

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Využití systému WiMAX v mobilních komunikacích

Radek Špínka

Bakalářská práce

2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek ŠPINKA**
Osobní číslo: **I07541**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Využití systému WiMAX v mobilních komunikacích**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Praktická část: Sestavte rádiový spoj s technologií WiMAX, případně sestavení spoje využijte laboratorní techniku umožňující generování a příjem signálu podle standardu 802.16. Provedte měření přenosových charakteristik v závislosti na vzdálenosti od vysílače, zastínění nebo rychlosti pohybu, a to při využití různých modulačních metod. Porovnejte měřené charakteristiky s teoretickými předpoklady.

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 13.8.2010

Radek Špínka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu této bakalářské práce Ing. Zdeňku Němcovi Ph.D. za cenné rady a připomínky při zpracování práce a za odborné vedení při laboratorních měřeních.

Anotace

Bakalářská práce se v první části zabývá popisem systému pro bezdrátový přenos dat podle standardu WiMAX, jeho užitím pro mobilní komunikace a porovnáním s jinými bezdrátovými technologiemi. Druhá část je věnována simulaci přenosu pomocí přístrojů v laboratorních podmínkách a ověření vlastností používaných modulací.

Klíčová slova

WiMAX; mobilní síť; bezdrátový přenos; OFDM

Title

Application of WiMAX wireless systems for mobile communications

Annotation

Bachelor's thesis in the first part describes a system for wireless data communication based on WiMAX standard and the utilization for mobile communication and comparison with other wireless technologies. The second part deals with the laboratory simulation of data transmission to verify characteristics of the modulation techniques.

Keywords

WiMAX; mobile network; wireless communication; OFDM

Obsah

Seznam zkratk	10
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	11
Seznam příloh	11
1 Úvod	13
2 Bezdrátové technologie pro přenos dat	14
2.1 Nepohyblivé služby	15
2.1.1 Služby v bezlicenčních pásmech	15
2.1.2 Služby v licenčních pásmech	17
2.2 Pohyblivé služby	17
2.2.1 Služby v bezlicenčních pásmech	17
2.2.2 Služby v licenčních pásmech	17
2.3 Porovnání technologií	20
3 Problematika šíření signálu v pásmech WiMAX	21
3.1 Typy komunikace NLOS, LOS	21
3.2 Bezlicenční pásma 2,4 GHz, 5 GHz	22
3.3 Dopplerův jev	22
3.4 Vícecestné šíření	26
3.4.1 Ochranné intervaly	27
3.5 OFDM	27
4 Technologie WiMAX pro mobilní aplikace 802.16e	29
4.1 Přehled standardů 802.16	29
4.2 Důvody vzniku 802.16e	29
4.3 Hlavní rysy 802.16e	30
4.4 Modulační techniky, kódové poměry, dosahované přenosové rychlosti	30
4.5 Současné využití WiMAX v ČR a ve světě	31
4.6 Dostupné produkty na trhu v ČR	32
4.7 Porovnání WiMAX s mobilními službami 3G, LTE	32
5 Rádiový spoj WiMAX	33
5.1 Obecný rádiový spoj (postavený z dostupných zařízení na trhu)	33
5.2 Generování a příjem signálu (v laboratorních podmínkách)	33

5.2.1	Popis měřicího pracoviště včetně detailnějšího popisu přístrojů	33
5.2.2	Testované modulace a kódové poměry.....	34
5.2.3	Simulace datové komunikace.....	37
5.2.4	Demodulace signálu.....	41
5.2.5	Možnosti simulace pohybu přijímače	42
5.3	Porovnání měřených charakteristik s teoretickými předpoklady.....	42
6	Závěr.....	44
	Použitá literatura	45
	Příloha – Vybrané záznamy z měření	48

Seznam zkratek

ARQ	Automatic Repeat reQuest
BPSK	Binary Phase Shift-Keying
CDMA	Code Division Multiple Access
DCS	Digital Cellular System
EDGE	Enhanced Data for GSM Evolution
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
GI	Guard Interval
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ČTÚ	Český Telekomunikační Úřad
ITU	International Telecommunication Union
IETF	Internet Engineering Task Force
LOS	Line Of Sight
LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
MAN	Metropolitan Area Network
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
NLOS	Non Line Of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PCS	Personal Communication System
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift-Keying
RFID	Radio Frequency Identification
RSSI	Received Signal Strength Indication
SISO	Single-Input Single-Output
SNR	Signal to Noise Ratio
SOFDM	Scalable Orthogonal Frequency Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WATM	Wireless Asynchronous Transfer Mode
WAVE	Wireless Access in Vehicular Environments

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Určení zastínění 1. Fresnelovy zóny.....	22
Obrázek 2 – Zdroj vlnění v pohybu.....	24
Obrázek 3 – Pozorovatel v pohybu	25
Obrázek 4 – Pohyb pozorovatele i zdroje.....	26
Obrázek 5 – Vícecestné šíření.....	26
Obrázek 6 – Princip OFDM.....	28
Obrázek 7 – OFDM spektrum.....	28
Obrázek 8 – Pokrytí ČR WiMAXem Českých Radiokomunikací.....	31
Obrázek 9 – Ukázka produktů řady BreezeMax společnosti Alvarion.....	32
Obrázek 10 – Generátor R&S SMBV100A.....	34
Obrázek 11 – Analyzátor R&S FSV	34
Obrázek 12 – Příklad konstelačního diagramu BPSK.....	35
Obrázek 13 – Příklad konstelačního diagramu QPSK	36
Obrázek 14 – Příklad konstelačního diagramu 16QAM	36
Obrázek 15 – Příklad konstelačního diagramu 64QAM	37
Obrázek 16 – BPSK DL burst v časové oblasti	38
Obrázek 17 – BPSK DL burst ve frekvenční oblasti.....	38
Obrázek 18 – Konstelační diagram BPSK.....	39
Obrázek 19 – 64QAM DL burst v časové oblasti.....	40
Obrázek 20 – 64QAM DL burst ve frekvenční oblasti	40
Obrázek 21 – Konstelační diagram 64QAM	41
Obrázek 22 – Princip demodulace OFDM	42
Obrázek 23 – Porovnání konstelačních diagramů vytvořených pomocí softwarové simulace (nahore) a laboratorního měření pro modulaci 16QAM a SNR 8 dB	43

Seznam tabulek

tabulka 1 – Přehled standardů 802.11.....	16
tabulka 2 – Přehled technologií pro datové přenosy v mobilních sítích.....	19
tabulka 3 – Přehled standardů 802.16.....	29
tabulka 4 – Přenosové rychlosti pro různé šířky pásma	31
tabulka 5 – Funkčnost modulací při daných SNR.....	42

Seznam příloh

Příloha 1 – DL burst v časové oblasti pro modulaci QPSK a SNR 30 dB.....	48
Příloha 2 – DL burst ve frekvenční oblasti pro modulaci 16QAM a SNR 30 dB.....	48
Příloha 3 – Konstelační diagram pro modulaci 64QAM a SNR 30 dB.....	49
Příloha 4 – DL burst v časové oblasti pro modulaci BPSK a SNR 12 dB	49
Příloha 5 – DL burst ve frekvenční oblasti pro modulaci QPSK a SNR 12 dB.....	50
Příloha 6 – Konstelační diagram pro modulaci 16QAM a SNR 12 dB.....	50

Příloha 7 – DL burst v časové oblasti pro modulaci BPSK a SNR 8 dB	51
Příloha 8 – Konstelační diagram pro modulaci QPSKa SNR 8 dB	51
Příloha 9 – DL burst v časové oblasti pro modulaci 16QAM a SNR 8 dB	52
Příloha 10 – DL burst ve frekvenční oblasti pro modulaci 64QAM a SNR 8 dB.....	52

1 Úvod

Tato práce je zaměřena na analýzu bezdrátových technologií pro datové přenosy, především pak na systém WiMAX a jeho využití pro vysokorychlostní přenosy.

V první kapitole teoretické části jsou uvedeny výhody a nevýhody bezdrátového přenosu, instituce zabývající se vývojem a normalizací v oblasti telekomunikací. Dále jsou popsány bezdrátové technologie ve vybraných licenčních a bezlicenčních pásmech, jejich technická specifikace použití a vzájemné porovnání vlastností. Druhá kapitola je věnována problémům nastávajícím při šíření vlnění v daném frekvenčním pásmu. Jsou zde rozebrány typy komunikace (LOS, NLOS), důsledky přenosu v pohybu, vícecestnému šíření a možnostem eliminace chyb jím vzniklým. Dále je věnována modulační technice OFDM, kterou systém WiMAX používá.

V praktické části je rozebrána technologie 802.16 především její mobilní verze 802.16e. Jsou uvedeny důvody vzniku této technologie, technický popis, používané modulační techniky a porovnání s podobnými mobilními technologiemi. V této části se dále práce zabývá laboratorní simulací spoje. Nejprve je stručně popsána realizace a použité přístroje a dále jsou uvedeny zjištěné údaje a jejich porovnání s teoretickými předpoklady.

2 Bezdrátové technologie pro přenos dat

K přenosu rádiového signálu se používají elektromagnetické vlny. kmitočet těchto vln je volen tak, aby se co nejlépe šířily volným prostředím. Obecně se bezdrátový spoj skládá ze dvou stanic A a B, mezi kterými je veden přímý mikrovlnný paprsek, který zprostředkuje přenos digitálního signálu mezi oběma stanicemi. Digitální bezdrátové spoje pracují většinou v duplexním režimu, což znamená, že spoj současně vysílá i přijímá data a používá tedy současně dvou kmitočtových intervalů v daném kmitočtovém pásmu – jeden pro vysílání ze stanice A ke stanici B a druhý pro vysílání ze stanice B ke stanici A.¹

Vývojem a normalizací v této oblasti se zabývá IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Regulačním orgánem v České republice je ČTÚ (Český telekomunikační úřad). Další významnou institucí v této oblasti je Mezinárodní telekomunikační unie (ITU – International Telecommunication Union). ITU se dělí do 3 sekcí: Radiokomunikace (ITU-R), Normalizace v telekomunikacích (ITU-T) a Vývoj telekomunikací (ITU-D)². Základní postavení v rozvoji internetových technologií a přípravě specifikací definujících všechny internetové protokoly má IETF³ (Internet Engineering Task Force), česky Komise techniky internetu. Evropskou normalizační organizací je ETSI (European Telecommunications Standards Institute), česky Evropský institut pro normalizaci v telekomunikacích.

Bezdrátové systémy mají oproti klasické kabeláži řadu výhod, jsou jimi:

- Mobilita,
- Přístupnost do jinak nedostupných prostor nebo prostředí.

Na druhou stranu oproti kabelovým rozvodům mají bezdrátová řešení tyto nevýhody:

- Útlum vlivem prostředí – omezený dosah,
- Rušení,
- Možnost odposlechu,
- Spolehlivost,
- Vliv počasí,
- U některých aplikací nutnost přímé viditelnosti.⁴

¹ Dostupné z WWW: <<http://www.bezdratove-telekomunikace.cz/katalog-pojitek/o-radiovych-spojich/1-zaklady-technologie-rr-spoju/>>

² Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Itu>>

³ Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Internet_Engineering_Task_Force>

⁴ Dostupné z WWW: <<http://www.lupa.cz/clanky/bezdraty-vs-klasicke-pevne-linky/>>.

2.1 Nepohyblivé služby

2.1.1 Služby v bezlicenčních pásmech

Tyto služby nepožadují žádnou licenci ani pro využití v komerční sféře. Přestože se v těchto frekvenčních pásmech nepožaduje licence, ČTÚ zavádí určitou regulaci používaných zařízení. Spojení jsou budovány na základě tzv. Všeobecných oprávnění. Pro bezdrátové přenosy od 2,4 GHz až 66 GHz je vydáno všeobecné oprávnění č. VO-R/12/06.2010-9,⁵ poslední verze je z 2. června 2010. Toto oprávnění zajišťuje, že bezdrátové přenosy nebudou používat nadměrnou šířku pásma a že zařízení nebudou způsobovat rušení s jinými uživateli daného pásma prostřednictvím příliš výkonného vysílání.

802.11 – WiFi

Tato technologie je v dnešní době velmi hojně využívána. Je součástí prakticky všech přenosných počítačů. Nejčastěji je využívána pro realizaci sítí bod-multibod poskytujících internetové připojení koncovým uživatelům. Poměrně velkou nevýhodou je vzájemné rušení, obzvláště ve velkých městech.

Celosvětově existují dvě frekvenční pásma, která je možno využít k přenosu dat pomocí technologie 802.11. Pásmo na frekvenci 2,4 GHz a pásmo na frekvenci 5 GHz. Pásmo 2,4 GHz je široké od 2,4–2,4835 GHz, tedy 83,5 MHz. Pásmo na kmitočtu 5 GHz je ve skutečnosti složeno ze 3 pásem:

- 5,150–5,250 GHz (šířka 100 MHz),
- 5,250–5,350 GHz (šířka 100 MHz),
- 5,47–5,725 GHz (šířka 255 MHz).⁶

IEEE pro účely bezdrátového přenosu dat zřídil skupinu IEEE 802.11, která postupně navrhla tři základní řešení: IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g. Zařízení pracující podle těchto standardů, a dalších z nich vycházející nebo je rozšiřující bývají souhrnně označována jako WiFi. U zařízení s označením WiFi je zaručeno, že bude komunikovat i s jinými zařízeními jiných výrobců, které mají toto označení. Existuje také sdružení (WiFi aliance), které testuje kompatibilitu (slučitelnost) a interoperabilitu (schopnost vzájemné spolupráce), a pokud zařízení vyhovuje, tak je označeno značkou WiFi.

802.11 (označení bez doplňujícího písmene) je původní standard, označovaný jako bezdrátový Ethernet. Je mu vyhrazeno pásmo 2,4 GHz. Dnes se již nepoužívá.

Standardu 802.11a je vyhrazeno pásmo 5 GHz. Na fyzické vrstvě používá modulaci OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Proti 802.11b má větší povolený vyzařovací výkon, díky tomu je schopno komunikovat na větší vzdálenosti. Komunikační rychlost 802.11a je 54 Mbit/s.

IEEE 802.11b využívá pásmo 2,4 GHz. Na fyzické vrstvě používá technologii DSSS. Navyšuje rychlost v pásmu 2,4 GHz oproti původnímu standardu na 11 Mbit/s.

⁵ Dostupné z WWW: <<http://www.ctu.cz/predpisy-a-opatreni/opatreni-ctu/vseobecna-opravneni.html>>

⁶ Dostupné z WWW: <<http://www.lupa.cz/clanky/novinky-v-pasmu-24-a-5-ghz-8211-stavajici-radiosite-do-ilegality/>>

Ke standardu 802.11 bylo vydáno mnoho dodatků rozšíření. Mezi nejvíce rozšířené patří 802.11g a 802.11n. První z nich je standard rozšiřující technologii 802.11b. Je zpětně kompatibilní, vysílá ve stejném frekvenčním pásmu 2400–2485 MHz, ale maximální rychlost je 54 Mbit/s. IEEE 802.11n je standard, který si klade za cíl upravit fyzickou vrstvu a část linkové vrstvy, takzvanou MAC (Media Access Control) podvrstvu tak, aby se docílilo reálných rychlostí přes 100 Mbit/s. Zvýšení rychlosti se dosahuje použitím MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) technologie, která využívá více vysílacích a přijímacích antén.⁷

tabulka 1 – Přehled standardů 802.11

Standard	Rok vydání	Pásmo [GHz]	Maximální Rychlost [Mbit/s]	Fyzická vrstva
IEEE 802.11	1997	2,4	2	DSSS a FHSS
IEEE 802.11a	1999	5	54	OFDM
IEEE 802.11b	1999	2,4	11	DSSS
IEEE 802.11g	2003	2,4	54	OFDM
IEEE 802.11n	2009	2,4 nebo 5	600	MIMO

Maximální rychlost komunikace je pouze teoretická, jde o přenos všech bitů: datových, řídicích, opakovaných přenosů (pokud dojde ke ztrátě dat, přenos se opakuje). U efektivní rychlosti jde pouze o přenos dat, proto je efektivní rychlost podstatně nižší, udává se okolo 50–60 % maximální rychlosti.

