



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

TECHNOLOGIE MIMO VE STANDARDU IEEE 802.11AC

MIMO TECHNOLOGY IN IEEE 802.11AC STANDARD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jaroslav Kvasnička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Miloš, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor Elektronika a sdělovací technika
Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Jaroslav Kvasnička
Ročník: 2

ID: 146047
Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Technologie MIMO ve standardu IEEE 802.11ac

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte vlastnosti fyzické vrstvy standardu IEEE 802.11ac. Zaměřte se obzvláště na použití technologie MIMO. Vytvořte modely MIMO využívané v uvedeném standardu.

Modely implementujte do frameworku WIFI simulátoru poskytnutého vedoucím práce. Ověřte funkčnost modelů i pro únikové přenosové kanály. Implementujte základní metodu odhadu charakteristiky přenosového kanálu pomocí pilotních subnosných. Proveďte simulace a vyhodnoťte výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] IEEE COMPUTER SOCIETY. IEEE Std 802.11ac-2013 Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer Specifications [online]. IEEE Standards Association, 2013 [cit. 2016-05-20]. ISBN: 978-073-8188-607. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11ac-2013.pdf>.

[2] MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. Editor Yong Soo Cho. Singapore: Wiley, 2010, 439 s. ISBN: 978-0-470-82561-7.

Termín zadání: 6. 2. 2017

Termín odevzdání: 16.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Jiří Miloš, Ph.D.
Konzultant:


prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI, díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Předmětem této práce je seznámit se standardem IEEE 802.11ac, věnovat se problematice fyzické vrstvy tohoto standardu, podrobně prostudovat použití technologie MIMO a implementovat ji do frameworku WIFI simulátoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

IEEE 802.11ac, MIMO, Fyzická vrstva, Simulace, Matlab

ABSTRACT

The object of this work is to study the IEEE 802.11ac standard, paying attention to the issue of the physical layer standard, to study in detail the use of MIMO and implement this technology into framework of WIFI simulator.

KEYWORDS

IEEE 802.11ac, MIMO, Physical Layer, Simulation, Matlab

KVASNIČKA, J. *Technologie MIMO ve standardu IEEE 802.11ac*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 52 s., bez příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Miloš, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Technologie MIMO ve standardu IEEE 802.11ac jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Jiřímu Milošovi, Ph.D. za odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Obsah	vii
Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xi
Úvod	1
1 IEEE 802.11	2
1.1 Rodina standardů IEEE 802.11	2
1.2 Verze standardů z rodiny IEEE 802.11	2
1.3 Požadavky na standard IEEE 802.11ac	4
1.4 Vrstvový model IEEE 802.11	5
1.5 Linková vrstva IEEE 802.11	5
1.5.1 Logical Link Control	5
1.5.2 Media Access Control.....	5
2 IEEE 802.11ac phy	8
2.1 Dělení přenosových kanálů IEEE 802.11ac	8
2.2 Přístupová a modulační technika	9
2.3 Modulační a kódovací schémata.....	10
2.4 Formát rámce fyzické vrstvy	11
2.5 VHT mód	13
2.6 Přenosové módy.....	13
2.6.1 SISO	14
2.6.2 SIMO	15
2.6.3 MISO	17
2.6.4 MIMO	19
2.7 Proces zpracování signálu PHY IEEE 802.11ac (VHT).....	23
3 IEEE 802.11 ac simulátor	24
3.1 Framework WIFI simulátoru	24
3.2 WIFI simulátor.....	26
3.2.1 BCC Encoder Parser	27
3.2.2 Stream Parser	28

3.2.3	STBC Encoder	28
3.2.4	CSD per STS.....	30
3.2.5	Spatial Mapping.....	31
3.2.6	Transmission channel	31
3.2.7	Equalization	33
3.2.8	Spatial Demapping.....	35
3.2.9	CSD per STD	35
3.2.10	STBC Decoder	35
3.2.11	Stream Deparser.....	36
3.2.12	BCC Encoder Deparser.....	37
3.3	Nastavení WIFI simulátoru.....	37
4	Simulace MIMO Modelů	39
4.1	Parametry simulace	39
4.2	Simulace v AWGN přenosovém kanálu	39
4.3	Simulace v únikovém přenosovém kanálu	44
4.4	Porovnání metod odhadu přenosového kanálu	48
5	Závěr	50
	Literatura	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Princip CSMA/CA přístupové metody.	6
Obrázek 1.2: Složení MAC rámce.	7
Obrázek 2.1: Globální dělení přenosových kanálů [16].	8
Obrázek 2.2: Dělení přenosových kanálů v Evropě a Japonsku [16].	8
Obrázek 2.3: Blokové schéma OFDM.	9
Obrázek 2.4: Porovnání konstelačních diagramů 64-QAM a 256-QAM.	11
Obrázek 2.5: Physical layer PDU formát.	12
Obrázek 2.6: Datové pole rámce fyzické vrstvy.	13
Obrázek 2.7: Konvenční systém SISO.	14
Obrázek 2.8: Porovnání SISO, SIMO a MISO.	14
Obrázek 2.9: SIMO.	15
Obrázek 2.10: Porovnání závislosti E_b/N_0 na počtu antén pro jednotlivé SIMO.	16
Obrázek 2.11: Porovnání závislosti BER na E_b/N_0 pro jednotlivé SIMO.	16
Obrázek 2.12: MISO.	17
Obrázek 2.13: Závislost BER na E_b/N_0 pro Alamoutiho kód.	18
Obrázek 2.14: Porovnání SISO, SIMO a MISO.	18
Obrázek 2.15: Obecný prostorově diverzitní MIMO systém [20].	19
Obrázek 2.16: BER pro simulace MIMO se ZF ekvalizací.	20
Obrázek 2.17: BER pro simulace MIMO s MMSE ekvalizací.	21
Obrázek 2.18: Single User MIMO.	22
Obrázek 2.19: Multi User MIMO.	22
Obrázek 2.20: Blokový diagram přenosu datového pole pro 20, 40 nebo 80 MHz VHT SU PPDU s BCC kódováním [15].	23
Obrázek 3.1: Blokový diagram frameworku WIFI simulátoru.	24
Obrázek 3.2: Blokové schéma MIMO WIFI simulátoru.	26
Obrázek 3.3: Porovnání použitých typů aproximace odhadnuté charakteristiky přenosového kanálu.	33
Obrázek 4.1: BER pro jednotlivé MCS pro AWGN přenosový kanál.	39
Obrázek 4.2: FER pro jednotlivé MCS pro AWGN přenosový kanál.	40
Obrázek 4.3: Propustnost pro jednotlivé MCS pro AWGN přenosový kanál.	40

Obrázek 4.4: BER pro jednotlivé N_{ss} pro AWGN přenosový kanál.....	41
Obrázek 4.5: FER pro jednotlivé N_{ss} pro AWGN přenosový kanál	41
Obrázek 4.6: Propustnost pro jednotlivé N_{ss} pro AWGN přenosový kanál.....	42
Obrázek 4.7: Porovnání BER pro vybrané MCS s STBC	42
Obrázek 4.8: Porovnání FER pro vybrané MCS s STBC.....	43
Obrázek 4.9: Porovnání propustnosti pro vybrané MCS s STBC	43
Obrázek 4.10: BER pro jednotlivé MCS pro únikový přenosový kanál	44
Obrázek 4.11: FER pro jednotlivé MCS pro únikový přenosový kanál.....	44
Obrázek 4.12: Propustnost pro jednotlivé MCS pro únikový přenosový kanál	45
Obrázek 4.13: Propustnost pro jednotlivé N_{ss} pro AWGN přenosový kanál.....	45
Obrázek 4.14: FER pro jednotlivé N_{ss} pro AWGN přenosový kanál	46
Obrázek 4.15: Propustnost pro jednotlivé N_{ss} pro AWGN přenosový kanál.....	46
Obrázek 4.16: Porovnání BER pro vybrané MCS s STBC	47
Obrázek 4.17: Porovnání FER pro vybrané MCS s STBC.....	47
Obrázek 4.18: Porovnání propustnosti pro vybrané MCS s STBC	48
Obrázek 4.19: Porovnání BER pro různé metody odhadu a vybrané MCS	48
Obrázek 4.20: Porovnání FER pro různé metody odhadu a vybrané MCS.....	49
Obrázek 4.21: Porovnání propustností pro různé metody odhadu a vybrané MCS	49

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1: Parametry jednotlivých verzí standardu IEEE 802.11.....	2
Tabulka 1.2: Referenční model ISO/OSI pro IEEE 802.11.....	5
Tabulka 2.1: Počet subnosných dle šířky pásma pro IEEE 802.11ac.....	9
Tabulka 2.2: Přehled rotovaných subnosných IEEE 802.11ac dle šířky pásma [15].	10
Tabulka 2.3: Přehled MCS standardu IEEE 802.11ac.....	10
Tabulka 3.1: Příklad STBC kódování [15].	29
Tabulka 3.2: Přehled CSD pro STS standardu IEEE 802.11ac [15].....	30

ÚVOD

V současné době jsou bezdrátové technologie jednou z nejprogresivněji se vyvíjejících oblastí elektrotechniky. S rychlým rozvojem bezdrátových sítí se klade stále větší důraz jak na zpětnou kompatibilitu, tak na všestrannost bezdrátových sítí a jednotlivých standardů. Bezdrátová technologie je levná, lehce dostupná a téměř všudypřítomná. Umožňuje uživatelům jak úsporný přenos s malou spotřebou, tak i lehce dostupný vysokokapacitní přenos dat, dnes převyšující i rychlost 1 Gb/s [2].

Cílem této práce je prostudovat a ověřit parametry fyzické vrstvy standardu IEEE 802.11ac se zaměřením na použití technologie Multiple-Input Multiple-Output (MIMO). Poté tuto technologii implementovat do frameworku WIFI simulátoru v programovém prostředí MATLAB.

1 IEEE 802.11

V této kapitole je představena rodina standardů IEEE 802.11 pro bezdrátové lokální sítě Wireless Local Area Networks (WLAN).

1.1 Rodina standardů IEEE 802.11

IEEE 802.11 je rodina standardů WLAN obsahující základní schéma bezdrátové komunikace, včetně definování první a druhé vrstvy ISO modelu. IEEE 802.11 obsahuje popis linkové podvrstvy – Media Access Control (MAC) a popis několika druhů fyzické vrstvy, Physical Layer (PHY). IEEE 802.11 specifikuje implementaci bezdrátových lokálních sítí ve volných, bezlicenčních pásmech [1].

Název vychází z vývojového zařazení standardů. Tento standard spadá pod asociaci *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). Patří do řady standardů 802, které se zabývají lokálními (LAN) a metropolitními sítěmi (MAN) a je řešen pracovní skupinou 11. Odtud název IEEE 802.11. Historie IEEE 802.11 se začala psát již v roce 1990, přičemž první část standardu byla představena v roce 1997. Od tohoto roku se rodina IEEE 802.11 neustále vyvíjí [2], [3].

1.2 Verze standardů z rodiny IEEE 802.11

Stručný přehled využitelných standardů, změn a vylepšení s postupným vývojem standardu IEEE 802.11 je uveden v Tab.1 [4].

Tabulka 1.1: Parametry jednotlivých verzí standardu IEEE 802.11.

Verze IEEE	Rok uvedení	Frekvenční pásmo [GHz]	Šířka pásma 1 kanálu [MHz]	Dosažitelná přenosová rychlost [Mbit/s]	MIMO streamy	Fyzické vrstvy
802.11	1997	2,4	22	2	-	DSSS, FHSS, IR
802.11a	1999	5	20	54	-	OFDM
802.11b	1999	2,4	22	11	-	DSSS
802.11g	2003	2,4	20	54	-	OFDM
802.11n	2009	2,4 / 5	20 / 40	72 / 150	4	OFDM
802.11ad	2012	60	2160	6,75	-	SCM, OFDM
802.11ac	2013	5	20 / 40 / 80 / 160	96 / 200 / 433 / 866	8	OFDM

IEEE 802.11 – původní verze standardu byla představena v roce 1997. Dnes je již zastaralá a nepoužívá se. Tento standard specifikuje tři různé technologie fyzické vrstvy. První technologií je Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), čili technika přímého rozprostřeného spektra. Další technologií je Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS), čili metoda přenosu v rozprostřeném spektru. Princip FHSS spočívá v přeskakování mezi několika frekvencemi při přenosu. Poslední technologií fyzické vrstvy tohoto standardu je přenos signálu pomocí infračerveného signálu IR (infrared), který ale nebyl skutečně implementován [9].

IEEE 802.11a – další verze standardu uvedená v roce 1999 spolu se standardem IEEE802.11b. Využívá stejné linkové vrstvy a formát rámce jako předchozí verze. Oproti verzi IEEE 802.11 je fyzická vrstva již založena na použití Orthogonal Frequency-Division Multiplex (OFDM), čili širokopásmového modulačního a přístupového schématu využívajícího frekvenční dělení kanálu. Tato verze si již celosvětově rozšířila, zejména v korporátní sféře.

IEEE 802.11b – uveden v roce 1999 spolu se standardem IEEE 802.11a. Využívá fyzické vrstvy DSSS jako originální verze standardu IEEE 802.11. Oproti originálu využívá Complementary Code Keying (CCK), tedy doplňkové klíčové kódování, které výrazně zvýšilo propustnost.

IEEE 802.11g – uveden v roce 2003. Je zachována zpětná kompatibilita s hardwarem podporujícím standard IEEE 802.11b. Využívá stejné MAC podvrstvy jako originální standard IEEE 802.11.

IEEE 802.11n – uveden v roce 2009. Založen na předchozích verzích standardu. Přidává technologii Multi-Input, Multi-Output (MIMO). Technologie MIMO předává možnost využít více antén ke zvýšení propustnosti. Také přidává možnost duplikovaného přenosového kanálu, tj. zdvojená šířka pásma kanálu pro přenos 40 MHz a rámcovou agregaci do linkové vrstvy.

IEEE 802.11ad – uveden v roce 2012. Doplnjuje a rozšiřuje MAC podvrstvu pro podporu 60 GHz přenosového pásma a Single Carrier Modulation (SCM). Tato verze je zpětně kompatibilní s předchozími verzemi.

IEEE 802.11ac – uveden v roce 2013. Staví na základu IEEE 802.11n a rozšiřuje jej o možnost přenosu dat s šířkou pásma 80 nebo 160 MHz. Dále byl zvýšen počet datových streamů MIMO a přidána technologie Multi User-MIMO (MU-MIMO).

1.3 Požadavky na standard IEEE 802.11ac

Základní požadavky a cíle při vývoji standardu IEEE 802.11ac byly:

- **Zpětná kompatibilita** – IEEE 802.11ac poskytuje zpětnou kompatibilitu pro zařízení podporující standardy IEEE 802.11, schopné zpracovat Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) a operujících v 5 GHz pásmu. Tento fakt také musel být brán v potaz při vývoji rámcové struktury.
- **Koexistence** – IEEE 802.11ac musí poskytnout mechanismy k zajištění koexistence s různými standardy pracujícími v pásmu 5 GHz.
- **Propustnost pro jednu stanic** – stanice (STA), tedy zařízení podporující standard IEEE 802.11ac fyzickou a MAC vrstvu, musí být schopna přenosové rychlosti vyšší než 500Mbit/s při šířce kanálu 80 MHz.
- **Propustnost pro více stanic** – pokud je v systému více stanic, musí být souhrnná přenosová rychlost větší, než 1 Gbit/s při šířce kanálu 80 MHz.

Příklady využití vyšší přenosové rychlosti standardu IEEE 802.11ac:

- Bezdrátový přenos obrazu
- Distribuce HDTV a dalšího obsahu v domácnosti
- Rychlé stahování a nahrávání velkých souborů z a na servery
- Nasazení v kampusech a hledištích
- Automatizované výrobní procesy

1.4 Vrstvový model IEEE 802.11

Obdobně jako u ostatních síťových standardů IEEE 802.11 se standard IEEE 802.11ac zaměřují na spodní dvě vrstvy ISO modelu, tedy na fyzickou a linkovou vrstvu [5].

Tabulka 1.2: Referenční model ISO/OSI pro IEEE 802.11.

Linková vrstva	Logical Link Control (LLC)						
	IEEE 802.11 (MAC)						
Fyzická vrstva	IEEE 802.11 IR, DSSS, FHSS	IEEE 802.11a OFDM	IEEE 802.11b CCK, DSSS	IEEE 802.11g CCK, DSSS, OFDM	IEEE 802.11n MIMO - OFDM	IEEE 802.11ad SCM, OFDM	IEEE 802.11ac MIMO - OFDM

1.5 Linková vrstva IEEE 802.11

Linková vrstva zodpovídá za přenos dat mezi dvěma propojenými sousedními uzly. Jejím úkolem je uspořádat data z fyzické vrstvy do logických celků. Horní podvrstva linkové vrstvy se nazývá LLC (Logical Link Control), spodní se nazývá MAC (Media Access Control). Linková vrstva vytváří rámce z dat přijatých ze síťové vrstvy, které opatří MAC adresou a předá fyzické vrstvě k odeslání. Linková vrstva poskytuje služby se spolehlivou nebo nespolehlivou, či spojovanou nebo nespojovanou komunikací. Stará se také o kontrolu adresy, kontrolní součet a seřazení přijatých rámců, případně o jejich zahození či zajištění opakovaného přenosu [6].

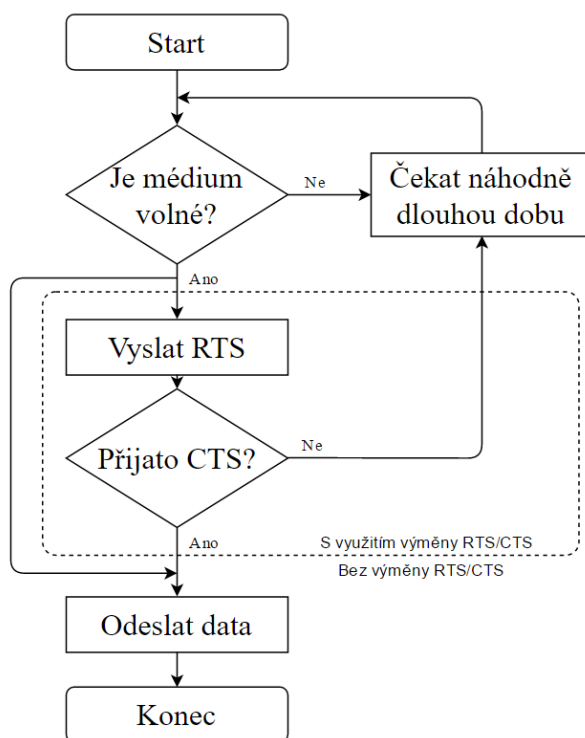
1.5.1 Logical Link Control

LLC podvrstva, také známá jako standard IEEE 802.2, poskytuje mechanismy multiplexování umožňující použití více síťových protokolů v jedné síti současně, jako jsou například IPv4, IPv6, AppleTalk, atd. Tato podvrstva může poskytovat služby Flow control, která předchází zahlcení přijímací strany, a ARQ (Automatic Repeat Request) pro detekci a korekci chyb používané při přenosu dat nespolehlivým kanálem za pomoci kladného potvrzení a časové prodlevy. U IEEE 802.11ac tyto služby ale zajišťuje část MAC podvrstvy. Stará se i o zapouzdření paketů do rámců [7], [10].

1.5.2 Media Access Control

Úkolem této podvrstvy je zajištění řízení přístupu ke sdílenému médiu, které umožňuje sdílené připojení několika stanic ke stejnému fyzickému médiu. Ve standardu IEEE 802.11ac se jako přístupová metoda využívá Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA), která funguje na principu detekování nosné a předcházení kolizím. Tato metoda spočívá v tom, že uzel kontroluje, jestli je vysílací kanál volný a pokud ano, paket je odeslán. Pokud je kanál obsazen, uzel čeká náhodně dlouhou dobu a celý proces se opakuje [8].

MAC podvrstva řeší také problém skrytých uzlů za pomoci Request to Send/Clear to Send (RTS/CTS) výměny. RTS/CTS spočívá v tom, že pokud je kanál prázdný nebo se prázdný tváří, vyšle stanice RTS zprávu čili dotaz, jestli je skutečně volný kanál. Pokud je kanál volný, dostane potvrzení ve formě CTS zprávy a může vysílat data. Po přijetí dat dostane stanice potvrzení ve formě Acknowledge (ACK) zprávy.



Obrázek 1.1: Princip CSMA/CA přístupové metody.

