

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Modelování OFDM v systému WiMAX

Jan Vacula

Bakalářská práce

2010

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan VACULA**
Osobní číslo: **I07542**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Modelování OFDM v systému WiMAX**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Teoretická část: Analýza současného stavu certifikace systému WiMAX 802.16e a zavádění technologie do výroby. Porovnání systému WiMAX určeného pro mobilitu se systémem pro pevnou službu z pohledu konfigurace rádiového spoje, dosahu, přenosových rychlostí, použitelných výkonů, frekvenčních pásem atd.

Praktická část: Modelování systému využívajícího techniku OFDM pro standard 802.16e pro různé rychlosti pohybu. Modelování proveďte s využitím prostředí Matlab, případně Matlab/Simulink. Proveďte získané výsledky s teoretickými předpoklady, a to např. z pohledu chybovosti přenosu pro různé kombinace přenosových rychlostí a rychlostí pohybu mobilní stanice.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Andrews, J., G., Ghosh, A., Muhamed, R.: Fundamentals of WiMAX:
Understanding Broadband Wireless Networking, Prentice Hall, 2007,
ISBN 978-0132225526**

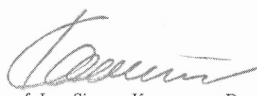
**Hasan, M., A.: Performance Evaluation of WiMAX/IEEE 802.16 OFDM
Physical Layer, Helsinki University of Technology, Thesis, 2007
<http://www.wimaxforum.org/>**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14. května 2010**


prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan




Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2010

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 12. 08. 2010

Jan Vacula

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce, Ing. Zdeňku Němcovi, Ph.D., za poskytnuté odborné rady a připomínky během zpracování této práce a všem ostatním lidem, kteří mě podporovali.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá problematikou datové komunikace podle standardu WiMAX 802.16e, popisuje základní vlastnosti této technologie. Analyzována jsou použití technologie pro přenos mezi dvěma pevnými stanicemi s technologií pro přenos mezi pevným vysílačem a pohyblivou přijímací stanicí. Pro ověření vlastností systému je vytvořena softwarová aplikace simulující přenos dat podle standardu 802.16e pro pevnou a pohyblivou službu.

Klíčová slova

WiMAX; OFDM; 802.16; signál; modulace; simulace

Title

WiMAX OFDM Modeling

Annotation

The thesis focuses on data communication based on WiMAX standard 802.16. It concentrates on main features of standard and analyzes technology utilization for fixed and mobile services for data transmission between transmitter and user station. To verify the differences between fixed and mobile WiMAX standard the computer model was created.

Keywords

WiMAX; OFDM; 802.16; signal; modulation; simulation

Obsah

Obsah	6
Seznam zkratek.....	8
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek	9
1 Úvod	10
2 Analýza standardu WiMAX 802.16e	11
2.1 Charakteristika rádiového kanálu	11
2.1.1 Kolísání přijímaného signálu	11
2.1.2 Výkonové ztráty	12
2.1.3 Šíření přímého signálu	12
2.1.4 Mezisymbolová interference	12
2.1.5 Dopplerův posuv	12
2.1.6 Šum	12
2.1.7 Interference	12
2.2 Frekvenční pásma pro širokopásmové bezdrátové systémy	13
2.2.1 Adaptivní modulace a kódování	16
2.2.2 Prostorový multiplex	16
2.3 Důležité vlastnosti standardu WiMAX	16
3 Zavádění technologie do výroby	18
3.1 Propustnost systému WiMAX	18
3.2 Typy síťové topologie	19
3.3 Řízení při přenosu	19
3.4 Transceivery a antény	19
3.4.1 Transceiver	20
3.4.2 Antény WiMAX	20
3.5 Zákaznické stanice	21
3.5.1 Outdoor uživatelská stanice	23
3.5.2 Indoor uživatelská stanice	23
3.6 Situace v ČR	24
4 Srovnání mobilního a pevného WiMAXu s WiFi	26

4.1 Fixed versus mobile WiMAX	26
4.1.1 Fixní WiMAX	29
4.1.2 Mobilní WiMAX	29
4.2 WiMAX versus WiFi	31
5 Praktická část.....	32
5.1 Ovládací panel	32
5.2 Vstupní a výstupní koeficienty	33
5.3 Konstelační diagram	34
5.4 Signál a spektrum	37
5.5 Výkonová křivka	38
5.6 Vliv rychlosti na přenos.....	41
Závěr	44
Literatura	45

Seznam zkratek

ARQ	Metoda potvrzování příjmu dat přijímačem
AWGN	Bílý šum
BER	Chybovost
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
DFS	Dynamic Frequency Selection
DSL	Digital Subscriber Line
FDD	Frequency Division Duplex
FFT	Fast Fourier Transformation
IP	Internet Protocol
ISI	Intersymbol Interference
LOS	Line of Sight
MAC vrstva	Medium Access Control
NLOS	Non Line of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PMP	Point to Multipoint
P2P	Point to Point
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RLC	Radio Link Control
SINR	Poměr signál/interference + šum
SNR	Signal to Noise Ratio
SNS	Simplified Network Selection
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time Division Multiplex
TPC	Transmit Power Control
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
64-QAM	Queued Access Method

Seznam obrázků

obrázek 1 - Princip vícecestného šíření signálu.....	11
obrázek 2 - Interference při přenosu.....	13
obrázek 3 - Interference při přenosu.....	13
obrázek 4 - Částečný překryv nosných frekvencí.....	16
obrázek 5 - Propustnost systému pro šířku pásma 3,5 MHz	18
obrázek 6 - Propustnost systému pro šířku pásma 20 MHz	18
obrázek 7 - Podporované síťové architektury.....	19
obrázek 8 - Rádía a antény	20
obrázek 9 - Typy antén	21
obrázek 10 - Přenosová cesta z hlediska výkonu	22
obrázek 11 - Orientační mapa pokrytí v Praze	23
obrázek 12 - Příklad sestavy od firmy Alvarion.....	24
obrázek 13 - Demonstrace propojení stanic	29
obrázek 14 - Porovnání parametrů WiMAX a WiFi	31
obrázek 15 - Ovládací panel	32
obrázek 16 - Vstupní a výstupní koeficienty	34
obrázek 17 - Modulace QPSK.....	35
obrázek 18 - Modulace 16QAM.....	36
obrázek 19 - Modulace 64QAM.....	37
obrázek 20 - Signál a spektrum OFDM.....	38
obrázek 21 - Výkonová křivka pro volný prostor.....	39
obrázek 22 - Výkonová křivka pro městskou zástavbu.....	40
obrázek 23 - Výkonová křivka pro hustou městskou zástavbu	41
obrázek 24 - Diagram při rychlosti pohybu přijímače 50km/h	42
obrázek 25 - Diagram při rychlosti pohybu přijímače 100km/h	42
obrázek 26 - Diagram při rychlosti pohybu přijímače 150km/h	43
obrázek 27 - Diagram při rychlosti pohybu přijímače 200km/h	43

Seznam tabulek

Tab. 1 - Frekvenční pásma využitelná pro WiMAX	15
Tab. 2 - Srovnání parametrů standardů 802.16 a 802.16e	27
Tab. 3 - Příklady základních parametrů systému WiMAX v pásmu 3,5GHz	28

1 Úvod

Úkolem bakalářské práce bylo popsat základní vlastnosti technologie WiMAX 802.16e, analyzovat její současný stav a postupné zavádění technologie do praktického užívání. Porovnávány jsou parametry standardu určeného pro mobilní služby, umožňující pohyb klientské stanice (standard 802.16e, Fixed WiMAX), se standardem určeným pro pevnou službu (standard 802.16).

První kapitola se zabývá podrobnou analýzou mobilního WiMAXu a jeho vlastností. Druhá kapitola obsahuje informace o využití standardu WiMAX v praxi a o nezbytných komponentech pro přenos dat. Třetí kapitola je zaměřena na srovnání mobilního WiMAXu s pevnou službou, jsou zde také uvedeny odlišnosti od systému WiFi. Čtvrtá kapitola je věnována praktické části, kde jsem se zabýval především vlivem rychlosti pohybu přijímače, typu frekvenčního pásma a zvolené modulace na chybovost přenášeného datového signálu. Vytvořená softwarová aplikace umožňuje simulovat chování systému vzhledem ke vzdálenosti mezi vysílací a přijímací stanicí, a to na základě měnicího se poměru signálu k šumu. V poslední kapitole je uvedeno shrnutí celé práce a jsou popsány dosažené výsledky.

2 Analýza standardu WiMAX 802.16e

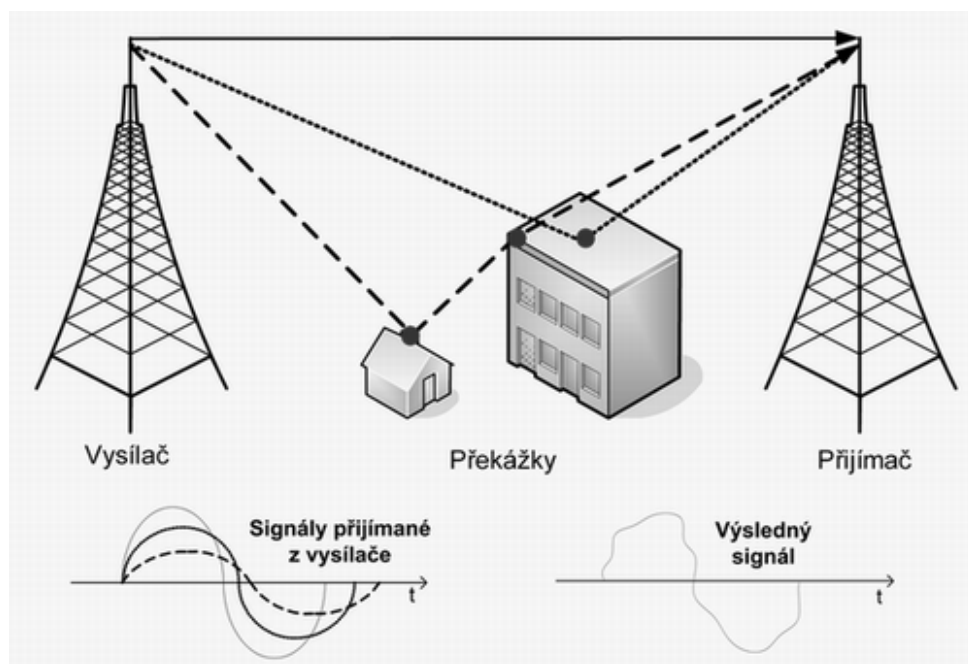
WiMAX sice nebyl od počátku konstruován jako mobilní systém, ale jeho vlastnosti a poptávka po aplikacích vedly ke specifikaci podpory mobility účastnických stanic. Pro optimální funkci této technologie v mobilním prostředí, je nutné analyzovat mnoho problémů, které požadované mobilitě brání. Jedná se především o volbu vhodného frekvenčního pásma a specifikaci přenosové cesty¹.

2.1 Charakteristika rádiového kanálu

Většina bezdrátových systémů počítá s tím, že nemají k dispozici přímou viditelnost mezi přijímací a vysílací stanicí (NLOS). Při šíření tak má rádiový signál v cestě budovy a další terénní překážky. Dalšími problémy jsou pohyb přijímací stanice vzhledem k vysílači, zpoždění při šíření signálu, interference od jiných signálů, šum, nebo zkreslení, které se dopředu nedá přesně určit a mění se v čase.

2.1.1 Kolísání přijímaného signálu

V mobilních komunikacích dochází kromě příjmu přímého signálu také k příjmu mnoha odrazů (vícecestné šíření). Tento jev má za následek kolísání výkonu přijímaného signálu až o desítky dB, a to i u poměrně malých vzdáleností mezi přijímačem a vysílačem.



obrázek 1 - Princip vícecestného šíření signálu²

¹ ANDREWS, Jeffrey G.; GHOSH, Arunabha; MUHAMED, Rias. Fundamentals of WiMAX

² Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=bezdratove-systemy-v-pristupove-siti&cislocclanku=2008020002>>.

2.1.2 Výkonové ztráty

V prostředí NLOS je přijímaný výkon více závislý na vzdálenosti šíření než v systémech LOS. Kromě vzdálenosti se zde přidávají další faktory, například umístění antény. Ztráty se zvyšují také s kvadrátem frekvence.

2.1.3 Šíření přímého signálu

V případě velkých překážek v podobě např. budov je signál přímého šíření velmi ztlumen nebo zcela potlačen. Přijímací stanice pak přijímá převážně odrazy vysílaného signálu.

2.1.4 Mezisymbolová interference

V prostředí s vícecestným šířením dochází k jevu, kdy během jedné symbolové periody přichází na vstup přijímače aktuální a odrazem zpožděný datový symbol zároveň (ISI). Při vyšších přenosových rychlostech je symbolová perioda poměrně malá, a tím se zvyšuje možnost vzniku ISI. K eliminaci tohoto jevu se využívá metoda ekvalizace, která vybírá nejsilnější z přijímaných zpožděných signálů. Následky ISI pomáhá snižovat modulační technika OFDM implementovaná do technologie WiMAX.

