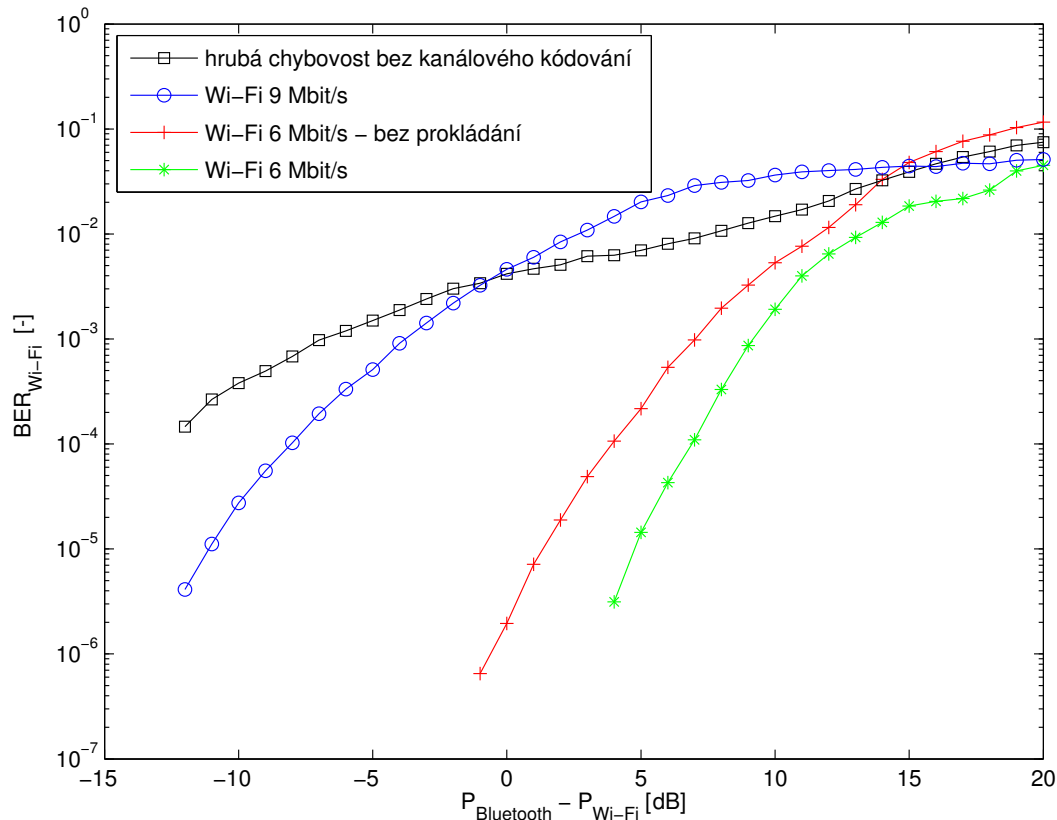
Na obrázku 4.19 jsou porovnány výsledky simulací při použití simulace přes celé pásmo 80 MHz se zkrácenou verzí simulace. Oba způsoby simulace jsou v tomto případě rovnocenné a rozdíly mezi výsledky se projevují až při nízkých C/I.



Obrázek 4.19: Porovnání výsledků plnohodnotné a zkrácené simulace pro IEEE 802.11g - 24 Mbit/s při rušení systémem Bluetooth.

4.4 Vliv prokládání a konvolučního kódování u IEEE 802.11g na výsledky simulací koexistence

Z důvodu výpočtové a časové náročnosti byly simulace prováděny pouze v redukovaném frekvenčním pásmu 22 MHz. Nosné kmitočty Bluetooth byly voleny od -10 MHz do 10 MHz viz Obr. 4.18.

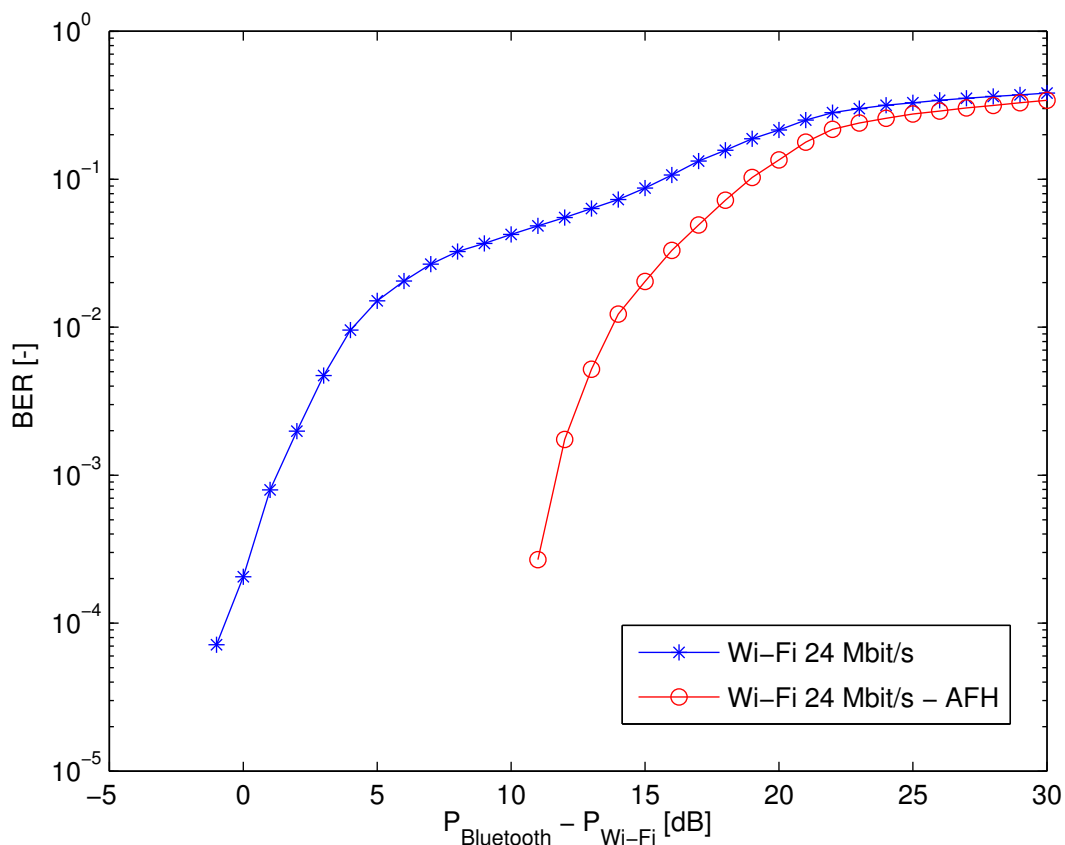


Obrázek 4.20: Porovnání efektivity použití konvolučního kódování a prokládání při simulacích koexistence IEEE 802.11g - 6 Mbit/s.

Na obrázku 4.20 jsou porovnány závislosti chybovostí při použití různého kanálového kódování na fyzické vrstvě IEEE 802.11g pro rychlost 6 Mbit/s. Modrá a zelená křivka představují implementaci konvolučního kódování a prokládání tak, jak předepisuje specifikace. Černá křivka představuje hrubou chybovost (chybovost bez použití konvolučního kódování a prokládání). Červená křivka zobrazuje průběh chybovosti signálu IEEE 802.11g je-li vynecháno prokládání. Z obrázků je patrný poměrně veliký zisk způsobený jak prokládáním, tak konvolučním kódováním. Bez použití kanálového kódování by systém IEEE 802.11g vykazoval mnohem horší parametry při testování koexistence se signálem Bluetooth.

4.5 Simulace koexistence při použití AFH

Systém AFH funguje na principu vynechávání zarušených kanálů. Bluetooth zařízení si vzájemně vyměňují informaci o zarušených kanálech, které jsou pak při komunikaci vynechány. Systém Bluetooth, který používá AFH, vytváří pole 79 hodnot představujících status na jednotlivých Bluetooth kanálech. Specifikace standardu nedefinuje způsob, jakým by se mělo zjišťovat obsazení kanálu. Pro zjišťování rušení slouží parametr RSSI nebo PER. Teoreticky by proto měly být pro přenos používány jen nezarušené kanály. Protože implementace AFH je z velké části ponechána na výrobcích zařízení, byla provedena pouze simulace koexistence v případě, že systém Bluetooth označí 22 MHz používaných systémem Wi-Fi jako zarušených. V tomto případě probíhá přenos dat bez rušení do doby, kdy kanál Wi-Fi začne rušit i v přilehlých pásmech. Toto rušení je ovšem závislé na typech použitých filtrů ve standardu IEEE 802.11b/g a navíc přilehlé zarušené kanály by byly také z komunikace vyřazeny. Jelikož není filtrování signálů IEEE 802.11b/g ve specifikaci definováno a je pouze nutné dodržet velice „benevolentní“ frekvenční masku, je i rušení v přilehlých pásmech významně závislé na konkrétní implementaci standardu jednotlivými výrobci. Na obrázku 4.21 je zobrazen průběh chybovosti systému IEEE 802.11g při použití adaptivního frekvenčního skákání systémem Bluetooth.



Obrázek 4.21: Porovnání efektivnosti použití AFH při simulaci přenosu signálu IEEE 802.11g - 24 Mbit/s a rušení systémem Bluetooth 1 Mbit/s.

4.6 Závěr

V této kapitole byly provedeny simulace koexistence standardů Bluetooth, IEEE 802.11b a IEEE 802.11g v prostředí Mathworks Matlab Simulink. Byly vytvořeny modely fyzických vrstev, které byly upraveny takovým způsobem, aby byly systémy navzájem sluchitelné pro modelování koexistence. Z důvodu menší výpočtové náročnosti byla zvolena simulace na kmitočtech blízkých 0 MHz. Výsledná bloková schémata v prostředí Matlab Simulink nebylo možno zpracovat pomocí paralelních výpočtů ve výpočtovém středisku projektu METACentrum společnosti CESNET, jak bylo předvedeno v kapitole 2.4 a 3.9 u simulací na AWGN kanálu. Projekt METACentrum nepodporuje spouštění modelů vytvořených v prostředí Matlab Simulink. Tato nevýhoda je kompenzována tím, že simulace v prostředí Matlab Simulink jsou rychlejší než standardní programové prostředí, jelikož dochází ke zpracování signálů všech bloků komunikačního systému současně, na rozdíl od klasického programování, kdy se pracuje s proměnnými, které je nutné zpracovávat postupně. K výhodám prostředí Matlab Simulink patří množství předpřipravených knihoven s nejčastěji používanými bloky komunikačního systému. Při simulacích koexistence byla využívána zejména knihovna *Communication Blockset*.

Spektrální obálky signálů získané v simulacích koexistence byly porovnány s výsledky naměřenými pomocí generátorů signálů Rohde&Schwarz CMU200, SMIQ 02B a spektrálního analyzátoru Rohde&Schwarz FSL. Naměřená i vypočtená frekvenční spektra a konstelační diagramy si odpovídají tvarem i úrovní signálů.

Při rušení systému IEEE 802.11b/g systémem Bluetooth bylo zjištěno, že větší rušení způsobují rychlosti rozšířeného módu EDR 2 Mbit/s a 3 Mbit/s. Tento minimální rozdíl je způsobený jiným typem předepsaných filtrů a tím i jiným tvarem spektra. Bylo zjištěno, že systémy Bluetooth a IEEE 802.11b/g se navzájem ruší zejména pokud dochází ke kolizím ve sdíleném frekvenčním pásmu. Simulacemi bylo ověřeno, že při použití adaptivního frekvenčního skákání dochází k významné redukci vzájemného rušení. Jelikož však implementace adaptivního frekvenčního skákání není ve specifikaci přesně definována a zjišťování zarušených kanálů ponechává standard na jednotlivých výrobcích, nebylo prováděno podrobnější zkoumání vlivu AFH na koexistenci.

V této kapitole byla ověřena také možnost rychlejšího výpočtu simulací koexistence ve zúženém pásmu 22 MHz a přepočtu na celé frekvenční pásmo široké 80 MHz při zachování přesnosti výsledků.

Pomocí simulací bylo ověřeno, že při koexistenci Bluetooth a IEEE 802.11g hraje velkou roli použití kanálového kódování, které zvyšuje robustnost systému IEEE 802.11g při rušení systémem Bluetooth.

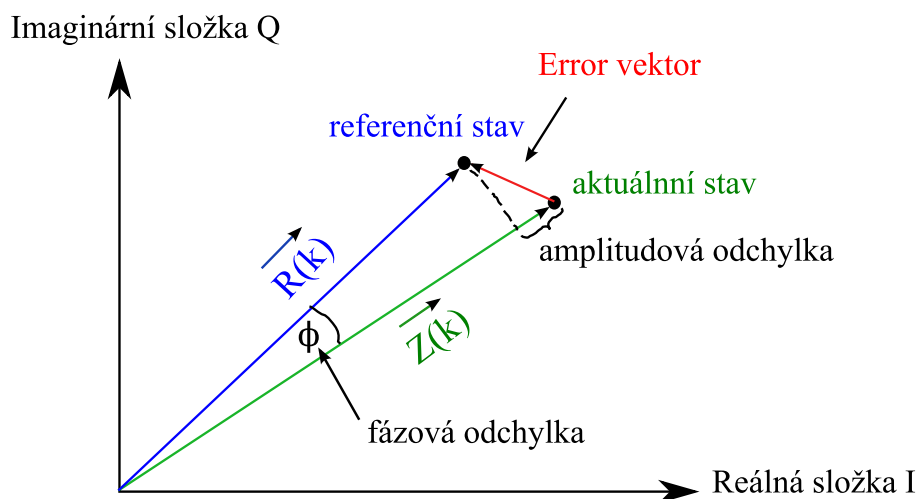
Výsledky simulací koexistence Bluetooth a IEEE 802.11b/g byly publikovány v časopise (30) a byly zaslány k publikování do časopisu (23).

5.1 Měření EVM

Bitová chybovost (BER) je jedním z hlavních parametrů používaných při popisu rušení a vyjádření kvality přenosu v bezdrátových komunikačních systémech. Jeho nevýhodou je ale problematický způsob měření v reálných podmínkách a potřeba speciálních měřících zařízení. Proto není měření bitové chybovosti optimální způsob k popisu kvality přenosové trasy.

Lepším kritériem než bitová chybovost při měření propustnosti systému je střední hodnota datové propustnosti vztažená k dosažitelnému maximu. Datová propustnost systémů Bluetooth a Wi-Fi je ovšem závislá na zpracování dat ve vyšších vrstvách protokolu (síťová, transportní, aplikační vrstva ...), a proto se k popisu fyzické vrstvy příliš nehodí.