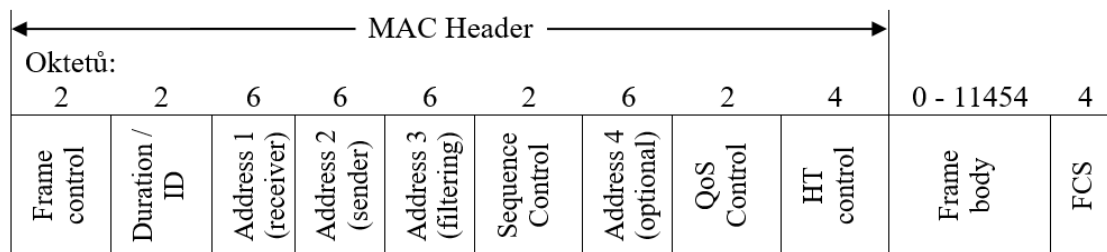
MAC podvrstva dále vymezuje odesílané a rozpoznává přijaté rámce. Dlouhé rámce dělí na menší části. Pokud je přijata poškozená část, nemusí se znovu posílat celý dlouhý rámec, ale jen jeho část.

Poskytuje ochranu proti chybám pomocí Cyclic Redundancy Check (CRC), kdy každý vyslaný paket obsahuje kontrolní součet. Pokud je při příjmu kontrolní součet odlišný od přijatého, znamená to, že při přenosu došlo k chybě.

Jedna ze základních věcí, které MAC podvrstva kromě jiného poskytuje, je zavádění adresace rámců a fyzické adresování. K adresaci jsou použity MAC adresy, jež se skládají ze 48 bitového kódu, který je svázán se síťovým adaptérem připojujícím zařízení do sítě a jenž by měl být unikátní pro každé zařízení. MAC adresa umožňuje doručovat datové pakety do destinací v podsítích.

MAC rámec

MAC rámec se skládá z MAC Header, těla rámce a rámcového kontrolního součtu Frame Check Sequence (FCS). Tento rámec se nazývá MAC Protocol Data Unit (MPDU).



Obrázek 1.2: Složení MAC rámce.

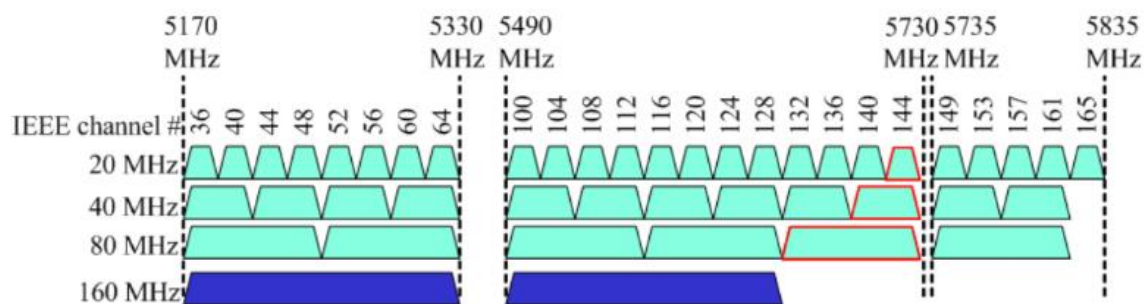
MAC Header je nejkomplicovanější strukturou rámce složenou z 36 bytů. Nejdůležitějšími informacemi, které MAC Header obsahuje, jsou informace, o jaký typ rámce se jedná, a jaká je zdrojová a cílová adresa rámce.

2 IEEE 802.11AC PHY

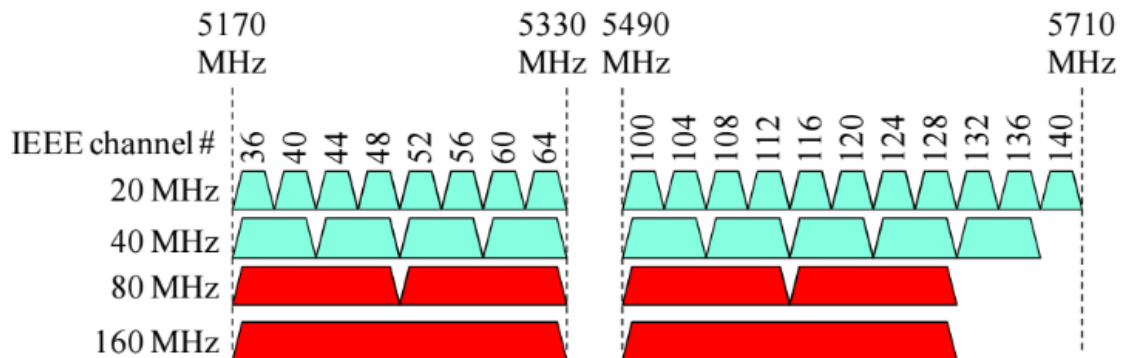
V této kapitole je popsána fyzická vrstva standardu IEEE 802.11ac. Standard IEEE 802.11ac je pokračovatelem standardu IEEE 802.11n. Tyto standardy jsou zpětně kompatibilní [14].

2.1 Dělení přenosových kanálů IEEE 802.11ac

Standard IEEE 802.11ac obsahuje stejné šířky pásem jako standard IEEE 802.11n, tj. 20 a 40 MHz. Navíc přináší navýšení šířky přenosového kanálu na 80 MHz povinně a šířku pásma kanálu 160 MHz volitelně. Při volbě kanálu se přihlíželo také na využitelnost frekvenčních pásem ve světě. Z tohoto důvodu je v Evropě a v Japonsku méně využitelných kanálů, než jinde ve světě [16].



Obrázek 2.1: Globální dělení přenosových kanálů [16].

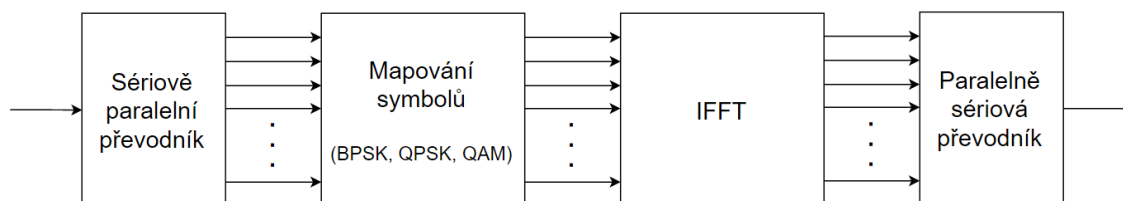


Obrázek 2.2: Dělení přenosových kanálů v Evropě a Japonsku [16].

Aby se nemuselo vyrábět zařízení pro každý region zvlášť, jsou zařízení schopná přenášet na všech přenosových kanálech. Podle polohy si zařízení načte Country Information a Regulatory Classes parametry pro dělení přenosových kanálů, které poté používá. Zařízení již tak nejsou dnes omezena pouze pro danou geografickou oblast použití.

2.2 Přístupová a modulační technika

Standard IEEE 802.11ac používá OFDM stejně jako standardy IEEE 802.11ad, IEEE 802.11n, IEEE 802.11g a IEEE 802.11a. OFDM používá rovnoměrně rozložené subnosné pro přenos dat, jejichž počet je závislý na použité šířce pásma.



Obrázek 2.3: Blokové schéma OFDM.

Subnosné, které nejsou použity pro přenos signálu jsou tzv. nulové subnosné, které jsou použity jako DC (Direct Current) subnosné nebo jako ochranné subnosné. Frekvence DC subnosná se rovná střední frekvenci vysílacího kanálu. To odpovídá nulové frekvenci (Direct Current) pokud FFT signál není modulován. Používá se za účelem zjednodušení digitálně-analogového a analogově-digitálního převodu. DC subnosná je nulová [16], [17].

Tabulka 2.1: Počet subnosných dle šířky pásma pro IEEE 802.11ac.

Šířka pásma [MHz]	Celkový počet subnosných	Indexy subnosných přenášejících signál
20	64	-28 až -1 a 1 až 28
40	128	-58 až -2 a 2 až 58
80	256	-212 až -2 a 2 až 122
160	512	-250 až -130, -126 až -6, 6 až 126 a 130 až 250
80+80	256 na jeden 80MHz kanál	-122 až -2 a 2 až 122

Vzhledem k tomu, že standard IEEE 802.11ac musí koexistovat i s předchozími verzemi standardu podporujícími OFDM, 5 GHz přenosové pásmo, a protože standard IEEE 802.11ac podporuje 20, 40, 80 a 160 MHz šířky pásma, posílá se stejná preamble v každém 20 MHz subpásmu, aby i zařízení podporující starší verze standardu byla schopná synchronizovat pakety. Použití OFDM přináší problém v podobě vysokého Peak to Average Power Ratio (PAPR), který redukuje efektivitu výkonových zesilovačů. Pro zmírnění tohoto efektu subnosné určitých subpásem rotují, viz Tabulka 2.2.

Tabulka 2.2: Přehled rotovaných subnosných IEEE 802.11ac dle šířky pásma [15].

Šířka pásma [MHz]	Indexy rotovaných subnosných k	Velikost rotace
20	-	-
40	$k < 0$	-
	$k \geq 0$	90° (j)
80	$k < -64$	-
	$k \geq -64$	180° (-1)
160	$k < -192$	-
	$-192 \leq k < 0$	180° (-1)
	$0 \leq k < 64$	-
	$k \geq 64$	180° (-1)
80+80	$k \geq -64$ pro každý segment	180° (-1)

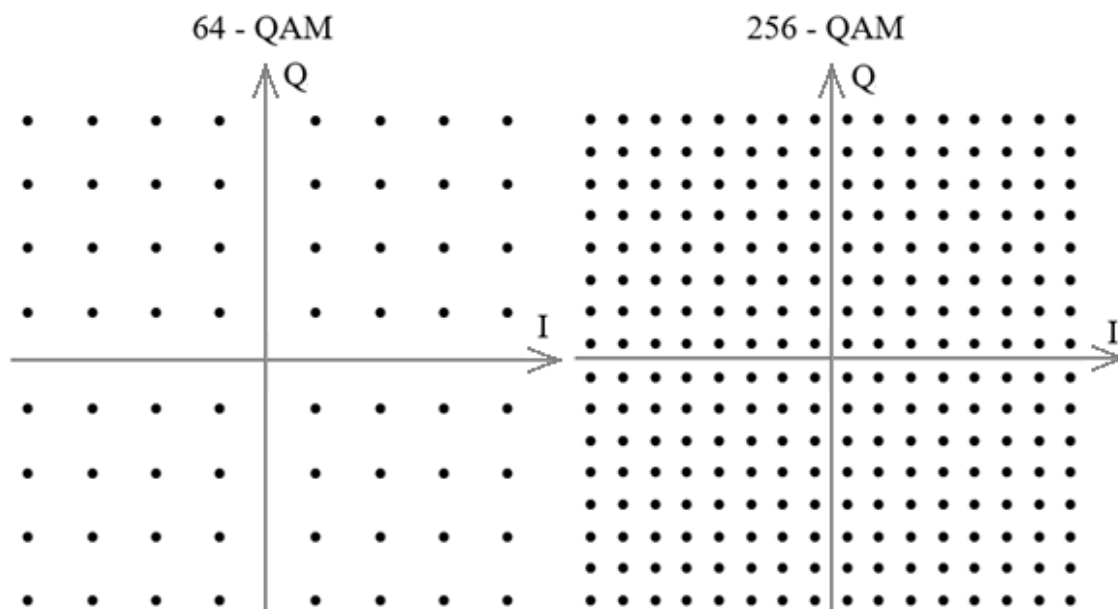
2.3 Modulační a kódovací schémata

Ve srovnání se starší verzí, standard IEEE 802.11ac zjednodušuje výběr Modulation and Coding Scheme (MCS) tím, že vyřazuje zřídka implementované kombinace MCS. Díky tomu je na výběr jen 10 možností oproti více než 70 u předchozí verze standardu. Dále je výběr MCS zjednodušen tím, že jednotlivé sety nejsou vázány k šířce pásma, jako u předchozí verze [18].

Tabulka 2.3: Přehled MCS standardu IEEE 802.11ac.

MCS index	Modulace	Kódový poměr
0	BPSK	1/2
1	QPSK	1/2
2	QPSK	3/4
3	16-QAM	1/2
4	16-QAM	3/4
5	64-QAM	2/3
6	64-QAM	3/4
7	64-QAM	5/6
8	256-QAM	3/4
9	256-QAM	5/6

Nově standard IEEE 802.11ac implementuje 256-QAM modulaci, oproti nejvýše 64-QAM u předchozí verze, která dokáže přenést 8 místo 6 bitů v jednom symbolu, což je jednou z hlavních změn umožňujících nárůst přenosové rychlosti. Modulace 256-QAM je ovšem citlivější na kvalitu přenosového prostředí a Signal to Noise Ratio (SNR), tudíž je náchylnější k chybám.



Obrázek 2.4: Porovnání konstelačních diagramů 64-QAM a 256-QAM.

První implementace standardu IEEE 802.11ac ukázala, že modulace 256-QAM potřebuje o 5 dB vyšší poměr signálu k šumu oproti 64-QAM modulaci. Ke zlepšení tohoto poměru proto zařízení podporující standard IEEE 802.11ac používají kvalitnější komponenty analogových částí zařízení. Standard IEEE 802.11ac také obsahuje účinný Low-Density Parity Check (LDPC) kód, který poskytuje zisk o 1-2 dB vyšší oproti konvolučnímu kódování. Použití LDPC je ale pouze volitelné [14], [15].

2.4 Formát rámce fyzické vrstvy

Při tvorbě rámce fyzické vrstvy pro standard IEEE 802.11ac bylo nutné zachovat zpětnou kompatibilitu s předchozími verzemi standardu. Pro zajištění kompatibility se Very High Throughput (VHT) rámec fyzické vrstvy podobá High Throughput (HT) mixed-mode rámcům používanému ve standardu IEEE 802.11n. Jeho začátek je totožný s rámcem, který používá standard IEEE 802.11a, viz Obr. 2.5.

Dalším požadavkem, který rámec fyzické vrstvy musí splňovat je podpora víceuživatelského MIMO (Multi-user MIMO), což znamená, že preamble musí být schopná označit číslo prostorového streamu a umožnit několika současným příjemcům nastavit se na příjem jejich rámce. Aby toto mohlo být splněno, musela být změněna hlavička Physical Layer Convergence Procedure (PLCP) Protocol Data Unit (PPDU) rámce fyzické vrstvy.

OFDM – IEEE 802.11a

Doba trvání:

8 μ s	8 μ s	4 μ s	různá
L-STF	L-LTF	L-SIG	Data

HT mixed mód – IEEE 802.11n

Doba trvání:

8 μ s	8 μ s	4 μ s	4 μ s	4 μ s		4 μ s	různá
L-STF	L-LTF	L-SIG	HT-STF	HT-LTF	...	HT-LTF	Data

VHT mód – IEEE 802.11ac

Doba trvání:

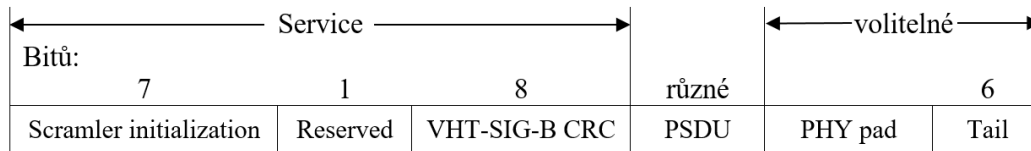
8 μ s	8 μ s	4 μ s	8 μ s	4 μ s	4 μ s / VHT-LTF symbol	4 μ s	různá
L-STF	L-LTF	L-SIG	VHT-SIG-A	VHT-STF	VHT-LTF	VHT-SIG-B	Data

Obrázek 2.5: Physical layer PDU formát.

- **L-STF (Non-HT Short Training Field) a L-LTF (Non-HT Long Training Field)** - identické se standardem IEEE 802.11a. Obsahuje sekvenci 12 OFDM symbolů které pomáhají rozpoznat začátek rámce, synchronizovat časovače a vybrat anténu. Každé zařízení podporující standard IEEE 802.11 a schopné OFDM může tato pole dekodovat.
- **L-SIG (Non-HT Signal Field)** – standard IEEE 802.11a používá tento rámec k definování přenosové rychlosti a délky rámce. Přijímací strana pomocí těchto údajů vypočítá dobu přenosu rámce. Při použití standardu IEEE 802.11ac se nastaví přenosová rychlost na 6 Mb/s a definuje se falešná délka rámce, takže vypočtená délka trvání přenosu odpovídá době trvání IEEE 802.11ac rámce.
- **VHT-SIG-A (VHT Signal A) a VHT-SIG-B (VHT Signal B)** – tato pole dekoduje pouze zařízení podporující standard IEEE 802.11ac. Tato pole společně popisují parametry přenášeného rámce, kterými jsou šířka kanálu, modulace, kódování, a také definici jednorázového nebo víceuživatelského rámce.
- **VHT-STF (VHT Short Training Field)** – slouží ke stejnému účelu jako non-HT STF. Pomáhá přijímací straně detekovat opakující se vzorce a nastavit automatické zesílení (AGC).
- **VHT-LTF (VHT Long Training Field)** – definuje nastavení demodulace zbytku polí rámce obsažených za tímto polem. V závislosti na počtu přenášených proudů se skládá z 1,2,4,6 nebo 8 symbolů, počet požadovaných symbolů se zaokrouhluje na nejbližší vyšší hodnotu. Toto pole je také použito při procesu odhadu kanálu, na kterém závisí tvarování paprsku.
- **Data** – obsahuje rámce z vyšších vrstev. Toto pole může také obsahovat Null Data Packet (NDP), který je použit pro tvarování paprsku, měření a ladění.

2.5 VHT mód

Datové pole následuje bezprostředně po záhlaví rámce fyzické vrstvy a obsahuje užitečné zatížení rámce. Obsahuje datové rámce z vyšších vrstev protokolu. Datové pole je znázorněno na Obr. 2.6.



Obrázek 2.6: Datové pole rámce fyzické vrstvy.

- **Service** – přidává se k datovému rámci z vyšší vrstvy. Skládá se 7 bitů pro inicializaci scrambleru, který zabrání dlouhému běhu stejných bitů. Dále obsahuje CRC pro VHT-Signal-B pole.
- **PHY Service Data Unit (PSDU)** - obsahuje rámec z MAC podvrstvy. Toto pole nemá pevnou délku.
- **PHY pad** – výplň zajišťující, že počet bitů předaných vysílači bude odpovídat počtu bitů potřebných pro jeden symbol.
- **Tail** – toto pole je přítomno, pokud je rámec fyzické vrstvy chráněn konvolučním kódováním, anglicky Binary Convolutional Codes (BCC). Toto pole slouží k vyprázdnění posuvného registru BCC kodéru. Pokud je použit LDPC kód není toto pole nutné.

2.6 Přenosové módy

V radiokomunikacích se používá různých metod ke zlepšení kvality přenosu signálu, tzn. jak udělat signál robustnější, a to i při přenosu v různých typech kanálů. Mezi tyto metody patří časová diverzita (různé časové sloty a kanálové kódování), kmitočtová diverzita (různé přenosové kanály, rozprostřené spektrum a OFDM) a také prostorová diverzita. Prostorová diverzita vyžaduje použití více antén na vysílací nebo přijímací straně.

Systém s několika anténami je znám jako Multiple Input, Multiple Output (MIMO). Technologie pro vícenásobné antény mohou být použity jak pro zvýšení odolnosti přenášeného signálu, tak ke zvýšení rychlosti přenosu dat (prostorové multiplexování).

Při zápisu vysílaného signálu jako vektoru $x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$, kde prvek x_1 je vyslán anténou x_1 , prvek x_2 je vyslán anténou x_2 apod., lze činnost kompletního přenosového systému popsat v maticové podobě jako vstupně-výstupní rovnice (2.1)

$$y = H \cdot x + n, \quad (2.1)$$

kde y představuje přijatý signál v maticové formě o rozměrech $n, 1$, H je radiový kanál popsáný komplexní maticí, x je vysílaný signál ve formě vektoru o rozměrech $m, 1$ a n je šum

2.6.1 SISO

Single-Input, Single-Output (SISO) je konvenční systém s jednou vysílací a jednou přijímací anténou [20].



