

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2008

Radim Zeman

**UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

**POROVNÁNÍ PŘENOSU DAT V MOBILNÍCH A WI-FI SÍTÍCH
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**AUTOR:
VEDOUCÍ PRÁCE:**

**Radim Zeman
Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.**

2008

Poděkování:

V úvodu bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Němcovi, Ph.D., za rady, připomínky a návrhy týkající se bakalářské práce a za odborné vedení při simulacích prováděných v softwarovém prostředí Matlab-Simulink.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá porovnáním dvou bezdrátových systémů Wi-fi a GSM z hlediska přenosu dat, jakým způsobem jsou data přenášena, jakých teoretických a praktických rychlostí jsou schopna dosáhnout. U Wi-fi je kladen důraz na 802.11 a/b/g, u GSM na GPRS.

KLÍČOVÁ SLOVA

Modulace; WI-FI; GSM; GPRS; přenos dat

TITLE

Comperison of data rates in mobile and WI-FI systems

ABSTRACT

This Bachelor thesis deals with a comparison of two wireless systems – WI-FI and GSM, from the perspective of data transfer: how the data is transferred, what theoretical and practical transfer speeds can be obtained using these protocols. The protocols analysed in this thesis are 802.11 a/b/g for WI-FI and GPRS for GSM.

KEYWORDS

Modulation; WI-FI; GSM; GPRS; data rate

Obsah

Úvod	14
1. GSM	15
1.1. Rozdělení GSM systémů z hlediska generací	16
1.2. Frekvenční pásmo GSM 2 a 2.5 (2.75) generace	17
1.3. Mobilní stanice	18
1.4. Kódování zdroje	19
1.5. Kódování kanálu	19
1.6. Prokládání	20
1.7. Ekvalizace	21
1.8. Šifrování	21
1.9. Modulace nosné vlny GMSK	21
1.10. Frekvenční skoky nosné vlny	22
2. GPRS (General Packet Radio Service)	23
2.1. Kódová schémata GPRS	23
3. IEEE 802.11 a/b/g	25
4. Vrstvový model 802.11	26
4.1. Fyzická vrstva	26
4.1.1. Fyzická vrstva 802.11b	27
4.1.2. Fyzická vrstva 802.11a/g	29
5. Modulace WI-FI	31
5.1. Modulace 16 a 64 QAM	31
5.2. Modulace QPSK	32
5.3. Modulace BPSK	33
6. Simulace systémů pro přenos dat	34
6.1. Systém 802.11g	34
6.2. Modulace 64QAM	34
6.2.1. Modulace 64QAM pro šíření přímou cestou	34
6.2.2. Modulace 64QAM s jedním odrazem při S/N 12dB	36
6.3. Modulace 16QAM	37
6.3.1. Modulace 16QAM pro šíření přímou cestou	37
6.3.2. Modulace 16QAM s jedním odrazem při S/N 12dB	38
6.4. Modulace QPSK	38
6.4.1. Modulace QPSK pro šíření přímou cestou	39

6.4.2.	Modulace QPSK s jedním odrazem při S/N 12dB	40
6.5.	Modulace BPSK	41
6.5.1.	Modulace BPSK pro šíření přímou cestou	41
6.5.2.	Modulace BPSK s jedním odrazem při S/N 12dB	42
7.	System GSM a modulace GMSK.....	44
7.1.	Modulace GMSK pro šíření přímou cestou	44
7.2.	Modulace GMSK s jedním odrazem při S/N 12dB.....	45
8.	Vyhodnocení simulací	46
9.	Měření přenosu u Wi-fi	48
10.	Měření přenosu v GSM u GPRS a EDGE.....	51
11.	Závěr.....	52
	Použitá literatura.....	54

