

**Návrh frameworku pro simulaci  
parametrů fyzické vrstvy systému  
LTE/SAE**

**Framework Proposal for Simulation  
of Physical Layer Parameters in  
LTE/SAE System**



**Tuto stránku nahradíte v tištěné verzi práce oficiálním zadáním Vaší diplomové či bakalářské práce.**



Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 26. dubna 2016



.....



Mé poděkování patří Ing. Libor Michalek, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, díky které tato práce vznikla.





## **Abstrakt**

Cílem této práce je detailnější seznámení s fyzickou vrstvou technologie LTE. Podrobněji popisuje funkce této oblasti, jednotlivé parametry a jejich rozbor a framework jehož součástí je simulace Link Adaptation a Resource Grid Mapping. V první části diplomové práce je popsána problematika fyzické vrstvy LTE a její nejdůležitější vlastnosti. Druhá část popisuje parametry pro vyhodnocení kvality rádiového kanálu. Dále jsou přiblíženy vlastnosti vytvořeného Frameworku a v následující část obsahuje naměřené výsledky pro jednotlivé typy rádiového prostředí, specifikované společností 3GPP. V závěrečné části jsou uvedeny vytvořené projekty pro simulaci 4G sítí a přiblížena problematika jejich tvorby. Pro pochopení tématu se předpokládá základní znalost technologie LTE.

**Klíčová slova:** LTE, OFDM, Link Adaptation, MIMO, Matlab, Simulink, CQI, Resource grid, rádiové kanály, BER

## **Abstract**

The goal of this work is detailed introduction to physical layer of LTE technology. Including extensive function of this field, related parameters with analysis and created framework that is including simulation of link adaptation and resource grid mapping. First part is focused on important features of LTE physical layer. Second part describes parameters for evaluation of transport channel quality. Furthermore thesis is describing features of created framework. Next part is dedicated to analysis of measurements from mentioned framework and influence of channel qualities specified by 3GPP organization. Finally the last part is focused on existing simulations and issues with simulation of 4G networks. Basic knowledge of LTE is recommended to understand the problems included in this thesis.

**Keywords:** LTE, OFDM, Link Adaptation, MIMO, Matlab, Simulink, CQI, Resource grid, radio channels, BER



## Seznam použitých zkratk a symbolů

16-QAM	– 16-Quadrature Amplitude Modulation
3GPP	– 3rd Generation Partnership Project
64-QAM	– 64-Quadrature Amplitude Modulation
ACK	– Acknowledge
AMC	– Adaptive Modulation and Coding
ARQ	– Automatic Repeat Request
AWGN	– Additive White Gaussian Noise
BCH	– Broadcast Channel
BLER	– Block Error Rate
CP	– Cyclic Prefix
CQI	– Channel Quality Indicator
CSI	– Channel State Information
CSI-RS	– Channel State Information Reference Signal
CSR	– Cyclic Redundancy Check
DC	– Direct Current
DCI	– Downlink Control Information
DFT	– Discrete Fourier Transform
DM-RS	– DeModulation Reference Signal
DSP	– Design and simulate streaming signal processing systems
eNodeB	– Evolved Node B
EPA	– Extended Pedestrian A
ETU	– Extended Typical Urban
EVA	– Extended Vehicular A
EVM	– Error Vector Magnitude
FDD	– Frequency Division Duplex
FDMA	– Frequency Division Multiple Access
FEC	– Forward Error Correction
FIR	– Finite Impulse Response

HARQ	- Hybrid automatic repeat request
HSPA	- High Speed Packet Access
HSPA+	- Evolved High Speed Packet Access
Hz	- Hertz
IIR	- Infinite Impulse Response
IoT	- Internet of Things
ITU	- International Telecommunications Union
LTE	- Long Term Evolution
MAC	- Medium Access Control
MBSFN	- Multicast-Broadcast Single-Frequency Network
MCS	- Modulation and Coding Scheme
MHz	- Megahertz
MIB	- Master Information Block
MIMO	- Multiple-Input and Multiple-Output
ms	- Millisecond
OFDM	- Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	- Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
RAN	- Radio Access Network
PAPR	- Peak to Average Power Ratio
PBCH	- Physical Broadcast Channel
PCFICH	- Physical Control Format Indicator Channel
PDCCH	- Physical Downlink Control Channel
PHICH	- Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PMI	- Precoding Matrix Indicator
PRB	- Physical Resource Block
PSS	- Primary Synchronization Sequence
PUCCH	- Physical Uplink Control Channel
PUSCH	- Physical Uplink Shared Channel
QPSK	- Quadrature Phase Shift Keying
RB	- Resource Block
RF	- Radio Frequency
RI	- Rank Indicator
SAE	- System Architecture Evolution

SC-FDMA	- Single-carrier Frequency Division Multiple Access
SIR	- Signal to Interface Ratio
SISO	- Single-Input and Single-Output
SNR	- Signal to Noise Ratio
SSS	- Secondary Synchronization Signal
TDD	- Time Division Duplex
UE	- User Equipment
UMTS	- Universal Mobile Telecommunications System



## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Fyzická vrstva systému LTE</b>	<b>9</b>
2.1	Úvod do fyzické vrstvy systému LTE . . . . .	9
2.2	Frekvenční pásmo LTE a alokace spektra . . . . .	9
2.3	Flexibilita a zdrojové bloky . . . . .	12
2.4	Zdrojový element - Resource Grid . . . . .	13
2.5	Signály fyzické vrstvy . . . . .	14
2.6	Kanály fyzické vrstvy . . . . .	17
2.7	MIMO . . . . .	18
2.8	Link Adaptation a kanálové kódování . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Parametry pro vyhodnocení kvality rádiového kanálu</b>	<b>25</b>
3.1	Channel quality indicator - CQI . . . . .	25
3.2	Precoding Matrix indicator - PMI . . . . .	25
3.3	Rank indicator - RI . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Simulace</b>	<b>27</b>
4.1	Matlab . . . . .	27
4.2	Simulink . . . . .	27
4.3	Potřebné toolboxy . . . . .	28
4.4	Proces link Adaptation a Resource Grid Mapping . . . . .	30
4.5	Blokové schéma simulace . . . . .	32
4.6	Vlastnosti přenosového kanálu . . . . .	33
4.7	Grafické rozhraní frameworku . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Vyhodnocení výsledků z vytvořeného modelu</b>	<b>37</b>
5.1	Naměřené charakteristiky link adaptation - zpětná vazba CQI . . . . .	37
5.2	Naměřené charakteristiky jednotlivých modulací v porovnání s link adaptation . . . . .	40
5.3	Porovnání charakteristiky přenosových kanálů . . . . .	45
5.4	Porovnání charakteristik MIMO 2x2 a MIMO 4x4 pro link adaptation, Spatial Multiplexing . . . . .	46
5.5	Link Adaptation - transmit diversity & spatial multiplexing . . . . .	48

<b>6 Srovnání ostatních LTE Simulátorů</b>	<b>49</b>
6.1 LTE-Sim Framework . . . . .	49
6.2 Vienna LTE Simulator . . . . .	49
6.3 Souhrn . . . . .	50
<b>7 Závěr</b>	<b>51</b>
<b>8 Reference</b>	<b>53</b>



---

## Seznam tabulek

1	Alokace frekvenčního pásma FDD LTE . . . . .	11
2	Alokace frekvenčního pásma TDD LTE . . . . .	12
3	Šířky pásma LTE . . . . .	13
4	Indexování CQI . . . . .	26
5	Profily pro simulaci vlastností přenosového kanálu . . . . .	34
6	Simulace modulací - 10 Mhz, 10 dB . . . . .	41
7	Simulace modulací - 20 Mhz, 10 dB . . . . .	41
8	Simulace modulací - 20 Mhz, 20 dB . . . . .	42
9	Simulace režimu MIMO 2x2 . . . . .	47
10	Simulace režimu MIMO 4x4 . . . . .	47
11	Porovnání Transmit Diversity, Spatial Multiplexing a Adaptivní MIMO . .	48



## Seznam obrázků

1	Zpracování signálu v LTE . . . . .	10
2	LTE resource grid, analýza pomocí spektrogramu[12] . . . . .	14
3	LTE resource grid, šířka pásma 1,4 MHz [12] . . . . .	15
4	Umístění signálů na Resource Grid[4] . . . . .	16
5	OFDM signál v časově-frekvenční doméně[17] . . . . .	17
6	Zpracování uživatelských dat na fyzické vrstvě . . . . .	19
7	Blokový diagram MIMO přijímače, vysílače a transportního kanálu[4] . . . . .	20
8	Mapování bitů u jednotlivých modulačních schémat . . . . .	22
9	LTE konvoluční kodér[1] . . . . .	23
10	Knihovna Simulink [12] . . . . .	28
11	Model procesu Link Adaptation . . . . .	30
12	Link Adaptation - Komunikace na fyzické vrstvě . . . . .	31
13	Blokové schéma vysílače . . . . .	33
14	Grafické rozhraní frameworku . . . . .	35
15	Graf - Link adaptation - Průměrná rychlost kódování . . . . .	38
16	Graf - Link adaptation - BER -5 - 30 dB . . . . .	39
17	Graf - Link adaptation - BER 10 - 30 dB . . . . .	39
18	Graf - Link adaptation - Průměrná propustnost dat . . . . .	40
19	Graf - Link adaptation - Procentuální rozdělení přiřazené modulace . . . . .	41
20	Přijatý signál před ekvalizací. Vlevo 64QAM, vpravo Link Adaptation-16QAM . . . . .	42
21	Přijatý signál po ekvalizaci. Vlevo 64QAM, vpravo Link Adaptation-16QAM . . . . .	43
22	Vztah mezi použitou modulací, SNR a BER . . . . .	44
23	QPSK - Přijatý signál po ekvalizaci. Vlevo šířka pásma 1,4 MHz, vpravo šířka pásma 20 MHz . . . . .	44
24	Vliv přenosového kanálu na propustnost dat . . . . .	45
25	Konstelační diagram - přijatý signál před a po ekvalizaci pro simulaci s vysokou mobilitou . . . . .	46



## 1 Úvod

Cílem této práce je popsat vlastnosti fyzické vrstvy systému LTE a parametry pro vyhodnocování kvality rádiového kanálu. Na základě těchto teoretických znalostí by měl být navržen framework pro simulaci procesu Link Adaptation a Resource Grid Mapping.

Podmínky bezdrátového přenosu se mohou značně měnit jak v čase, tak z pohledu frekvenční domény. Link Adaptation je proces, který pomáhá se vyrovnat s těmito proměnnými parametry a zaručit nejlepší možnou kvalitu služeb. To je zajištěno adaptací modulačního a kódovacího schématu. Různá schémata poskytují rozdílné přístupy k robustnosti bitové detekce proti šumu a jiným deformacím způsobeným bezdrátovým kanálem. Framework pro simulaci Link Adaptation by měl obsahovat možnost ověřit simulaci na několika přenosových kanálech pro srovnání jejich vlivu na přenášený signál.

Pro vytvoření procesu Resource Grid Mapping je potřeba znát strukturu přenosového schématu OFDM, který je nejlepší volbou multiplexování pro 3GPP LTE downlink. Ačkoliv se zvyšuje složitost pokud jde o scheduling, je toto řešení z hlediska účinnosti a zpoždění mnohem lepší než paketově orientovaný přístup. V OFDMA je uživateli přidělen určitý počet subnosných na předem stanovenou dobu. Ty jsou známy v LTE specifikaci jako PRB. PRB se tak rozprostírají v časové i frekvenční doméně a jsou přiřazeny na základě schedulinku. Podrobnější informace o této problematice jsou uvedeny v daných kapitolách této diplomové práce, popřípadě část z nich ověřena na základě vytvořeného frameworku.

Pro výše zmíněné procesy by framework měl dále poskytovat možnost modifikace skupiny parametrů, které se k těmto simulacím vztahují. V první řadě by se mělo jednat o parametr SNR, ke kterému by se měli jednotlivá měření nebo srovnání vztahovat. Dále možnost zvolit šířku pásma, počet antén pro přenos a příjem, případně možnost spustit simulaci bez zpětné vazby pro určení kvality kanálu.

Vytvořené nástroje pro simulaci 4G sítí se mohou velmi lišit podle toho, v jakém prostředí byly vytvořeny. K tomu nezávislé ověření naměřených výsledků není jednoduché. Přesto tyto simulace mohou sloužit jako vynikající nástroje pro výzkum a testování možností systému LTE.



## 2 Fyzická vrstva systému LTE

### 2.1 Úvod do fyzické vrstvy systému LTE

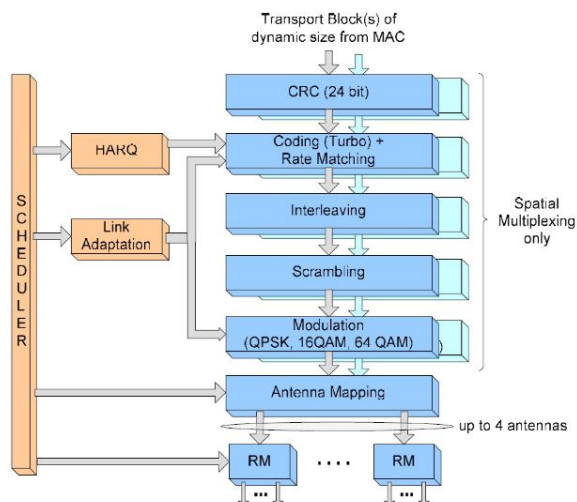
Technologie mobilních sítí jako GSM, UMTS nebo HSPA(+) je možno označit jako předchůdce technologie LTE. Jednou ze společných vlastností těchto technologií byl požadavek na hodnotu SNR nebo SINR v rozmezí 20 - 30 dB pro přijatelnou kvalitu hlasu. Na rozdíl od těchto technologií LTE používá zcela jiný přístup k redukci kolísání útlumu a jeho vlivu na přenášený signál (fading). Hlavní zásluhu si za to připisuje fakt, že přenosové schéma na fyzické vrstvě LTE je založeno na technologii OFDM a to v obou směrech. Jedná se o širokopásmovou modulaci využívající frekvenční dělení kanálu. Jde o metodu využití velkého počtu subnosných, které jsou dále dle potřeby modulovány robustními modulacemi jako QPSK, 16-QAM nebo 64-QAM. Pro downlink LTE využívá technologii OFDMA, která aplikuje výhody OFDM s možností rozdělení uživatelů jak v frekvenčně dělitelném duplexu (FDD), tak i v časově dělitelném duplexu (TDD). Tyto vlastnosti, společně s efektivním využitím kanálů, poskytují možnost efektivní ekvalizace kanálu zvláště pro každého uživatele společně s rozdělením pásma, které je potřeba pro daný UE (scheduling).

V uplinku LTE používá proces SC-FDMA založen na DFT plánování. Přenosové schéma SC-FDMA bylo vybráno na základě nízké úrovně PAPR přenášeného signálu. U modulační techniky SC-FDMA je signál rozprostřen přes všechny subnosné. Na rozdíl od OFDMA je zde lepší uplatnění v mnohonásobném přístupu pro uplink a schopnost flexibilně pracovat s dostupným pásmem. Na druhou stranu nevýhodou oproti OFDM může být považována menší odolnost vůči frekvenčně selektivnímu fadingu.