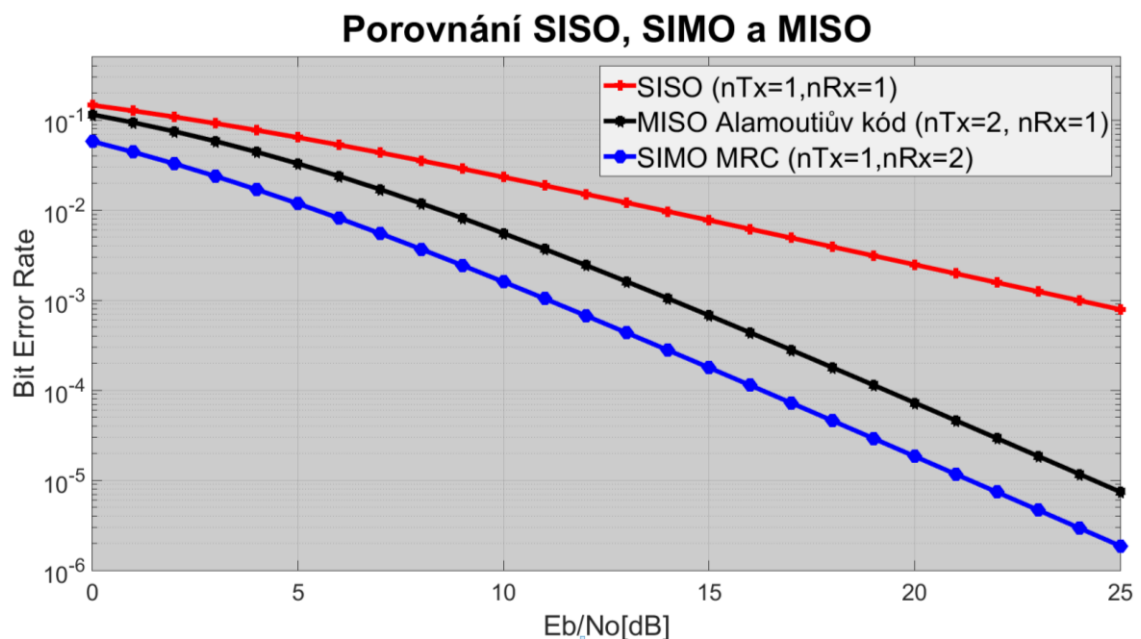
Obrázek 2.7: Konvenční systém SISO.

Pro výpočet maximální přenosové kapacity kanálu je základem Shannon-Hartleyův teorém, který vyjadřuje vliv šumu na přenosovou kapacitu přenosového kanálu [21].

Shanon-Hartleyův zákon pro výpočet maximální kapacity SISO systému:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (2.2)$$

kde C představuje kapacitu kanálu v bitech za sekundu, B je šířka přenosového kanálu, S představuje průměrný výkon přijímaného signálu a N reprezentuje průměrný výkon šumu a rušení v dané šířce pásma.

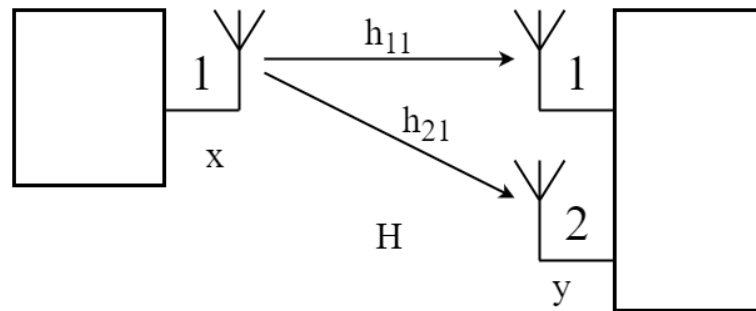


Obrázek 2.8: Porovnání SISO, SIMO a MISO.

2.6.2 SIMO

Single-Input, Multi-Output (SIMO) systém nevyužívá prostorové diverzity ke zvýšení propustnosti přenosového kanálu, ale využívá se k zajištění menší náchylnosti signálu k rušení. SIMO má méně antén na vstupu a více antén na výstupu. Protože SIMO nevyžaduje žádnou speciální metodu kódování je tento systém lehké implementovat [20].

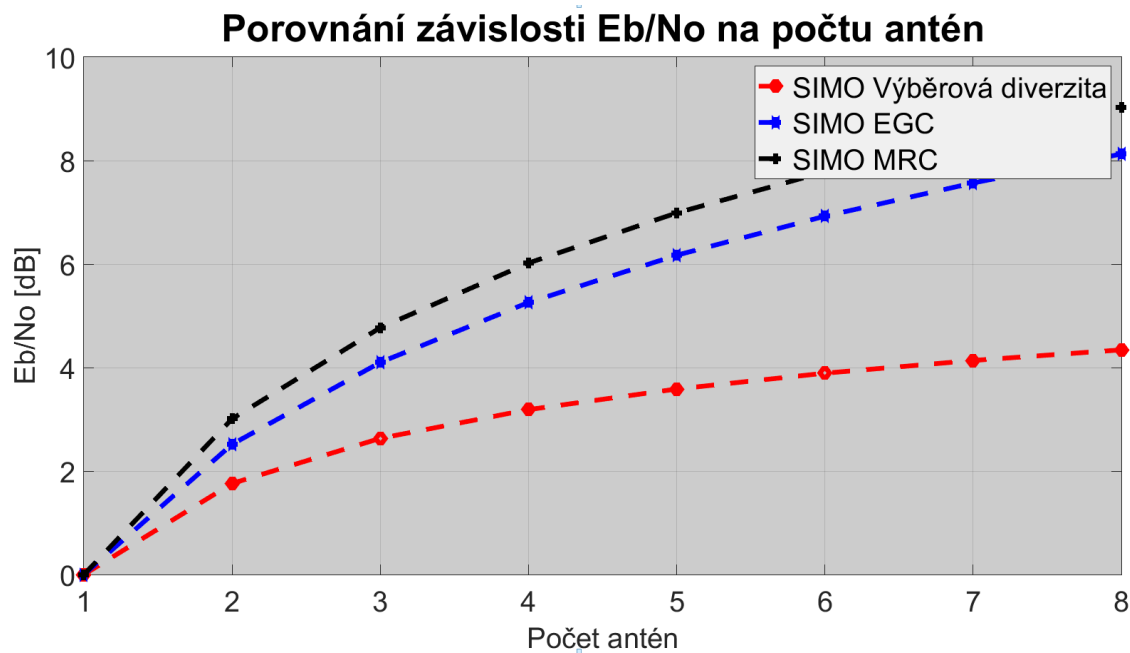
Rádiový SIMO kanál je popsán komplexní maticí H o rozměrech $n, 1$. Jednotlivé prvky této matice, prvky h_{n1} , vyjadřují komplexní koeficienty přenosového kanálu mezi vysílací anténou a n -tou přijímací anténou [22].



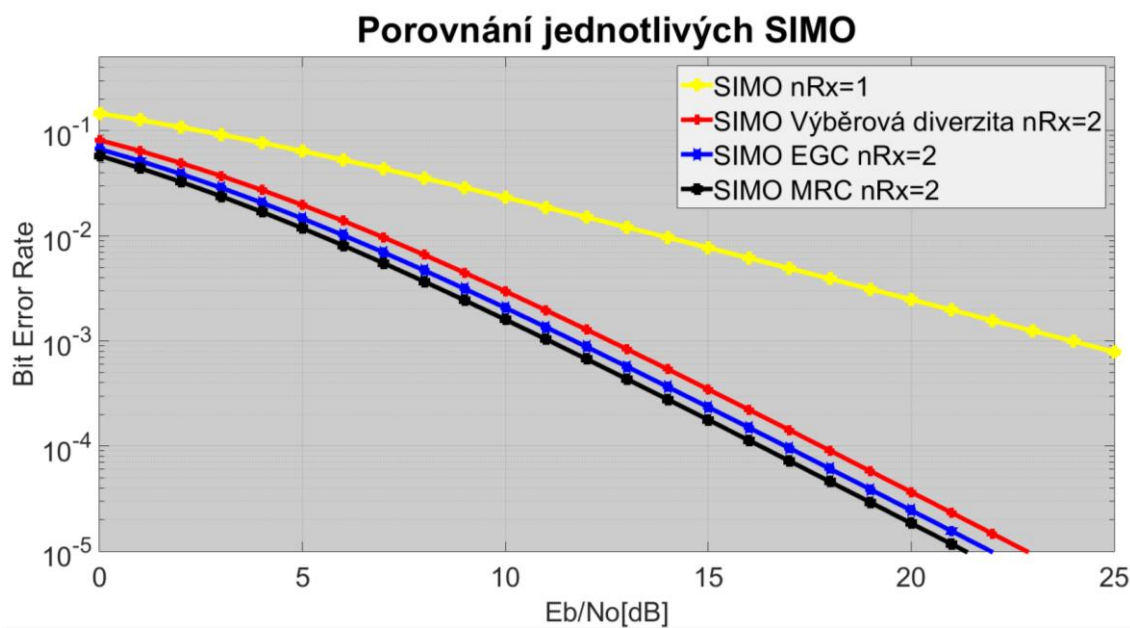
Obrázek 2.9: SIMO.

Z důvodu použití dvou různých přenosových kanálů má přijímač dva odlišné přijaté signály. Pomocí příslušné metody v přijímači je možné zvýšit poměr signálu k šumu.

První metoda je SIMO s výběrovou diverzitou (SD). Spočívá ve výběru antény s největším přijímaným výkonem a ignoraci signálu z ostatních antén. Další je SIMO systém s Equal Gain Combining (EGC). V tomto systému je na přijímací anténě přijatý signál ekvalizován (ekvalizér, vyrovnávač). Ekvalizaci provádí přijímač dělením přijatého symbolu dopředu známou fází přenosového kanálu. Výsledný symbol je poté dekódovaný ze součtu signálů z fázově kompenzovaných přenosových kanálů. Jako poslední je SIMO systém s Maximum Ratio Combining (MRC). Zde na přijímací anténě opět proběhne ekvalizace podle fáze kanálu, ale až poté, co je provedeno sečtení přijatých signálů. Toto sečtení se provádí za účelem maximalizovat poměr signálu k šumu [22], [23].



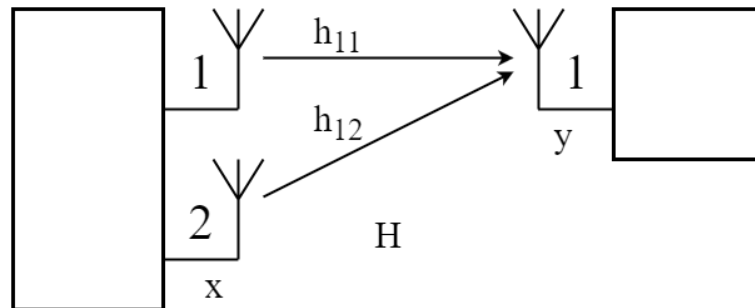
Obrázek 2.10: Porovnání závislosti E_b/N_0 na počtu antén pro jednotlivé SIMO.



Obrázek 2.11: Porovnání závislost BER na E_b/N_0 pro jednotlivé SIMO.

2.6.3 MISO

Multi-Input, Single-Output (MISO) systém opět využívá prostorové diverzity ke zmenšení náchylnosti signálu na rušení. MISO má více antén na vstupu než na výstupu.



Obrázek 2.12: MISO.

Rádiový MISO kanál je popsán komplexní maticí H o rozměrech $1, m$. Jednotlivé prvky této matice, prvky h_{1m} , vyjadřují komplexní koeficienty přenosového kanálu mezi m -tou vysílací anténou a přijímací anténou [22].

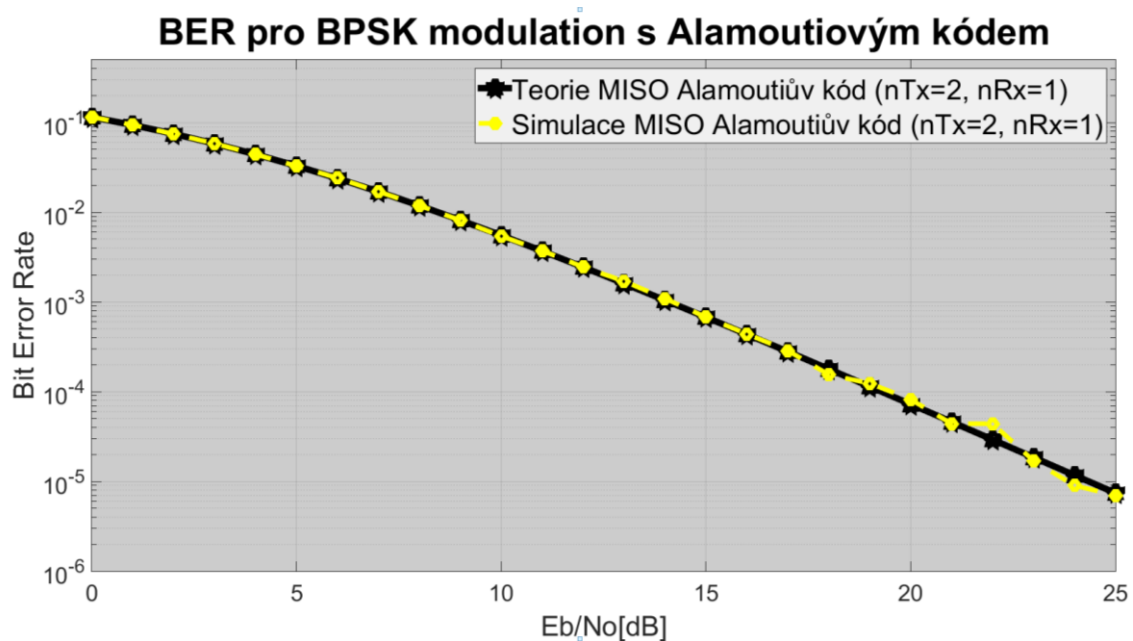
V případě MISO jsou data vysílána pomocí dvou antén. Více vysílacích antén a redundantní kódování se provádí v základové stanici (vysílači), kde jsou tyto technologie snadněji a levněji implementovatelné. Pro vytvoření redundantního signálu jsou použity časoprostorové kódy, které zlepšují výkon a umožňují použitelnost prostorové diverzity.

Alamoutiho kód

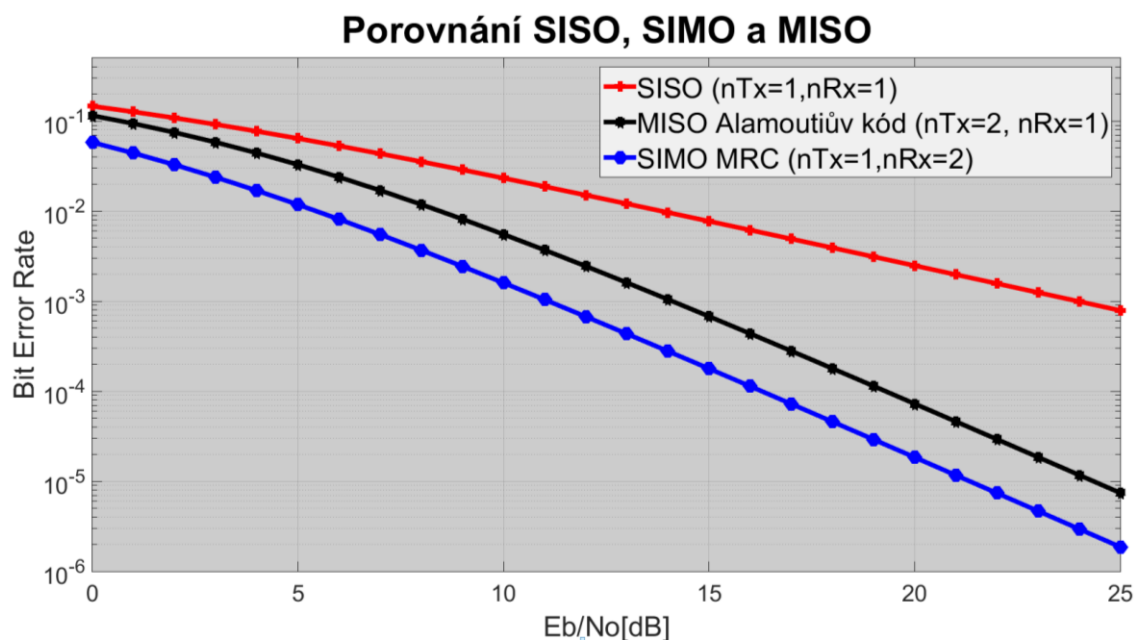
Jedná se o nejjednodušší časoprostorový blokový kód. Tento kód přímo předpokládá použití dvou vysílacích a jedné přijímací antény, jak je vidět na Obr. 2.14. Redundantní kopie signálu je přenášena nejen z jiné antény, ale také v jiném čase. Časoprostorové kódy kombinují prostorové a časové kopie signálu [22], [23].

Vstupní modulované symboly x_1 a x_2 jsou mapovány do 2 vysílacích antén pomocí kódovací matice. Výsledný signál je zobrazen v rovnici (2.3), kde sloupce představují různý čas a řádky představují různé antény [22], [23].

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$



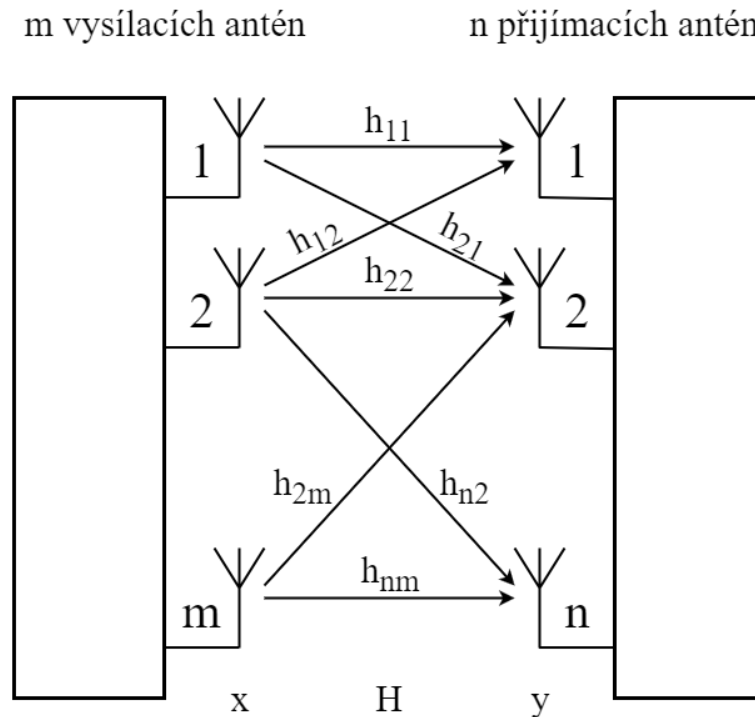
Obrázek 2.13: Závislost BER na E_b/N_0 pro Alamoutiho kód.



Obrázek 2.14: Porovnání SISO, SIMO a MISO.

2.6.4 MIMO

MIMO využívá vícecestného šíření signálu ke zvýšení propustnosti nebo ke snížení chybovosti přenosu. MIMO je systém skládající se z více vysílacích či přijímacích antén využívajících stejný přenosový kanál. Obecný MIMO systém je zobrazen na Obr. 2.9.



Obrázek 2.15: Obecný prostorově diverzitní MIMO systém [20].

Rádiový MIMO kanál je popsán komplexní maticí H o rozměrech n, m . Komplexní matice H je definována v rovnici (2.4). Jednotlivé prvky této matice, prvky h_{nm} , vyjadřují komplexní koeficienty přenosového kanálu mezi m -tou vysílací anténou a n -tou přijímací anténou [22].

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1m} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n1} & h_{n2} & \cdots & h_{nm} \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

V MIMO systému se data k odeslání rozdělují do samostatných datových streamů. Počet těchto streamů je vždy menší nebo roven počtu antén na přijímací či vysílací straně podle toho, kde je antén méně [20].

Shanon-Harleyův zákon pro výpočet maximální kapacity MIMO systému:

$$C = M \cdot B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (2.5)$$

kde M představuje počet samostatných datových streamů.

Z důvodu použití více různých přenosových kanálů má přijímač více přijatých signálů. Pomocí příslušné ekvalizační metody v přijímači je možné zvýšit poměr signálu k šumu.

MIMO se Zero Forcing ekvalizací

Zero Forcing (ZF) ekvalizace je forma lineárního ekvalizačního algoritmu, který používá inverzní frekvenční odezvu kanálu k obnovení signálu po průchodu přenosovým kanálem [22], [23], [24].