2.1.5 Dopplerův posuv

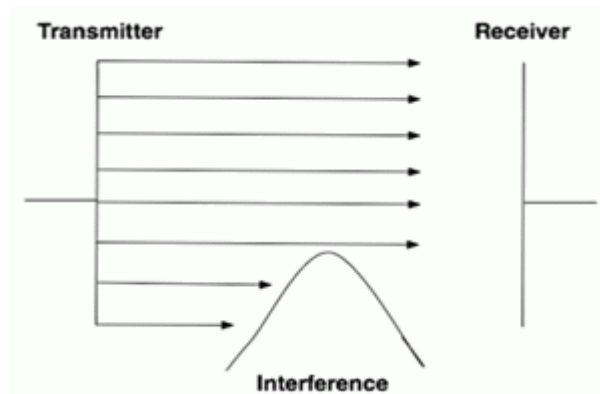
Vzájemný pohyb mezi vysílačem a přijímačem způsobuje rozptyl frekvence označovaný jako Dopplerův posuv. Dopplerův posuv je přímo úměrný rychlosti pohybující se uživatelské stanice a nosné frekvenci. V širokopásmových systémech způsobuje Dopplerův posuv snížení poměru signál/šum (SNR) a komplikuje tak synchronizaci a obnovu nosné. Tento jev má vliv také na systémy s OFDM, protože může narušit ortogonalitu jednotlivých subnosných.

2.1.6 Šum

V komunikačních systémech je nejčastěji uvažován kanál s bílým šumem (AWGN). Tepelný šum přijímače je dán šířkou pásma, a proto je jeho úroveň u širokopásmových systémů větší než u úzkopásmových a vede ke snížení plochy pokrytí.

2.1.7 Interference

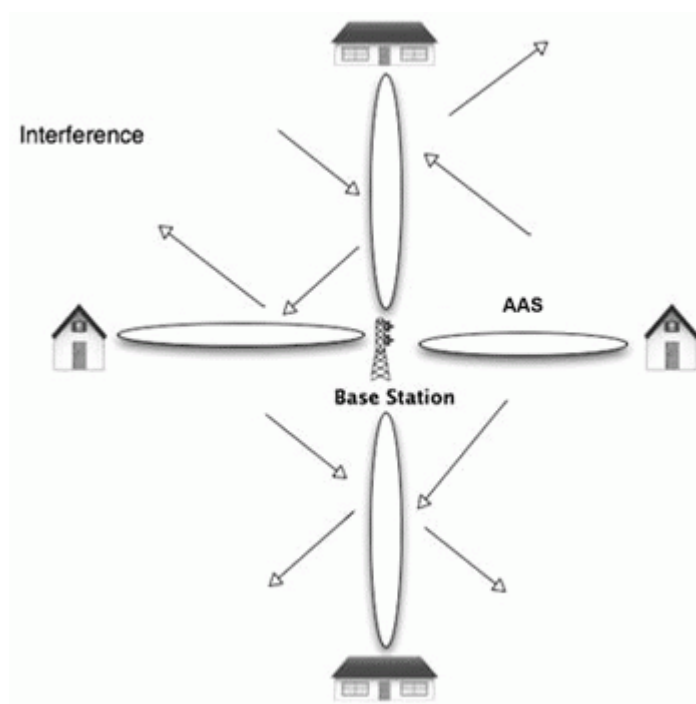
Každý systém přenosu dat má k dispozici omezenou šířku pásma, která musí být sdílena mnoha uživateli. Díky tomu ovlivňuje vysílání jednoho uživatele všechny ostatní. V systémech zaměřených na maximální přenosovou kapacitu má interference větší vliv než úroveň šumu.



obrázek 2 - Interference při přenosu

Příčiny mohou být různé, např. další vysílání na stejné frekvenci. WiMAX má několik technik na potlačení vlivu interference:

- technologie OFDM
- adaptivní anténní systém
- dynamický výběr frekvence



obrázek 3 - Interference při přenosu³

2.2 Frekvenční pásma pro širokopásmové bezdrátové systémy

Výběr vhodného frekvenčního pásma hraje jednu z klíčových rolí při návrhu bezdrátových sítí. Některá pásma byla používána pro vývoj technologie WiMAX,

³ Dostupné z WWW: <http://wimax.ic.cz/wimax_i.html>.

v budoucnu se ale počítá s využitím pouze vybraných pásem rozdělených podle zemí. Z výběru frekvenčního pásma a jeho šířky vyplývají omezení v podobě přenosových rychlostí a oblasti pokrytí.

Tab. 1 Frekvenční pásma využitelná pro WiMAX

Pásmo	Alokace pásma	Šířka pásma	Poznámka
3,5GHz	3,4-3,6GHz 3,3-3,4GHz 3,6-3,8GHz	Celkem 200MHz; pohybuje se od 2x5MHz do 2x56MHz	Licencované pásmo. Pásma přístupná podle zemí. Vhodné pro Evropu.
2,5GHz	2,495-2,690GHz	Celkem 194MHz	Amerika a Asie
2,3GHz	2,305-2,320GHz 2,345-2,360GHz	2x5MHz	Spojené státy, Austrálie
2,4GHz	2,405-2,4835GHz	80MHz	Bezlicen. pásmo. Velmi využívané, zarušené, výkonová omezení
5GHz	5,250-5,350GHz 5,725-5,825GHz	200MHz	Výkonová omezení
UHF	televizní pásmo	30-48MHz	

Většina pásem s sebou nese omezení buď v šířce pásma, nedostupnosti v našem regionu, nebo případně výkonových omezení. Pásma 2,4 GHz a 5 GHz jsou sice bezlicenční, z tohoto ale vyplývá vysoké zarušení mnoha uživateli různých dalších služeb, jako jsou WiFi, Bluetooth, průmyslová zařízení, radary apod. Z uvedeného přehledu je v současné době možné počítat s licencovaným pásmem 3,5 GHz, které je v mnoha zemích po celém světě určeno právě pro účely širokopásmových bezdrátových služeb. Dostupná šířka pásma je až 200 MHz, z čehož vyplývají možnosti poměrně vysokých přenosových rychlostí.

Do poměrně úzkého pásma je nutné umístit stále rostoucí počet uživatelů, kteří chtějí využívat náročnější aplikace. Základní metodou pro efektivnější využití spektra je použití buňkové architektury, kde jsou jednotlivé buňky pokrývány přístupovými body s nižším výkonem. Buňky jsou pak dále děleny do několika sektorů pomocí směrových antén. Frekvence používaná v jedné buňce se opakuje v další buňce, která je ve

vzdálenosti, kde už nehrozí ovlivňování interferencemi. Pro dosažení co nejvyšší kapacity systému je ale na druhou stranu nutné vysoké využití dostupných frekvencí. To vede k návrhu systémů umožňujících vysílání a příjem signálu s nízkým SINR (poměr signál/interference + šum).

2.2.1 Adaptivní modulace a kódování

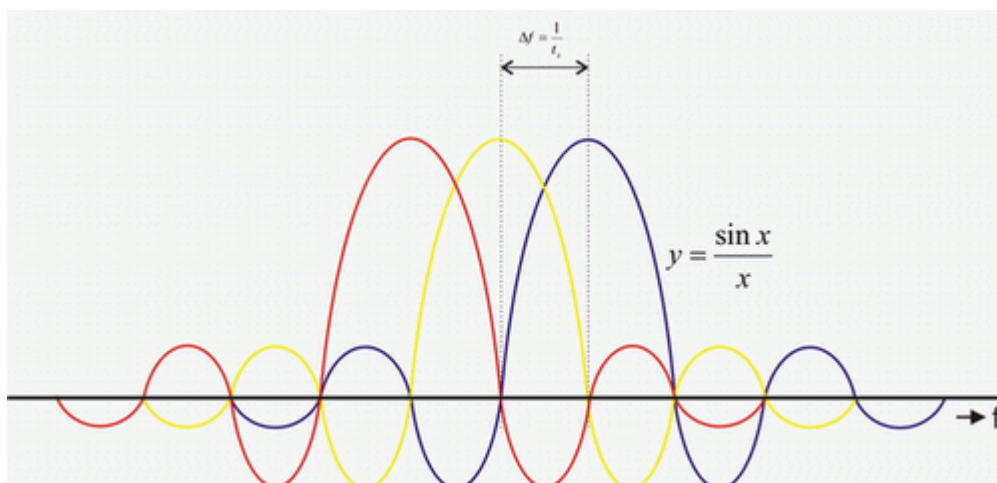
Výběr modulace a kódovacího poměru se může měnit v závislosti na počtu uživatelů nebo objemu přenášených dat. V obou případech je výsledek ovlivněn především poměrem SINR.

2.2.2 Prostorový multiplex

Při použití více antén je možné vysílat více nezávislých signálů paralelně a podobným způsobem může být na přijímači signál zpracován. Prostorový multiplex umožňuje zvýšení datového toku úměrně k počtu použitých antén.

2.3 Důležité vlastnosti standardu WiMAX

- *Fyzická vrstva s OFDM:* OFDM přináší výhody v podobě lepší odolnosti proti vícecestnému šíření a umožňuje přenos v NLOS prostředí. Modulační technika OFDM je v dnešní době implementována např. v systémech WiFi nebo digitální televize. Princip OFDM spočívá v použití několika stovek až tisíců nosných kmitočtů (pro WiMAX se používá 256 kmitočtů). Nosné jsou dále modulovány dle potřeby různě robustními modulacemi od BPSK až po 64-QAM. Jednotlivé nosné jsou vzájemně ortogonální, takže maximum každé nosné by se mělo překrývat s minimy ostatních. Datový tok celého kanálu se tak dělí na 256 dílčích datových toků jednotlivých nosných.



obrázek 4 - Částečný překryv nosných frekvencí

- *Přenosová rychlost:* využitelné rychlosti přenosu dat až do úrovně 75Mb/s (pro šířku pásma 20MHz). V reálných podmínkách s využitím poměru downlink to uplink s hodnotou 3:1 lze dosáhnout rychlostí 25Mb/s pro

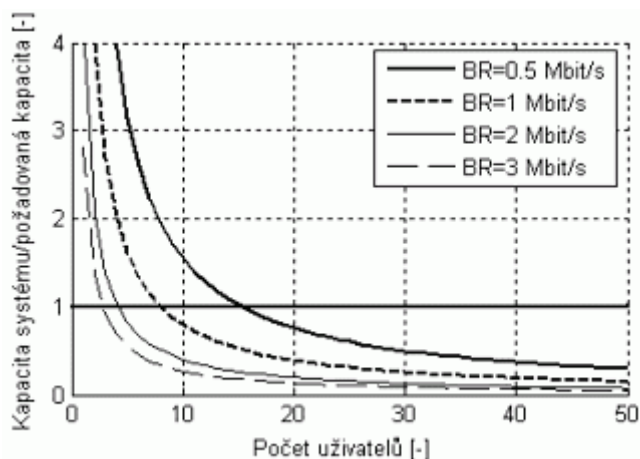
downlink a 6,7Mb/s pro uplink. Přenosovou rychlost lze také zvyšovat s využitím více antén a prostorového multiplexu.

- *Šířka pásma a přenosová rychlost:* architektura fyzické vrstvy podporuje změny datového toku podle dostupné šířky pásma. Tato možnost je podporována metodou OFDMA, která umožňuje měnit délku FFT. WiMAX tak dokáže měnit délku FFT v rozmezí od 128 do 1024 bodů v závislosti na pásmu 1,25MHz, 5MHz a 10MHz. To usnadňuje i možnosti roamingu v oblastech přechodu mezi sítěmi s různou šířkou pásma.
- *Adaptivní modulace a kódování:* WiMAX podporuje několik modulačních technik a opravných kódů. Tyto techniky lze vhodně aplikovat na přenosové kanály s různým stupněm šumu a rušení a tím je možné dosáhnout vždy maximálního využití kanálu s minimální chybovostí.
- *Podpora TDD a FDD:* časově dělený duplex je dnes upřednostňován z několika důvodů. Hlavním důvodem je možnost volby vhodného poměru mezi datovými toky uplink a downlink. FDD je využíván pouze pro některé typy Fixed WiMAX v pásmu 3,5GHz.
- *OFDMA:* tato technika umožňuje mnohonásobný přístup k přenosovému médium, takže uživatelé si pásmo OFDM rozdělí podle svých okamžitých potřeb. Tak vzniká možnost lepšího využití kapacity systému.
- *Quality of service:* WiMAX podporuje celou řadu aplikací zahrnujících hlasové a multimediální služby. S tím souvisí podpora konstantního nebo proměnného datového toku, přenos dat v „reálném čase“.
- *Bezpečnost:* WiMAX nabízí vysokou úroveň zabezpečení přenosu (kódování, hesla, autentifikační protokoly...).
- *Podpora mobility:* mechanismy implementované ve WiMAXu dovolují určitý stupeň mobility uživatelské stanice. Technika OFDM s vhodným odstupem subnosných frekvencí umožňuje pohyb v závislosti na použitém pásmu, podle standardu 802.16e však nejvýše do 150km/h.
- *Podpora IP-protokolu:* celá síť WiMAX využívá techniku IP-protokolů, nevzniká tak žádný problém s napojením na okolní systémy

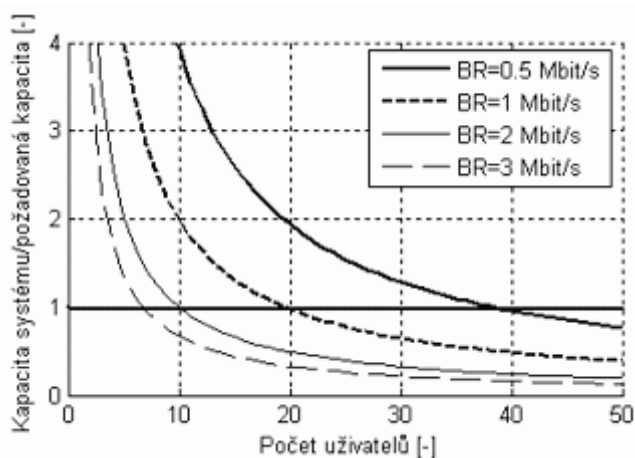
3 Zavádění technologie do výroby

3.1 Propustnost systému WiMAX

Na obr. 1 je ukázáno, kolik uživatelů může být připojeno do sítě při zvolené garantované rychlosti pro šířku pásma 3,5 MHz. Při výpočtu byly uvažovány čtyři garantované rychlosti (na obr. 8 označeno jako BR). V případě, kdy je kapacita systému větší než požadovaná kapacita, lze dané uživatele obsloužit. V opačném případě je nutné snížit garantovanou rychlost pro zajištění obsluhy dalších uživatelů. Při použití 0,5 Mbit/s lze obsloužit až 12 koncových uživatelů zatímco pouze 3 uživatelé mohou využívat dostupnou přenosovou kapacitu při garantované rychlosti 3 Mbit/s. Při použití rádiového kanálu o šířce 20 MHz (obr. 2) může systém obsloužit až 30 uživatelů při garantované rychlosti 0,5 Mbit/s a 5 uživatelů při rychlosti 3 Mbit/s.