Jako další součásti fyzické vrstvy LTE jsou považovány tyto vlastnosti: flexibilní alokace pásma, time framing a časově-frekvenční reprezentace zdrojových prostředků LTE standardu. V diplomové práci budou dále detailně popsány jednotlivé protokoly a funkce fyzické vrstvy LTE. Například komunikační kanály, které propojují různé vrstvy komunikace LTE, dále zpracování signálu na fyzické vrstvě aplikované jak pro downlink tak i uplink a jejich mapování s uživatelskými daty na zdrojový element. [15]

### 2.2 Frekvenční pásmo LTE a alokace spektra

Počet frekvenčních pásem, které jsou přiděleny LTE, stále roste. Mnoho frekvenčních pásem, které byly použity pro jiné buněčné systémy, se nyní používají pro nová mobilní LTE pásma. Jedním z cílů LTE standardu je bezproblémová integrace s předchozími mobilními systémy. Předpisy upravující tyto frekvenční pásma se liší pro každou zemi. Z tohoto důvodu je možné, že ne pouze jedno, ale mnoho z frekvenčních pásem může být



Obrázek 1: Zpracování signálu v LTE

nasazeno jakýmkoliv daným poskytovatelem služeb v zemi, čímž se usnadňuje řízení globálního mechanismu roamingu. [4]

### 2.2.1 FDD a TDD LTE frekvenční pásma

FDD spektrum je vždy rozděleno na jedno pásmo pro uplink a jedno pro downlink, zatímco TDD spektrum vyžaduje jedno pásmo pro uplink i downlink, takže oba směry jsou na jedné frekvenci, ale časově rozděleny. V důsledku tohoto rozdělení existují různé alokace LTE pásma pro FDD a pro TDD. V některých případech se tyto pásma mohou překrývat, proto je možné, i když nepravděpodobné, že by oba TDD a FDD přenosy mohly probíhat na jednom daném LTE frekvenčním pásmu. UE může detekovat oba duplexní režimy v jednom pásmu, ale dále je úkolem UE zjistit, zda se jedná o TDD nebo FDD přenos v daném pásmu v dané lokaci. K jednotlivým LTE frekvenčním alokacím nebo LTE frekvenčním pásmům jsou přidělena čísla. Současné rozdělení LTE pásma je v rozsahu 1 až 31 pro FDD a pro TDD se jedná o rozsah od 33 do 44. [4]

#### Alokace frekvenčního pásma FDD LTE

Radiové spektrum určené pro FDD LTE je poměrně široké. Tyto kmitočtová pásma jsou spárovány tak, aby současně vysílaly na dvou frekvencích zároveň. Mezi pásmy je zajištěn dodatečný odstup, díky kterému nedochází k narušení přijatého signálu na straně přijímače. Kdyby byly signály příliš blízko sebe, pokud se díváme z pohledu frekvenčního rozdělení, může být příjem blokován nebo může dojít k zvýšené citlivosti při-



LTE Pásmo (MHz)	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)	Šířka (MHz)	Rozdělení duplexu (MHz)	Mezera mezi pásmy (MHz)
1	1920 - 1980	2110 - 2170	60	190	130
2	1850 - 1910	1930 - 1990	60	80	20
3	1710 - 1785	1805,-1880	75	95	20
4	1710 - 1755	2110 - 2155	45	400	355
5	824 - 849	869 - 894	25	45	20
6	830 - 840	875 - 885	10	35	25
7	2500 - 2570	2620 - 2690	70	120	50
8	880 - 915	925 - 960	35	45	10
9	1749.9 - 1784.9	1844.9 - 1879.9	35	95	60
10	1710 - 1770	2110 - 2170	60	400	340
11	1427.9 - 1452.9	1475.9 - 1500.9	20	48	28
12	698 - 716	728 - 746	18	30	12
13	777 - 787	746 - 756	10	-31	41
14	788 - 798	758 - 768	10	-30	40
15	1900 - 1920	2600 - 2620	20	700	680
16	2010 - 2025	2585 - 2600	15	575	560
17	704 - 716	734 - 746	12	30	18
18	815 - 830	860 - 875	15	45	30
19	830 - 845	875 - 890	15	45	30
20	832 - 862	791 - 821	30	-41	71
21	1447.9 - 1462.9	1495.5 - 1510.9	15	48	33
22	3410 - 3500	3510 - 3600	90	100	10
23	2000 - 2020	2180 - 2200	20	180	160
24	1625.5 - 1660.5	1525 - 1559	34	-101.5	135.5
25	1850 - 1915	1930 - 1995	65	80	15
26	814 - 849	859 - 894	30 / 40	-	10
27	807 - 824	852 - 869	17	45	28
28	703 - 748	758 - 803	45	55	10
29	n/a	717 - 728	11	-	-
30	2305 - 2315	2350 - 2360	10	45	35
31	452.5 - 457.5	462.5 - 467.5	5	10	5

Tabulka 1: Alokace frekvenčního pásma FDD LTE

jímače. Rozdělení musí tedy být dostatečné natolik, aby anténa mohla bezproblémově filtrovat s dostatkem útlumu přenášeného signálu v rámci přijímacího pásma. [18, 7]

### Alokace frekvenčního pásma TDD LTE

V případě TDD LTE se jedná o několik nespárovaných frekvenčních přidělení, které jsou připravovány pro nasazení LTR TDD použití. TDD LTE pásma nejsou spárovány, jelikož uplink a downlink sdílí stejnou frekvenci v časovém multiplexu.

LTE Pásmo	Alokace (MHz)	Šířka pásma (MHz)
33	1900 - 1920	20
34	2010 - 2025	15
35	1850 - 1910	60
36	1930 - 1990	60
37	1910 - 1930	20
38	2570 - 2620	50
39	1880 - 1920	40
40	2300 - 2400	100
41	2496 - 2690	194
42	3400 - 3600	200
43	3600 - 3800	200
44	703 - 803	100

Tabulka 2: Alokace frekvenčního pásma TDD LTE

Počet LTE frekvenčních pasem pořád narůstá díky jednání jednotlivých ITU regulačních procesů. Je to zapříčiněno z důvodu digitálních dividend a také z tlaku způsobeného stále rostoucími potřebami mobilních komunikací. Mnoho nových přidělení do LTE spektra je relativně malých, často se šířkou pásma 10 – 20 MHz, což může být důvodem k obavám, jelikož s příchodem LTE-Advanced nároky na šířku pásma narůstají na 100 MHz. [1, 19]

### 2.3 Flexibilita a zdrojové bloky

LTE standart umožňuje flexibilně dělit šířku pásma pro jednotlivé kanály ve frekvenční doméně, což se projevuje rozdělením přiděleného spektra v rozsahu od 1,4 do 20 MHz. Frekvenční spektrum v LTE je formováno jako zřetězení zdrojových bloků sestávajících z 12 subnosných. A jelikož subnosné jsou od sebe rozděleny 15 kHz, vzniká šířka pásma zdrojového bloku o velikosti 180 kHz. Díky tomu je možno rozdělit danou šířku pásma na 6 až 110 zdrojových bloků přes jednu frekvenční nosnou a to také vysvětluje, jakým způsobem je potřebná flexibilita dosažena.

<u>Šířka pásma</u>	<u>Zdrojové bloky</u>	<u>Subnosné - downlink</u>	<u>Subnosné - uplink</u>
1.4 MHz	6	73	72
3 MHz	15	181	180
5 MHz	25	301	300
10 MHz	50	601	600
15 MHz	75	901	900
20 MHz	100	1201	1200

Tabulka 3: Šířky pásma LTE

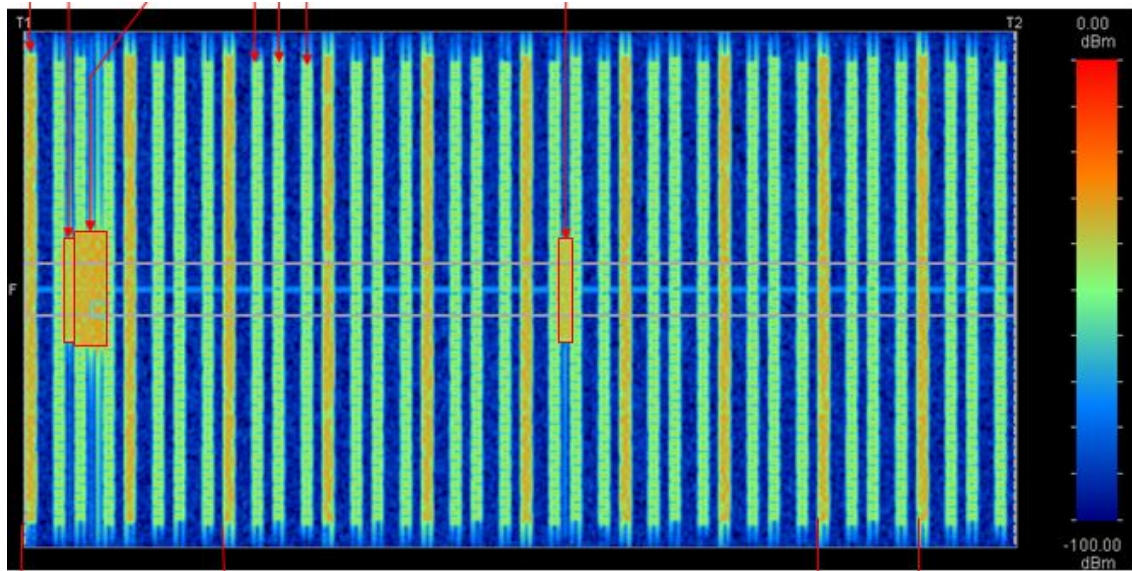
Pro pásmo 3 – 20 MHz počet vysílaných zdrojových bloků využívá zhruba 90 % z celého pásma daného kanálu. V případě, že se jedná o pásmo 1.4 MHz, procento využití klesá na 77%. Daný poměr využití pásma pomáhá redukovat nechtěné emise mimo pásmo. Detailní popis časově-frekvenční reprezentace spektra, zdrojového bloku a zdrojového elementu bude popsáno v diplomové práci v kapitole 2.4.. Tabulka č.3 znázorňuje vztah mezi šířkou pásma a počtem použitých zdrojových bloku a uvádí počet subnosných pro jednotlivé zdrojové bloky pro uplink a downlink. [1, 15]

## 2.4 Zdrojový element - Resource Grid

Pochopení časově-frekvenční reprezentaci dat, organizovaných jako zdrojový element, je klíčovým krokem k pochopení přenosového schématu LTE. Zdrojový element je v podstatě matice, jejíž prvky představují modulované symboly vypočtené jako výstup z modulačního mapovače. Na obr. č. 2 lze vidět 2D zobrazení zdrojového elementu. Na ose y jsou prezentovány subnosné, které jsou řazeny podél frekvenční oblasti a na ose x jsou reprezentovány symboly OFDM zarovnané podél časové oblasti. Umístění dat v rámci zdrojového elementu je velmi důležité a odhaluje některé z konstrukčních parametrů fyzického modelu LTE. Například umístění a rozlišení pilotních signálů (CSR) podél obou os určuje přesnost odhadu odezvy kanálu v čase a frekvenci. [13, 14]

Podobně je tomu s umístěním kontrolního kanálu PDCCH na začátku každého subrámece, jehož úkolem je pomoci přijímači dešifrovat důležité parametry procesů (například typ modulátoru a režim použití MIMO) dříve, než systém zahájí dekodování uživatelských dat v subrámcích. Detaily spojené s umístěním dat na zdrojový element, lze pochopit pouze v rámci kontextu, jakým LTE definuje rámeček, subrámeček a slot. Každý LTE rámeček má dobu trvání 10 ms a je složen z deseti 1 ms subrámečků označených indexy 0 až 9. Každý subrámeček je rozdělen do dvou slotů o délce 0,5 ms, přičemž každý slot obsahuje sedm symbolů

OFDM (pokud je použit standartní CP). Pokud by byl použit rozšířený CP, zbylo by místo pouze na šest OFDM symbolů.



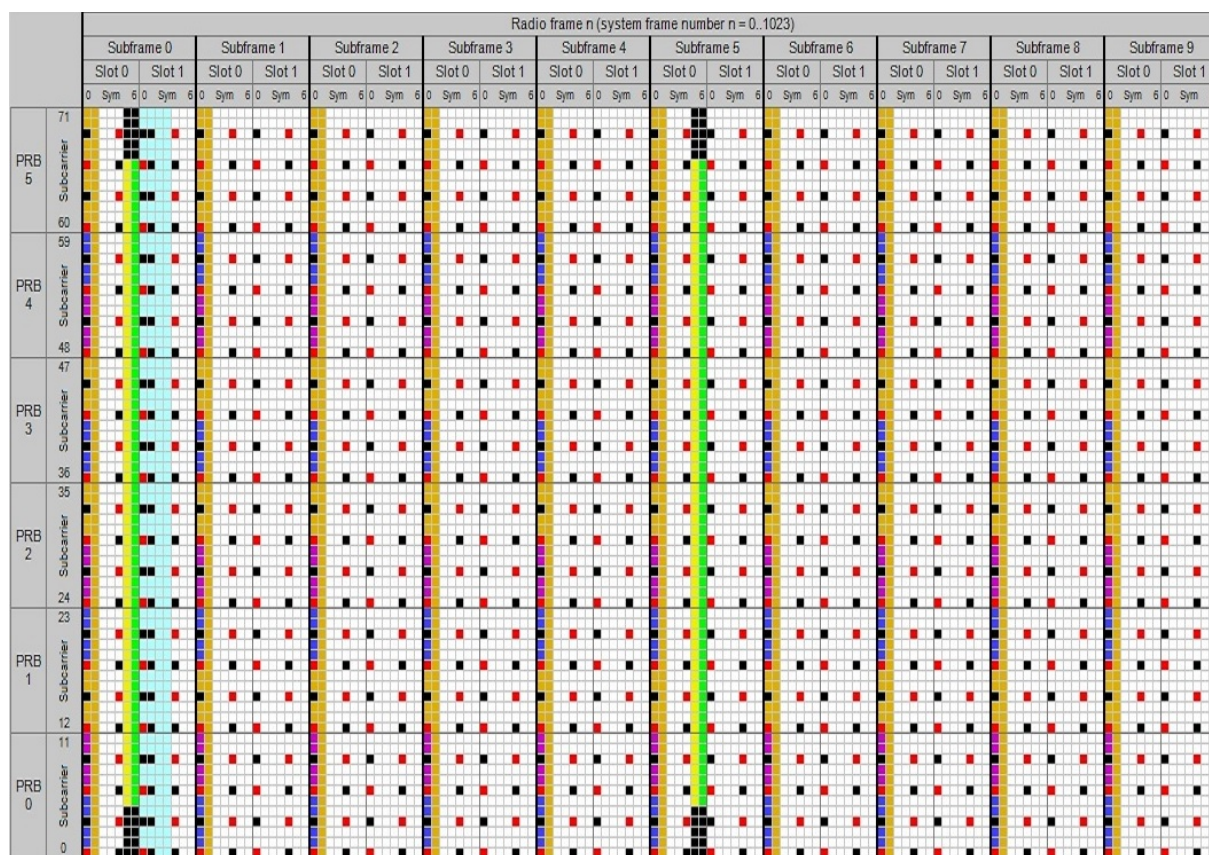
Obrázek 2: LTE resource grid, analýza pomocí spektrogramu[12]

Umístění každého modulovaného datového typu (uživatelská data, CSR, DCI, PSS, SSS a BCH) na zdrojový element se řídí specifickou strukturou v čase a frekvenci. Tato struktura závisí na třech parametrech: subnosná (osa y) index, symbol OFDM (osa x) index a index 1ms subrámce v 10ms rámci. Všechny subrámce uvnitř rámce můžou obsahovat tři typy dat: uživatelská data (PDSCH), pilotní data CSR a kontrolní downlink data (PDCCH). PSS a SSS jsou k dispozici pouze v subrámcích 0 až 5. PBCH se nachází pouze v subrámci 0.[21, 20]

## 2.5 Signály fyzické vrstvy

Různé fyzické signály, včetně referenčních a synchronizačních signálů, jsou přenášeny do sdíleného fyzického kanálu. Fyzické signály jsou mapovány ke konkrétním fyzickým zdrojovým elementům používaných fyzickou vrstvou, ale nenesou informace z vyšších vrstev.

Plánování závislé na přenosovém kanálu ve frekvenční doméně patří mezi nejatraktivnější funkce standardu LTE. Například provedení plánování downlinku, které zohledňuje aktuální kvalitu kanálu, mobilní terminál musí poskytnout data CSI základnové stanici. CSI je možno získat měřením referenčních signálů přenášených v downlink směru.



Obrázek 3: LTE resource grid, šířka pásma 1,4 MHz [12]

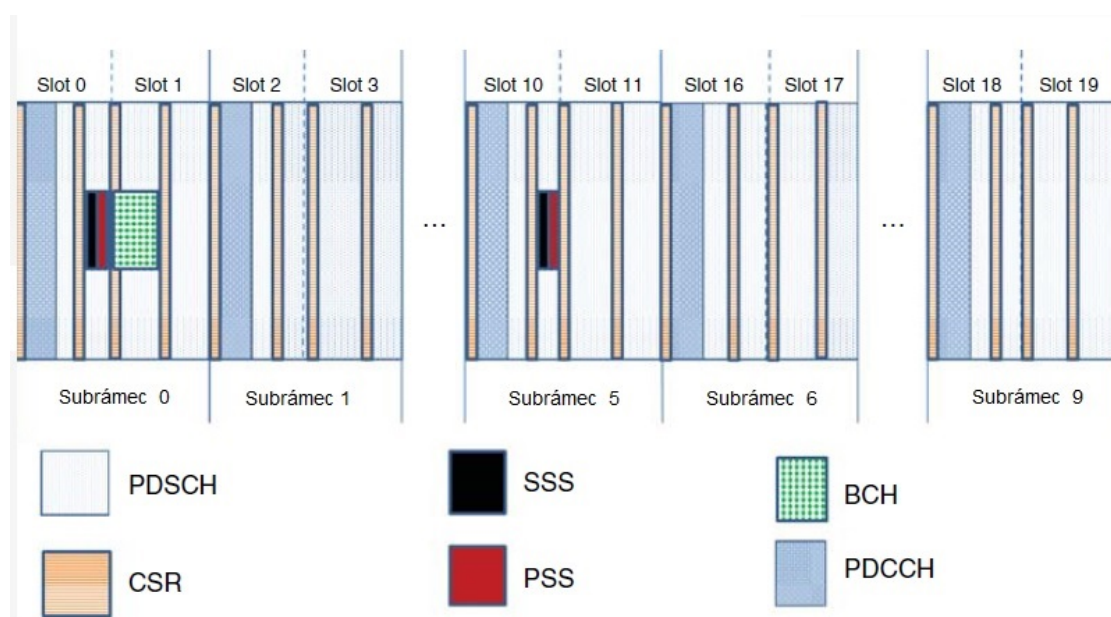
Referenční signály jsou přenášeny signály, které jsou generovány za pomoci synchronizovaných sekvencí generátorů na straně vysílače a přijímače. Tyto signály jsou umístěny na specifických pozicích v časově-frekvenčním zdrojovém elementu. LTE určuje několik typů downlink a uplink referenčních signálů, které jsou popsány níže. [1, 6]

### 2.5.1 Referenční signály pro downlink

Referenční signály pro downlink podporují funkcionalitu odhadu kvality kanálu potřebnou k ekvalizaci a demodulaci řídicích informací a dat. Jsou také instrumentální v CSI měřeních pro určení hodnot RI, CQI a PMI, které slouží jako zpětná vazba pro kvalitu kanálu. LTE specifikuje 5 typů referenčních signálů pro přenos v downlinku: Cell-Specific Reference Signals (CSR), Demodulation Reference Signal (DM-RS, také známý jako referenční signál pro specifický UE), Channel-State Information Reference Signal (CSI-RS), MBSFN referenční signály a referenční polohovací signály.