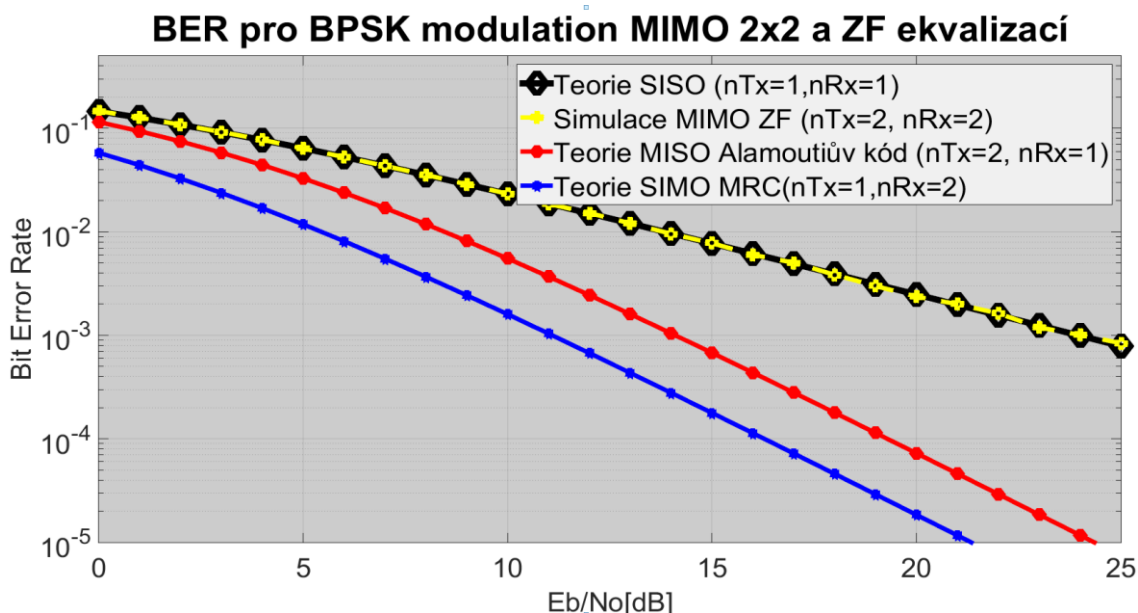
$$C(f) = \frac{1}{F(f)}, \quad (2.6)$$

kde $F(f)$ je frekvenční odezva přenosového kanálu a $C(f)$ je inverzní frekvenční odezva přenosového kanálu.

V přenosové rovnici (2.1) pro MIMO veličina H představuje komplexní přenosovou matici neboli frekvenční odezvu kanálu. Pro ZF ekvalizaci tedy musíme najít inverzní matici W .

$$W = (H^H H)^{-1} H^H, \quad (2.7)$$

kde H je frekvenční odezva přenosového kanálu a W je inverzní frekvenční odezva přenosového kanálu.



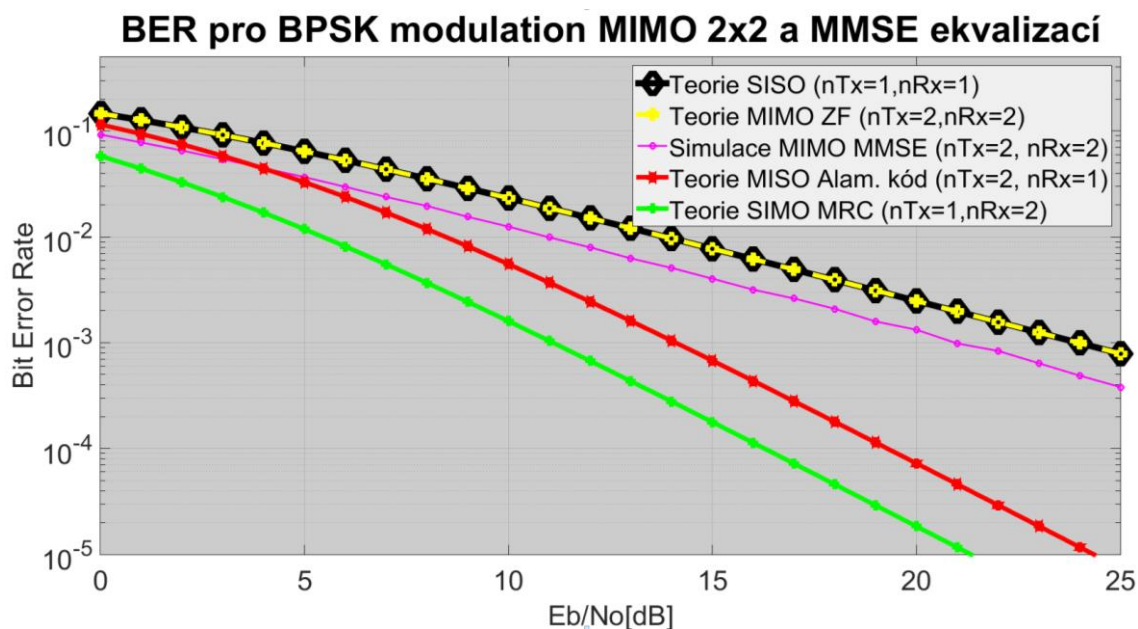
Obrázek 2.16: BER pro simulace MIMO se ZF ekvalizací.

MIMO s Minimum Mean Square Error ekvalizací

Jedná se o MIMO systém s Minimum Mean Square Error (MMSE) ekvalizací neboli ekvalizací založenou na minimalizaci střední kvadratické odchylky, tj. rozptylu σ . Pokud je šum nulový, jedná se v podstatě o ZF ekvalizaci. Pro ekvalizaci se hledá koeficient W podle rovnice (2.8) [22], [23], [24].

$$W = (H^H H + N_0 I)^{-1} H^H, \quad (2.8)$$

kde H je frekvenční odezva přenosového kanálu, W je inverzní frekvenční odezva přenosového kanálu, N_0 je šum a I je jednotková matice.

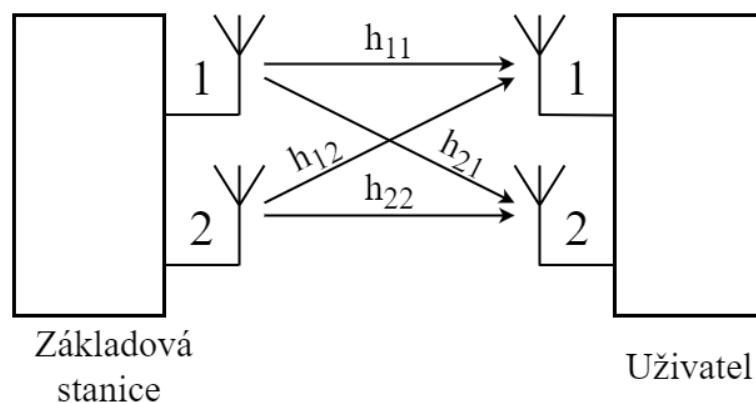


Obrázek 2.17: BER pro simulace MIMO s MMSE ekvalizací.

MIMO systém je možné také použít ve dvou základních režimech podle počtu uživatelů.

SU-MIMO

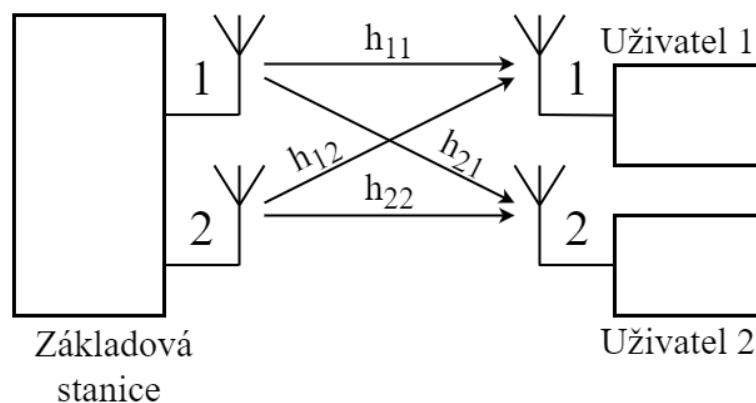
Single User MIMO systém využívá prostorové diverzity ke zvýšení propustnosti nebo snížení chybovosti přenosu pouze pro jednoho uživatele [20].



Obrázek 2.18: Single User MIMO.

MU-MIMO

Pokud jsou jednotlivé streamy přiřazeny jednotlivým uživatelům, nazývá se tento systém Multi User MIMO (MU-MIMO). Tento systém je užitečný zejména v přenosu dat od uživatele, protože díky možnosti použití pouze jedné antény může být složitost na uživatelské straně snížena na minimum [20].

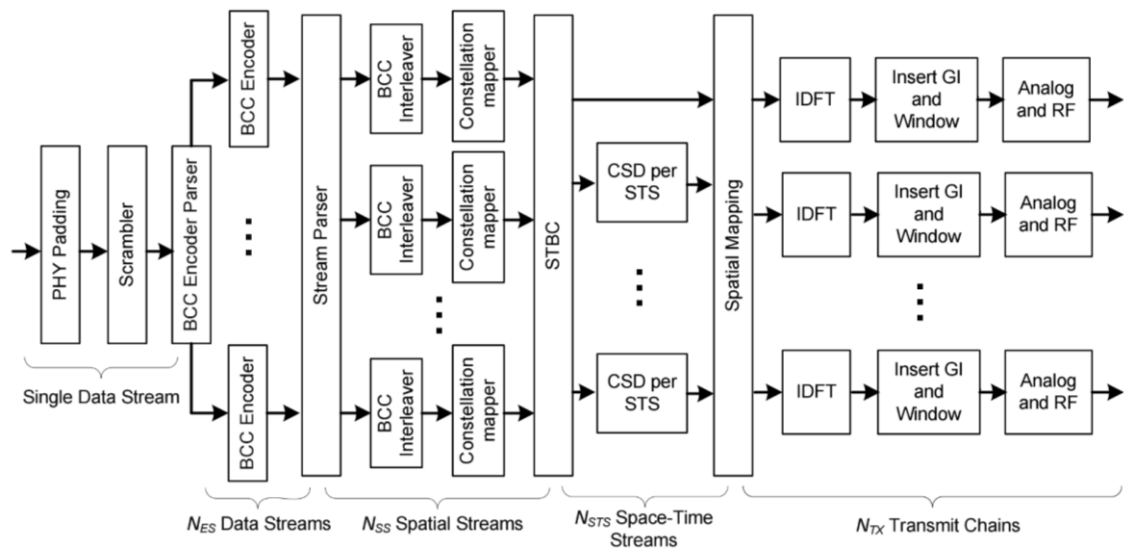


Obrázek 2.19: Multi User MIMO.

2.7 Proces zpracování signálu PHY IEEE 802.11ac (VHT)

Vysílací proces se liší podle druhu kanálového kódování. Používá se buď LDPC nebo BCC kódování. LDPC kódování nepotřebuje výplňové bity PHY pad. LPCD také používá jen jeden Forward Error Correction (FEC) kódér, zatímco BCC používá jeden nebo více dílčích FEC kódérů. Blokové diagramy jsou uvedeny ve zdroji [15].

Na následujícím blokovém diagramu Obr. 2.13 je zobrazeno blokové schéma vysílače standardu IEEE 802.11ac pro přenos datových rámců s BCC kódováním pro různé šířky přenosového kanálu (20, 40 a 80 MHz) a pro přenos dat jednoho uživatele, Single User (SU). Toto blokové schéma bylo vybráno k implementaci do frameworku WIFI simulátoru, včetně požadované MIMO technologie. Proces zpracování signálu na vysílací i přijímací straně bude detailně popsán v následující kapitole [19].



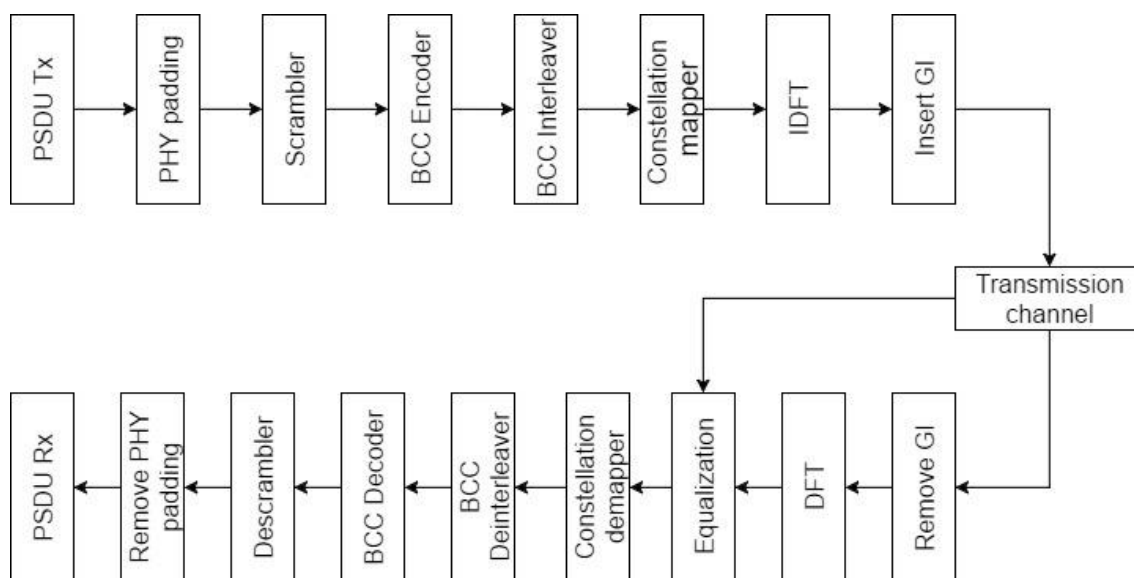
Obrázek 2.20: Blokový diagram přenosu datového pole pro 20, 40 nebo 80 MHz VHT SU PPDU s BCC kódováním [15].

3 IEEE 802.11 AC SIMULÁTOR

V této kapitole je popsán framework simulátoru standardů IEEE 802.11 a následná implementace MIMO technologie v programovém prostředí MATLAB ve verzi R2014b.

3.1 Framework WIFI simulátoru

Pro implementaci MIMO technologie byl poskytnut framework simulátoru standardů IEEE 802.11. Framework je schopen plné simulace různých standardů, až do standardu IEEE 802.11n s použitím SISO technologie. Dále již framework obsahoval implementované MCS pro IEEE 802.11ac s technologií SISO s šířkou přenosového pásma 20MHz, pro kterou byl výsledný WIFI simulátor testován [27].



Obrázek 3.1: Blokový diagram frameworku WIFI simulátoru.

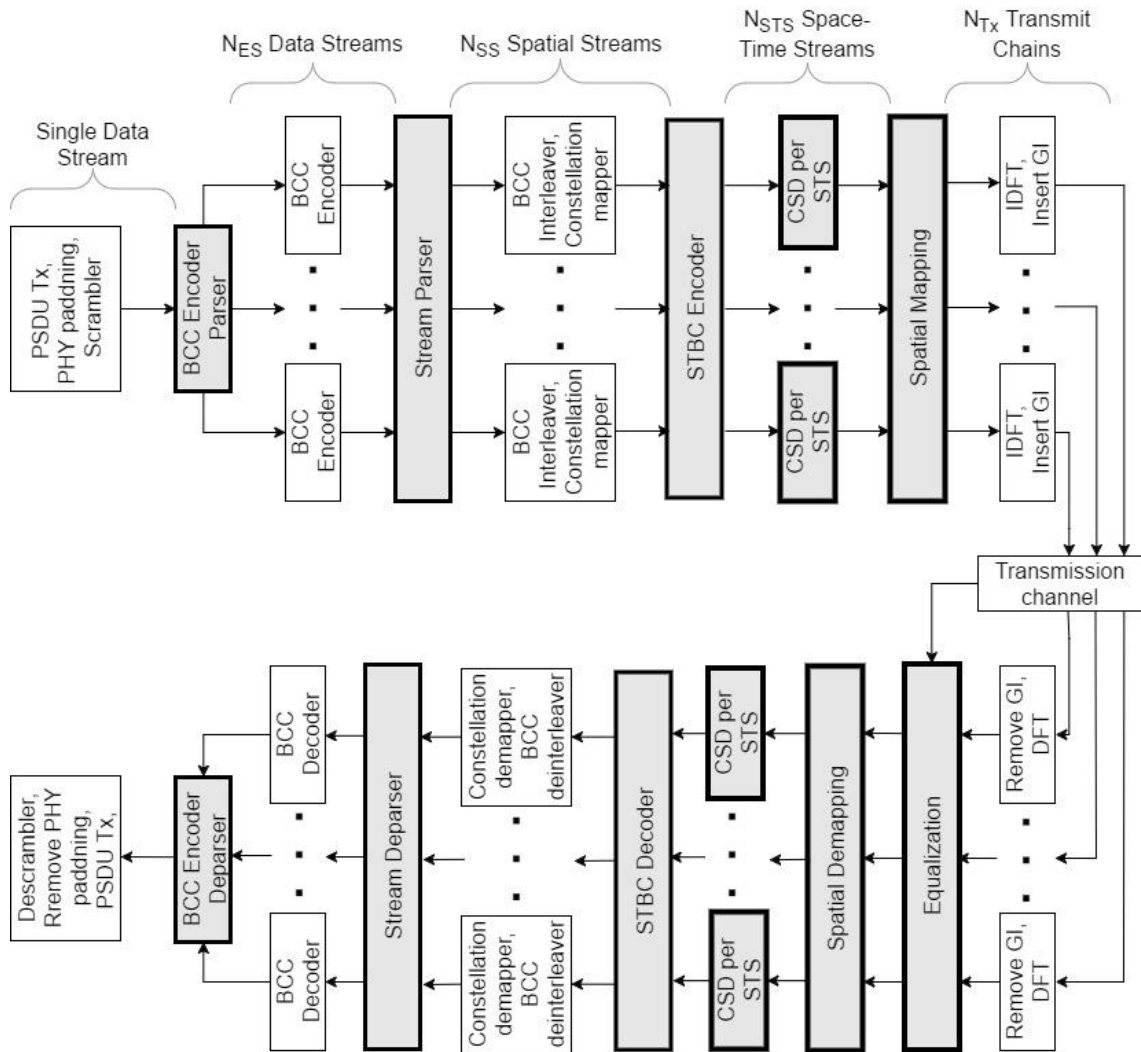
Stručný popis jednotlivých bloků frameworku WIFI simulátoru:

- **PSDU Tx** – generování posloupnosti bitů nahrazující rámec z MAC podvrstvy
- **PHY padding** – přidání výplňových bitů
- **Scrambler** – snížení pravděpodobnosti dlouhých řetězců stejných bitů na svém výstupu a je přítomen, protože konvoluční kódy fungují nejlépe na datech, které nemají dlouhé běhy stejných bitů
- **BCC Encoder** – BCC kóder
- **BCC Interleaver** – prokládá bity každého prostorového proudu (mění jejich pořadí) pro minimalizaci skupinových chyb
- **Constellation mapper** – mapování bitů na body konstelačního diagramu vybrané modulace

- **IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform)** – převod z frekvenční do časové oblasti
- **Insert GI** – vložení cyklického prefixu
- **Transmission channel** – přenosový kanál s možností volby AWGN nebo únikového přenosového kanálu
- **Remove GI** – odebrání cyklického prefixu
- **DFT** – převod z časové do frekvenční oblasti
- **Equalization** – ZF ekvalizace za pomoci dokonalé znalosti přenosového kanálu
- **Constellation demapper** – mapování na bity z bodů konstelačního diagramu vybrané modulace
- **BCC Deinterleaver** – zpětně prokládá bity každého prostorového proudu (zpětně mění jejich pořadí)
- **BCC Decoder** – BCC dekodér
- **Descrambler** – zpětné spojení bitů do dlouhých řetězců
- **Remove PHY padding** – odebrání výplňových bitů
- **PSDU Rx** – přijatá a dekodovaná data pro porovnání

3.2 WIFI simulátor

Výsledný simulátor vychází z frameworku WIFI simulátoru a přidává do něj potřebné bloky nezbytné pro přenos uživatelských dat pomocí standardu IEEE 802.11ac včetně MIMO technologie dle blokového schématu vysílače IEEE 802.11ac uvedeného na Obr. 2.13.



Obrázek 3.2: Blokové schéma MIMO WIFI simulátoru

3.2.1 BCC Encoder Parser

Jedná se o demultiplexor, který rozděluje datový tok ze scrambleru na standardem daný počet N_{ES} datových streamů způsobem Round-Robin. Tento počet také určuje celkový počet použitých BCC kódérů a je dán MCS podle použitého kódování.