Jako vhodný parametr pro měření velikosti rušení na fyzické vrstvě byla zvolena vektorová odchylka EVM (*Error Vector Magnitude*) (viz Obr. 5.1). Na vektorové odchylce EVM je přímo závislá hrubá bitová chybovost (Gross BER, chybovost na fyzické vrstvě bez použití ochranného kódování, prokládání, nebo skramblování), která je s ní svázána pomocí vzorců 5.5 a 5.6 platících pro AWGN kanál.



Obrázek 5.1: Error Vector Magnitude (EVM).

Měření vektorové odchylky bylo vybráno také z důvodu jednoduchého výpočtu a implementace do modelu fyzické vrstvy v prostředí Matlab Simulink a bezproblémového měření na vektorových signálových analyzátoch Rohde & Schwarz.

Hodnota EVM je definována rovnicí 5.1

$$EVM = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M |Z(k) - R(k)|^2}{\sum_{k=1}^M |R(k)|^2}}, \quad (5.1)$$

kde $Z(k)$ je aktuální pozice ve vektorovém diagramu a $R(k)$ je referenční pozice vektoru v ideálním okamžiku vzorkování. V prostředí bez interferencí a rušení odpovídá změřený vektor $Z(k)$ referenčnímu vektoru $R(k)$ a chybový vektor je roven nule. Hodnota EVM má přímý vztah s poměrem signálu ku šumu SNR (43) podle vztahu

$$SNR = \frac{E_S}{N_0} = \frac{E_B}{N_0} \cdot k \approx \frac{1}{EVM^2}, \quad (5.2)$$

kde k je počet bitů na symbol. Pravděpodobnost chyby v závislosti na poměru signálu ku šumu pro modulaci DQPSK nebo $\pi/4$ -DQPSK a kanál AWGN lze vypočítat (50) pomocí vzorce

$$P_b \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \sin \frac{\pi}{4\sqrt{2}} \right), \quad (5.3)$$

kde „erfc“ je definováno jako

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt. \quad (5.4)$$

Pro modulaci DQPSK a $\pi/4$ -DQPSK bez použití přídatného kódování a kódového zisku platí, že $E_S/N_0 = SNR$. Díky tomu je možné z rovnic 5.2 a 5.3 odvodit vztah pro výpočet pravděpodobnosti chyby v závislosti na EVM viz rovnice 5.5.

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{EVM} \sin \frac{\pi}{4\sqrt{2}} \right) \quad (5.5)$$

Obdobným způsobem byla odvozena chybovost pro modulaci 8DPSK jako

$$P_b = \frac{1}{3} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{EVM} \sin \frac{\pi}{8\sqrt{2}} \right). \quad (5.6)$$

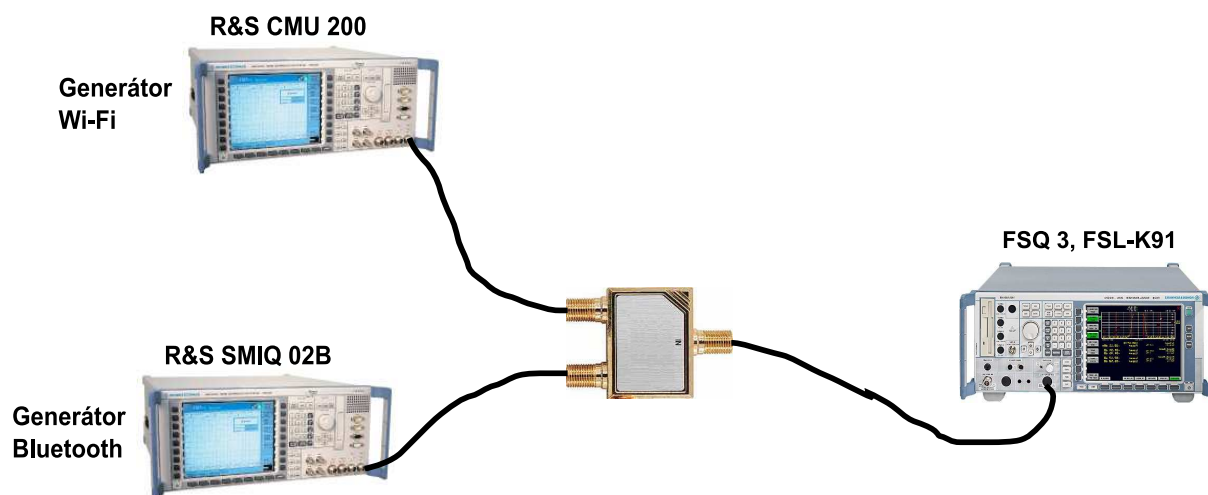
Přepočtové vzorce pro výpočet pravděpodobnosti chyby P_b z normovaného poměru signálu ku šumu E_b/N_0 pro různé druhy modulací lze nalézt v literatuře (50).

5.2 Průběh měření

Měření EVM bylo vybráno jako nejlepší způsob popisu kvality přenosové trasy na fyzické vrstvě. Vektorová odchylka (*EVM*) byla měřena pomocí spektrálního analyzátoru Rohde & Schwarz FSQ3, u OFDM pak byl použit spektrální analyzátor Rohde & Schwarz FSL s nadstavbou FSL-K91, která umožňuje testování sítí IEEE 802.11 a zejména obsahuje podporu pro analýzu OFDM signálů.

Hlavním cílem měření bylo provést ověření vypočtených a simulovaných výsledků z prostředí Matlab Simulink. Ověření výsledků bylo provedeno pro standard IEEE 802.11b (rychlosti 2, 5,5 a 11 Mbit/s) a IEEE 802.11g, který používá OFDM a modulace BPSK, QPSK, 16QAM a 64QAM. U standardu Bluetooth bylo vypočteno a měřeno EVM pro

přenosové rychlosti 2 a 3 Mbit/s, které využívají modulace $\pi/4$ -DQPSK a 8DPSK. Povinný přenosový mód Bluetooth s rychlostí 1 Mbit/s využívá modulaci GFSK, u které jsou jiné parametry pro popis kvality přenosové trasy (např. kmitočtová odchylka FSK_{DEV}), a proto není při měření EVM zmiňován.



Obrázek 5.2: Schéma zapojení pracoviště pro měření EVM.

Signály zkoumaného systému jsou generovány na signálovém generátoru CMU200 firmy Rohde & Schwarz a na přijímací straně analyzovány pomocí signálového analyzátoru FSQ3. Měření vzájemného rušení systémů Wi-Fi a Bluetooth není prováděno bezdrátově, ale pomocí VF kabelů a slučovače (parametry viz příloha na straně 98). Díky tomu je možné měřit přesný vysílaný a přijímaný výkon obou zařízení. Tento způsob měření má výhodu také v odstranění vlivu rušivých signálů ze vzdálených Wi-Fi AP, nebo jiných zdrojů rušení v pásmu ISM 2,4 GHz.

5.3 Přenos dat kanálem AWGN

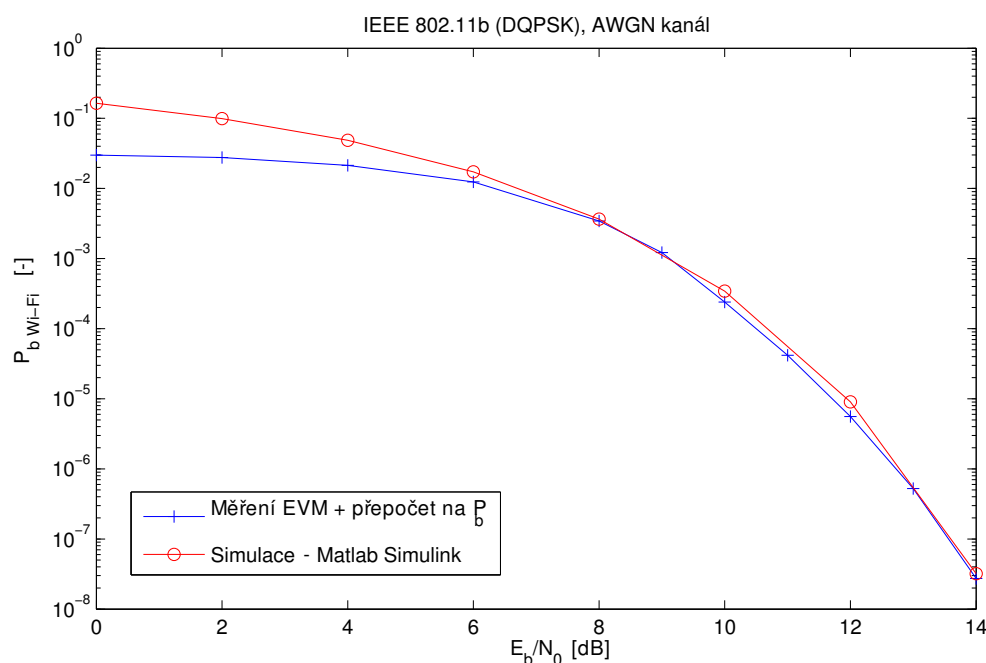
5.3.1 IEEE 802.11b/g

Pro ověření výsledků simulací na AWGN kanálu a kontrole odvozených vztahů pro výpočet chybovosti z EVM na AWGN kanálu byly změřeny průběhy EVM v závislosti na E_b/N_0 . Signál standardu Wi-Fi byl generován signálovým generátorem Rohde & Schwarz CMU200, který umožňuje vysílat signál IEEE 802.11b i IEEE 802.11g. Signálový generátor umožňuje generovat AWGN šum, čehož bylo také využito při měření. Bitová chybovost přenosu, spočítaná z naměřených hodnot EVM je zobrazena na obrázku 5.3 spolu s průběhem chybovosti BER pro fyzickou vrstvu IEEE 802.11b vypočítaným v programu Matlab Simulink. Možná chyba měření EVM způsobená nepřesnostmi vysílače, nedokonalostí přijímače, nebo zkreslením ve VF kabelech je cca 0.3%, což je hodnota EVM při vysílání signálu bez AWGN šumu.

Jak je vidět na obrázku 5.3, pro vysoké hodnoty EVM se průběhy liší, což je způsobeno tím, že spektrální analyzátor nedokázal přesně vyhodnotit hodnoty EVM vyšší než 50% z důvodu neznalosti vyslaných dat.

Měření EVM u systému IEEE 802.11g, využívajícího OFDM je problematické z toho důvodu, že je nutné pracovat s bursty (režim *Framed*), na rozdíl od přímého rozptřování u IEEE 802.11b, kdy bylo EVM odečítáno v režimu *Unframed*. Při měření EVM u IEEE 802.11g musí analyzátor FSL-K91 zachytit přijímané bursty a demodulovat signál. Ukázalo se však, že pro OFDM nejsou demodulační algoritmy FSL-K91 připraveny pro zpracování signálů s malými S/N, a tak je zařízení schopné zachytit bursty do hodnoty maximálně $\text{EVM} = 15\%$. Takto malé hodnoty EVM však odpovídají chybovostem menším než 10^{-10} , které není možné v Simulinku z důvodů časové náročnosti simulací vypočítat. Naměřené hodnoty EVM systému IEEE 802.11g jsou prezentovány dále v textu u měření koexistence.

Závislosti hrubé chybovosti BER (chybovost bez použití kanálového kódování) na E_b/N_0 byly tedy měřeny pouze pro IEEE 802.11b, protože u IEEE 802.11g nebylo možné provést srovnání vypočtených a naměřených hodnot.

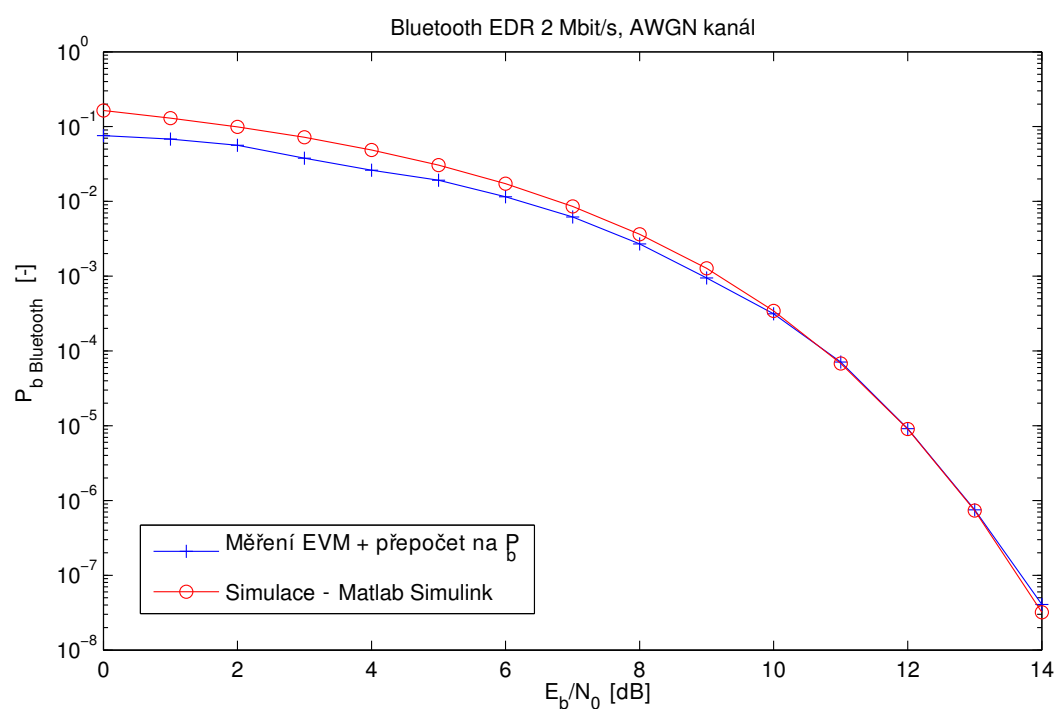


Obrázek 5.3: Porovnání výsledků simulací s naměřenými hodnotami na AWGN kanálu.