Mikrovlnné spoje

Používají se výhradně pro spoje bod – bod na přímou viditelnost, tedy především pro páteřní spoje a firemní datové přípojky. V České republice jsou v současné době bezlicenční pásma 10 GHz, 24 GHz, 60 GHz a 80 GHz.

Je široké 10,3–10,6 GHz. Spoje jsou provozovány na sdíleném kmitočtu. V praxi to znamená, že nově instalovaný spoj je nutné nainstalovat tak, aby neomezil činnost ostatních zařízení. Dosahováno je reálné datové rychlosti v řádu desítek Mbit/s. Přenos lze uskutečnit až na vzdálenost několika desítek kilometrů.⁸

Pásmo 24 GHz má danou šířku 24–24,25 GHz. Maximální dosah udávaný výrobcí je cca 3,5 km. Přenosová rychlost se pohybuje v řádu stovek Mbit/s.⁹

Spoje bez licence lze také provozovat v pásmu 60 GHz. Vyznačují se poměrně velkou rychlostí přes 100 Mbit/s. Nevýhodou je omezený dosah maximálně 2 km. Jsou vhodné pro tzv. poslední míli.¹⁰

Pásmo 80 GHz je dáno v rozsahu 71–76/81–86 GHz. Maximální dosah je cca 10 km. Dosahováno je velmi vysoké přenosové rychlosti přes 1 Gbit/s.¹¹

⁷ Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Wifi>>

⁸ Dostupné z WWW: <<http://www.internetprovsechny.cz/clanek.php?cid=198>>

⁹ Dostupné z WWW: <<http://www.wifi-shop.cz/24ghz-spoje>>

¹⁰ Dostupné z WWW: <<http://www.i4shop.net/cz/iObchod/~i4wifi-BackBone.asp>>

2.1.2 Služby v licenčních pásmech

Pásma, ve kterých je pro provoz nutné získání licence, se nacházejí na kmitočtech 3,5 GHz, 6 GHz, 7 GHz, 11 GHz, 13 GHz, 18 GHz, 23 GHz, 38 GHz, 40 GHz. Český telekomunikační úřad, který licence v těchto pásmech spravuje a přiděluje, se tak zároveň stává garantem omezeného využití spektra pouze jediným operátorem v dané lokalitě. Díky tomu na těchto spojích nedochází k rušení a poskytovatel spoje tak může zaručit vysokou garanci a kvalitu zde nabízených datových i hlasových služeb.

2.2 Pohyblivé služby

2.2.1 Služby v bezlicenčních pásmech

Pro normu 802.11, která je navržena pro bezlicenční pásma, existují dvě rozšíření týkající se přenosu dat v pohybu, především v dopravních prostředcích. Jsou jimi 802.11r a 802.11p.

802.11r umožňuje připojení v pohybu pomocí rychlých neznatelných přechodů (tzv. handoff nebo handover) mezi jednotlivými přístupovými body. Protokol umožňuje bezdrátovému klientu vytvořit zabezpečené připojení k novému přístupovému bodu s definovanou kvalitou služeb QoS (Quality of Service) ještě před tím, než se k němu provede přechod. Díky tomu je výpadek spojení kratší než 50 ms a minimalizuje se tak výpadek aplikace. Výpadek během přechodu je příliš dlouhý k podpoře audio nebo video aplikací.¹²

802.11p neboli WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments) bude v budoucnu používán především pro komunikaci mezi dopravními prostředky. Automobilová komunikace bude hrát důležitou roli v nových automobilech a v dopravním managementu. V literatuře se označuje mnoho služeb jako komunikace Vehicle to Vehicle (V2V) nebo Vehicle to Infrastructure (V2I). K nim patří např. detekce kolize automobilu, aktuální dopravní informace, aktivní navigace, mýtné brány. Hlavním cílem této technologie ve vozidlech je zvýšení bezpečnosti cestujících a snížení vážných dopravních nehod.¹³

2.2.2 Služby v licenčních pásmech

Jedná se o datové přenosy poskytované společnostmi, které se zabývají mobilní telefoníí. Mobilní sítě jsou z hlediska historického vývoje děleny do tzv. generací.

První generace mobilních systémů

První generaci mobilních systémů lze charakterizovat jako analogové radiotelefonní mobilní systémy, které využívají na radiovém rozhraní (uživatel – síť) FDMA (Frequency Division Multiple Access) a modulaci FM. Příkladem těchto systémů jsou systémy FDMA (Frequency Division Multiple Access). První sítě s tímto systémem byly zprovozněny na začátku osmdesátých let. NMT systémy využívají na radiovém rozhraní frekvence v pásmu 450 nebo 900 MHz.

Druhá generace mobilních systémů

¹¹ Dostupné z WWW: <<http://www.wifi-shop.cz/kategorie-wifishopcz-80ghz-spoje>>

¹² Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11r>

¹³ Dostupné z WWW: <<http://www.cs.vsb.cz/grygarek/TPS/projekty/0708Z/80211rAp.pdf>>

Druhou generaci mobilních systémů lze charakterizovat jako digitální buňkové mobilní radiotelefonní systémy. Typickým příkladem tohoto systému je GSM (Global System for Mobile Communication). V porovnání se systémy první generace jde o pokročilejší způsob komunikace vyznačující se hlavně vyšší kapacitou systému, vysokou odolností proti odposlechu a rušení (dáno typem použité modulace a kódováním), možností jednoduché realizace mezinárodního roamingu, menšími a úspornějšími terminály, větší nabídkou funkcí, větší kompatibilitou s pozemními i družicovými systémy. Systémy GSM se ve světě používají od roku 1992.

Pro GSM se využívá různých frekvenčních pásem 900, 1800, 1900 MHz a podle používaného pásma se často hovoří o GSM900, GSM1800 (někdy nazýváno DCS 1800 – Digital Cellular System), GSM1900 (někdy nazýváno PCS 1900 – Personal Communication System). Nejdříve bylo navrženo GSM900, poté bylo ve Velké Británii modifikováno na GSM1800 – důvodem bylo umožnit vstup dalšího provozovatele na trh (nedostatek frekvencí v původním pásmu). GSM1900 je nejmladší odnož, která vznikla v USA, protože toto pásmo bylo v USA volné a tudíž potenciálně lehce využitelné. V GSM se na radiovém rozhraní používá pro každý rádiový kanál krom frekvenčního i časové dělení a princip TDMA (Time Division Multiple Access). Tento princip se nazývá “TDMA over FDMA“. V TDMA rámci se přenáší kromě užitečných dat od několika uživatelů také řídicí informace.

Z hlediska přenosu dat je na tom druhá generace mnohem lépe než první generace. Druhá generace používá již z principu pro přenos hlasu v celé síti digitální tvar signálu. Základní rychlost mezi mobilní stanicí a sítí je 13 kbit/s obousměrně. Tento kanál lze bez větších potíží užít pro přenos dat, běžně rychlostí 9,6 kbit/s.

Rozšíření druhé generace mobilních systémů

Dále se často hovoří o dvouapůlté generaci, tedy vylepšených mobilních systémech druhé generace. Tyto systémy jsou charakteristické digitálním přenosem signálu v rámci celé sítě s možností vyšších přenosových rychlostí než 9,6 kbit/s a případně využitím paketového způsobu přenosu GPRS (General Packet Radio Service). Zavádí do prostředí mobilních systémů IP protokol s přímým standardizovaným připojením do Internetu teoreticky až rychlostí 192 kbit/s. Do této skupiny lze zařadit i GSM s rychlým přenosem dat pomocí přepojování okruhů HSCSD (High Speed Circuit Switched Data). HSCSD umožňuje přenosové rychlosti až 57,6 kbit/s (součet v obou směrech přenosu) zabráním více než jednoho časového intervalu (timeslotu) v rámci TDMA – v současnosti maximálně čtyři časové intervaly rozdělené asymetricky na tři směrem k mobilnímu terminálu a jeden směrem od terminálu k základnové stanici 3+1 nebo symetricky 2+2. Přepojování okruhů je vhodné tam, kde je potřebný souvislý tok dat.

Další zvyšování přenosových rychlostí je možné použitím systému EDGE (Enhanced Data for GSM Evolution). Tato technologie představuje konečný vývoj datových komunikací uvnitř standardu GSM. V porovnání s konvenčním GSM je zde použit jiný druh modulace (8 PSK – Phase Shift-Keying). Celkové bitová rychlost datových přenosů je maximálně 236,8 kbit/s při použití 4 timeslotů. EDGE je vhodný zejména pro provozovatele GSM sítí bez licence na síti třetí generace, kteří chtějí nabídnout poměrně rychlé datové přenosy.

Třetí generace mobilních systémů

Pro označení třetí generace mobilních systémů se používá zkratka UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Jde o systémy, které pracují v pásmu okolo 2 GHz a které sjednotily různé bezdrátové přístupové technologie do jedné pružné a výkonné infrastruktury schopné nabídnout široký rozsah multimediálních služeb s garantovanou kvalitou. V praxi to znamená plnou mezinárodní interoperabilitu a přístup k pokročilým službám, jako jsou např. videokonference a datové přenosy 384 kbit/s s plnou mobilitou (v dopravních prostředcích do 120 km/hod) a až 2 Mbit/s s omezenou mobilitou (pohyb chůzí méně než 10 km/hod).

Systém třetí generace UMTS by měl podporovat všechny služby zamýšlené pro pevné širokopásmové sítě (B-ISDN). Na rozhraní mezi mobilní stanicí a sítí využívá pro přenos dat principu CDMA (Code Division Multiple Access). Jedná se o metodu, kde je možné celé frekvenční pásmo ve stejném čase sdílet více účastníky pomocí kódového dělení. Účastníci komunikují se sítí za využití WATM (Wireless Asynchronous Transfer Mode), které umožňuje garantovat požadovanou kvalitu služby. Zajímavá vlastnost UMTS je také to, že jako první systém umožňuje mezinárodní handover. Z původního standardu UMTS R99 nebo také R3 byla postupně tato technologie vylepšována. Významnější změny přinesl až standard R5 a sice technologii HSDPA (High Speed Downlink Packet Access), která výrazným způsobem zvýšila rychlost datových přenosů směrem k uživateli. R6 pak přinesl zrychlení datových přenosů směrem od uživatele do sítě shrnuté pod název HSUPA (High Speed Uplink Packet Access). R7 pak přichází s technologií HSPA+, kde ono „+“ označuje nárůst přenosových rychlostí na dvojnásobek oproti HSPA. Zatím posledním schváleným standardem UMTS je R8. Ten přináší tolik významných změn, že se marketingová oddělení rozhodla už těmito sítím neříkat UMTS, nýbrž LTE (Long Term Evolution). LTE je také označováno jako mobilní síť 4. generace.¹⁴

tabulka 2 – Přehled technologií pro datové přenosy v mobilních sítích¹⁵

Technologie		Uvedení do provozu	Maximální přenosová rychlost [kbit/s]	
GSM		1992	9,6	
HSCSD		1999	57,4	
GPRS		2000	192	
EDGE		2001	384	
UMTS	UMTS R99		1999	384
	R5 (HSDPA)		2002	3600 (na celou buňku)
	R6	HSDPA	2004	14 400 (na celou buňku)
		HSUPA		5760(na celou buňku)
	R7 (HSPA+)	HSDPA	2007	28800(na celou buňku)
		HSUPA		11500(na celou buňku)

¹⁴ Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072801>>

¹⁵ Dostupné z WWW: <<http://www.businessvize.cz/datove-prenosy-a-site/jak-se-vyznat-v-mobilnich-datovych-sitich-umts-hsdpa-hsupa-hspa-lte>>

2.3 Porovnání technologií

Technologie	Použité modulace (technologie)	Druh komunikace	Mobilita	Dosah vysílače
802.11	FSSS, DSSS	TDD	Nízká	Desítky metrů
802.11a	OFDM	TDD	Nízká	Desítky metrů
802.11b	DSSS	TDD	Nízká	Desítky metrů
802.11g	OFDM	TDD	Nízká	Desítky metrů
802.11n	OFDM, MIMO	TDD	Nízká	Desítky metrů
GSM	GSMK	FDD	Vysoká	Desítky metrů až 17,5 km
UMTS	CDMA	FDD, TDD	Vysoká	1 až 2 km

3 Problematika šíření signálu v pásmech WiMAX

Důležitým parametrem, který určuje dosah spoje, je přijímaná úroveň signálu (RSSI – Received Signal Strength Indication) a odstup signálu od šumu (SNR – Signal to Noise Ratio). S každou překážkou v cestě se útlum rádiového spoje výrazně zvyšuje, čímž jako důsledek klesá úroveň přijímaného signálu. Pokud se v dosahu přijímače na stejné frekvenci vyskytnou i jiná zařízení, zvyšuje se úroveň šumu, a tím klesá odstup signálu od šumu. Pokud je vysílač společně s přijímačem umístěn venku a mezi nimi se nenachází žádná překážka ani hydrometeory (déšť, sníh, rosa, mlha, atd.), které by způsobovaly útlum je možné brát v úvahu pouze útlum volného prostředí. Jakmile se však mezi vysílačem a přijímačem vyskytne překážka (zeď, člověk, zeleň), útlum silně vzroste, a dosah signálu se sníží.¹⁶ Útlum volným prostředím v dB je dán vztahem:

$$L_0 = 20 \log \frac{4\pi d}{\lambda}$$

kde λ – je vlnová délka,

d – je vzdálenost mezi vysílací a přijímací anténou.

3.1 Typy komunikace NLOS, LOS¹⁷

Základní variantou šíření přizemní prostorové vlny je spoj na přímou viditelnost mezi dvěma anténami, kdy přímá spojnice mezi anténami není zastíněna. Anglicky se takové spojení označuje jako LOS (Line Of Sight) – typickou aplikací je spoj bod – bod spojující dvě pozemní rádiové stanice. Analogicky případ NLOS (Non Line Of Sight) spoje nastává při zastínění této spojnice.

Pro systémy NLOS je důležité znát tzv. Fresnelovu zónu, která určuje oblast tvaru elipsoidu mezi dvěma anténami, ve které je přenášeno 90 % celkové energie signálu. Fresnelových zón je několik, ale pro bezdrátové systémy je nejdůležitější 1. Fresnelova zóna. Jakmile něco zasáhne do Fresnelovy zóny, dojde na straně přijímače k rapidnímu poklesu úrovně přijímaného signálu. Poloměr 1. Fresnelovy zóny je dán vztahem:

$$b_1 = \sqrt{\frac{d_1 d_2 \lambda}{d_1 + d_2}}$$

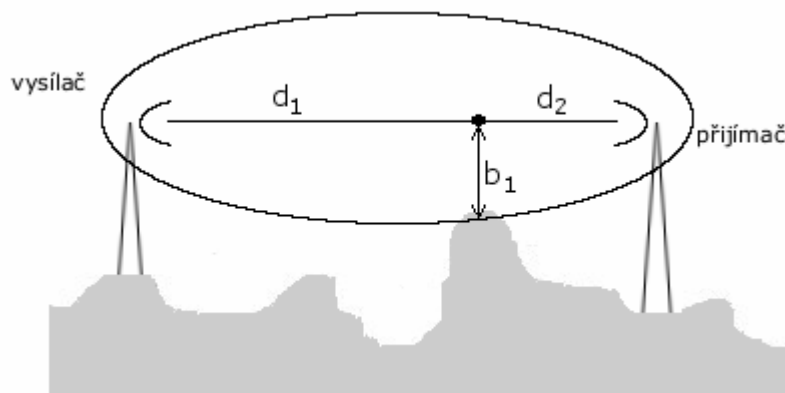
kde λ – je vlnová délka,

d_2 – je vzdálenost místa, pro které počítáme poloměr Fresnelovy zóny, od druhé antény.