CSR jsou společné pro všechny uživatele v buňce a jsou přenášeny v každém subrámcu. DM-RS signály se používají ve víceuživatelských přenosových režimech 7, 8 nebo 9. Jak název napovídá, jsou určeny pro stanovení odhadu kanálu každým jednotlivým mobilním terminálem v buňce. Signály CSI-RS byly poprvé představeny v LTE release 10. Jejich hlavní funkcí je zmírnit problém hustoty spojený s použitím CSR pro CSI měření, kdy je využito více než 8 antén. Z tohoto důvodu je použití CSI RSS omezeno na víceuživatelský režim 9. Referenční MBSFN signály jsou použity při koherentní demodulaci, která je součástí multicastových a broadcastových služeb. A konečně referenční signály pro polohování, nejprve představeny v LTE Release 9, podporují měření na více buňkách s cílem odhadnout pozici daného terminálu.

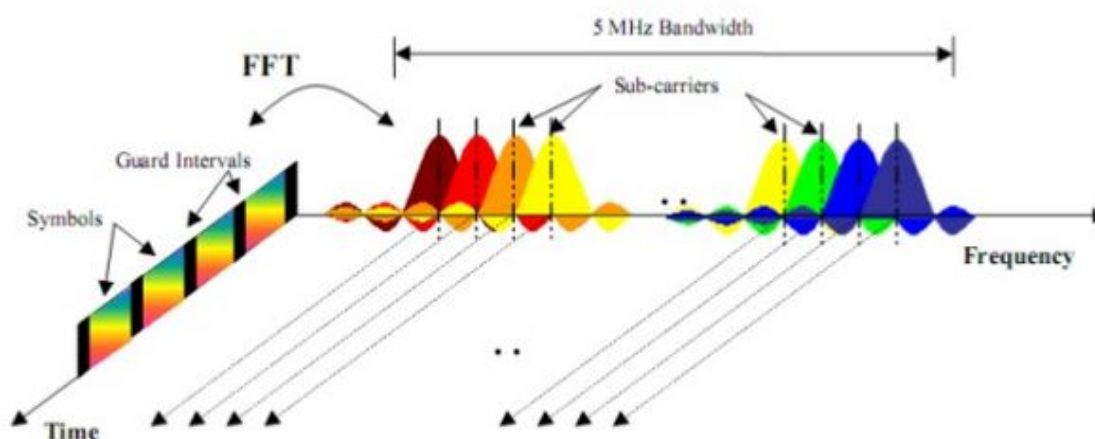


Obrázek 4: Umístění signálů na Resource Grid[4]

## 2.6 Kanály fyzické vrstvy

Spousta jednoúčelových kanálů ze standardu 3GPP bylo nahrazeno sdílenými kanály a celkový počet kanálů fyzické vrstvy byl snížen.

Transportní kanály spojují MAC vrstvu s vrstvou fyzickou. Každý fyzický kanál je specifikován určitým počtem zdrojových částí, které nesou informace z vyšších vrstev pro případný další přenos na výstupu rozhraní. [6, 17]



Obrázek 5: OFDM signál v časově-frekvenční doméně[17]

- **PBCH(Physical Broadcast Channel)**

Přenáší pouze MIB. MIB je důležitou zprávou, která je vysílána jako broadcast z eNodeB všem přítomným uživatelům. Součástí této zprávy jsou informace o šířce pásma, informace o PHICH a další data potřebná pro synchronizaci UE s eNodeB. PBCH je mapován do 6 zdrojových bloků (72 subnosných) umístěných kolem DC subnosných.

- **PCFICH(Physical Control Format Indicator Channel)**

Přenáší počet symbolů, které mohou být použity pro kontrolní kanály (PDCCH a PHICH). Mapování do zdrojového elementu probíhá vždy do prvního OFDM symbolu v každém subrámcu. UE používá tyto informace k dekodování a zjištění počtu OFDM symbolů přiřazených ke kontrolním kanálům. Pozice na zdrojovém elementu je definována podle cell ID a šířky pásma.

- **PDCCH(Physical Downlink Control Channel)**

PDCCH je mapováno do každého downlink sub rámce a počet PDCCH symbolů je specifikován PCFICH. PDCCH přenáší informace o DCI, DCI transportním formátu, přidělení zdrojů, H-ARQ a další dodatečné informace podle toho o jaký formát DCI se jedná.

- **PHICH**

Obsahuje zpětnou vazbu pro H-ARQ pro přijatý PUSCH. Poté co EU přenesse data v UL, čeká na PHICH pro potvrzení ACK.

- **PDSCH(Physical Downlink Shared Channel)**

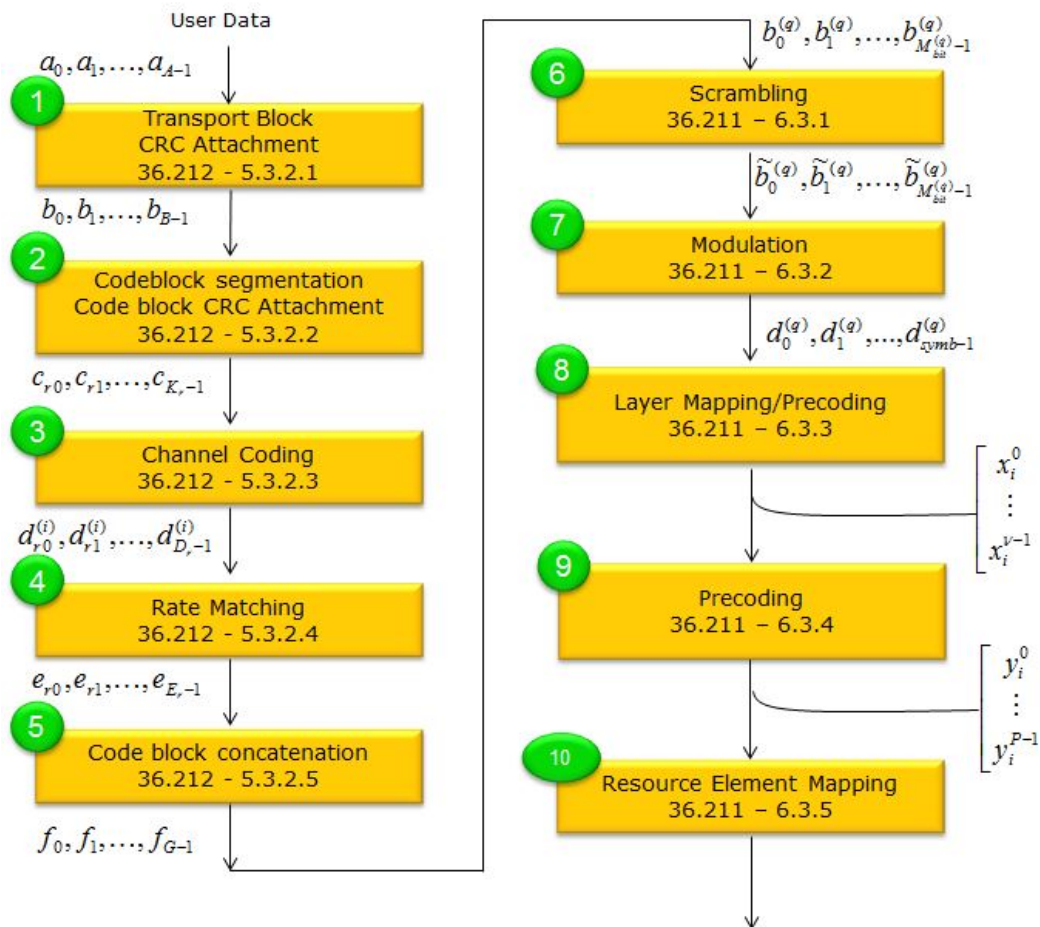
Nese uživatelské specifické údaje. Celý proces PDSCH je poměrně složitý a využívá adaptivní modulaci a kódování. Modulační schéma pro každého uživatele je dáno podle MCS hodnoty v DCI. [1, 6]

## 2.7 MIMO

Jedním z nástrojů LTE je schopnost využívat technologii MIMO. MIMO umožňuje rádiovým systémům dosáhnout významného zvýšení výkonu při použití vícenásobného počtu antén na straně vysílače i přijímače. Tato technologie přináší rádiovým systémům řadu výhod počínaje zvýšenou spolehlivostí za špatných přenosových podmínek, lepší spektrální účinnost (tedy i celkovou kapacitu kanálu) a zvýšené přenosové rychlosti pro jednotlivé uživatele. Nicméně MIMO je komplexní technologií s řadou variací postavených na jednom principu. LTE standart podporuje širokou škálu MIMO operačních režimů, které jsou přizpůsobeny různým podmínkám v radiovém kanálu a dále umožňuje dynamicky přepínat mezi režimy a vždy použít ten nejvhodnější.

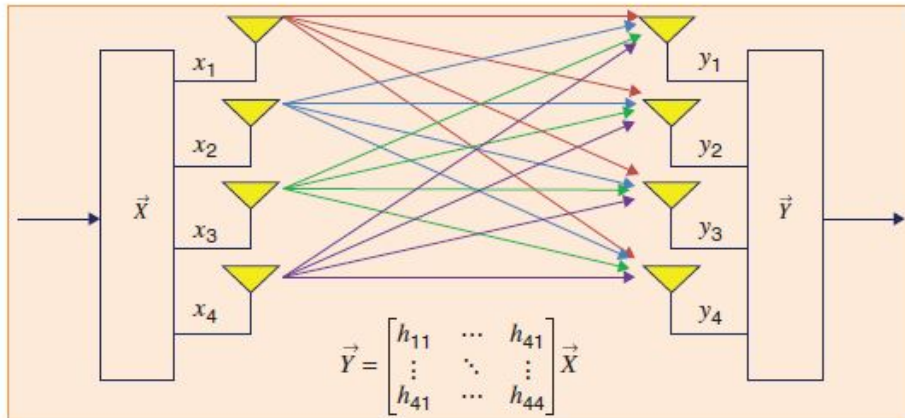
Následující obrázek znázorňuje příklad použití MIMO pro 4 vysílací antény a 4 antény na straně přijímače, tento režim je označen jako 4x4 MIMO. V situaci, kdy jsou rádiové vlny podrobeny významnému rozptylu a vícecestnému šíření signálu mezi vysílačem a přijímačem, MIMO systém může dosáhnout podstatně lepšího výkonu, než by bylo možné s jednotlivými anténami pomocí stejného celkového výkonu. Při vhodném umístění antén, jako na *obr. č.7*, může být propustnost dat mezi vysílačem a přijímačem až zdvojnásobena. [8, 9]





Obrázek 6: Zpracování uživatelských dat na fyzické vrstvě

Pomocí kódování na straně vysílače a zpracování signálu na straně přijímače, MIMO systém je schopen těžit z komplexního šíření radiových vln prostředím. Lze použít řadu různých technik:[8, 9]



Obrázek 7: Blokový diagram MIMO přijímače, vysílače a transportního kanálu[4]

- **Single antenna**

Základní forma bezdrátového přenosu. Data jsou přenášena v jednom toku z jedné antény a přijata jednou nebo více anténami. Lze vztahovat k modelu SISO v závislosti kolik antén je použito.

- **Transmit diversity**

Tato forma režimu LTE MIMO využívá přenos stejného informačního toku z více antén. Pro tuto techniku LTE podporuje 2 nebo 4 antény. Informace je kódována odlišně pomocí prostorové frekvence blokových kódů. Tento režim umožňuje zlepšení kvality signálu na straně přijímače, ale neposkytuje možnost zvýšení rychlosti toku dat. V souladu s tím je tato forma LTE MIMO používána na společných kanálech, stejně jako na kontrolních kanálech a kanálech pro broadcastové vysílání.

- **Open loop spatial multiplexing**

Tato forma MIMO používána v LTE systému zahrnuje posílání dvou informačních toků, které mohou být přenášeny přes dvě nebo více antén. Nicméně zde neexistuje žádná zpětná vazba z UE, ačkoli TRI vysílán z UE může být použit základnovou stanicí pro určení počtu prostorových vrstev.

- **Close loop spatial multiplexing**

Podobný princip jako u Open loop řešení, ale jak název naznačuje, je zde zpětná vazba začleněná pro uzavření smyčky. PMI je zde zpětnou vazbou od UE směrem k základové stanici. To umožňuje vysílači data kódovat před přenosem tak, aby přenos byl optimální a přijímač mohl jednoduše rozdělit různé přijaté datové toky.

- **Closed loop with pre-coding**

Umožňuje vysílači využít informaci o přenosovém kanálu poskytovanou přijímačem. Pokud je k dispozici zpětná vazba, vysílač může změnit jeho kódování přenášených signálů a vzít v úvahu převažující charakteristiku kanálu ke zjednodušení zpracování signálu požadovaného na přijímači a umožní potenciálně větší zisk výkonu.

- **Multi-User MIMO, MU-MIMO**

Tato forma LTE MIMO umožňuje cílit různé datové prostorové toky k různým uživatelům.

- **Beam-forming**

Nejkomplexnější z režimů MIMO, kde vysílací lineární pole umožňuje anténám se soustředit na určitou oblast. Tím se sníží interference a zvýší se kapacita v dané oblasti. Terminál odhaduje kvalitu kanálu ze společných referenčních signálů na anténách.

