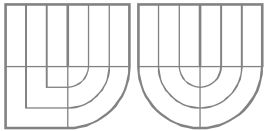


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS



## VYSOKORYCHLOSTNÍ BEZDRÁTOVÉ TECHNOLOGIE LOW POWER, HIGH DATA RATE, WIRELESS TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

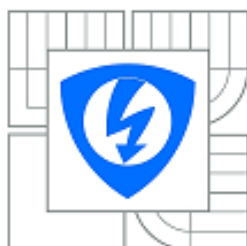
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

David Bureš

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. Stanislav Hanus, CSc.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Student:** David Bureš

**ID:** 10454

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2009/2010

**NÁZEV TÉMATU:**

## Vysokorychlostní bezdrátové technologie

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s architekturou a zpracováním signálů v systémech využívajících vysokorychlostní bezdrátové technologie (xMAX, LTE). Provedte srovnání používaných modulačních technik, přenosových rychlostí, spektrální a výkonové účinnosti technologií těchto systémů s jinými technologiemi (UMTS, aj.).

V prostředí MATLAB vytvořte program umožňující simulaci zpracování signálu ve zvoleném systému a vyhodnocení jeho chybovosti v různých přenosových prostředích (šum, rušení).

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SCHWARZ, S. Overview and Evaluation of xMax. Princeton University of Electrical Engineering, 2006. Dostupné na [www: http://www.xgtechnology.com/](http://www.xgtechnology.com/)

[2] NUAYMI, L. WiMAX Technology for Broadband Wireless Access. France: J. Wiley & Sons, 2007.

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 28.5.2010

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Stanislav Hanus, CSc.

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**  
*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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.

# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: David Bureš  
Bytem: Šaumannova 1A, Brno, 615 00  
Narozen/a (datum a místo): 25. února 1978 ve Znojmě

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

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

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

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

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

Název VŠKP: Vysokorychlostní bezdrátové technologie

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

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\*:

- |  |   |                    |
|--|---|--------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> v tištěné formě      | – | počet exemplářů: 2 |
| <input checked="" type="checkbox"/> v elektronické formě | – | počet exemplářů: 2 |

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

\* hodící se zaškrtněte

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

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

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

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

V Brně dne: 28. května 2010

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **ABSTRAKT**

Seznámení s architekturou a zpracováním signálu v systémech využívajících vysokorychlostní bezdrátové technologie – LTE, WiMAX, UMB. Srovnání modulačních technik, přenosových rychlostí, spektrální a výkonové efektivity..

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Vysokorychlostní bezdrátové technologie, GSM, GPRS, EDGE, UMTS, HSPA, HSDPA, HSUPA, HSPA+, WiMAX, UMB, LTE.

## **ABSTRACT**

Introduction to architecture and processing of signals in high data rate wireless systems – LTE, WiMAX, UMB. Comparing of modulation technology, data rates, spectral and power efficiency.

## **KEYWORDS**

High data rate wireless technology, GSM, GPRS, EDGE, UMTS, HSPA, HSDPA, HSUPA, HSPA+, WiMAX, UMB, LTE.

BUREŠ, D. *Vysokorychlostní bezdrátové technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010. 46 s., 5 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Stanislav Hanus, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Vysokorychlostní bezdrátové technologie jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 bakalářské práce prof. Ing. Stanislavu Hanusovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále manželce Martině a dceři Bětce, že mi umožnili věnovat čas této práci a lékařům a sestřám oddělení ORIM1 kliniky KARIM FN Bohunice, bez jejichž pomoci bych tuto práci už nedokončil.

V Brně dne 28.5.2010

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>x</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>xi</b>
<b>Zadání</b>	<b>1</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Historický vývoj</b>	<b>2</b>
1.1 Rodina GSM/UMTS/LTE.....	2
1.2 Rodina technologií CDMA2000.....	2
1.3 Rodina technologií WiMAX.....	3
1.4 Další konkurence .....	4
<b>2 Historický vývoj ve zkratce</b>	<b>5</b>
<b>3 Porovnání podle technologií mnohonásobného přístupu</b>	<b>7</b>
3.1 Výhody OFDMA .....	7
3.2 Princip OFDM/OFDMA/SC-FDMA.....	7
3.2.1 Technologie OFDM.....	8
3.2.2 Technologie SC-FDMA.....	9
3.2.3 Princip přiřazení konkurenčních uživatelů na podnosné .....	9
<b>4 Porovnání z hlediska použitých modulací</b>	<b>10</b>
4.1 Zobrazování fázové modulace .....	10
4.2 Typy modulace - QPSK / 16QAM / 64QAM.....	11
<b>5 Porovnání z hlediska použití duplexního módu</b>	<b>12</b>
<b>6 Porovnání rychlostí</b>	<b>13</b>
<b>7 Spektrální efektivita</b>	<b>15</b>
<b>8 Porovnání nákladů a rozsahu</b>	<b>17</b>
<b>9 Porovnání výkonové efektivity</b>	<b>18</b>
9.1 Příklady metod na snižování PAPR u OFDM .....	19
<b>10 Konkurenční srovnání</b>	<b>20</b>

<b>11</b>	<b>Výběr technologie</b>	<b>22</b>
<b>12</b>	<b>Technologie LTE</b>	<b>22</b>
12.1	Souhrnný popis .....	22
12.2	Fyzická vrstva .....	23
12.2.1	Principy eliminace ISI .....	23
12.2.2	Datový rámec u OFDMA .....	24
12.2.3	Referenční signály .....	27
<b>13</b>	<b>Simulace technologií LTE a jejich vliv na BER</b>	<b>30</b>
13.1	Měření chybovosti .....	30
13.2	Simulace BER pro jednotlivé modulace .....	30
13.2.1	BPSK .....	31
13.2.2	QPSK (4QAM) .....	34
13.2.3	16QAM .....	35
13.2.4	64QAM .....	36
13.3	Srovnání chybovosti jednotlivých modulací.....	37
13.4	Závěr k chybovosti BER pro jednotlivé modulace .....	38
<b>14</b>	<b>Turbo kódování</b>	<b>39</b>
14.1	Schéma simulace.....	39
14.2	Výsledky simulace .....	40
<b>15</b>	<b>Závěr</b>	<b>41</b>
	<b>Literatura</b>	<b>42</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>44</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>47</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Grafický přehled historického vývoje, převzato z [1].	6
Obr. 3.1: Princip OFDM/OFDMA, převzato z [6]	8
Obr. 3.2: Princip SC-FDMA, převzato z [6]	9
Obr. 3.3: Distribuovaný a lokalizovaný mód, převzato z [6]	10
Obr. 4.1: I/Q složky fázového posuvu, převzato z [7]	11
Obr. 4.2: Konstelační diagramy digitálních modulací a) PSK, b) QAM, převzato z [8]	11
Obr. 7.1: Spektrální efektivita vybraných technologií v porovnání s teoretickou hranicí, převzato z [1]	15
Obr. 7.2: Porovnání spektrální efektivity downlinku, převzato z [1]	16
Obr. 7.3: Porovnání spektrální efektivity uplinku, převzato z [1]	17
Obr. 8.1: Množství účastníků napříč technologiemi, předpověď pro roky 2008- 2013, převzato z [1]	18
Obr. 9.1: Přidělování kanálu uživatelům v OFDM/OFDMA [9]	18
Obr. 12.1: struktura OFDM v čase na jedné podnosné, převzato z [12]	24
Obr. 12.2: Zrojová mřížka pro downlink a uplinka, převzato z [12]	25
Obr. 12.3: Rozmístění referenčních signálů v OFDM podrámcí, převzato z [12]	27
Obr. 12.4: Mapování referenčních signálů pro normální cyklický prefix [11]	28
Obr. 12.5: Mapování referenčních signálů pro rozšířený cyklický prefix [11]	29
Obr. 13.1: BPSK/OFDM v Simulinku	31
Obr. 13.2: OFDM Modulace v Simulinku	32
Obr. 13.3: OFDM Demodulace v Simulinku	32
Obr. 13.4: Graf BER pro BPSK/OFDM	33
Obr. 13.5: Graf BER pro QPSK(4QAM)/OFDM	34
Obr. 13.6: Graf BER pro 16QAM/OFDM	35
Obr. 13.7: Graf BER pro 65QAM/OFDM	36
Obr. 13.8: Společný graf BER pro BPSK-QPSK-16QAM-64QAM/OFDM	37
Obr. 13.9: Teoretické hodnoty BER pro jednotlivé modulace.	38
Obr. 14.1: BPSK/OFDM s Turbo kódem v Simulinku	39
Obr. 14.2: Graf BER pro BPSK/OFDM – s turbokódováním a bez kódování	40

# SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1: Rozdělení dle způsobu mnohonásobného přístupu – Multiple Access Protocol dle [1] .....	7
Tab. 4.1: Použité modulace.....	10
Tab. 5.1: Srovnání technologií dle duplexního módu.....	12
Tab. 6.1: Porovnání datové prostupnosti .....	13
Tab. 10.1: Kokurenční porovnání technologií, založeno na [1] .....	20
Tab. 12.1: Závislost špičkových rychlostí na konfiguraci LTE, převzato z [1] .....	23
Tab. 12.2: Parametry zdojového bloku pro uplink .....	26
Tab. 12.3: Parametry zdojového bloku pro downlink .....	26

# ZADÁNÍ

Seznamte se s architekturou a zpracováním signálů v systémech využívajících vysokorychlostní bezdrátové technologie (xMAX, LTE). Proved'te srovnání používaných modulačních technik, přenosových rychlostí, spektrální a výkonové účinnosti technologií těchto systémů s jinými technologiemi (UMTS, aj.).

V prostředí MATLAB vytvořte program umožňující simulaci zpracování signálu ve zvoleném systému a vyhodnocení jeho chybovosti v různých přenosových prostředích (šum, rušení).

# ÚVOD

Bude provedeno srovnání technologií pro bezdrátový přenos dat v mobilních sítích a výběr technologie pro další podrobnější zkoumání a simulace v prostředí MATLAB. Srovnání bude provedeno na základě aktuálních dostupných zdrojů a rešerší. Srovnání poslouží k výběru technologie pro další zkoumání a simulace.

Součástí práce bude i teoretický úvod do použitých základních technologických principů.

# 1 HISTORICKÝ VÝVOJ

Znalosti historického vývoje jednotlivých technologických rodin jsou důležité z hlediska pochopení závislostí jednotlivých technologií na sobě a rozřazení technologií do rodin.

## 1.1 Rodina GSM/UMTS/LTE

Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) založený na Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) s High Speed Packet Access (HSPA) technologií a jejich postupný vývoj a přechod k sítím třetí generace (3G) tvoří nejpoužívanější rodinu širokopásmového připojení.

Tak jak dříve probíhal upgrade z GSM na Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE), probíhá nyní rozšiřování UMTS o High Speed Packet Access (HSPA). [1]

HSPA se přitom skládá z dvou nezávislých technologií - High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) a High Speed Uplink Packet Access (HSUPA). Tyto technologie je možné nasazovat odděleně. (Což například provedl u nás Eurotel jako rozšíření své UMTS/WCDMA sítě v dubnu 2006, ale je to běžnou praxí i ve světě, T-MOBILE proti tomu použil UMTS TDD a dosáhl stejného efektu [2]).

Rozšířením standardu HSPA je pak HSPA+ - důvodem každého takového rozšiřování standardů jsou investice mobilních operátorů do sítí a snaha o zachování stávající infrastruktury a zvýšení návratnosti investic. Ze stejného důvodu dochází k rozšíření standardu EDGE na Evolved EDGE.

HSPA patří již mezi technologie 3GPP (Third Generation Partnership Project) stejně jako nově připravovaná a testovaná **3GPP LTE** – Long Term Evolution.

Vzhledem k snaze operátorů maximalizovat návratnost investic do infrastruktury se někdy označuje jejich nasazování HSPA+ jako sítě třetí generace (3G) a LTE jako síť generace čtvrté (4G).

## 1.2 Rodina technologií CDMA2000

V současné době má rodina CDMA2000 přibližně 6x méně účastníků než rodina GSM/UMTS/HSPA [1], přesto stojí jako hlavní konkurent za zmínku. V současné době používá technologie CDMA 277 komerčních operátorů ve 103 zemích, z toho 105 1xEV-DO Rel. 0 sítí v komerčním provozu (41 se nasazuje), 54 komerčních sítí 1xEV-DO Rev. A (33 se nasazuje) [3].

One Carrier Evolved Data Optimized - 1xEV-DO používá stejné nebo podobné technologie jako UMTS/HSPA a dosahuje podobné spektrální efektivity. Proti UMTS/HSPA, které operuje v 5MHz kanálech používá 1,25MHz kanály. To sice vede k teoreticky nižším špičkovým rychlostem ale průměrná propustnost je pro stejnou úroveň zátěže podobná. [1]

**Jednou z největších nevýhod** je, že EV-DO neumí efektivně přidělovat spektrální zdroje mezi rychlými daty a hlasem. EV-DO kanál neumožňuje hlasový přenos a 1xRTT kanál umožní jen středně rychlý datový přenos. To vede k rozhodování kolik

kanálu vyhradit pro data a kolik pro hlas, zatímco UMTS/HSPA je alokuje dynamicky. [1]

Dalším omezením při použití separátního kanálu pro data je nemožnost používat zároveň hlasové a datové služby tak jako je to možné u UMTS/HSPA. [1]

K revizi B se zatím nepřihlásil žádný operátor, navíc používá již také OFDMA tak jako LTE [1]. Uzavřením rozvoje této rodiny nejspíš bude fakt, že Qualcomm jako tvůrce CDMA s monopolem na tuto technologii zastavil vývoj UMB a rozhodl se investovat do LTE. [4]

### 1.3 Rodina technologií WiMAX

WiMAX se objevil jako alternativa k mobilním technologiím pro WAN bezdrátové sítě. Pokouší se porazit stávající technologie větší efektivitou. Jak se ale WiMAX přibližuje realitě, stále pokračuje vývoj UMTS/HSPA a zřejmé výhody WiMAXu už přestávají být patrné. Například spektrální efektivita Mobilního WiMAXu je sice lepší než HSPA 2005 ale už horší než HSPA 2008. [5]

Že WiMAX vychází z kořenů WiFi je také patrné - až revize IEEE 802.16e (2005) přidává WiMAXu mobilitu – tyto sítě však **nejsou zpětně kompatibilní**, hlavně díky změně technologie downlinku. Místo OFDM246 je použita SOFDMA (škálovatelná FFT).

V současnosti jsou distribuovány zařízení certifikovaná pro 802.16-2004, tzv. Fixed WiMAX. Tento standard není v přímé konkurenci mobilním technologiím, jsou spíše doplněním, například pro pokrytí velkých oblastí (univerzity) v nelicencovaném pásmu. [1]

Výchozí verze mobilních WiMAX sítí bude nasazena za použití 2x2 MIMO, TDD a 10MHz kanálů v profilu nazvaném jako WiMAX Wave 2. Mezitím výrobci definovali WiMAX Release 1.5, s očekávaným dodáním produktů na konci roku 2009. Tato verze obsahuje vylepšení ve výkonu a efektivitě bude dostupná pro nasazení ve stejné době jako LTE. [1]

Mezi zmiňované nevýhody WiMAXu patří malá efektivita při správě velkého množství uživatelů, power management pomocí signálních zpráv v MAC vrstvě, proti rychlé kontrole výkonu u WCDMA. [1]

Mezi nevýhody patří 5ms rámeček místo 1ms u LTE nebo použití časového multiplexu (TDD) - jedna buňka nemůže vysílat, zatímco sousední přijímá – to klade nároky na synchronizaci mezi operátory ve stejném pásmu nebo vynucuje ochranná pásma. [1]

Mezi další nevýhody WiMAXu plynoucí z použití TDD místo FDD je potřeba započítat to, že je potřeba pro stejnou kapacitu, frekvenci a výkon pro mobilní WiMAX 1,7x více buněk než pro HSPA. To zvyšuje cenu celkovou cenu vlastnictví. [5]

## 1.4 Další konkurence

**Flash OFDM** – proprietární technologie vyvinutá firmou Flarion Technologies. Je založena na OFDM v 1,25MHz širokých kanálech. Dosahuje přibližně stejného downlinku jako HSDPA a uplinku jak HSUPA. [1] V současnosti patří Flarion pod Qualcomm

**IEEE 802.20** – založena na OFDMA, podobné LTE, z tohoto důvodu není jistá podpora výrobců.

## 2 HISTORICKÝ VÝVOJ VE ZKRATCE

Následující přehled bodově shrnuje vývoj technologií.