V následujícím odstavci je ukázkový zdrojový kód. Tento kód je vytvořen univerzálně a uvažuje libovolný počet N_{ES} datových streamů. Jako první je přiřazení výstupu předchozího bloku kvůli jednodušší orientaci a poté je alokována výstupní proměnná. Poté jsou do každého datového streamu vybrány bity ze vstupu kruhovým výběrem Round-Robin. Například pro celkově 2 datové streamy se pro první stream vybere od prvního každý druhý bit až do konce. U druhého datového streamu se vybere od druhého každý druhý bit až do konce. Poté jsou poslední tail bity nulovány.

```
%% BCC ENCODER PARSING

%Rozdělení na N_es datových streamů
for i_encoderParser = 1:MCS.N_es

    %Adresování bitů ze vstupu na výstup způsobem Round-Robin
    encoderParserOut(:,i_encoderParser) =
        encoderParserIn(i_encoderParser:MCS.N_es:end, 1);

    %Zajištění, aby se koncové bity rovnali 0
    encoderParserOut(end-DEC_offset+1:end,i_encoderParser) =
        zeros(DEC_offset,1);
end
```

3.2.2 Stream Parser

Tento blok má za úkol rozdělit N_{ES} výstupů BCC kodérů na N_{SS} prostorových streamů způsobem Round-Robin, přičemž $N_{ES} \leq N_{SS}$.

$$s = \max \left\{ 1, \frac{N_{BPCS}}{2} \right\}, \quad (3.1)$$

$$S = N_{SS} * s, \quad (3.2)$$

V následujícím odstavci je ukázkový zdrojový kód. Tento kód je uvažuje libovolný počet N_{ES} datových a libovolný počet N_{SS} prostorových streamů, přičemž jsou z každého N_{ES} datového streamu brány bloky dat po S bitech podle rovnice 3.2, které jsou poté děleny do N_{SS} prostorových streamů po s bitech podle rovnice 3.1.

```
%% STREAM PARSING (N_es -> N_ss)

%Výpočet parametrů dělení
s_parser = max([ (log2(MCS.M))/2, 1]);
S_parser = MCS.N_ss*s_parser;

%Rozdělení každého streamu do matice o S řádcích a seřazení pod sebe
for i = 1:MCS.N_es
    streamParsingTransfer = [streamParsingTransfer
                             reshape(streamParsingIn(:,i),S_parser,[])];
end

%Změna počtu řádků matice podle počtu s bitů
streamParsingTransfer = reshape(streamParsingTransfer,s_parser,[]);

%Rozdělení matic do N_ss matic a změna na řady
for i = 1:MCS.N_ss
    streamParsingTransfer2 = streamParsingIn2(:,i:MCS.N_ss:end);
    streamParsingOut2(:,i) = reshape(streamParsingTransfer2,1,[]);
end
```

3.2.3 STBC Encoder

Rozšiřuje N_{SS} prostorových streamů na N_{STS} časoprostorových streamů za použití časoprostorových blokových kódů. Při použití STBC musí být splněna podmínka $N_{STS} = 2N_{SS}$. Protože počet antén je roven počtu časoprostorových streamů, a maximální počet přenosových streamů je osm, maximální počet prostorových streamů je při použití STBC omezen na čtyři. V Tabulce 3.1 je také patrné, že se každý prostorový stream kóduje zvlášť stejným časoprostorovým blokovým kódem.

Tabulka 3.1: Příklad STBC kódování [15].

N _{STS}	N _{ss}	Vstupní stream i _{ss}	Výstupní stream i _{STS}	X _n (i _{SS})	X _n (i _{SS})
8	4	1	1	X ₁ (1)	X ₂ (1)
			2	-X ₂ [*] (1)	X ₁ [*] (1)
		2	3	X ₁ (2)	X ₂ (2)
			4	-X ₂ [*] (2)	X ₁ [*] (2)
		3	5	X ₁ (3)	X ₂ (3)
			6	-X ₂ [*] (3)	X ₁ [*] (3)
		4	7	X ₁ (4)	X ₂ (4)
			8	-X ₂ [*] (4)	X ₁ [*] (4)

V následujícím odstavci je ukázkový zdrojový kód. Tento kód využívá STBC kodér integrovaný v Communications System Toolbox, který využívá i původní framework. Výhody jsou v jednoduchosti použití či případné modifikace a minimalizace chyb při vývoji. Jako první se prověří podmínka, jestli je zapnuto STBC kódování. Pokud není použito, je kódování přeskočeno a vstup je přepsán na výstup. Pokud je STBC kódování použito, je napřed kodér inicializován a poté je každý prostorový stream kódován zvlášť. Na každý vstupní prostorový stream poté připadají dva výstupní časoprostorové streamy. Tyto zakódované streamy jsou poté přidány na výstup k předchozím, již zakódovaným časoprostorovým streamům.

```
%% STBC

%Inicializace STBC kodéru
hOSTBCEnc = comm.OSTBCEncoder;
release(hOSTBCEnc);
hOSTBCEnc.NumTransmitAntennas = 2;

%Pro všechny prostorové streamy
for i_STBC = 1:wifi_params.MCS(i_mcs).N_ss

    %Vyber jeden prostorový stream
    STBCEncTransfer = STBCEncIn(:,i_STBC);

    %Kódování
    STBCEncoded = step(hOSTBCEnc, STBCEncTransfer);

    %Přidání časoprostorových streamů na výstup
    STBCEncOut = [STBCEncOut STBCEncoded];
end
```

3.2.4 CSD per STS

Tento blok má za úkol zabránit neúmyslnému beamformingu při vysílání stejných dat z více antén ve stejný čas. Pro předcházení tomuto nežádoucímu jevu jsou jednotlivé časoprostorové streamy vůči sobě cyklicky posunuty o standardem daný časový interval. Této blok se používá pouze, pokud není přítomen beamforming [15].

Tabulka 3.2: Přehled CSD pro STS standardu IEEE 802.11ac [15].

Celkový počet časoprostorových streamů [N _{STS}]	Cyklický posun pro časoprostorový stream n [ns]							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	-	-	-	-	-	-	-
2	0	-400	-	-	-	-	-	-
3	0	-400	-200	-	-	-	-	-
4	0	-400	-200	-600	-	-	-	-
5	0	-400	-200	-600	-350	-	-	-
6	0	-400	-200	-600	-350	-650	-	-
7	0	-400	-200	-600	-350	-650	-100	-
8	0	-400	-200	-600	-350	-650	-100	-750

V následujícím odstavci je ukázkový zdrojový kód. Tento kód využívá smyčky, ve které postupně cyklicky posouvá jednotlivé streamy o daný počet pozic. Tento počet je vypočten vynásobením vzorkovací frekvence a doby zpoždění streamu načtené z Tabulky 3.2. Zaokrouhlení bylo vloženo poté, co byla zjištěna chyba v podobě špatného výpočtu čísla. Byť tato chyba byla v řádu 10^{-12} již nesplňoval podmínku celého čísla pro počet kroků cyklického posunu.

```
%%Cyclic Shift Diversity per STS

%Smyčka pro všechny časoprostorové streamy
for i_csd = 1:wifi_params.general.N_sts

    %Konkrétní stream se cyklicky posune o daný počet symbolů
    CSDOut(:,i_csd) = circshift(CSDIn(:,i_csd),
        round(wifi_params.mapping.csd_per_sts(i_csd)*wifi_params.Fs));

end
```

3.2.5 Spatial Mapping

Má za úkol mapovat časoprostorové streamy do vysílacích řetězců. Toto mapování zahrnuje jednu z následujících funkcí:

- **Direct Mapping** – každý z časoprostorových streamů je připojen přímo na jeden vysílací řetězec
- **Spatial Expansion** – časoprostorové streamy jsou rozšířeny za pomoci maticového násobení a přivedeny na všechny vysílací řetězce
- **Beamforming** – podobně jako Spatial Expansion ale využívá se násobením matic řídicích vektorů

Tato práce uvažuje Direct Mapping a tento blok pouze předává vstupní data na výstup.

3.2.6 Transmission channel

Tento blok simuluje přenosový kanál a pracuje ve dvou základních režimech. Buď jako Additive white Gaussian noise (AWGN) přenosový kanál nebo jako únikový přenosový kanál, jehož jednotlivé přenosové kanály jsou vzájemně nekorelované.

V následujícím odstavci je ukázkový zdrojový kód. Tento kód využívá již vytvořeného generátoru únikového kanálu. Jako první je načten typ přenosového kanálu a výstup vysílacího řetězce. Pokud je zvolen únikový přenosový kanál proběhne inicializace únikového přenosového kanálu pomocí generátoru přítomného ve frameworku WIFI simulátoru. Poté proběhne konvoluce přenosových signálů a hlavní diagonály vygenerované matice a přičtení vygenerovaného AWGN šumu. Použití pouze hlavní diagonály zajistí vzájemně nekorelované přenosové kanály. Pokud je zvolen AWGN kanál proběhne pouze vygenerování AWGN šumu přičtení k signálu.

```

%%Channel model and noise

switch addSomeNoise
case 'fad'

    %Inicializace únikového přenosového kanálu
    channelObj = channel(wifi_params,txObj.nTXant,rxObj.nRXant);

    %Vzájemně nekorelované únikové kanály
    for i_channelPath = 1:wifi_params.general.N_sts

        channelObj.x_h_fadding(i_channelPath,:) =
            conv(txObj.output.x_s(i_channelPath,:),
                channelObj.h(:, :, i_channelPath, i_channelPath));

    end

    %Generování AWGN šumu
    n = 10^(-SNR(i_snr)/20)*((randn(size(channelObj.x_h_fadding)))+
        1j*(randn(size(channelObj.x_h_fadding))))/sqrt(2));

    v = sqrt(wifi_params.mapping.n_fft/wifi_params.mapping.n_tot)*n;

    %Přidání AWGN šumu
    channelFad = channelObj.x_h_fadding + v;

    %Zapsání na výstup
    channelObj.x_hn = channelFad;

case 'awgn'

    %Generování AWGN šumu
    n = 10^(-SNR(i_snr)/20)*((randn(size(txObj.output.x_s)))+
        1j*(randn(size(txObj.output.x_s))))/sqrt(2));

    v = sqrt(wifi_params.mapping.n_fft
        /wifi_params.mapping.n_tot) * n;

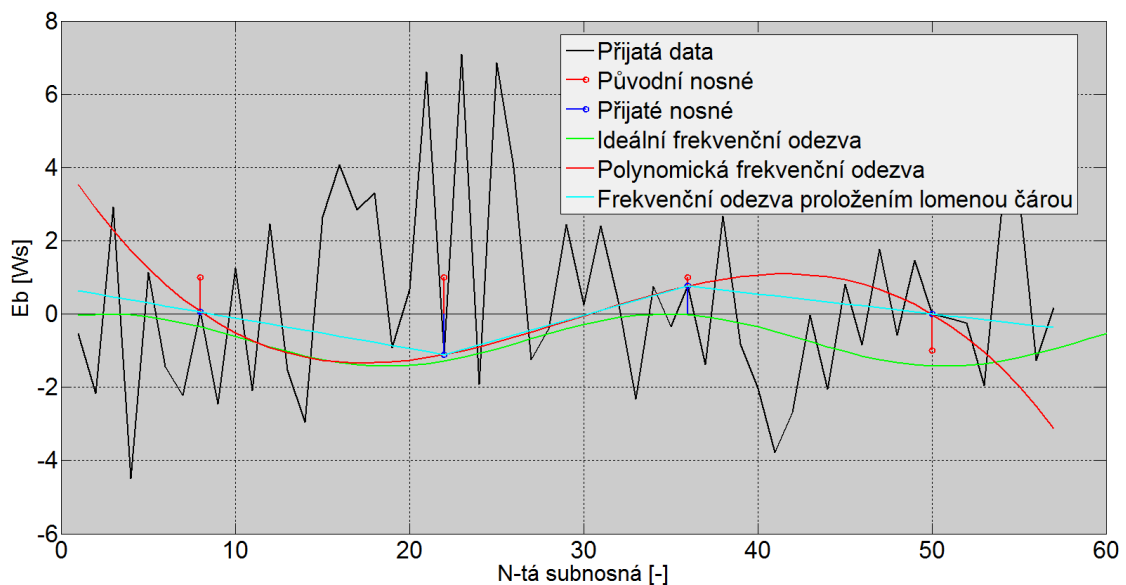
    %Přidání AWGN šumu a přepsání na výstup
    channelObj.x_hn = txObj.output.x_s+v;

end

```

3.2.7 Equalization

Tento blok má za úkol ekvalizaci, česky vyrovnávání, přijatých symbolů na základě odhadu frekvenční charakteristiky jednotlivých časoprostorových streamů. K ekvalizaci je využita ZF ekvalizace, jež je popsána v kapitole 2.6.4. K získání frekvenční odezvy přenosového kanálu jsou využity tři základní možnosti. První možností je načtení perfektní znalosti přenosového kanálu z Transmission channel bloku. Druhou je získání odhadu odezvy pomocí proložení pilotních nosných lomenou čarou a poslední je proložení pilotních nosných polynomicou funkcí n -tého stupně. Pro zmenšení výpočetní náročnosti ekvalizace se využívá faktu, že dělení je rovno násobení převráceným neboli inverzním číslem. Proto je použito dělení signálu frekvenční odezvou místo násobení inverzní frekvenční odezvou.



Obrázek 3.3: Porovnání použitých typů aproximace odhadnuté charakteristiky přenosového kanálu

V následujícím odstavci je ukázkový zdrojový kód. Jako první je prověřen typ ekvalizací. Pokud je zvolena ekvalizace pomocí znalosti frekvenční odezvy přenosového kanálu, je odezva načtena, poté roztažena přes délku celého streamu a jako poslední je signál vydělen odezvou. Pokud je zvoleno proložení lomenou čarou jsou pro každá stream napřed vypočítány koeficienty pro jednotlivé přímky, jimiž jsou jednotlivé nosné proloženy. Poté jsou krajní koeficienty zkopírovány i pro data, jež neleží mezi pilotními nosnými a pomocí těchto koeficientů je vypočtena frekvenční odezva, která se následně roztáhne přes celý datový stream a uložena k dalším frekvenčním odezvám pro jednotlivé streamy. Jako poslední je signál vydělen odezvou. Pokud je zvoleno proložení polynomem, proběhne pro každý stream výpočet koeficientů polynomu, z něhož se vypočítá frekvenční odezva, která je následně roztažena přes celou délku streamu a uložena k dalším frekvenčním odezvám pro jednotlivé streamy. Jako poslední je signál vydělen odezvou.

```

%% Equalization

%Pro zvolený typ ekvalizace
switch wifi_params.general.eqType
    case 'ideal'
        ...

    case 'linear'
        ...

    case 'polynom'

        for i_amountOfAntennas = 1:wifi_params.MCS(i_mcs).N_sts

            %Změna řady hodno přijatých pilotních nosných na matici
            eq_pilots = reshape(y_rx_pilots_adjusted_out(
                i_amountOfAntennas,:),wifi_params.mapping.n_pilot,[]);

            %Výpočet koeficientů odhadu kanálu
            equalization = (wifi_params.mapping.pilots_value.') .*
                eq_pilots(:,1);

            equalization = equalization.';

            %Výpočet koeficientů pro polynom
            Poly = polyfit(wifi_params.mapping.i_pilots,
                equalization,3);

            %Výpočet polynomickeho odhadu kanálu pro datové nosné
            H_rx_eq = polyval(Poly,wifi_params.mapping.i_data);

            %Roztáhni odhad přes celou délku streamu
            H_rx_eq = repmat(H_rx_eq.',new_N_sym,1);
            H_rx_eq = H_rx_eq.';

            %Ulož odhad kanálu
            H_out(i_amountOfAntennas,:) = H_rx_eq;

        end

        %ZF Ekvalizace
        y_rx_data_adjusted_out = y_rx_data_adjusted_out./H_out;

    otherwise

        %Pokud není únikový kanál, výstup = vstup
        y_rx_data_adjusted_out = y_rx_data_adjusted_out;

end

```

3.2.8 Spatial Demapping

Používá se pro prostorové demapování dvou vzájemně korelovaných zdrojů signálu při použití jedné přijímací antény a stejné nosné frekvence. Z důvodu použití nekorelovaného přenosového kanálu má tento blok v simulátoru za úkol pouze přepsat vstup na výstup [25], [26].

3.2.9 CSD per STD

Tento blok má za úkol zpětně cyklicky posunout časoprostorové streamy o standardem daný časový interval. Tento blok se používá pouze, pokud není přítomen beamforming a je přítomen blok CSD per STD ve vysílači.

```
%% CSD per STS

%Pro každý časoprostorový stream
for i_csd = 1:wifi_params.general.N_sts

    %Zpětně cyklicky posuň daný časoprostorový steam
    CSDOut(:,i_csd) = circshift(CSDIn(:,i_csd),round(-
        (wifi_params.mapping.csd_per_sts(i_csd)*wifi_params.Fs)));
end
```

3.2.10 STBC Decoder

Tento blok má za úkol dekodovat časoprostorové streamy na jednotlivé prostorové streamy.

V následujícím odstavci je ukázkový zdrojový kód. Tento kód využívá STBC dekodér integrovaný v Communications System Toolbox, který využívá i původní framework. Výhody jsou v jednoduchosti použití či případné modifikace a minimalizace chyb při vývoji. Jako první se prověří podmínka, jestli je zapnuto STBC kódování. Pokud není, je dekodování přeskočeno a vstup je přepsán na výstup. Pokud je použito, je napřed inicializován výstup a falešná frekvenční odezva kanálu, jež se rovná jedné, čímž je zajištěno, že STBC dekodér neprovádí žádnou ekvalizaci. Poté je inicializován STBC dekodér a poté jsou časoprostorové streamy dekodovány. Na každé dva vstupní časoprostorové streamy připadá jeden výstupní prostorový stream. Tento stream je poté přidán na výstup k předchozím, již dekodovaným prostorovým streamům.

```

%% STBC DEMODULATION

%Inicializace proměnných
chEst = ones([length(y_rx_data_adjusted_out.),2,2]);

%Inicializace dekodéru
hOSTBCDec = comm.OSTBCCombiner;
release(hOSTBCDec);
hOSTBCDec.NumReceiveAntennas = 2;
hOSTBCDec.NumTransmitAntennas = 2;

%Pro každé dva časoprostorové streamy
for i_STBC = 1:2:wifi_params.general.N_sts

    %Načtení požadovaných časoprostorových streamů
    STBCDecTransfer = OSTBCDecIn (:, i_STBC:i_STBC+1);

    %Dekódování
    STBCDecoded = step (hOSTBCDec, STBCDecTransfer, chEst);

    %Připsání na výstup
    STBCDecOut = [STBCDecOut STBCDecoded];

end

```

3.2.11 Stream Deparser

Tento blok má za úkol sloučit N_{SS} prostorových streamů na N_{ES} datových streamů.

V následujícím odstavci je ukázkový zdrojový kód. Tento kód uvažuje libovolný počet N_{SS} prostorových a libovolný počet N_{ES} datových streamů. Jako první jsou prostorové streamy spojeny v jeden datový tok a poté je tento datový tok rovnoměrně rozdělen na N_{ES} datových streamů.

```

%% STREAM DEPARSING (N_ss -> N_es)

%Výpočet parametrů dělení
s_parser = max([(log2(MCS.M))/2, 1]);
S_parser = MCS.N_ss*s_parser;

%Transformace každého N_ss streamu na matici o s řádcích
for i = 1:MCS.N_ss
    streamDeparsingTransfer = [ streamDeparsingTransfer;
                               reshape(streamDeparsingIn(:,i),s_parser,[]) ];
end

%Transformace na matici o S řádcích
streamDeparsingTransfer2 = reshape(streamDeparsingTransfer,[],1);
streamDeparsingTransfer2 = reshape(streamDeparsingTransfer2,
                                    S_parser,[]);

%Seřazení sloupců matice do správných N_es streamů
for i = 1:MCS.N_es
    streamDeparsingOut2(:,i) =
        reshape(streamDeparsingTransfer2(:,i:MCS.N_es:end),[],1);
end

```

3.2.12 BCC Encoder Deparser

Jedná se o multiplexor, který spojuje jednotlivé bity datový streamů z BCC dekodérů na jediný datový stream.

V následujícím odstavci je ukázkový zdrojový kód. Tento kód je vytvořen univerzálně a uvažuje libovolný počet datových streamů N_{ES} . Jako první je přiřazení výstupu předchozího bloku. Poté je provedeno seřazení jednotlivých bitů pomocí funkce integrované funkce `reshape`, jež v tomto případě za sebe poskládá všechny sloupce matice, jejíž řádky představují jednotlivé datové streamy. Takto poskládaný datový stream je poté přepsán na výstup.

```
%% BCC ENCODER DEPARSING

%Poskládání jednotlivých bitů každého datového streamu za sebe
inverseParsingTransfer = reshape(inverseParsingIn.',
                                1, size(inverseParsingIn, 1) * size(inverseParsingIn, 2));

%Přepiš datový stream na výstup
inverseParsingOut = inverseParsingTransfer.';
```

3.3 Nastavení WIFI simulátoru

Nastavení parametrů simulace WIFI simulátoru se provádí v souboru s názvem *wifi_sim_batch.m*, pomocí kterého se i celý simulátor spouští stejně, jako v původním frameworku WIFI simulátoru.