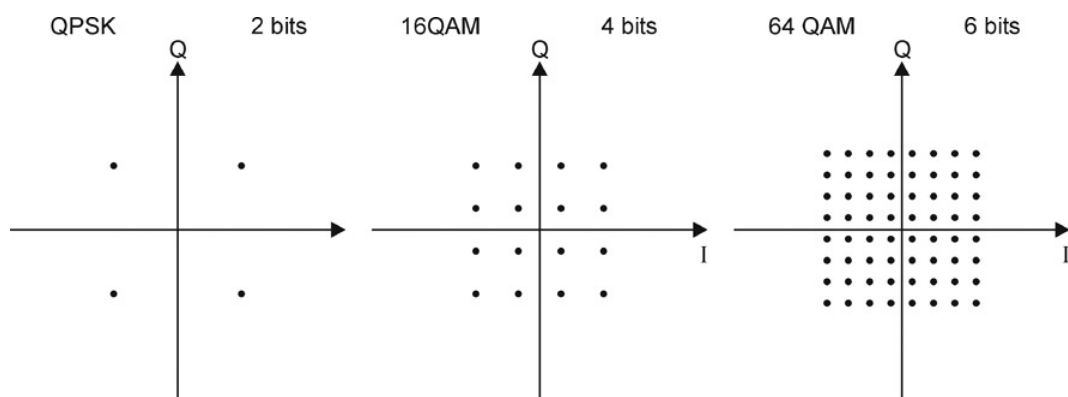
## 2.8 Link Adaptation a kanálové kódování

Kanálové kódování je jedním z nejdůležitějších aspektů v digitálních komunikačních systémech a lze jej považovat za hlavní rozdíl mezi analogovým a digitálním procesem pro vyhledávání a opravu vzniklých chyb při přenosu dat. Oprava chyb existuje ve dvou formách: ARQ a FEC. V případě ARQ se přijímač dožaduje opětovného odeslání datových paketů, které obsahují chybu. Při použití FEC mechanismu jsou přidány redundantní bity, což může být provedeno po blocích (blokové kódování) nebo konvolučně, kde kódování bitů nezávisí jen na aktuálních bitech, ale taky na bitech předchozích. [11, 12, 4]

### 2.8.1 Link Adaptation

Podmínky pro příjem signálu v mobilních bezdrátových sítích se velmi liší v závislosti na frekvenci a času. Aby bylo možno se vyrovnat se všemi okolnostmi a poskytnout nejlepší možnou kvalitu služeb, byl vyvinut postup známý jako adaptivní modulace a kódování (AMC). AMC kontroluje a mění vysílací parametry tak, aby hodnota Transport

block error rate (BLER) nebyla nižší než 10%, s cílem udržet přenos ve vhodné kvalitě. To se provádí přizpůsobením modulačního schématu, u LTE na sdílených kanálech mezi QPSK, 16QAM a 64QAM, a dále za pomoci rychlosti kódování FEC. Různá modulační schémata mají různý vliv na robustnost proti šumu a jiným zkreslením způsobeným bezdrátovým kanálem. Obrázek č. 8 zobrazuje aplikaci různých modulačních schémat na sdílené LTE kanály. Nejrobustnějšího přenosu je dosaženo v případě, kdy jsou k mapování použity jen 2 bity na každý modulační symbol, jak lze vidět u QPSK. Velká vzdálenost mezi modulačními body u QPSK zvětšuje pravděpodobnost správného rozhodnutí na straně přijímače i v prostředí s vysokou hladinou šumu. 16QAM a 64QAM mapují 4 a 6 bitů na jeden modulační symbol, což vede k dosažení větší propustnosti dat. Přesto je vždy nejlepší najít kompromis mezi použitým modulačním schématem a rychlosti kódování pro specifické podmínky v daném kanálu. LTE definuje seznam MCS kombinací a dále jen signalizuje index MSC. [11, 4]



Obrázek 8: Mapování bitů u jednotlivých modulačních schémat

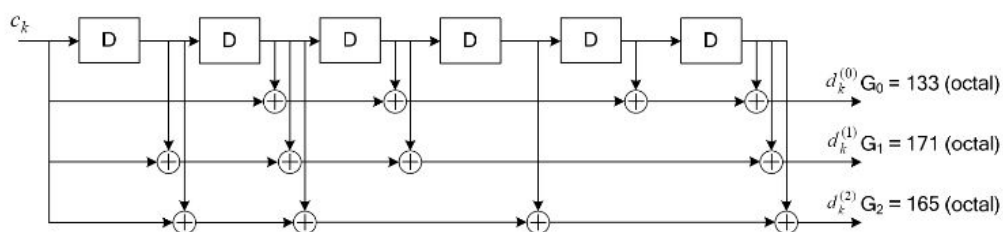
Ať se jedná o jakékoliv použité modulační schéma, subnosné musí být chráněny proti přenosovým chybám. K tomu napomáhá turbo kodér, který přidává redundantní data, která mohou být použita pro obnovu přijatých bitů na straně přijímače. Poměr kódování redundantních dat ke zdrojovým datům ve většině případů bývá 1 kódovaný bit na 3 bity zdrojové. Dále jsou ještě potřeba další bity, pro zachování rovnováhy mezi ochranou přenášeného signálu a jeho účinností. Kromě toho dalším parametrem, který je kontrolován, je vysílací úroveň pro uplink. Kontrola vysílací úrovně v uplinku je nezbytná pro minimalizaci near-far efektu. Tento efekt nastává v případě, kde jeden uživatel (UE) se nachází v blízkosti vysílače (eNodeB) a druhý uživatel je umístěn ve větší vzdálenosti. To pro uživatele znamená, že by měli přijímat vysílaný signál o různých úrovních v závislosti na vzdálenosti od vysílače a ztrátami, které vznikají po trase mezi vysílačem a

uživatel. Čím delší trasa, tím větší ztráta. Všechny signály přijaté z uplinku by měly mít stejnou úroveň, aby převodník analogového signálu na digitální byl nasycen na stejném stupni každým přijatým signálem v rámci snížení kvantizačního šumu od uživatelů s nízkou úrovní přijímaného signálu, čímž se snižuje interference mezi uživateli. Tato situace nastává v reálných scénářích při neúplné synchronizaci v uplinku.

## 2.8.2 Kanálové kódování

Jedním z nejdůležitějších problémů v digitálních komunikacích je napravování vzniklých chyb v přenosu. Opravu chybovosti lze zařadit do dvou různých kategorií: ARQ a FEC. S HARQ přijímač žádá o opětovný přenos datových paketů v případě, že je zjištěna chyba. Proces je opakován tak dlouho, dokud není obdrženo bezchybný paket nebo je dosaženo maximálního počtu opakovaných přenosů.

K redundantním bitům FEC jsou přidány datové bity, které umožňují opravu chyb. FEC používá 2 základní typy: blokové kódování a konvulční kódy. V kontrastu s blokovým kódováním mají konvulční kódy podobnou strukturu jako FIR (Finite Impulse Response) filtry operující po bitech. Konvulční kódy mají paměť, což znamená, že výstup nezáleží pouze na aktuálním bitu, ale také na počtu předchozích bitů. Počet je dán počtem registrů v konvulčním kodéru. V LTE jsou použity jak blokové kódy, tak i kódy konvulční. CRC je cyklický lineární kód použit procesem HARQ pro opravu chyb. Kontrolní a datové kanály v LTE využívají konvulční a turbo kódy.[2]



Obrázek 9: LTE konvulční kodér[1]



### 3 Parametry pro vyhodnocení kvality rádiového kanálu

Jedná se o parametry pro měření kvality přenosového kanálu definovaného LTE standardem. UE může měřit všechny 3 parametry a přenést naměřené hodnoty směrem k základnové stanici, která data zpracuje a přizpůsobí vysílaný signál k ideálním požadavkům pro přenos. [2]

#### 3.1 Channel quality indicator - CQI

CQI indikuje nejvyšší modulaci a rychlost kódování, při kterém block error rate (BLER) kanálu, který je měřen, nepřekračuje 10 %. CQI nabývá hodnot 0 až 15, kde 0 znamená případ, kdy UE neobdržel žádný užitečný LTE signál a kanál je nefunkční. Posílání hodnoty CQI směrem od UE k základnové stanici je možno provést dvěma způsoby.

- Periodicky přes PUCCH nebo PUSCH kanály
- V neregulárních intervalech přes PUSCH kanál. V tomto případě základnová stanice posílá dotaz k UE o zaslání zprávy obsahující hodnotu CQI.

CQI Index zasílaný k základnové stanici je odvozen z kvality signálu v downlinku. V porovnání s ostatními mobilními systémy jako například HSDPA, CQI index nemá žádnou spojitost s měřením signal-to-noise ratio. Místo toho je ovlivněn zpracováním signálu na straně přijímače (UE). Pokud UE používá výkonnější algoritmus je schopno předat vyšší hodnotu CQI než UE s méně výkonným algoritmem.[10]

#### 3.2 Precoding Matrix indicator - PMI

PMI určuje, jakým způsobem jsou data mapována k vysílacím anténám. Vyhodnocuje výběr matice, která udává maximální počet datových bitů, které může UE přijímat napříč všemi vrstvami. To vyžaduje znalost kvality kanálu pro každou anténu v downlinku, kterou UE může určit pomocí měření. V případě, že UE ví, jaká je povolená předkódovaná matice, může poslat PMI report směrem k základnové stanici a navrhnout vhodnou matici pro následující přenos.[2, 5]

#### 3.3 Rank indicator - RI

RI indikuje počet vrstev a datových toků, které jsou vysílány směrem k UE. Při použití SIMO je použita pouze jedna vrstva. Dalším příkladem může být 2x2 MIMO, kde jsou pro vysílání použity vrstvy dvě. Cílem optimalizovaného RI je maximálně využít kapacitu kanálu pro dostupnou šířku pásma. RI není jediným měřítkem pro stav přenosového

CQI Index	Modulace	Coding Rate
0	QPSK	-
1	QPSK	78
2	QPSK	120
3	QPSK	193
4	QPSK	308
5	QPSK	449
6	QPSK	602
7	16QAM	378
8	16QAM	490
9	16QAM	616
10	64QAM	466
11	64QAM	567
12	64QAM	666
13	64QAM	772
14	64QAM	873
15	64QAM	948

Tabulka 4: Indexování CQI

kanálu v LTE. CQI a PMI se také berou v úvahu, protože hodnota RI přímo ovlivňuje tyto dva parametry. Ve výsledku základnová stanice používá pouze hodnotu CQI pro určení kvality přenosového kanálu směrem k UE.

Základnová stanice není nucena reagovat na obdrženou CQI hodnotu, nicméně adaptace na základě hodnoty CQI je vhodná pro snížení chybovosti ve vysílání. Na druhou stranu nepřesná zpětná vazba může vést k opačné situaci. Z tohoto důvodu je nezbytné zajistit, aby UE přesně indikovalo stav kanálu pomocí CQI, PMI a RI parametrů. Pro kontrolu tohoto požadavku jsou definovány příslušné testy, které slouží k ověření, zda UE přesně určuje hodnoty CQI, PMI a RI i za obtížných podmínek jako je aditivní bílý Gaussovský šum (AWGN) a fading.[2, 5]



## 4 Simulace

### 4.1 Matlab

MATLAB je integrovaný systém obsahující nástroje pro numerické a symbolické operace, analýzu a vizualizaci dat, modelování a simulaci reálných procesů.

### 4.2 Simulink

Jako platforma k provedení simulací a jejich vyhodnocení byl použit Simulink, který je součástí programu Matlab verze 2015a. Integrace s prostředím Matlab poskytuje přístup k jeho mnohým charakteristickým vlastnostem.

Simulink je softwarový nástroj pro modelování, simulaci a analýzu dynamických systémů, včetně zpracování signálu a komunikačních nebo kontrolních systémů. Grafické uživatelské rozhraní je zde poskytnuto formou hierarchicky postavených modelů a bloků, které mohou být vybrány z existujících předdefinovaných bloků nebo vytvořeny podle individuálních potřeb uživatele. K vytvoření simulace lze použít menu Simulinku nebo příkazový řádek Matlabu. Jak Matlab tak Simulink poskytují velké množství nástrojů pro analýzu modelu.

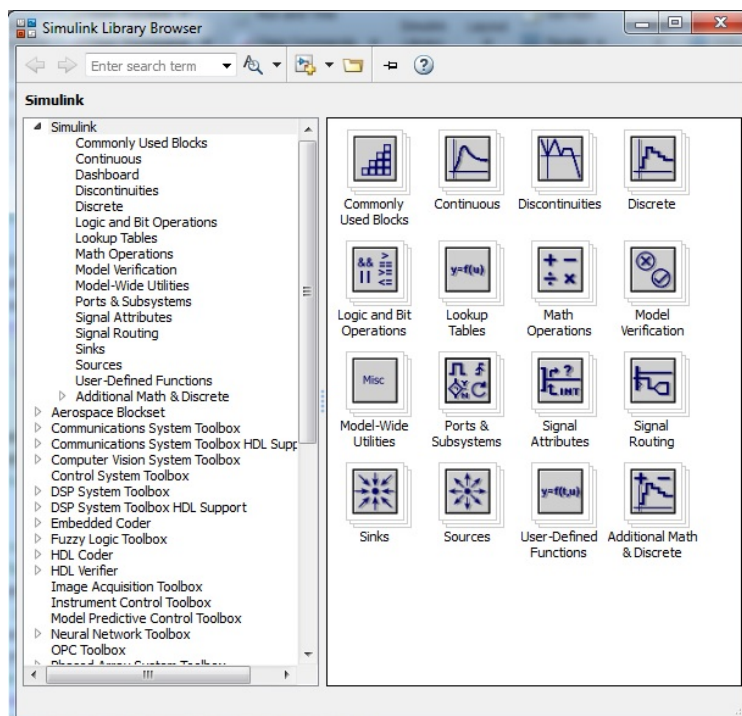
V Simulinku jsou funkce prováděny pomocí bloků a data jsou přenášena mezi bloky za pomoci adresování jednotlivých funkcí. Implementace bloků je klíčovým krokem pro realizaci LTE systému. [12]

#### 4.2.1 Knihovna Simulink

Knihovna obsahuje 16 standartních bloků jako Commonly Used Blocks, Math operations, Model verification, Signal Routing, Logic and Bit Operations apod. Každý z bloků rozšiřuje knihovnu o různé funkce. Všechny funkce knihovny mohou být rovnou použity, což je velkou výhodou Simulinku. Nicméně v případě, že požadavky modelu jsou mnohem složitější, je nemožné jej vytvořit pouze z předdefinovaných bloků. Proto je potřeba použít vložené funkce Matlabu pro propojení a vytvoření komplexního modelu. [12, 4]

#### 4.2.2 Spuštění simulace

Po dokončení modelu v Simulinku, je možno simulovat jeho dynamické chování a zobrazit výsledky. Simulink poskytuje několik funkcí a nástrojů, které zajišťují rychlost a přesnost simulace, včetně dlouhodobých kroků a práci s proměnlivými parametry, grafický debugger a práci s různými profily modelu.



Obrázek 10: Knihovna Simulink [12]

Poté, co jsou nastaveny možnosti simulace, je možno model spustit interaktivně pomocí grafického rozhraní Simulinku nebo systematicky z příkazového řádku Matlabu. Mohou být použity následující režimy simulace:

- Normální (výchozí), který simuluje interpretační model.
- Zrychlený, urychlující simulaci modelu tím, že vytvoří zkompileovaný cílový kód, který ale stále ještě dovolí změnu modelových parametrů.
- Rapidně zrychlený, který může simulovat modely rychleji než režim zrychlený, ale s menší interaktivitou tím, že vytvoří spustitelnou instanci oddělenou od Simulinku, kterou lze spustit na druhém jádru procesoru.[12]

## 4.3 Potřebné toolboxy

### 4.3.1 LTE System toolbox

LTE System toolbox poskytuje standardní kompatibilní funkce a aplikace pro navrhování, simulaci a ověřování LTE a LTE-Advanced komunikačních systémů. Systémový toolbox urychluje vývoj LTE a jeho fyzické vrstvy (PHY) a podporuje referenční ověřování a testování. S tímto toolboxem je možno nakonfigurovat, simulovat, měřit a analy-

zovat end-to-end komunikační spojení. Lze také využívat test bench pro ověření vytvořeného designu, prototypu a implementaci s LTE standardem. [12]

### 4.3.2 DSP System toolbox

DSP System toolbox poskytuje algoritmy, aplikace a další nástroje pro návrh, simulaci a analýzu zpracování signálu. Lze zde v reálném čase modelovat DSP systémy pro komunikaci, audio, zdravotnické zařízení, IoT, radarové systémy a ostatní aplikace.

DSP System toolbox umožňuje analyzovat FIR, IIR, vícestupňové a adaptivní filtry. Dále podpora simulace vysílaného signálu s proměnnými, datových souborů a síťových zařízení pro systémový vývoj a ověření jeho funkčnosti. Spektrální a logický analyzátor dovolují dynamicky zobrazit a měřit streamovaný signál. V případě modelu vytvořeného pro tuto diplomovou práci je tento objekt využit k vizualizaci spektra dat na vysílači a přijímači. Toto porovnání je dále použito k vyhodnocení vlivu přenosového kanálu na přenášená data nebo k porovnání konstelačního diagramu před a po ekvalizaci signálu.

Algoritmy jsou k dispozici jako funkce MATLABu, systémové objekty a bloky z Simulink knihovny. [12]

### 4.3.3 Communications System Toolbox

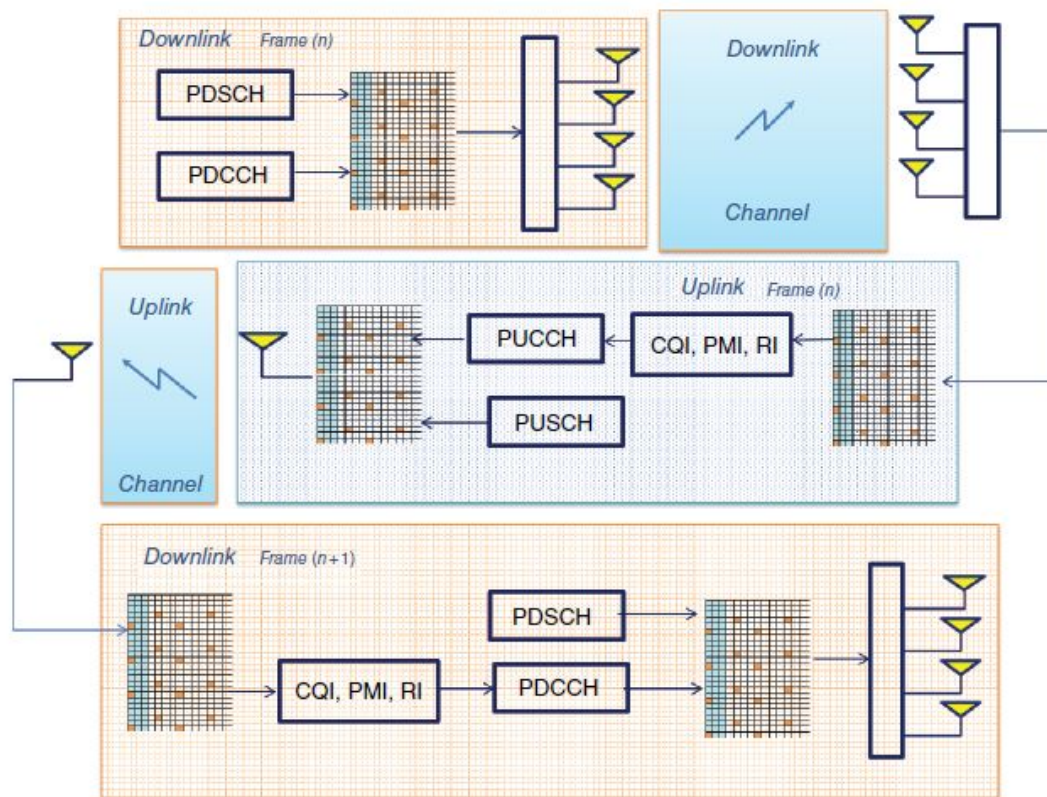
Communications System Toolbox poskytuje algoritmy a aplikace pro analýzu, návrh end-to-end simulací a jejich ověření. Algoritmy tohoto nástroje zahrnují kanálové kódování, modulace, MIMO a OFDM. Dále umožňují sestavit fyzický model daného systému a jeho vyhodnocení.