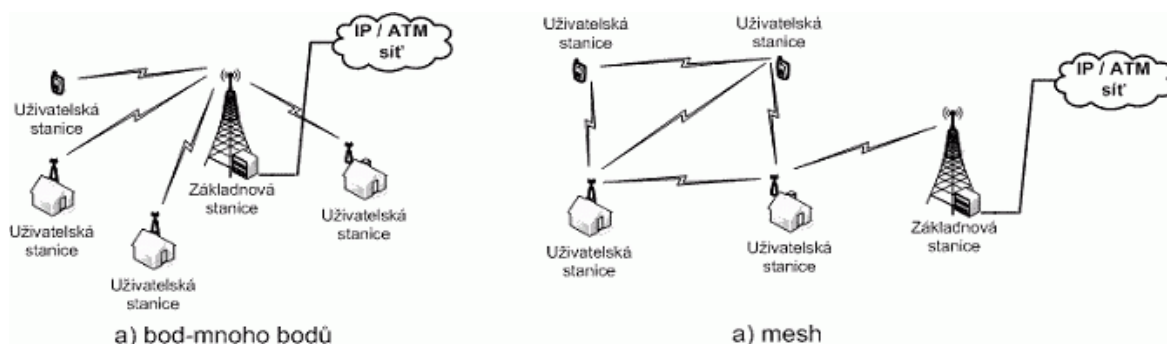
obrázek 5 - Propustnost systému pro šířku pásma 3,5 MHz



obrázek 6 - Propustnost systému pro šířku pásma 20 MHz

3.2 Typy síťové topologie

Podle standardu IEEE 802.16 nebo IEEE 802.16e lze definovat dvě možné síťové topologie: bod-mnoho bodů (PMP, *Point to Multipoint*) a *mesh* topologii. Topologie PMP musí být povinně implementována, zatímco implementace *mesh* topologie je volitelná.



obrázek 7 - Podporované síťové architektury

PMP architektura je založena na klasické buňkové struktuře sítě, kdy se jednotlivé uživatelské stanice připojují přímo ke stanici základnové.

U *mesh* topologie v porovnání s PMP je umožněna i přímá komunikace mezi stanicemi. Počítají s využitím pevných stanic jako retranslačních bodů. Díky tomu lze zvětšit dosah jedné základnové stanice bez nutnosti zvětšovat vysílací výkon.

3.3 Řízení při přenosu

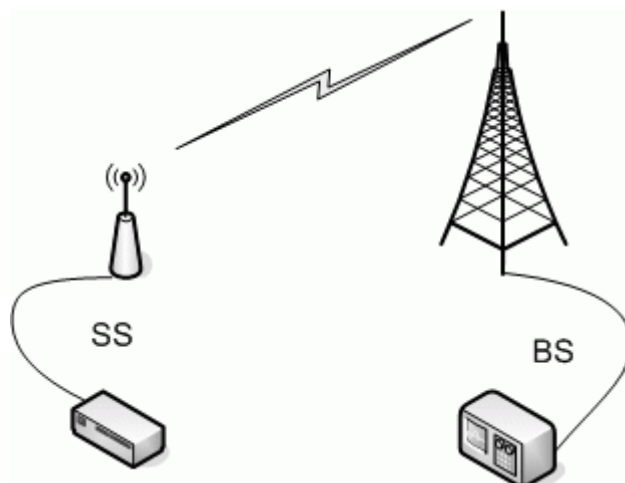
WiMAX podporuje pružné přidělování šířky pásma rádiových kanálů a opětovné využívání kanálů pro zvýšení kapacity buňky při růstu sítě. Specifikuje také řízení vysílacího výkonu (TPC) a měření kvality kanálu, jako doplňkové prostředky pro plánování buněk a efektivního využívání spektra. Dynamický výběr kmitočtu (DFS) je povinný pro práci v bezlicenčních pásmech⁴.

Metropolitní síť podle 802.16 se musí, podobně jako všechny rádiové sítě, vyrovnávat s měnícími se podmínkami prostředí, protože zejména déšť může mít negativní vliv na kvalitu příjmu signálu. Specifikace proto zahrnuje řízení rádiového spoje (RLC) pro nastavení počátečních parametrů rádiového spojení a pro jejich změnu při změně podmínek. Zařízení podle 802.16 monitoruje kvalitu spoje po jeho inicializaci a příslušně přizpůsobuje přenosové parametry.

3.4 Transceivery a antény

Struktura stanic WiMAX je velmi jednoduchá. Je postavena na dvou prvcích, a to transceiveru (kombinace vysílače a přijímače) a anténě.

⁴ Dostupné z WWW: <http://radio.feld.cvut.cz/personal/mikulak/MK/MK07_semestralky/wimax-zakl_prehled.pdf>.



obrázek 8 - Rádía a antény

3.4.1 Transceiver

Jádrem WiMAXu jsou transceivery, které obsahují jak přijímač, tak vysílač. Ten generuje nosné kmitočty (pro WiMAX 2 – 11GHz). Transceiver obsahuje obvody s komplexními sadami procesorů.

Většina základnových stanic je řešena tak, že má oddělenou anténu od transceiveru. Oproti tomu klientské stanice mají dvě řešení, a to buď s nainstalovanou vnější anténou, např. vně budovy (outdoors), nebo s anténou umístěnou uvnitř budovy (indoors).

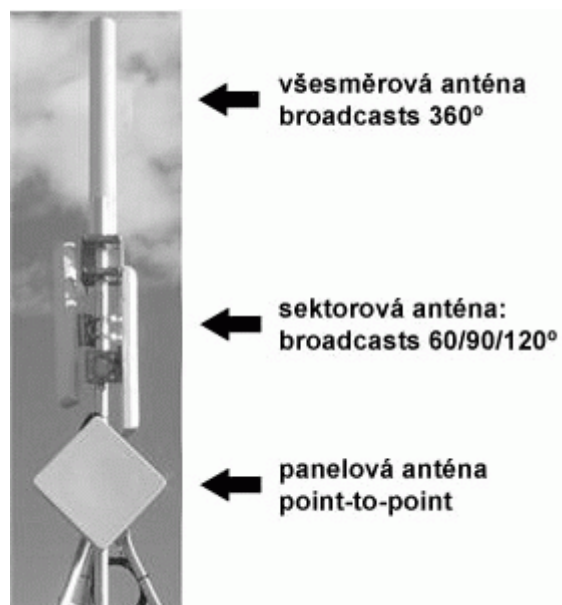
Hlavní výhodou takového řešení BS je, že transceiver je chráněn před extrémními vlivy počasí. Navíc anténa umístěná venku má lepší příjem signálu, než anténa umístěná uvnitř budovy, obzvláště je-li požadavek na přímou viditelnost.

Anténa s radiostanicí je spojena kabelem, tzv. „pigtail“. Je vhodné mít tento kabel vždy co nejkratší, aby docházelo k co možná nejmenšímu útlumu signálu. Například u velmi používaného kabelu LMR-400 dochází na každých 3 m k útlumu o 1 dB. Budeme-li mít tedy na střeše 20-ti patrové budovy anténu a v přízemí rádio pak se nám může stát, že nebudeme mít žádný signál.

Při umísťování radiostanice do ochranné schránky musíme zvažovat, jaké jsou v dané lokalitě atmosférické vlivy (především teplota), nebo jak zajistit dostatečnou bezpečnost schránky. Vhodnou teplotu zajistíme izolací a odvětráváním schránky. Základnové jednotky snášejí teploty v rozsahu - 30 až 50 °C.

3.4.2 Antény WiMAX

WiMAX antén je více druhů optimalizovaných pro různé aplikace. Tři hlavní typy antén ilustruje obrázek.



obrázek 9 - Typy antén

Všesměrové antény

Všesměrové antény jsou vhodné pro topologii sítě PMP. Jejich nevýhodou je, že vysílací výkon je rozprostřen do oblasti 360° kolem antény, což snižuje její dosah a výkon signálu ve vybraném směru. Vhodné je nasadit tyto antény v oblastech s vysokou koncentrací uživatelů.

Sektorové antény

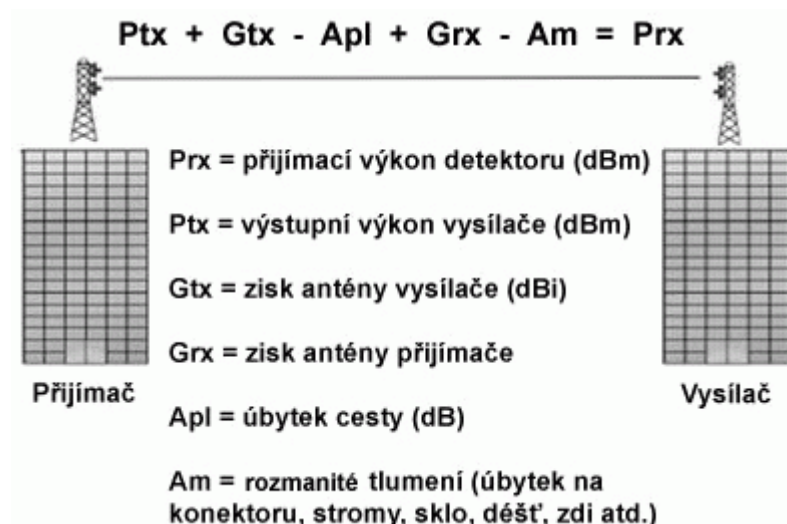
Sektorové antény soustřeďují vysílací signál do určité oblasti (sektoru). Nabízejí větší dosah a výkonnost s menším nárokem na energii než antény všesměrové. Pro tyto vlastnosti mnoho provozovatelů většinou volí k pokrytí 360° raději více sektorových antén než jednu anténu všesměrovou.

Panelové antény

Panelové antény jsou obvykle ploché, čtvercové o délce strany kolem 30 cm. Mohou se používat pro spojení P2P i PMP. V některých případech se proto používají i jako sektorové antény, ale s omezeným vyzařovacím úhlem (20°/60°). Při spojení P2P je jejich dosah větší a signál kvalitnější.

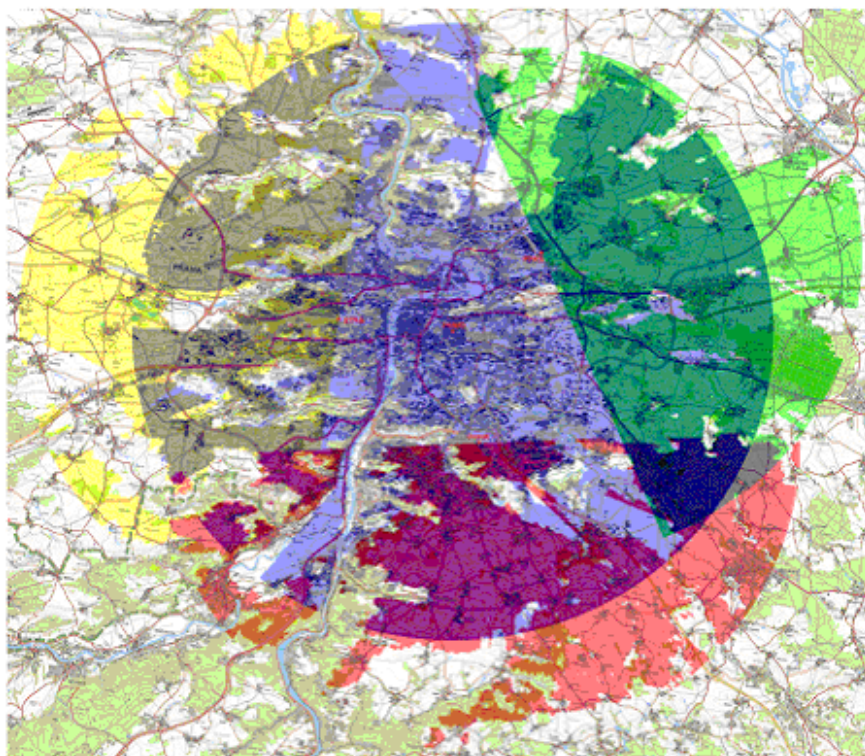
3.5 Zákaznické stanice

Wimax nabízí dvě provedení klientských stanic. První řešení je s umístěnou anténou vně budovy outdoor, zatím co druhé má umístěnou anténu uvnitř budovy indoor.



obrázek 10 - Přenosová cesta z hlediska výkonu

V následujícím obrázku je vidět pokrytí k 19. 1. 2009 v Praze. Jedná se o frekvenční pásmo 3,5 GHz s přijímací anténou ve výšce 10 metrů. Jde o pokrytí vypočítané, nikoliv naměřené, které bere v úvahu vliv terénu, ale nikoliv budov. Jde o outdoorové pokrytí, vyžadující venkovní anténu (o průměru 20 cm). Předpokládá se, že v okruhu do 2 km by mělo být možné i indoor provedení přijímače, v rámci kterého lze vystačit s vnitřním koncovým zařízením (s integrovanou anténou). Zprovozněné služby jsou pouze fixní: zákazník je vázán na konkrétní základnovou stanici, ke které se připojuje. Současné řešení nepodporuje přechod k jiné základnové stanici.



obrázek 11 - Orientační mapa pokrytí v Praze⁵

Celkově je tato oblast pokryta čtyřmi anténami. Každá z barev znázorňuje pokrytí jedné antény.