### HSM / UMTS / HSPA / LTE

- GSM
  - o GPRS
  - o EDGE
  - o Evolved EDGE
- UMTS - HSPA/3GPP LTE
  - o R99 – UMTS / WCDMA
  - o R5 – HSDPA – rychlejší download
  - o R6 – HSUPA – rychlejší upload
  - o R7 – HSPA+ - vícesegmentové antény MIMO (finální verze)
  - o R8 – LTE - Long Term Evolution – (standard ve vývoji)
  - o R9 – očekává se rozšíření HSPA a LTE
  - o R10 - LTE-Advanced

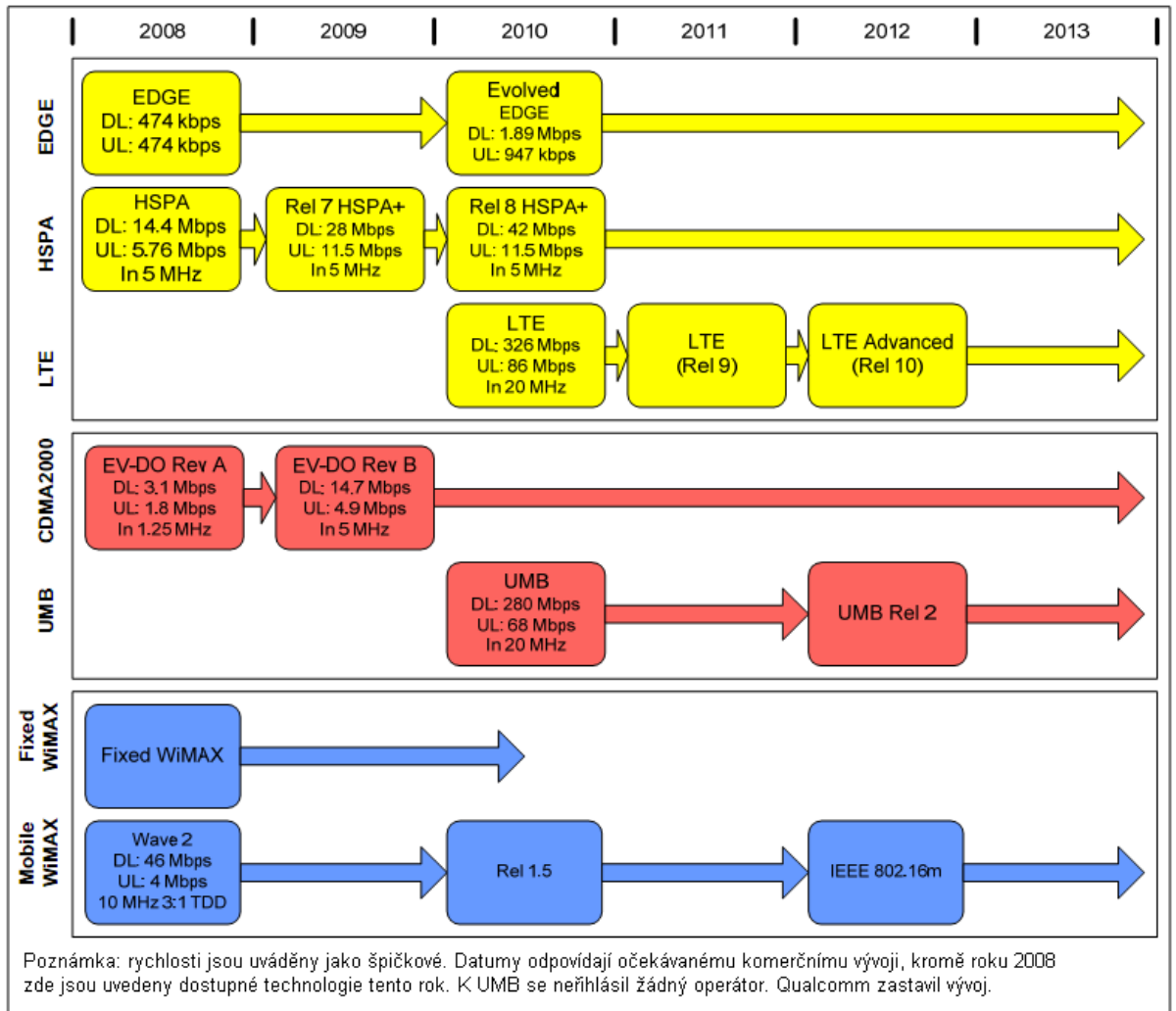
### CDMA2000 / 3GPP2

- 1xRTT
- 1xEV-DO – (Rel. 0) - datové optimalizace
- EV-DO Rev. A – podpora VOIP
- EV-DO Rev. B. – více nosných
- UMB (EV-DO Rev. C) – Ultra Mobile Broadband

### WiMax / IEEE 802.16

- IEEE 802.16 – 10-66 GHz
- IEEE 802.16a – 2-11 GHz
- IEEE 802.16d – 802.16-2004 – tzv. fixed WiMAX – opravy – downlink OFDM256 (256 podnosných)
- IEEE 802.16e – 802.16-2005 – tzv. Mobile WiMAX - datová mobilita, asymetrický datový tok – downlink SOFDMA
- IEEE 802.16m - rozpracovaný návrh (ekvivalent LTE, UMB), zvýšení i uživatelské datové rychlosti, redukce zpoždění a rozšíření bezpečnostních mechanismů

Graficky je tento vývoj znázorněn v následujícím obrázku:



Obr. 2.1: Grafický přehled historického vývoje, převzato z [1].

# 3 POROVNÁNÍ PODLE TECHNOLOGIÍ MNOHONÁSOBNÉHO PŘÍSTUPU

V tabulce 3.1 je pro přehled rozdělení technologií dle způsobu mnohonásobného přístupu.

- FDMA – frekvenční multiplex – nejstarší způsob – každému uživateli je přidělena jeho frekvence
- TDMA – časový multiplex – přidělování kanálu v čase na jedné frekvenci
- CDMA – kódový multiplex – společný kanál na frekvenci i v čase. Rozlišení pomocí kódování pseudonáhodným kódem
- OFDMA - ortogonální frekvenční multiplex – rozdělení pásma do podnosných

Tab. 3.1: Rozdělení dle způsobu mnohonásobného přístupu – Multiple Access Protocol dle [1]

MAP	Technologie
TDMA	GSM, GPRS, EDGE
CDMA	CDMA2000 1xRTT, CDMA2000 EV-DO, WCDMA, HSPA, IEEE 802.11b
OFDM	802.16/WiMAX, Flash OFDM, 3GPP LTE, IEEE 802.11a, IEEE 802.11g, IEEE 802.20, 3GPP2 UMB, 3GPP2 EBCMCS, DVB-H, FLO

## 3.1 Výhody OFDMA

Pro systémy které používají kanály 10MHz a menší nejsou výhody OFDM tak patrné. Techniky pro optimalizaci spektrální efektivity a rušení interferencí jsou dostupné i v chipsetech pro UMTS a CDMA.

Výhody OFDMA se projevují až u širších pásem v kombinaci s technologiemi jako je MIMO (více antén) nebo AAS (adaptivní anténní systém). Ty umožňují méně výpočetně náročné implementace. Právě redukce komplexnosti je důvodem použití OFDMA pro LTE i pro nové WLAN standardy, které používají 20MHz kanály. [1]

Výhodou OFDM je jednoduchá škálovatelnost šířky kanálů podle dostupného volného spektra. Jednoduše se použije menší počet podnosných.

## 3.2 Princip OFDM/OFDMA/SC-FDMA

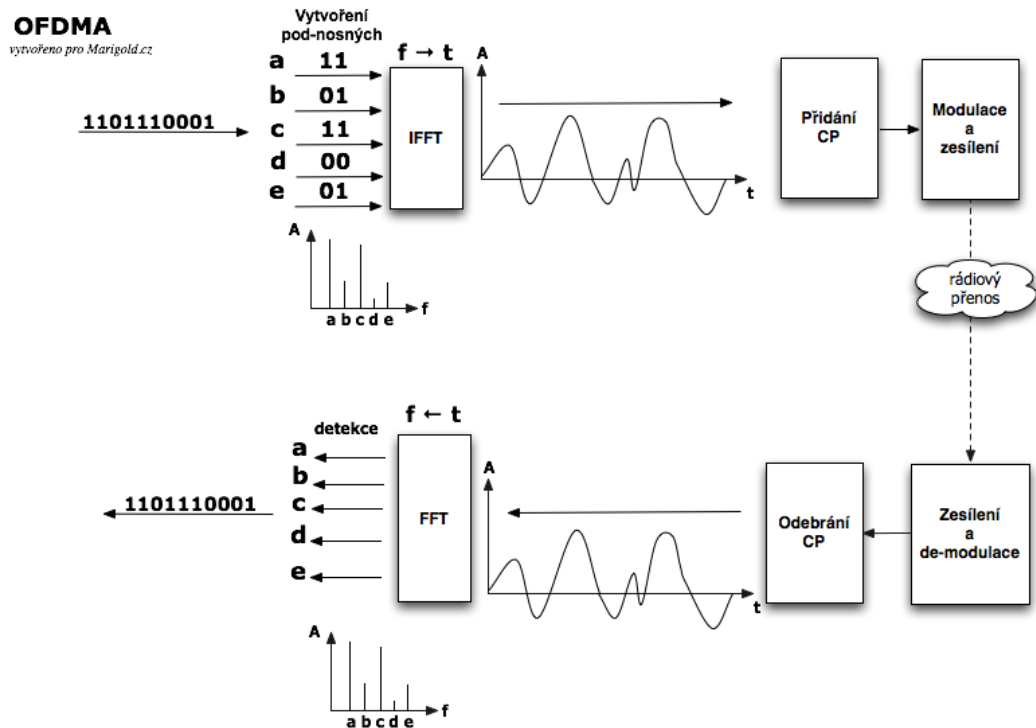
Vycházím z toho, že principy TDMA a CDMA jsou obecně známé a z hlediska použití v nejnovějších vysokorychlostních standardech pro bezdrátový přenos dat se zaměřím na podrobnější vysvětlení technologie OFDM/OFDMA /SC-FDMA.

### 3.2.1 Technologie OFDM

Rozdíl mezi OFDM a OFDMA je ten, že OFDMA je v principu OFDM, kde se přidělují podnosné jednotlivým uživatelům.

Zatímco OFDM je modulační technologie, tak OFDMA je rozšířením OFDM o technologii multiuživatelského přístupu.

- OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing - ortogonální frekvenčně dělený multiplex
- OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access - Ortogonální frekvenčně dělený vícenásobný přístup



Obr. 3.1: Princip OFDM/OFDMA, převzato z [6]

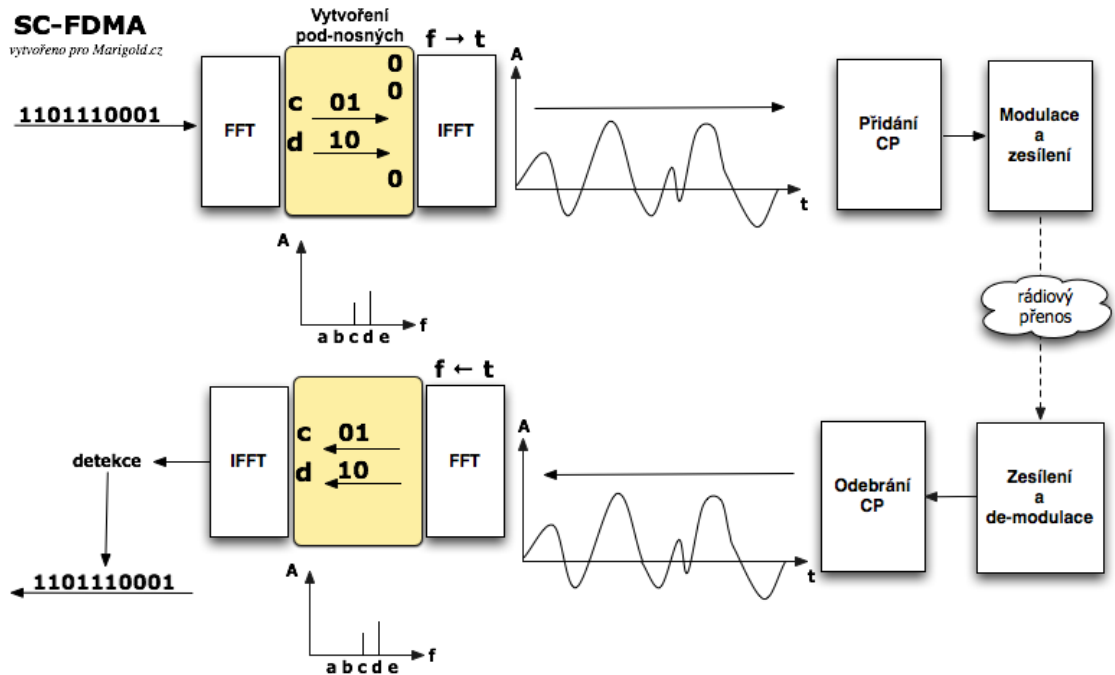
Data jsou přenášena s využitím podnosných – jejich počet (512, 1024 ...) závisí na šířce použitého pásma (5,10,15, 20 MHz). Rychlost na každé podnosné je pomalejší než celková výsledná rychlost.

Princip je zobrazen na obrázku 3.1. Přenášené bity jsou seskupeny a přiřazeny k jednotlivým podnosným (frekvencím). Na obrázku jsou to 4bity – modulační 16QAM. Místo aby byla každá podnosná vysílána extra vysílačem (což je vzhledem k jejich množství nepraktické) je využito matematiky – vytvoříme diagram kde na ose x je frekvence a na ose y amplituda (malý graf na obrázku) – pokud na tento graf aplikujeme IFFT (rychlou inverzní Fourierovu transformaci) převedeme ji z frekvenční do časové roviny. [6] Dále je přidána hlavička (CP – cyclic prefix) signál modulován a vyslán.

Na straně přijímače probíhá inverzní proces – místo IFFT je použita FFT.

### 3.2.2 Technologie SC-FDMA

SC-FDMA - Single Carrier Frequency Division Multiple Access - frekvenčně dělený vícenásobný přístup na jedné nosné. Používá se u LTE při uplinku. Název je trochu zavádějící, protože opět dochází k použití více podnosných, ale signál je mezi ně rozprostřen.



Obr. 3.2: Princip SC-FDMA, převzato z [6]

Princip je zobrazen na obrázku 3.2 a vychází z OFDMA ale 4 bity nejsou přiděleny mezi jednotlivé podnosné, ale jsou rozprostřeny mezi všechny podnosné. To se provede použitím FFT. Výsledkem jsou data, která jsou převedena pomocí IFFT z frekvencí na čas. Nepoužité podnosné mohou být přiděleny jiným uživatelům. [6]

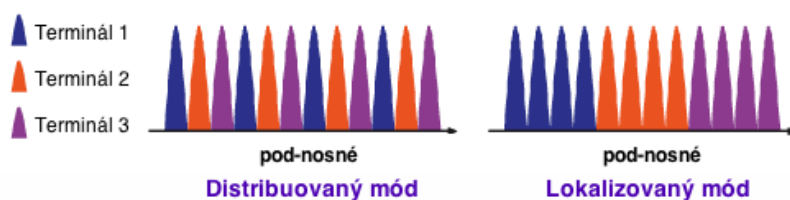
Na přijímači se musí časově orientovaný signál za IFFT pomocí detektoru převést na data.

Důvodem rozprostření mezi všechny podnosné snížení hodnoty PAPR – Peak to Average Power Ratio – tedy poměru špičkového a průměrného výkonu. Tento je důležitý hlavně na straně vysílače (mobilu, mobilního terminálu) - dochází k úspoře baterií ale i menšímu zarušení sítě vysílaným výkonem. [6]

### 3.2.3 Princip přiřazení konkurenčních uživatelů na podnosné

Existují dva základní způsoby, zobrazeny jsou na obrázku 3.3.

- Distribuovaný mód
- Lokalizovaný mód



Obr. 3.3: Distribuovaný a lokalizovaný mód, převzato z [6]

## 4 POROVNÁNÍ Z HLEDISKA POUŽITÝCH MODULACÍ

Modulace je použita pro klíčování přenášených informací na nosnou vlnu. V zmiňovaných systémech je použita fázová modulace. V tabulce najdeme použité typy fázové modulace a pod ní vysvětlení těchto typů.