Je zřejmé, že poloměr Fresnelovy zóny je největší uprostřed spoje, stoupá s délkou spoje a vlnovou délkou. Při zastínění 0,6 poloměru 1. Fresnelovy zóny je úroveň signálu přijímaná za překážkou stejná jako v případě šíření bez zastínění.

¹⁶ Dostupné z WWW: <www.comtel.cz/files/download.php?id=2803>

¹⁷ PECHÁČ, Pavel ; ZVÁNOVEC, Stanislav. *Základy šíření pro plánování pozemních rádiových spojů.*



Obrázek 1 – Určení zastínění 1. Fresnelovy zóny

3.2 Bezlicenční pásma 2,4 GHz, 5 GHz

Největší problém z hlediska útlumu pro vlny v těchto pásmech tvoří molekuly vody. Především pokud se mezi vysílačem a přijímačem nachází mokřý listnatý strom, významně se zhorší útlumové parametry celého systému. Podobně působí i lidské tělo, které z větší části obsahuje právě vodu. Molekuly vody samostatně způsobují jen nepatrné výchylky signálu, projevují se hlavně na větší vzdálenosti a výrazněji až na kmitočtech přesahujících 5 GHz.¹⁸

V pásmu 2,4 GHz způsobí prudký déšť (100 mm³/hod) pokles signálu o 0,05 dB/km, běžný déšť pak pokles o 0,02 dB/km. V pásmu 5 GHz je to pro prudký déšť 0,5 dB/km, pro běžný déšť 0,07 dB/km.¹⁹

Bezlicenční pásmo 2,4 GHz je kromě technologií založených na standardu 802.11 využíváno i jinými technologiemi. Jednou z nich je technologie Bluetooth (IEEE 802.15.1), ta slouží k bezdrátovému propojení mezi dvěma a více elektronickými zařízeními, jakými jsou například mobilní telefon, osobní počítač nebo náhlavní souprava, na velmi krátké vzdálenosti. Další z nich je Zigbee (IEEE 802.15.4), technologie svými parametry podobná Bluetooth, ale její primární určení je do aplikací v průmyslu a senzorových sítích. RFID (Radio Frequency Identification) také pracuje mimo jiné v pásmu 2,4 GHz, je navrženo pro bezdrátovou identifikaci zboží, navazuje na systém čárových kódů. Dále jsou v tom to pásmu realizovány rádiové přenosy pro dálkově řízené modely.

Bezlicenční pásmo 5 GHz je využíváno z pohledu datové komunikace výhradně technologiemi, které vychází ze standardů 802.11 a 802.16.

3.3 Dopplerův jev²⁰

Dopplerův jev udává změnu pozorované vlnové délky či frekvence elektromagnetických vln, vznikající vzájemným pohybem zdroje a pozorovatele, vztahovanému vůči prostředí, které tyto vlny přenáší. Tento jev lze popsat třemi způsoby vzájemného pohybu zdroje a pozorovatele:

¹⁸ Dostupné z WWW: <www.comtel.cz/files/download.php?id=2803>

¹⁹ Dostupné z WWW: <www.comtel.cz/files/download.php?id=2229>

²⁰ Dostupné z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=175>>

- zdroj vlnění v pohybu,
- pozorovatel v pohybu,
- zdroj i pozorovatel v pohybu.

Uvažujeme kolineární pohyb zdroje a pozorovatele, tedy pohyb po přímce spojující zdroj a pozorovatele před počátkem pohybu.

Zdroj vlnění v pohybu

Uvažujme zdroj vlnění, který se pohybuje směrem k pozorovateli rychlostí o velikosti v a který vysílá vlnění s periodou T . Vlnění se šíří prostředím rychlostí o velikosti v_z . Za dobu jedné periody se zdroj přiblíží k pozorovateli o vzdálenost vT . Čas jedné periody vlnění tedy klesne o $t = \frac{vT}{v_z}$.

Perioda vlnění měřená pozorovatelem, proto je:

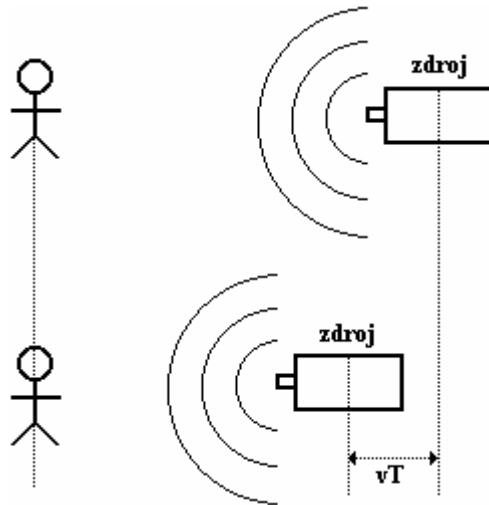
$$T_p = T - \frac{vT}{v_z} = \frac{v_z - v}{v_z} T.$$

Uvědomíme-li si, že platí $f = \frac{1}{T}$, lze pro frekvenci měřenou pozorovatelem psát:

$$f_p = \frac{v_z}{v_z - v} f.$$

Bude-li velikost rychlosti zdroje vlnění větší nebo rovna velikosti rychlosti vlnění v daném prostředí, k pozorovateli nedorazí žádná vlna šířící se směrem dopředu (z hlediska zdroje). Pozorovatel zachytí vlnění až poté, co pozorovatele mine zdroj vlnění. Zdroj se v tom případě už bude od pozorovatele vzdalovat. Tuto situaci lze ale popsat analogicky. Pro frekvenci, kterou naměří pozorovatel, od něhož se zdroj vzdaluje rychlostí o velikosti v , platí:

$$f_p = \frac{v_z}{v_z + v} f.$$



Obrázek 2 – Zdroj vlnění v pohybu

Pozorovatel v pohybu

Předpokládejme, že se pozorovatel pohybuje rychlostí o velikosti v_p směrem k nehybnému zdroji vlnění. Zdroj vysílá vlnění s periodou T , pozorovatel jej přijímá s periodou T_p . Mezi vysláním vrcholů dvou po sobě jdoucích vln ze zdroje, uplyne čas T . Pozorovatel tyto dva vrcholy přijme v časovém odstupu T_p , přičemž se mezitím posune ke zdroji o vzdálenost $v_p T_p$. Čas mezi přijetím druhého vrcholu vlny se proto pro pozorovatele sníží o hodnotu $\frac{v_p T_p}{v_z}$. Pro hledanou periodu T_p měřenou pozorovatelem, lze psát:

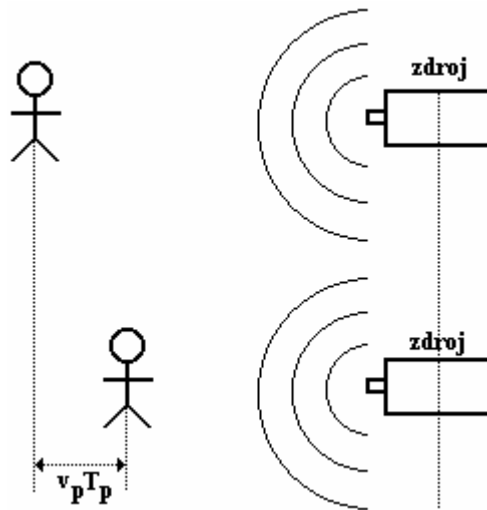
$$T_p = T - \frac{v_p T_p}{v_z} = \frac{v_z}{v_z + v_p} T.$$

Mezi příslušnými frekvencemi pak platí vztah:

$$f_p = \frac{v_z + v_p}{v_z} f.$$

Obdobným způsobem lze postupovat při odvozování vztahu pro frekvenci, kterou naměří pozorovatel pohybující se směrem od zdroje. Pro příslušné frekvence bude platit vztah:

$$f_p = \frac{v_z - v_p}{v_z} f$$



Obrázek 3 – Pozorovatel v pohybu

Pohyb pozorovatele i zdroje

V praxi může nastat i situace, kdy se pohybuje jak pozorovatel (rychlostí o velikosti v_p), tak zdroj (rychlostí o velikosti v). Uvažujme situaci, kdy se pohybují oba stejným směrem. Zdroj vysílá vlnění s periodou T , pozorovatel jej přijímá s periodou T_p . Mezi vysláním vrcholů dvou po sobě jdoucích vln ze zdroje uplyne čas T , za který se zdroj přiblíží k pozorovateli o vzdálenost vT . Tím se sníží čas, který potřebuje druhý vrchol, aby dorazil k pozorovateli, o hodnotu $\frac{vT}{v_z}$. Pozorovatel přijme tyto dva vrcholy v časovém odstupu T_p . On sám se ale mezitím od zdroje vzdálí o vzdálenost $v_p T_p$. Čas potřebný k tomu, aby druhý vrchol dospěl k pozorovateli, se zvětší o hodnotu $\frac{v_p T_p}{v_z}$. Pro periodu měřenou pozorovatelem lze tedy psát:

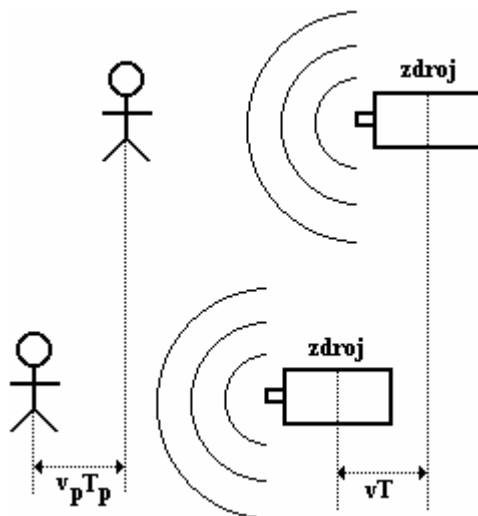
$$T_p = T - \frac{vT}{v_z} + \frac{v_p T_p}{v_z} = \frac{v_z - v}{v_z - v_p} T.$$

Pro frekvenci tedy pak dostáváme:

$$v_{fp} = \frac{v_z - v_p}{v_z - v} f.$$

Změní-li se směr rychlosti u pozorovatele resp. u zdroje vlnění, změní se odpovídajícím způsobem i frekvence:

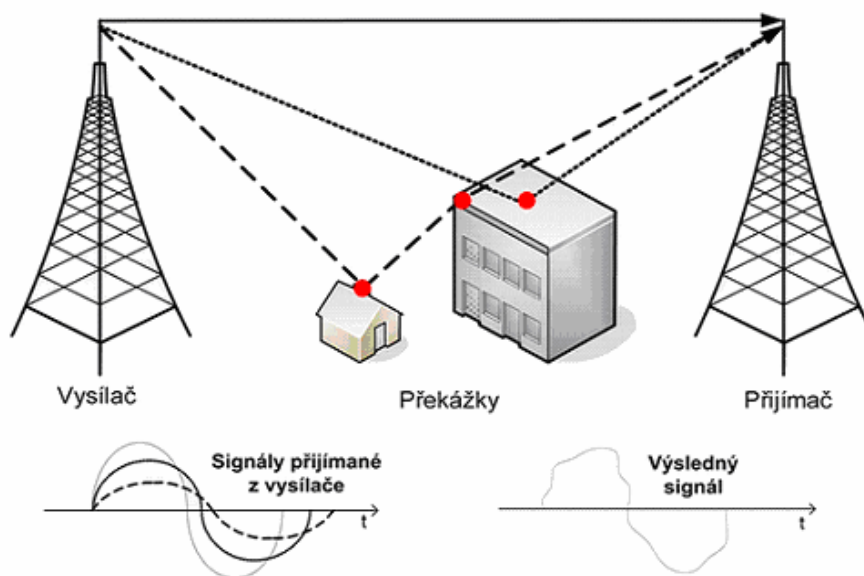
$$f_p = \frac{v_z \pm v_p}{v_z \pm v} f.$$



Obrázek 4 – Pohyb pozorovatele i zdroje

3.4 Vícecestné šíření

Díky vzájemnému působení elektromagnetické vlny s atmosférou a zemským povrchem dochází u pozemních rádiových spojů k tzv. vícecestnému šíření. Od antény vysílací k anténě přijímací se kromě přímé vlny šíří odrazem i vlna druhotná, která se s přímou vlnou sčítá. Při šíření v zástavbě může být odražených vln nekonečně mnoho. Situaci si můžeme přiblížit pomocí paprskové optiky, kdy šíření vlny aproximujeme diskretním paprskem (Obr. 5). Takto lze uvažovat pouze tehdy, je-li vlnová délka mnohem menší než všechny objekty, se kterými může vlna přijít do styku. Na cestě každého paprsku může docházet k odrazům, difracím (ohybům) či průchodům skrz překážky.



Obrázek 5 – Vícecestné šíření²¹

²¹ Dostupné z WWW: <www.comtel.cz/files/download.php?id=2229>

Vlivem vícecestného šíření vzniká tzv. mezisymbolová interference, anglicky intersymbol interference (ISI). Je to druh zkreslení, kde zpožděný signál jednoho symbolu zasahuje do symbolu následujícího. ISI lze potlačit různými způsoby, např.: adaptivní ekvalizací, kódováním nebo pomocí tzv. ochranných intervalů

3.4.1 Ochranné intervaly

Ochranný interval, anglicky Guard Interval (GI) je vlastně časové oddělení jednotlivých symbolů v kontinuálním přenosu signálu od vysílače k přijímači. Během ochranného intervalu nejsou data na přijímací straně vyhodnocována. Délka celkového symbolu je součtem délky užitečného symbolu a ochranného intervalu. Délka ochranného intervalu se udává jako poměr vůči délce trvání užitečného symbolu, tedy např. 1/4, 1/8, 1/16, 1/32. Použitím delšího ochranného intervalu se může systém lépe vyrovnat s vícecestným šířením signálu. Naopak při použití kratšího ochranného intervalu při menším očekávaném výskytu příjmu odražených signálů může přijímač přijmout silnější signál, tím se sníží počet chyb při přenosu a data mohou být přenášena rychleji.²²

3.5 OFDM

OFDM je zkratka z anglického Orthogonal Frequency Division Multiplexing, česky ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením. Systém OFDM je založen na převodu vstupního vysokorychlostního sériového datového toku na řadu pomalejších paralelních datových toků. Ty jsou poté modulovány dle přenosových podmínek (tzv. adaptivní modulace) různě robustními modulacemi QPSK, 16QAM nebo 64QAM na řadu sub-nosných vln a přenášeny k přijímači. Tam se opačným postupem demodulují a převádí na vysokorychlostní sériový datový signál.²³

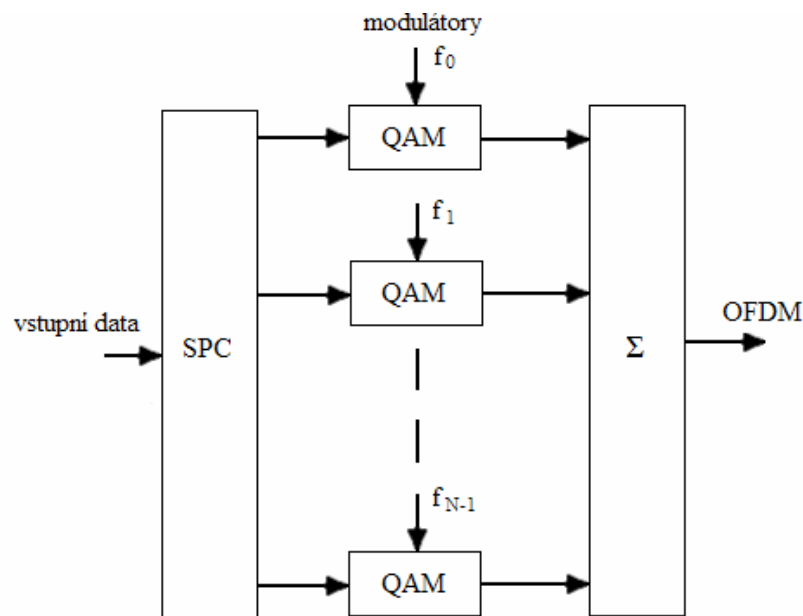
V systémech s OFDM se často používá technologie MIMO, je to multi-anténní systém používaný v oblasti bezdrátové komunikace. Výhodou jeho použití je nárůst datové propustnosti a dosahu při zachování šířky pásma a celkového výdeje vyzařovací energie. MIMO nespotřebovává více frekvenčního spektra, ale umožňuje využít stejně velké spektrum efektivněji. Právě k tomu slouží použití více antén, které musí být rozmístěny v určité konkrétní vzdálenosti od sebe. MIMO rádiová komunikace využívá vícecestné šíření k zvýšení propustnosti a dosahu nebo k snížení počtu přenosových bitových chyb, místo snahy o eliminaci efektu vícecestné propagace, o kterou se snaží tradiční SISO (Single-Input Single-Output). Podle počtu použitých antén na komunikujících zařízeních se systémy označují například jako 2×2 nebo 4×4.²⁴

Základní koncepce systému OFDM je zobrazena na Obrázku 6. Na vstup je přiveden sériový binární datový tok. Ten se v sériově paralelním převodníku SPC cyklicky dělí do většího počtu N paralelních složek. Soustava všech paralelních modulačních symbolů vytváří OFDM symbol. Jeho jednotlivé složky se modulují na soustavu N sub-nosných vln a ty jsou vysílány k přijímači.