Tento systémový nástroj poskytuje konstelační diagramy, funkce bit-error-rate a další nástroje pro analýzu systémového návrhu. Umožňuje analyzovat signál, vizualizovat vlastnosti kanálů a získat metriku výkonu, jako je chyba vektoru velikost (EVM).

Modely pro ovlivňování kvality RF, přenosového kanálu a kompenzační algoritmy (včetně nosiče a časového synchronizování symbolů) umožňují realisticky modelovat požadavky a kompenzovat efekt degradace kanálu.

Použitím balíčku pro podporu hardwaru je možno připojit modely vysílače a přijímače k rádiovým zařízením a tím ověřit návrh s reálným prostředím.

Algoritmy jsou k dispozici jako funkce MATLABu, systémové objekty a bloky z Simulink knihovny. [12]



Obrázek 11: Model procesu Link Adaptation

#### 4.4 Proces link Adaptation a Resource Grid Mapping

Celý proces link adaptation a resource grid mapping lze rozdělit do 5-ti částí, *obrázek č. 11*.

V první části vysílač tvoří zdrojový element, který se skládá z uživatelských dat (PDSCH kanál) a kontrolních informací pro downlink DCI (PDCCH). DCI obsahuje informace pro plánování úkolů, které pomáhají mobilnímu přijímači správně dekodovat informace z přijatého subrámečce. Tyto data zahrnují MSC, precoder matrix, Rank Information a použitý režim MIMO.

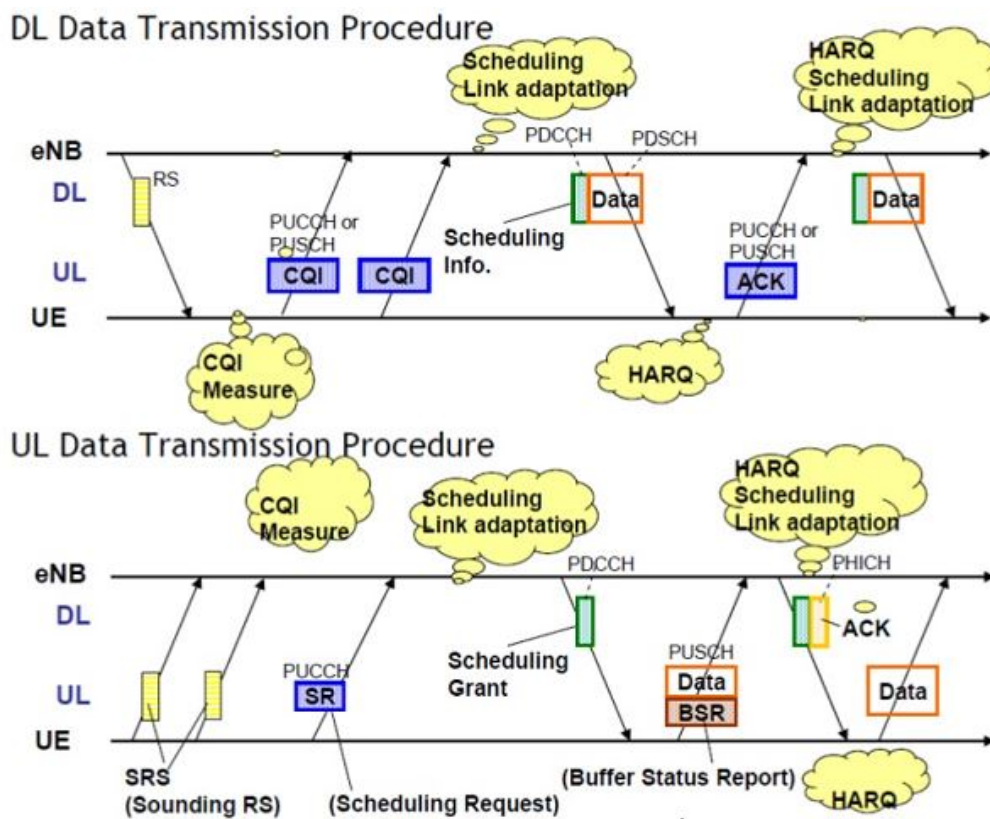
V druhém kroku mobilní přijímač provádí potřebné kroky pro měření stavu přenosového kanálu jako součást procesu dekodování přijatého zdrojového elementu. V tomto procesu se odhaduje přijatou kanálovou matici a provádí se různá měření kvality přenosového kanálu. Tato měření zahrnují parametry CQI, PMI a RI.

V rámci uplink přenosu může UE vysílač vložit informace o měření kvality přeno-

sového kanálu do PUCCH a vysílat je směrem k základnové stanici jako mechanismu zpětné vazby v uzavřené smyčce.

Ve čtvrtém kroku přijímač na straně eNodeB dekóduje informace obsažené v PUCCH. Dále tyto informace získané měřením kvality přenosového kanálu použije k rozhodnutí, jestli je třeba přizpůsobit parametry pro přenos zpět k UE.

V poslední části probíhá plánování pro odeslání následujícího sub rámce. Přenosové vlastnosti tohoto sub rámce jsou zakódovány do PDCCH a přeneseny směrem k UE. Tyto data obsahují informace o nových hodnotách parametrů udávajících vlastnosti přenosu (MSC, PMI, Rank Information, MIMO režim), které byly adaptovány pro aktuální kvalitu přenosového kanálu. Tento proces se opakuje pro každý sub rámec.



Obrázek 12: Link Adaptation - Komunikace na fyzické vrstvě

#### 4.4.1 Mapování na zdrojovém elementu - Resource Grid Mapping

Pro pochopení a implementaci problematiky mapování na zdrojový element je v první řadě potřeba znát a porozumět struktuře LTE rámce v časové doméně.

LTE signál může být prezentován na dvou dimenzionální mapě. Vertikální osa slouží jako časová doména a horizontální osa jako doména frekvenční.

Pro frekvenční doménu platí, že LTE (OFDM/OFDMA) pásmo tvoří malé oddělené kanály, které jsou nazývány subnosné. Mezera mezi jednotlivými kanály je vždy stejná. To znamená, že pokud se změní šířka pásma, mezery pořád zůstávají 15 KHz. To neplatí pro počet subnosných. Jako příklad poslouží LTE pásmo 20 MHz, které tvoří 1200 subnosných, zatímco LTE pásmu 10 MHz obsahuje 600 subnosných.

V časové doméně minimální jednotka je Symbol ( $66,7\mu\text{s}$ ). Velikost Symbolu se nemění. Další jednotkou v časové doméně je rámeček (10 ms) a každý rámeček obsahuje 10 subrámečků (1 ms), které se dělí na 2 sloty (0.5 ms). Každý slot obsahuje 7 symbolů.

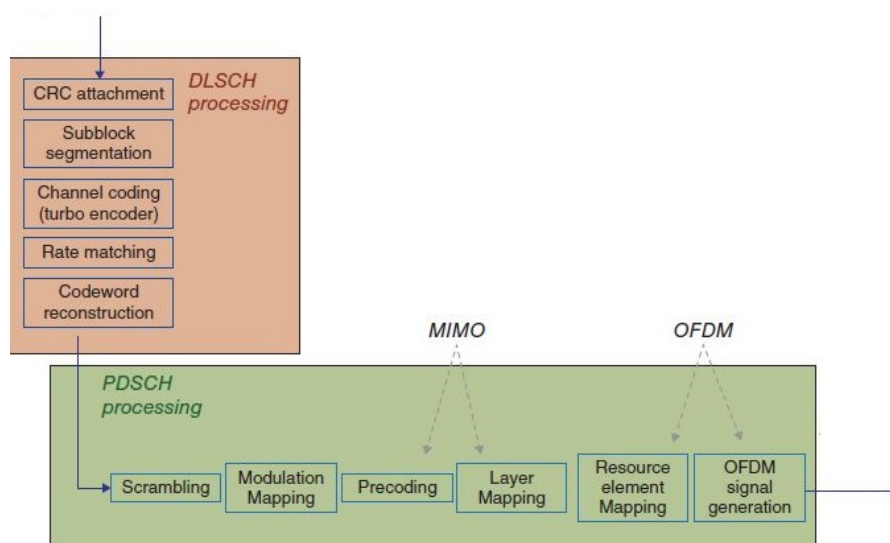
Pokud je zohledněna časově-frekvenční doména, hlavní jednotkou bude zdrojový blok (RB), který se skládá z jednoho slotu v časové doméně a 12 subnosných v doméně frekvenční.

Mapování na zdrojový element probíhá tak, že se pro matici zdrojového elementu vytvoří jednotlivé indicie, kterým jsou přiřazeny jednotlivé prvky, jež je třeba mapovat. V závislosti na tom, který subrámeček je využit, mapuje se BCH, PSS a SSS v subrámečku 0 nebo v subrámečku 5 z celkových šesti centrálních zdrojových bloků kolem DC subnosné. Dále CSR je umístěno do symbolu 0 a 5 každého slotu ve frekvenční doméně rozdělené do 6 subnosných. Vytvořená funkce bere jako vstup uživatelská data, CSR signál, index subrámečku a parametry PDSCH. Výstupem bude proměnná  $y$ , která představuje matici zdrojového elementu. 2D Matice má počet řádků roven počtu subnosných a počet sloupců je roven počtu OFDM symbolů. Počet OFDM symbolů je dán počtem slotů. [8]

## 4.5 Blokové schéma simulace

Na obr. č. 13 je zobrazen blokový diagram vysílače pro vytvořenou simulaci. Jako vstup je proměnná *payload* reprezentující bitový tok. Postupně jsou provedeny jednotlivé funkce DLSCH a následně PDSCH.

Na výstupu blokového schéma jsou OFDM symboly namapovány na vysílací antény a zpracovány pro přenos komunikačním kanálem. V komunikačním kanále jsou parametry ovlivněny vlastnostmi daného přenosového kanálu a dále jsou data přijata na straně přijímače, kde jsou jednotlivé procesy obráceny a data jsou postupně dekodována a demodulována.



Obrázek 13: Blokové schéma vysílače

## 4.6 Vlastnosti přenosového kanálu

### 4.6.1 Dopplerův posun

Vlivem zkreslení signálu při přenosu může dojít ke zkreslení konstelačního diagramu díky Dopplerovu posuvu. To se zejména děje při pohybujičím se přijímači vůči vysílači. Bez korekce Dopplerova posunu, není možné symboly správně odmapovat a dojde k úplné ztrátě informace. [3]

### 4.6.2 AWGN Kanál

Kromě kanálu pro fading simulace vyžaduje dodatečně AWGN kanál. Jedná se o kanál, jehož jediným zdrojem chyb je Gaussovský aditivní šum a nezohledňuje úniky, interferenci a vícecestné šíření. Jedná se o nejjednodušší model, kde signál  $r(t)$  na výstupu je součtem užitečného signálu  $s(t)$  (zeslaben konstantou  $\alpha$ ) a výše zmíněného Gaussovského aditivního šumu  $n(t)$ , který má vliv na SNR. AWGN kanál je součástí Communications System Toolboxu.

$$r(t) = \alpha s(t) + n(t)$$

Použitý přenosový kanál pro simulaci je kombinací AWGN kanálu a fading kanálu. [5, 7]



### 4.6.3 Specifikace modelu pro přenosový kanál

Systémový objekt *comm.LTEMIMOChannel* je specifický pro modelování LTE kanálu a pro implementaci používá 3 fading modely s vícecestným šířením - Extended Pedestrian A (EPA), Extended Vehicular A (EVA), and Extended Typical Urban (ETU). Existují i další modely s vyšší úrovní mobility, ale z důvodů jejich vlastností se nehodí na použití pro simulaci closed-loop spatial multiplexing režimu, který se používá pro vysoké datové rychlosti při menší mobilitě. S použitím AWGN kanálu tyto modely poskytují možnost hodnotit výkon vysílače/přijímače v různých podmínkách přenosového kanálu.

Tyto modely vícecestného šíření jsou specifikovány kombinací profilů pro zpoždění a profilů pro frekvenci Dopplerova jevu. Profily pro zpoždění odpovídají prostředím s nízkou, střední a vysokou hodnotou zpoždění. Jedná se o hodnoty 5, 70 a 300 Hz pro Dopplerův jev. Tyto modely jsou specifikovány standartem 3GPP (Third Generation Partnership Project) Technical Recommendation (TR) 36.104. *Tabulka číslo 5* představuje profily vytvořených modelů vycházejících právě z výše zmíněných doporučení. [4, 7]

Model Kanálu	Zpoždění (ns)	Relativní výkon (dB)	Dopplerův posun
Selektivní frekvence	(0:1:4)*(1.0e-06)	0 -4 -8 -12 -16	0
Nízká mobilita - flat	0	0	0
Nízká mobilita	(0 10 20 30 100)*(1/rychl. sampl. kanálu)	0 -3 -6 -8 -17.2	0
Vysoká mobilita - flat	0	0	70
Vysoká mobilita	(0 10 20 30 100)*(1/rychl. sampl. kanálu)	0 -3 -6 -8 -17.2	70

Tabulka 5: Profily pro simulaci vlastností přenosového kanálu

## 4.7 Grafické rozhraní frameworku

No *obr. č. 14* je zobrazeno vytvořené grafické rozhraní modelu. Vytvořený framework poskytuje možnost experimentovat s LTE procesem link adaptation.

**Grafické rozhraní se spouští v Matlabu v pracovním adresáři pomocí příkazu *diplomaGUI*.**

Pro experiment lze zvolit jednu ze 3 simulací. V první možnosti je třeba vybrat modulaci a rychlost kódování manuálně, zatímco druhá možnost poskytuje stejné simulační vlastnosti, ale modulace a rychlost kódování je zvolena podle použitého standartu pro link adaptation v LTE. Třetí simulace je zaměřena na zpětnou vazbu PMI a adaptivní MIMO.

Simulace probíhá pro jednotlivé subrámcce. Po zpracování jednotlivých subrámců program volá funkci pro grafické zobrazení spektra vyslaného a přijatého signálu před a po ekvalizaci. To stejné platí pro konstelační diagram přijatého a odeslaného signálu.