3.5.1 Outdoor uživatelská stanice

Outdoor stanice jsou velmi jednoduché a nabízejí oproti Indoor stanicím lepší parametry. To je dáno především tím, že signál nemusí procházet například betonové zdi a ocelové konstrukce. Navíc je často kladen požadavek na přímou viditelnost, pro maximalizaci spojení a pak je Outdoorové řešení ideální. Naopak Indoorové provedení by mělo být o něco levnější, protože se nemusí například řešit ochrana proti atmosférickým vlivům.

3.5.2 Indoor uživatelská stanice

Největší výhodou vnitřního provedení uživatelských stanic je skutečnost, že zákazník si může zařízení instalovat sám, protože je prakticky bez instalace. Zákazník tak může zařízení používat téměř ihned a nemusí čekat na odbornou instalaci. Výhodou je, že anténa není vystavena atmosférickým vlivům a nemusí tak pracovat v extrémních podmínkách.

Na následujícím obrázku pro ilustraci uvádím sestavy pro vysílání a příjem systému WiMAXu.

⁵ Dostupné z WWW: <<http://www.lupa.cz/clanky/cra-spustily-v-praze-wimax/>>.



obrázek 12 - Příklad sestavy od firmy Alvarion⁶

Technologie se zatím nejvíce využívá v komerčním sektoru. Cena základnových stanic se pohybuje okolo 150 000 Kč za základní jednotku a cca 60 000 Kč za každou anténní jednotku, což při využití tří antén vychází asi na 350 000 Kč pro pokrytí v úhlu 360°. Další investicí jsou samozřejmě nutné stavební práce a licenční povolení (pro jeden kanál se uvádí cena licence okolo 30 000 Kč ročně)⁷.

I tak jsou ale náklady, vzhledem k možnostem takovéto sítě, překvapivě nízké. Důvodem je také fakt, že všechna nutná logika je soustředěna do základnové stanice a nad ní již funguje standardní IP síť.

Zatímco teoretické předpokládané přenosové rychlosti dosažitelné technologií WiMAX se pohybují v hodnotách kolem 75 Mbit/s na jeden přenosový kanál při užití PMP topologie, výsledky prováděných testů hovoří podstatně pesimističtěji. Skutečně dosahované rychlosti jsou kolem 20 Mbit/s pro kanál 20 MHz a 7 až 8 Mbit/s pro kanál 3,5 MHz. Rozdíl mezi teoretickými a skutečnými hodnotami je především režie přenosu.

3.6 Situace v ČR

V České republice je zatím využíváno pouze řešení v pásmu 3,5 GHz dle standardu 802.16d na kmitočtově děleném duplexu (FDD). Jiná varianta není zatím v ČR povolena. Nejbližší povolení je pásmo 2,6 GHz, které snad bude pro tuto technologii uvolněno v roce 2011.

⁶ Dostupné z WWW: <<http://www.internetprovsechny.cz/clanek.php?cid=160>>.

⁷ Dostupné z WWW: <<http://www.odn.cz/clanky.html>>.

Situace mobilního WiMAXu je poněkud odlišná, tato technologie je sice již běžně nasazována např. v USA, v ČR a mnoha dalších evropských státech však zatím není legislativně podporována. Většímu rozšíření tak brání spíše ekonomická a regulační omezení, než technologická zralost nebo dostupnost komerčního řešení.

4 Srovnání mobilního a pevného WiMAXu s WiFi

4.1 Fixed versus mobile WiMAX

Skupina IEEE 802.16 vznikla v roce 1998 pro účely standardizace bezdrátového širokopásmového rozhraní pro přenos dat. Původní záměr byl standardizovat systém s přímou viditelností stanic (LOS) v pásmu 10-66GHz. Výsledný standard byl definován v roce 2001 a zahrnoval fyzickou vrstvu s jednou nosnou frekvencí a časovým multiplexem (TDM). Následně byl vypracován doplněk k tomuto standardu implementující rádiovou cestu bez přímé viditelnosti stanic (NLOS) v pásmu 2 – 11 GHz a s využitím fyzické vrstvy s technikou OFDM. Na MAC vrstvě je pak aplikována technika OFDMA.

V roce 2005 byl vypracován další dodatek s označením 802.16e, který podporuje mobilitu uživatelských stanic. Standard je pak často označován jako 802.16e-2005 nebo *mobile WiMAX*.

Tabulka uvádí pouze přehled komunikačních profilů pro pásmo 3,4GHz až 3,8GHz, které je prozatím uvažováno pro Evropu. Pouze první z uvedených profilů využívá kmitočtově dělený duplex (FDD), ostatní profily využívají časově dělený duplex (TDD).

- **FDD** neboli kmitočtový duplex, používá pro vysílání a příjem různé kmitočty. Pro provoz je tedy nutné vyhradit dvě kmitočtová pásma o stejné šířce. To umožňuje současně příjem a vysílání (*Full Duplex*). Existuje také varianta, kdy pouze přijímáme nebo pouze vysíláme (*Half Duplex*).
- **TDD** využívá pouze jedno kmitočtové pásmo pro příjem a vysílání. Lze tedy buď pouze vysílat, nebo přijímat. Velkou výhodou oproti *Half Duplexu* je možnost asymetrie komunikace v dopředném směru „*downstream*“ a ve zpětném směru „*upstream*“. Vhodným nastavením lze dosáhnout maximálního využití kmitočtového pásma.

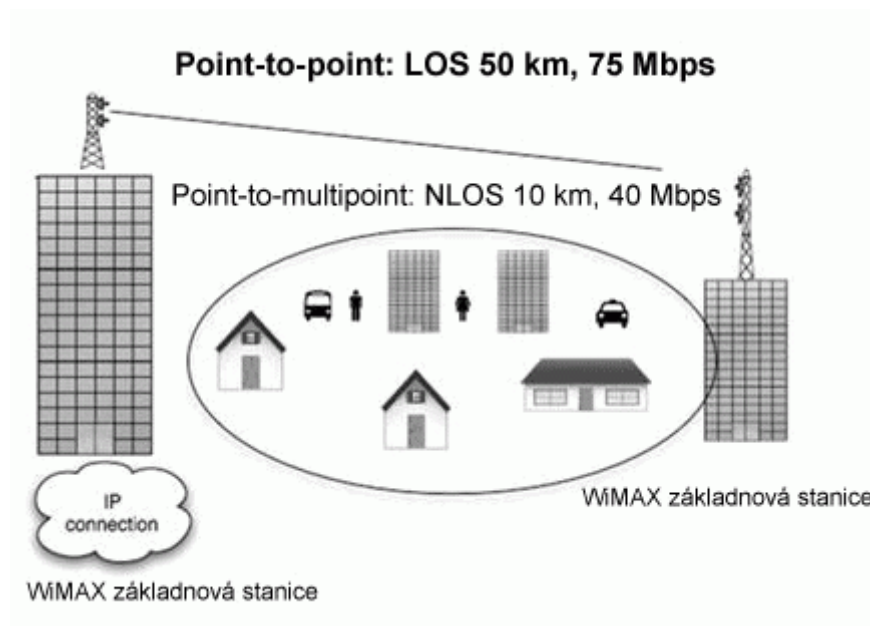
Tab. 2: Srovnání parametrů standardů 802.16 a 802.16e

	802.16	802.16e
Současný stav	Dokončeno v r. 2001	Dokončeno v r. 2005
Frekvenční pásmo	10GHz – 66GHz	2GHz – 11 GHz (fixed) 2GHz – 6 GHz (mobile)
Prostředí	LOS	LOS pro fixed NLOS pro mobile
Technika přenosu	Pouze jedna nosná frekvence	Jedna nosná; OFDM s 128, 256, 512, 1024 a 2048 subnosnými
Modulace	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM
Přenosová rychlost	32Mb/s – 134,4Mb/s	1Mb/s – 75Mb/s
Multiplex	Burst TDM, TDMA	Burst TDM, TDMA, OFDMA
Šířka pásma	20MHz, 25MHz, 28MHz	1,75MHz, 3,5MHz, 7MHz, 10MHz, 14MHz, 15MHz
Implementace	---	Mobile WiMAX

Tab. 3: Příklady základních parametrů systému WiMAX v pásmu 3,5GHz

Pásmo	Šířka pásma	Velikost FFT OFDM	Duplex
Fixed WiMAX			
3,5GHz	3,5 MHz	256	FDD
	3,5 MHz	256	TDD
	7 MHz	256	FDD
	7 MHz	256	TDD
Mobile WiMAX			
3,4-3,8GHz	5 MHz	512	TDD
3,4-3,6 GHz	7 MHz	1024	TDD
3,6-3,8 GHz	10 MHz	1024	TDD

4.1.1 Fixní WiMAX



obrázek 13 - Demonstrace propojení stanic

Podobu fixního WiMAXu upravuje norma IEEE 802.16-2004. Pracuje jak v licenčním tak bezlicenčním pásmu v rozsahu 2 - 11GHz, a to i bez požadavku na přímou viditelnost⁸.

Teoretický dosah v otevřeném prostoru je až 50 km a v hustě zastavěných oblastech až 10 km. Přenosová rychlost je teoreticky až 75 Mbps, kterou však sdílí všichni uživatelé připojení k základnové stanici. Udávané reálné hodnoty jsou (pro přenos na vzdálenost kolem 20 km mimo město a ve městě od 3 do 10 km podle hustoty zástavby) propustnosti až 40 Mbps bez přímé viditelnosti.

Jedna základnová stanice je schopna obsluhovat stovky firem majících vysoké nároky na kvalitu, spolehlivost a robustnost připojení a až tisíce uživatelů s připojením srovnatelném s DSL. Fixní WiMAX se ideálně hodí na vybudování páteřní sítě v městských oblastech. Kvalitní připojení k internetu s podporou řízení kvality je vhodné pro přenos dat, hlasu i videa v reálném čase.

4.1.2 Mobilní WiMAX

Mobilitu v sítích WiMAX zajišťuje standard 802.16e-2005. Je rozšířením standardu 802.16-2004 a musel vyřešit tři zásadní problémy. Změny modulace signálu při rychlém pohybu, předávání si koncových stanic mezi buňkami a management připojení mezi jednotlivými poskytovateli (roaming). Nyní by měl mobilní WiMAX fungovat na frekvencích 2 - 6 GHz s maximální přenosovou rychlostí 15 Mbps (reálně 2 - 3 Mbps)

⁸ Dostupné z WWW: <http://wimax.ic.cz/wimax_i.html>.

a latencí kolem 50 ms. Díky svým technickým parametrům, může být použit pro služby mobilní TV nebo on-line her.

Zavedení podpory mobility do technologie WiMAX

Pro účely vytvoření mobilní sítě přenosu dat je v dnešní době možné uvažovat pouze standard 802.16e, popisující technologii WiMAX podporující určitou mobilitu uživatelských stanic. Nicméně stále se jedná do určité míry o přechodový krok k mobilním sítím vyšší generace. Vzájemné propojení systémů WiMAX od různých výrobců a implementace této problematiky přímo do norem pak nabývá na významu právě s podporou mobility. Dnešní uplatnění technologie WiMAX je především v bezdrátovém širokopásmovém přístupu, ve venkovních sítích, privátních sítích, také jako rozšíření veřejných přístupových WLAN a dalších aplikací potřebujících bezdrátové propojení bez přímé viditelnosti.

Mobilní bezdrátová metropolitní síť 802.16e

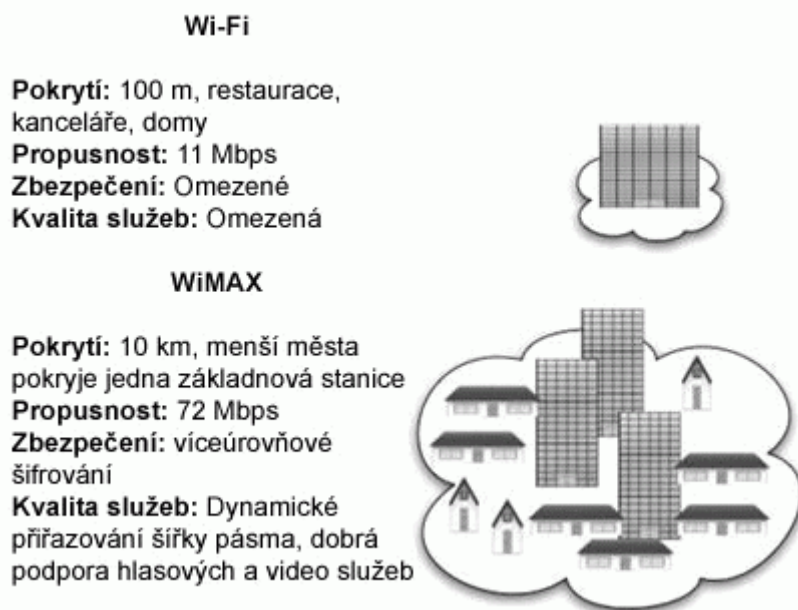
Tato technologie implementuje mobilitu do bezdrátové metropolitní sítě, konkrétně kombinuje fixní a mobilní podporu v licenčních kmitočtových pásmech 2 – 5 GHz. Mobilním spojem se rozumí spoj, kdy vysílací anténa je pevně umístěna, zatímco přijímací anténa je volně pohyblivá. Nejsložitějším případem pro plánování mobilního spoje je šíření vln v městské zástavbě. Signál, šířící se v zástavbě mezi pevnou a mobilní anténou, je ovlivňován řadou různých fyzikálních mechanismů. Jedná se o odraz, ohyb, rozptyl vlny a difrakci na hranách střech. Tyto jednotlivé mechanismy šíření vln jsou dány především typem okolního prostředí a polohou obou antén mobilního spoje. Doplněk k 802.16 má tedy za úkol zajistit, aby základnová stanice podporovala jak pevný, tak mobilní širokopásmový bezdrátový přístup. Význam 802.16e se nachází mezi rychlou bezdrátovou komunikací s malým dosahem (WLAN) a vysoce mobilní komunikací v rozlehlých celulárních sítích. Specifikace vychází z technických principů 802.16d, ale musí zahrnovat podporu pro předávání komunikace stanice mezi buňkami (na základě přijímaného signálu základnové stanice, kterou mobilní stanice zjišťuje na základě pravidelných zpráv od základnových stanic) a roaming. 802.16e nabídne nižší kapacitu než 802.16d, protože se do ní promítá režie pro mobilitu.