Tab. 4.1: Použité modulace

Technologie	Modulace
LTE	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
WiMAX	downlink: QPSK, 16QAM, 64QAM uplink: QPSK, 16QAM
UMB	QPSK, 8PSK, 16QAM, 64QAM

### 4.1 Zobrazování fázové modulace

Modulace fáze bývá zobrazována v konstelačním diagramu. Vychází z matematického modelu (obrázek 4.1), kdy jde každá sinusovka vyjádřit jako suma sinusových funkcí (fáze 0) a kosinusových funkcí (fáze  $\pi/2$ ).

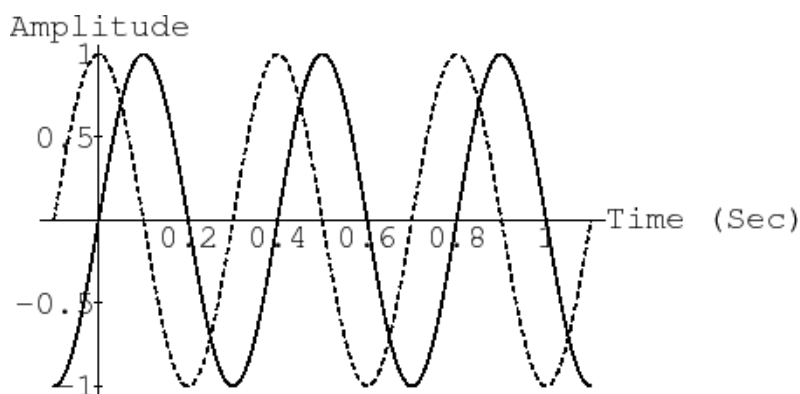
Vydeme-li z

$$\sin(A + B) = \sin(A) \cos(B) + \cos(A) \sin(B) \quad [1]$$

pak

$$\begin{aligned} x(t) &\stackrel{\Delta}{=} A \sin(\omega t + \phi) = A \sin(\phi + \omega t) \\ &= [A \sin(\phi)] \cos(\omega t) + [A \cos(\phi)] \sin(\omega t) \\ &\stackrel{\Delta}{=} A_1 \cos(\omega t) + A_2 \sin(\omega t). \end{aligned} \quad [2]$$

Sinové části se říká synfázní složka (in-phase) - **I** a kosinové kvadrurní složka (quadrature) - **Q**. Skládání je zobrazeno na obrázku 4.1. Tyto složky jsou pak zobrazovány v konstelačním diagramu.



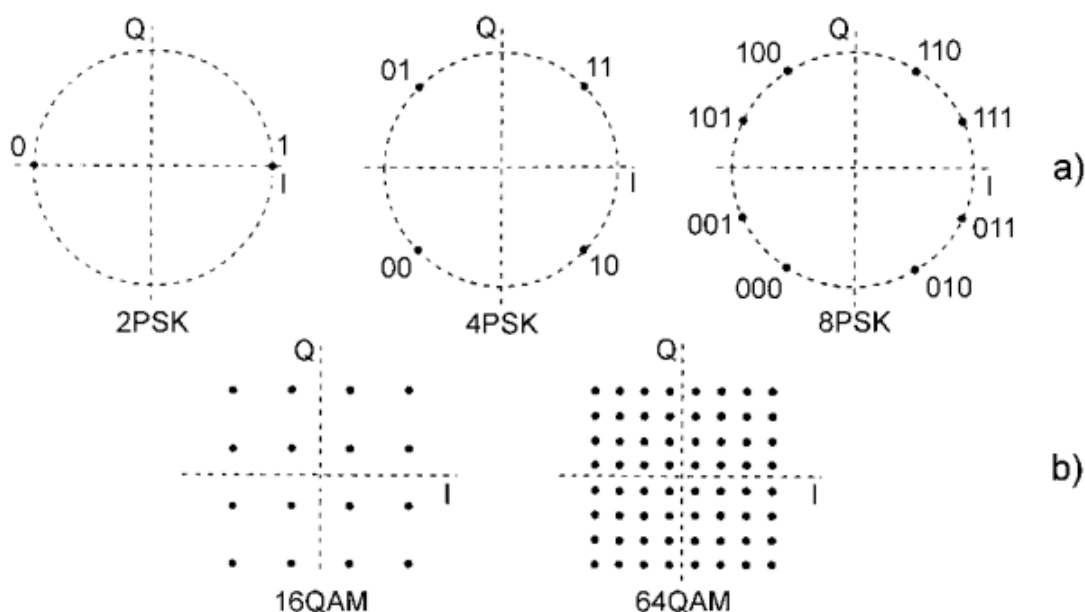
Obr. 4.1: I/Q složky fázového posuvu, převzato z [7]

## 4.2 Typy modulace - QPSK / 16QAM / 64QAM

**QPSK** - Quadrature Phase-Shift Keying - kvadrurní fázová modulace – nabývá 4 stavů a je schopná přenést najednou 4bity.

**QAM** – Quadrature Amplitude Modulation – kvadrurní amplitudová modulace – kromě fáze dochází ke klíčování amplitudy – umožňuje to přenos více stavů najednou – 4 bity u 16QAM, 6bitů u 64QAM.

Ukázky konstelačních diagramů nalezneme na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Konstelační diagramy digitálních modulací a) PSK, b) QAM, převzato z [8]

## 5 POROVNÁNÍ Z HLEDISKA POUŽITÍ DUPLEXNÍHO MÓDU

- **TDD** – frekvenční duplex - pro uplink a downlink jsou použity jiné frekvence – značí se například 2x5MHz. Tj. jeden 5MHz kanál pro downlink a jeden pro uplink.
- **FDD** – časový duplex – sdílení jednoho kanálu a časová synchronizace. Udáván je poměr sdílení např. 2:1. Tj. 2/3 času pro downlink a 1/3 pro uplink.
- **H-FDD** – poloviční frekvenční duplex – uplink a downlink mají svoji frekvenci, ale v jeden čas je možno jen vysílat nebo přijímat.

V tabulce 5.1 jsou uvedeny technologie a jejich duplexní módy.

Tab. 5.1: Srovnání technologií dle duplexního módu

<b>Technologie</b>	<b>Duplexní mód</b>
<b>HSPA / LTE</b>	FDD u HSPA FDD i TDD u LTE
<b>WiMAX</b>	TDD Specifikace sice obsahuje i FDD a H-FDD, ale v certifikačním procesu je jen TDD.
<b>CDMA2000/UMB</b>	FDD u CDMA TDD u WCDMA UMB: TDD, FDD a H-FDD

## 6 POROVNÁNÍ RYCHLOSTÍ

V následující tabulce jsou porovnány rychlosti jednotlivých technologií [1]

Tab. 6.1: Porovnání datové prostupnosti

Technologie	Downlink		Uplink	
	Špičková rychlost sítě	Rychlost dosažitelná uživatelem	Špičková rychlost sítě	Rychlost dosažitelná uživatelem
EDGE (type 1 MS)	236.8 kbps	200 kbps 70 - 135 kbps	236.8 kbps	200 kbps 70 - 135 kbps
UMTS WCDMA Rel'99	2.048 Mbps		768 kbps	
UMTS WCDMA Rel'99 (praktické terminály)	384 kbps	350 kbps 200 - 300 kbps	384 kbps	350 kbps 200 - 300 kbps
HSDPA první zařízení (2006)	1.8 Mbps	> 1 Mbps	384 kbps	350 kbps
HSDPA současná zařízení	3.6 Mbps	> 2 Mbps	384 kbps	350 kbps
HSDPA objevující se zařízení	7.2 Mbps	> 3 Mbps	384 kbps	350 kbps
HSDPA	14.4 Mbps		384 kbps	
HSPA úvodní implementace	7.2 Mbps	> 5 Mbps 700 kbps - 1.7 Mbps	5.76 Mbps	> 1.5 Mbps 500 kbps - 1.2 Mbps
HSPA budoucí implementace	7.2 Mbps	> 4 Mbps	1.46 Mbps	1 Mbps
HSPA	14.4 Mbps		5.76 Mbps	
HSPA+ (2X2 MIMO, DL 16 QAM, UL 16 QAM)	28 Mbps	> 5Mbps očekáváno	11.5 Mbps	> 3 Mbps očekáváno
HSPA+ (2X2 MIMO, DL 64 QAM, UL 16	42 Mbps		11.5	

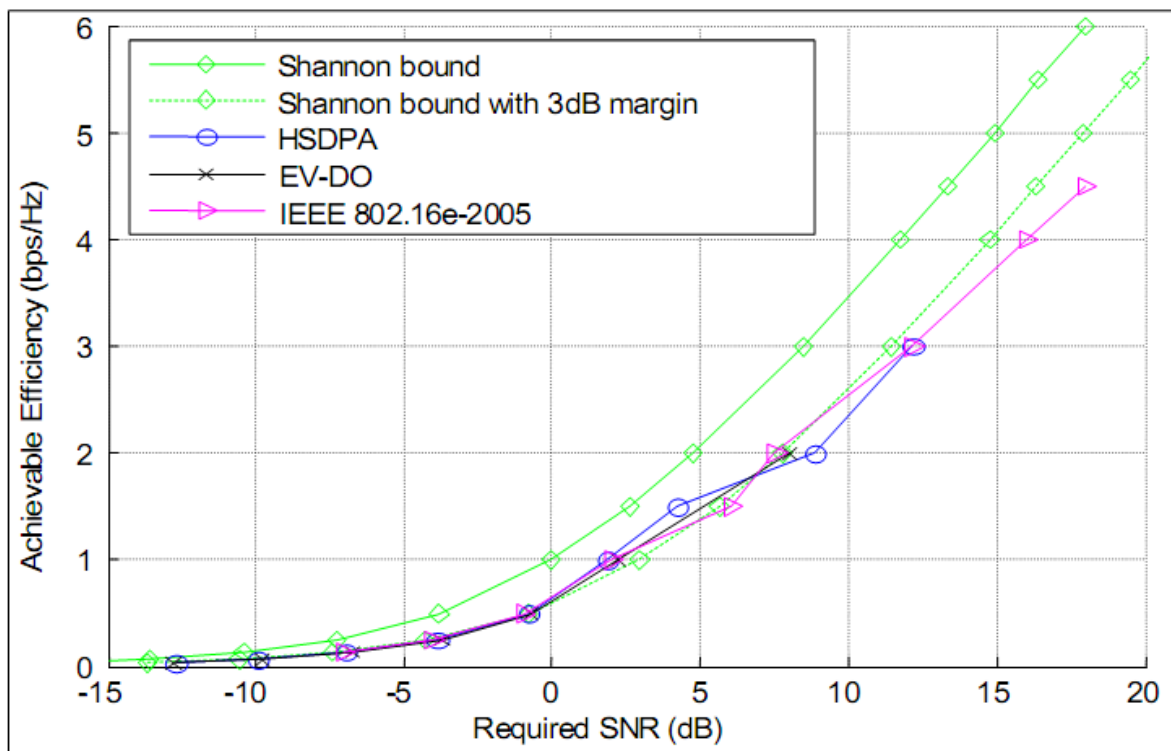
QAM)			Mbps	
LTE (2X2 MIMO)	173 Mbps	> 10 Mbps očekáváno	58 Mbps	> 5 Mbps očekáváno
LTE (4X4 MIMO)	326 Mbps		86 Mbps	
CDMA2000 1xRTT	153 kbps	130 kbps	153 kbps	130 kbps
CDMA2000 1xRTT	307 kbps		307 kbps	
CDMA2000 EV-DO Rev 0	2.4 Mbps	> 1 Mbps	153 kbps	150 kbps
CDMA2000 EV-DO Rev A	3.1 Mbps	> 1.5 Mbps 600 kbps - 1.4 Mbps	1.8 Mbps	> 1 Mbps 300 - 500 kbps
CDMA2000 EV-DO Rev B (3 kanály)	9.3 Mbps		5.4 Mbps	
CDMA2000 EV-DO Rev B Teoreticky (15 kanálů)	73.5 Mbps		27 Mbps	
Ultra Mobile Broadband (2X2 MIMO)	140 Mbps		34 Mbps	
Ultra Mobile Broadband (4X4 MIMO)	280 Mbps		68 Mbps	
802.16e WiMAX očekáváno Wave 1 (10 MHz TDD DL/UL=3, 1X2 SIMO)	23 Mbps		4 Mbps	
802.16e WiMAX očekáváno Wave 2 (10 MHz TDD, DL/UL=3, 2x2 MIMO)	46 Mbps		4 Mbps	

## 7 SPEKTRÁLNÍ EFEKTIVITA

S rozvojem datových technologií dochází k nárůstu počtu uživatelů a jejich nároků na šířku zabraného pásma. Zvyšujeme-li spektrální efektivitu neboli efektivitu využití spektra, roste při stejných parametrech prostupnost sítě pro uživatele nebo množství připojitelných uživatelů.

Zvyšování spektrální efektivitu je otázkou peněz. Zvyšuje složitost uživatelských zařízení a základnových stanic. Znamená zvyšování nároků na výpočty při zpracování signálů nebo přidávání dalších komponent. Důvodem, proč jsou atraktivní technologie, jako je OFDMA, je zvýšení spektrální efektivitu při menší míře složitosti. Z toho důvodu jsou použity v nových standardech pro LTE, WiMAX nebo UMB.

Zaměříme-li se na technologie jako jsou HSDPA, 1xEV-DO a IEEE 802-16e je zřejmé, že mají velmi optimalizovanou fyzickou vrstvu. Což dokazuje obrázek 7.1. V něm je vidět porovnání s limitem daným Shannovým teorémem (Shannonův teorém je funkcí poměru signálu k šumu (SNR – signal to noise ratio). Tato hranice je vztažena k spektrální efektivitě u jednoho uživatele a nesnaží se ukázat rychlosti při agregaci, ale i to ukazuje, že není mnoho místa na zlepšení, protože možnosti fyzické vrstvy dosáhly teoretické hranice. [1]



Obr. 7.1: Spektrální efektivita vybraných technologií v porovnání s teoretickou hranicí, převzato z [1]

Příkladem technologií, které omezují poměr signálu a šumu (SNR) jsou technologie omezující interference mezi anténami nebo mezi buňkami sítě. Ale ani

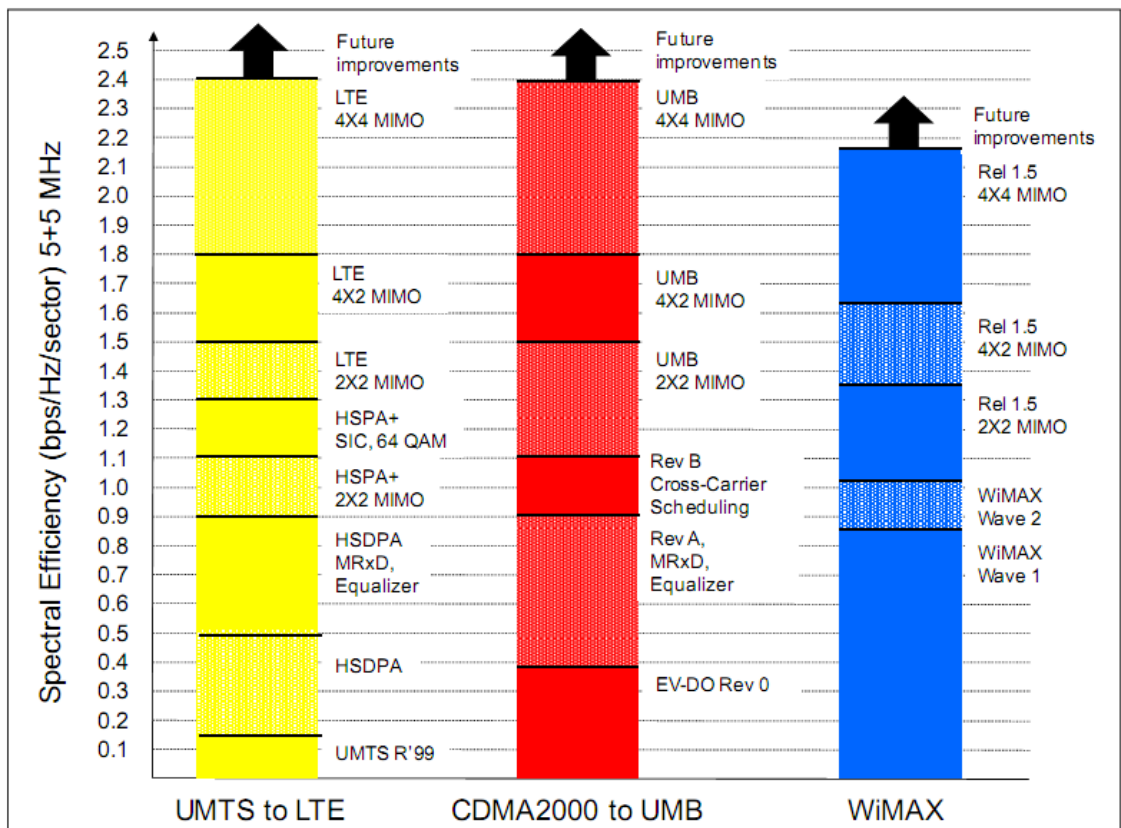
použití technologie MIMO (více antén) nenarušuje Shannonův teorém, ačkoliv zvedá celkovou efektivitu, protože každá jednotlivá anténa je jím omezena (představuje jeden přenosový kanál).