²² Dostupné z WWW: <<http://www.digizone.cz/clanky/jednofrekvencni-site-sfn-vychodisko-z/>>

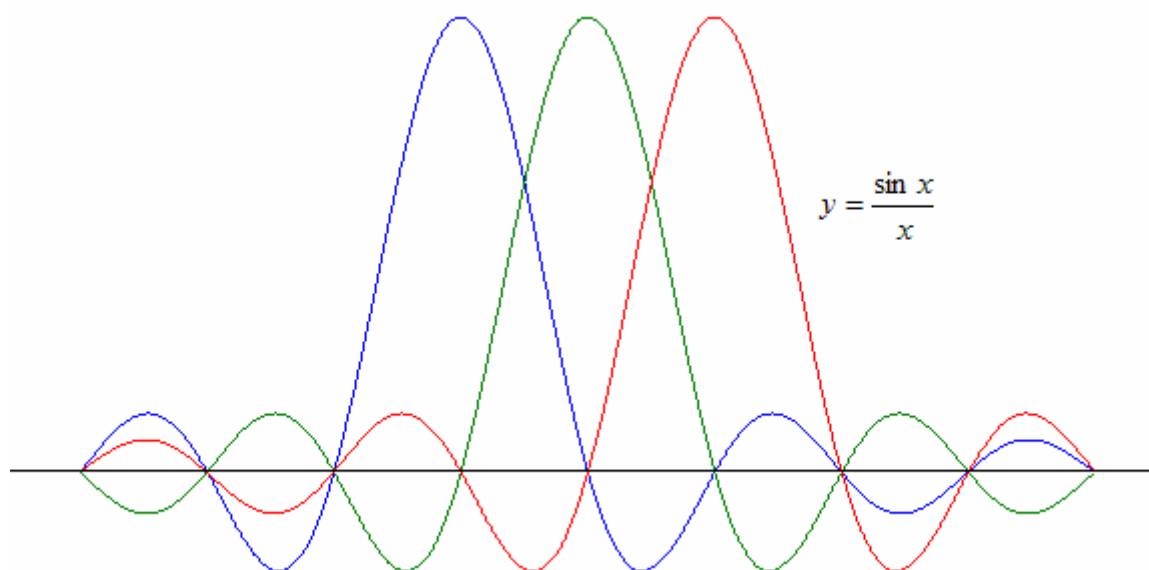
²³ Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008020002>>

²⁴ Dostupné z WWW: <<http://www.neu-mann.cz/mobilni-komunikace/mobilni-technologie/perspektivni-mobilni-technologie-mimo-hspa-lte/>>



Obrázek 6 – Princip OFDM

Spektrální účinnost OFDM systému je velmi vysoká díky částečnému překrytu sousedních sub-kanálů. Použité sub-nosné vlny vytvářejí ortogonální soustavu, a proto se tyto vlny vzájemně neovlivňují. Ukázka překrytu sub-nosných vln je na obrázku 7. Tato ortogonalita se však nedá ve skutečnosti dosáhnout realizací modulátoru podle obrázku 8. OFDM modulátor se realizuje digitálně pomocí signálového procesoru, který vykonává matematickou operaci inverzní Fourierovy transformace, která převádí signál z frekvenční oblasti (posloupnost sub-kanálů) na signál v časové oblasti (výsledný časový průběh superpozice sub-kanálů).



Obrázek 7 – OFDM spektrum

4 Technologie WiMAX pro mobilní aplikace 802.16e

4.1 Přehled standardů 802.16²⁵

WiMAX je souhrnné označení pro různé druhy technologií bezdrátových sítí, vycházející ze specifikací vypracovaných skupinou IEEE 802.16. Cílem této skupiny je nalézt univerzální celosvětově aplikovatelné řešení bezdrátové metropolitní sítě (MAN – Metropolitan Area Network).

Původní specifikace hovořily o používaných pásmech v kmitočtovém rozmezí 10–66 GHz, s průměrnými přenosovými rychlostmi 70 Mbit/s a topologií point-to-multipoint. V těchto pásmech je již jedinou možnou realizací spojení na přímou viditelnost LOS. Původní návrh, zveřejněný v roce 2001, byl ovšem záhy přepracován s dodatky ve formě specifikace 802.16a. Ta rozšířila spektrum používaných kmitočtů o pásmo 2–11 GHz, umožňující i šíření bez přímé viditelnosti NLOS a současně přidala několik nových kódovacích schémat tak, aby se nová specifikace dala sloučit s nezávisle v Evropě vyvíjeným standardem HiperMAN. Specifikaci 802.16a a následujícím se již souhrnně říká WiMAX. Verze 802.16a a dodatek 802.16c byly v roce 2004 nahrazeny přepracovanou specifikací IEEE 802.16d. Tato specifikace byla navržena s ohledem na pevné umístění vysílací a přijímací stanice (WiMAX fixed). V roce 2005 pak následovalo rozšíření o 802.16e (zvané WiMAX Mobile) umožňující rovněž pohyblivou účastnickou stanici. Na úrovni rádiového rozhraní se jednalo o použití nového schématu SOFDM (Scalable Orthogonal Frequency Division Multiplexing), které již nebylo kompatibilní s předchozí 802.16d. Ze specifikace 802.16e rovněž vychází specifikace WiBro, vyvíjená v Jižní Koreji jakožto technologie mobilního širokopásmového přístupu pro mobilní síť 3.5G.

tabulka 3 – Přehled standardů 802.16

Standard	Rok schválení	Obsah
HiperMan	2001	Specifikace ETSI pro kmitočty 2–11 GHz
802.16	2001	Původní specifikace IEEE pro kmitočty 10–66 GHz, LOS
802.16a	2003	Dodatek k původní specifikaci, rozšíření o pásmo 2–11 GHz, NLOS
802.16c	2003	Další dodatek
802.16d (802.16-2004)	2004	Přepracování původní specifikace a dodatků a, c, pouze pevné stanice
802.16e (802.16-2005)	2005	Specifikace s mobilní účastnickou stanicí, SOFDMA, nekompatibilní s 802.16-2004
Wibro	2005	Korejská specifikace vycházející z 802.16-2005 pro mobilní síť

4.2 Důvody vzniku 802.16e

Hlavním důvodem vzniku standardu 802.16e jsou nedostačující parametry dosud známých mobilních technologií (2G, 3G sítě) pro náročné mobilní aplikace. Především se jedná o přenosovou rychlost a její značný pokles se zvyšující se rychlostí pohybu na přijímací

²⁵ <http://radio.feld.cvut.cz/personal/mikulak/MK/MK06_semestralky/WiMAX-NevrlyJ.pdf>

straně. Vznik technologie pro datové přenosy ve velkých rychlostech byl v zájmu velkých dopravních společností poskytujících vlakovou dopravu.

Dalším důvodem je, že zařízení s technologií WiFi, nejsou původně určena pro budování metropolitních sítí, například kvůli problematickému řízení sdílení přístupu jednotlivých uživatelů k základnové stanici či nedostatečnému zabezpečení se systémy WEP a WPA.

4.3 Hlavní rysy 802.16e

Základem tohoto standardu je požadavek na fixní i mobilní přístup zároveň s NLOS implementací. K tomu je nutná podpora předávání účastníků mezi jednotlivými základnovými stanicemi (handover), popřípadě mezi jinými poskytovateli (roaming). 802.16e umožňuje jak řízené sdílení přístupu s garancí QoS, tak pokročilou úroveň zabezpečení. Specifikace WiMAX umožňuje přenos ve většině dosud používaných síťových technologií (Ethernet, ATM, atd.). 802.16e zahrnuje podporu mobility do rychlosti 150 km/h v lokálním až regionálním dosahu. Průměr buňky je cca 15 km. Jako koncové zařízení lze předpokládat laptop s omezenou možností napájení, takže 802.16e obsahuje možnosti pro řízení napájení a podporuje režim spánku.²⁶

4.4 Modulační techniky, kódové poměry, dosahované přenosové rychlosti

U standardu 802.16e je modulační technikou SOFDM, nebo-li škálovatelný ortogonální frekvenčně dělený multiplex. Škálovatelnost umožňuje měnit šířku pásma kanálů od 1,25MHz do 20MHz. Pro mobilní zařízení se pro zjednodušení systému používá menší šířka kanálů. Pro fixní uživatele se používá šířka větší, umožňující rychlejší přenos.

Pro zabezpečení přenosu proti chybám je použita jednak oprava chyb FEC (Forward error correction), jejímž principem je vkládání nadbytečných kontrolních bitů. Konkrétními používanými FEC technikami jsou Reed-Salomonovo kódování, konvoluční kódování a prokládání. Dále je použita technika ARQ (Automatic Repeat reQuest), která umožňuje opakované posílání dat v případě, že při jejich přenosu došlo k chybě. O tom zda se bude pro dané spojení používat ARQ se rozhoduje při vytváření spojení. Požívají se kódové poměry 1/2, 2/3, 3/4, 5/6.

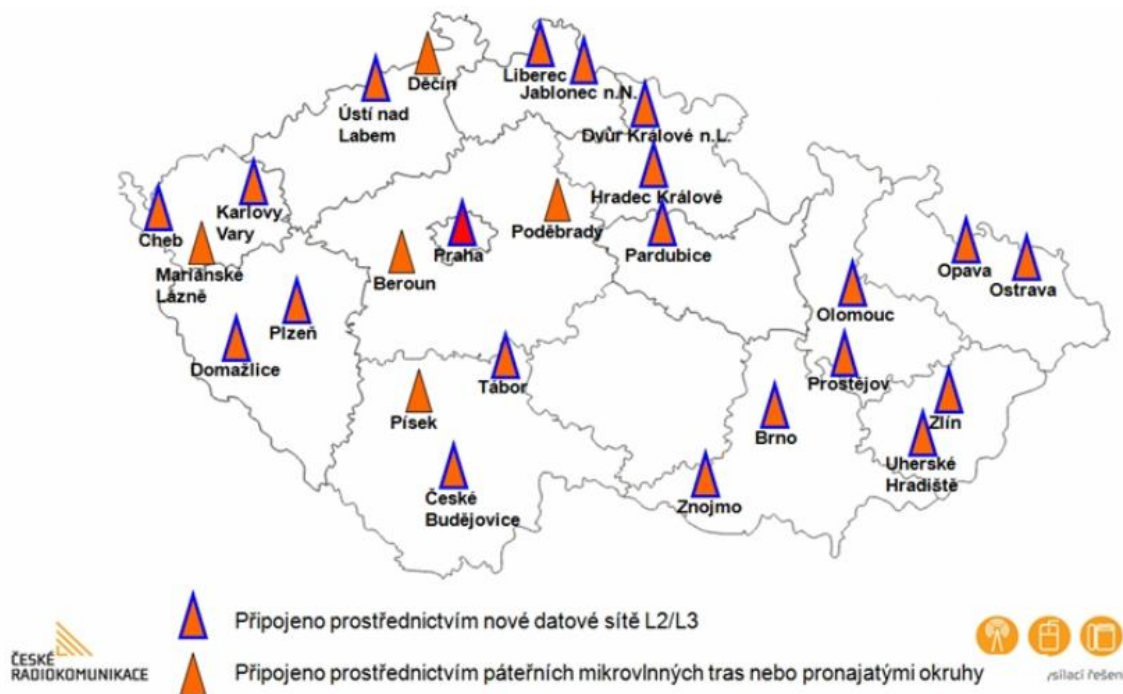
²⁶ Dostupné z WWW: <<http://www.techquark.com/2010/02/mobile-wimax-meet-80216e.html>>

tabulka 4 – Přenosové rychlosti pro různé šířky pásma²⁷

Šířka pásma [MHz]	3,5		1,25		5		10	
Modulace a kódový poměr	Přenosová rychlost [kbit/s]							
Směr komunikace	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
BPSK, 1/2	946	326	Nerealizováno					
QPSK, 1/2	1882	653	504	154	2520	653	5040	1344
QPSK, 3/4	2822	979	756	230	3780	979	7560	2016
16 QAM, 1/2	3736	1306	1008	307	5040	1306	10080	2688
16 QAM, 3/4	5645	1958	1512	461	7560	1958	15120	4032
64 QAM, 1/2	5645	1958	1512	461	7560	1958	15120	4032
64 QAM, 2/3	7526	2611	2016	614	10080	2611	20160	5376
64 QAM, 3/4	8467	2938	2268	691	11340	2938	22680	6048
64 QAM, 5/6	9408	3264	2520	768	12600	3264	25200	6720

4.5 Současné využití WiMAX v ČR a ve světě

První pilotní projekt byl v ČR spuštěn na jaře roku 2005. Postupně počet poskytovatelů rostl, v současné době jich je více než 100. Poskytovatelem s největším pokrytím WiMAXem jsou v ČR České Radiokomunikace. K 1.11.2009 byly jejich služby dostupné ve 26 městech.



Obrázek 8 – Pokrytí ČR WiMAXem Českých Radiokomunikací²⁸

V lednu roku 2006 se poprvé objevily produkty s označením „WiMAX certified“. 4. Července 2008 byla v USA spuštěna první síť mobilního WiMAXu.

²⁷ ANDREWS, Jeffrey G. ; GHOSH, Arunambha ; MUHAMED, Rias . *Fundamentals of WiMAX*

²⁸ Dostupné z WWW: <http://www.zive.cz/ShowArticleImages.aspx?id_file=121464330&article=148518 >

Podle posledních analýz, které vypracovalo WiMAX Forum, funguje tato technologie v 519 oblastech 146 zemí. Asociace certifikovala 165 hardwarových produktů. Technologii využívá také 95 operátorů GSM.

4.6 Dostupné produkty na trhu v ČR

V současné době jsou v České republice k dostání pouze produkty společnosti Alvarion a sice řada BreezeMax. Alvarion je izraelský výrobce zařízení pro bezdrátové širokopásmové sítě včetně WiMAX a je světovým lídrem v tomto odvětví. Výhradním distributorem této techniky je pro ČR společnost INTELEK.



Obrázek 9 – Ukázka produktů řady BreezeMax společnosti Alvarion²⁹

4.7 Porovnání WiMAX s mobilními službami 3G, LTE

Přenosová kapacita mobilní verze WiMAXu je dána použitou šířkou pásma. Naproti tomu u 3G systémů je šířka pásma pevná. Systém WiMAX umožňuje lepší využití frekvenčního pásma než 3G. WiMAX zahrnuje podporu MIMO již od svého počátku na rozdíl od 3G, kde byla tato funkce doplněna až ve verzi R6, díky tomu je fyzická vrstva WiMAXu k této technice lépe uzpůsobena. WiMAX umožňuje měnit poměr downlinku ku uplinku, u 3G je toto pevně dáno. Z hlediska mobility je na tom o něco lépe technologie 3G, protože byla od počátku navrhována pro mobilní použití, WiMAX byl původně navrhován jako fixní služba.