V simulátoru lze nastavit následující parametry:

- Použitý IEEE 802.11 standard
- Šířka použitého přenosového pásma
- Délka ochranného intervalu
- Typ kódování
- Typ detekce
- Počet prostorových streamů
- Použití STBC
- Počet oktetů uživatelských dat
- MCS
- Typ Přenosového kanálu
- Typ ekvalizace
- SNR
- Počet rámců pro každé SNR

V následujícím odstavci je popsán ukázkový zdrojový kód, ve kterém se jednotlivé parametry nastavují. Testovány byly pouze parametry, jež odpovídají zadání této práce.

```

%% define parameters -----

%Definice standardu - '802dot11g', '802dot11n', '802dot11ac'
wifi_standard = '802dot11ac';

%Šířka kanálu - 'CBW20', 'CBW40', 'CBW80'
CH_BANDWIDTH = 'CBW20';

%Délka ochranného intervalu - 'short', 'normal', 'doubled'
GuardInterval = 'normal';

%Typ kódování - 'BCC'
coding_type = 'BCC';

%Typ detekce - 'HD' (Hard decision); 'LLR' (Log-likelihood ratio);
decision_type = 'LLR';

%Počet prostorových stremů - od počtu stremů:do počtu streamů
SpatialStreams = 3:4;

%Použití STBC - true, false;
includeSTBC = false;

%Počet oktetů uživatelských dat (0--65535)
LENGTH_vec = 100;

%Použité MCS - od:do
MCSvec = 1:2;

%Typ Přenosového kanálu - 'awgn', 'fad'
channelType = 'fad';

%Typ ZF ekvalizace - 'ideal', 'linear', 'polynom'
eqType = 'ideal';

%Pro tyto hodnoty SNR - od:do
SNR = -5:5:25;

%Počet rámců pro každé SNR
N_frames = 100;

```

4 SIMULACE MIMO MODELŮ

V této kapitole je popsána realizace jednotlivých modelů MIMO technologií v programovém prostředí MATLAB ve verzi R2014b.

4.1 Parametry simulace

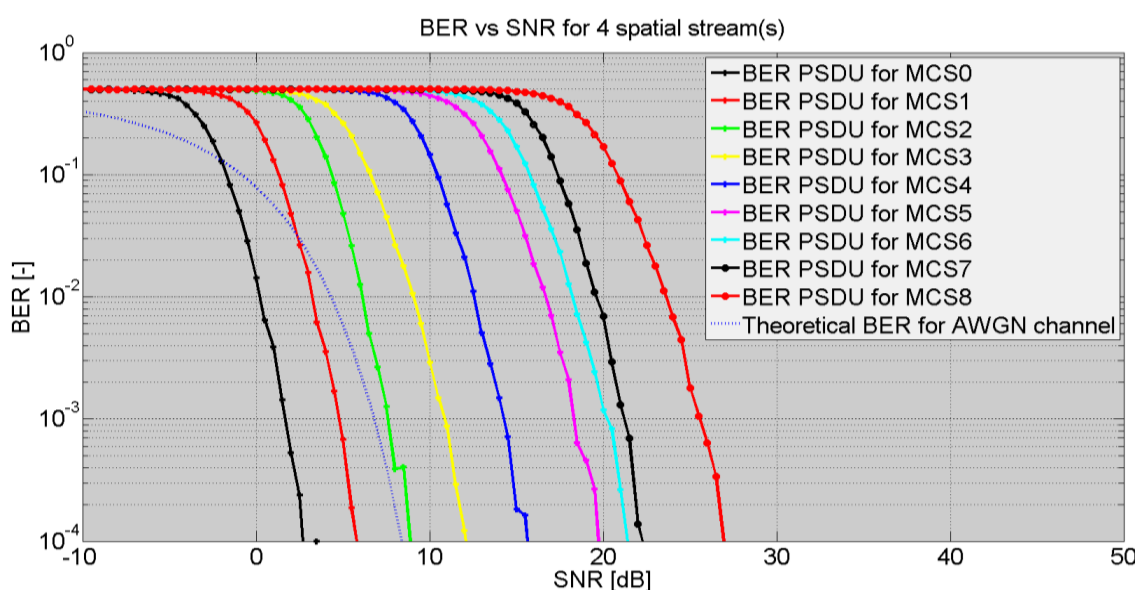
Pro simulaci byli zvoleny tyto společné základní parametry:

- wifi_standard = '802dot11ac';
- CH_BANDWIDTH = 'CBW20';
- GuardInterval = 'normal';
- coding_type = 'BCC';
- decision_type = 'LLR';
- N_frames = 100;

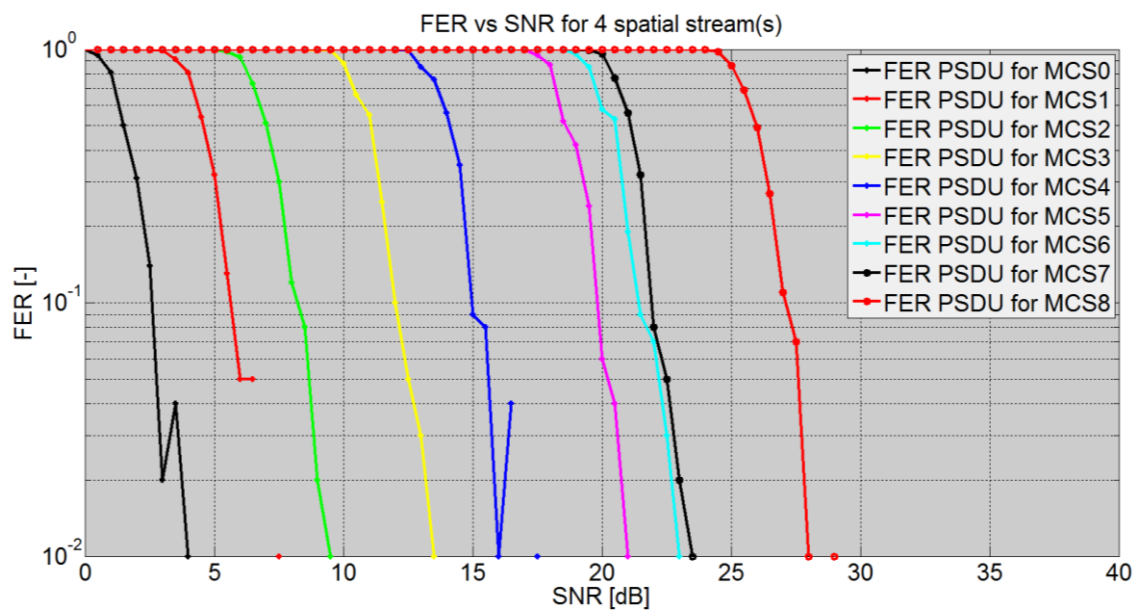
4.2 Simulace v AWGN přenosovém kanálu

Simulace IEEE 802.11ac v přenosovém AWGN kanálu pro jednotlivé MCS s MIMO konfigurací pro 4 prostorové streamy a s vypnutým STBC. Výsledky simulace se shodují s teoretickými předpoklady. V přenosových rychlostech, jež se počítají z FER, je odchylka od teoretické maximální rychlosti. FER je nepřímo ovlivněn zaokrouhlováním při výpočtu celkového počtu vzorků na jeden OFDM symbol, rovnice 4.1. Čím menší je odchylka při zaokrouhlení, tím menší FER a tím blíže je přenosová rychlost k teoretické maximální. Teoretická chybovost je uvedena pro BPSK.

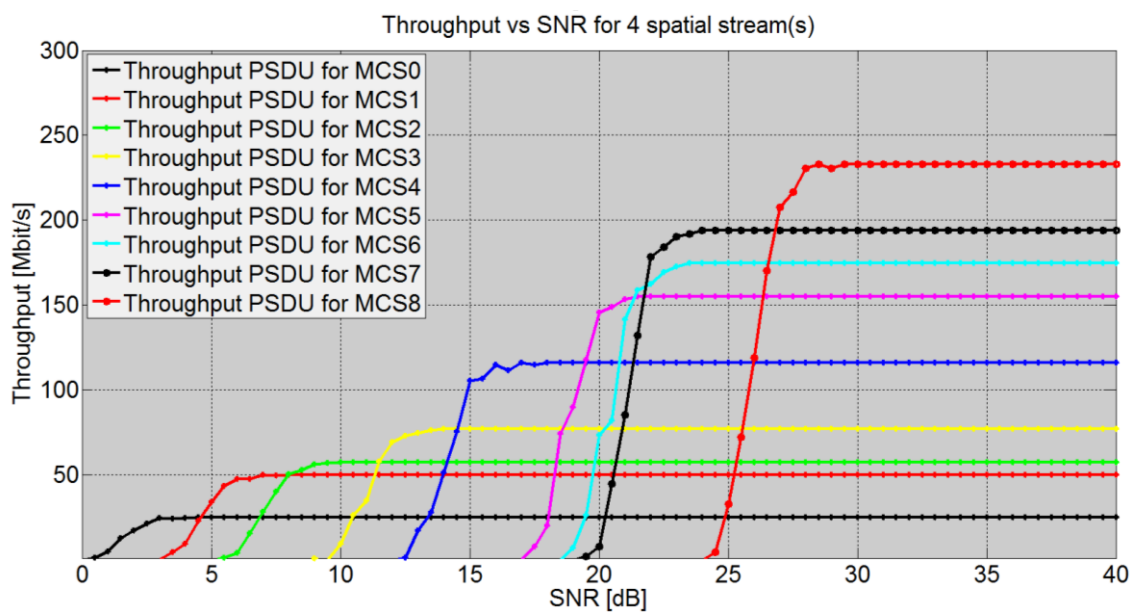
$$N_{SYM} = m_{STBC} \times \left\lceil \frac{8 * PSDU_LENGTH + N_{service} + N_{tail} + N_{ES}}{m_{STBC} * N_{DBPS}} \right\rceil \quad (4.1)$$



Obrázek 4.1: BER pro jednotlivé MCS pro AWGN přenosový kanál

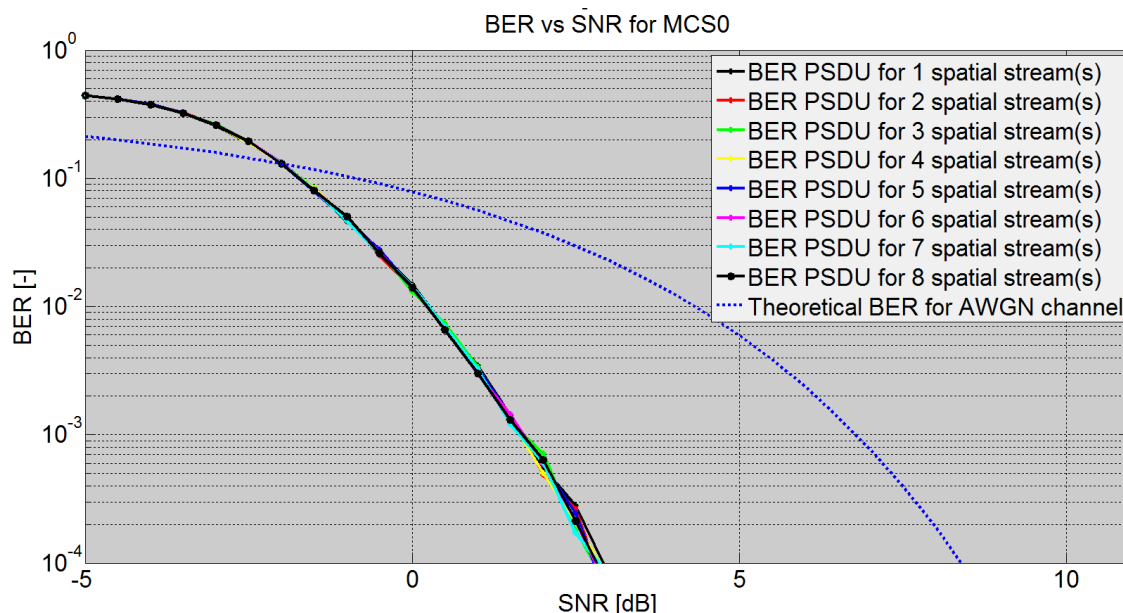


Obrázek 4.2: FER pro jednotlivé MCS pro AWGN přenosový kanál

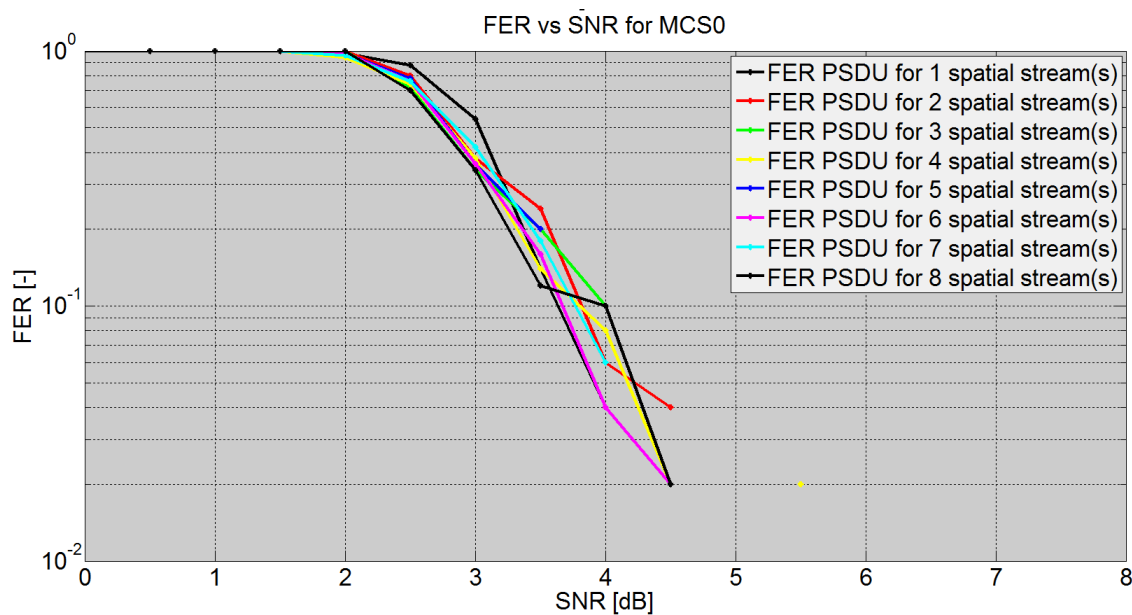


Obrázek 4.3: Propustnost pro jednotlivé MCS pro AWGN přenosový kanál

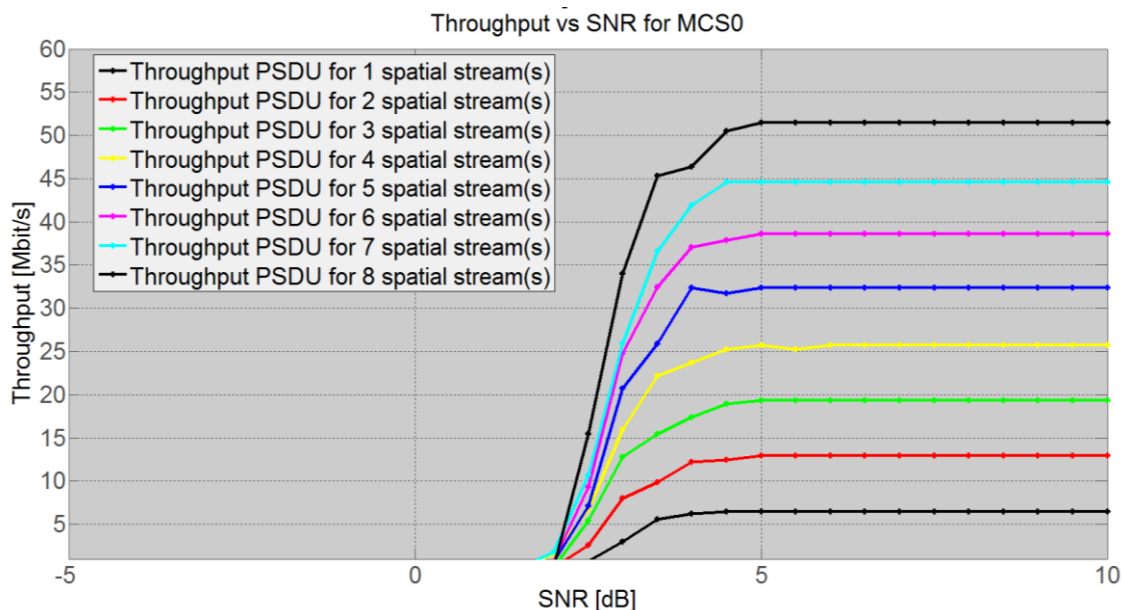
Dále následuje simulace přenosového AWGN kanálu pro jednotlivé N_{ss} s konfigurací MCS0 a s vypnutým STBC. V BER simulaci je vidět, že počet streamů neovlivňuje bitovou chybovost. Protože u této konkrétní simulace byla použita stejná délka PSDU má FER již minimální rozdíly a dokazuje, že použití více streamů nemá na FER vliv. Teoretická chybovost je uvedena pro BPSK.