Obrázek 7.2 ukazuje spektrální efektivitu downlinku u jednotlivých technologických rodin. Hodnoty neobsahují všechny kombinace technologií a efektivitu, ale jen důležité milníky při zlepšování spektrální efektivitu.

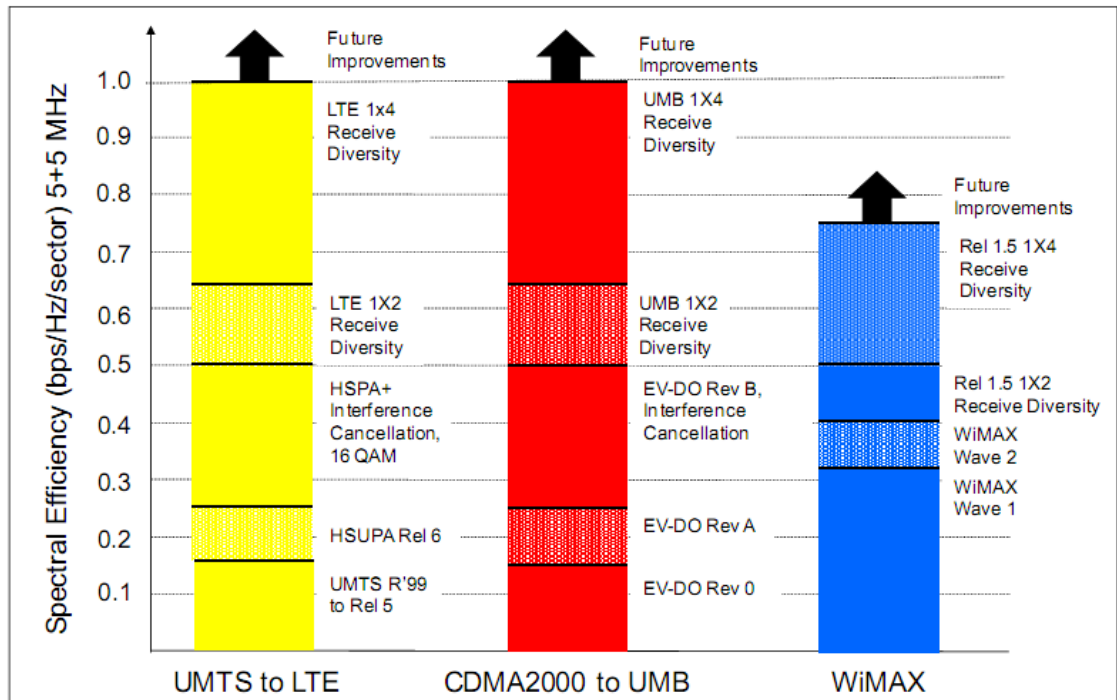
Je zde vidět, že spektrální efektivita první fáze Mobilního WiMAXu (Release 1.5 - 2x2 MIMO) je menší než u první fáze LTE (2x2 MIMO) a na přibližně stejné úrovni jako HSPA+.

Obrázek 7.3 ukazuje totéž u uplinku. I zde je patrné že WiMAX zaostává za LTE i UMB, porovnáme-li stejné podmínky jako je například přijímací pestrost (receive diversity, de facto počet antén na základní stanici – 1x2 = dvě antény).

Oba grafy ukazují, že mobilní WiMAX v jeho první fázi je na úrovni stávajících technologií.



Obr. 7.2: Porovnání spektrální efektivitu downlinku, převzato z [1]



Obr. 7.3: Porovnání spektrální efektivity uplinku, převzato z [1]

Vzhledem k zaměření na datové technologie zde neuvádím, spektrální efektivitu pro hlasové přenosy. Tyto údaje jsou však k dohledání v použitém zdroji.

## 8 POROVNÁNÍ NÁKLADŮ A ROZSAHU

Zatímco v technických schopnostech jsou si jednotlivé bezdrátové technologie relativně podobné, je tu možnost srovnání v oblastech kde se velmi liší. Například množství účastníků, či množství potřebné infrastruktury.

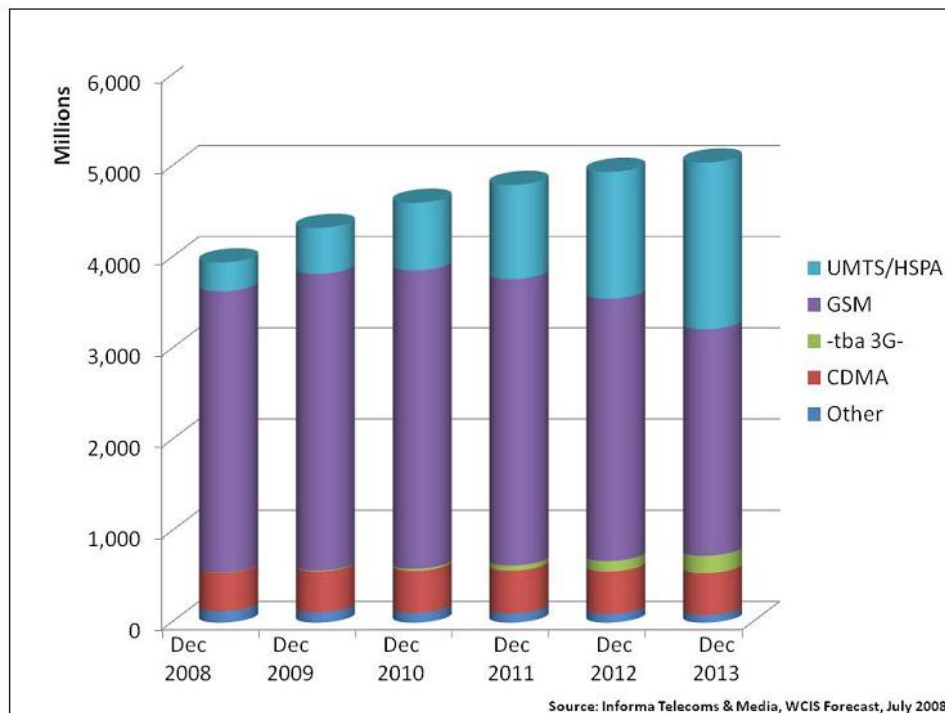
Větší množství uživatelů snižuje náklady, dané objemem, v přepočtu na jednoho uživatele. Takže zatímco propagátoři WiMAXu zmiňují levnější náklady, je tento argument, v reálném světě, při velkých objemech diskutabilní.

Z hlediska vývoje je každá technologie jen deskou s plošným spojem – náklady na tuto část základnové stanice jsou ovšem jen malou částí celkových nákladů. K tomu je nutno připočítat náklady na antény, zesilovače, kabely, racky. Ve zbytku sítě pak páteřní konektivita, budovy, konstrukce vysílačů atd. Tyto ostatní náklady jsou stejné pro všechny sítě bez ohledu na typ a klesají právě s požizovaným objemem. [5]

Stejně tak je cena GSM mobilů menší než cena 1xRTT mobilů. To samé platí i pro terminály. [1]

K porovnání rozsahu byla již v kapitole o historii WiMAXu zmíněna nutnost většího počtu buněk na pokrytí stejné oblasti než u HSPA.

Obrázek 8.1 porovnává množství účastníků v jednotlivých sítích.



Obr. 8.1: Množství účastníků napříč technologiemi, předpověď pro roky 2008- 2013, převzato z [1]

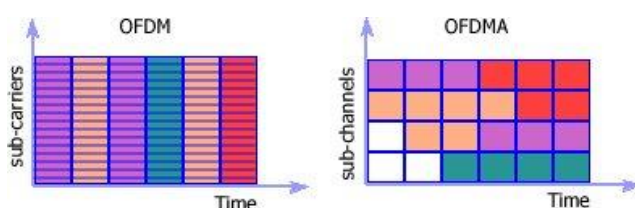
## 9 POROVNÁNÍ VÝKONOVÉ EFEKTIVITY

Porovnání provedu na teoretické bázi jen u rodin LTE/WiMAX podle jejich modulačních technik, protože 3G fáze u CDMA ve formě UMB zřejmě nebude dokončena a používá stejnou technologii (OFDMA).

Největší vliv na zátěž a tím výdrž baterií má jednak náročnost početních operací a pak poměr špičkového a průměrného výkonu – PAPR.

Jak LTE tak WiMAX (802.16-2004) používají pro downlink OFDM, rozdíl je ten, že zatímco LTE používá rozdělení do podkanálů pomocí OFDMA a zpracovává tak malé kousky dat, tak WiMAX zůstává u zpracování celého širokého kanálu pomocí OFDMA. Viz obrázek 9.1.

Zatímco LTE si vystačí s 16 bodovou FFT u WiMAXu je nutná 1000 bodová FFT. To zvedá nároky na výpočetní výkon a tím nároky na napájení [9]. U verze 802.16-2005 je již zaveden škálovatelné OFDMA (SOFDMA) pro downlink a tak se rozdíl srovnává.



Obr. 9.1: Přidělování kanálu uživatelům v OFDM/OFDMA [9]

Při uplinku je u LTE použita SC-FDMA zatímco WiMAX(802.16-2004 i 2005) používá OFDMA. SC-FDMA snižuje PAPR u OFDMA (viz dále). Díky tomu je i při nejnovějších standardech lepší technologie LTE.

## 9.1 Příklady metod na snižování PAPR u OFDM

Dle [10] se používají následující metody pro redukci PAPR

- Ořezávání – clipping
  - Ořezává nejvyšší složky výkonu tak aby nedocházelo k ztrátám
  - Způsobuje rušení mimo pásmo
- Filtrování a zpracování signálu
  - PTS : Partial Transmit Signaling – rozdělení do skupin a každá je zakódována s menší IFFT, zakódované skupiny jsou zkombinovány tak, aby měly co nejmenší PAPR
  - TR: Tone Reservation – vkládání protišpičkového signálu do nepoužitých nebo rezervovaných podnosných. Úkolem je najít takový signál po jehož přidání dojde k redukci PAPR
- Coding – snaha najít kódování které vytvoří kódová slova s menším PAPR, otevřeným problémem je nalezení kódování které snižuje PAPR a zároveň má krátkou Hammingovu vzdálenost
  - SLM: Selected Mapping – výběr jednoho z transformovaných bloků, který má nejnižší PAPR
  - TR: tone reservation – správný návrh pilotních kanálů

## 10 KONKURENČNÍ SROVNÁNÍ

Porovnání je těžké udělat, protože proti sobě stojí rodina UMTS, která už teď ve verzi HSPA/HSPA+ nabízí to, co ostatní dvě technologie nemají (Mobilní WiMAX) nebo mít nebudou(UMB). Do porovnání je zahrnuta mobilní verze WiMAXu. Porovnání je provedeno s ohledem na stávající nebo velice blízký stav technologií. Porovnání je uvedeno v následující tabulce.

Tab. 10.1: Konkurenční porovnání technologií, založeno na [1]

<b>Technologie</b>	<b>HSPA/LTE</b>	<b>CDMA2000/UMB</b>	<b>IEEE 802.16e WiMAX Release 1.5</b>
<b>Vyspělost technologie</b>	Velmi vyspělá	Velmi vyspělá	Vznikající
<b>Pokrytí</b>	celosvětové	celosvětové s výjimkou Evropy	velmi omezené
<b>Nabídka zařízení</b>	široká nabídka všech typů pro UMTS/HSPA	široká nabídka všech typů pro 1xRTT/EV-DO	Zatím žádná, první zařízení budou jen pro přenos dat (datové karty)
<b>Radiová technologie</b>	Velmi optimalizované CDMA pro HSPA OFDMA pro LTE	Velmi optimalizované CDMA pro Rev 0/A/B OFDMA pro UMB	OFDMA s postupnou optimalizací, v Release 1.5 již velmi optimalizováno
<b>Spektrální efektivita</b>	U HSPA velmi vysoká, u HSPA+ odpovídá očekávání OFDMA v 5MHz kanálu	Velmi vysoká s EV-DO Rev A/B	Velmi vysoká, ale ne vyšší než u HSPA+
<b>Datové rychlosti (download)</b>	špičkové dnes i přes 3 Mb/s u HSDPA, výrazně více v budoucnu (LTE).	špičkové dnes přes 1,5 Mb/s (Rev A.), výrazně více v budoucnu (Rev B.).	Údaj zatím nedostupný. Záleží na návrhu sítě.
<b>Latence (zpoždění)</b>	V HSPA sítích dnes kolem 70 ms, snížení v budoucnu.	U EV-DO Rev. A pod 70 ms, snížení v budoucnu.	Údaj zatím nedostupný.
<b>Integrace hlasových služeb</b>	Velmi efektivní přenos hlasu po okružové doméně funguje dnes, migrace na VoIP má	Velmi efektivní přenos hlasu po okružové doméně funguje dnes, EV-DO nemůže	V první fázi neefektivní VoIP, očekává se zlepšení ale ne

	být nejjednodušší ze všech technologií.	kombinovat okruhovou doménu najednou s VoIP.	lepší než u LTE.
<b>Efektivní využití spektra pro kombinaci služeb</b>	Všechny radiové kanály v UMTS mohou míchat hlasové i datové služby velmi efektivně.	Dnes omezeno na míchání hlasu a pomalejších dat nebo jen vysokorychlostních dat.	Zatím se očekává jen datový přenos.
<b>Simultánní data/hlas</b>	Celý UMTS kanál dostupná pro míchání vysokorychlostních dat/hlasu	Kanál je dostupný buď pro hlas/středně rychlé data anebo pouze vysokorychlostních dat	Použitelný jen pro datové sítě až do pozdějších verzí

# 11 VÝBĚR TECHNOLOGIE

Jako nejvhodnější technologie třetí (nebo čtvrté – dle nejnovějších požadavků na síť 4. generace bude splňovat tyto požadavky až LTE Rel. 9) generace se jeví technologie z rodiny UMTS: LTE – Long Term Evolution. Zatímco technologie WiMAX zaostává při svém rozvoji za již existujícími standardy technologií rodin UMTS/CDMA, tak při zvážení potenciálního rozsahu nasazení vychází rodina UMTS a její 3GPP LTE nejlépe. Jak již bylo zmíněno, při zastavení vývoje CDMA/UMB, vypadá technologie LTE na vítěze boje o 3G.

V praktické části se zaměřím na zkoumání základních principů technologií standardu LTE, jejichž principy jsou často společné i pro další systémy.

## 12 TECHNOLOGIE LTE

### 12.1 Souhrnný popis

Při popisu LTE vycházím ze standardu 3GPP Rel. 8. - V8.3.0 [11].