Přímou konkurenční technologií WiMAXu je LTE. Obě technologie mají z technického hlediska hodně společného. Rozdílem je, že WiMAX optimalizuje maximální využití kanálu pomocí zpracování veškerých informací v širokém kanálu, zatímco LTE organizuje dostupné spektrum v menších částech. Nevýhodou WiMAXu oproti LTE je jeho energetická náročnost. LTE může dosáhnout větší rychlosti v dopředném směru. U LTE je teoretické maximum 100 Mbit/s, u WiMAXu je to 70 Mbit/s. LTE je přirozeným vývojem 3G sítí proto se počítá pro zavádění do mobilních sítí spíše s touto technologií.³⁰

²⁹ Dostupné z WWW: <<http://infracom-france.com/blog2/?tag=alvarion>>

³⁰ Dostupné z WWW:

<http://www.computerworld.com/s/article/9085202/WiMax_vs._Long_Term_Evolution_Let_the_battle_begin?taxonomyId=15&pageNumber=1>

5 Rádiový spoj WiMAX

5.1 Obecný rádiový spoj (postavený z dostupných zařízení na trhu)

Pro realizace spoje pomocí WiMAX systému BreezeMAX společnosti Alvarion by bylo zapotřebí indoor řídicí jednotky základnové stanice, outdoor jednotka základnové stanice, indoor nebo outdoor klientskou stanici a příslušenství jako napájecí jednotky a antény.

BMAX-MBST-IDU indoor jednotka základnové stanice slouží pro řízení i dohled nad celou sítí (základnová stanice i klientské stanice) a pro připojení bezdrátové sítě k síti provozovatele přes Ethernet rozhraní. Pracuje se specifikací 802.16d.

BMAX-BST-AU-ODU outdoor jednotka základnové stanice se s vnitřní jednotkou propojuje přes koaxiální kabel. K tomuto propojení má TNC-female konektor.

Na straně klienta lze použít např. BMAX-CPE-DMe-Si-E indoor jednotku. Ta má integrovanou anténu a umožňuje připojit i anténu externí. Obsahuje led panel pro zobrazení síly signálu. Kromě 802.16d podporuje i 802.16e.³¹

5.2 Generování a příjem signálu (v laboratorních podmínkách)

5.2.1 Popis měřicího pracoviště včetně detailnějšího popisu přístrojů

Měřicí pracoviště bylo realizováno pomocí dvou přístrojů společnosti Rohde&Schwarz. A to sice generátorem SMBV100A (Vector Signal Generator) a signálovým analyzátozem FSV (Signal and Spectrum Analyzer). Oba přístroje byly spojeny kabelem s konektory určenými pro použití v pásmu jednotek GHz.

Generátor poskytuje vynikající výkon v aplikacích s frekvencemi v CW (continuous wave) módu od 9 kHz do 6 GHz a v I/Q módu od 1 MHz do 6 GHz. Vektorový generátor SMBV100A má modulační šířku pásma 528MHz. Podporuje řadu bezdrátových standardů např. GSM, 3G, LTE, 802.11, 802.16.³²

Analyzátor použitý pro demodulaci a analýzu přijímaného signálu pracuje do kmitočtu 40 GHz při šířce pásma 40 MHz. Podle volitelného vybavení umí zpracovávat jakýkoliv dnes používaný komunikační standard. Velmi pohodlným způsobem umožňuje sledovat časovou i spektrální oblast signálu, vyhodnocuje chybovost datových přenosů, vykresluje konstelační diagramy fázových modulací atd.³³

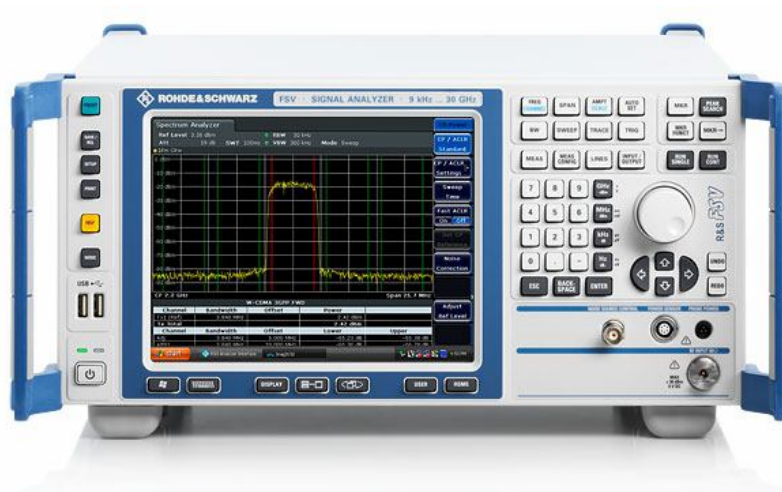
³¹ Dostupné z WWW: <<http://www.intelek.cz/fulltext.jsp?query=wimax>>

³² Dostupné z WWW: <<http://www2.rohde-schwarz.com/product/SMBV100A.html>>

³³ WWW: <<http://www2.rohde-schwarz.com/product/FSV.html>>



Obrázek 10 – Generátor R&S SMBV100A



Obrázek 11 – Analyzátor R&S FSV

5.2.2 Testované modulační a kódové poměry

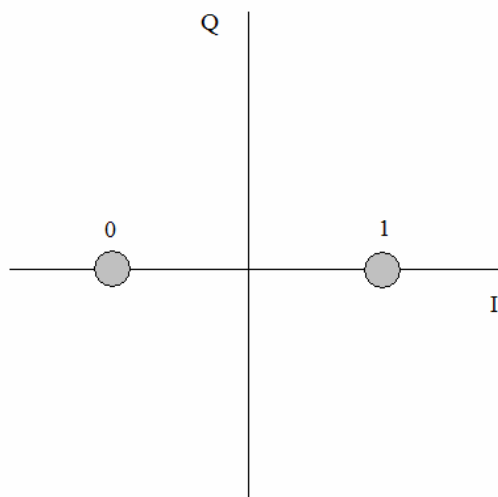
Při simulaci jsme použili tyto modulační a kódové poměry:

- BPSK (Binary Phase Shift-Keying) s kódovým poměrem 1/2,
- QPSK (Quadrature Phase Shift-Keying) s kódovým poměrem 1/2,
- 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) s kódovým poměrem 1/2,
- 64QAM s kódovým poměrem 2/3.

Pro PSK modulační se často používá zobrazení jejich fázových stavů v komplexní rovině pomocí fázorů, respektive jejich koncových bodů. Jedná se o rovinu, která se nazývá rovina IQ, kde zobrazované body potom vytvářejí konstelační (stavový) diagram. Reálná osa je zde označována symbolem I (In-phase, tj. synfázní složka), imaginární osa symbolem Q (Quadrature, tj. kvadrurní neboli o 90 ° otočená složka). Fáze těchto složek se vztahuje k

fázi pomyslné referenční nedomulované nosné vlny. Místo celých vektorů se do roviny IQ zakreslují pouze jejich koncové body.

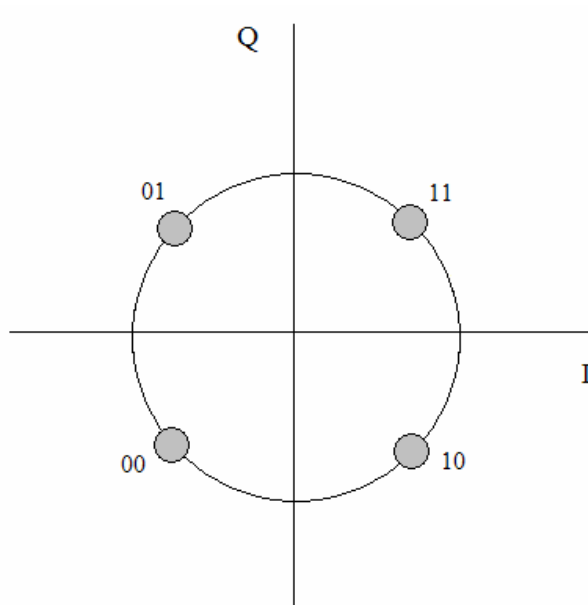
BPSK je dvoustavovou, nejjednodušší variantou PSK fázového klíčování. BPSK používá dvě fáze vzdálené od sebe 180° , proto bývá také často označována jako 2-PSK. Amplituda zůstává konstantní. Je nejrobustnější ze všech PSK modulací, protože má největší odolnost vůči šumu nebo zkreslení, díky čemuž je minimalizován výskyt chyb. Na druhou stranu umožňuje modulovat pouze 1 bit na symbol, tím se stává nevhodnou pro vysokorychlostní datové aplikace s omezenou šířkou pásma.³⁴



Obrázek 12 – Příklad konstelačního diagramu BPSK

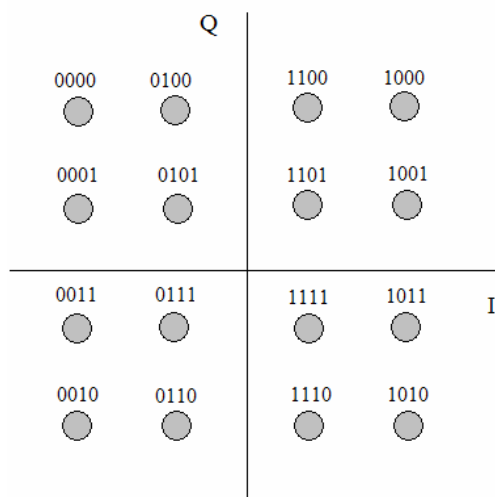
Modulace QPSK, neboli kvadrurní fázové klíčování, používá čtyři body v konstelačním diagramu rovnoměrně rozmístěné na kružnici. Je patrné, že umožňuje modulovat 2 bity na symbol, což zvýší teoretickou komunikační rychlost na dvojnásobek oproti BPSK. Snižuje se však odolnost proti šumu, což je více patrné při vícecestavových modulacích M-QAM.

³⁴ Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-shift_keying#Binary_phase-shift_keying_.28BPSK.29>



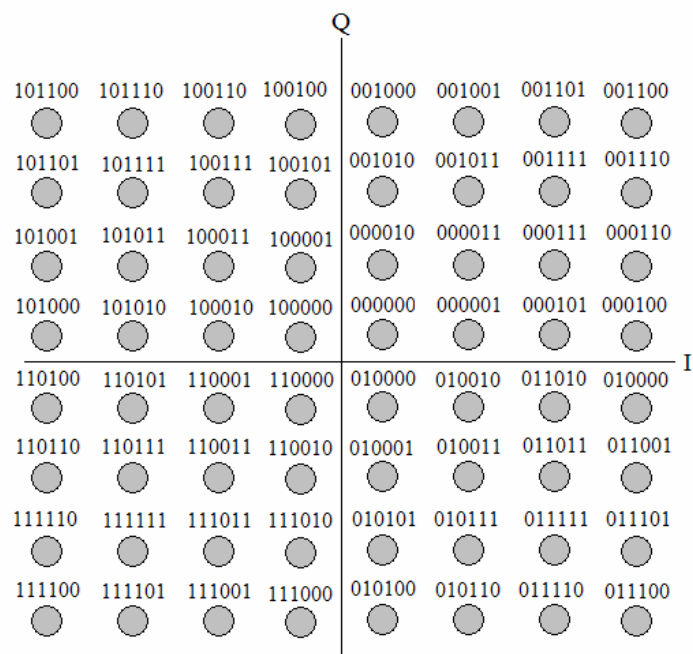
Obrázek 13 – Příklad konstelačního diagramu QPSK

Nosnou vlnu s libovolnou amplitudou a fází je možné složit ze dvou pomocných vln se stejným kmitočtem, daných amplitudách a vzájemnou fází posunutou konstantně o 90° , tj. vln, které jsou v kvadratuře. Proto se tyto modulace nazývají modulace kvadrturní a značí se symbolem QAM. Pomocí těchto modulací lze realizovat.) „čtvercové“ diagramy, které umožňují lepší využití konstelačního diagramu (z hlediska rovnoměrného rozložení jednotlivých bodů v rovině). Běžně se v současnosti používají modulace QAM, které mají 256 nebo 512 stavů. Se zvyšováním počtu stavů použitých modulací však vzrůstají požadavky na přijímač, který musí rozlišit mnohem menší změny amplitudy nebo fáze ve srovnání s modulacemi BPSK a QPSK.³⁵



Obrázek 14 – Příklad konstelačního diagramu 16QAM

³⁵ MIROSLAV, Bezděk. *Elektronika I*



Obrázek 15 – Příklad konstelačního diagramu 64QAM

5.2.3 Simulace datové komunikace

Pro získání reálných charakteristik chování technologie WiMAX byly pomocí výše zmíněných přístrojů testovány různé režimy komunikace mezi vysílačem a přijímačem, kde byly při měřeních nastavovány následující parametry:

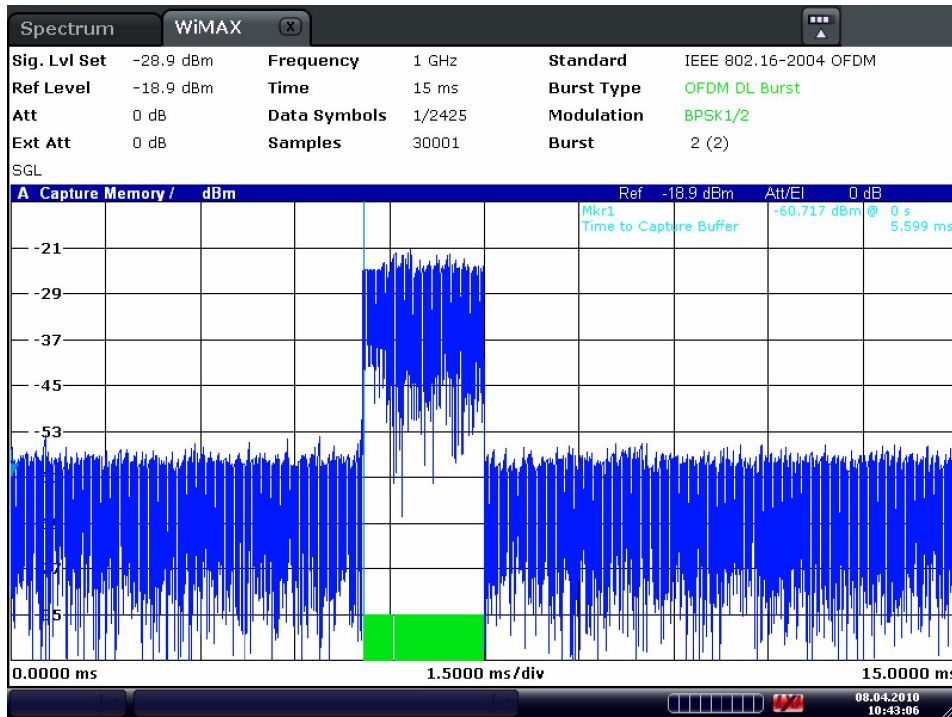
- Modulace BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM,
- Kódový poměr 1/2 nebo 2/3,
- Poměr signál/šum 8, 12 a 30 dB.

Ostatní parametry jako vysílací výkon a kmitočet (pro měření zvolen 1 GHz) byly po celou dobu měření konstantní.

V textové části bakalářské práce jsou uvedeny zaznamenané charakteristiky dvou vybraných režimů komunikace.