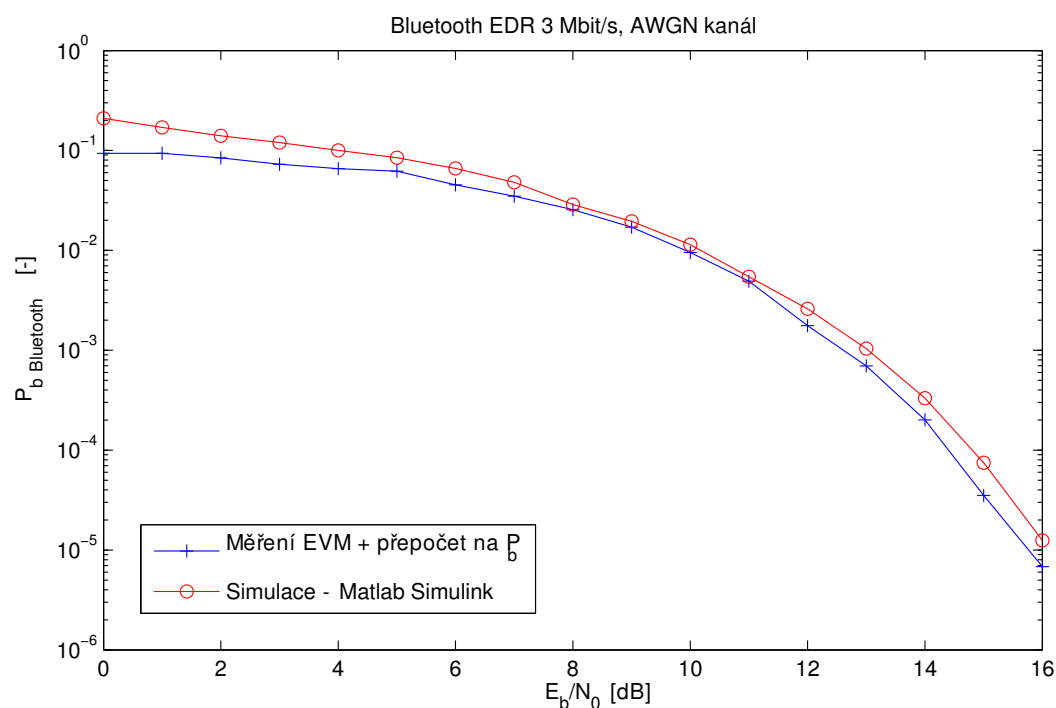
Hrubá chybovost má přímou závislost na vektorové odchylce EVM. Tato závislost je v případě rušení typu AWGN představována vzorcem 5.5, pomocí kterého je možné pravděpodobnost chyby vypočítat.

5.3.2 Bluetooth

U systému Bluetooth bylo provedeno měření pro rozšířený mód EDR pro rychlosti 2 a 3 Mbit/s. Základní mód s rychlostí 1 Mbit/s nebyl měřen, jelikož využívá modulaci GFSK u které je základním parametrem pro popis kvality kanálu kmitočtová odchylka FSK_{DEV} a platí pro ni jiné přepočtové vztahy. Výsledky chybovostí odvozených z EVM porovnané s výsledky chybovostí vypočítané simulací v prostředí Matlab Simulink jsou zobrazeny na Obr. 5.4 a 5.5. Z grafů je vidět, že pro hodnoty chybovostí menší než $\text{BER} = 10^{-3}$ se křivky získané simulacemi a měřením téměř shodují.



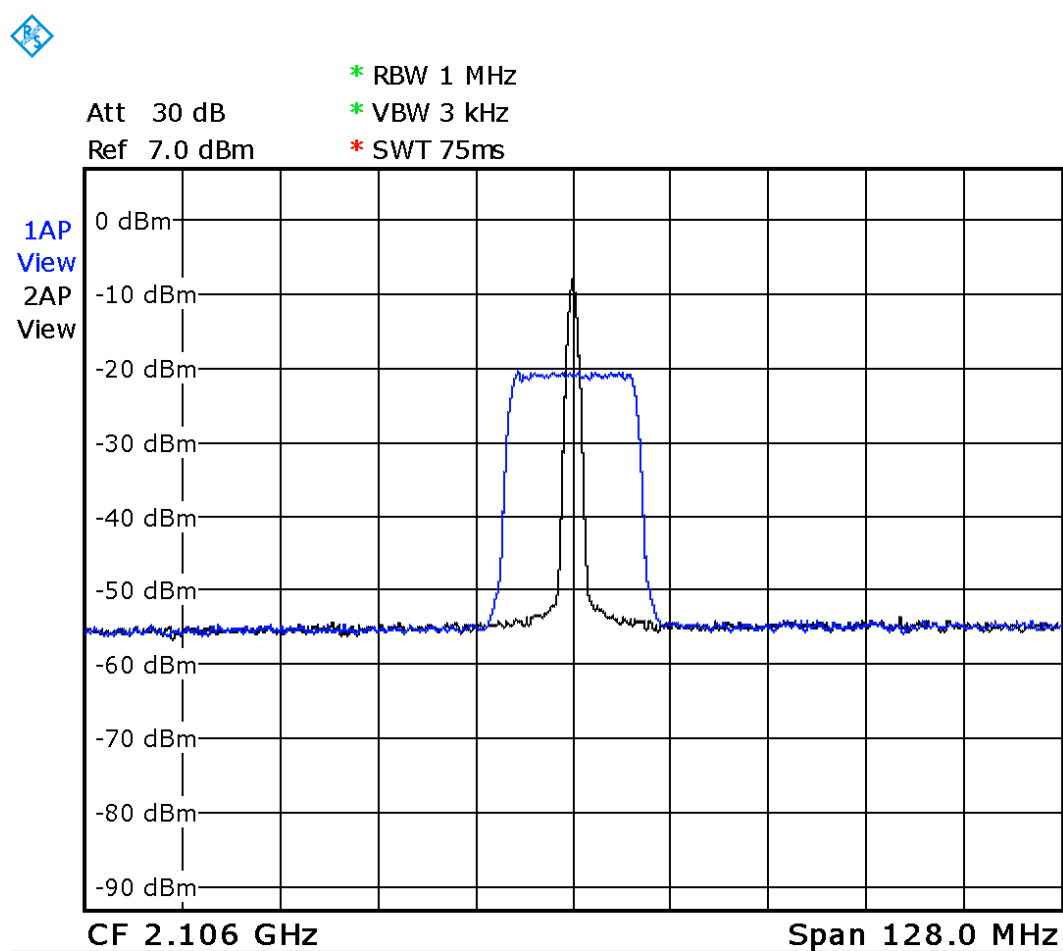
Obrázek 5.4: Porovnání chybovostí vypočítaných z naměřených hodnot EVM s hodnotami ze simulací IEEE 802.11b z programu v prostředí Matlab Simulink - Bluetooth 2 Mbit/s.



Obrázek 5.5: Porovnání chybovostí vypočítaných z naměřených hodnot EVM s hodnotami ze simulací IEEE 802.11b z programu v prostředí Matlab Simulink - Bluetooth 3 Mbit/s.

5.4 Měření koexistence standardů Bluetooth a Wi-Fi

Jelikož se v případě koexistence nejedná o rušení typu AWGN, není možné použít přepočtové vzorce 5.5 a 5.6. Při použití těchto přepočtových vztahů pro simulaci koexistence se výsledky měření a simulací lišily o 3 dB i více. Proto jsou porovnávány přímo závislosti změřených EVM na rozdílu výkonů $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi}$ s vypočtenými hodnotami EVM pomocí programu pro koexistenci. Simulace koexistence byla pro tento úkol upravena tak, že Bluetooth vysílá data bez frekvenčního skákání na stejné nosné jako systém Wi-Fi (viz Obr. 5.6). Toto měření proto není ekvivalentní vzájemné koexistenci reálných systémů, ale slouží zejména pro porovnání simulace s měřením a pro ověření správné funkce simulací koexistence. Takto zjednodušené simulace koexistence byly prováděny pouze u srovnávání s měřením. V kapitole 4 věnující se simulacím koexistence jsou plnohodnotné výsledky chybovostí pro simulace koexistence včetně frekvenčního skákání a kódování na fyzické vrstvě.



Date: 22.JUL.2008 14:47:22

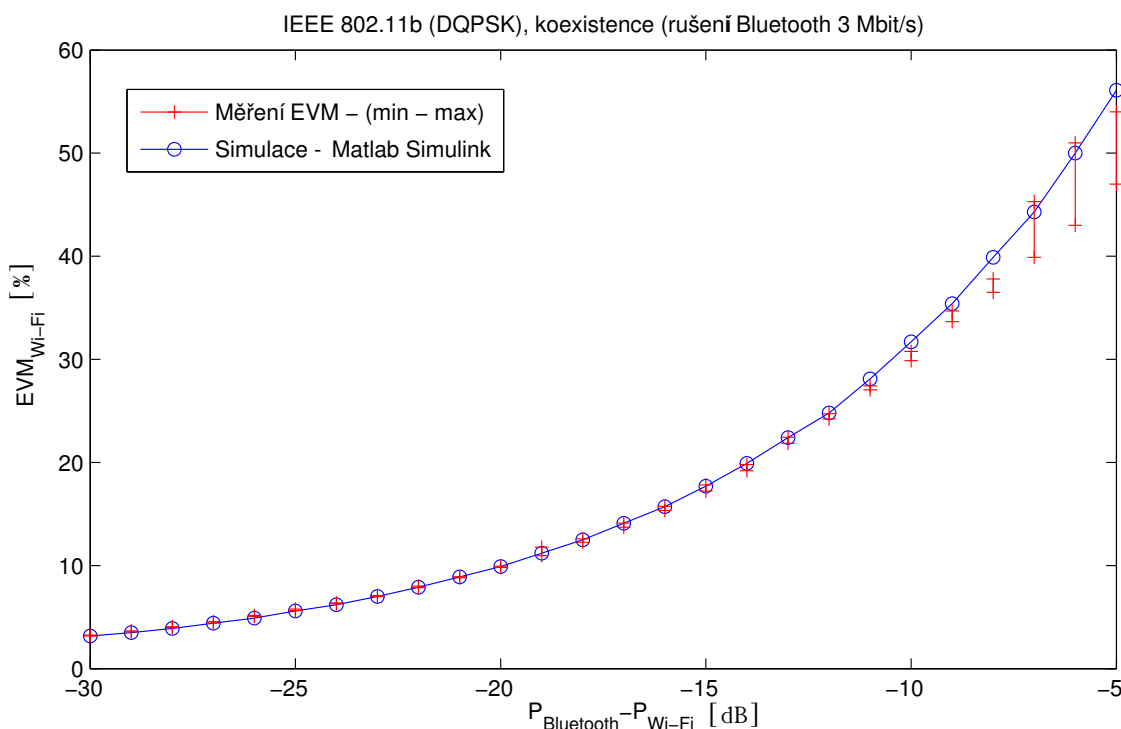
Obrázek 5.6: Měření EVM systému IEEE 802.11g při rušení systémem Bluetooth.

5.4.1 IEEE 802.11b/g při rušení standardem Bluetooth

Vektorová odchylka EVM byla měřena pomocí spektrálního analyzátoru Rohde & Schwarz FSL s rozšířením pro měření WLAN sítě FSL-K91. Toto rozšíření umožňuje měření EVM pro systémy IEEE 802.11a, IEEE 802.11b a IEEE 802.11g. Vektorová odchylka je parametr vycházející z konstelačního diagramu, a proto není závislá na konvolučním kódování a prokládání (viz Obr. 5.8).

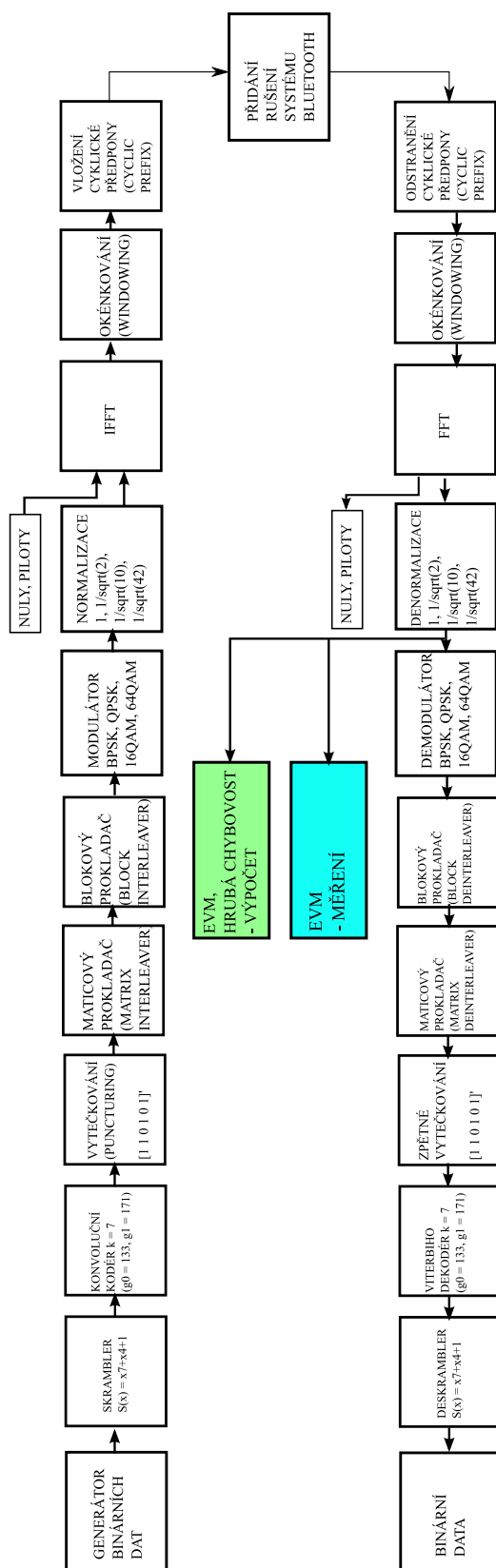
Výsledné naměřené hodnoty EVM pro rychlosti využívající stejnou modulaci a lišící se pouze typem konvolučního kódu a použitím vytečkování jsou stejné. Kvůli možnosti srovnání byly provedeny simulace koexistence s výpočtem EVM a hrubé chybovosti dle obrázku 5.8.

Porovnáním obrázků závislosti EVM na rozdílu výkonů pro IEEE 802.11b (DQPSK) a IEEE 802.11g (QPSK-OFDM) (Obr. 5.7 a 5.10) vidíme, že při použití OFDM má výsledný signál menší EVM, což je způsobeno právě použitím OFDM, které by se v klasickém AWGN kanálu neprojevilo. QPSK a DQPSK signály by jinak měly stejný průběh EVM, protože mají stejné konstelační diagramy. Průběh EVM v závislosti na rozdílu výkonů Bluetooth a Wi-Fi pro standard IEEE 802.11b je zobrazen na Obr. 5.7 a platí pro rychlosti 2, 5,5 a 11 Mbit/s. Závislosti EVM na rozdílu výkonů jsou pro všechny 3 rychlosti IEEE 802.11b stejné, jelikož je vždy použita modulace DQPSK a rychlosti se liší pouze použitým přídavným kódováním (Barkerovo kódování, Komplementární kódování).