Kvalita služby

Kvalita služby hlasové či video telefonie je definována jako vnímaná kvalita hlasu nebo videa. Kvalitnější služby znamenají menší bitovou chybovost přijímaného signálu. V rádiové síti uživatel za ideálních podmínek obdrží plnou bitovou rychlost, ale v případě zhoršení přenosových podmínek, s větší vzdáleností od základnové stanice anebo rušení, se rychlost příslušně sníží. Za této situace může také dojít až ke ztrátě paketů, což zase znamená jejich opakovaný přenos a v souvislosti s tím nižší přenosovou rychlost.

4.2 WiMAX versus WiFi

Nejedná se o technologie, které by se mezi sebou nahrazovaly, ale vzájemně se doplňují. Technologie WiFi je určena pro lokální bezdrátové sítě, zatímco WiMAX pro metropolitní sítě. Podle toho se také odlišují jejich charakteristiky. V minulosti se žádná z těchto technologií nezaměřovala na mobilitu ve větším rozsahu, než v rámci území pokrytého jedním přístupovým bodem. První standard zahrnující mobilitu uživatelských stanic je tak 802.16e



obrázek 14 - Porovnání parametrů WiMAX a WiFi

Wi-Fi je technologie pro použití na krátké vzdálenosti. Dosah přístupových bodů je několik desítek metrů uvnitř budov a několik stovek metrů venku. Pracuje v bezlicenčním pásmu, což způsobuje, že v hustě osídlených oblastech dochází k vzájemnému rušení při vysílání na stejné frekvenci. Wi-Fi navíc nemá implementovanou podporu kvality služeb. Technologie Wi-Fi je vhodné použít pro bezdrátové lokální sítě tzv. WLAN, pro něž také byla původně navržena.

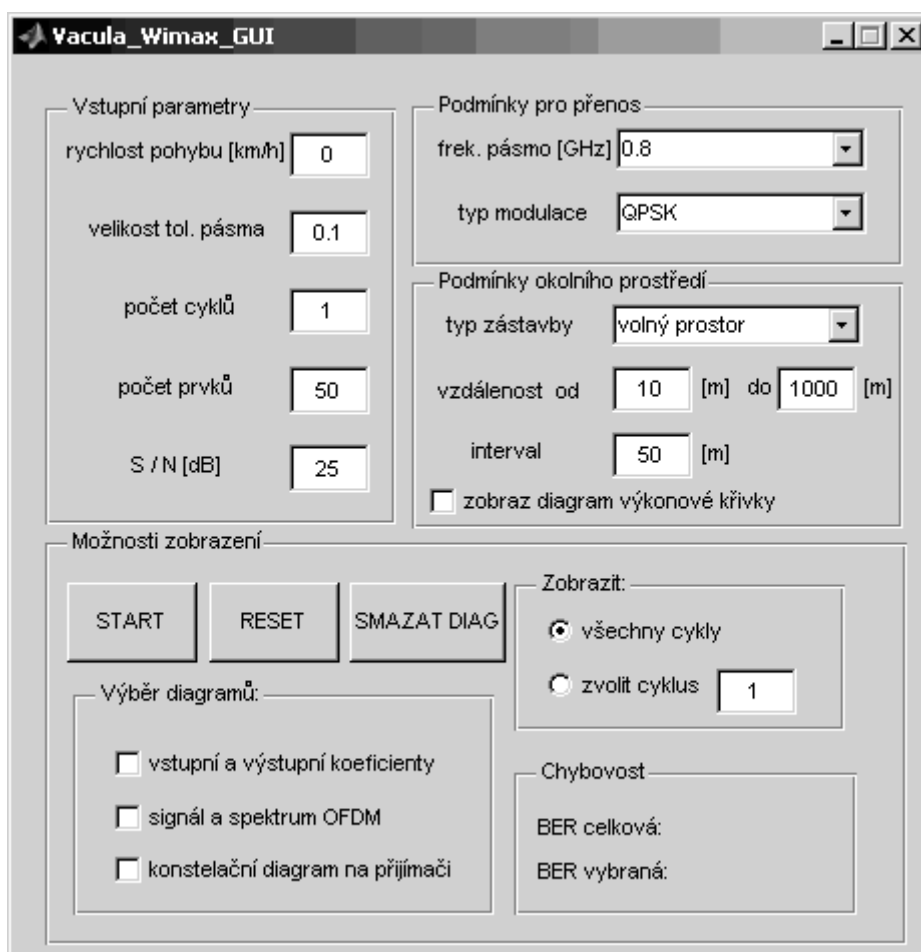
Oproti staršímu standardu WiFi je WiMAX určen výhradně do venkovního prostředí, kde může dosahovat vyšších přenosových rychlostí, má vyšší dosah, nabízí možnost spojení i bez přímé viditelnosti. Používá se navíc licencované pásmo, které odstraňuje vzájemné rušení. Podporuje řízení kvality služeb (QoS). Zejména poslední výhoda je velmi vítaná, neboť díky QoS lze zajistit koncovému zákazníkovi garantovanou vysokou rychlost a stabilní odezvy, což je vhodné pro moderní služby jako je IP telefonie či přenos videa v reálném čase. Je určen především pro poskytovatele (operátory, provideři), kteří mají díky QoS prostředky pro garantování služeb uživatelům. Rovněž bezpečnost je na mnohem vyšší úrovni než je tomu u Wi-Fi.

5 Praktická část

Úkolem bylo vytvořit softwarovou aplikaci pro simulaci datové komunikace podle standardu WiMAX na úrovni fyzické vrstvy, a to při využití různých technik modulace a demodulace signálu v multiplexu OFDM. Pro tyto účely jsem vypracoval grafické rozhraní umožňující generovat spektrum, konstelační diagramy, křivky závislosti BER na vzdálenosti, a to pro pevnou službu nebo pohybující se přijímač.

Pro vytvoření aplikace jsem použil prostředí MATLAB. Softwarová aplikace včetně grafického rozhraní je na přiloženém CD.

5.1 Ovládací panel



obrázek 15 - Ovládací panel

V horní části ovládacího panelu jsou umístěny možnosti pro nastavení vstupních parametrů a podmínek pro přenos mezi vysílací a přijímací stanicí. Je možnost nastavit:

- rychlost pohybu přijímací stanice v rozmezí od 0 do 200 km/h

- velikost tolerančního pásma od 0 až do maxima, kde by se toleranční pásma navzájem překrývala
- počet cyklů při přenosu je možné nastavit v rozmezí od 1 do 1000 (jedná se o počet opakované generování OFDM symbolů)
- počet prvků v jednom cyklu lze nastavit v rozmezí od 1 do 1000 (jedná se o zvolení počtu subnosných, což je provedeno z důvodu výpočtové náročnosti na méně výkonných stanicích)
- poměr signál/šum. Jeho hodnota má vliv na vypočítávané chybovosti a zobrazované charakteristiky. Graf závislosti chybovosti na poměru S/N a vzdálenosti od vysílače si hodnotu poměru nastavuje automaticky.
- frekvenční pásmo, ve kterém má přenos probíhat - je na výběr z možností 0,8GHz, 2,4GHz, 3,5GHz a 5GHz
- typ modulace přenosu, lze vybrat jednu ze tří nabídnutých modulací QPSK, 16QAM a 64QAM
- u výkonové křivky, kde můžeme zobrazit vliv vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem na celkovou chybovost přenosu si můžeme vybrat ze třech typů prostředí – volného prostoru, městské zástavby nebo husté městské zástavby. Vzdálenost „od“ - myšleno v jaké vzdálenosti od vysílače bude námi garantovaný poměr S/N 50dB. Vzdálenost „do“ znamená, do jaké vzdálenosti chceme výkonovou křivku zobrazit. Interval je vzdálenost, po které se mají provádět výpočty. Všechny tři parametry jsou definovány v metrech. Maximální vzdálenost od vysílače je nastavena na 3 000 metrů.

V dolní části panelu je možnost výběru zobrazení jednotlivých diagramů. Jestli chceme zobrazit všechny cykly přenosu, nebo jen jeden konkrétní, námi vybraný. Při každém výpočtu se zobrazí celková chybovost přenosu, případně chybovost námi vybraného cyklu.

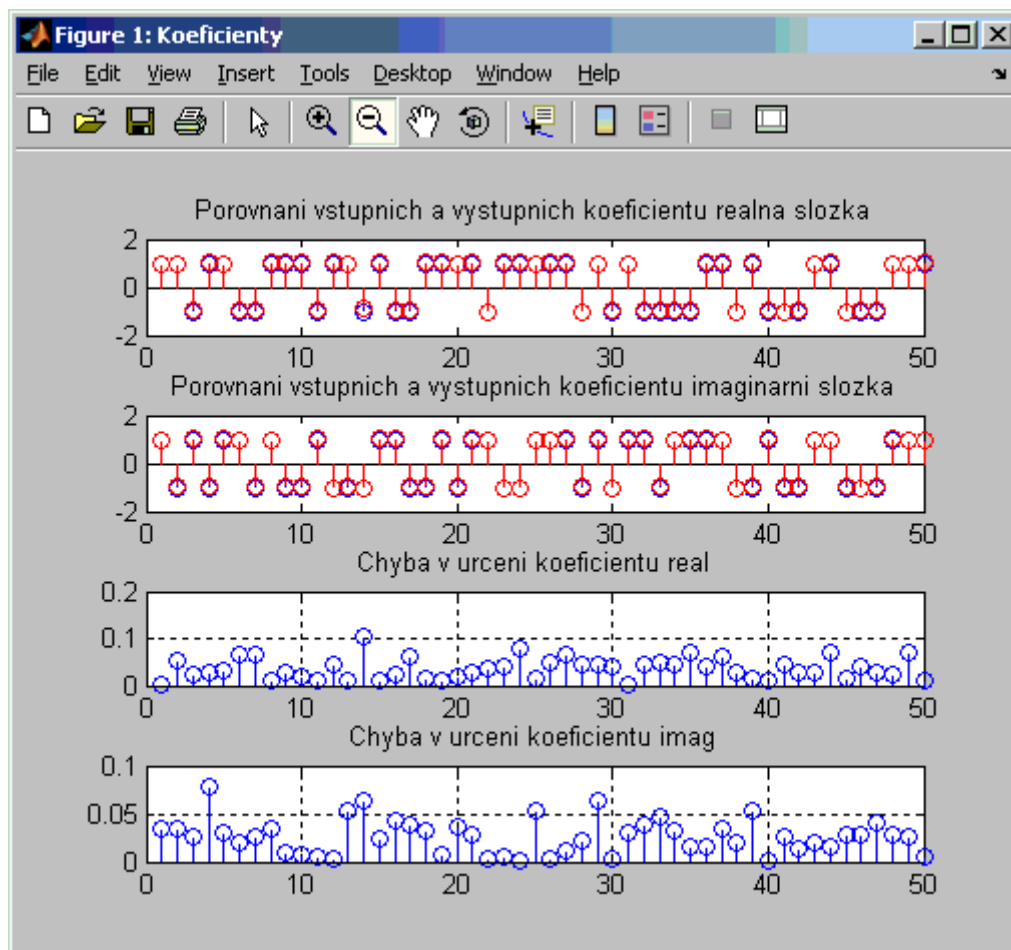
Ovládání probíhá pomocí tlačítek START pro spuštění simulace, RESET pro počáteční nastavení všech podmínek a SMAZAT DIAG pro vymazání všech zobrazených diagramů.

5.2 Vstupní a výstupní koeficienty

Tento diagram umožňuje porovnat výstupní signál z vysílače (na obrázku znázorněn modrou barvou, v podobě reálné a imaginární složky signálu na jednotlivých subnosných kmitočtech) se vstupním signálem na přijímači (červená barva). Společně jsou

tyto signály zobrazeny v prvních dvou oknech diagramu. Ve zbylých dvou oknech je znázorněna velikost chyb mezi nimi v reálné a imaginární složce.

V následujícím obrázku vidíme, že se chyba v určení koeficientu pohybuje ve vybraném případě pod hranicí 0,1 maximální hodnoty.