Režim BPSK, SNR 30 dB

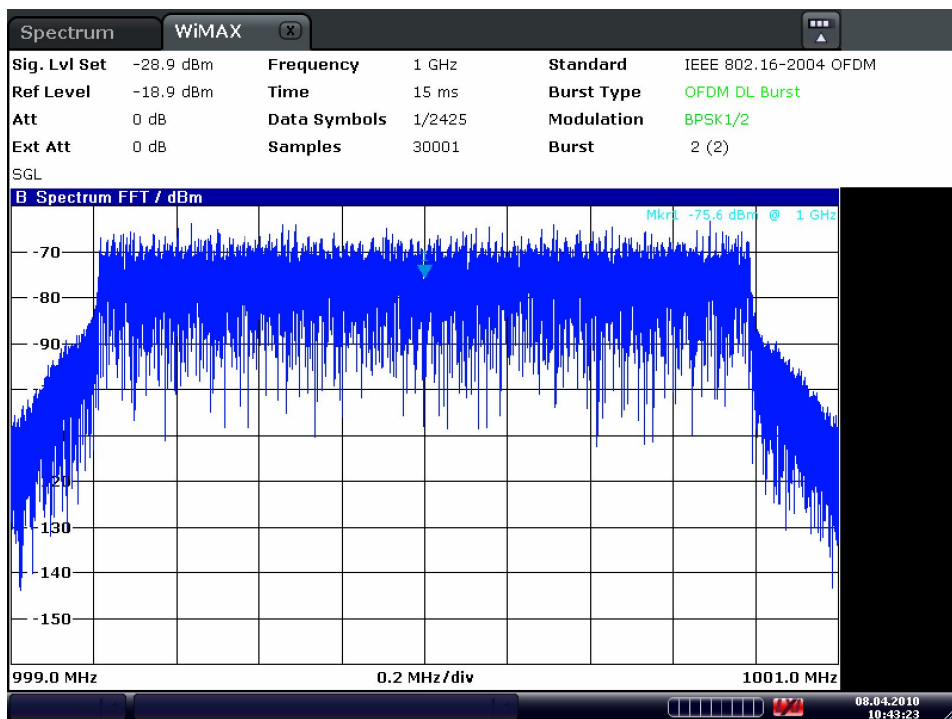
Na obrázku 10 je zachycen DL burst pro modulaci BPSK1/2. Trvání tohoto burstu je přibližně 2ms. Ze záznamu je patrné, že odstup signál-šum SNR je 30 dB.



Date: 8.APR.2010 10:43:06

Obrázek 16 – BPSK DL burst v časové oblasti

Obrázek 11 zachycuje DL burst s BPSK1/2 ve frekvenční oblasti. Převod je proveden pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT – Fast Fourier Transform). Ve frekvenční oblasti je burst široký 1,6 MHz.



Date: 8.APR.2010 10:43:23

Obrázek 17 – BPSK DL burst ve frekvenční oblasti

Na Obrázku 12 je konstelační diagram pro modulaci BPSK. Koncové body fázorů jsou téměř v ideální pozici díky dostatečnému odstupu signál/šum, z toho plyne potlačená chybovost.

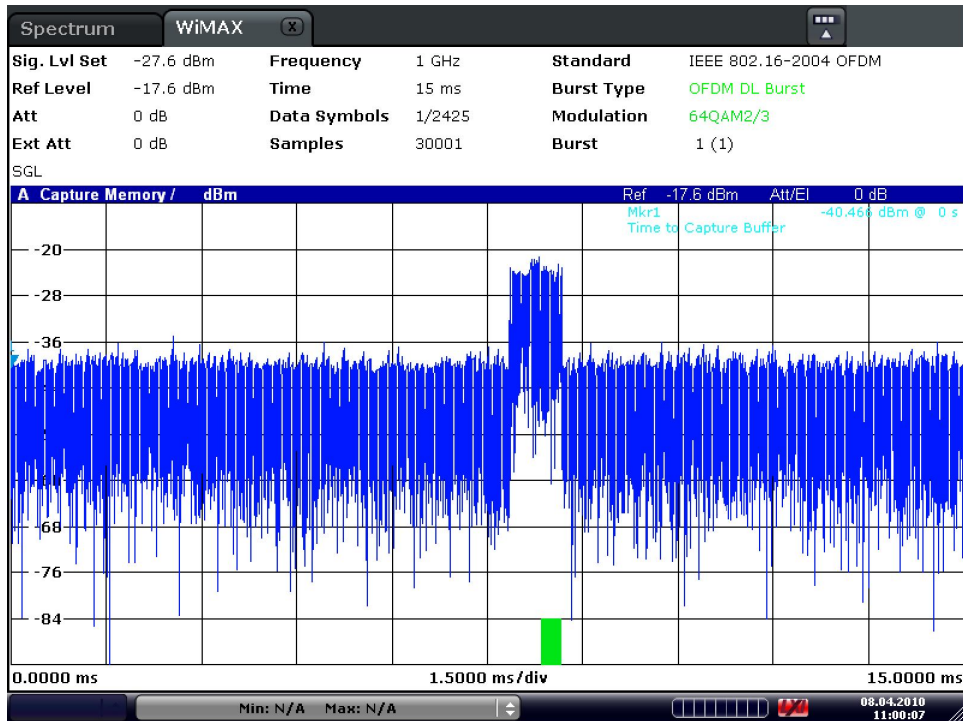


Date: 8.APR.2010 10:43:39

Obrázek 18 – Konstelační diagram BPSK

Režim 64QAM, SNR 12 dB

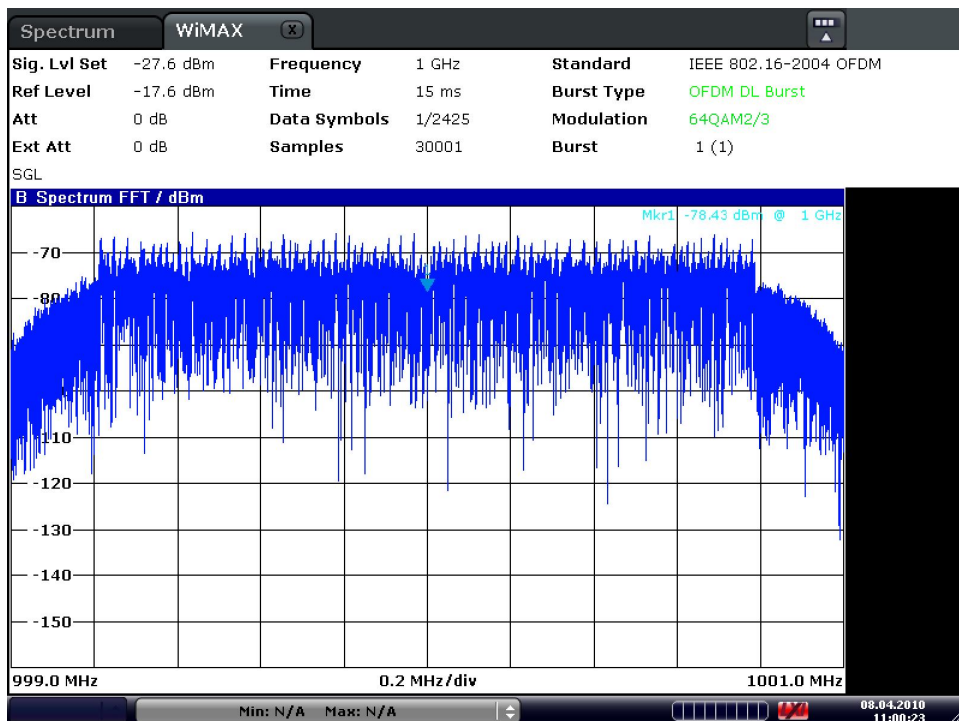
Na obrázku 13 je zachycen DL burst pro modulaci 64QAM2/3. Trvání tohoto burstu je přibližně 0,75ms. Dále je patrné, že odstup signál-šum SNR je 12 dB.



Date: 8.APR.2010 11:00:07

Obrázek 19 – 64QAM DL burst v časové oblasti

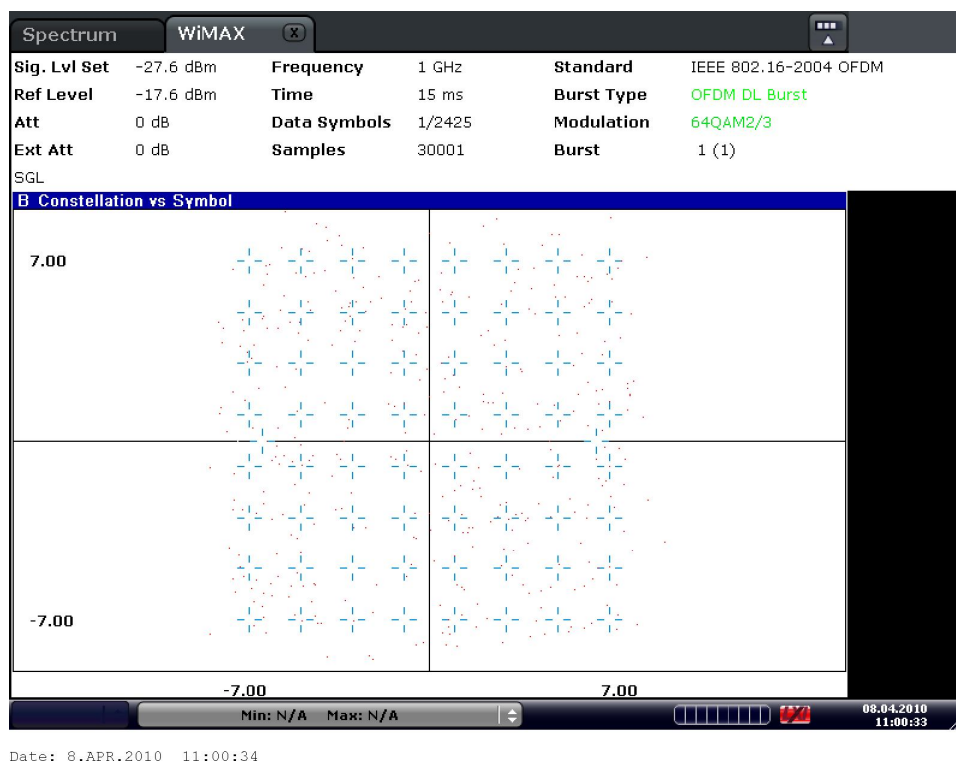
Obrázek 14 zachycuje DL burst s 64QAM2/3 ve frekvenční oblasti, tedy tzv. FFT spektrum. Ve frekvenční oblasti je burst široký opět 1,6 MHz. Oproti BPSK je zde patrné větší zašumění.



Date: 8.APR.2010 11:00:23

Obrázek 20 – 64QAM DL burst ve frekvenční oblasti

Na Obrázku 15 je konstelační diagram pro modulaci 64QAM. Koncové body fázorů se značně odchyľují z ideální pozice, proto bude docházet k chybnému vyhodnocení stavů.



Obrázek 21 – Konstelační diagram 64QAM

Ze získaných charakteristik bylo možné provést vyhodnocení funkčnosti jednotlivých režimů komunikace při různých odstupech signálu od šumu.

V příloze č. 1 až č. 10 jsou uvedeny další příklady záznamů z měření různých modulačních metod a kódových poměrů. Další zaznamenaná měření jsou na přiloženém CD v souboru OFDM_test.

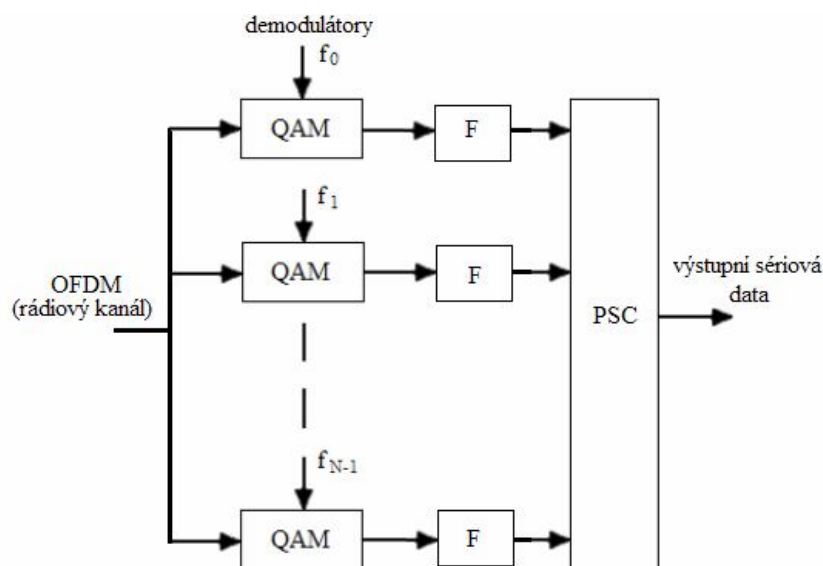
5.2.4 Demodulace signálu

Demodulace signálů je proces, při kterém se získává z modulovaného vysokofrekvenčního nosného signálu zpět původní modulační signál. Podstatou demodulace je tedy oddělení vysokofrekvenčního nosného signálu od nízkofrekvenčního modulačního signálu.

Z konstelačních diagramů získaných po demodulaci signálu lze určit funkčnost jednotlivých režimů komunikace (modulace, kódový poměr) pro různé SNR. Funkčnost je v tomto případě považována za bezchybný provoz. Hodnoty odstupů S/N byly voleny tak, aby byla nalezena hranice, při které jednotlivé režimy komunikace selhávají. Hodnota odstupů S/N 30 dB je v praxi pro systém WiMAX označována jako hraniční pro funkčnost systému. Z reálných měření je však zřejmé, že pro pomalejší stupně komunikace je možné provozovat systém WiMAX i při nižších poměrech S/N. Např. pro BPSK byla komunikace funkční až do úrovně S/N = 8 dB.

tabulka 5 – Funkčnost modulací při daných SNR

SNR [dB]	Modulace			
	BPSK	QPSK	16QAM	64QAM
30	√	√	√	√
12	√	√	x	x
8	√	x	x	x



Obrázek 22 – Princip demodulace OFDM

5.2.5 Možnosti simulace pohybu přijímače

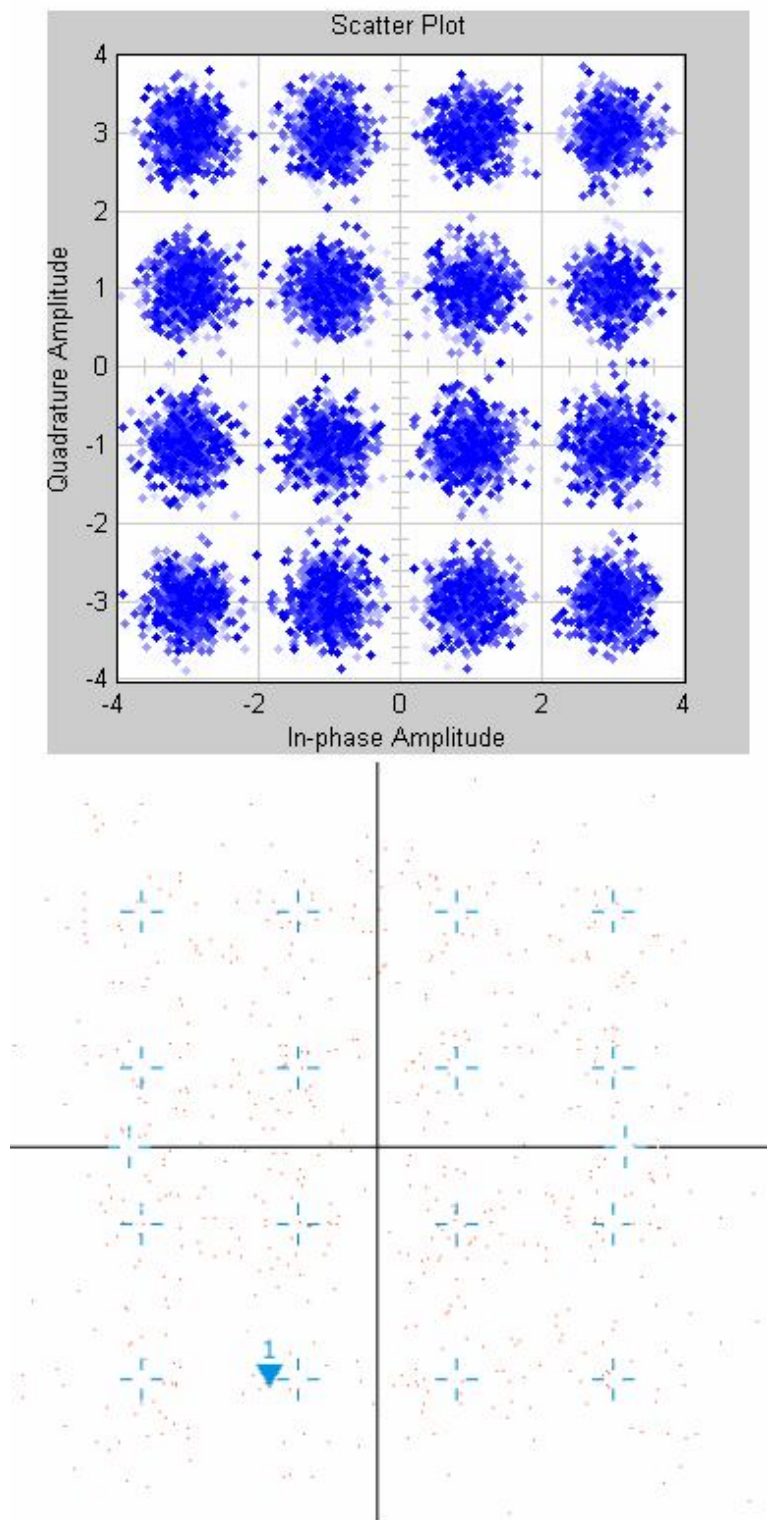
Simulace pohybu přijímače měla být prováděna tak, že se kmitočet vysílače bude postupně vzdalovat od kmitočtu přijímače o desítky až stovky Hz, což by na nosném kmitočtu 1 GHz odpovídalo rychlostem pohybu až ve stovkách km/h. Měřicí sestava však takové testy sice umožnila, ale přijímač se velmi dlouhou dobu synchronizuje s vysílačem až do hranice, kdy komunikace zcela vypadne. Během vzdalování obou kmitočtů nedochází k nárůstu chybovosti podle teoretických předpokladů. Podle zapůjčitele přístrojové techniky je to právě vlastnost použité měřicí sestavy a pro podobné testy by se musela použít ještě další technika, která by pozmenila měřicí řetězec v části přenosové cesty, která v našem případě byla tvořena kalibrovaným kabelem.