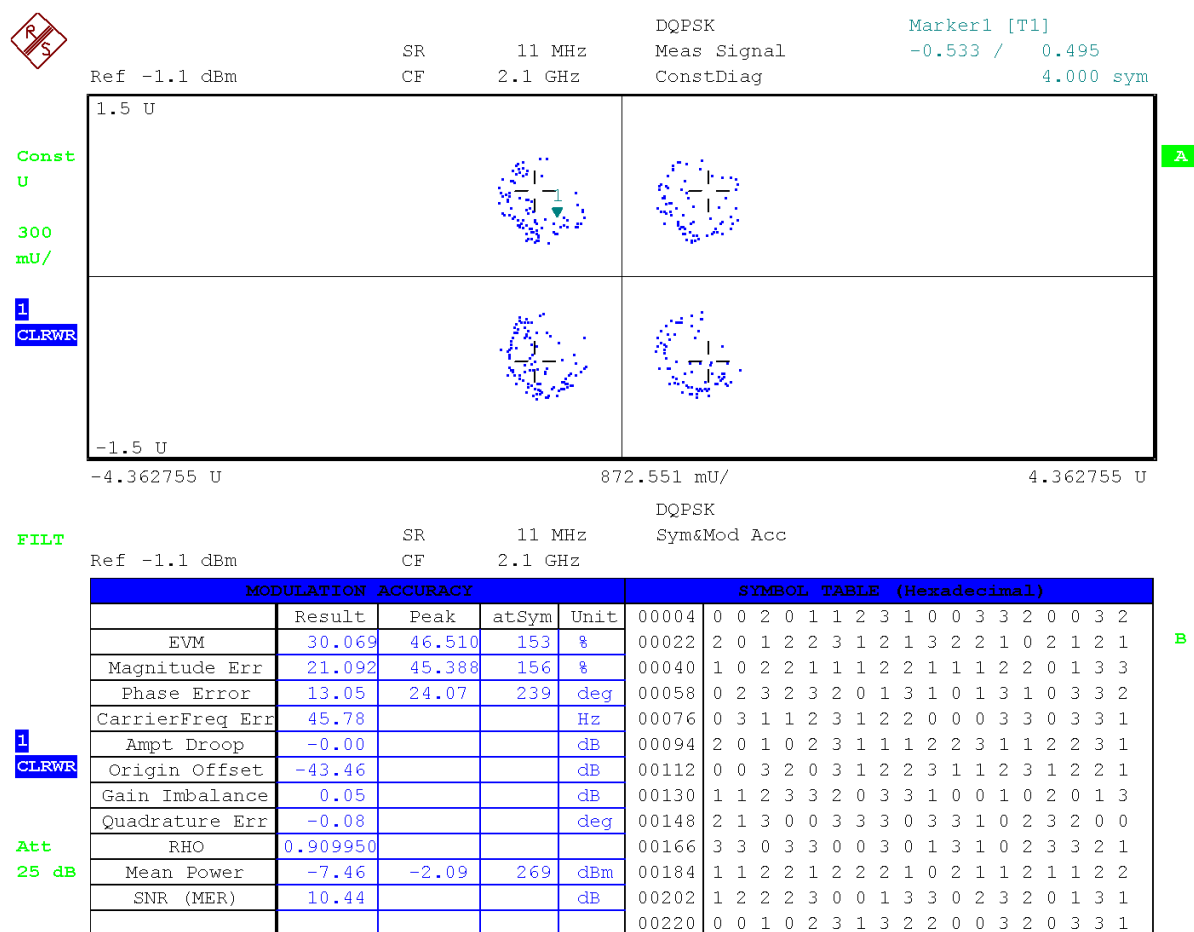
Obrázek 5.7: Simulace a měření EVM pro IEEE 802.11b a rychlosti 2, 5,5 a 11 Mbit/s.

Na obrázcích 5.10, 5.11, 5.12 a 5.13 jsou zobrazeny průběhy EVM systému IEEE 802.11g pro přenosové rychlosti 6 - 54 Mbit/s v závislosti na rozdílu výkonů $P_{\text{Bluetooth}} - P_{\text{Wi-Fi}}$. V jednom obrázku jsou vždy změřené i simulované hodnoty. Bohužel spektrální analyzátor FSL nebyl schopen zachytit bursty při vyšším rušení při použití OFDM, a tak



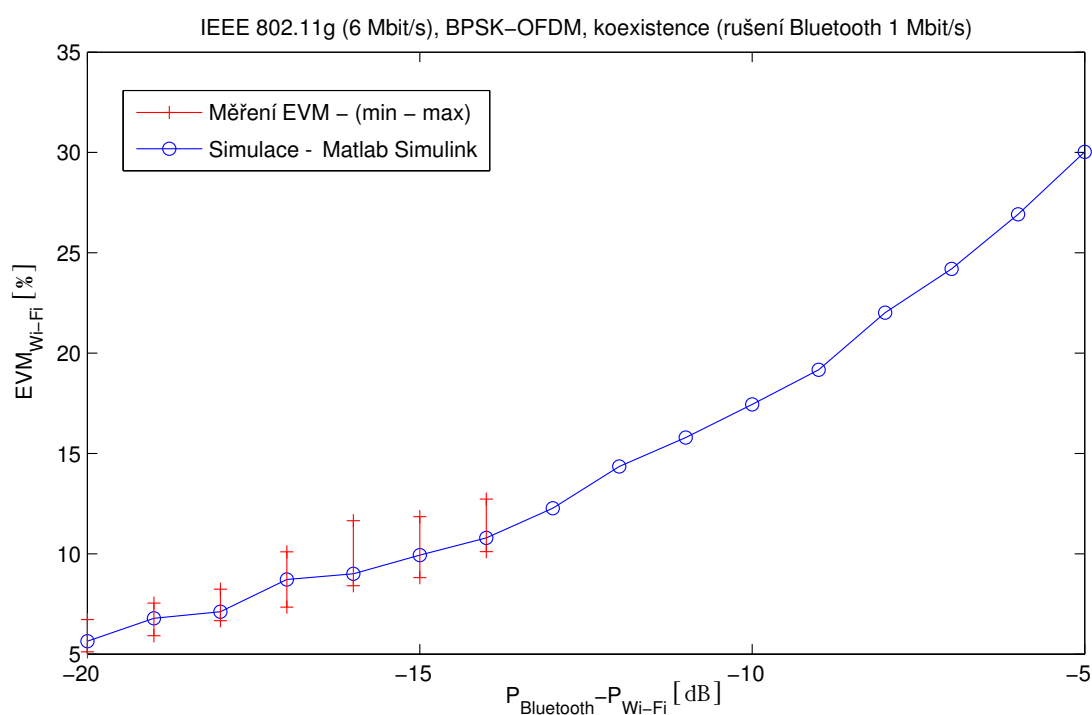
Obrázek 5.8: Blokové schéma výpočtu EVM a hrubé chybovosti u systému IEEE 802.11b/g při rušení standardem Bluetooth.

maximální změřené hodnoty odpovídají cca EVM 15%. Navíc při odečítání EVM nebyla hodnota stabilní, a proto byly hodnoty odečítány vždy v intervalu 1 minuty a byla zaznamenána minimální a maximální hodnota EVM. Ze závislostí EVM na rozdílu výkonů $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi}$ je vidět, že simulované hodnoty leží téměř vždy v intervalu změřeného maxima a minima EVM. Tím byla ověřena správnost simulací a postupů využitých u simulací koexistence v prostředí Matlab Simulink. Spolu s obrázky závislostí EVM na rozdílu výkonů jsou zobrazeny vždy i konstelační diagramy pro konkrétní rozdíl výkonů viz Obr. 5.9, 5.14, 5.15, 5.16 a 5.17.

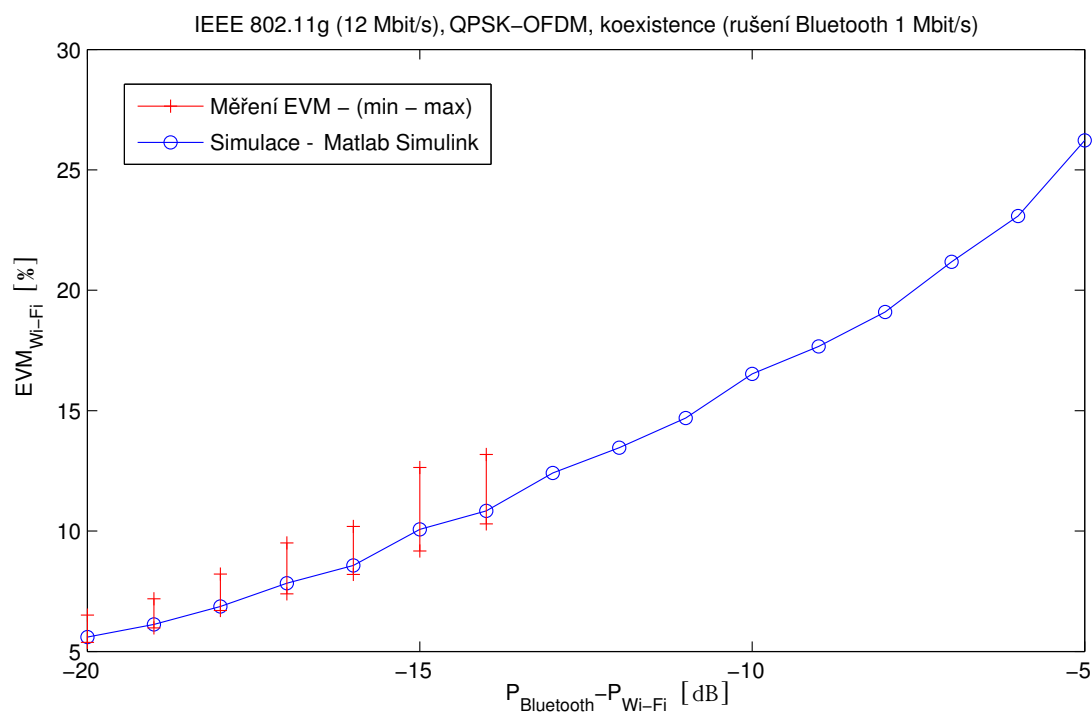


Date: 11.AUG.2008 08:50:20

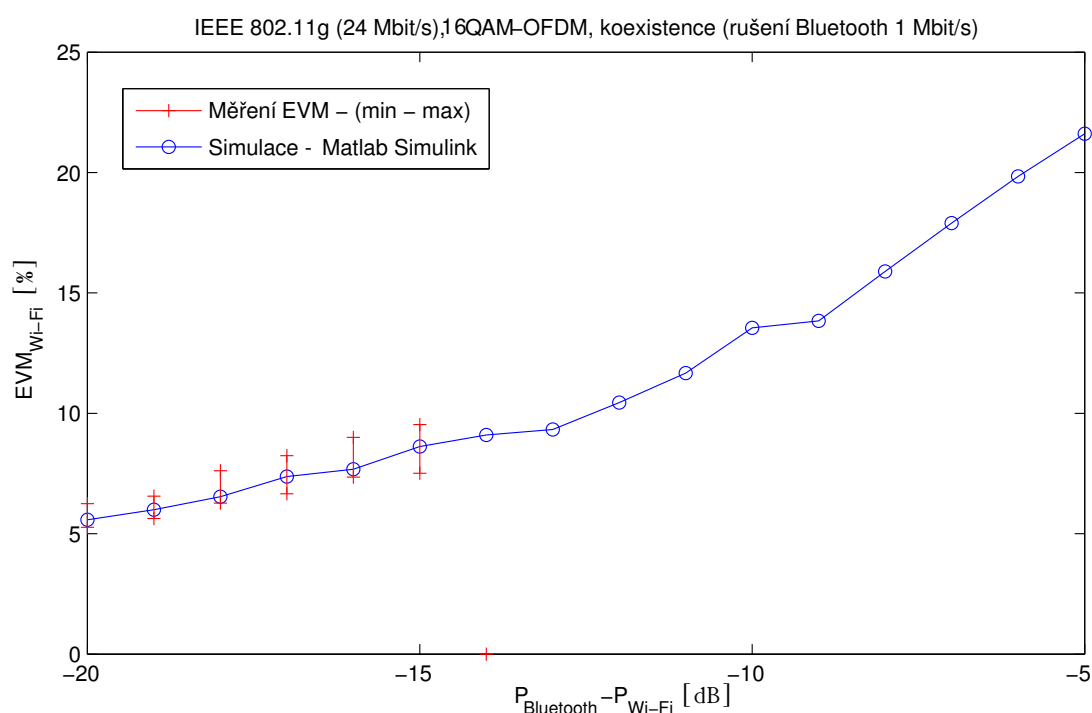
Obrázek 5.9: Měření EVM pro IEEE 802.11b a rychlosti 2, 5,5 a 11 Mbit/s na FSL-K91, $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi} = -10$ dB.



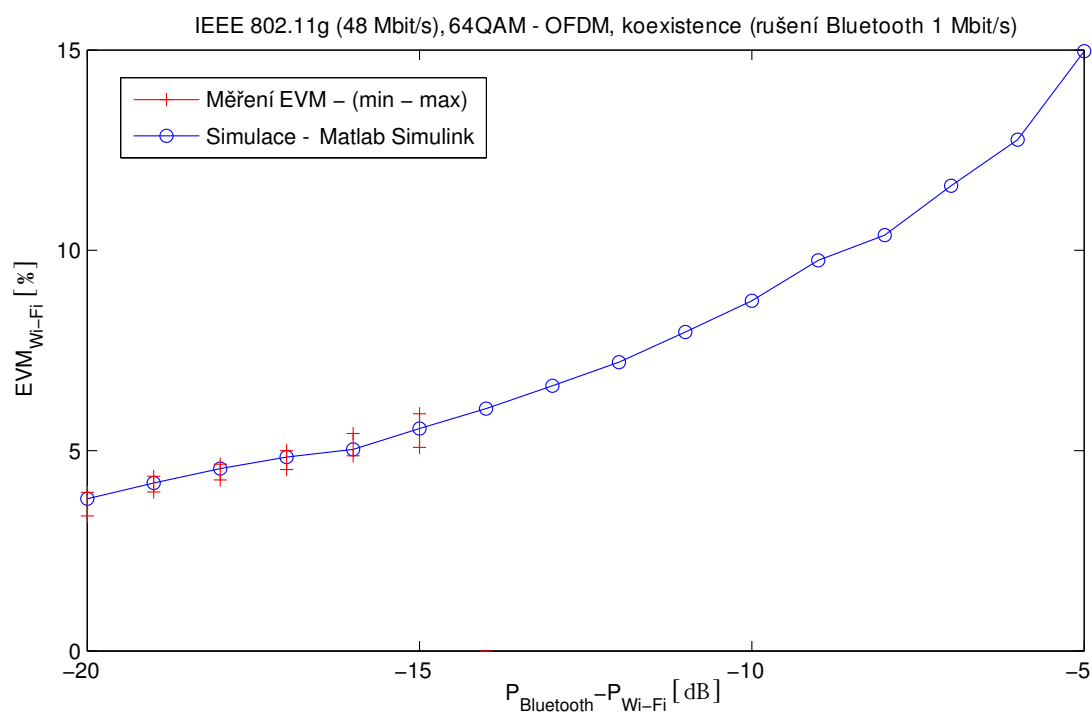
Obrázek 5.10: Simulace a měření EVM pro IEEE 802.11g a přenosovou rychlost 6 a 9 Mbit/s.