Obrázek 4.4: BER pro jednotlivé N_{ss} pro AWGN přenosový kanál

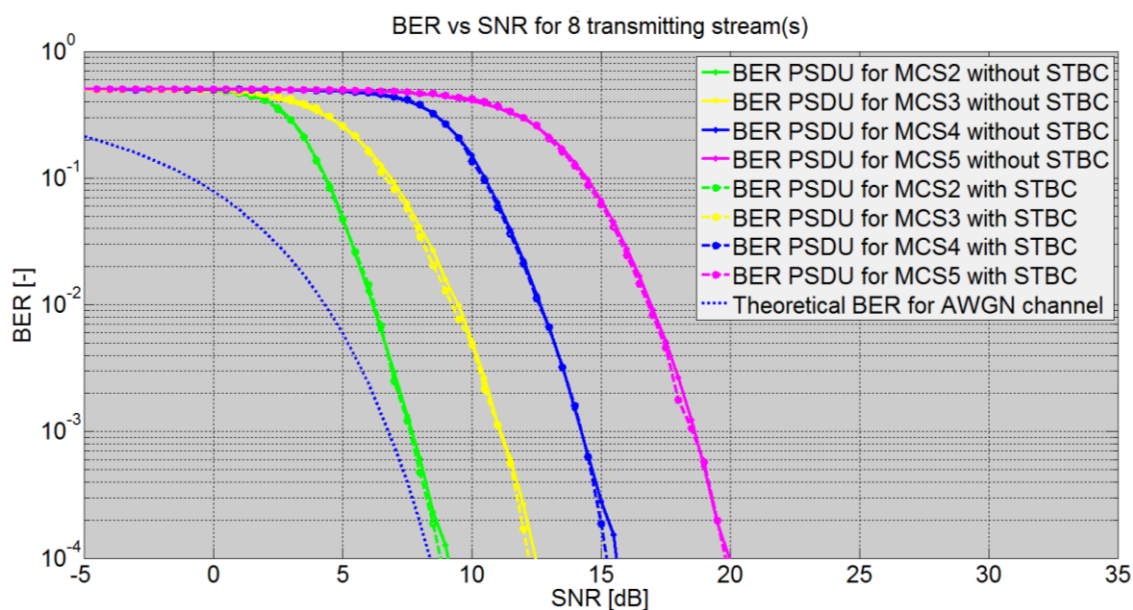


Obrázek 4.5: FER pro jednotlivé N_{ss} pro AWGN přenosový kanál

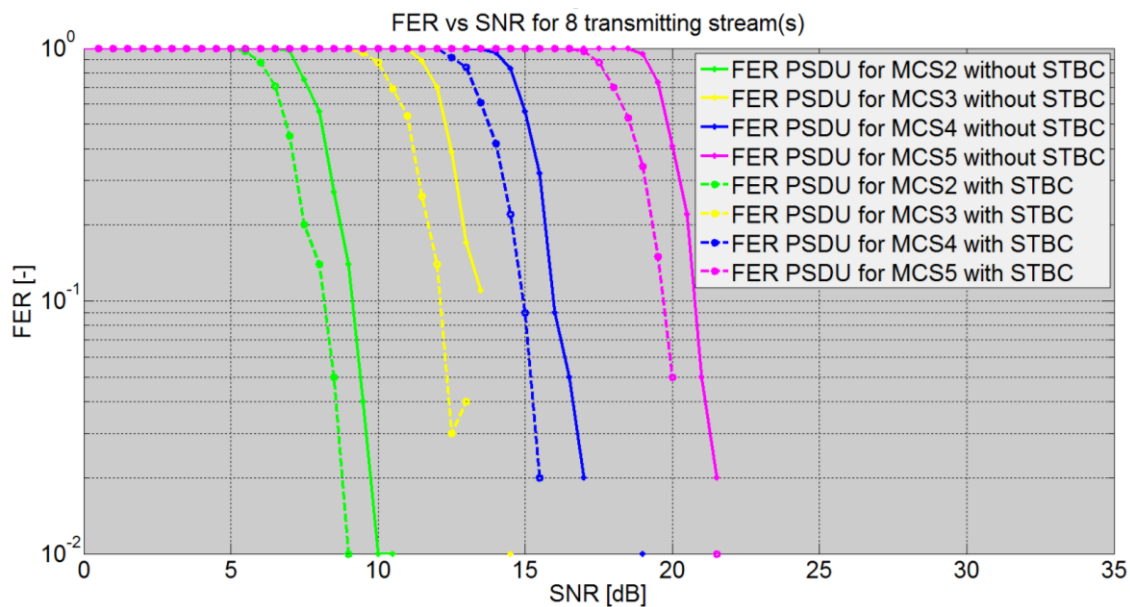


Obrázek 4.6: Propustnost pro jednotlivé N_{ss} pro AWGN přenosový kanál

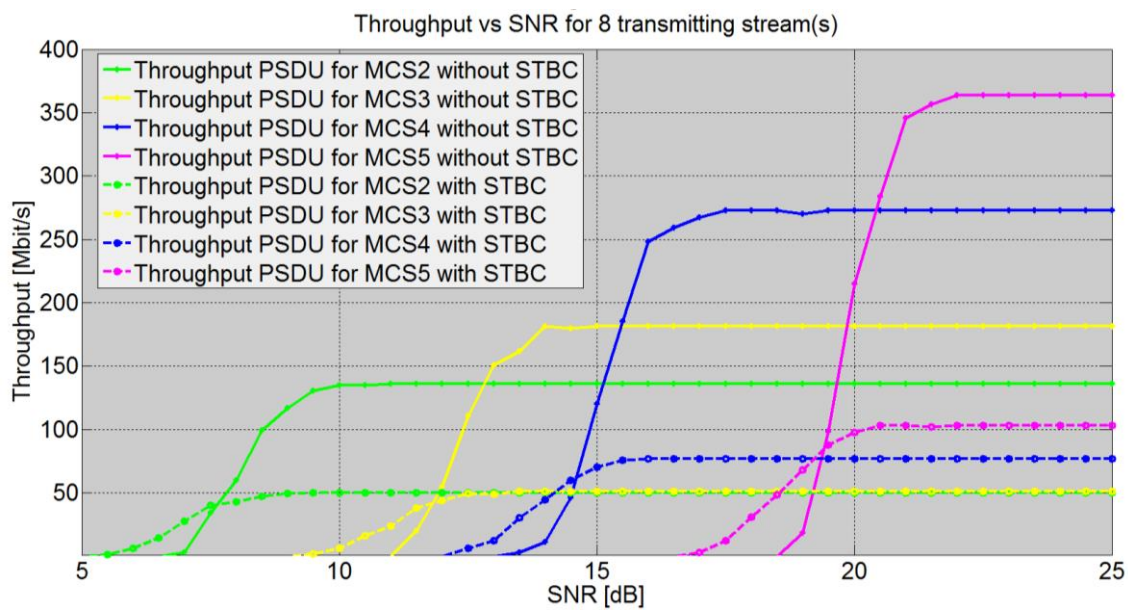
Pro porovnání výhod a nevýhod STBC následuje simulace přenosového AWGN kanálu pro vybrané MCS a se zapnutým STBC pro maximální počet přenosových streamů. Tato simulace je zatížena chybou v podobě vzniklou při volbě náhodně dlouhého pole PSDU pro jednotlivé prostorové streamy. To má za následek rozdílný počet celkového počtu vzorků na OFDM symbol, což způsobuje rozdílné FER pro jednotlivé streamy. Ze simulace je vidět, že díky použití STBC je při zachování stejné chybovosti FER = 10^{-1} zisk kódování 1-2 dB. Teoretická chybovost je uvedena pro BPSK.



Obrázek 4.7: Porovnání BER pro vybrané MCS s STBC



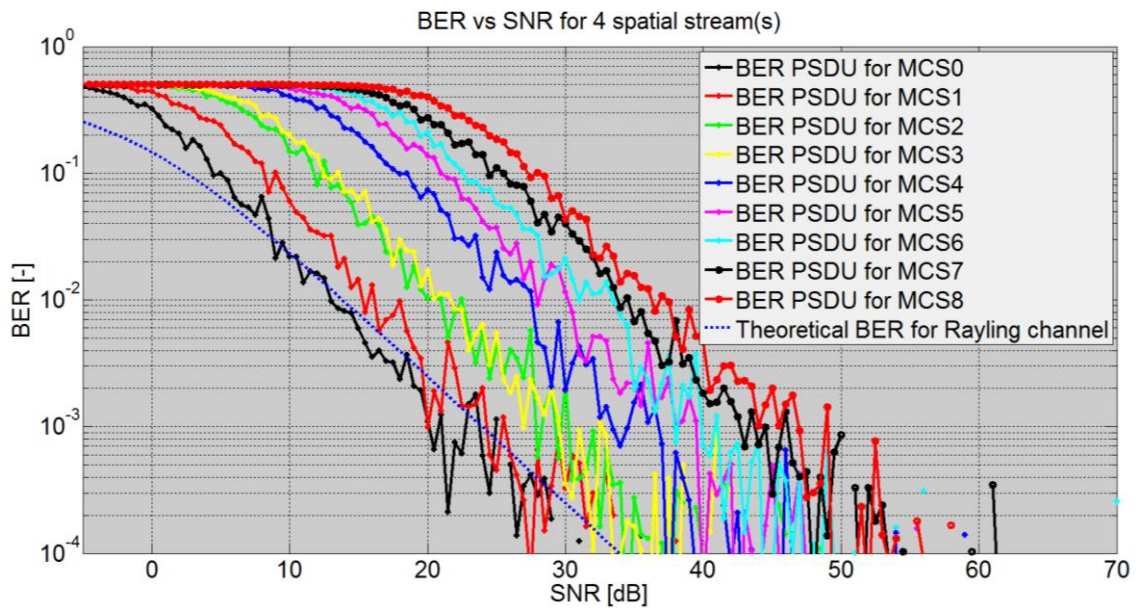
Obrázek 4.8: Porovnání FER pro vybrané MCS s STBC



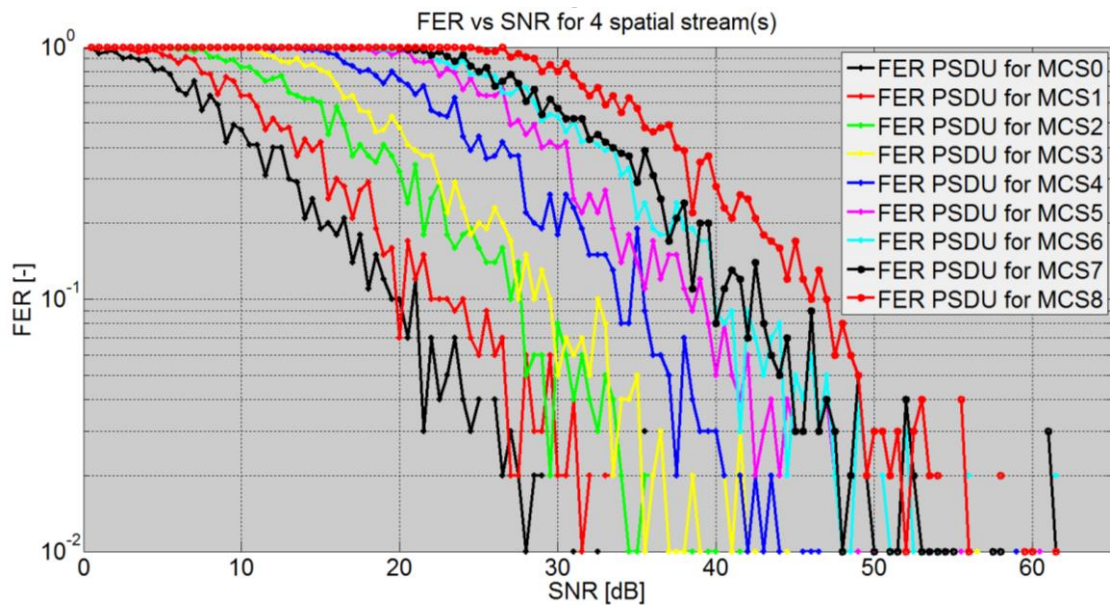
Obrázek 4.9: Porovnání propustnosti pro vybrané MCS s STBC

4.3 Simulace v únikovém přenosovém kanálu

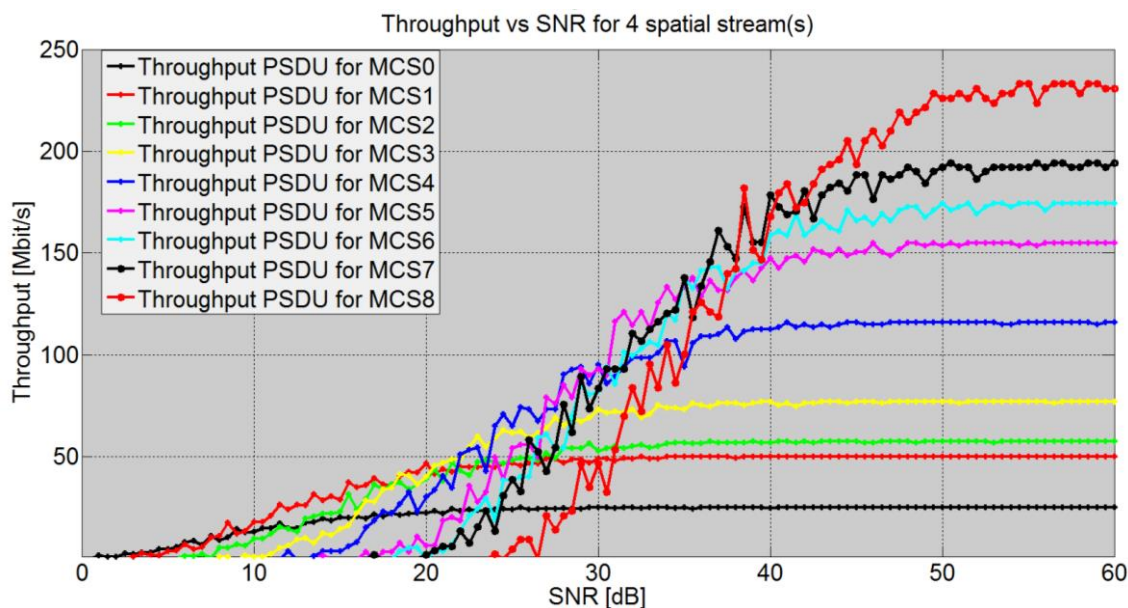
Simulace IEEE 802.11ac v přenosovém únikovém kanálu pro jednotlivé MCS s MIMO konfigurací pro 4 prostorové streamy s vypnutým STBC a ideální znalostí přenosového kanálu. Výsledky simulace se shodují s teoretickými předpoklady. V přenosových rychlostech je odchylka od teoretické maximální rychlosti, jež je popsána v kapitole 4.2. Teoretická chybovost je uvedena pro MCS0. Teoretická chybovost je uvedena pro BPKS.



Obrázek 4.10: BER pro jednotlivé MCS pro únikový přenosový kanál

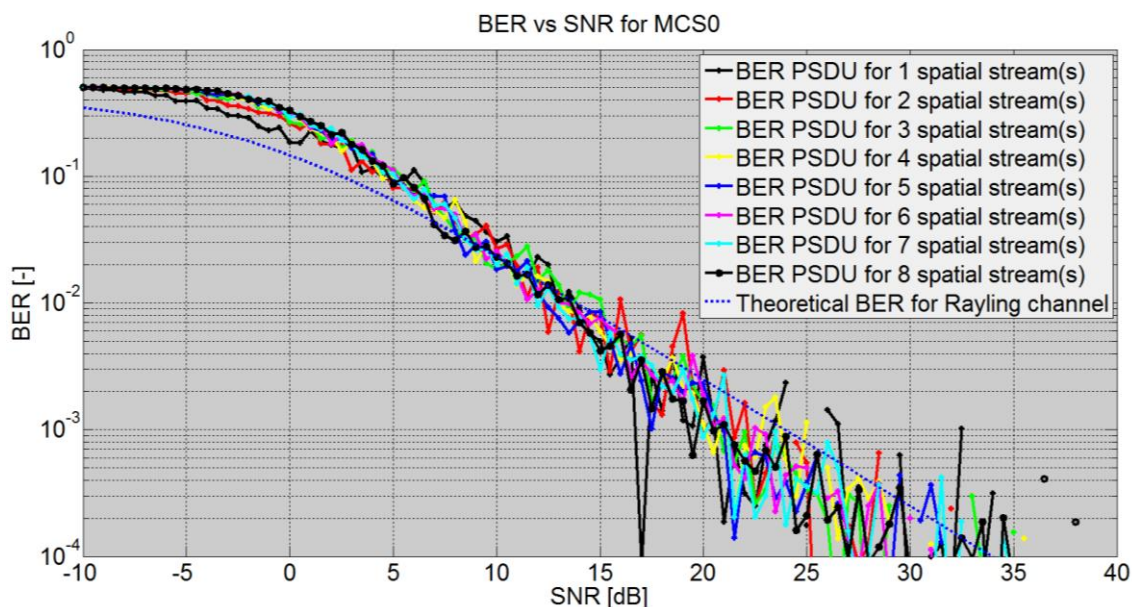


Obrázek 4.11: FER pro jednotlivé MCS pro únikový přenosový kanál

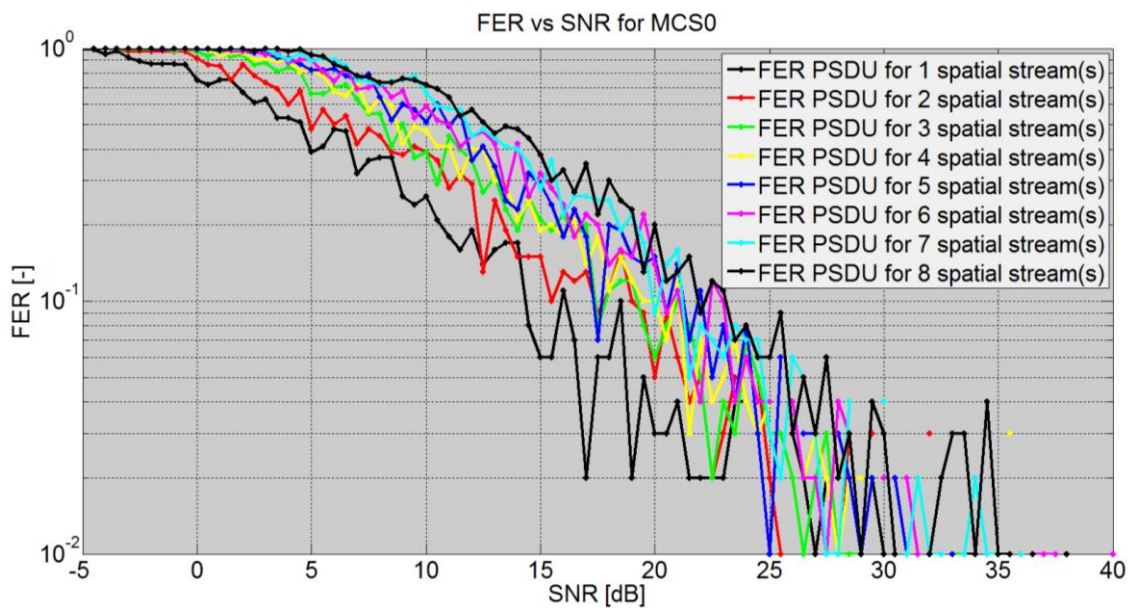


Obrázek 4.12: Propustnost pro jednotlivé MCS pro únikový přenosový kanál

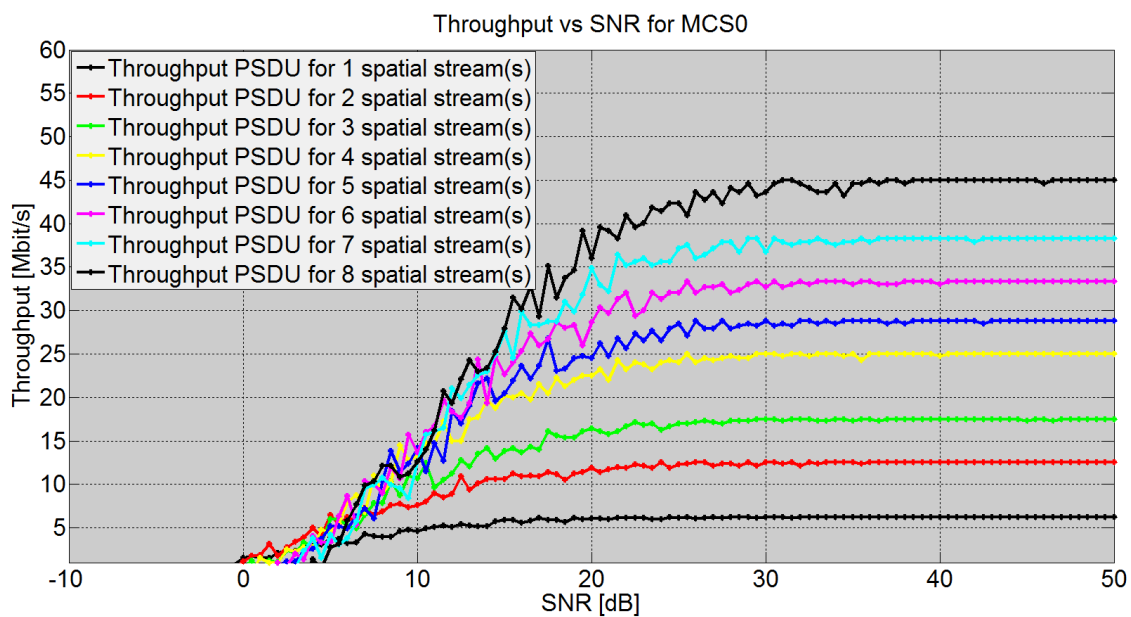
Dále následuje simulace přenosového únikového kanálu pro jednotlivé N_{ss} s konfigurací MCS0 a s vypnutým STBC. V BER simulaci je vidět, že počet streamů neovlivňuje bitovou chybovost. FER v této simulaci je zatíženo chybou vzniklou při volbě náhodně dlouhého pole PSDU pro jednotlivé prostorové streamy. Čím více streamů tím delší pole bylo. Teoretická chybovost je uvedena pro BPSK.