5.3 Porovnání měřených charakteristik s teoretickými předpoklady

Při porovnání teoretických hodnot (zjištěných pomocí simulačního programu) a námi vygenerovaných konstelačních diagramů zjistíme, že teoretické hodnoty chybovosti BER dosahují mnohem nižších hodnot pro všechny testované modulace.

Například při softwarové simulaci modulace 16QAM se minimální chybovost, v řádu setin procenta začne objevovat až při snížení odstupu signálu od šumu na 8 dB. Při dalším snižování odstupu signálu od šumu chybovost roste a chybovosti 2 % dosáhneme při odstupu signálu od šumu 4,8 dB. Chybovosti 5 % dosáhneme při odstupu signálu od šumu 3,5 dB. Zatímco z konstelačního diagramu vzniklého přístrojovou simulací reálného přenosu je

patrné, že již při odstupu signálu od šumu 8 dB je chybovost vysoká a komunikace není možná.



Obrázek 23 – Porovnání konstelačních diagramů vytvořených pomocí softwarové simulace (nahore) a laboratorního měření pro modulaci 16QAM a SNR 8 dB

6 Závěr

Technologie WiMAX zaplňuje prázdné místo na poli bezdrátových technologií. Splňuje současné požadavky kladené na datové přenosy, ale je perspektivní i pro budoucí rozšiřování služeb. Standard 802.16e zavádí pro WiMAX možnost mobility přijímací stanice, čímž rapidně rozšiřuje možnosti použití této technologie např. v dopravních prostředcích. Bezdrátové sítě WiMAX jsou v současnosti v provozu v mnoha zemích světa včetně ČR a předpokládá se jejich další rozšiřování. Probíhá vývoj dalších WiMAX standardů pro vyšší přenosové rychlosti dat při větších rychlostech pohybu.

Bakalářská práce pomocí porovnání teoretických předpokladů s laboratorním měřením prokazuje, že není možné se při návrhu bezdrátových spojů spolehnout na jednoduché softwarové simulace, ale je nutné vycházet ze znalosti reálného prostředí. Ačkoliv simulace prováděné v prostředí Matlab/Simulink vykazují dobrou schopnost přenosu dat i při nízkých poměrech signálu k šumu, z provedených měření vyplývá potřeba vyšších poměrů signál k šumu až o 10 dB, a to při použití kanálového kódování předepsaného podle standardu WiMAX. Praktická měření také potvrdila nutnost používání adaptivního kódování a změn modulačních technik k tomu, aby komunikace mohla probíhat i na větší vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem. Laboratorní měření však nedokázala prokázat změny parametrů komunikace při pohybu přijímací stanice, což by mělo vést na zhoršující se kvalitu přenosu dat při vzniku Dopplerova jevu.

Použitá literatura

ANDREWS, Jeffrey G. ; GHOSH, Arunambha ; MUHAMED, Rias . *Fundamentals of WiMAX : Understanding Broadband Wireless Networking*. [s.l.] : [s.n.], 2007. 496 s. ISBN 0132225522.

PECHÁČ, Pavel ; ZVÁNOVEC, Stanislav. *Základy šíření pro plánování pozemních rádiových spojů*. [s.l.] : [s.n.], 2007. 200 s. ISBN 978-80-7300-223-7.

MIROSLAV, Bezděk. *Elektronika I*. [s.l.] : [s.n.], 2008. 341 s. ISBN 978-80-7232-365-4.

JONÁŠ, Marek. *Simulace a analýza digitálního televizního vysílání*. [s.l.], 2007. 56 s. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.

LUPA [online]. 3.1.2001 [cit. 2010-08-03]. Bezdráty vs. klasické pevné linky. Dostupné z WWW: <<http://www.lupa.cz/clanky/bezdraty-vs-klasicke-pevne-linky/>>.

KAISER DATA [online]. 2007 [cit. 2010-08-03]. Základy technologie RR spojů. Dostupné z WWW: <<http://www.bezdratove-telekomunikace.cz/katalog-pojitek/o-radiovych-spojich/1-zaklady-technologie-rr-spoju/>>.

Itu. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2010-08-03]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Itu>>.

Internet Engineering Task Force. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2010-08-03]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Internet_Engineering_Task_Force>.

LUPA [online]. 2005 [cit. 2010-08-03]. Novinky v pásmu 2,4 a 5 GHz – stávající radiosítě do ilegality. Dostupné z WWW: <<http://www.lupa.cz/clanky/novinky-v-pasmu-24-a-5-ghz-8211-stavajici-radiosite-do-ilegality/>>.

Český telekomunikační úřad [online]. 2008 [cit. 2010-08-3]. Všeobecná oprávnění. Dostupné z WWW: <<http://www.ctu.cz/predpisy-a-opatreni/opatreni-ctu/vseobecna-opravneni.html>>.

Wifi. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2010-08-03]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Wifi>>.

Wifishop.cz [online]. 2005 [cit. 2010-08-03]. 24GHz - Spoje. Dostupné z WWW: <<http://www.wifi-shop.cz/24ghz-spoje>>.

Access server [online]. 2004 [cit. 2010-08-09]. Mobilní síť. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2004072801>>.

Katedra informatiky : Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB-TUO [online]. 2009 [cit. 2010-08-07]. Referát do předmětu TPS. Dostupné z WWW: <<http://www.cs.vsb.cz/grygarek/TPS/projekty/0708Z/80211rAp.pdf>>.

IEEE 802.11r. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2010-08-09]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11r>.

4wifi [online]. 2010 [cit. 2010-08-03]. Mimořádná nabídka. Dostupné z WWW: <<http://www.i4shop.net/cz/iObchod/~i4wifi-BackBone.asp>>.

Wifishop.cz [online]. 2006 [cit. 2010-08-03]. 80GHz - Spoje. Dostupné z WWW: <<http://www.wifi-shop.cz/kategorie-wifishopcz-80ghz-spoje>>.

IEEE 802.11r. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2010-08-05]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11r>.

Internet pro všechny [online]. 2008 [cit. 2010-08-03]. Fenomén bezdrátových sítí v Česku aneb éra 10 GHz spojují!. Dostupné z WWW: <<http://www.internetprovsechny.cz/clanek.php?cid=198>>

Tech Guru [online]. 2.2.2010 [cit. 2010-08-03]. Mobile WiMAX : Meet 802.16e. Dostupné z WWW: <<http://www.techquark.com/2010/02/mobile-wimax-meet-80216e.html>>.

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická [online]. 2005 [cit. 2010-08-03]. 37MK_EDGE_Jan_Radosta. Dostupné z WWW: <http://radio.feld.cvut.cz/personal/mikulak/MK/MK05_semestralky/37MK_EDGE_Jan_Radosta.pdf>.

BusinessVize [online]. 29.6.2010 [cit. 2010-08-03]. Jak se vyznat v mobilních datových sítích (UMTS, HSDPA, HSUPA, HSPA+, LTE) . Dostupné z WWW: <<http://www.businessvize.cz/datove-prenosy-a-site/jak-se-vyznat-v-mobilnich-datovych-sitich-umts-hsdpa-hsupa-hspa-lte>>.

ROHDE&SCHWARZ [online]. 2010 [cit. 2010-09-07]. R&S®SMBV100A Vector Signal Generator. Dostupné z WWW: <<http://www2.rohde-schwarz.com/product/SMBV100A.html>>.

ROHDE&SCHWARZ [online]. 2010 [cit. 2010-08-07]. R&S®FSV Signal and Spectrum Analyzer. Dostupné z WWW: <<http://www2.rohde-schwarz.com/product/FSV.html>>.

Neu-Mann.cz [online]. 4.2.2009 [cit. 2010-08-03]. Perspektivní mobilní technologie – MIMO, HSPA+, LTE. Dostupné z WWW: <<http://www.neu-mann.cz/mobilni-komunikace/mobilni-technologie/perspektivni-mobilni-technologie-mimo-hspa-lte/>>.

Infracom, le Blog WiFi / Wimax / Vidéo sans fil [online]. 2010 [cit. 2010-08-07]. Alvarion connecte 90 villes au Brésil. Dostupné z WWW: <<http://infracom-france.com/blog2/?tag=alvarion>>.

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická [online]. 2009 [cit. 2010-08-10]. WiMAX. Dostupné z WWW: <http://radio.feld.cvut.cz/personal/mikulak/MK/MK06_semestralky/WiMAX-NevrlyJ.pdf>.

Access server [online]. 16.12.2008 [cit. 2010-08-03]. Mechanismus ARQ v sítích WiMAX. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008120004>>.

Katedry telekomunikační techniky ČVUT [online]. 2009 [cit. 2010-08-07]. Bezdrátové sítě v telekomunikacích. Dostupné z WWW: <www.comtel.cz/files/download.php?id=2803>.

Živě [online]. 28.8.2009 [cit. 2010-08-03]. Renesance bezdrátových sítí WiMAX v Česku?. Dostupné z WWW: <http://www.zive.cz/ShowArticleImages.aspx?id_file=121464330&article=148518 >.

WiMAX : networking [online]. 4.7.2008 [cit. 2010-08-03]. WiMAX, LTE a NGMN . Dostupné z WWW: <http://www.wimax.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=227&Itemid=33>.

INTELEK [online]. 2010 [cit. 2010-08-09]. WiMAX Produkty. Dostupné z WWW: <<http://www.intelek.cz/fulltext.jsp?query=wimax>>.

Katedry telekomunikační techniky ČVUT [online]. 2004 [cit. 2010-08-07]. Bezdrátové sítě dle standardu IEEE 802.11 (WiFi). Dostupné z WWW: <www.comtel.cz/files/download.php?id=2229>.

Access server [online]. 2008 [cit. 2010-08-07]. Bezdrátové systémy v přístupové síti. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008020002>>.

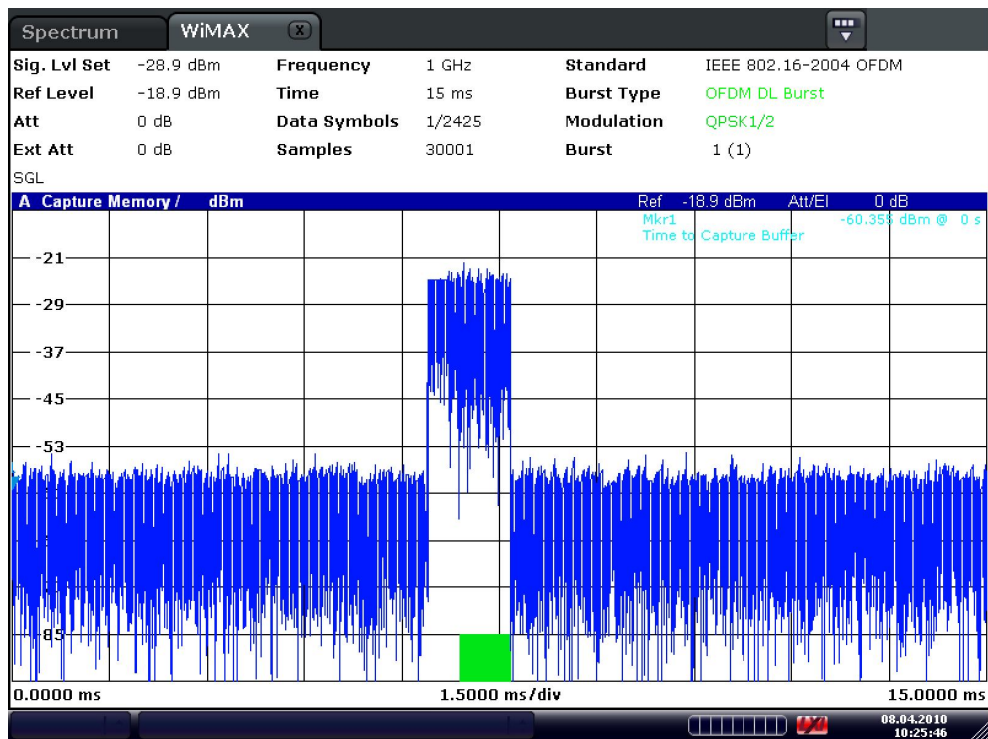
COMPUTERWORLD [online]. 14.4.2008 [cit. 2010-08-03]. WiMax vs. Long Term Evolution: Let the battle begin. Dostupné z WWW: <http://www.computerworld.com/s/article/9085202/WiMax_vs._Long_Term_Evolution_Let_the_battle_begin?taxonomyId=15&pageNumber=1>.

DigiZone.cz [online]. 2009 [cit. 2010-08-07]. Jednofrekvenční sítě SFN – východisko z kmitočtové nouze nebo jen zdroj nových problémů?. Dostupné z WWW: <<http://www.digizone.cz/clanky/jednofrekvencni-site-sfn-vychodisko-z/>>.

Phase-shift keying#Binary phase-shift keying .28BPSK.29. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2010-08-03]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-shift_keying#Binary_phase-shift_keying_.28BPSK.29>.