LTE je souhrnem více technologií, pro downlink se používá modulace OFDM a pro zajištění multiuživatelského přístupu OFDMA, které umožňuje rozdělení uživatelů do kanálů. Pro snížení PAPR používá pro uplink SC-FDMA

Vlastnosti LTE dle [1] a [11]:

- Špičkové rychlosti downlink až 326Mbps při šířce pásma 20MHz
- Uplink až 86,4Mbps při šířce pásma 20MHz
- Duplexní módy TDD i FDD
- 12 podnosných o šířce 15kHz nebo 24 podnosných o šířce 7,5kHz
- Trvání slotu – 0,5ms
- BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM modulace
- MIMO 2x2 a 4x4
- Škálovatelná šířka pásma – 1,4, 3, 5, 10, 15, 20MHz
- Spektrální efektivita proti HSPA Rel. 6 je 2-4 násobná
- Snížení latence k 10ms mezi uživatelem a základnovou stanicí a méně než 100ms pro přepnutí z neaktivního stavu do aktivního

Špičkové rychlosti jsou uvedeny v následující tabulce

Tab. 12.1: Závislost špičkových rychlostí na konfiguraci LTE, převzato z [1]

LTE konfigurace	Downlink (Mbps) špičková rychlost	Uplink (Mbps) špičková rychlost
2x2MIMO 16QAM	172,8	57,6
4x4 MIMO 64QAM	326,4	86,4

## 12.2 Fyzická vrstva

Fyzické vrstva zahrnuje:

1. Fyzické kanály a modulace (TS 36.211):
  - a. Uplink a downlink fyzické kanály
  - b. Strukturu fyzických kanálů, formát rámců, elementy atd.
  - c. Fyzický sdílený kanál v uplinku i downlinku
  - d. Referenční signály v uplinku i downlinku
  - e. Kanál náhodného přístupu
  - f. Primární a sekundární synchronizační signály
  - g. Generaci OFDM signálu v downlinku
  - h. SC-FDMA generaci signálu v uplinku
  - i. Scrambling, modulaci a up-konverzi
  - j. Časování relací
  - k. Mapování vrstvy a předkódování v downlinku
2. Multiplexing a kódování kanálů (TS 36.212)
  - a. Kódovací schémata
  - b. Kódování kontrolních informací vrstvy 1 a vrstvy 2
  - c. Prokládání
  - d. Rate matching

A další jako Procedury fyzického kanálu (TS 36.213) a Měření fyzického kanálu (TS 36.214).

### 12.2.1 Principy eliminace ISI

U OFDM systému nejsou přenášeny data sériově ale paralelně, se sníženou symbolovou rychlostí, protože je datový tok rozdělen do podnosných vln. Každá vlna je modulována pomocí různých druhů QAM modulace (dle kvality signálu) BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM. Díky paralelnímu přenosu je každý symbol mnohem delší než

v systému s jednou nosnou se stejnou výslednou symbolovou rychlostí.

Pře každý symbol je navíc přidán cyklický prefix, který eliminuje ISI (intersymbolové interference). Místo vkládání prázdného ochranného místa je pro zachování spojitosti signálu vkládáno před symbol opakování konce tohoto vysílaného symbolu.

Dále jsou podnosné umístěny velmi těsně vedle sebe, aby se využilo efektivně spektrum. Toto snižuje také možnosti ISI mezi sousedními podnosnými.

## 12.2.2 Datový rámeček u OFDMA

Dle normy LTE [11] jsou definovány dva typy rámečků:

- Typ 1 aplikovaný pro FDD (frekvenční duplex)
- Typ 2 aplikovaný pro TDD (časový duplex)

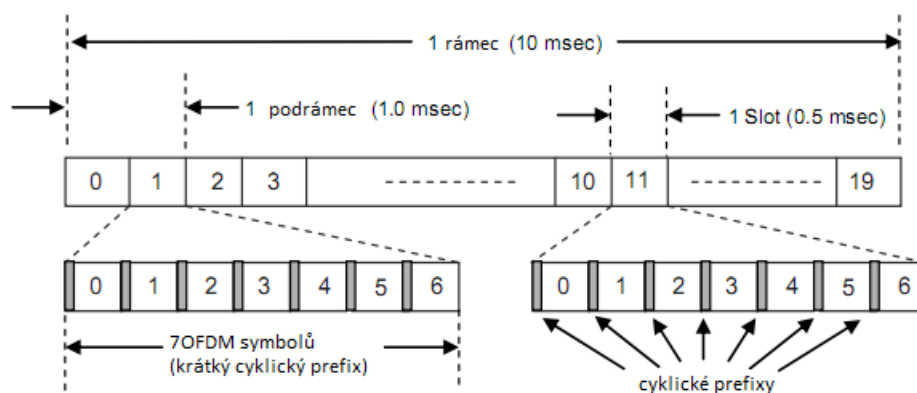
Tak jako u většiny komerčních aplikací bude dále věnována pozornost jen Typu 1 pro frekvenční duplex.

Jako časová jednotka je v normě [11] uvedeno  $T_s = 1/(15000 \times 2048)$  s.

Pro rámeček typu 1 platí:

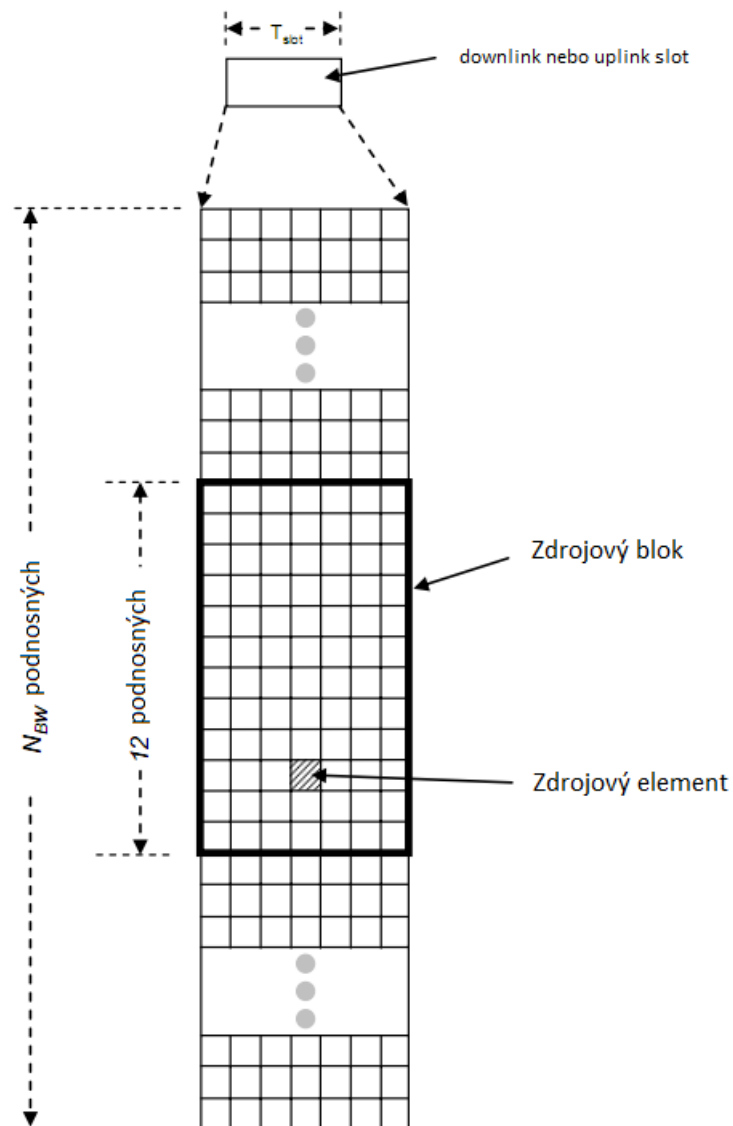
- Každý rámeček je dlouhý  $T_f = 307200 \cdot T_s = 10$  ms a skládá se z 20 slotů o délce  $T_{\text{slot}} = 15360 \cdot T_s = 0.5$  ms, číslovaných od 0 do 19. Podrámeček je definován jako dva následující sloty, kde podrámeček  $i$  se skládá ze slotů  $2i$  and  $2i+1$ .
- Pro FDD je dostupných 10 podrámečků pro downlink a 10 podrámečků pro uplink v každém 10ms intervalu. Uplinka a downlink jsou odděleny ve frekvenční doméně. U polovičního duplexu nemůže uživatelské zařízení přijímat a vysílat zároveň.

Časový průběh symbolů ukazuje následující obrázek [12]. Mezi jednotlivé symboly jsou vkládány cyklické prefixy.



Obr. 12.1: struktura OFDM v čase na jedné podnosné, převzato z [12]

Downlink a uplink struktura je ukázána na následujícím obrázku:



Obr. 12.2: Zdrojová mřížka pro downlink a uplinka, převzato z [12]

Obrázky jsou schematické a skutečný počet bloků a délku cyklického prefixu ukazuje následující tabulka, převzata z [11]:

Tab. 12.2: Parametry zdrojového bloku pro uplink

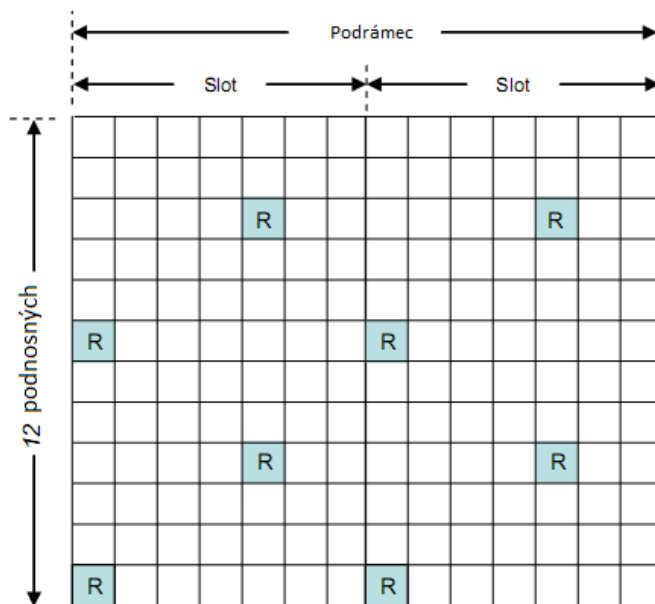
Konfigurace	Podnosných	Elementů (symbolů)	Cyklický prefix - elementy	Cyklický prefix - čas
Normální cyklický prefix	12	7	- 160 pro první symbol - 144 pro ostatní symboly	- 5.2us pro první symbol -4.7us pro další symboly
Rozšířený cyklický prefix	12	6	512	16.7us

Tab. 12.3: Parametry zdrojového bloku pro downlink

Konfigurace (pro danou šířku podnosné)		Podnosných	Elementů (symbolů)	Cyklický prefix - elementy	Cyklický prefix - čas
Normální cyklický prefix	$\Delta f = 15 \text{ kHz}$	12	7	- 160 pro první symbol - 144 pro ostatní symboly	
Rozšířený cyklický prefix	$\Delta f = 15 \text{ kHz}$			6	512
	$\Delta f = 7.5 \text{ kHz}$	24	3	1024	33.3us

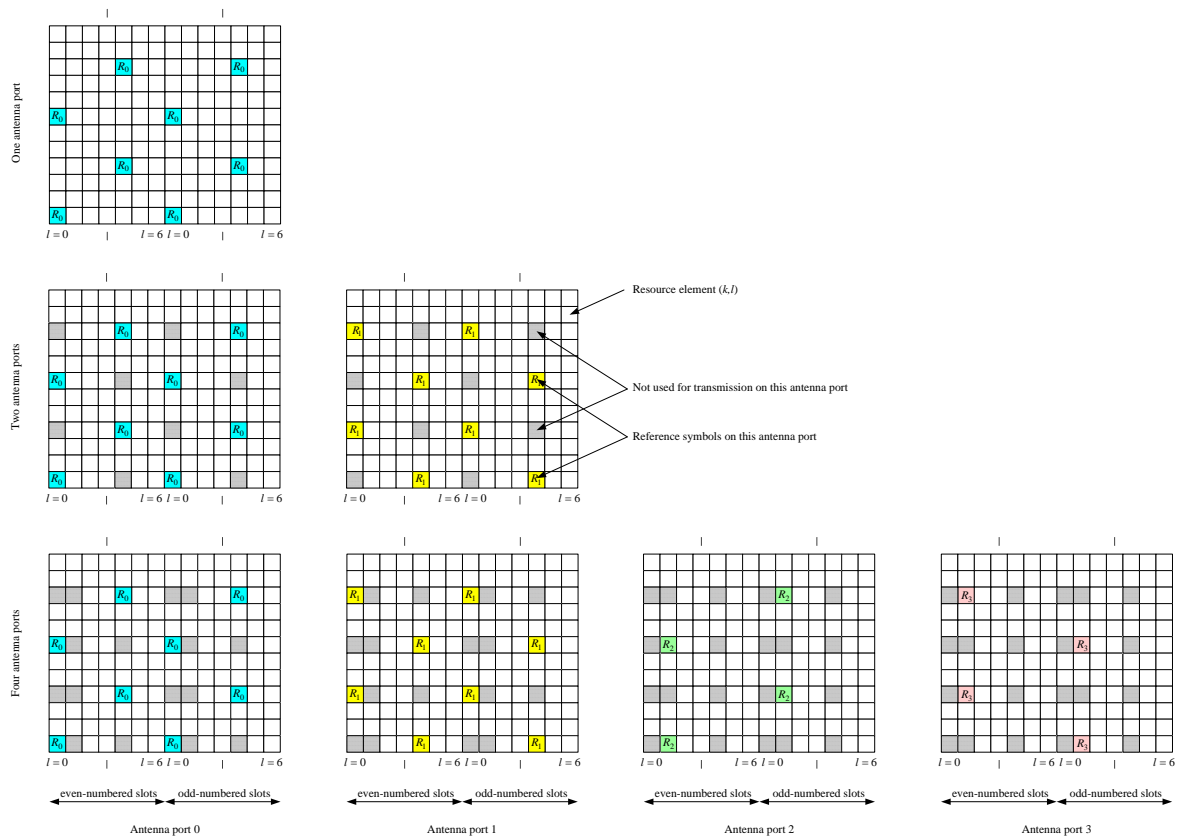
### 12.2.3 Referenční signály

Pro zjištění pulsní odezvy kanálu a časovou synchronizaci se vysílají v OFDM rámcích periodicky referenční signály. Viz následující obrázek. R – značí referenční signál. Při příjmu je pak možné upravit poměry posunu amplitudy a fáze případné rušení.

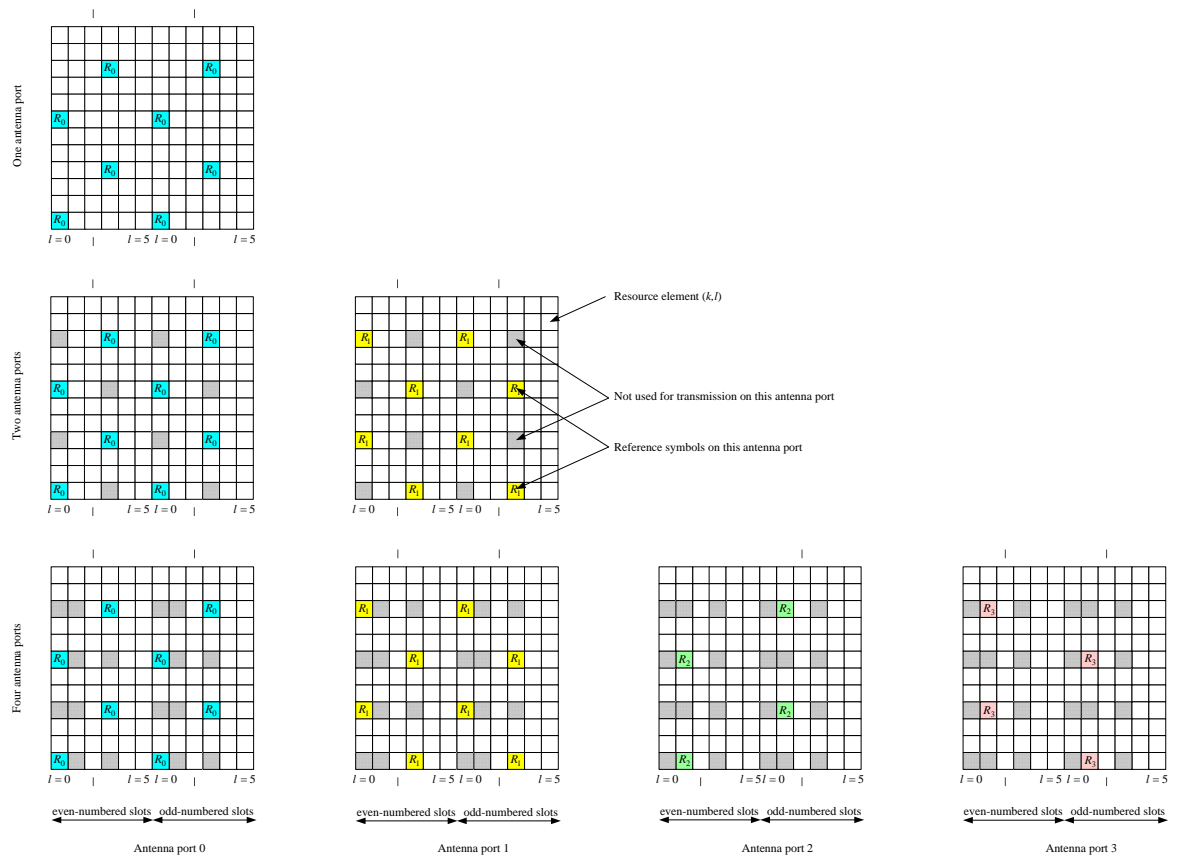


Obr. 12.3: Rozmístění referenčních signálů v OFDM podrámci, převzato z [12]

Jejich rozmístění pro více antén ukazují následující obrázky. Uvedeny jsou vždy mapování pro jednu anténu, dvě antény a čtyři antény. Barevně je zobrazen pilotní signál a křížkem nepoužité symboly, které jsou ovšem využity pilotním signálem při vysílání na jiných anténách.