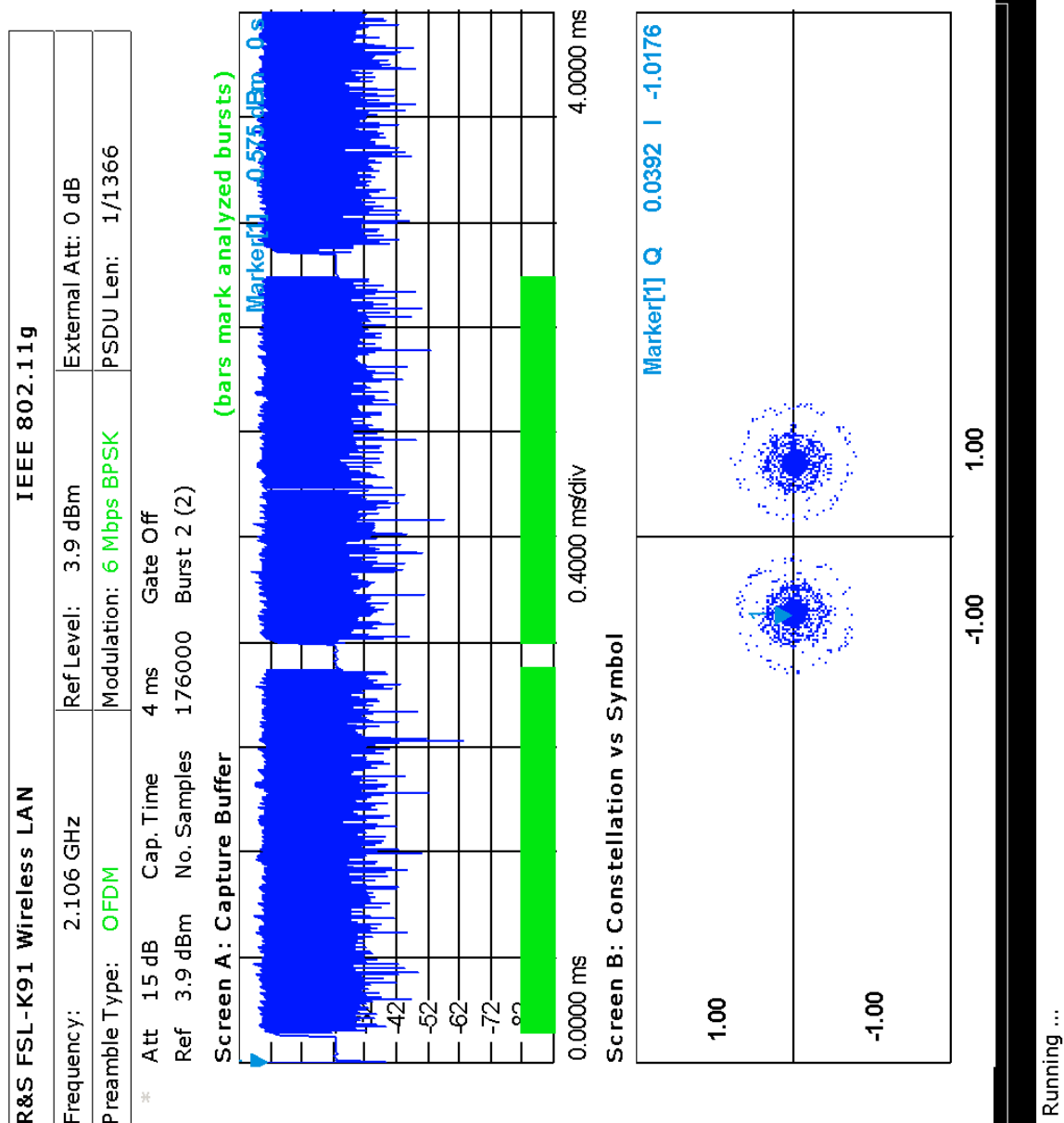
Obrázek 5.11: Simulace a měření EVM pro IEEE 802.11g a přenosovou rychlost 12 a 18 Mbit/s.



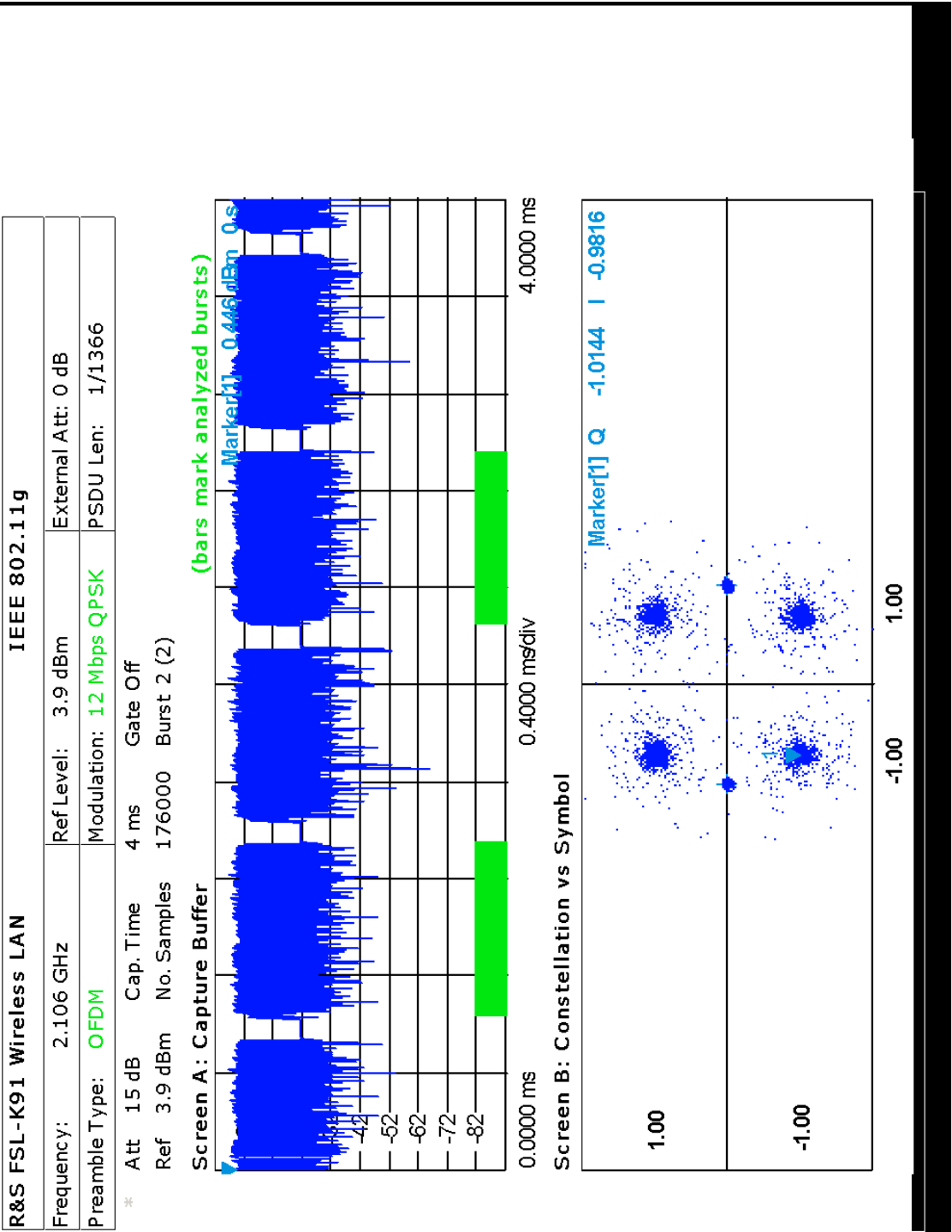
Obrázek 5.12: Simulace a měření EVM pro IEEE 802.11g a přenosovou rychlost 24 a 36 Mbit/s.



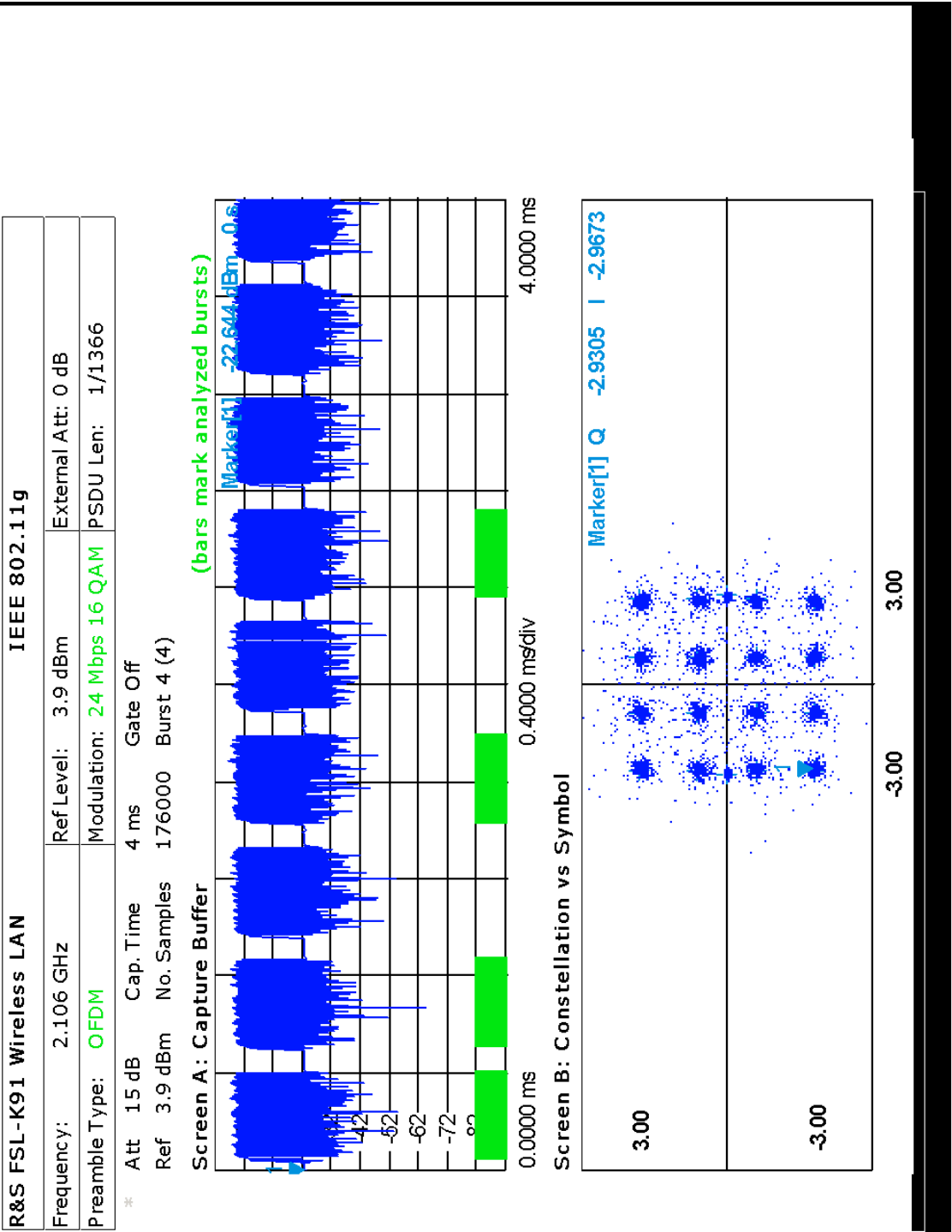
Obrázek 5.13: Simulace a měření EVM pro IEEE 802.11g a přenosovou rychlost 48 a 54 Mbit/s.

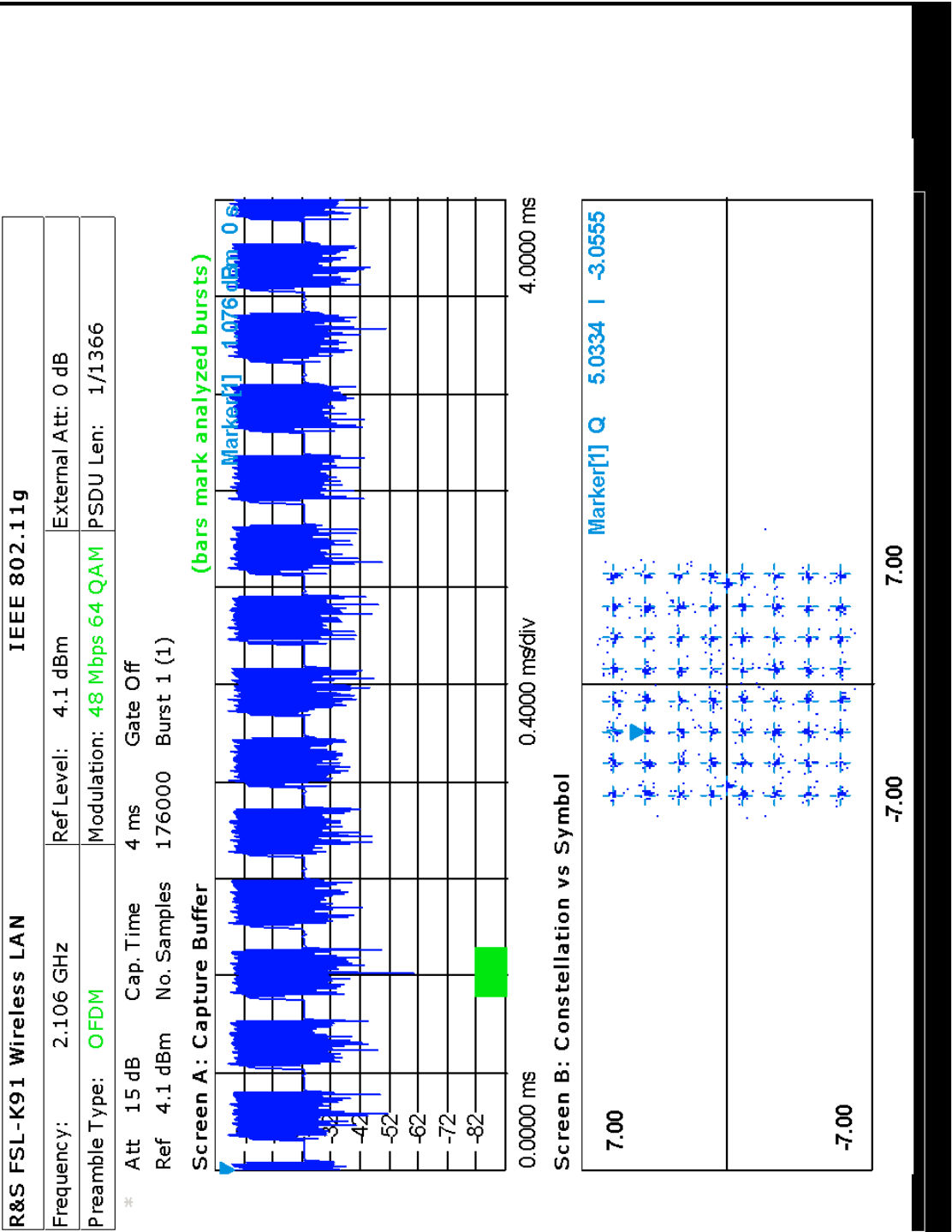


Obrázek 5.14: Měření EVM pro IEEE 802.11g a přenosovou rychlost 6 Mbit/s na FSL-K91, $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi} = -14$ dB.