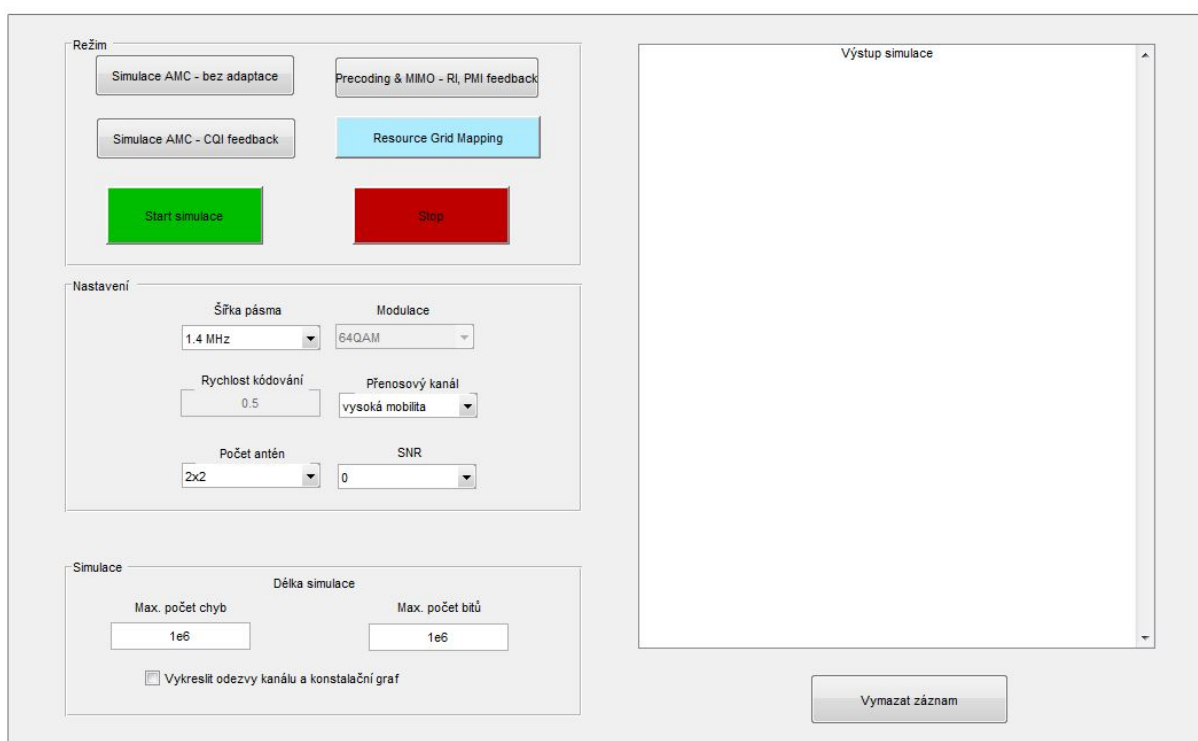


Měněním parametrů jako modulace, rychlost kódování, použitý model kanálu, šířka pásma, počet antén a SNR lze modifikovat podmínky pro danou simulaci a jejich vliv na celkový výkon.

Délku simulace lze zvolit přepsáním hodnot pro maximální počet chyb nebo maximální počet zpracovaných bitů. Obecně platí, že simulace pro větší šířku pásma si vyžaduje větší počet dat.

Pro model byl zvolen režim 4 LTE přenosu (Closed loop spatial multiplexing), který poskytuje potřebnou zpětnou vazbu pro link adaptation.

Součástí frameworku je také možnost vykreslit Resource Grid s namapováním jednotlivých signálů pro danou šířku pásma.



Obrázek 14: Grafické rozhraní frameworku



## 5 Vyhodnocení výsledků z vytvořeného modelu

Mezi typické systémové parametry, které se dynamicky mění podle vlastnosti kanálu, patří využitá šířka pásma, MIMO režim pro přenos, počet přenosových vrstev, předkódovaná matice, modulační a kódové schéma MCS a výkon přenosu. Pokud jsou tyto parametry zvoleny optimálně, lze efektivně využívat dostupné zdroje pro přenos, čehož nejde dosáhnout u modelu, kde jsou výše zmíněné parametry fixní a nepřizpůsobují se aktuálním podmínkám v přenosovém kanálu. Také bylo zmíněno, že aby mohly být tyto parametry dynamicky změněny, je potřeba vytvořit model, který bude simulovat parametry pro zpětnou vazbu přenosového kanálu - CQI, PMI, RI. Mezi LTE kanály, které tuto zpětnou vazbu poskytují, patří PUCCH a PDCCH, pro komunikaci mezi eNodeB a UE.

Níže uvedené výsledky jsou rozděleny do kapitol podle toho k jaké problematice se vztahují. V první části byla simulace zaměřena na link adaptation. Ve většině příkladů se naměřené hodnoty vztahují k hodnotě šířky pásma a hodnotě SNR. Mezi měřené parametry patří například rychlost kódování, bitová chybovost atd. Vytvořené uživatelské rozhraní poskytuje velký počet možností simulace, a proto v diplomové práci jsou zdůrazněny příklady, které mohou sloužit jako vzorový případ pro další obsáhlejší měření.

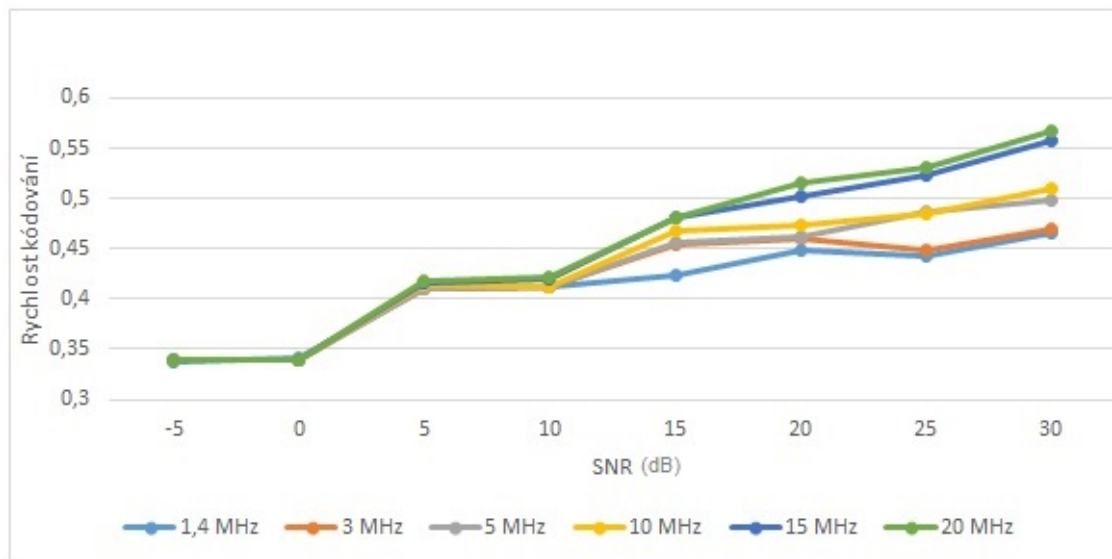
Pro zpřesnění měření bylo zpracováno v každé simulaci 60 subrámců, ze kterých byly vypočteny průměrné hodnoty. Samozřejmě počet zpracovaných dat lze nastavit v uživatelském rozhraní modelu a podle toho zvolit i přesnost naměřených výsledků. Je také potřeba brát v potaz, že první subrámeček není ovlivněn procesem link adaptation, jelikož bez předchozího subrámečku není možné vytvořit proces pro zpětnou vazbu.

### 5.1 Naměřené charakteristiky link adaptation - zpětná vazba CQI

Jak bylo výše zmíněno CQI představuje parametr, podle kterého se u procesu link adaptation volí použitá modulace a rychlost kódování pro následující subrámeček.

Přestože simulace probíhá pro jeden subrámeček, rozdílnost mezi jednotlivými šířkami pásma je způsobena obecným principem zdrojového elementu, kde počet symbolů v jednom subrámečku roste společně se šířkou pásma. Čím více dílčích nosných máme, tím více datových symbolů může být umístěno v každé subnosné, kde každý datový symbol je modulovaná verze uživatelských bitů a o to větší rychlosti přenosu dat lze podporovat.

Tato simulace používá pro přenos MIMO 2x2 a přenosový kanál vycházející z AWGN a EPA kanálu (s přidanou proměnlivou ztrátou užitečného signálu a vícecestným šířením).



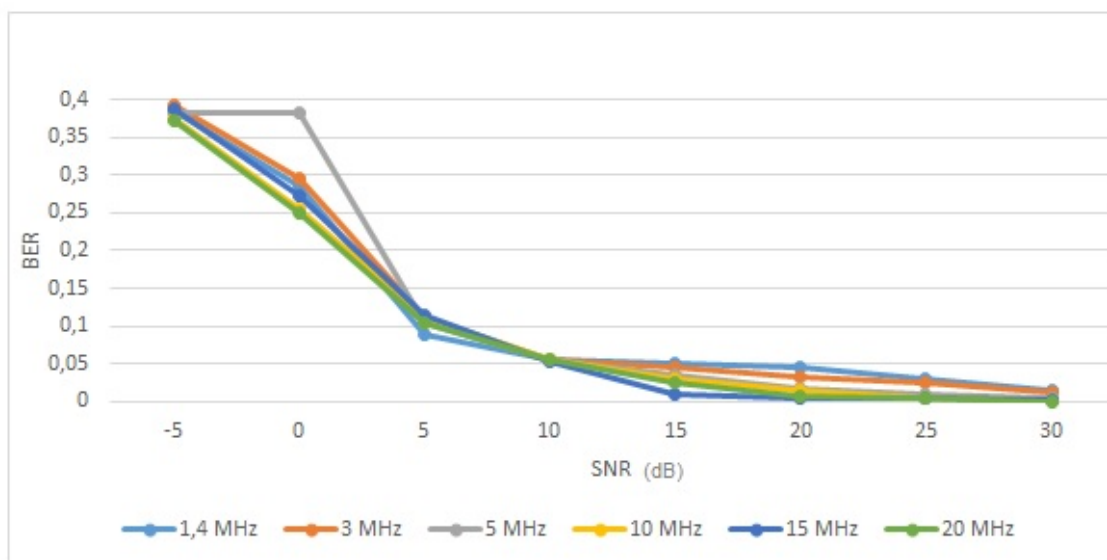
Obrázek 15: Graf - Link adaptation - Průměrná rychlost kódování

Na obrázku *obr. č. 15* vidíme zobrazení průměrné naměřené rychlosti kódování. Lze vidět, že rychlost kódování stoupá postupně se zvyšující se hodnotou SNR. Hodnoty 0 a -5 SNR představují velmi vysokou hladinu šumu, proto v tomto případě je zvolena nejmenší možná rychlost kódování za účelem vyšší ochrany dat při přenosu. Na *obr. č. 16* lze vidět vztah bitové chybovosti k použité šířce pásma. Podle předpokladu větší pásmo poskytuje větší možnosti v použití modulace a rychlosti kódování, což lze podle vztahů na obrázku potvrdit. Případné odchylky jsou způsobeny vlastnostmi přenosového kanálu. *Obr. č. 17* představuje stejná data, ale pouze od hodnoty 10 SNR po hodnotu 30 dB pro lepší představu rozdílů mezi jednotlivými pásmy.

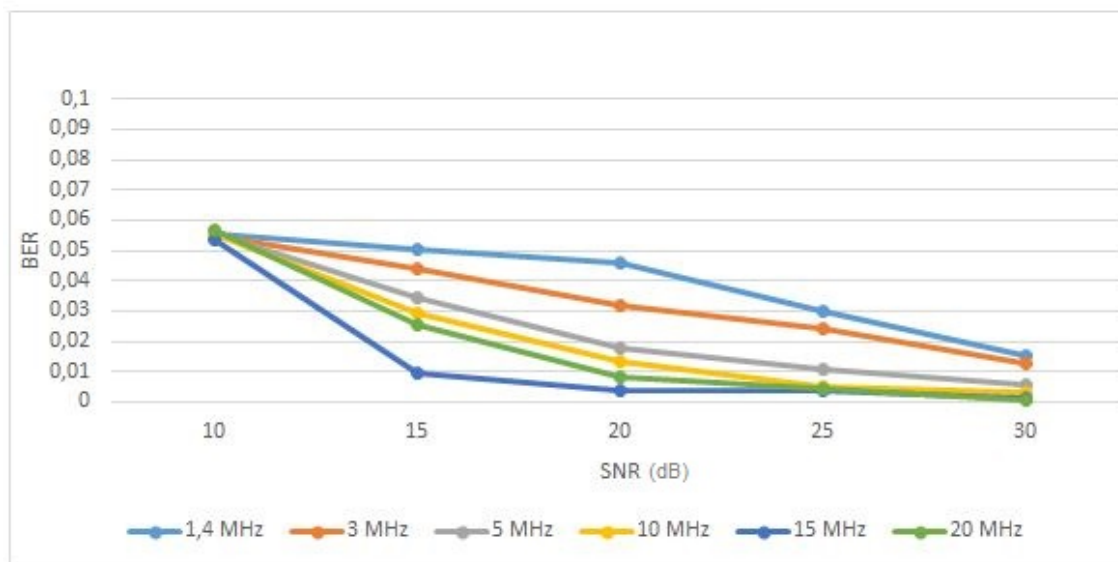
Samozřejmě všechny tyto hodnoty hrají roli na výslednou propustnost dat, která je pro tuto simulaci zobrazena na *obr. č. 18*. Jednotlivé šířky pásma poskytují specifickou propustnost dat pro každou volbu, což je dáno obecnou strukturou OFDM. Jak dokazuje provedená simulace, propustnost dat roste s vyšší hodnotou SNR, tak stejně jako rostou rozdíly mezi jednotlivými pásmy.

Z provedených měření lze dokázat, jak velký vliv má parametr SNR na celkový přenos a kapacitu přenosového pásma.

Posledním zajímavým údajem je procentuální rozdělení přiřazené modulace v závislosti na SNR. Pokud SNR nepřekročí hranici nad 5 dB, link adaptation volí jako modulaci QPSK, která poskytuje větší robustnost a lepší odolnost proti šumu. Opakem QPSK je použití modulace 64QAM pro vysoké přenosové rychlosti, ale menší odolnost proti šumu.

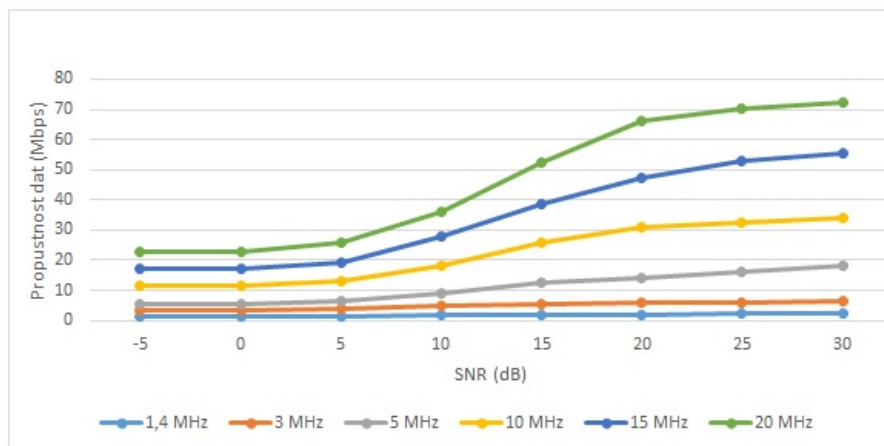


Obrázek 16: Graf - Link adaptation - BER -5 - 30 dB



Obrázek 17: Graf - Link adaptation - BER 10 - 30 dB

Jak lze vidět na obr. č. 19, pro použití modulace 64QAM je potřeba, aby vlastnosti přenosového kanálu nebyly ve větší míře ovlivněny parametry, které negativně působí na kvalitu kanálu. Tak stejně jako se zvětšuje propustnost daného kanálu se zvyšující se hodnotou SNR, tak stejně je možno pozorovat navyšující se počet subrámců modulovaných modulací 64QAM, která poskytuje mnohem vyšší spektrální účinnost.



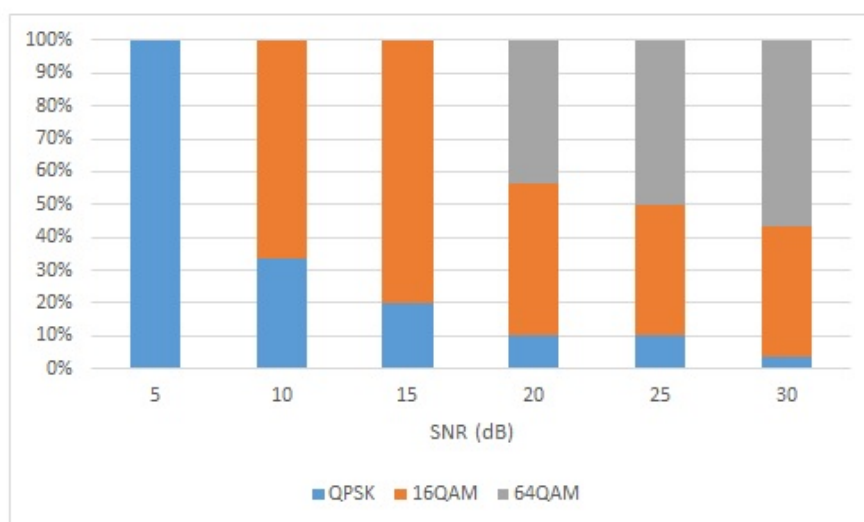
Obrázek 18: Graf - Link adaptation - Průměrná propustnost dat

## 5.2 Naměřené charakteristiky jednotlivých modulací v porovnání s link adaptation

Tato kapitola obsahuje naměřené charakteristiky jednotlivých modulací, které jsou dále porovnány s výsledky simulace link adaptation. Pro pochopení níže uvedených výsledků je potřeba chápat vztah mezi jednotlivými parametry a jejich vzájemný vliv. Vysoká přenosová rychlost ne vždy poskytuje lepší kvalitu přenesených dat. Přenos může být rychlejší, ale chybovost a šum mohou být příčinou nízké kvality signálu. Proto pro podrobnější analýzu můžeme porovnat například výsledky, které uvádí konstelační diagram pro uživatelská data. Díky parametru BER a ostatním analýzám je možno dojít ke komplexnějšímu závěru.