Obr. 12.4: Mapování referenčních signálů pro normální cyklický prefix [11]



Obr. 12.5: Mapování referenčních signálů pro rozšířený cyklický prefix [11]

## 13 SIMULACE TECHNOLOGIÍ LTE A JEJICH VLIV NA BER

LTE se skládá z mnoha různých technologií, zaměřil jsem se na ty nejnižší v řetězci zpracování dat a zkoumal jejich vliv na chybovost přenosu:

- modulace bitového proudu na nosnou vlnu pomocí fázové modulace
- rozdělení mezi podnosné pomocí OFDM
- kanálové kódování pro snížení chybovosti – Turbo kódování

### 13.1 Měření chybovosti

Chybovost se udává pomocí BER – bit error ratio

$$BER = \text{chybné byty} / \text{celkový počet bytů}$$

V grafech byla tato hodnota vztažena k spektrální účinnosti  $E_b/N_0$ [dB], kde  $E_b$  je střední energie modulovaného signálu vztažena na jeden bit a  $N_0$  je hustota výkonového spektra šumu.

Tato jednotka byla použita místo SNR[dB] (signal noise ratio – odstup signálu od šumu), protože ji používá příkaz matlabu *berfit*, sloužící k jednoduchému vykreslení chybovosti v grafu (nalezne vhodné zobrazení i osy).

AWGN kanál pro přidávání šumu k signálu byl nastaven na výkon signálu 0.01W a byla mu programově měněna hodnota  $E_b/N_0$ .

### 13.2 Simulace BER pro jednotlivé modulace

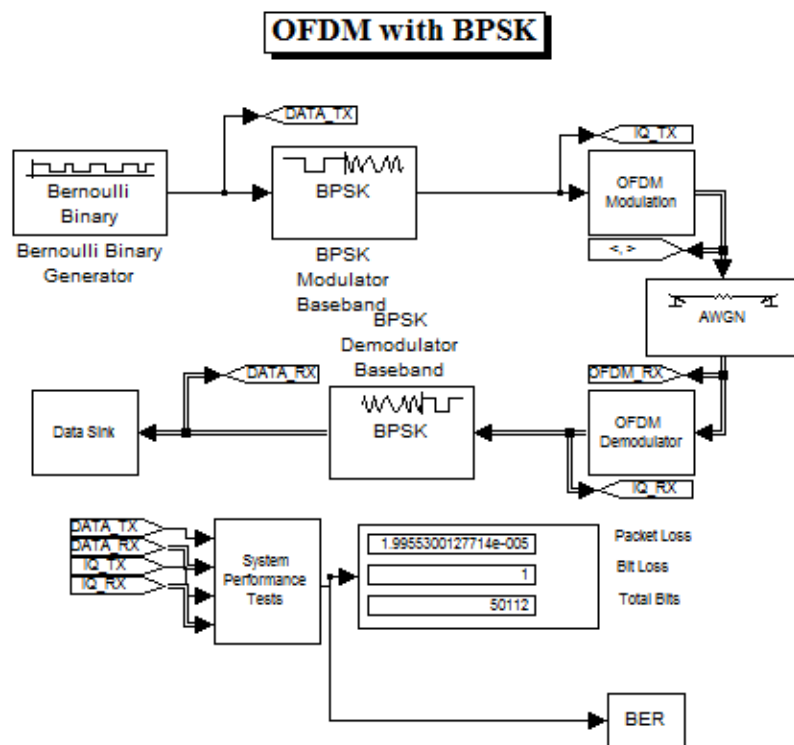
Simulace jednotlivých modulací přenášených pomocí OFDM jsem provedl v MATLABu pomocí programu, který volá simulaci z nadstavby Simulink. Vytvořil jsem čtyři simulace – pro modulace BPSK, QPSK (4QAM), 16QAM a 64QAM. Simulace obsahují: tvorbu náhodných dat, IQ (fázovou) modulaci (BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM), OFDM mapování, přidání cyklického prefixu pro snížení ISI, přenos přes kanál zatížený bílým šumem s daným odstupem  $E_b/N_0$  (dB). Tyto simulace jsem spouštěl s různými parametry  $E_b/N_0$  (dB) :

- BPSK: 0 – 15dB
- QPSK: 0 – 16dB
- 16QAM: 0 – 20dB
- 64QAM: 0 – 24dB

Pro simulace byly použity upravené modely [12], [13], [14]. Pro spuštění simulace a zobrazení BER v grafu byl vytvořen program v MATLABu (viz příloha).

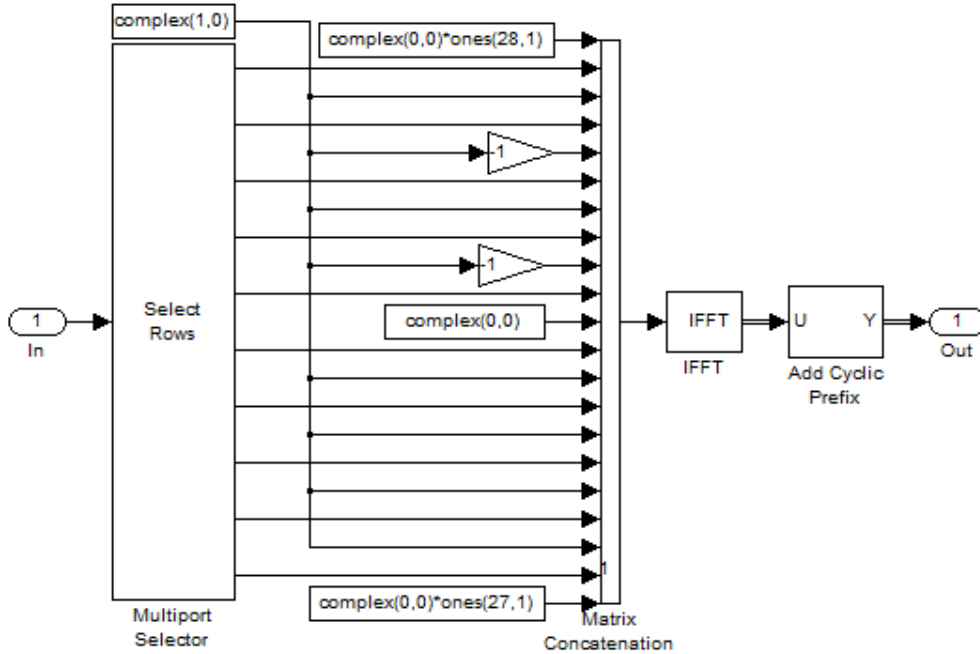
### 13.2.1 BPSK

Při simulaci je na straně vysílače použit generátor náhodných bitů, ty jsou modulovány pomocí BPSK modulace dále rozloženy do rámců pomocí OFDM a vysílány přes AWGN kanál – kanál přidávající bílý šum. Odstup signálu od šumu byl programově měněn. Výstup BER byl ukládán do proměnné v Matlabu, aby mohl být pro vstupní hodnoty odstup signálu od šumu zobrazen. Na následujícím obrázku je celkové schéma simulace vytvořené v Simulinku.



Obr. 13.1: BPSK/OFDM v Simulinku

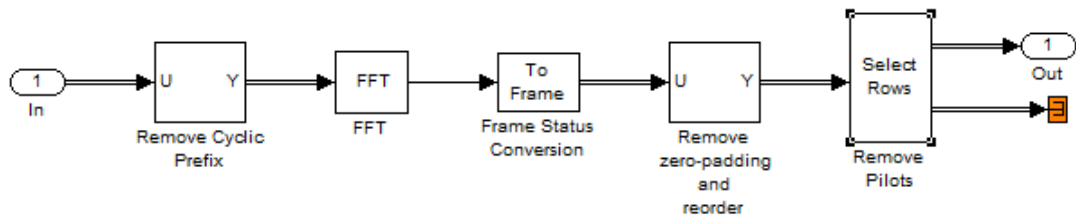
Pro OFDM modulaci byl použit existující blok z [14], ten používá princip OFDM – IFFT a přidání cyklického prefixu. Skládání OFDM rámce neodpovídá normě LTE [11], ale protože nenavazujeme v dalším zkoumání na pilotní signály, nechal jsem blok beze změn. Blok je na následujícím obrázku.



Obr. 13.2: OFDM Modulace v Simulinku

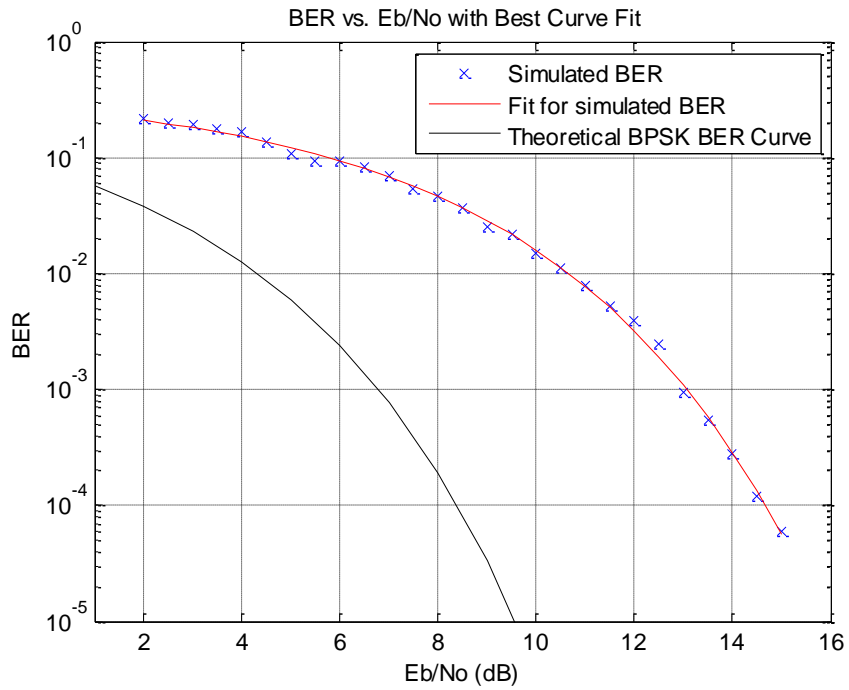
V bloku je patrné vkládání pilotních tónů, IFFT transformace z frekvenční do časové oblasti a přidání cyklického prefixu.

Demodulace se provádí v bloku OFDM Demodulator. V tomto bloku dochází k odstranění cyklického prefixu, FFT transformace z časové do frekvenční oblasti a odstranění pilotních tónů.



Obr. 13.3: OFDM Demodulace v Simulinku

Na následujícím obrázku je zobrazena křivka chybovosti pro BPSK/OFDM modulaci a její odstup od teoretické křivky.

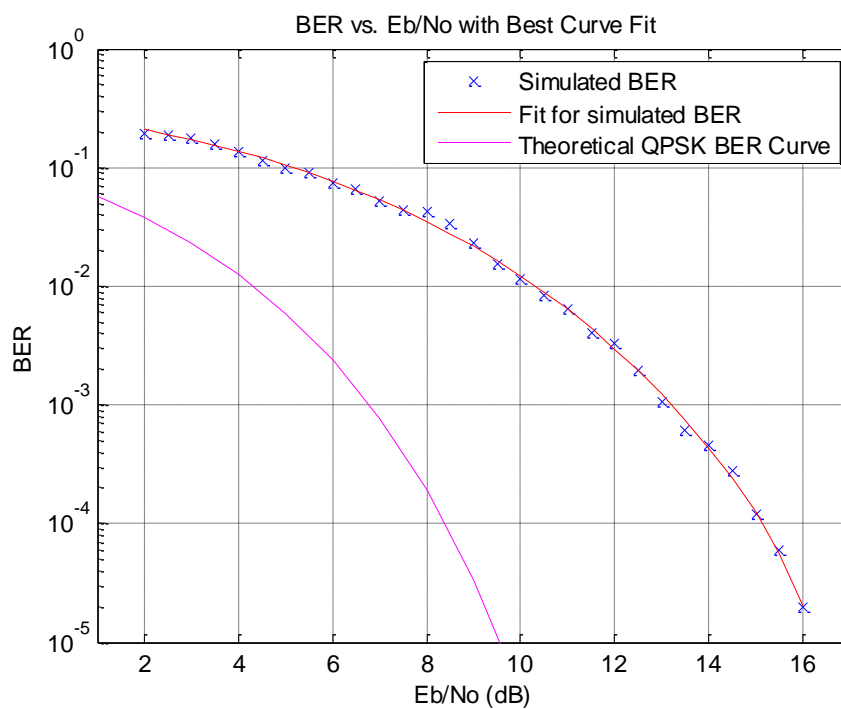


Obr. 13.4: Graf BER pro BPSK/OFDM

### 13.2.2 QPSK (4QAM)

Princip je stejný jako pro BPSK modulaci, jen byly vyměněn modulační modul.

Na následujícím obrázku je zobrazena křivka chybovosti pro QPSK(4QAM)/OFDM modulaci a její odstup od teoretické křivky.

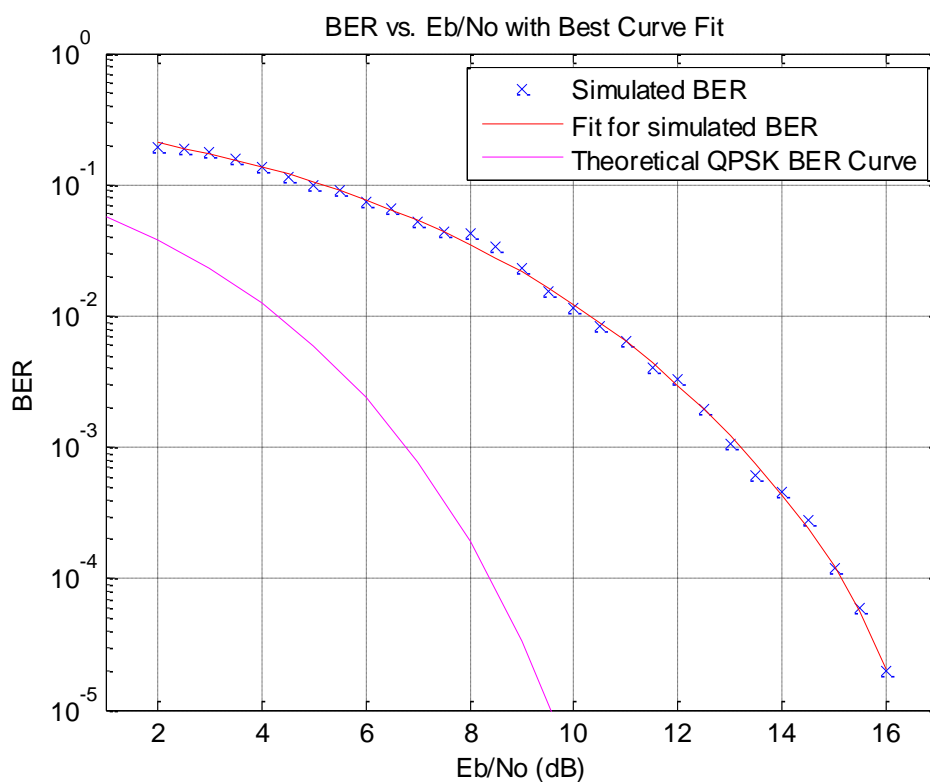


Obr. 13.5: Graf BER pro QPSK(4QAM)/OFDM

### 13.2.3 16QAM

Princip je stejný jako pro BPSK modulaci, jen byly vyměněn modulační modul.

Na následujícím obrázku je zobrazena křivka chybovosti pro 16QAM/OFDM modulaci a její odstup od teoretické křivky.