Obrázek 5.15: Měření EVM pro IEEE 802.11g a přenosovou rychlost 12 Mbit/s na FSL-K91, $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi} = -14$ dB.

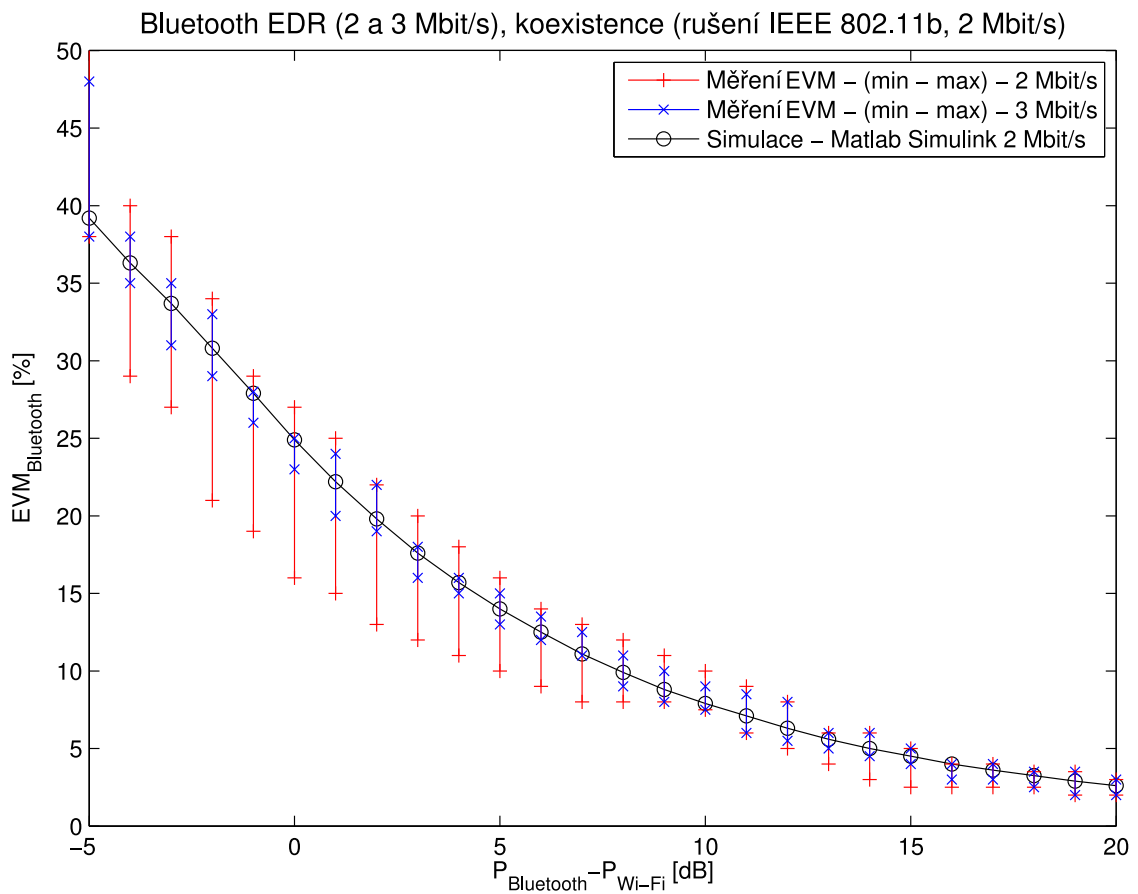




Obrázek 5.17: Měření EVM pro IEEE 802.11g a přenosovou rychlost 48 Mbit/s na FSL-K91, $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi} = -14$ dB.

5.4.2 Bluetooth EDR při rušení standardem IEEE 802.11b/g

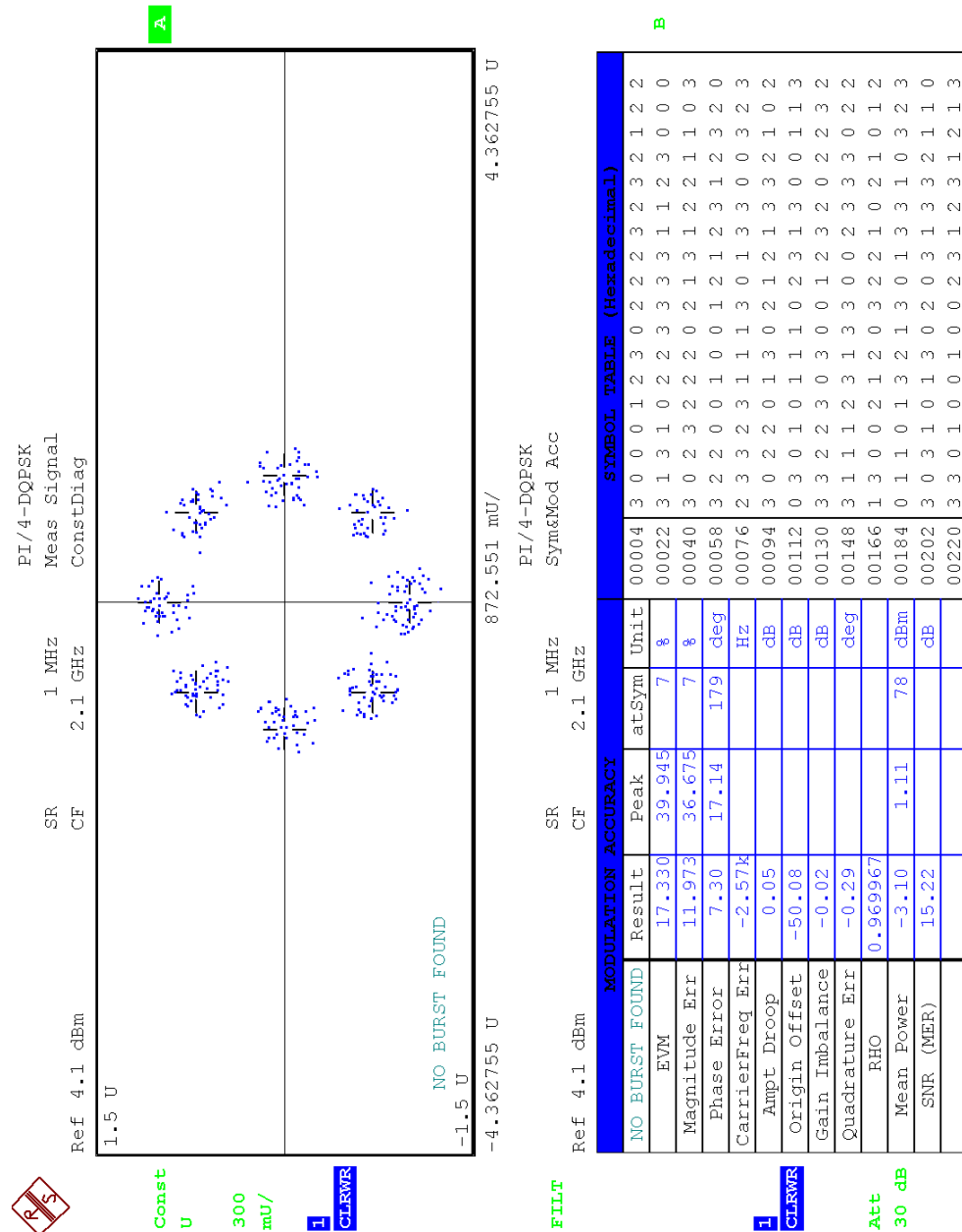
Na obrázku 5.18 je zobrazena závislost EVM pro standard Bluetooth a rychlosti 2 a 3 Mbit/s. Při měření rychlosti 2 Mbit/s ($\pi/4$ -DQPSK) docházelo k „dýchání“ konstelačního diagramu, a proto je velký naměřený rozsah EVM_{MIN} a EVM_{MAX} . Pro rychlost 3 Mbit/s a modulaci 8DPSK k „dýchání“ konstelačního diagramu nedocházelo a hodnoty EVM odpovídaly simulovaným výsledkům. Hodnoty EVM pro $\pi/4$ -DQPSK i 8DPSK modulaci získané simulacemi si odpovídaly, proto je v obrázku vykreslena pouze křivka pro modulaci $\pi/4$ -DQPSK. Hodnoty získané simulacemi v Matlabu leží v intervalu EVM_{MIN} a EVM_{MAX} , čímž byla ověřena správnost výsledků simulací pro přenos pomocí Bluetooth při rušení standardem IEEE 802.11b (2 Mbit/s).



Obrázek 5.18: Simulace a měření EVM pro standard Bluetooth EDR 2 a 3 Mbit/s.

Na obrázku 5.19 je zobrazen konstelační diagram pro modulaci $\pi/4$ -DQPSK z obrazovky vektorového signálového analyzátoru Rohde & Schwarz FSQ3.

Všechna měření závislostí EVM byla prováděna na frekvenci 2,1 GHz místo používaných 2,4 GHz, jelikož signálový generátor Rohde & Schwarz SMIQ 02B umožňuje generování signálu pouze do kmitočtu 2,2 GHz.



Date: 11.AUG.2008 09:02:47

Obrázek 5.19: Měření EVM pro standard Bluetooth EDR 2 Mbit/s na FSL-K91 , $\pi/4$ -DQPSK, $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi} = 4$ dB.

5.5 Závěr

V této kapitole byla provedena měření vektorové odchylky EVM fyzické vrstvy standardů Bluetooth a IEEE 802.11b/g při vzájemném rušení. Zdrojem signálů Bluetooth a Wi-Fi byly vektorové signálové generátory Rohde & Schwarz SMIQ 02B a Rohde & Schwarz CMU 200, které jsou schopny generovat signály obou systémů. Signály byly analyzovány pomocí vektorového signálového analyzátoru Rohde & Schwarz FSQ3 a Rohde & Schwarz FSL s rozšířením FSL-K91. V první části kapitoly bylo provedeno měření EVM při přenosu standardů AWGN kanálem s následným přepočtem EVM na chybovost BER (pravděpodobnost chyby P_b). Takto získané hrubé chybovosti byly porovnány s výsledky získanými upravenými simulacemi v prostředí Matlab Simulink. Výsledné chybovosti získané simulacemi a měřením si odpovídají až na hodnoty chybovostí pro vysoké EVM, které nedokázal analyzátor přesně změřit.

Druhá část měření se týkala koexistence signálů Bluetooth a IEEE 802.11b/g. Vztahy pro převod EVM na BER není možné v tomto případě použít, jelikož vzájemné rušení má jiný charakter než kanál AWGN, pro který jsou přepočtové vztahy určeny. Z toho důvodu byly měřené závislosti EVM na rozdílu výkonů přímo porovnávány se závislostmi EVM získanými simulacemi v prostředí Matlab Simulink. Výsledné hodnoty EVM získané měřením i simulacemi si odpovídají, čímž je ověřena správnost modelu pro simulaci koexistence vytvořeného v prostředí Matlab Simulink.

Metodické pokyny pro minimalizaci vlivu vzájemného rušení

Základním problémem koexistence systémů Bluetooth a Wi-Fi je sdílení stejného frekvenčního pásma. Jelikož systémy používají relativně nízké výkony na krátkou vzdálenost, dochází k vzájemnému rušení výhradně při provozu zařízení v místě o malé rozloze (kancelář, byt). Problémy jsou většinou způsobeny provozem několika zařízení zároveň na jednom pracovním stole, nebo při použití různých bezdrátových periférií jednoho zařízení. Abychom snížili pravděpodobnost vzájemného rušení a vyhnuli se tak problémům s koexistencí, je vhodné dodržovat následující zásady:

- Je potřeba dodržovat limity stanovené ČTÚ pro pásmo 2,4 GHz (maximální vyzařovaný výkon EIRP 100 mW a maximální výkonová spektrální hustota 10 dBm/1 MHz. Více viz všeobecné oprávnění ČTÚ č. VO-R/12/05.2007-6 z května 2007 (přiloženo na CD).
- U systému Wi-Fi je třeba vhodně zvolit výkon přístupového bodu (*Access Point*), eventuálně použít směrovou anténu.
- Výhodná je koupě zařízení s novější verzí specifikace. Týká se zejména Bluetooth s podporou AFH (od verze 1.2), které umožňuje lepší koexistenci zařízení Wi-Fi a Bluetooth.
- Při problémech s koexistencí je výhodné použít prostorového oddělení, je-li to možné (zvětšit vzdálenost mezi zařízeními, oddělení zdí atd.).
- Při provozování Wi-Fi bezdrátového přístupového bodu je výhodnější použití „IEEE 802.11g only“ módu bez zpětné kompatibility s IEEE 802.11b. Použitím módu se zpětnou kompatibilitou se významně sníží propustnost sítě i přesto, že síť žádný IEEE 802.11b klient využívat nebude (36). Čím efektivnější je provoz v síti, tím menší je pravděpodobnost vzájemných kolizí.
- Protože specifikace IEEE 802.11b/g předepisuje ne příliš přísnou spektrální masku a implementace filtrů je ponechána na výrobcích zařízení, je vhodná koupě kvalitnějšího zařízení, které obsahuje kvalitnější filtry a díky tomu má minimální rušení na sousedních kanálech.
- Důležitým parametrem při výběru zařízení by měla být také výkonová třída. Je výhodnější používat Bluetooth zařízení obsahující podporu pro Power Control.
- Některá zařízení IEEE 802.11b/g prodávaná v USA nemusí splňovat limity pro vysílací výkon v EU. V USA je maximální vysílaný výkon omezen na 1W, naproti tomu v EU jsou limity pro vysílání v pásmu ISM 2,4 GHz omezeny hranicí 100mW.