Tabulky č. 6, 7 a 8 zobrazují naměřené hodnoty BER, modulační rychlosti, propustnost dat a rychlost kódování. Rychlost kódování u jednotlivých modulací byla zvolena podle průměrné rychlosti kódování u naměřené simulace pro link adaptation, aby simulace poskytla co nejpřesnější data.

Pro simulaci v této kapitole byl zvolen MIMO režim 2x2.



Obrázek 19: Graf - Link adaptation - Procentuální rozdělení přiřazené modulace

Simulace - šířka pásma 10 MHz, SNR 10 dB				
Modulace	Propustnost dat	BER	Rychlost modulace	Rychlost kódování
QPSK	12,02 Mbps	0,0957789	2	0,413
16QAM	22,92 Mbps	0,1495315	4	0,413
64QAM	36,31 Mbps	0,2518382	6	0,413
Link Adaptation	18,35 Mbps	0,0556532	3,35	0,413

Tabulka 6: Simulace modulací - 10 Mhz, 10 dB

Simulace - šířka pásma 20 MHz, SNR 10 dB				
Modulace	Propustnost dat	BER	Rychlost modulace	Rychlost kódování
QPSK	28,34 Mbps	0,0000234	2	0,4186
16QAM	57,34 Mbps	0,1468995	4	0,4186
64QAM	87,01 Mbps	0,2518663	6	0,4186
Link Adaptation	36,09 Mbps	0,0564745	3,41	0,4186

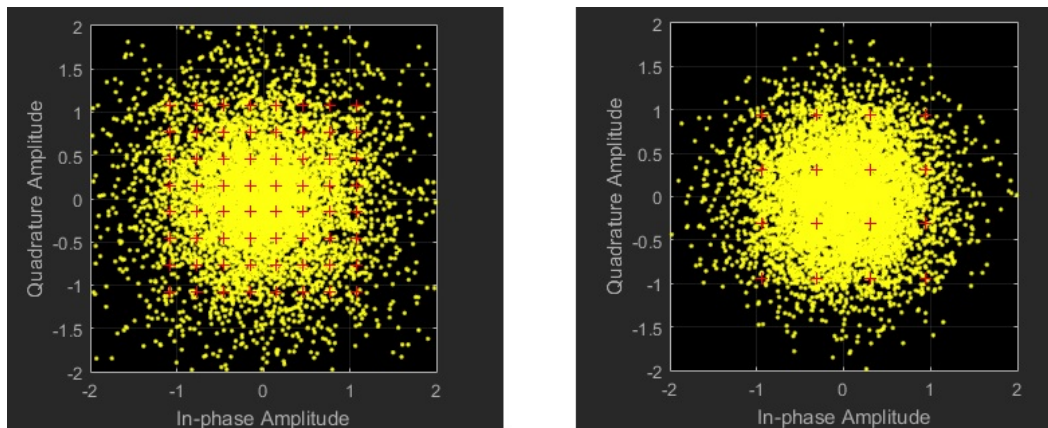
Tabulka 7: Simulace modulací - 20 Mhz, 10 dB

Simulace - šířka pásma 20 MHz, SNR 20 dB				
Modulace	Propustnost dat	BER	Rychlost modulace	Rychlost kódování
QPSK	28,34 Mbps	0,0000001	2	0,5152
16QAM	60,80 Mbps	0,0001109	4	0,5152
64QAM	87,94 Mbps	0,0665861	6	0,5152
Link Adaptation	65,97 Mbps	0,0080514	4,58	0,5152

Tabulka 8: Simulace modulací - 20 Mhz, 20 dB

Při porovnání jednotlivých tabulek je možno vidět rozdíly u jednotlivých šířek pásma. Modulace 64 QAM poskytuje vysokou propustnost dat, ale hodnota poměru přijatých bitů k bitům chybovým je natolik vysoká, že ve většině případů se nehodí pro přenos. Při menší hodnotě SNR modulace 16 QAM neposkytuje potřebnou kvalitu ani při použití pásma 20 MHz. Pokud jsou porovnány hodnoty pro link adaptation s hodnotami jednotlivých modulací, lze dojít k závěru, jak velký rozdíl je mezi jednotlivými parametry zvolených modulací a parametry procesu link adaptation, který představuje ideálně zvolenou modulaci pro daný přenosový kanál při dané šířce pásma.

Jako příklad pro určení, zda je daná modulace vhodná pro přenosový kanál, může sloužit konstelační diagram. Na obrázku *obr. č. 20* je možno porovnat přijatý signál před ekvalizací pro šířku pásma 10 MHz a SNR 10 dB. Pro obrázek vlevo bylo použita modulace 64QAM a pro obrázek vpravo byla použita modulace 16QAM, která byla zvolena na základě zpětné vazby CQI.

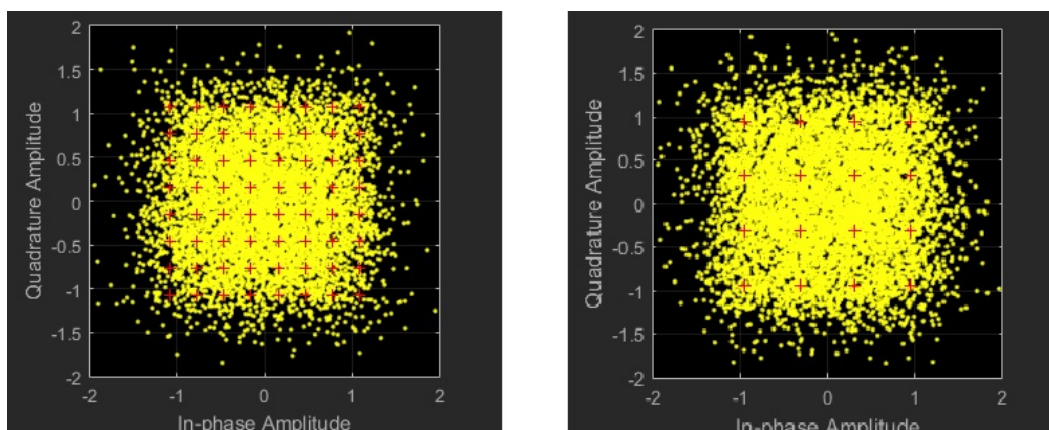


Obrázek 20: Přijatý signál před ekvalizací. Vlevo 64QAM, vpravo Link Adaptation-16QAM

*Obr. č. 21* představuje spektrum uživatelských dat po procesu ekvalizace. Ukazuje se,



že ekvalizér může kompenzovat účinek fading kanálu a výsledkem je konstelace, která odpovídá mapování dané modulace. V tomto případě 64QAM vlevo a 16QAM vpravo.

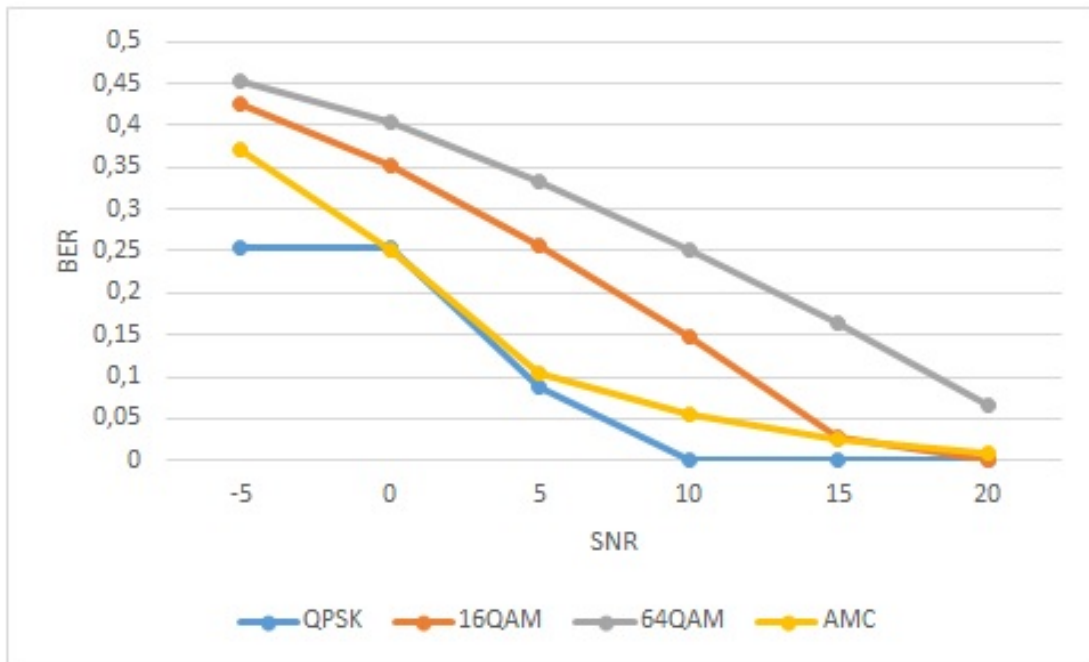


Obrázek 21: Přijatý signál po ekvalizaci. Vlevo 64QAM, vpravo Link Adaptation-16QAM

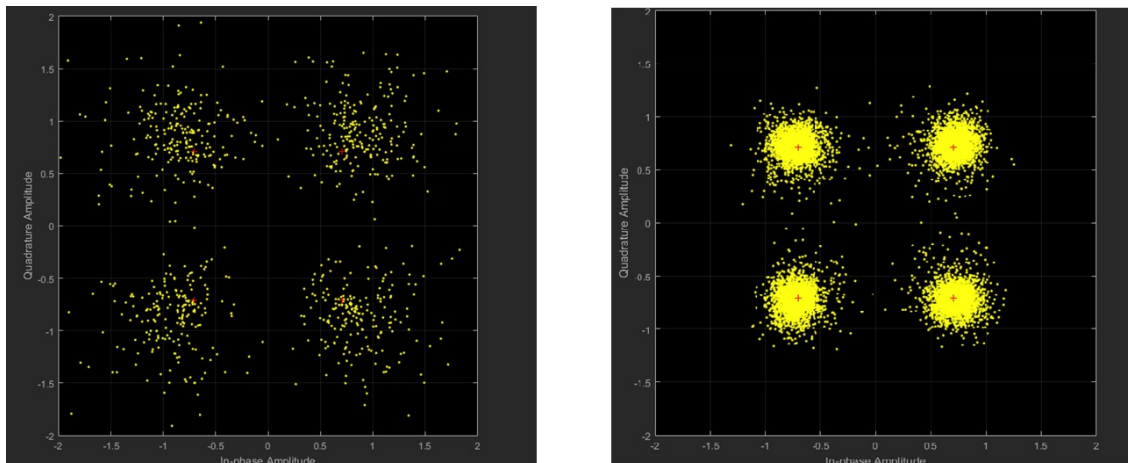
Výše uvedené *tab. č. 6* a *tab. č. 7* pro pásmo 20 MHz a 10 MHz při hodnotě SNR 10 ukazují, že hodnota BER pro určitou modulaci je velmi podobná té stejné modulaci pro jiné pásmo. Ale na druhou stranu propustnost dat je velmi rozdílná, což dokazuje, jak velké rozdíly poskytuje použití různých šířek pásma. Jako příklad může posloužit měření modulace 16QAM, kde pro pásmo 10 MHz je průměrná propustnost 22,92 Mbps, zatímco pro pásmo 20 MHz při podobné bitové chybovosti je dosaženo průměrné rychlosti až 57,34 Mbps.

*Obr. č. 22* popisuje vztah SNR, BER a použité modulace pro šířku pásma 20 MHz. Křivka popisující link adaptation může sloužit jako ideální využití daného přenosového kanálu. Samozřejmě je třeba taky brát ohled na propustnost dat (*tab. č. 7* a *tab. č. 8*).

Na závěr této kapitoly je zachycen přijatý subrámeček po ekvalizaci pro různé šířky pásma - (*obr. č. 23*). Jelikož struktura subrámečku z pohledu frekvenční domény se liší pro každou šířku pásma, lze vidět, že subrámeček pro šířku pásma 20 MHz mapuje větší počet symbolů a to i s větší přesností. Mapování odpovídá použité modulaci QPSK. Pro tuto simulaci byla hodnota SNR nastavena na 30 dB pro lepší zobrazení struktury namapovaných bitů.



Obrázek 22: Vztah mezi použitou modulací, SNR a BER



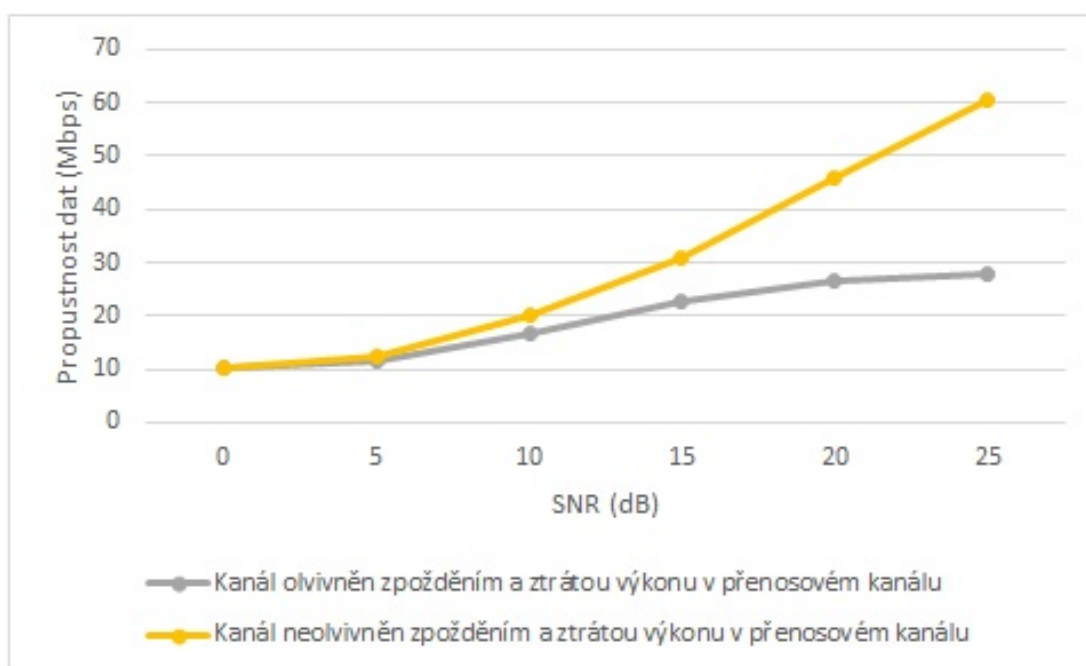
Obrázek 23: QPSK - Přijatý signál po ekvalizaci. Vlevo šířka pásma 1,4 MHz, vpravo šířka pásma 20 MHz

### 5.3 Porovnání charakteristiky přenosových kanálů

Díky modelům kanálu, které byly uvedeny v *Kapitole 4. 5 Vlastnosti přenosového kanálu*, je možno simulovat a porovnat vlastnosti jednotlivých typů kanálu. Jednotlivé modely jsou specifikovány kombinací vytvořených profilů pro zpoždění signálu a fadingu. Simulace obsahuje 4 druhy kanálu. 2 jsou určeny pro simulaci vysoké a nízké mobility bez ovlivnění užitečného výkonu signálu. A následující dva jsou určeny pro simulaci vysoké a nízké mobility, kde je užitečný signál ovlivněn jak ztrátou výkonu v přenosovém kanálu, tak i zpožděním, které představuje vícecestné šíření.

Pro ověření a simulaci vlivu vícecestného šíření a ztráty výkonu v přenosovém kanálu, byl zvolen model přenosového kanálu pro vysokou mobilitu, který není vícecestným šířením a ztrátou výkonu ovlivněn a přenosový kanál, kde jsou tyto jevy aplikovány.