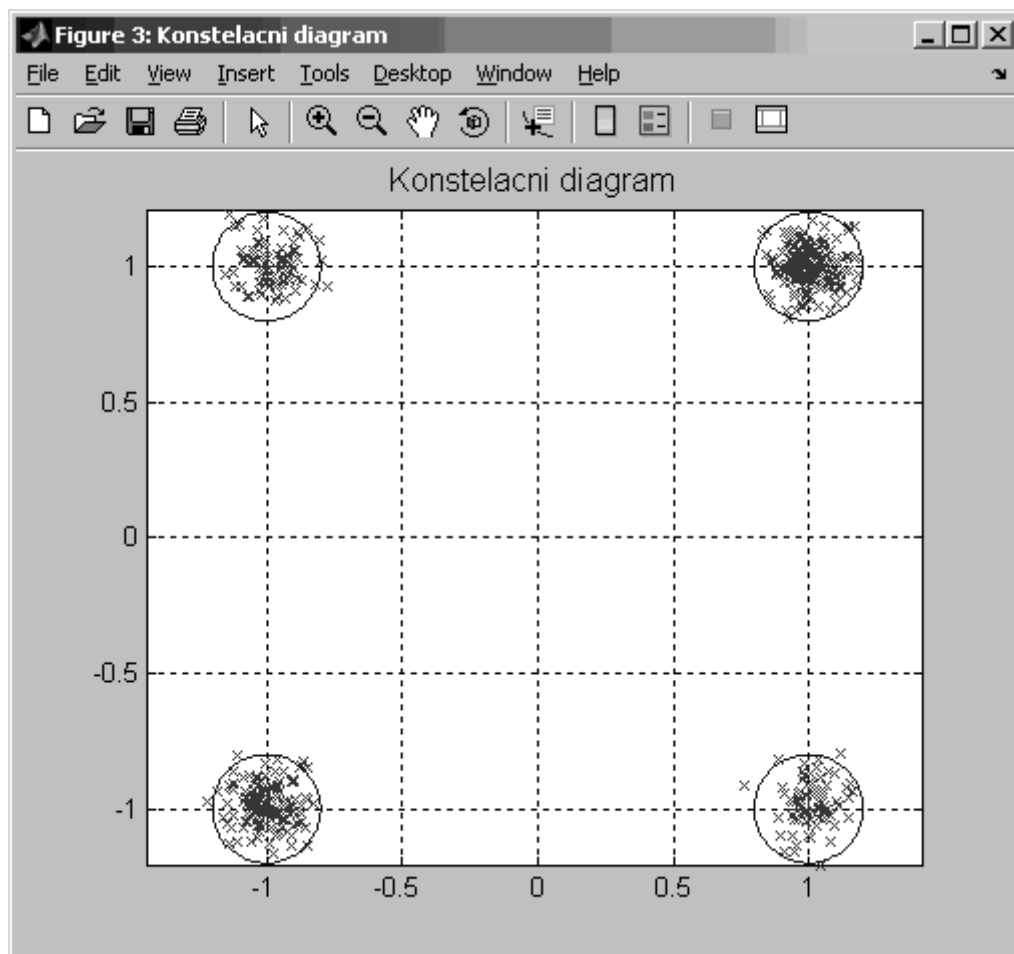


obrázek 16 - Vstupní a výstupní koeficienty

5.3 Konstelační diagram

Konstelační diagram umožňuje přehledně sledovat, jestli přenášené symboly leží v tolerančním pásmu pro přenos dat. K prvkům, které neleží v tomto pásmu, nejsme schopni přiřadit správnou hodnotu obnoveného symbolu. Velikost tolerančního pásma nemůžeme libovolně zvětšovat, čím blíže jsou k sobě hranice jednotlivých tolerančních pásem, tím je v praxi složitější tento přenos zaručit bez chyb.

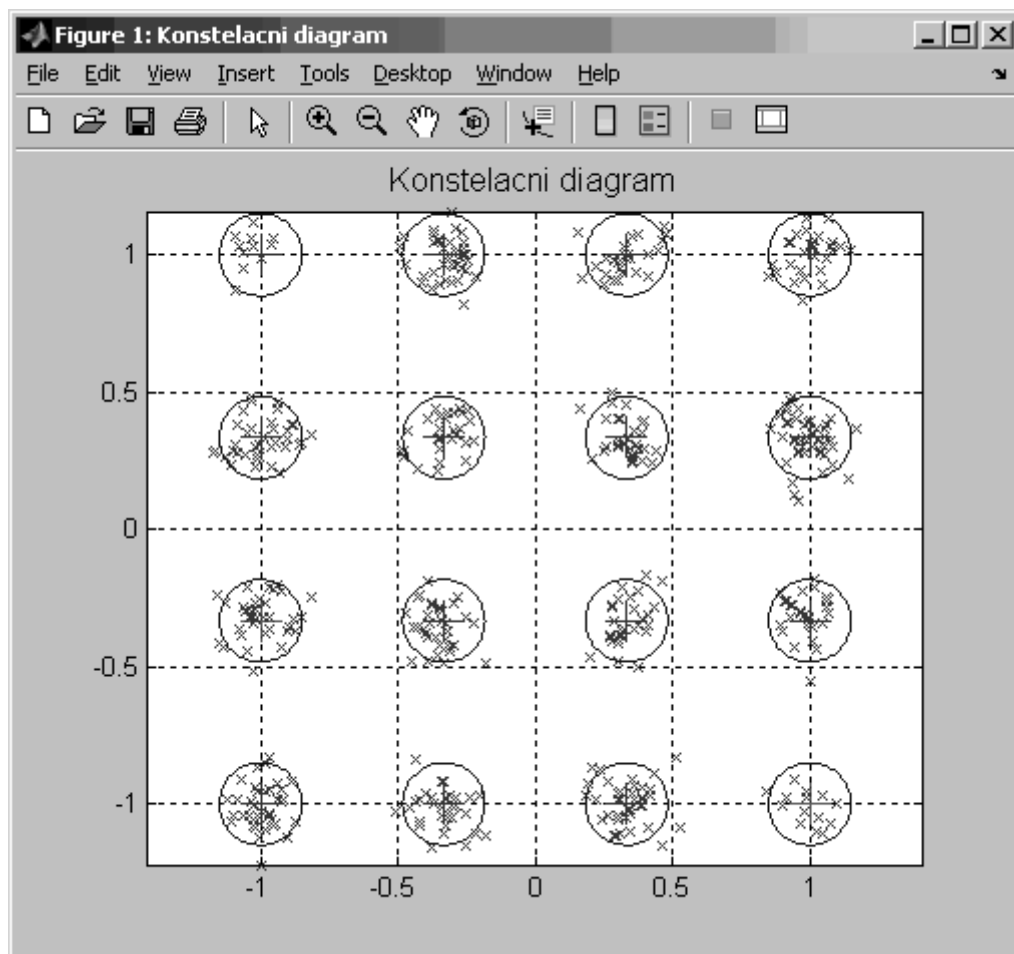
Následující obrázek ukazuje konstelační diagram při zvolené modulaci QPSK na frekvenčním pásmu 3,5GHz s nastaveným tolerančním pásmem 0,2 při nulovém pohybu přijímače vůči vysílači a úrovni signál/šum na 20dB.



obrázek 17 - Modulace QPSK

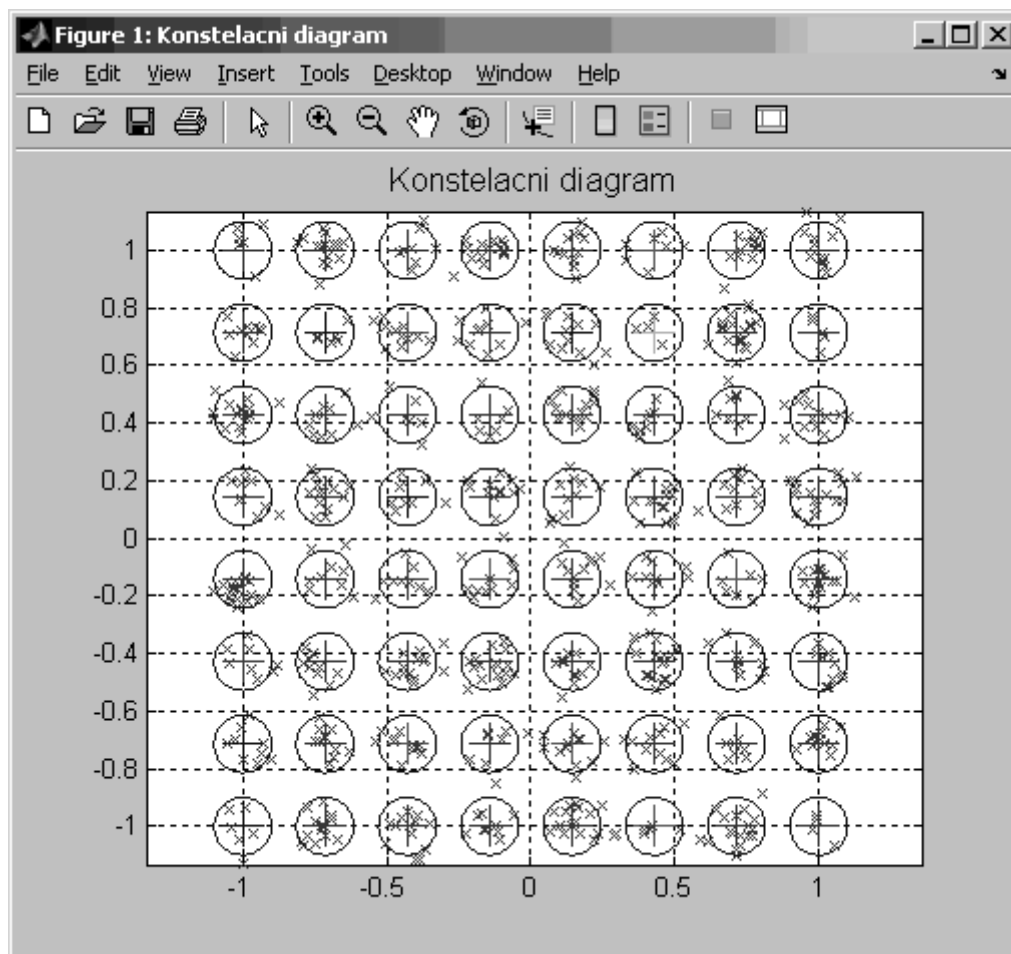
Na obrázku uvedeném níže je zvolena modulace 16QAM ve frekvenčním pásmu 3,5GHz s tolerančním pásmem 0,18 pro fixní přijímací stanici s úrovní signál/šum 20dB.

Zvyšováním počtu stavů sice šetříme frekvenční pásmo, ale zvyšuje se citlivost na šum.



obrázek 18 - Modulace 16QAM

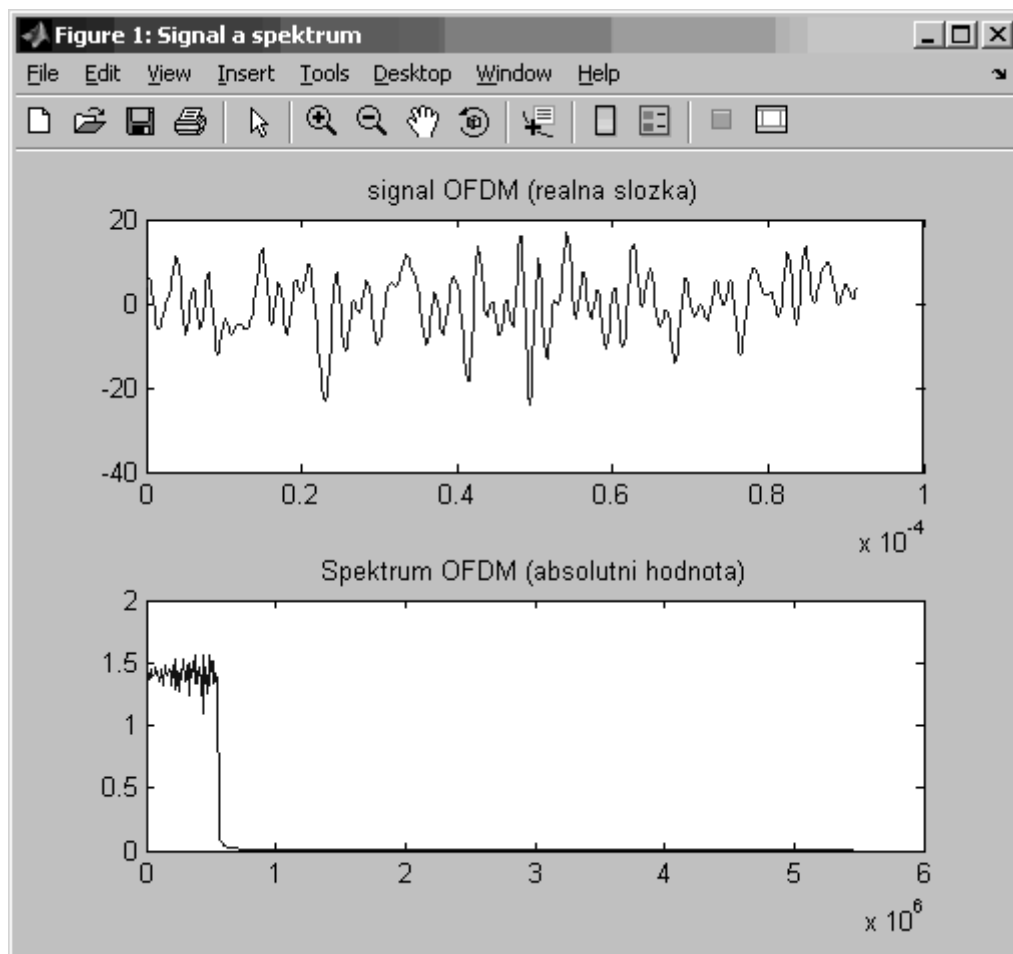
Následující diagram pro modulaci 64QAM na frekvenčním pásmu 3,5GHz s tolerančním pásmem 0,1 pro fixní přijímací stanici s úrovní signál/šum 23dB nám ukazuje, jak blízko k sobě mají sousední toleranční pásma a tím vzniká nebezpečí, že by chybný symbol mohl překonat tuto vzdálenost a padnout tak do jiného stavu, než byl na vysílači.