Obrázek 4.13: Propustnost pro jednotlivé N_{ss} pro AWGN přenosový kanál

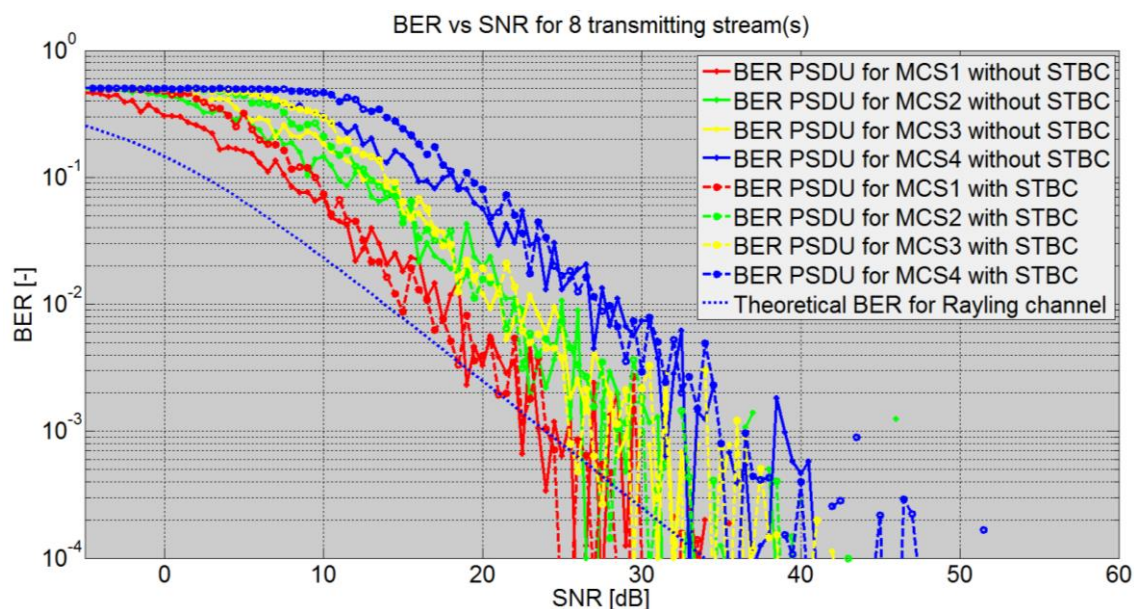


Obrázek 4.14: FER pro jednotlivé N_{ss} pro AWGN přenosový kanál

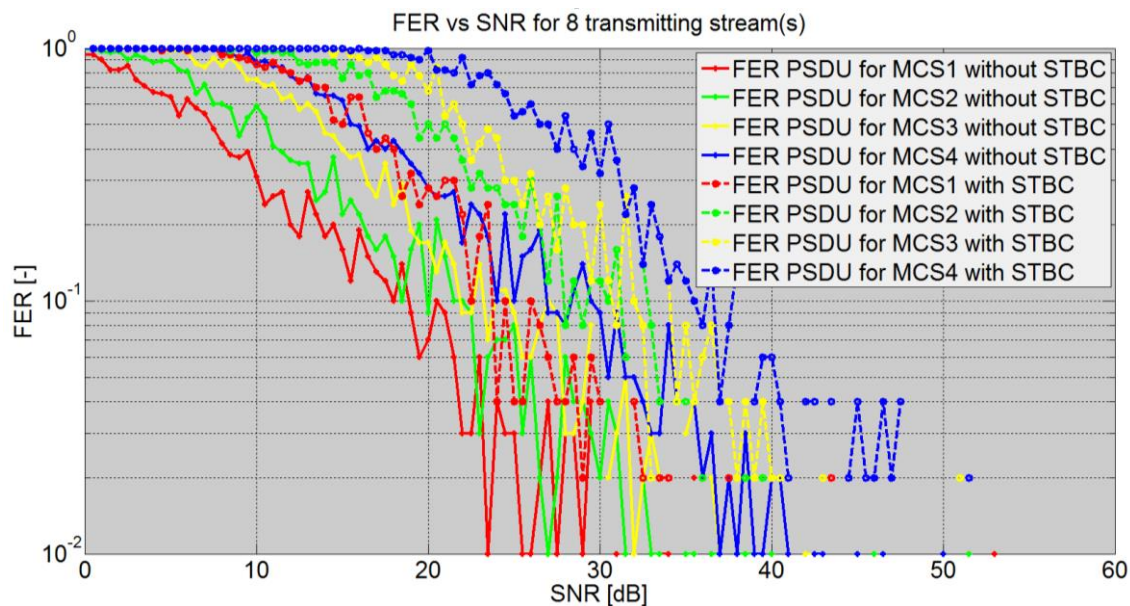


Obrázek 4.15: Propustnost pro jednotlivé N_{ss} pro AWGN přenosový kanál

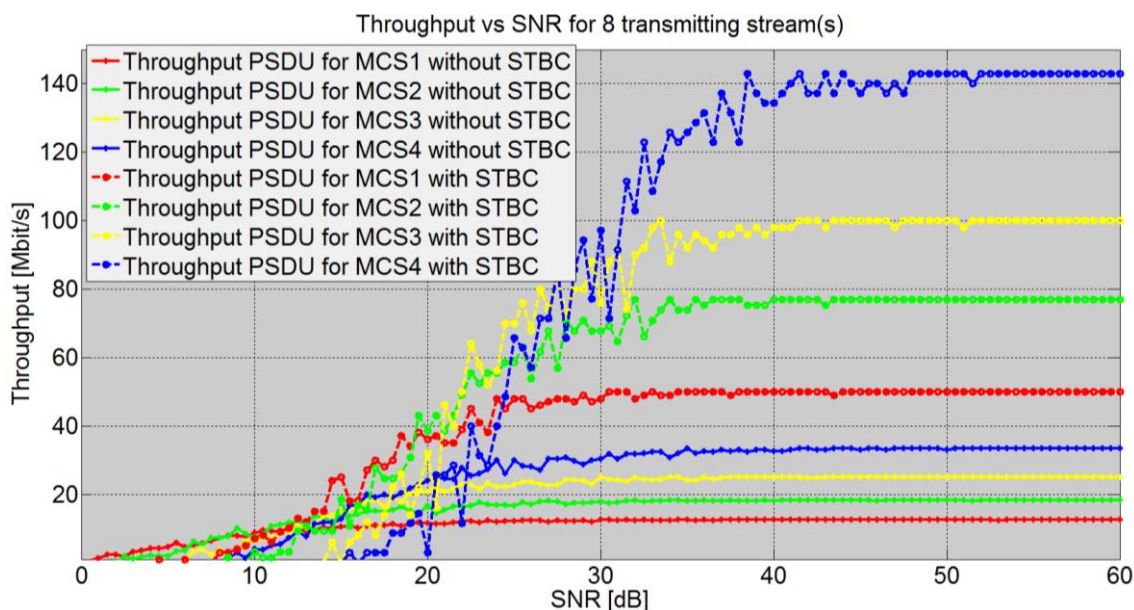
Pro porovnání výhod a nevýhod STBC následuje simulace přenosového únikový kanálu pro vybrané MCS a se zapnutým STBC pro maximální počet přenosových streamů. Ze simulace je vidět, že díky použití STBC je při zachování stejné chybovosti FER = 10^{-1} zisk kódování 4-12 dB pro vybrané MCS. Teoretická chybovost je uvedena pro BPSK.



Obrázek 4.16: Porovnání BER pro vybrané MCS s STBC



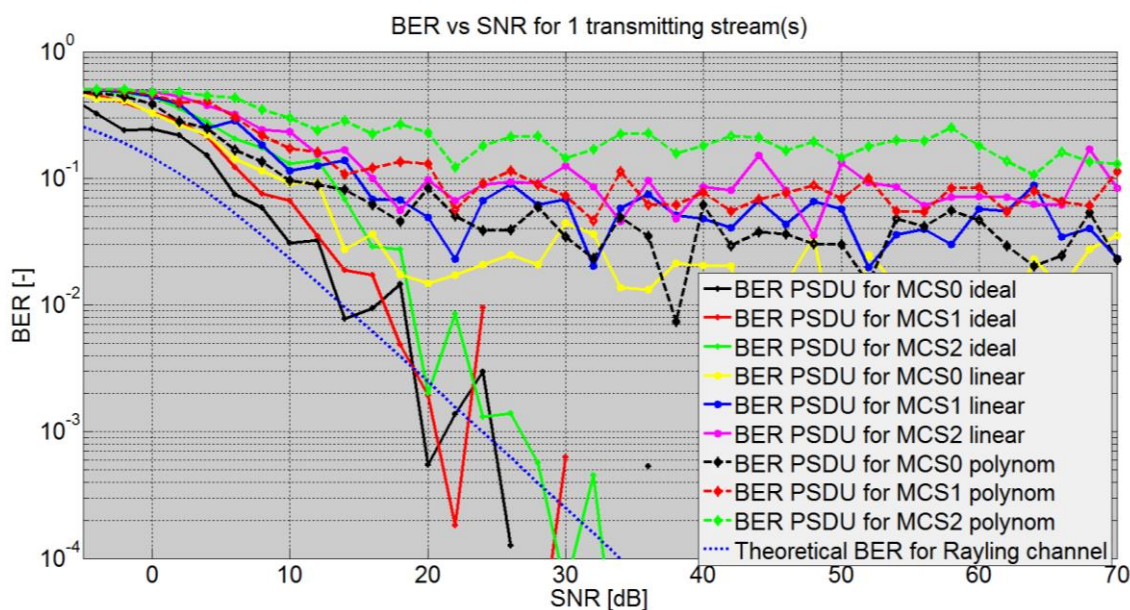
Obrázek 4.17: Porovnání FER pro vybrané MCS s STBC



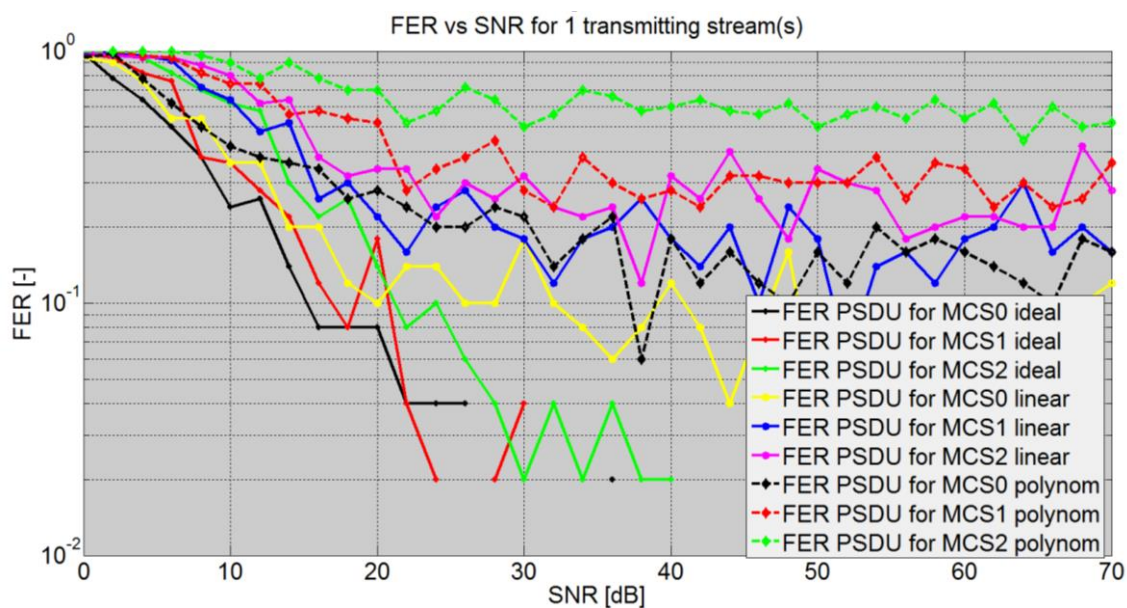
Obrázek 4.18: Porovnání propustnosti pro vybrané MCS s STBC

4.4 Porovnání metod odhadu přenosového kanálu

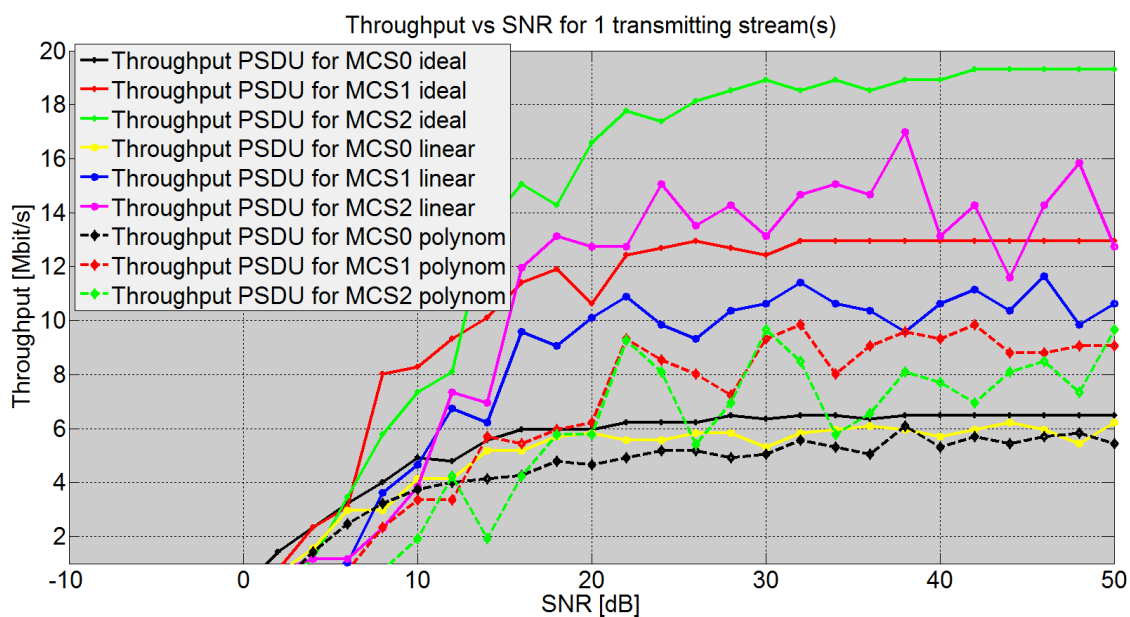
Následují simulace různých způsobů odhadu přenosového kanálu pro únikový kanál. Ze simulací je vidět, že odhady velice zaostávají za ideální znalostí a pro MCS vyšší, než MCS2 jsou již nevýhodné, jelikož přenosová rychlost dokonce klesá. To je způsobeno použitím základních způsobů odhadu kanálu a malým počtem nosných použitých pro odhad, viz. Obr 3.3. Od poměru SNR větší, než 20 dB již také je minimálně klesá chybovost a nenarůstá přenosová rychlost. Teoretická chybovost je uvedena pro BPKS.



Obrázek 4.19: Porovnání BER pro různé metody odhadu a vybrané MCS



Obrázek 4.20: Porovnání FER pro různé metody odhadu a vybrané MCS



Obrázek 4.21: Porovnání propustností pro různé metody odhadu a vybrané MCS

5 ZÁVĚR

Zadáním diplomové práce bylo prostudovat vlastnosti fyzické vrstvy standardu IEEE 802.11ac a zaměřit se na technologii MIMO. Kromě fyzické vrstvy je v této práci probrána i část linkové vrstvy, tedy LLC a MAC podvrstvy, spadající pod standard IEEE 802.11ac. V rámci fyzické vrstvy byla probrána použitelná frekvenční pásma, přístupové a modulační techniky, formát rámce fyzické vrstvy, jednotlivé přenosové módy a ve vývojovém prostředí MATLAB vytvořeny základní modely. Tyto modely byly simulovány a výsledky graficky prezentovány.

Dále byl vytvořen nástroj pro simulaci IEEE 802.11ac včetně MIMO ve vývojovém prostředí MATLAB. Tento nástroj staví na frameworku WIFI simulátoru poskytnutého vedoucím práce. Součástí vývoje bylo také co nejméně zasahovat do původního frameworku WIFI simulátoru. V simulátoru poté byly simulovány modely pro různé MCS, přenosové kanály, metody odhadu přenosového kanálu a výsledky byli prezentovány grafiky pro porovnání.

Výsledkem této práce je program pro simulaci standardu IEEE 802.11ac včetně MIMO a následná simulace. Některé simulace jsou zatíženy chybou způsobenou volbou různé délky pro jednotlivé PSDU, který nemohla být z důvodu časové náročnosti simulace opravena. Simulace i přesto vyšla dle teoretických předpokladů. Z výsledků simulace je vidět, že STBC je vhodné použít u únikového přenosového kanálu, kde dokáže zvýšit kódový zisk o více než 4 dB v závislosti na použitém MCS. Simulace vytvořené metody odhadu přenosového kanálu pomocí proložení pilotních nosných odhalila, že při použití této metody vhodné použít pouze MCS0 až MCS2, tedy BPSK a QPSK modulaci. Vícestavové modulace již měly nižší přenosovou rychlost.

LITERATURA

- [1] SPONSORED BY LAN/MAN STANDARDS COMMITTEE OF THE IEEE COMPUTER SOCIETY. IEEE standard for information technology telecommunications and information exchange between systems: local and metropolitan area networks--specific requirements [online]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012 [cit. 2016-12-12]. ISBN 978-073-8172-453. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2012.pdf>
- [2] IEEE 802.11. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11
- [3] *IEEE 802.11 ARCHIVE DOCUMENTATION* [online]. the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE), 2015 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.ieee802.org/11/Documents/DocumentArchives/>
- [4] SAISHANKAR N, DEBASHIS DASH, HASSAN EL MADI, AND GURU GOPALAKRISHNAN. *WiGig and IEEE 802.11ad* [online]. Tensorcom Inc., 5900 Pasteur Court, Carlsbad, CA 92008 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1211/1211.7356.pdf>
- [5] *Introduction to Wireless LAN and IEEE 802.11* [online]. 2013 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: http://www.tutorial-reports.com/wireless/wlanwifi/introduction_wifi.php
- [6] Z. KOCUR, M. ŠAFRÁNEK. *Fyzická vrstva Wi-Fi* [online]. 2008 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008050006>. České vysoké učení technické v Praze, FEL.
- [7] Logical link control. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Logical_link_control
- [8] BREEZE WIRELESS COMMUNICATIONS LTD. *IEEE 802.11 Technical Tutorial* [online]. Tel Aviv 61131, ISRAEL [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: https://classes.soe.ucsc.edu/cmpe257/Spring03/papers/802_11tut.pdf
- [9] IEEE 802.11 (legacy mode). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11_\(legacy_mode\)](https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11_(legacy_mode))
- [10] GEIER, Jim. *Wireless LANs* [online]. Second Edition. Indiana, USA: Sams Publishing [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: http://materias.fi.uba.ar/6637/material/SAMS_Wireless_Lans.pdf
- [11] RASIKA NAYANAJITH. *CWAP – MAC Header : Frame Control* [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://mrnciew.com/2014/09/27/cwap-mac-header-frame-control/>
- [12] *How 802.11 Wireless Works* [online]. Microsoft [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: [https://technet.microsoft.com/cs-cz/library/cc757419\(v=ws.10\).aspx](https://technet.microsoft.com/cs-cz/library/cc757419(v=ws.10).aspx)
- [13] *WLAN – Frame Structure* [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: http://www.sharetechnote.com/html/WLAN_FrameStructure.html
- [14] MATTHEW S. GAST. *802.11ac: A Survival Guide: Wi-Fi at Gigabit and Beyond* [online]. O'Reilly Media, 2013 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://chimera.labs.oreilly.com/books/1234000001739/ch03.html>

- [15] SPONSOR a LAN/MAN STANDARDS COMMITTEE OF THE IEEE COMPUTER SOCIETY. IEEE standard for information technology: telecommunications and information exchange between systems : local and metropolitan area network-- specific requirements [online]. 2013 [cit. 2016-12-12]. ISBN 978-073-8188-607. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11ac-2013.pdf>
- [16] LISA WARD. *802.11ac Technology: Introduction* [online]. Rohde & Schwarz GmbH & Co., 2012 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: www.rohde-schwarz.com
- [17] OFDM Transmission. *ETutorials.org* [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://etutorials.org/Networking/wimax+technology+broadband+wireless+access/Part+Two+WiMAX+Physical+Layer/Chapter+5+Digital+Modulation+OFDM+and+OFDMA/5.2+OFDM+Transmission/>
- [18] MATTHEW S. GAST. *802.11ac: A Survival Guide: Wi-Fi at Gigabit and Beyond* [online]. O'Reilly Media, 2013 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://chimera.labs.oreilly.com/books/1234000001739/ch02.html>
- [19] BCC and LDPC Encoders. *Keysight Technologies* [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/n7617b/Content/Main/LDPCEncoding.htm>
- [20] SCHINDLER, SCHULZ. *Introduction to MIMO: Application Note* [online]. Rohde & Schwarz GmbH & Co., 2009 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: www.rohde-schwarz.com
- [21] Shannon–Hartley theorem. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Shannon%E2%80%93Hartley_theorem
- [22] MARŠÁLEK, Roman. *Teorie rádiové komunikace – simulace v SW Matlab* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012 [cit. 2016-12-12]. ISBN 978-80-214-4504-8.
- [23] KRISHNA SANKAR MADHAVAN PILLAI. MIMO. In: *Dsplog.com* [online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.dsplog.com/category/mimo/>
- [24] FERRAN CONILLERA VILAR. *Implementation of Zero Forcing an MMSE equalization techniques in OFDM*. Fortaleza, Brasil, 2014. FUNDAÇÃO EDSON QUEIROZ
- [25] Stream Deparser. IEEE [online]. IEEE Xplore Digital Library [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6240271/>
- [26] Tutorial on 802.11n PHY layer: Part 3. EETimes [online]. 2007 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1273479
- [27] MILOŠ, J.; POLÁK, L.; SLANINA, M.; KRATOCHVÍL, T. Link- Level Simulator for WLAN Networks. In *International Workshop on Link- and System Level Simulations (IWSLS²)*. 2016. s. 1-4. ISBN: 978-3-200-04687- 0.