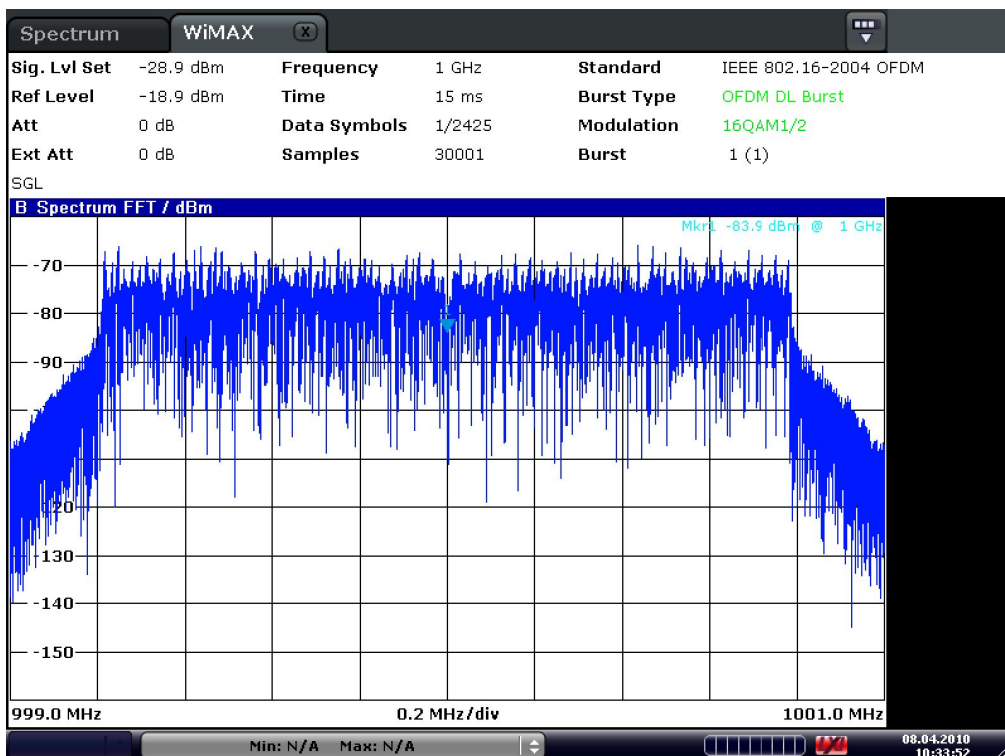
Encyklopedie fyziky [online]. 2008 [cit. 2010-08-03]. Dopplerův jev (efekt). Dostupné z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=175>>.

Příloha – Vybrané záznamy z měření



Date: 8.APR.2010 10:25:46

Příloha 1 – DL burst v časové oblasti pro modulaci QPSK a SNR 30 dB



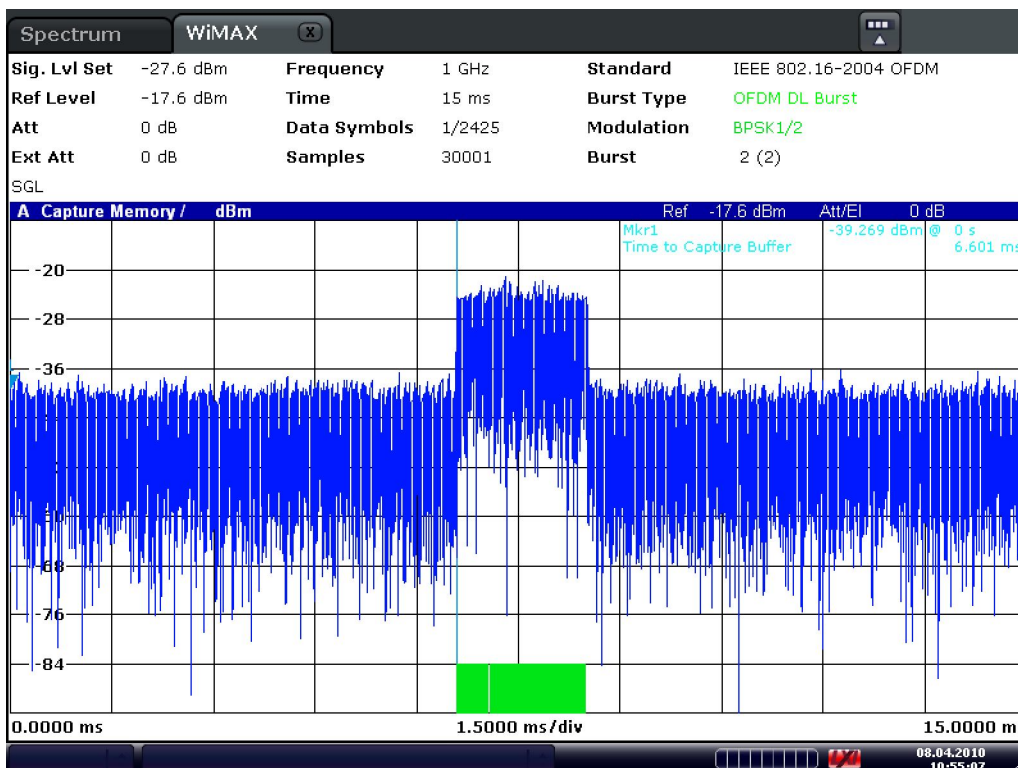
Date: 8.APR.2010 10:33:53

Příloha 2 – DL burst ve frekvenční oblasti pro modulaci 16QAM a SNR 30 dB



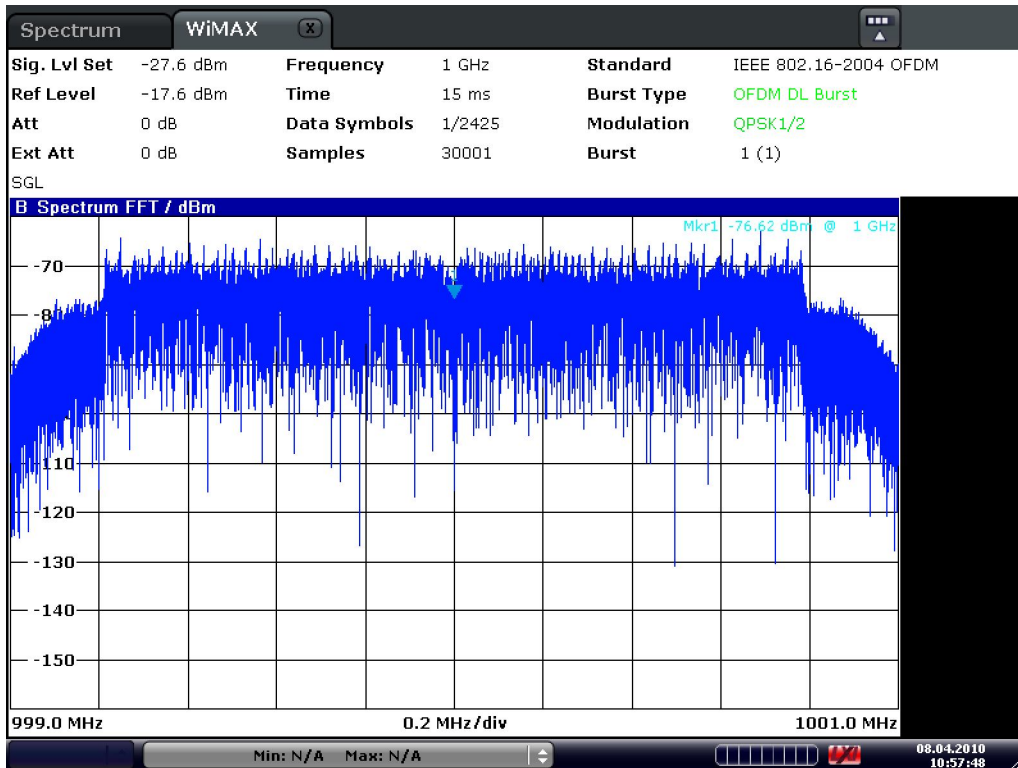
Date: 8.APR.2010 10:45:27

Příloha 3 – Konstelační diagram pro modulaci 64QAM a SNR 30 dB



Date: 8.APR.2010 10:55:08

Příloha 4 – DL burst v časové oblasti pro modulaci BPSK a SNR 12 dB



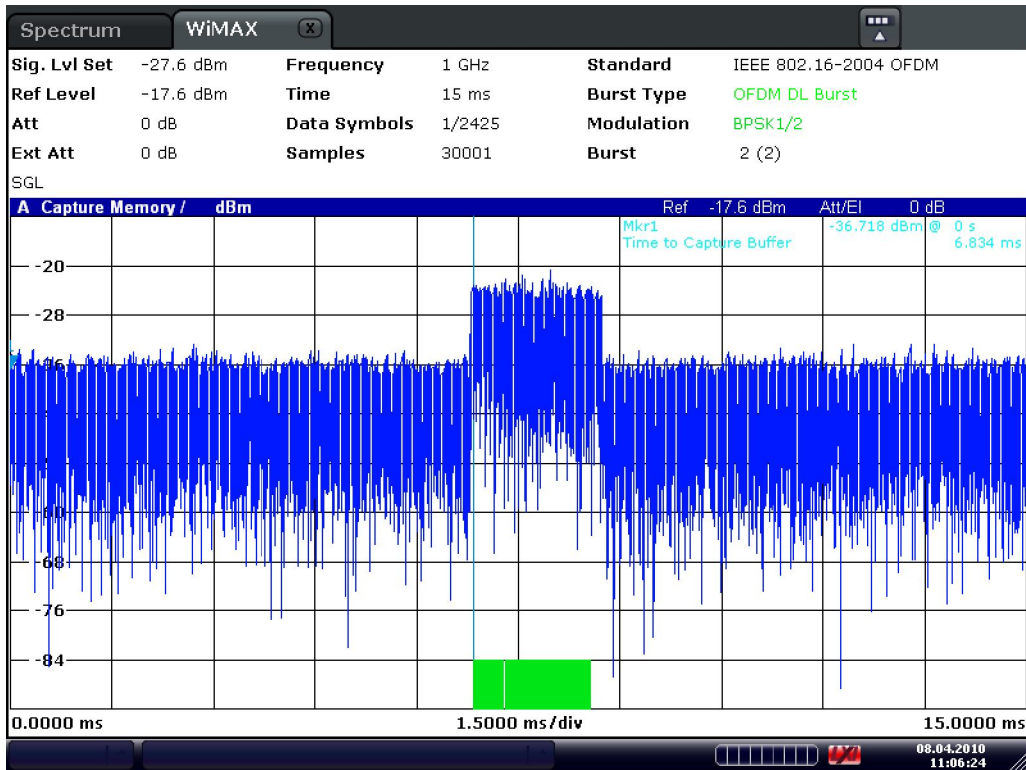
Date: 8.APR.2010 10:57:48

Příloha 5 – DL burst ve frekvenční oblasti pro modulaci QPSK a SNR 12 dB



Date: 8.APR.2010 10:59:25

Příloha 6 – Konstelační diagram pro modulaci 16QAM a SNR 12 dB



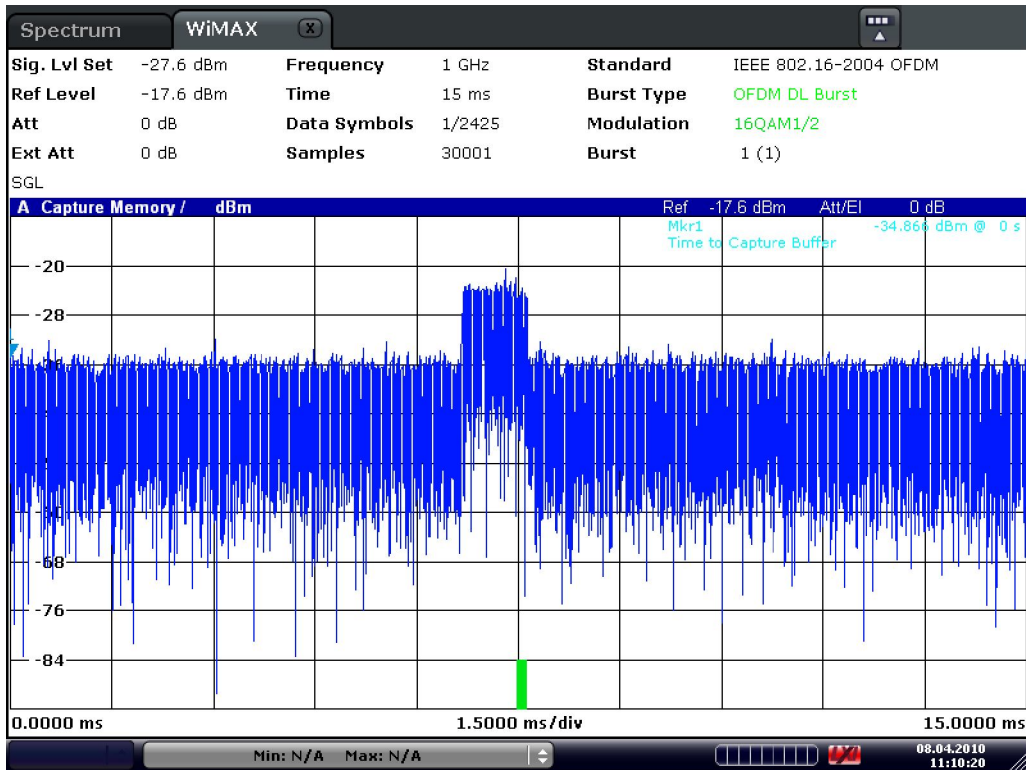
Date: 8.APR.2010 11:06:25

Příloha 7 – DL burst v časové oblasti pro modulaci BPSK a SNR 8 dB



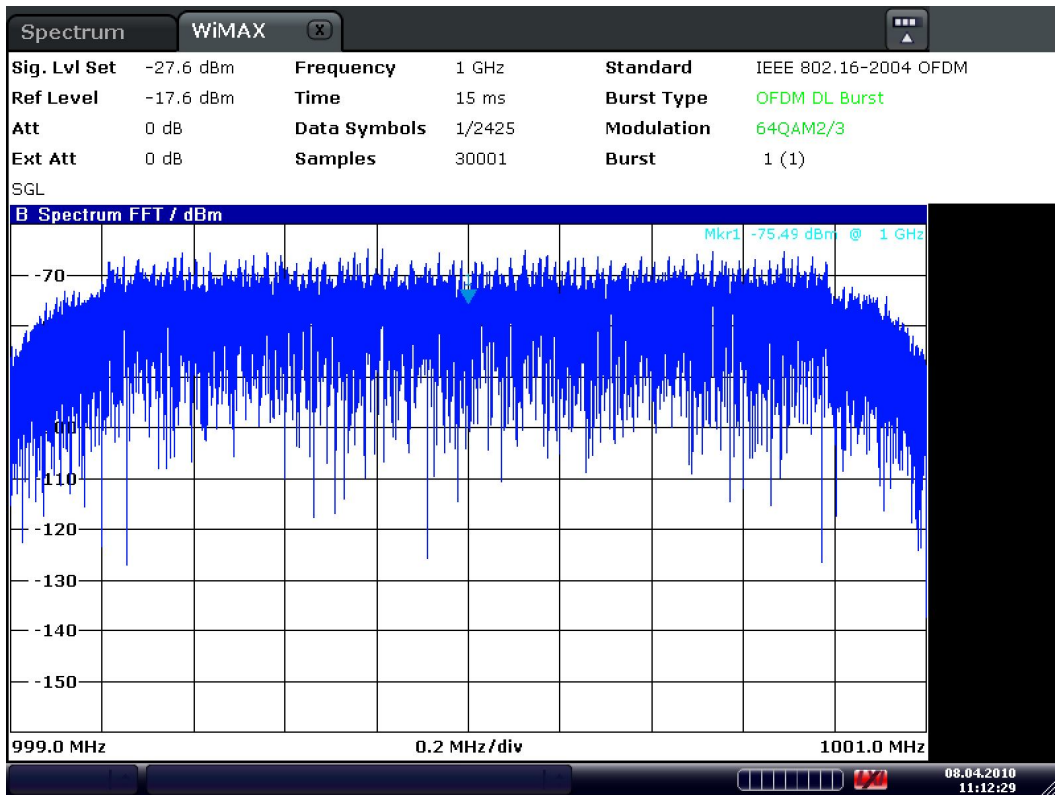
Date: 8.APR.2010 11:09:15

Příloha 8 – Konstelční diagram pro modulaci QPSKa SNR 8 dB



Date: 8.APR.2010 11:10:20

Příloha 9 – DL burst v časové oblasti pro modulaci 16QAM a SNR 8 dB



Date: 8.APR.2010 11:12:29

Příloha 10 – DL burst ve frekvenční oblasti pro modulaci 64QAM a SNR 8 dB