obrázek 19 - Modulace 64QAM

5.4 Signál a spektrum

Signál má charakter náhodného šumu, což je dáno jeho složením z mnoha desítek nebo stovek signálů multiplexu OFDM. Z takového signálu nelze bez znalosti složení signálu demodulovat žádné informace. Díky skládání signálu z mnoha dílčích signálů přenášených na jednotlivých subnosných má výsledné spektrum obdélníkový charakter s velmi ostrými hranami. Takové řešení umožňuje velmi efektivní využití celé šířky pásma, což je jednou z výhod multiplexu OFDM.



obrázek 20 - Signál a spektrum OFDM

5.5 Výkonová křivka⁹

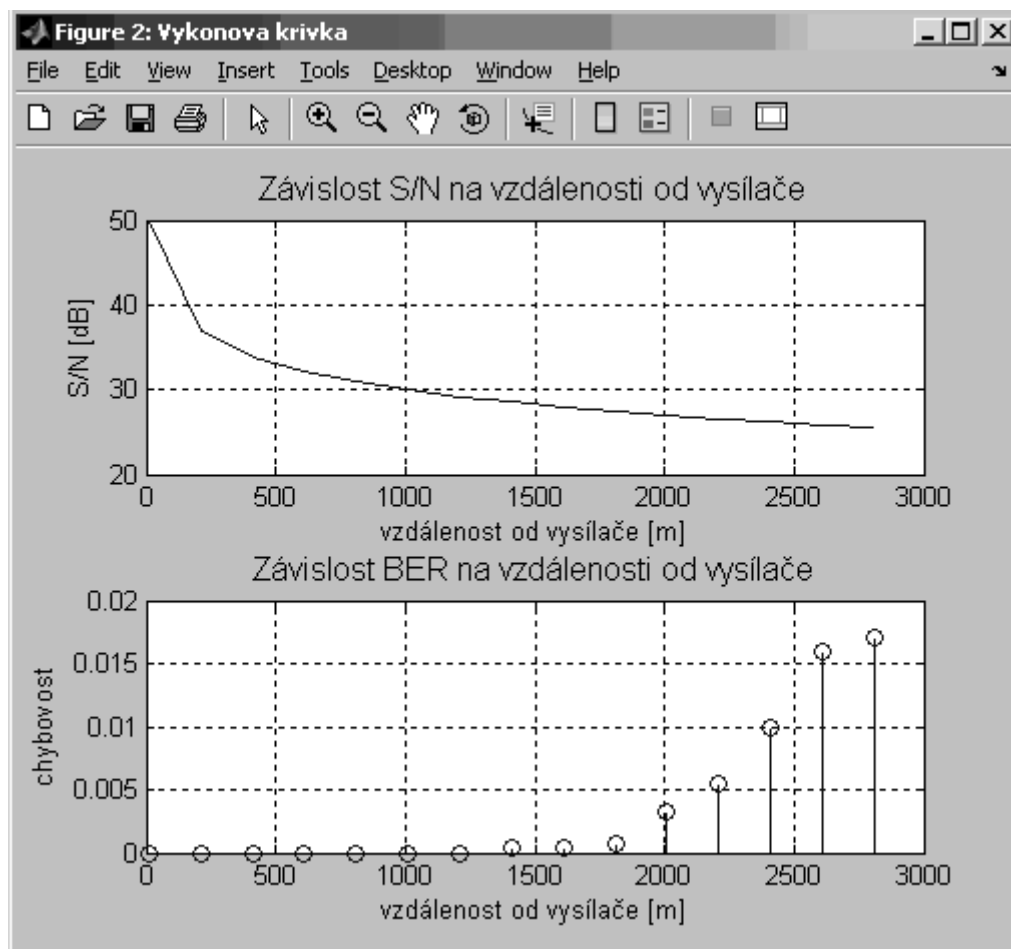
Tato funkce nám umožňuje sledovat pokles poměru signál/šum v závislosti na vzdálenosti od vysílače. Z tohoto grafu můžeme potom vysledovat, do jaké vzdálenosti je ještě reálné umisťovat přijímač, aby byl signál ještě dostatečně kvalitní pro přenos.

V horní části obrázku tedy vidíme závislost poměru signál/šum na vzdálenosti od vysílače a ve spodní části je graficky znázorněna chybovost v jednotlivých měřicích bodech (které nastavujeme intervalem).

Příklady zobrazení výkonové křivky jsem simuloval ve frekvenčním pásmu 3,5GHz a s modulací 16QAM a fixní přijímací stanicí.

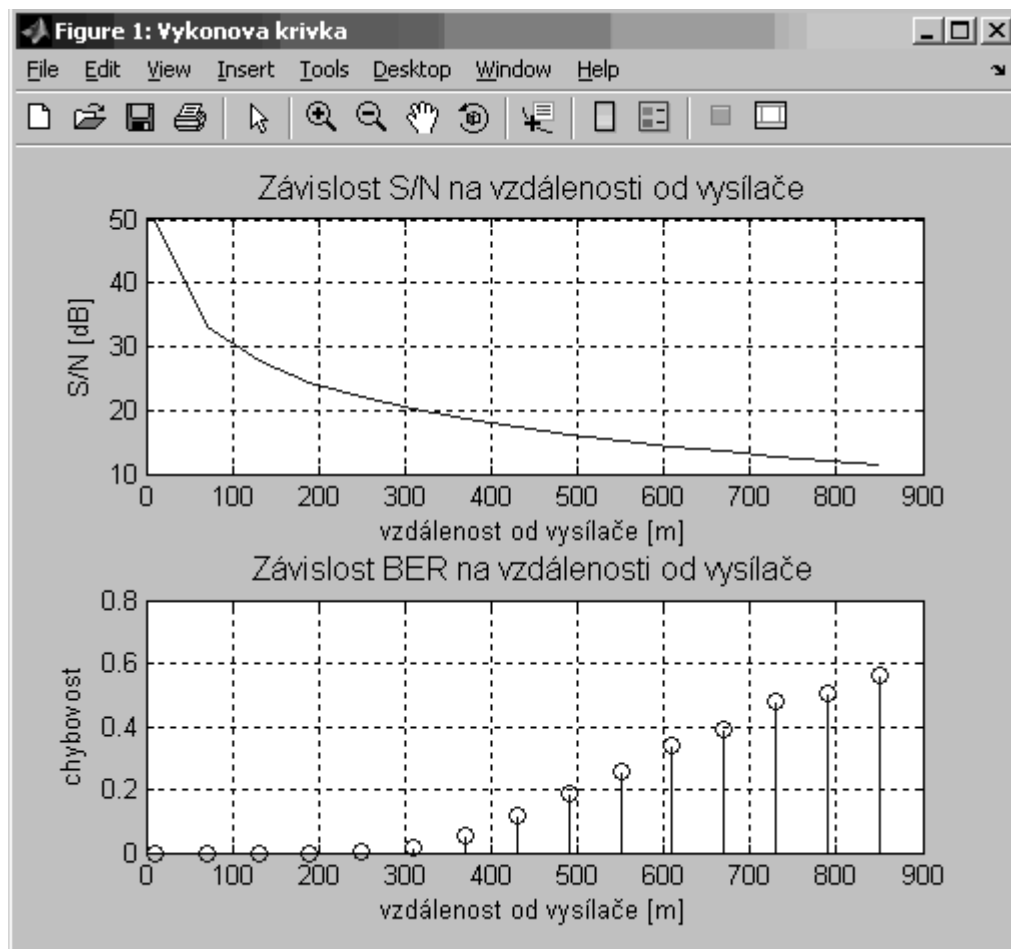
První výkonová křivka simuluje přenos ve volném prostoru. I když se vzdálenost od vysílače blíží 3km, tak je chybovost relativně nízká. Toleranční pásmo pro přenos jsem zvolil 0,11.

⁹ Informace k sestavení výkonové křivky jsem čerpal z publikace: **PECHAČ, Pavel**. Šíření vln v zástavbě



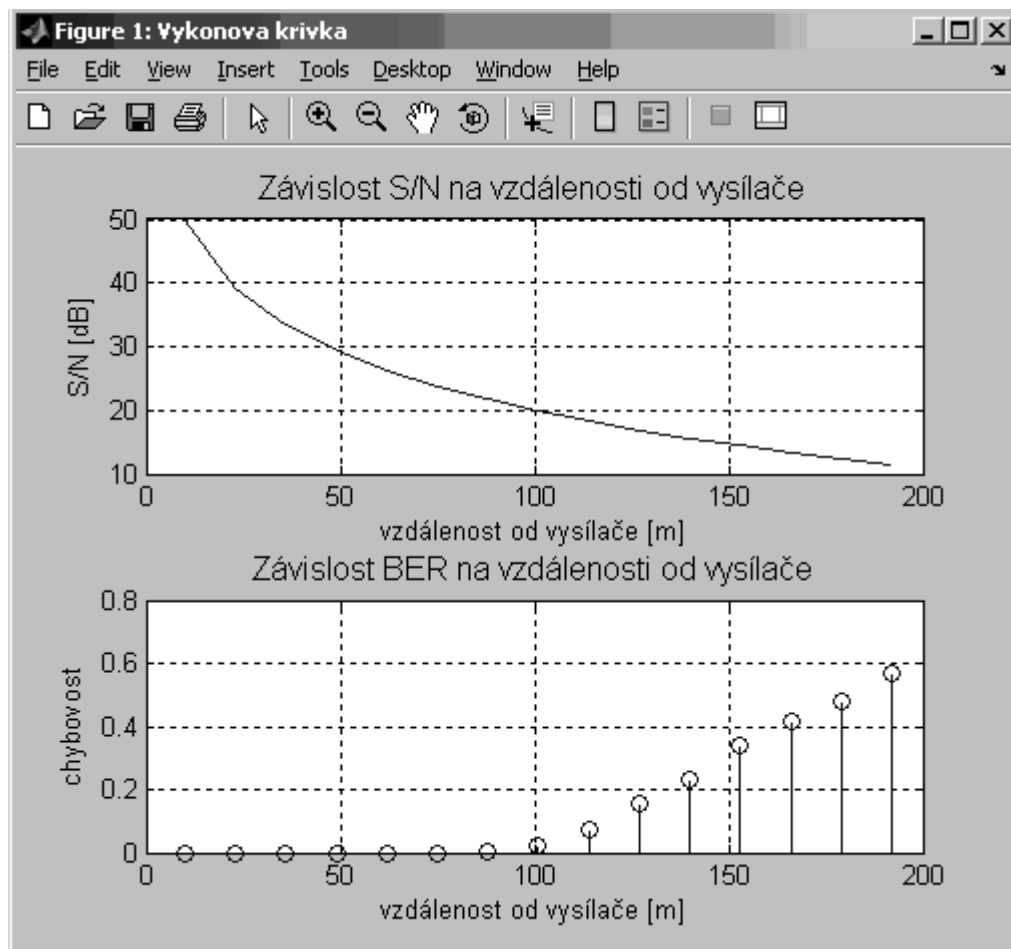
obrázek 21 - Výkonová křivka pro volný prostor

Druhá křivka znázorňuje přenos v městské zástavbě. Toleranční pásmo pro tuto variantu jsem zvolil 0,2. Je velmi patrné, jak má prostředí NLOS výrazný vliv na kvalitu přenosu, respektive na možnost vysílat na větší vzdálenosti. Už na hranici 500m vzdálenosti se chybovost blíží 0,2. Ve volném prostoru této hranice nedosahovala ani na 3km.



obrázek 22 - Výkonová křivka pro městskou zástavbu

Poslední výkonová křivka ukazuje, že v husté městské zástavbě by byl podle simulace přenos reálný cca do 150m. Toleranční pásmo jsem zvolil stejné jako v minulém případě 0,2. Již na 200m by byl každý druhý přenesený prvek chybný, což znemožňuje jakoukoliv formu navázání komunikace.