Cílem disertační práce bylo prozkoumání problematiky vzájemného rušení bezdrátových standardů Bluetooth a WLAN v pásmu 2,4 GHz. V první části disertační práce je rozebrána problematika rušení ve sdíleném pásmu ISM 2,4 GHz, včetně popisu algoritmů umožňujících předcházení kolizím, a uvedení do současného stavu řešení dané problematiky.

V dalších dvou kapitolách je proveden teoretický popis standardů, který je nutný k následnému popisu modelů fyzických vrstev Bluetooth a IEEE 802.11b/g v prostředí Mathworks Matlab a Mathworks Matlab Simulink. Součástí popisu vytvořených modelů jsou jednoduché simulace rušení na AWGN kanálu pro všechny datové rychlosti obou systémů. Modely fyzických vrstev pro rušení AWGN byly vytvořeny v programovém prostředí Mathworks Matlab. Jelikož jsou simulace bezdrátových systémů značně výpočtově náročné, bylo využito projektu METACentrum společnosti CESNET, který poskytuje clusterové a gridové počítače pro výpočtově náročné úlohy. Programový kód pro Mathworks Matlab byl upraven takovým způsobem, aby bylo možné úlohu zpracovávat pomocí paralelních výpočtů a výsledky uložené na serveru METACentra byly poté dodatečně zpracovány na lokální stanici. Tento postup, kdy bylo paralelně zpracováváno 10 skriptů zároveň, umožnil cca 10x urychlit simulace v Matlabu.

Následující kapitola se zabývá samotnou koexistencí standardů Bluetooth a IEEE 802.11b/g. Pro zjednodušení tvorby programu bylo použito grafické prostředí Matlab Simulink, které samo o sobě umožňuje rychlejší běh výpočtů, jelikož zpracovává signály všech bloků systému zároveň a není nutné postupné zpracování proměnných jako v programovacím skriptovacím prostředí Matlab. Jelikož projekt METACentrum neumožňuje simulace modelů v prostředí Matlab Simulink, byly veškeré simulace koexistence prováděny na lokálním PC. V kapitole je také porovnáno vzájemné rušení obou systémů v závislosti na použití adaptivního frekvenčního skákání.

Předposlední část disertační práce je zaměřena na ověření použité metody a vypočtených výsledků měření v laboratorních podmínkách. Byla provedena zjednodušená měření koexistence jako závislosti EVM na E_b/N_0 a na rozdílu výkonů $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi}$. Výsledná naměřená spektra, konstelační diagramy i průběhy popsanych závislostí odpovídají téměř přesně hodnotám získaným pomocí simulací v prostředí Matlab Simulink. Tím bylo provedeno ověření použité metody a vytvořeného modelu, který umožňuje provádět různé druhy simulací a měření vektorových odchylek, chybovostí, hrubých chybovostí a v neposlední řadě tento model umožňuje provádění simulací v přítomnosti AWGN a jiných druhů rušení. Stávající model je možné upravit pro simulaci koexistence i složitější sít'ové struktury s více zařízeními Bluetooth i Wi-Fi.

V poslední části práce jsou sepsány základní metodické pokyny, které je nutno dodržovat při vytváření bezdrátových sítí, zejména pokud mají pracovat ve sdíleném frekvenčním pásmu.

Vytvářením modelů a skriptů v prostředí Matlab bylo zjištěno, že ačkoliv je na první pohled jednodušší a výhodnější vytváření simulací komunikačních systémů v skriptovacím

prostředí Mathworks Matlab, grafické prostředí Matlab Simulink umožňuje efektivnější a rychlejší vytváření modelů komunikačních systémů i díky dostupnosti knihoven poskytujících předpřipravené základní bloky komunikačního systému. Ačkoli modely vytvořené v prostředí Matlab Simulink nebylo možné spouštět na vzdáleném výpočtovém centru pomocí paralelních výpočtů, díky efektivnější práci s proměnnými dosahuje kratších simulačních časů než standardní skriptovací prostředí Matlab.

Další práce v této oblasti by mohla být zaměřena na rozšíření modelů fyzických vrstev o vyšší protokolové vrstvy standardů (spojová, síťová, transportní vrstva, ...) a testování vlivů únikových kanálů na vzájemnou koexistenci. Velice zajímavou problematikou jsou také způsoby předcházení kolizím ve sdíleném frekvenčním pásmu jak bylo popsáno v kapitole 1.1.6. Další práce by mohla být zaměřena na testování a vývoj nových algoritmů pro předcházení kolizím s pomocí již vytvořeného modelu pro simulaci koexistence. Z hlediska měření je velice zajímavá problematika testování koexistence v reálných bezdrátových systémech. Zajímavé by bylo také odvození vztahů použitelných pro přepočítání EVM na BER i pro jiné kanály než AWGN a zejména pro vzájemnou koexistenci.

Všechny nové poznatky a simulace byly publikovány na 9 mezinárodních konferencích (11), (24), (8), (25), (26), (27), (31), (28), (29) a v 3 odborných časopisech (12), (32), (30).

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] BLAUNSTEIN, N.; ANDERSEN, J. B.: *Multipath Phenomena in Cellular Networks*. Artech House Publishers; 1st edition (June 15, 2002), 2002, 376 s., ISBN 978-1580531856.
- [2] BOULMALF, M.; SOBH, A.; AKHTAR, S.: Physical Layer Performance of 802.11g WLAN. In *Proceedings of the Applied Telecommunication Symposium 2004*, 2004, s. 175–178, ISBN 1-56555-276-8.
- [3] CHEN, L.; SUN, T.; CHEN, Y.: Improving Bluetooth EDR Data Throughput Using FEC and Interleaving. *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, ročník 4325/2006, Springer Berlin / Heidelberg, 2006, s. 724–735, ISSN 0302-9743.
- [4] COOKLEV, T.: *Wireless Communication Standards*. Standards Information Network/ IEEE Press, 2004, 365 s., ISBN 073814066X.
- [5] DOBEŠ, J.; ŽALUD, V.: *Moderní radiotechnika*. BEN, 2006, 768 s., ISBN 80-7300-132-2.
- [6] DOBKIN, D. M.: *RF Engineering for Wireless Networks*. Newnes, 2004, 48 s., ISBN 0750678739.
- [7] FETCHEL, S. A.: A Novel Approach to Modeling and Efficient Simulation of Frequency-Selective Fading Radio Channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, ročník 11, April 1993: s. 422 – 431.
- [8] GLEISSNER, F.; HANUS, S.; MIKULKA, J.: Optimization of Interference in Mobile Network. *WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS*, ročník 4, č. 2, 2005: s. 180–185, ISSN 1109-2742.
- [9] GOLMIE, N.; DYCK, R. E. V.; SOLTANIAN, A.: Interference Evaluation of Bluetooth and IEEE 802.11b Systems. *Wireless Networks*, ročník 1, č. 9, 2003: s. 201 – 211, ISSN 1572-8196.
- [10] GOLMIE, N.; N., V. D. R.; SOLTANIAN, A.; aj.: Interference Evaluation of Bluetooth and IEEE 802.11b Systems. *Wireless Networks*, ročník 9, č. 3, Springer Netherlands, May 2003: s. 201–211, ISSN 1022-0038.
- [11] HANUS, S.; MIKULKA, J.: Bluetooth and WLAN Systems Coexistence. In *Proceedings of the 27th International Conference Telecommunications and Signal Processing TSP-2004*, Listopad 2004, s. 181–184, ISBN 80-214-2684-5.
- [12] HANUS, S.; MIKULKA, J.: Coexistence of Bluetooth and WLAN Systems. *WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS*, ročník 3, č. 4, 2004: s. 972–975, ISSN 1109-2742.

- [13] HANZO, L.; MÜNSTER, M.; CHOI, B.; aj.: *OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications*. Wiley-IEEE Press, 2003, 1014 s., ISBN 0470858796.
- [14] HARADA, H.; PRASAD, R.: *Simulation and Software Radio for Mobile Communications*. Artech House Publishers, 2006, 448 s., ISBN 1580530443.
- [15] IEEE: *IEEE 802.15.2: Coexistence of Wireless Personal Area Networks with Other Wireless Devices Operating in Unlicensed Frequency Bands*. 2003.
URL <<http://standards.ieee.org/getieee802/802.15.html>>
- [16] IEEE: *IEEE Std 802.11, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. 2007.
URL <standards.ieee.org/getieee802/802.11.html>
- [17] JOHANSSON, P.; KAPOOR, R.; KAZANTZIDIS, M.; aj.: Personal Area Networks: Bluetooth or IEEE 802.11 ? *International Journal of Wireless Information Networks*, ročník 9, č. 2, Springer Netherlands, April 2002: s. 89 – 103, ISSN 1068-9605.
- [18] KELLER, T.; MODELSKI, J.: Experimental Results of Testing Interferences in 2.4 GHz ISM Band. In *Proceedings of the 33rd European Microwave Conference*, ročník 3, 2003, s. 1043 – 1046.
- [19] MANDER, J. S.; READING-PICOPUULOS, D.; TODD, C.: Evaluating the Adaptive Frequency Hopping Mechanism to Enable Bluetooth - WLAN Coexistence. In *Proceedings of the London Communications Symposium (LCS'03)*, London, Sept. 2003.
- [20] The MathWorks: *MATLAB Central, An open exchange for the MATLAB and Simulink community*. 2008.
URL <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange>>
- [21] MIKULKA, J.: Bluetooth and WLAN Systems Coexistence. In *Proceedings of the 11th conference Student EEICT 2005*, ročník 1, Listopad 2005, s. 185–187, ISBN 80-214-28880.
- [22] MIKULKA, J.: Bluetooth and IEEE 802.11b Interference modeling. In *Proceedings of the 12th conference Student EEICT 2006*, ročník 1, 2006, s. 296–300, ISBN 80-214-3163-6.
- [23] Mikulka, J.; HANUS, S.: Bluetooth Performance Evaluation in Presence of Wi-Fi Interference. *Wireless Personal Communications*, (v recenzním řízení od 21. 5. 2008).
- [24] MIKULKA, J.; HANUS, S.: Bluetooth and Wi-Fi Coexistence Simulation. In *Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Information Security, Communications and Computers*, 2005, s. 135–138.
- [25] MIKULKA, J.; HANUS, S.: Bluetooth and Wi-Fi Coexistence Modeling. In *Proceedings of the 16th International Conference RADIOELEKTRONIKA 2006*, ročník 1, 2006, s. 361–364, ISBN 80-227-2388-6.

- [26] MIKULKA, J.; HANUS, S.: Matlab Simulation of 802.11b Performance in AWGN Channel. In *Proceedings of the 15th Electrotechnical and Computer Science Conference ERK'2006*, ročník 1, 2006, s. 123–126, ISSN 1581-4572.
- [27] MIKULKA, J.; HANUS, S.: CCK and Barker Coding implementation in IEEE 802.11b standard. In *Proceedings of the 17th International Conference RADIO-ELEKTRONIKA 2007*, ročník 1, 2007, s. 177–180, ISBN 1-4244-0821-0.
- [28] MIKULKA, J.; HANUS, S.: Complementary Code Keying Implementation in the Wireless Networking. In *Proceedings of the 14th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, IWSSIP 2007 and 6th EURASIP Conference Focused on Speech and Image Processing, Multimedia Communications and Services EC-SIPMCS 2007*, ročník 1, 2007, s. 329–333, ISBN 978-961-248-029-5.
- [29] MIKULKA, J.; HANUS, S.: IEEE 802.11g Baseband Physical Layer Simulation. In *Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on APPLIED ELECTROMAGNETICS, WIRELESS and OPTICAL COMMUNICATIONS (ELECTROSCIENCE '07)*, ročník 1, 2007, s. 361–364.
- [30] MIKULKA, J.; HANUS, S.: Bluetooth and IEEE 802.11b/g Coexistence Simulation. *Radioengineering* 2008, ročník 17, č. 3, 2008, ISSN 1210-2512.
- [31] MIKULKA, J.; HANUS, S.: Bluetooth EDR Physical Layer Modeling. In *Proceedings of the 18th International Conference RADIOELEKTRONIKA 2008*, ročník 1, 2008, s. 97–100, ISBN 978-1-4244-2087-2.
- [32] MIKULKA, J.; HANUS, S.; GLEISSNER, F.: Modeling of Bluetooth and IEEE 802.11b Interference. *WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS*, ročník 4, č. 2, 2005: s. 180–185, ISSN 1109-2742.
- [33] MOLISH, A. F.: *Wireless Communications*. Wiley-IEEE Press, 2005, 668 s., 47084888X.
- [34] MORROW, R.: *Wireless Network Coexistence*. McGraw-Hill Professional, 2004, 350 s., ISBN 0071399151.
- [35] OHRTMAN, F.: *WiMAX Handbook*. McGraw-Hill Professional, 2005, 288 s., ISBN 0071454012.
- [36] PELLEJERO, I.; ANDREU, F.; BARBERO, A.; aj.: Compatibility between IEEE 802.11b and IEEE 802.11g networks: Impact on throughput. In *Proceedings of the 3rd International Working Conference HET-NETs '05*, ročník 1, 2005, s. 1–9, ISBN 80-227-2388-6.
- [37] PROAKIS, J. G.: *Digital Communications*. McGraw Hill Higher Education; 4New Ed edition, 2000, 1024 s., ISBN 978-0071181839.
- [38] PROAKIS, J. G.; SALEHI, M.; BAUCH, G.: *Contemporary Communication Systems Using MATLAB and Simulink*. CENGAGE-Engineering, 2003, 496 s., ISBN 978-0534406172.