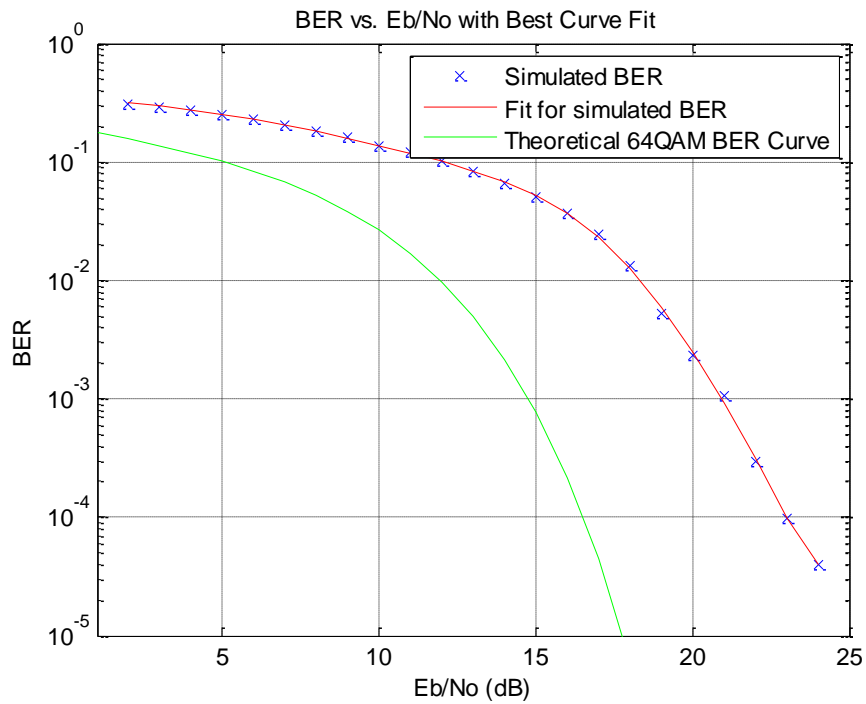


Obr. 13.6: Graf BER pro 16QAM/OFDM

### 13.2.4 64QAM

Princip je stejný jako pro BPSK modulaci, jen byly vyměněn modulační modul.

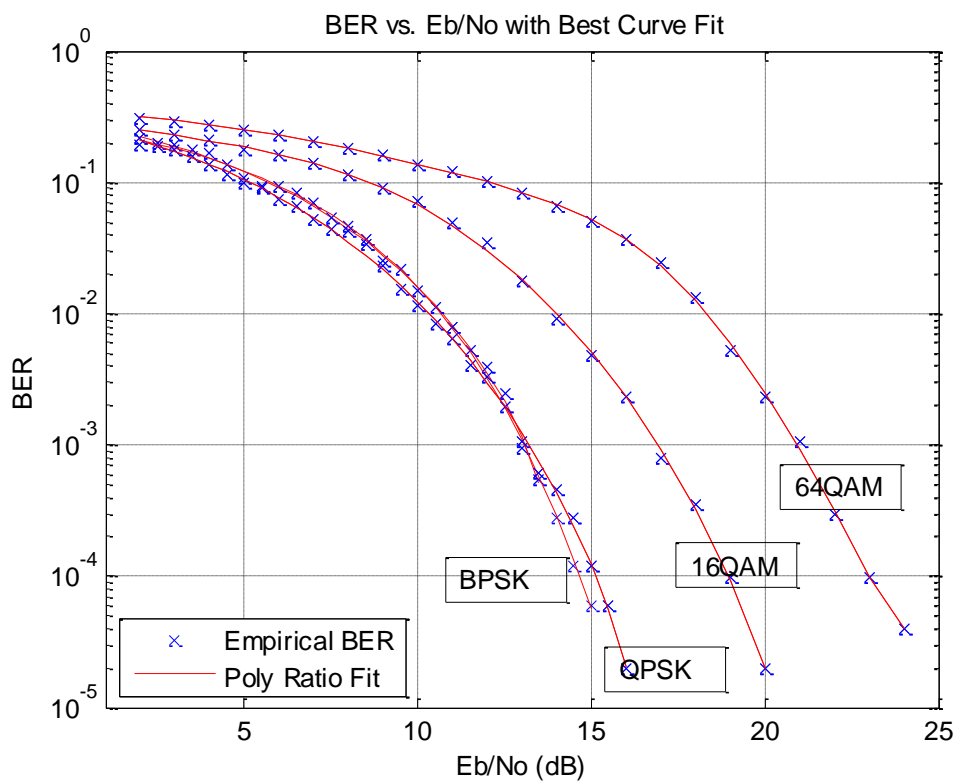
Na následujícím obrázku je zobrazena křivka chybovosti pro 64QAM/OFDM modulaci a její odstup od teoretické křivky.



Obr. 13.7: Graf BER pro 64QAM/OFDM

### 13.3 Srovnání chybovosti jednotlivých modulací

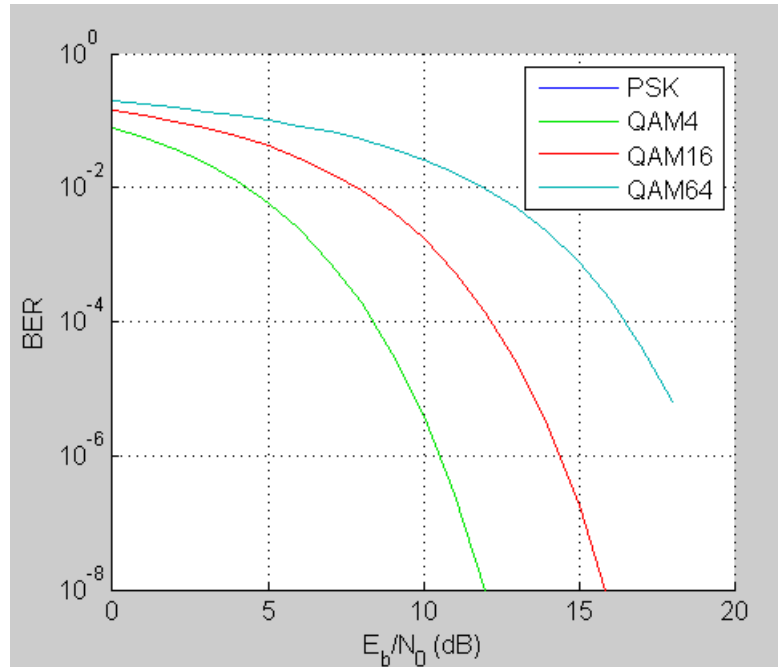
Na následujícím obrázku jsou porovnány jednotlivé modulační metody navzájem.



Obr. 13.8: Společný graf BER pro BPSK-QPSK-16QAM-64QAM/OFDM

### 13.4 Závěr k chybovosti BER pro jednotlivé modulace

Jak je vidět, tak jako u teoretických hodnot tak u simulovaných dochází k překryvu chybovosti BPSK a QPSK modulace. Z tohoto důvodu se jeví vhodnější použití modulace QPSK pro vyšší rychlost přenosu dat.



Obr. 13.9: Teoretické hodnoty BER pro jednotlivé modulace.

Vzhledem k tomu že pro vyšší přenosové rychlosti je nutné použít vyšší řády QAM modulací, a tyto jsou náchylnější na rušení šumem, je nutné použít další technologie pro potlačení chyb. U LTE pro tyto účely slouží kanálové kódování:

- Tail biting convolutional coding – pro kontrolní informace
- Turbo kódování - Turbo coding – pro data

Celý proces vypadá následovně:

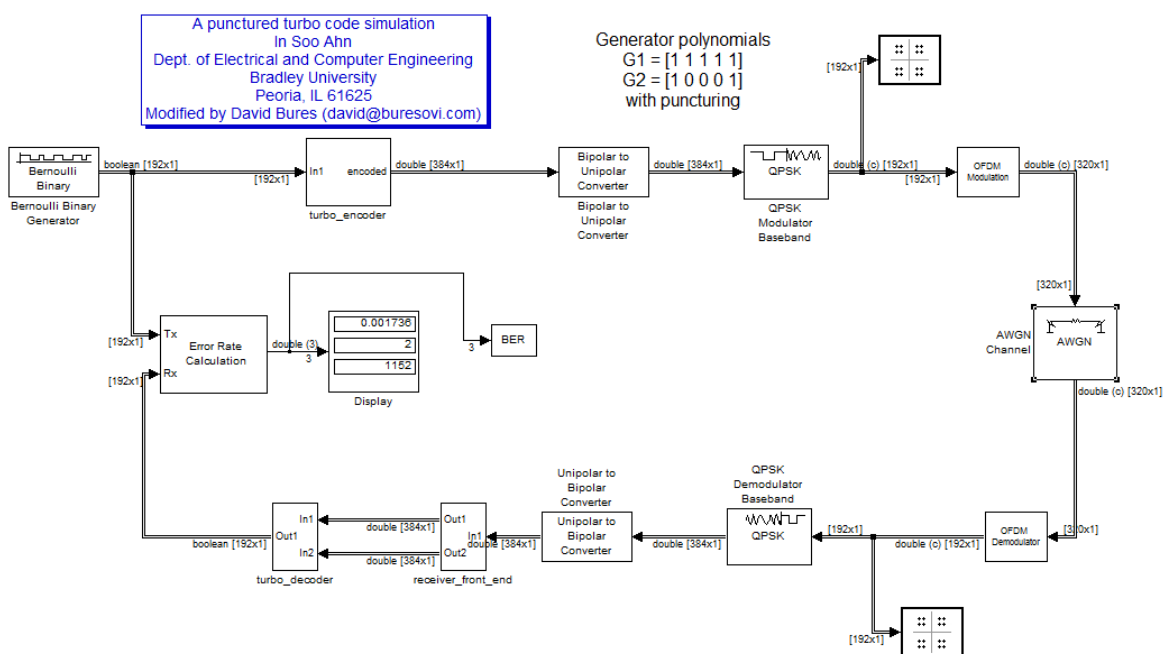
Přidání CRC k transportnímu bloku -> Segmentace bloku, Přidání CRC k segmentovaným blokům -> Kanálové kódování -> Rate Matching (vytváří místo pro kontrolní informace) -> Spojování bloků.

# 14 TURBO KÓDOVÁNÍ

Princip turbo kódování byl popsán v [15]. Jedná se o konvoluční kódy jejichž výkonost se blíží Shannonovu limitu.

Vliv turbo kódů pro opravu chyb byl vyzkoušen na modelu dle [15] upraveného o modulaci BPSK/OFDM s turbo kódem pro 8 iterací. Moduly pro BPSK/OFDM modulaci byly použity z předchozího zkoumání. Účelem zkoumání nebylo pochopit a vysvětlit principy turbo kódu, ale vyzkoumat jejich vliv na BER.

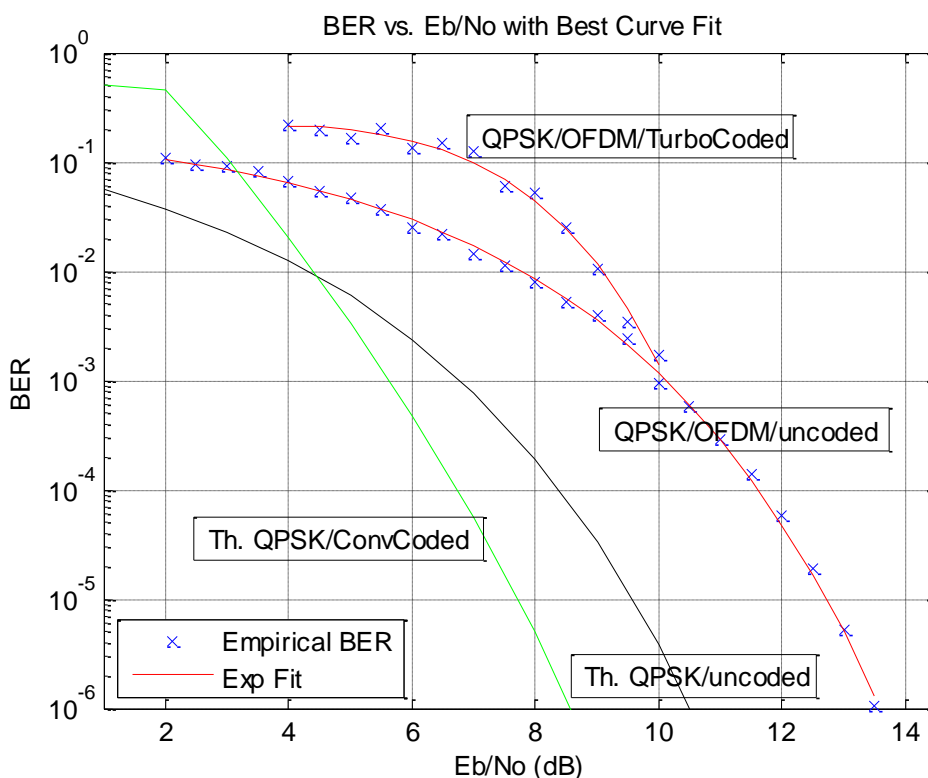
## 14.1 Schéma simulace



Obr. 14.1: BPSK/OFDM s Turbo kódem v Simulinku

## 14.2 Výsledky simulace

V oblasti požadované chybovosti ( $10e-5$  až  $10e-6$ ) dochází vzhledem k předpokládanému průběhu křivky k přiblížení k teoretickému limitu nekódované QPSK modulace. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny křivky pro kódovaný přenos pomocí Turbo kódu a nekódovaný přenos. Graf je doplněn o teoretickou BER křivku pro QPSK (černě) a QPSK s konvolučním kódováním (zeleně) se stejným polynommem jako je použit pro turbo kódování. Tato křivka je jen pro hrubé porovnání, protože *bertool* neumí vygenerovat teoretickou křivku pro Turbo kód.



Obr. 14.2: Graf BER pro BPSK/OFDM – s turbokódováním a bez kódování

Z grafu je vidět, že k zlepšení BER dochází pro kódovaný přenos až od určitého odstupu signálu od šumu, jak také bylo popsáno v [16].

Při odstranění bloku OFDM nedošlo ke změně v chybovosti BER. Výhody OFDM budou patrné až při přenosech přes kanál s rozdílným frekvenčním posunem a rušením na jednotlivých podnosných a při ekvalizaci kanálu při znalosti impulsní odezvy podnosných při použití referenčních signálů.

Toto je už námět na další simulace v pokračování práce.

## 15 ZÁVĚR

V bakalářské práci bylo provedeno srovnání architektury a zpracování signálů v systémech využívajících vysokorychlostní bezdrátové technologie (xMAX, LTE). Srovnání používaných modulačních technik, přenosových rychlostí, spektrální a výkonové účinnosti technologií těchto systémů s jinými technologiemi (UMTS, aj.). Pro praktickou část a podrobnější studium jsem vybral technologii LTE.

V praktické části byla provedena simulace vlivu šumu na přenosovou soustavu signálu modulovaného pomocí různých modulací a OFDM a vliv turbo kódování na BER.

Při pokračování v by bylo vhodné se zaměřit na zkoumání chybovosti pomocí celého řetězce zpracování dat v LTE jako je synchronizace, ekvalizace, H-ARQ (hybrid automatic repeat request), diverzifikace přenosových cest pomocí MIMO (více antén).

Vzhledem ke komplexnosti a složitosti technologií a existenci profesionálních produktů, které nebyly v době, kdy bylo započato s pracemi na bakalářské práci, k dispozici, by bylo vhodné se zaměřit na využití těchto produktů a simulací v nich.