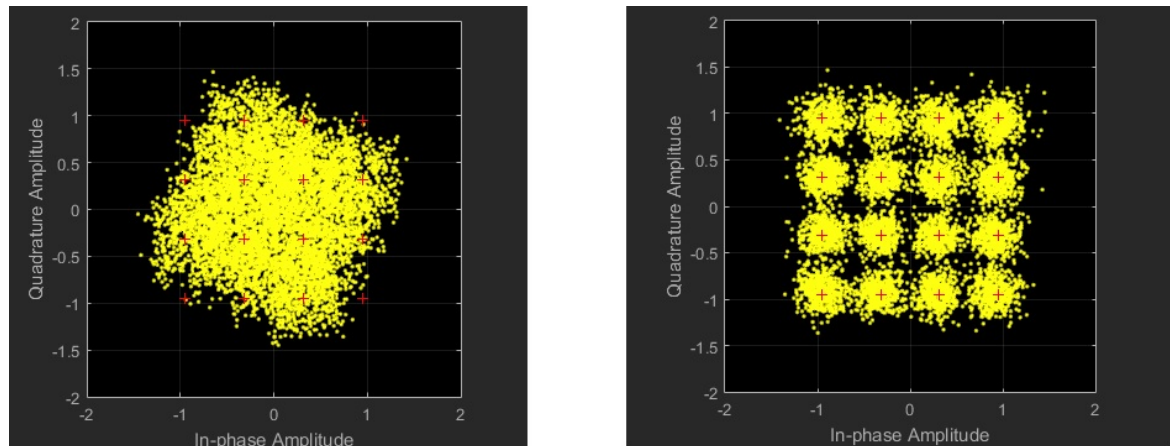
Pro každou simulaci bylo zpracováno 60 subrámců. Součástí simulace je proces link adaptation, který vždy volí ideální použití modulace a rychlost kódování v daných přenosových podmínkách. Na *obr. č. 24* je zobrazen vztah mezi SNR a propustností dat pro výše zmíněné přenosové kanály.



Obrázek 24: Vliv přenosového kanálu na propustnost dat

Při vysoké mobilitě lze pozorovat vliv Dopplerova jevu na přenášený signál.

Na obr. č. 25 je zobrazen přijatý signál před a po ekvalizaci. Konstelace přijatého signálu se stále podobá 16 QAM modulaci. Přesto v každém časovém kroku se konstelace otáčí na základě fázového posunu v důsledku Dopplerova jevu.



Obrázek 25: Konstelační diagram - přijatý signál před a po ekvalizaci pro simulaci s vysokou mobilitou

#### 5.4 Porovnání charakteristik MIMO 2x2 a MIMO 4x4 pro link adaptation, Spatial Multiplexing

Nejefektivnější způsob, jak zvýšit propustnost dat, je zvýšením úrovně přijatého signálu na straně přijímače. Toho lze dosáhnout zvýšením počtu antén na straně vysílače i přijímače. Takové řešení poskytuje znatelný vliv na propustnost pásma a bitovou chybovost. Spatial Multiplexing zaručuje lineární růst přenosové kapacity s přibývajícím počtem antén. To platí i pro šířku pásma viz *tab. č. 9* a *tab. č. 10*. Více o Spatial Multiplexing v *Kapitole 2.7*.

Vliv možnosti vysílat nezávislé toky dat z každé antény, je možno vidět v *tab. č. 9* a *tab. č. 10*. Pokud jsou porovnány naměřené výsledky, lze si všimnout, že hodnoty BER pro MIMO 2x2 se přibližují hodnotám BER naměřených pro MIMO 4x4. Tento výsledek je zavádějící a je potřeba si uvědomit, že při procesu link adaptation je zvolena modulace a rychlost kódování, tak aby se hodnota parametru BLER, který je ovlivněn parametrem BER, pohybovala na určité úrovni. Přesto, že MIMO 4x4 poskytuje větší prostor pro snížení bitové chybovosti, link adaptation využívá efektivně danou šířku pásma, pro zvýšení propustnosti dat a udržuje hladinu hodnoty BER na podobné úrovni pro všechny kombinace MIMO.

Odchyly v měření mohou být způsobeny vlastnostmi přenosového kanálu.

<b>Simulace - MIMO 2x2, SNR 15 dB, Spatial Multiplexing</b>				
Šířka pásma	Propustnost dat	BER	Rychlost modulace	Rychlost kódování
1,4 MHz	<b>1,89 Mbps</b>	0,0501356	2,63	0,4883
3 MHz	<b>6,04 Mbps</b>	0,0442659	3,31	0,4552
5 MHz	<b>12,30 Mbps</b>	0,0342897	3,88	0,4566
10 MHz	<b>25,87 Mbps</b>	0,0292316	3,94	0,4684
15 MHz	<b>38,44 Mbps</b>	0,0216364	3,87	0,4803
20 MHz	<b>52,57 Mbps</b>	0,0257462	4	0,4706

Tabulka 9: Simulace režimu MIMO 2x2

<b>Simulace - MIMO 4x4, SNR 15 dB, Spatial Multiplexing</b>				
Šířka pásma	Propustnost dat	BER	Rychlost modulace	Rychlost kódování
1,4 MHz	<b>2,80 Mbps</b>	0,0349926	2,06	0,4253
3 MHz	<b>7,79 Mbps</b>	0,0415402	2,06	0,4773
5 MHz	<b>15,02 Mbps</b>	0,0354289	2,19	0,4766
10 MHz	<b>31,67 Mbps</b>	0,0249738	2,44	0,5
15 MHz	<b>46,08 Mbps</b>	0,0294595	2,44	0,4766
20 MHz	<b>61,18 Mbps</b>	0,0329981	2,38	0,4867

Tabulka 10: Simulace režimu MIMO 4x4

## 5.5 Link Adaptation - transmit diversity & spatial multiplexing

Zpětná vazba RI umožňuje adaptovat přenosový režim MIMO na transmit diversity nebo spatial multiplexing. Jak bylo zmíněno v teoretické části, transmit diversity využívá jednotlivé antény na straně vysílače k vyslání stejného signálu ve více vrstvách a tím zvyšuje robustnost vysílání a spolehlivost přenosové linky. Počet vrstev je vždy odvozen od počtu antén. Na druhou stranu režim spatial multiplexing nevyužívá redundantních vrstev, ale posílá oddělené toky dat přes jednotlivé antény a tím zvyšuje propustnost přenosové linky.

MIMO režimy se volí podle zpětné vazby RI a mají vliv na celkovou propustnost dat. Tab. 11 zobrazuje vliv jednotlivých režimů na propustnost dat a BER. Jak lze předpokládat při použití spatial multiplexingu je možno dosáhnout vyšší propustnosti dat a na druhou stranu u transmit diversity režimu je snížena bitová chybovost právě na úkor přenosové rychlosti. Adaptivní MIMO poskytuje pro tyto podmínky datovou propustnost přibližující se režimu spatial multiplexing. To je dáno podmínkami v přenosovém kanálu. Z celkových 60 subbrámců použitých pro tuto simulaci, 18 subbrámců bylo zpracováno metodou transmit diversity a 42 metodou spatial multiplexing.

Simulace - šířka pásma 15 MHz, SNR 20 dB, 16 QAM, 4x4 MIMO				
MIMO režim	Propustnost dat	BER	Rychl. modulace	Rychl. kódování
Transmit Diversity	16,65 Mbps	0,0042784	4	0,4
Spatial Multiplexing	67,38 Mbps	0,0187701	4	0,4
Adaptivní MIMO	52,41 Mbps	0,0117821	4	0,4

Tabulka 11: Porovnání Transmit Diversity, Spatial Multiplexing a Adaptivní MIMO

## 6 Srovnání ostatních LTE Simulátorů

### 6.1 LTE-Sim Framework

LTE-Sim je open source framework vytvořený pro simulaci LTE sítě. Zahrnuje několik aspektů LTE sítě, včetně obou Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRAN) a Evolved Packet System (EPS). Dále podporuje jednoduché a heterogenní multi-buněčné prostředí, řízení QoS, multi-user prostředí, mobilitu uživatele a procedury procesu handover. Dále jsou zde vymodelovány 4 druhy síťových uzlů: UE, Home eNodeB, eNodeB a MME/GW. Čtyři různé generátory datového provozu byly implementovány na aplikační vrstvě a je zde podporována i správa dat radiového nosiče. A konečně známé procesy schedulingu (Proportional Fair, Modified Largest Weighted Delay First a Exponential Proportional Fair, Log and Exp rules), AMC schéma, zpětná vazba CQI a modely pro fyzickou vrstvu.

Aby byla zajištěna modularita, polymorfismus, flexibilita a vysoká výkonnost, LTE-Sim byl napsán v jazyce C++ s použitím objektově orientované paradigma, jako simulátor řízený událostmi.

LTE-Sim Framework byl vytvořen, aby simuloval LTE síť. Funkce tohoto simulátoru umožňují výzkumným pracovníkům a odborníkům testovat techniky pro vylepšení 4G mobilních sítí, jako jsou nové fyzikální funkcionality, inovativní síťové protokoly a architektury, výkonné schedulink techniky a podobně. Otevřená dostupnost tohoto softwaru umožňuje lidem, věnujícím se výzkumu v této oblasti, přispět k rozvoji frameworku a srovnávat nová řešení pro LTE systém.

Účinnost vyvinutého frameworku byla ověřena simulacemi a studijí. V blízké budoucnosti se plánuje vylepšit simulátor zavedením nových funkcí jako je HARQ a sofistikovanější modely kanálů a PHY, které nebyly zahrnuty v aktuální verzi softwaru. [22]

### 6.2 Vienna LTE Simulator

Simulátor je k dispozici v rámci nekomerční open source akademické licence, což umožňuje výzkumným pracovníkům provádět a testovat algoritmy spojené s technologií LTE. Open source řešení usnadňuje vědcům reprodukovat uveřejněné výsledky v souvislosti s LTE a tím podporuje srovnání nových algoritmů.

Simulátor byl vytvořen na platformě Matlab a slouží k simulaci linkové a systémové úrovně prostředí LTE a UMTS. Simulace linkové vrstvy slouží pro vyhodnocení procesu odhadu kanálu, předpovědácích a synchronizačních algoritmů, MIMO, AMC a podobně. Zatímco systémová úroveň se soustředí spíše na problematiku spojenou se síťovou vrst-

vou. Zde patří scheduling, přidělení zdrojů, multi-user zacházení, řízení mobility, řízení interference a optimalizace plánování sítě.

Vienna LTE Simulator poskytuje možnost simulace základních vlastností linkové vrstvy pro uvedení nejčastějších veličin a parametrů v LTE a LTE-A a je zaměřen hlavně na downlink. Mezi další možnosti simulace patří DL synchronizace v různých přenosových podmínkách. Dále simulace vysoké mobility, lze reprodukovatelně měřit při rychlostech až 400 km/h, kde se simulace soustředí na optimální kódování a OFDM architekturu v těchto extrémních podmínkách.

Další možností je simulace základních principů link adaptation a lineárního precodingu pro simulaci "single-user" při použití MIMO přenosu. Práce je zde zaměřena na vytvoření optimální zpětné vazby pro umožnění efektivního provozu s informacemi o stavu kanálu. Součástí MIMO přenosu je i simulace "multi-user", ale zde chybí rozsáhlejší studie na téma link adaptation.

Jako nejnovější součást LTE Vienna Simulátoru vznikl experiment pro uplink s pomocí studentských prací. Prvním záměrem bylo vytvořit přímočarou kopii DL s úpravami jako například SC-FDMA, ale brzy se ukázalo, že mezi DL a UL existují příliš velké rozdíly a koncept pro DL neposkytuje dostatečnou funkčnost pro UL. [23]

### 6.3 Souhrn

Pokud by měly být srovnány jednotlivé dostupné simulace pro LTE, je nutno dodat, že bez ohledu na to, jestli je simulační nástroj komerční/nekomerční nebo jestli je založen na prostředí Matlabu, C, C++ nebo WM-SIM, jejich uzavřená implementace blokuje přístup k detailům implementace a tedy k jakýmkoliv předpokladům, které mohly být zařazeny. Například jako spolehlivost výsledků závisící čistě na víře v odpovídající a řádnou implementaci. Nezávislé ověření výsledků v těchto uzavřených simulačních prostředích není jednoduché, je časově velmi náročné a často neproveditelné. Pokud se pohybujeme v prostředí RAN, víme jak komplikované je porovnávat nebo vycházet z výsledků výstupu simulace.



## 7 Závěr

Tato práce měla za cíl popsat vlastnosti fyzické vrstvy systému LTE, uvedení parametrů pro vyhodnocování kvality rádiového kanálu a vytvoření frameworku pro simulaci Resource Grid Mapping a Link Adaptation. Díky Matlabu a jeho systémovým toolboxům se podařilo navrhnout zmíněný framework. Simulace link adaptation obsahuje širokou škálu možností díky implementovaným přenosovým kanálům, volitelné šířce pásma a dalším parametrům ovlivňujících kvalitu přenosu. Jelikož možností simulace je opravdu mnoho, byly v diplomové práci uvedeny převážně případové studie k jednotlivým experimentům. Mezi možnosti frameworku patří porovnání výběru modulace a rychlosti kódování na základě zpětné vazby, dále porovnání jednotlivých modulací, použití různých přenosových kanálů, různých režimů MIMO či počtu antén. Součástí frameworku je také vykreslení Resource Grid pro jednotlivé šířky pásma s namapováním jednotlivých signálů.

Pokud jsou srovnány naměřené výsledky, lze vidět, jak důležitou součástí je proces link adaptation pro systém LTE nebo LTE/SAE. Bez tohoto procesu by základnová stanice nedokázala automaticky vybírat vhodné přenosové schéma pro daný přenosový kanál. Flexibilita kterou tento proces poskytuje mnohem lepší výsledky ve srovnání s manuálním nastavením přenosového schématu.

Existující projekty pro simulaci LTE a LTE/SAE se velmi liší a to hlavně implementací. Přesto vytvořené frameworky v první řadě slouží jako nástroje pro výzkum a testování vlastností systému LTE. Případně pro simulaci specifických schémat pro ověření parametrů ovlivňujících LTE služby v daném prostředí nebo v daných specifických podmínkách. Samozřejmě nelze zapomenout na přínos v podobě ověření teoretických znalostí. To znamená, že jednotlivé frameworky mohou sloužit jako nástroj pro studenty k získání potřebných znalostí LTE problematiky.

Andrzej Waloszek



## 8 Reference

- [1] Prokopec, Jan. *SYSTÉMY MOBILNÍCH KOMUNIKACÍ: Síť pro mobilní datové služby* Brno: Litera Brno, 2012. 186 s. ISBN 978-80-214-4498-0
- [2] Christopher Cox *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications: Second Edition* ISBN: 978-1-118-81803-9, 2014.
- [3] ADAM HAMADA *Využití moderních vícetónových modulací v bezdrátových sítích* Vysoké Učení technické v Brně, 2013.
- [4] Houman Zarrinkoub *Understanding LTE with MATLAB: From Mathematical Modeling to Simulation and Prototyping* ISBN: 978-1-118-44341-5, 2014.
- [5] Joydeep Acharya, Long Gao, Sudhanshu Gaur *Heterogeneous Networks in LTE-Advanced* ISBN: 978-1-118-51186-2, 2014
- [6] Pradeep Prabhu <https://ltebasics.wordpress.com/>
- [7] *From GSM to LTE-Advanced: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband* ISBN: 978-1-118-86195-0, 2014.
- [8] Dr Alastair Brydon <http://www.unwiredinsight.com/> Unwired Insight
- [9] Radio Electronics <http://www.radio-electronics.com/>
- [10] Shahram Zarei *Channel Coding and Link Adaptation* Ausgewahlte Kapitel der Nachrichtentechnik, WS 2009/2010
- [11] Dr. Thomas Brüggem *R&S®/TS 8980 test system analyzes LTE quality indicators: CQI, PMI and RI* ROHDE&SCHWARZ, 2013.
- [12] The MathWorks, Inc. <http://www.mathworks.com/>
- [13] Berenguer Ignacio, Hall Hughes *Filtered Multitone (FMT) Modulation for Broadband Fixed Wireless System* United Kingdom: University of Cambridge, Department of Engineering, 2002.
- [14] Proakis J., Salehi M. *Digital Communications, fifth edition* McGraw-Hill, inc. 2008, ISBN: 978-0-07-295716-7
- [15] Sklar Bernard *Digital Communications Fundamentals and Applications second edition* University of California, Los Angeles, California. 2001, ISBN: 0-13-084788-7

- [16] Gessner C. *UMTS Long Term Evolution (LTE) Technology Introduction*, Rhode & Schwarz
- [17] <http://www.3gpp.org/> 3rd Generation Partnership Project. 3GPP
- [18] Bumbálek Z. <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010020004> Modulační techniky v moderních bezdrátových sítích
- [19] 3GPP, TS 36.212 <<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36212.htm> Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding, 2012
- [20] STEEPEST ASCENT LTD <http://www.steepestascent.com/> 4G Evolution Lab - LTE Toolbox: Channel Estimation, 2009
- [21] Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker *LTE-the UMTS long term evolution: from theory to practise* SBN 978-0-470-69716-0, 2009.
- [22] Telematics lab <http://telematics.poliba.it/index.php/en/lte-sim>
- [23] Christian Mehlhruer, Josep Colom Ikuno, Michal Simko, Stefan Schwarz, Martin Wrulich, and Markus Rupp <http://www.cs.odu.edu/~rnagella/LTE-simulation/Reproducible%20results%20using%20LTE%20Simulator.pdf>