- [39] PUNNOOSE, R. J.; TSENG, R. S.; STANCIL, D. D.: Experimental Results for Interference between Bluetooth and IEEE 802.11b DSSS Systems. In *Proceedings of the Vehicular Technology Conference*, ročník 1, 2001, s. 67–71.
- [40] PÄTZOLD, M.: *Mobile Fading Channels*. Wiley; 1st edition (February 27, 2002), 2002, ISBN ISBN 978-0471495499, 529 s.
- [41] QUINNELL, R. A.: Wi-Fi and Bluetooth Fight for Bandwidth. *Electronics Design, Strategy, News (EDN)*, 2005: s. 73 – 78.
URL <<http://www.edn.com>>
- [42] SCHIFF, M.: *Introduction to Communication Systems Simulation*. Artech House Publishers; Har/Cdr edition (January 31, 2006), 2006, 238 s., ISBN 978-1596930025.
- [43] SHAFIK, R. A.; RAHMAN, S.; ISLAM, R.: On the Extended Relationships Among EVM, BER and SNR as Performance Metrics. In *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical and Computer Engineering*, December 2006, s. 408 – 411.
- [44] SHOEMAKE, M. B.: *Wi-Fi (IEEE 802.11b) and Bluetooth, Coexistence Issues and Solutions for the 2.4 GHz ISM Band*. 2001.
URL <<http://focus.ti.com/pdfs/vf/bband/coexistence.pdf>>
- [45] SIG, B.: *Specification of the Bluetooth system, version: 2.1 + EDR*. 2007.
URL <www.bluetoothsig.org>
- [46] SKLAR, B.: Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems. *IEEE Communications Magazine*, ročník 35, č. 7, July 1997: s. 102–109.
- [47] SLAVÍK, J.: *Vysokorychlostní přístup ke službám elektronických komunikací*. 2006.
URL <www.testcom.cz/pdf/vyzkum/Navrh_postupu.pdf>
- [48] STAVROULAKIS, P.: *Interference Analysis and Reduction for Wireless Systems*. Artech House Publishers, 2003, 432 s., ISBN 1580533167.
- [49] TRANTER, W. H.; SHANMUGAN, K. S.; RAPPAPORT, T. S.; aj.: *Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications*. Prentice Hall PTR (January 9, 2004), 2004, 800 s., ISBN 978-0134947907.
- [50] XIONG, F.: *Digital Modulation Techniques*. Artech House, London, 2000, 1046 s., ISBN 0-89006-970-0.
- [51] ZANDL, P.: *Bezdrátové sítě Wi-Fi*. Computer Press, a.s., 2003, 190 s., ISBN 807226632.
- [52] ZIEMER, R. E.; TRANTER, W. H.: *Principles of Communication: Systems, Modulation and Noise*. Wiley; 5 edition (July 27, 2001), 2001, 648 s., ISBN 978-0471392538.

Použité zkratky

ACK *Acknowledgement*

ACL *Asynchronous Connectionless*

AFC *Automatic Frequency Control*

AFH *Adaptive Frequency Hopping*

AIM *Adaptive Interference Management*

AP *Access Point*

APSS *Adaptive Packet Selection and Scheduling*

ARQ *Automatic Repeat Request*

AWGN *Additive White Gaussian Noise*

AWMA *Alternating Wireless Media Access*

BER *Bit Error Rate*

BPSK *Binary Phase Shift Keying*

BR *Basic Rate*

BSS *Basic Service Set*

CCA *Clear Channel Assessment*

CCK *Complementary Code Keying*

CDMA *Code Division Multiple Access*

CRC *Cyclic Redundancy Check*

ČTÚ *Český telekomunikační úřad*

DBPSK *Differential Binary Phase Shift Keying*

DQPSK *Differential Quadrature Phase Shift Keying*

DSSS *Direct Sequence Spread Spectrum*

DVB-H *Digital Video Broadcasting-Handheld*

DVB-T *Digital Video Broadcasting-Terrestrial*

EDR	<i>Enhanced Data Rate</i>
EIRP	<i>Equivalent Isotropically Radiated Power</i>
ERP	<i>Extended Rate PLCP Sublayer</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i>
FCS	<i>Frame Check Sequence</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FH	<i>Frequency Hopping</i>
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HCI	<i>Host Controller Interface</i>
HEC	<i>Header Error Check</i>
HPA	<i>High Power Amplifier</i>
HR/DSSS	<i>High Rate - Direct Sequence Spread Spectrum</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IR	<i>Infra Red Transmission</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LAP	<i>Lower Address Part</i>
LFSR	<i>Linear Feedback Shift Register</i>
LMP	<i>Link Manager Protocol</i>
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i>
LSB	<i>Least Significant Bit</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>

MPDU	<i>MAC Protocol Data Unit</i>
MSB	<i>Most Significant Bit</i>
NAK	<i>Negative Acknowledgement</i>
NAP	<i>Non-significant Address Part</i>
NFC	<i>Near Field Communication</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplex</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PBCC	<i>Packet Binary Convolutional Coding</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PLCP	<i>Physical Layer Convergence Protocol</i>
PMD	<i>Physical Medium Dependent</i>
PPDU	<i>PLCP Protocol Data Unit</i>
PSDU	<i>PHY Service Data Unit</i>
PTA	<i>Packet Traffic Arbitration</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
SCO	<i>Synchronous Connection-Oriented</i>
SFD	<i>Start Frame Delimiter</i>
SIG	<i>Special Interest Group</i>
SS	<i>Spread Spectrum</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
UAP	<i>Upper Address Part</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UWB	<i>Ultra Wide Band</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>

Seznam obrázků

2.1	Rozdělení kanálů IEEE 802.11b.	9
2.2	Rozdělení fyzické vrstvy IEEE 802.11.	11
2.3	Formát PLCP rámce pro systém DSSS.	12
2.4	Skrambler (A) a Deskrambler (B) používaný na fyzické vrstvě IEEE 802.11.	12
2.5	Spektrální maska pro systém DSSS (16).	13
2.6	Formát PLCP rámce pro systém HR/DSSS - dlouhý.	14
2.7	Formát PLCP rámce pro systém HR/DSSS - krátký.	15
2.8	Formát PLCP rámce pro systém ERP-OFDM.	17
2.9	Formát PPDU rámce pro mód DSSS-OFDM, pro krátkou i dlouhou verzi.	18
2.10	Formát PSDU rámce pro DSSS-OFDM mód.	18
2.11	Vstupy a výstupy bloku IFFT.	20
2.12	Konvoluční kódy 2/3 a 3/4 - vytečkování.	21
2.13	Blokový diagram vysílače a přijímače OFDM PHY.	21
2.14	Blokové schéma simulace Barkerova kódování.	22
2.15	Generování CCK čipů u standardu IEEE 802.11b (11 Mbit/s).	22
2.16	Porovnání přenosových rychlostí IEEE 802.11b.	23
2.17	Blokové schéma fyzické vrstvy standardu IEEE 802.11g v prostředí Matlab Simulink.	25
2.18	Okénkování.	26
2.19	Normalizace konstelačních diagramů.	26
2.20	Porovnání přenosových rychlostí IEEE 802.11g.	28
3.1	Topologie Bluetooth sítě.	30
3.2	Vrstvový model systému Bluetooth.	32
3.3	Blokové schéma zjednodušeného Bluetooth vysílače.	33
3.4	Spektrální maska systému Bluetooth.	34
3.5	Výměna informace mezi řídicí a podřízenou jednotkou.	36
3.6	Délky timeslotů v systému Bluetooth.	36
3.7	Struktura adresy Bluetooth jednotky.	36
3.8	Blokové schéma Bluetooth paketu pro BR mód.	37
3.9	Blokové schéma Bluetooth paketu pro EDR mód.	37
3.10	Formát Bluetooth hlavičky.	37
3.11	Synchronizační sekvence.	38
3.12	Skrambler (A) a Deskrambler (B) používaný na fyzické vrstvě Bluetooth.	39
3.13	Dopředný ochranný kód - FEC 2/3.	40
3.14	Bluetooth 1.1 - bez AFH.	41
3.15	Bluetooth 1.2 - použití AFH.	41
3.16	Blokové schéma simulace fyzické vrstvy Bluetooth pro 1 až 3 Mbit/s.	43
3.17	Simulace fyzické vrstvy Bluetooth 1 Mbit/s pro různé druhy FEC ochrany.	44
3.18	Blokové schéma simulace pro rozšířený mód EDR - 1, 2, 3 Mbit/s (bez FEC).	45

3.19	Porovnání přenosových rychlostí 1, 2, 3 Mbit/s (bez FEC).	46
4.1	Vzorkování signálů Bluetooth a Wi-Fi.	47
4.2	Blokové schéma simulace koexistence Bluetooth a IEEE 802.11b.	48
4.3	Simulace přenosu dat standardu IEEE 802.11b při rušení systémem Bluetooth (1 Mbit/s a 3 Mbit/s).	49
4.4	Porovnání spekter Bluetooth 1 Mbit/s a Bluetooth EDR 3 Mbit/s a - měřené spektrum - spektrální analyzátor b - spektrum - simulace v Matlabu.	50
4.5	Simulace přenosu dat systémem Bluetooth při rušení standardem IEEE 802.11b (11 Mbit/s).	51
4.6	Simulace přenosu dat systémem Bluetooth s rychlostí 1 Mbit/s při rušení různými rychlostmi standardu IEEE 802.11b.	52
4.7	Koexistence systémů Bluetooth 1 Mbit/s a Wi-Fi 11 Mbit/s (CCK64 kódování) - spektrální výkonová hustota: $P_{Bluetooth} = -10$ dBm; $P_{Wi-Fi} = 0$ dBm a - měřené spektrum - spektrální analyzátor b - spektrum - simulace v Matlabu.	53
4.8	Přenos dat systémem IEEE 802.11g při rušení signálem Bluetooth 1 Mbit/s.	54
4.9	Zjednodušené blokové schéma koexistence systémů IEEE 802.11g a Bluetooth v prostředí Matlab Simulink.	55
4.10	Přenos dat systémem Bluetooth 1 Mbit/s při rušení IEEE 802.11g.	56
4.11	Přenos dat systémem Bluetooth při rušení standardem IEEE 802.11g (54 Mbit/s).	57
4.12	Porovnání spekter IEEE 802.11b (11 Mbit/s) a IEEE 802.11g (54 Mbit/s) a - měřené spektrum - spektrální analyzátor b - spektrum - simulace v Matlabu.	58
4.13	Koexistence systémů IEEE 802.11g a Bluetooth (1 Mbit/s) - bez kolize, $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi} = 0$ dB.	59
4.14	Koexistence systémů IEEE 802.11g a Bluetooth (1 Mbit/s) - kolizní stav, $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi} = 0$ dB.	59
4.15	Koexistence systémů Bluetooth 1 Mbit/s a Wi-Fi 54 Mbit/s - spektrální výkonová hustota: $P_{Bluetooth} = -10$ dBm; $P_{Wi-Fi} = 0$ dBm a - měřené spektrum - spektrální analyzátor b - spektrum - simulace v Matlabu.	60
4.16	Koexistence systémů Bluetooth 3 Mbit/s a Wi-Fi 54 Mbit/s - spektrální výkonová hustota: $P_{Bluetooth} = -10$ dBm; $P_{Wi-Fi} = 0$ dBm a - měřené spektrum - spektrální analyzátor b - spektrum - simulace v Matlabu.	61
4.17	Simulace přes celé frekvenční pásmo.	62
4.18	Zkrácená simulace.	62
4.19	Porovnání výsledků plnohodnotné a zkrácené simulace pro IEEE 802.11g - 24 Mbit/s při rušení systémem Bluetooth.	62
4.20	Porovnání efektivity použití konvolučního kódování a prokládání při simulacích koexistence IEEE 802.11g - 6 Mbit/s.	63

4.21	Porovnání efektivnosti použití AFH při simulaci přenosu signálu IEEE 802.11g - 24 Mbit/s a rušení systémem Bluetooth 1 Mbit/s.	64
5.1	Error Vector Magnitude (EVM).	66
5.2	Schéma zapojení pracoviště pro měření EVM.	68
5.3	Porovnání výsledků simulací s naměřenými hodnotami na AWGN kanálu.	69
5.4	Porovnání chybovostí vypočítaných z naměřených hodnot EVM s hodnotami ze simulací IEEE 802.11b z programu v prostředí Matlab Simulink - Bluetooth 2 Mbit/s.	70
5.5	Porovnání chybovostí vypočítaných z naměřených hodnot EVM s hodnotami ze simulací IEEE 802.11b z programu v prostředí Matlab Simulink - Bluetooth 3 Mbit/s.	70
5.6	Měření EVM systému IEEE 802.11g při rušení systémem Bluetooth.	71
5.7	Simulace a měření EVM pro IEEE 802.11b a rychlosti 2, 5,5 a 11 Mbit/s.	72
5.8	Blokové schéma výpočtu EVM a hrubé chybovosti u systému IEEE 802.11b/g při rušení standardem Bluetooth.	73
5.9	Měření EVM pro IEEE 802.11b a rychlosti 2, 5,5 a 11 Mbit/s na FSL-K91, $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi} = -10$ dB.	74
5.10	Simulace a měření EVM pro IEEE 802.11g a přenosovou rychlost 6 a 9 Mbit/s.	75
5.11	Simulace a měření EVM pro IEEE 802.11g a přenosovou rychlost 12 a 18 Mbit/s.	75
5.12	Simulace a měření EVM pro IEEE 802.11g a přenosovou rychlost 24 a 36 Mbit/s.	76
5.13	Simulace a měření EVM pro IEEE 802.11g a přenosovou rychlost 48 a 54 Mbit/s.	76
5.14	Měření EVM pro IEEE 802.11g a přenosovou rychlost 6 Mbit/s na FSL-K91, $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi} = -14$ dB.	77
5.15	Měření EVM pro IEEE 802.11g a přenosovou rychlost 12 Mbit/s na FSL-K91, $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi} = -14$ dB.	78
5.16	Měření EVM pro IEEE 802.11g a přenosovou rychlost 24 Mbit/s na FSL-K91, $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi} = -14$ dB.	79
5.17	Měření EVM pro IEEE 802.11g a přenosovou rychlost 48 Mbit/s na FSL-K91, $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi} = -14$ dB.	80
5.18	Simulace a měření EVM pro standard Bluetooth EDR 2 a 3 Mbit/s.	81
5.19	Měření EVM pro standard Bluetooth EDR 2 Mbit/s na FSL-K91, $\pi/4$ -DQPSK, $P_{Bluetooth} - P_{Wi-Fi} = 4$ dB.	82

Seznam tabulek

2.1	Nosné frekvence 802.11b (kanály 1 - 13).	9
2.2	Použitelnost IEEE 802.11 v pásmu ISM je jednotlivých zemích.	9
2.3	Přehled nejdůležitějších standardů pro WLAN podle IEEE.	10
2.4	1 Mbit/s - DBPSK.	13
2.5	2 Mbit/s - DQPSK.	13
2.6	IEEE 802.11b - specifikace přenosových rychlostí DSSS.	14
2.7	IEEE 802.11g - specifikace přenosových rychlostí OFDM.	19
2.8	Parametry IEEE 802.11g - OFDM.	19
2.9	Závislost normalizačního parametru na typu modulace.	20
3.1	Přehled nejdůležitějších verzí standardu Bluetooth.	31
3.2	Výkonové třídy standardu Bluetooth.	33
3.3	$\frac{\pi}{4}$ -DQPSK mapování.	35
3.4	8DPSK mapování.	35
3.5	Přehled typů paketů standardu Bluetooth.	42
4.1	Základní modulační parametry různých přenosových rychlostí systém Bluetooth.	48
4.2	Porovnání základních modulačních parametrů systému IEEE 802.11b a IEEE 802.11g.	57

Příloha: Přenosové charakteristiky použitého slučovače pro pásmo 2,4 GHz