Například pomocí LTE Toolboxu od firmy **steep ascent** [17], který zahrnuje:

Implementaci fyzické vrstvy dle 3GPP Release 8 E-UTRA podle norem TS36.211, TS36.212 and TS36.213

- FDD duplexní mód
- Podporu downlinku a uplinku
- Kompletní podpora pro přenosy pomocí 1, 2 a 4 antén s plnou podporou všech vlastností MIMO precodingu a vrstev
- Plná podpora všech parametrů
- Tvorba zpráv DCI (downlink control information) a kontrola tvorby a dekódování regionů
- Všechny kroky fyzické vrstvy jako individuální bloky:
  - Kódování/dekódování transportního kanálu
  - Scrambling/ descrambling
  - Symbolová modulace/ demapování
  - Mapování zdrojových elementů
  - OFDM a SC-FDMA

# LITERATURA

- [1] RYSAVY RESEARCH, LLC. EDGE, HSPA and LTE - Broadband Innovation. [online]. Dostupné na [http://www.rysayv.com/Articles/2008\\_09\\_Broadband\\_Innovation.pdf](http://www.rysayv.com/Articles/2008_09_Broadband_Innovation.pdf).
- [2] PETERKA, J. Budoucnost rychlých mobilních dat: HSPA+ a LTE. [online] 23. Únor 2007. Dostupné na <http://www.lupa.cz/clanky/budoucnost-rychlych-mobilnich-dat-hspa-a-lte/>.
- [3] CDMA Development Group. [online] Dostupné na <http://www.cdg.org/>.
- [4] Reuters. Qualcomm halts UMB project, sees no major job cuts. [online] November 13, 2008. Dostupné na <http://www.reuters.com/article/rbssTechMediaTelecomNews/idUSN1335969420081113>.
- [5] Ericsson. HSPA, the undisputed choice for mobile broadband. [online] May 2007. Dostupné na [http://www.ericsson.com/technology/whitepapers/hspa\\_Rev\\_a.pdf](http://www.ericsson.com/technology/whitepapers/hspa_Rev_a.pdf).
- [6] ZANDL, P. Porovnání SC-FDMA a OFDM. *Knol*. [online] 2. September 2008. Dostupné na <http://knol.google.com/k/patrick-zandl/porovnn-sc-fdma-a-ofdma/6jec9w6ooix6/6#>.
- [7] SMITH, JULIUS O. In-Phase & Quadrature Sinusoidal Components. *Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT) with Audio Applications, Second Edition*. [online] 2007. Dostupné na [http://ccrma-www.stanford.edu/~jos/st/In\\_Phase\\_Quadrature\\_Sinusoidal.html](http://ccrma-www.stanford.edu/~jos/st/In_Phase_Quadrature_Sinusoidal.html).
- [8] HANUS, S. *Bezdrátové a mobilní komunikace*. Brno : VUT FEKT, 2002.
- [9] SHARM, D. LTE And WiMax Together? [online] July 2008. Dostupné na <http://3g4g.blogspot.com/2008/07/lte-and-wimax-together.html>.
- [10] WANG, S. *PAPR Reduction for OFDM*. [pdf] 2008.
- [11] 3GPP. 3GPP TS 36.201 V8.1.0. [online] November 2007. Dostupné na <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36-series.htm>.
- [12] ZYREN, J. *Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer*. [pdf] místo neznámé : freescale semiconductor, 2007.
- [13] KHAN, MUHAMMAD N. OFDM with 16-QAM for R14. Matlab Central FileExchange. [online] Dostupné na <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/17038-ofdm-with-16-qam-for-r14>.
- [14] KHAN, MUHAMMAD N. OFDM with 64-QAM. Matlab Central FileExchange. [online] Dostupné na <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/17200-ofdm-with-64-qam>.
- [15] KHAN, MUHAMMAD N. OFDM with QPSK for R14. Matlab Central FileExchange. [online] Dostupné na <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/17037-ofdm-with-qpsk-for-r14>.
- [16] BERROU, CLAUDE, GLAVIEUX, ALAIN A THITIMAJSHIMA, PUNYA Near Shannon Limit Error - Correction Coding And Decoding: Turbo Codes In *Technical Program, Conference Record, IEEE International Conference*, Geneva , Switzerland, 1993
- [17] AHN, IN S. Turbo Code Simulation. *Matlab Central FileExchange*. [online] Dostupné na <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/14600-turbo-code-simulation>.

[18] steepest ascent. 3G Evolution Lab - LTE Toolbox and Blockset. [online] Dostupné na [http://www.steepestascent.com/content/default.asp?page=s2\\_10](http://www.steepestascent.com/content/default.asp?page=s2_10) .

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$\mu$ s – Microseconds

1xEV-DO – One Carrier Evolved, Data Optimized

1xEV-DV – One Carrier Evolved, Data Voice

1XRTT – One Carrier Radio Transmission Technology

2G – Second Generation

3G – Third Generation

3GPP – Third Generation Partnership Project

3GPP2 – Third Generation Partnership Project 2

4G – Fourth Generation

8-PSK – Octagonal Phase Shift Keying

ANSI – American National Standards Institute

AWGN – Additive White Gaussian Noise Channel

BCCH – Broadcast Control Channel

bps – bits per second

BTS – Base Transceiving Station

C/I – Carrier to Interference Ratio

CDMA – Code Division Multiple Access

CMOS – Complementary Metal Oxide Semiconductor

CP – Cyclic Prefix

dB – Decibel

DVB-H – Digital Video Broadcasting Handheld

EBCMCS – Enhanced Broadcast Multicast Services

EDGE – Enhanced Data Rates for GSM Evolution

EGPRS – Enhanced General Packet Radio Service

EV-DO – One Carrier Evolved, Data Optimized

EV-DV – One Carrier Evolved, Data Voice

FDD – Frequency Division Duplex

Flash OFDM – Fast Low-Latency Access with Seamless Handoff OFDM

FLO – Forward Link Only

Gbps – Gigabits Per Second

GHz — Gigahertz

GPRS – General Packet Radio Service  
GSM – Global System for Mobile communications  
HSDPA – High Speed Downlink Packet Access  
HSPA – High Speed Packet Access (HSDPA with HSUPA)  
HSPA+ – HSPA Evolution  
HSUPA – High Speed Uplink Packet Access  
Hz – Hertz  
IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers  
IFFT – Inverse Fast Fourier Transform  
IP – Internet Protocol  
IPTV – Internet Protocol Television  
ISP – Internet Service Provider  
ITU – International Telecommunications Union  
kbps – Kilobits Per Second  
kHz — KiloHertz  
km – Kilometer  
MAC – Medium Access Control  
Mbps – Megabits Per Second  
Mcps – Megachips Per Second  
MCS – Modulation and Coding Scheme  
MediaFLO – Media Forward Link Only  
MHz – Megahertz  
MIMO – Multiple Input Multiple Output  
msec – millisecond  
OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing  
OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access  
PAR – Peak to Average Ratio  
PBCCH – Packet Broadcast Control Channel  
PHY – Physical Layer  
QAM – Quadrature Amplitude Modulation  
QoS – Quality of Service  
QPSK – Quadrature Phase Shift Keying  
RAN – Radio Access Network  
RF – Radio Frequency

SC-FDMA – Single Carrier Frequency Division Multiple Access  
SDMA – Space Division Multiple Access  
SMS – Short Message Service  
SNR – Signal to Noise Ratio  
TD-CDMA – Time Division Code Division Multiple Access  
TDD – Time Division Duplex  
TDMA – Time Division Multiple Access  
TD-SCDMA – Time Division Synchronous Code Division Multiple Access  
UMB – Ultra Mobile Broadband  
UMTS – Universal Mobile Telecommunications System  
UTRAN – UMTS Terrestrial Radio Access Network  
VoIP – Voice over Internet Protocol  
WCDMA – Wideband CDMA  
Wi-Fi – Wireless Fidelity  
WiMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access  
WLAN – Wireless Local Area Network  
WMAN – Wireless Metropolitan Area Network

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>48</b>
<b>B</b>	<b>Programy</b>	<b>48</b>
B.1	Program pro spouštění simulací.....	48
B.2	Program pro spouštění simulací turbo kódování .....	51

# A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

OFDM\_16QAM\_R14.mdl – simulace v Simulinku – 16QAM/OFDM

OFDM\_4QAM\_R14.mdl – simulace v Simulinku – 4QAM/OFDM

OFDM\_64QAM\_R14.mdl – simulace v Simulinku – 64QAM/OFDM

OFDM\_BPSK\_R14.mdl – simulace v Simulinku – BPSK/OFDM

plot\_ber.m – soubor pro spouštění všech simulací, vyčtení a zobrazení BER

plot\_ber\_turbo\_code.m - soubor pro spouštění všech simulací, vyčtení a zobrazení BER pro turbo kód simulaci

turbo\_code\_punc\_ofdm.mdl – simulace v Simulinku – QPSK/OFDM/TurboCode

## B PROGRAMY

### B.1 Program pro spouštění simulací

```
% konfigurace
%QAMType = 'BPSK'; % BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
QAMTypeVec = {'BPSK'}; % , 'QPSK', '16QAM', '64QAM'
blkLen = 10*1024; %100*3; % delka posilanych dat
maxNumErrs = 50; % max pocet chyb pro zastaveni simulace pro dane
EbNo
maxNumBits = 5e4; % max pocet prenesenych bitu pro zastaveni
simulace (pro pripad ze uz nejsou chyby)
EbNoVEcBPSK = 2:.5:15; % rozsah EbNo
EbNoVEcQPSK = 2:.5:16; % rozsah EbNo
EbNoVEcQAM16 = 2:1:20; % rozsah EbNo
EbNoVEcQAM64 = 2:1:24; % rozsah EbNo
BERVecBPSK = zeros(length(EbNoVEcBPSK),3);
BERVecQPSK = zeros(length(EbNoVEcQPSK),3);
BERVecQAM16 = zeros(length(EbNoVEcQAM16),3);
BERVecQAM64 = zeros(length(EbNoVEcQAM64),3);

for k=1:length(QAMTypeVec),
    QAMType = QAMTypeVec(k);

    if strcmp(QAMType,'BPSK') == 1
        EbNoVEc = EbNoVEcBPSK;
    end
    if strcmp(QAMType,'QPSK') == 1
        EbNoVEc = EbNoVEcQPSK;
    end
    if strcmp(QAMType,'16QAM') == 1
        EbNoVEc = EbNoVEcQAM16;
    end
end
```

```

if strcmp(QAMType, '64QAM') == 1
    EbNoVec = EbNoVecQAM64;
end

for n=1:length(EbNoVec),

    if strcmp(QAMType, 'BPSK') == 1
        EbNo = EbNoVecBPSK(n);
        sim('OFDM_BPSK_R14');
        BERVecBPSK(n,:) = BER; % BER je výstup ze simulací
    end
    if strcmp(QAMType, 'QPSK') == 1
        EbNo = EbNoVecQPSK(n);
        sim('OFDM_4QAM_R14');
        BERVecQPSK(n,:) = BER; % BER je výstup ze simulací
    end
    if strcmp(QAMType, '16QAM') == 1
        EbNo = EbNoVecQAM16(n);
        sim('OFDM_16QAM_R14');
        BERVecQAM16(n,:) = BER; % BER je výstup ze simulací
    end
    if strcmp(QAMType, '64QAM') == 1
        EbNo = EbNoVecQAM64(n);
        sim('OFDM_64QAM_R14');
        BERVecQAM64(n,:) = BER; % BER je výstup ze
simulací(n,:) = BER;
    end

end

end

% teoreticke hodnoty BPSK a QAM modulaci, ziskane pomoci bertool do
18dB
THber0psk =
[0.0786496035251426, 0.0562819519765415, 0.0375061283589260, 0.0228784075
610853, 0.0125008180407376, 0.00595386714777866, 0.00238829078093281, 0.00
0772674815378444, 0.000190907774075993, 3.36272284196176e-
05, 3.87210821552205e-06, 2.61306795357521e-07, 9.00601035062878e-
09, 1.33293101753005e-10, 6.81018912878077e-13, 9.12395736262818e-
16, 2.26739584445444e-19, 6.75896977065478e-24, 1.39601431090675e-29];
THber0qam4 =
[0.0786496035251426, 0.0562819519765415, 0.0375061283589260, 0.0228784075
610853, 0.0125008180407376, 0.00595386714777866, 0.00238829078093281, 0.00
0772674815378444, 0.000190907774075993, 3.36272284196176e-
05, 3.87210821552205e-06, 2.61306795357521e-07, 9.00601035062878e-
09, 1.33293101753005e-10, 6.81018912878077e-13, 9.12395736262818e-
16, 2.26739584445444e-19, 6.75896977065478e-24, 1.39601431090675e-29];
THber0qam16 =
[0.140981635066842, 0.118997407465924, 0.0977418537374869, 0.077453060292
5490, 0.0586237372834044, 0.0418927600464623, 0.0278713278451503, 0.016966
7343687604, 0.00924721374147442, 0.00439033608735211, 0.00175415061789273
, 0.000564706106481744, 0.000138658688812619, 2.42337854663159e-
05, 2.76320800168778e-06, 1.84185551109448e-07, 6.25020082774196e-
09, 9.07162538956510e-11, 4.52230900481844e-13];
THber0qam64 =
=[0.199841352300150, 0.177913257423400, 0.156969538964440, 0.137186816459
851, 0.118522697008311, 0.100791607295114, 0.0838167831472671, 0.067587263

```

```

3875218,0.0523338628488922,0.0384845391123388,0.0265327087975652,0.016
8835322220591,0.00972398508312426,0.00494598719517540,0.00215400375718
013,0.000772472180420457,0.000217173959159420,4.49888734403963e-
05,6.35114807198657e-06;];
    THebno = 0:18;

    % plot
    figure[1];
    berfit(EbNoVEcBPSK',BERVecBPSK(:,1)); % Curve-fitted simulation
results
    hold on;
    berfit(EbNoVEcQPSK',BERVecQPSK(:,1)); % Curve-fitted simulation
results
    hold on;
    berfit(EbNoVEcQAM16',BERVecQAM16(:,1)); % Curve-fitted simulation
results
    hold on;
    berfit(EbNoVEcQAM64',BERVecQAM64(:,1)); % Curve-fitted simulation
results

    figure[2];
    berfit(EbNoVEcBPSK',BERVecBPSK(:,1)); % Curve-fitted simulation
results
    hold on;
    semilogy(THebno, THber0psk,'k'); % Theoretical results
    legend('Simulated BER', 'Fit for simulated BER', 'Theoretical BPSK
BER Curve');

    figure[3];
    berfit(EbNoVEcQPSK',BERVecQPSK(:,1)); % Curve-fitted simulation
results
    hold on;
    semilogy(THebno, THber0qam4,'m'); % Theoretical results
    legend('Simulated BER', 'Fit for simulated BER', 'Theoretical QPSK
BER Curve');

    figure[4];
    berfit(EbNoVEcQAM16',BERVecQAM16(:,1)); % Curve-fitted simulation
results
    hold on;
    semilogy(THebno, THber0qam16,'b'); % Theoretical results
    legend('Simulated BER', 'Fit for simulated BER', 'Theoretical 16QAM
BER Curve');

    figure[5];
    berfit(EbNoVEcQAM64',BERVecQAM64(:,1)); % Curve-fitted simulation
results
    hold on;
    semilogy(THebno, THber0qam64,'g'); % Theoretical results
    legend('Simulated BER', 'Fit for simulated BER', 'Theoretical 64QAM
BER Curve');

```

## B.2 Program pro spouštění simulací turbo kódování

```
% konfigurace
maxNumErrs = 100; % max pocet chyb pro zastaveni simulace pro dane
EsNodB
maxNumBits = 5e4; % max pocet prenesenych bitu pro zastaveni simulace
(pro pripad ze uz nejsou chyby)

EbNoVec = 4:0.5:10; % rozsah EsNodB
BERVec = zeros(length(EbNoVec), 3);

for n=1:length(EbNoVec),
    EbNoDb = EbNoVec(n);
    sim('turbo_code_punc_ofdm');
    BERVec(n, :) = BER; % BER je výstup ze simulací
end

% treoreticke hodnoty BPSK a QAM modulaci, ziskane pomoci bertool do
18dB
THber0psk =
[0.0786496035251426, 0.0562819519765415, 0.0375061283589260, 0.0228784075
610853, 0.0125008180407376, 0.00595386714777866, 0.00238829078093281, 0.00
0772674815378444, 0.000190907774075993, 3.36272284196176e-
05, 3.87210821552205e-06, 2.61306795357521e-07, 9.00601035062878e-
09, 1.33293101753005e-10, 6.81018912878077e-13, 9.12395736262818e-
16, 2.26739584445444e-19, 6.75896977065478e-24, 1.39601431090675e-29];
THberConv =
[0.5000000000000000, 0.5000000000000000, 0.453179264964827, 0.1078104649523
16, 0.0207786762763938, 0.00335579309063832, 0.000470932656810725, 5.59520
884811475e-05, 5.05221302349611e-06, 2.98668529303482e-
07, 9.77843658076489e-09, 1.46698289166359e-10, 8.07943150483926e-
13, 1.25082771423908e-15, 3.91544209643485e-19, 1.64059883185472e-
23, 5.47657499494074e-29, 7.57741889189389e-36, 1.90843547051916e-44];
THebno = 0:18;

figure(20);
% plot
berfit(EbNoVec', BERVec(:, 1)); % Curve-fitted simulation results
hold on;
% prvni spusti simulaci modulaci BPSK/OFDM
berfit(EbNoVecBPSK', BERVecBPSK(:, 1)); % Curve-fitted simulation
results
%hold on;
semilogy(THebno, THber0psk, 'k'); % Theoretical results
hold on;
semilogy(THebno, THberConv, 'g'); % Theoretical results
```