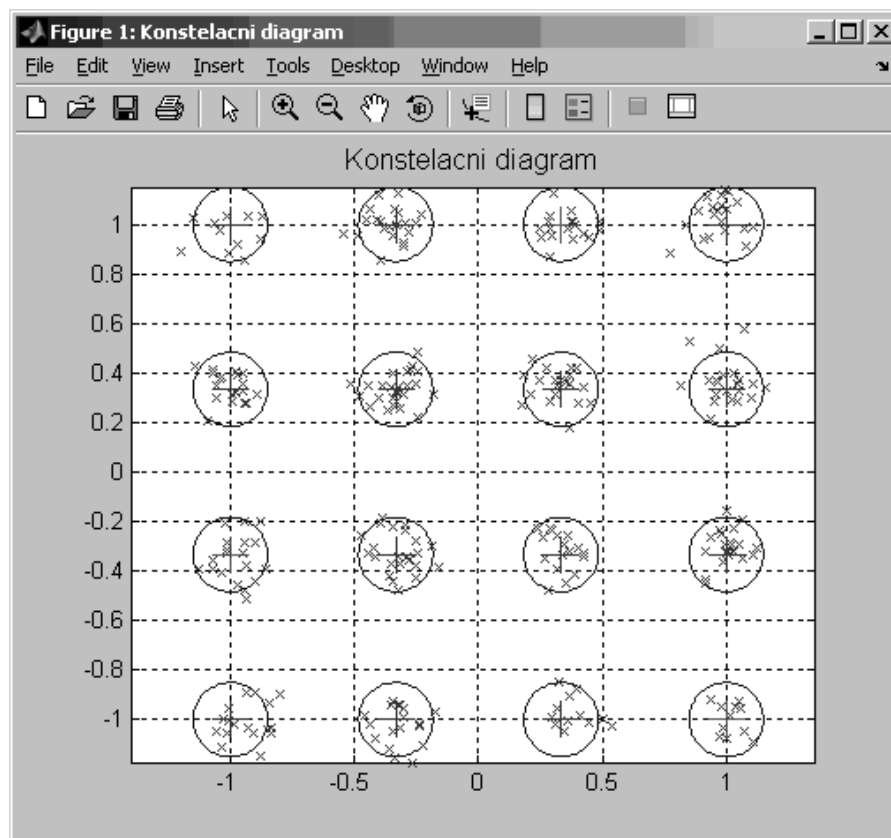


obrázek 23 - Výkonová křivka pro hustou městskou zástavbu

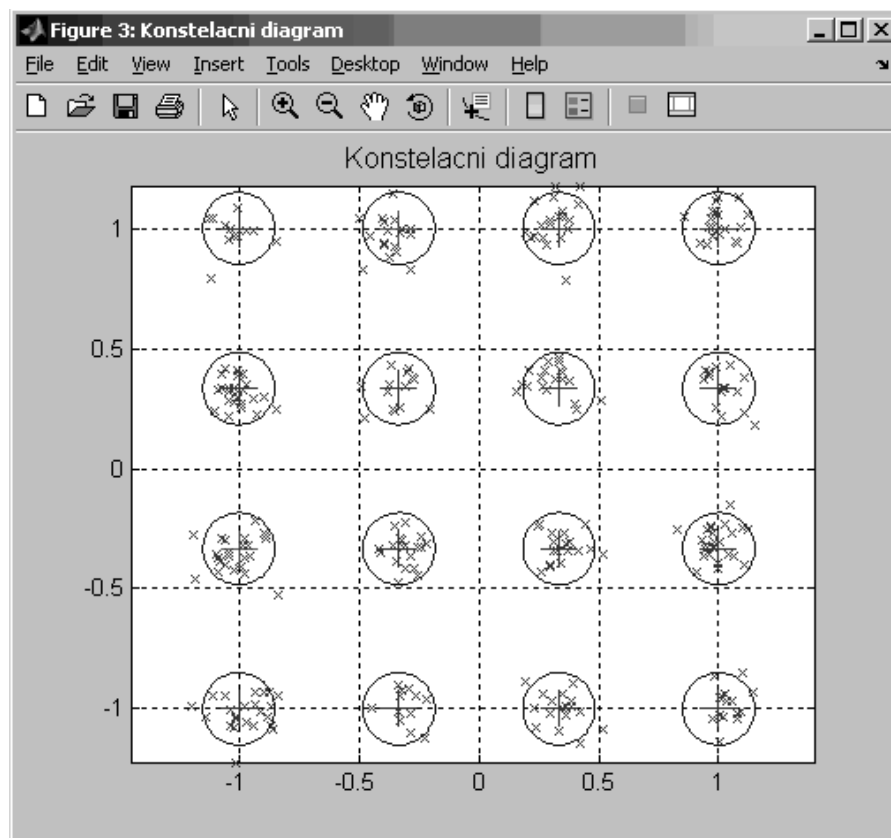
5.6 Vliv rychlosti na přenos

Pro ověření vlivu rychlosti na přenos a jeho chybovost jsem vygeneroval postupně diagramy pro různé rychlosti pohybu přijímací stanice – 50, 100, 150 a 200 km/h a ve stejném pořadí jsou i seřazeny v níže uvedeném textu. Přenos byl nasimulován ve frekvenčním pásmu 3,5 GHz za použití modulace 16QAM při poměru signál/šum 20 dB. Pro přesnější hodnoty chybovosti by bylo vhodnější použít více prvků ve více cyklech, potom by ale konstelační diagramy méně přehledné.

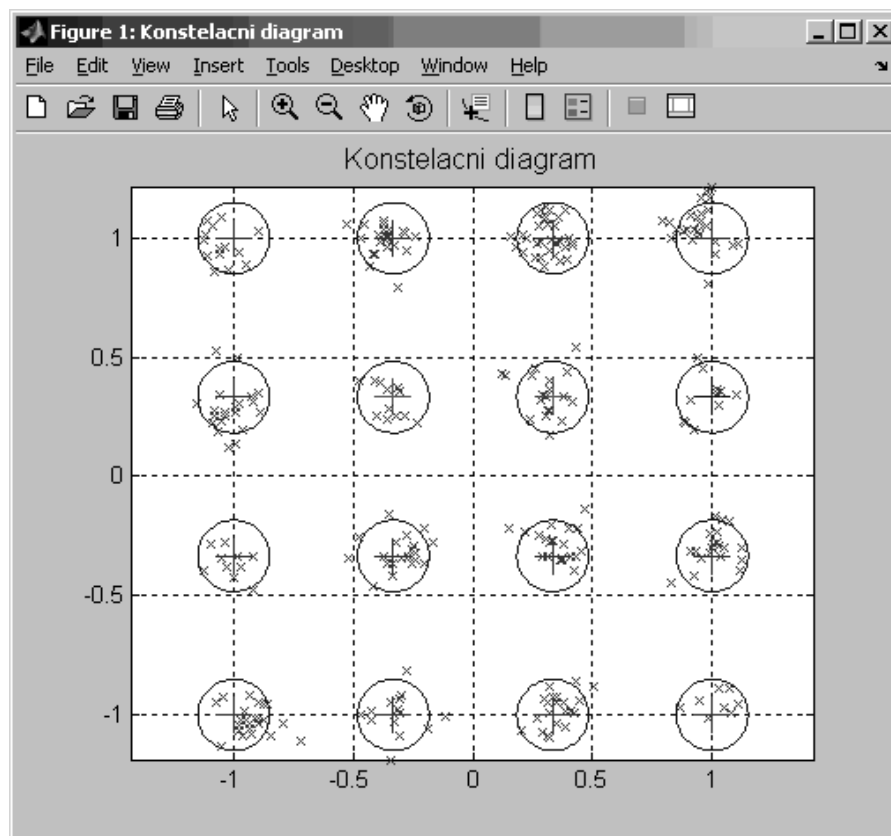
Z následujících obrázků je patrné, jak se zvyšující se rychlostí pohybu přijímače, prvky jakoby rotovaly kolem středu. Tento jev způsobuje Dopplerův posuv u kmitočtů multiplexu OFDM. U rychlosti 50 km/h to ještě není patrné, u vyšších rychlostí už lze tento jev pozorovat.



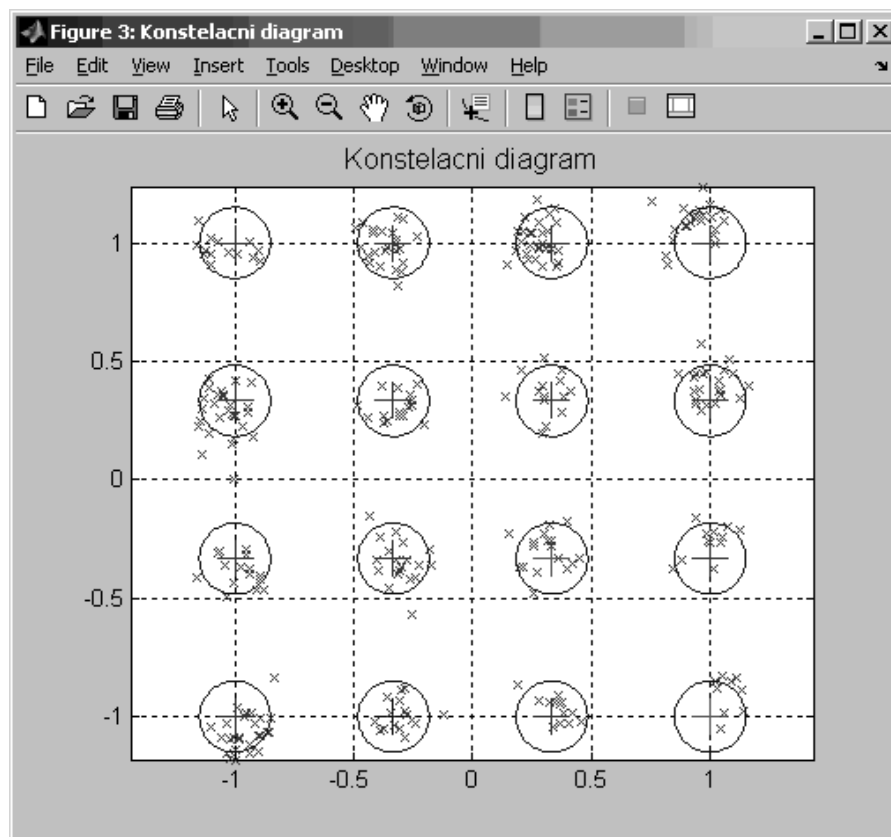
obrázek 24 - Diagram při rychlosti pohybu přijímače 50km/h



obrázek 25 - Diagram při rychlosti pohybu přijímače 100km/h



obrázek 26 - Diagram při rychlosti pohybu přijímače 150km/h



obrázek 27 - Diagram při rychlosti pohybu přijímače 200km/h

Závěr

WiMAX má potenciál k tomu, aby nahradil nebo doplnil současnou telekomunikační infrastrukturu. Jedná se o technologii, která umožňuje bezdrátové přenosy na relativně velké vzdálenosti, s velkou přenosovou rychlostí, s řízením kvality služeb, a to bez požadavku na přímou viditelnost. WiMAX umožňuje nasadit služby jako je VoIP, služby pro reálný přenos videa nebo dokonce mobilní verze WiMAXu má ambice nahradit celulární síť.

Ne že by neexistovaly systémy, které by mohly WiMAXu konkurovat. Ale když vezmeme poměr cena / výkon, tak je tato technologie velmi perspektivní. Z dosavadního vývoje v ČR zatím vyplývá, že tyto služby budou využívat převážně firmy. Předpokládaný poměr mezi rezidenčními a firemními zákazníky se očekává cca 1:9. Největší zájem bude zřejmě v oblastech, kde jsou již vyčerpány stávající přenosové kapacity, nebo v oblastech, kde je větší koncentrace smyček s nasazenou DSL technologií a kde už nastávají problémy se vzájemným ovlivňováním jednotlivých smyček mezi sebou.

Ze simulace v praktické části je patrné, že za reálných podmínek by byly vzdálenosti přenosu výrazně nižší, než garantuje teorie i poskytovatelé právě v reálném prostředí. Potvrdilo se, že vliv okolního prostředí je nejvýraznějším činitelem na kvalitu přenášeného signálu a jeho chybovost. Vliv rychlosti je také velmi patrný, výrazněji se ale projevuje až u rychlostí pohybu přijímací stanice nad 50 km/h. Při rychlostech nad 150 km/h by už chybovost byla pro přenos příliš vysoká. Dalším významným faktorem je velikost tolerančního pásma, kterou je nutné zvolit podle typu modulace tak, aby mezi jednotlivými pásmy byly dostatečné vzdálenosti a přenášené prvky nezasahovaly do sousedních stavů. Frekvenční pásmo by bylo vhodné co nejnižší, značnou roli zde ale hraje i obsazenost jednotlivých pásem dalšími službami, a proto i hledání vhodných frekvencí není jednoduchou záležitostí.

Literatura

PECHAČ, Pavel. Šíření vln v zástavbě: modely pro plánování mobilních rádiových systémů WLAN, WiFi, DECT, GSM, UMTS. 1. vydání. Praha: BEN, 2005. 108 s. ISBN 80-7300-186-1.

ANDREWS, Jeffrey G.; GHOSH, Arunabha; MUHAMED, Rias. Fundamentals of WiMAX : Understanding Broadband Wireless Networking. 1 edition. Upper Saddle River, New Jersey, USA: Prentice hall, 2007. 496 s. ISBN 0132225522.

ZICKLER, Otto. Wimax.ic.cz [online]. 2009 [cit. 2010-05-28]. Dostupné z WWW: <http://wimax.ic.cz/wimax_i.html>.

Oden Technology Czech Republic s.r.o. [online]. 2005 [cit. 2010-05-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.odn.cz/clanky.html>>.

KUŠNIR, Lev. ČVUT [online]. 2009 [cit. 2009-12-28]. ČVUT. Dostupné z WWW: <http://radio.feld.cvut.cz/personal/mikulak/MK/MK07_semestralky/wimax-zakl_prehled.pdf>.

SOVA, Miloslav. Internet pro všechny [online]. 2006 [cit. 2010-06-23]. Lesk a bída WiMAX v ČR. Dostupné z WWW: <<http://www.internetprovsechny.cz/clanek.php?cid=160>>.

KOCUR, Z.; ŠAFRÁNEK, M. Access server [online]. 3. 2. 2008 [cit. 2010-05-28]. Bezdrátové systémy v přístupové síti. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=bezdratove-systemy-v-pristupove-siti&cislocclanku=2008020002>>.

PETERKA, Jiří. LUPA [online]. 2009 [cit. 2010-06-25]. ČRa spustily v Praze WiMAX. Dostupné z WWW: <<http://www.lupa.cz/clanky/cra-spustily-v-praze-wimax/>>.