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 - Logo GSM</i>	15
<i>Obr. 2 - Frekvenční a časový multiplex</i>	17
<i>Obr. 3 - Blokové schéma mobilní stanice</i>	19
<i>Obr. 4 - Normal burst, TDMA rámeček, mulirámeček</i>	20
<i>Obr. 5 - Blokové schéma GMSK modulátoru</i>	22
<i>Obr. 6 - Klíčování diagram GMSK modulace</i>	22
<i>Obr. 7 - Včlenění GPRS do GSM 2.generace</i>	23
<i>Obr. 8 - Porovnání rychlostí a použití klíčování GPRS a EDGE</i>	24
<i>Obr. 9 - Logo Wi-Fi</i>	25
<i>Obr. 10- Referenční model ISO/OSI pro Wi-Fi</i>	26
<i>Obr. 11 - Frekvenční spektrum HR-DSSS signálu</i>	27
<i>Obr. 12 - PPDU rámeček dle IEEE 802.11b</i>	28
<i>Obr. 13 - Frekvenční spektrum OFDM signálu</i>	29
<i>Obr. 14 - PPDU rámeček dle IEEE 802.11a/g</i>	30
<i>Obr. 15- Blokové schéma QAM modulace</i>	31
<i>Obr. 16 - 16 a 64 bodové QAM uspořádání</i>	32
<i>Obr. 17- QPSK</i>	32
<i>Obr. 18 - modulátor BPSK</i>	33
<i>Obr. 19 - příklad BPSK signálu</i>	33
<i>Obr. 20 - Model systému s modulací 64QAM – šíření signálu bez odrazu</i>	34
<i>Obr. 21 - Zobrazení 64QAM šíření signálu bez odrazu při S/N 27.5dB</i>	35
<i>Obr. 22 - Zobrazení 64QAM bez odrazu s S/N 12dB</i>	35
<i>Obr. 23 - Model 64QAM s jedním odrazem</i>	36
<i>Obr. 24 - Model odrazu u 64QAM s výkonem 10% původního signálu</i>	36
<i>Obr. 25 - zobrazení 64QAM s jedním odrazem s S/N 12dB</i>	37
<i>Obr. 26 - zobrazení 16QAM bez odrazu při S/N 21.5dB</i>	37
<i>Obr. 27 - Zobrazení 16QAM bez odrazu a s S/N 12dB</i>	38
<i>Obr. 28 - Zobrazení 16QAM s jedním odrazem při 12dB S/N</i>	38
<i>Obr. 29 - Model QPSK</i>	39
<i>Obr. 30 - Zobrazení QPSK – šíření signálu bez odrazu při S/N 15dB</i>	39
<i>Obr. 31 - Zobrazení QPSK – šíření signálu bez odrazu při S/N 8dB</i>	40
<i>Obr. 32 - Model QPSK s jedním odrazem</i>	40
<i>Obr. 33 - Model QPSK s jedním odrazem S/N 12dB</i>	40

<i>Obr. 34 - Model BPSK</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 35 - Zobrazení BPSK bez odrazu s S/N 8dB</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 36 - Zobrazení BPSK bez odrazu při S/N 5dB</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 37 - Model BPSK s jedním odrazem</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 38 - Zobrazení BPSK s jedním odrazem při S/N 12 dB</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 39 - Model modulace GMSK.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 40 - Diagram oka GMSK při S/N 12dB</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 41- Diagram oka GMSK při S/N 8dB</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 42 - Model Modulace GMSK s jedním odrazem při S/N 12dB</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 43 - Diagram oka GMSK s jedním odrazem při S/N 12dB</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 44 - Porovnání modulací Wi-fi v závislosti BER na S/N.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 45 - Porovnání BER při S/N 12db při různých modulací Wi-fi</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 46 - Závislost BER na S/N u modulace GMSK</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 47 - Závislost rychlosti přenosu na vzdálenosti, AP anténa se ziskem 1dB.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 48 - Závislost rychlosti přenosu na vzdálenosti, AP anténa se ziskem 5dB.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 49 - Sony Ericsson P900</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 50 - HP IPAQ 6515</i>	<i>51</i>

Seznam tabulek

<i>Tab. 1 - Porovnání rychlostí V GSM</i>	17
<i>Tab. 2 - Rozdělení GPRS podle tříd</i>	24
<i>Tab. 3 - Povolené radiové frekvence pro Wi-Fi v pásmu 2,4 GHz</i>	25
<i>Tab. 4 - Přehled Wi-Fi standartů</i>	26
<i>Tab. 5 - Přehled modulací v 801.11</i>	31
<i>Tab. 6 - vzdálenosti pro útlum trasy v pásmu 2,4 GHz</i>	48
<i>Tab. 7 - Naměřené hodnoty, AP se ziskem antény 1dB</i>	48
<i>Tab. 8- Naměřené hodnoty, AP se ziskem antény 5dB</i>	49

Seznam zkratk

AMPS - American Mobile Phone Standard - standart používaný v USA v systémech první generace

BER - Bit Error Rate - bitová chybovost

BPSK - Binary Phase Shift Keying - dvoustavová fázová modulace

BSC - Base Station Controller - řídicí základnová jednotka

BTS - Base Transceiver Station - základnová stanice

CCA - Clear Channel Assessment

CCH - Control Channel - řídicí kanál

CCK - Complementary Code Keying – kódování komplementárním kódem dlouhodobým odhadem

CCITT - Comité Consultatif International de Télégraphique et Téléphonique- Mezinárodní poradní sbor pro telegraf a telefon

CRC - Cyclic redundancy check - Cyklický redundantní součet

CPFSK - Continuous Phase frequency Shift Keying - frekvenční klíčování se spojitou fází

CS - Coding Scheme – kódové schéma

DCS - Digital Cellular System – digitální buňkový systém

DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum - kódově rozprostřené spektrum

EDGE - Enhanced Data Rates for Global Evolution - vylepšený datový přenos pro globální rozvoj

ERP-PBCC - Extended Rate PHY - Packet Binary Convolutional Cosiny

FHSS - Frequency Hopping Spread Spectrum - spektrum rozprostřené frekvenčními proskoky

FDMA (Frequency Division Multiple Access) - vícenásobný přístup s frekvenčním dělením

FM - Frequency Modulation – frekvenční modulace

FSK - Frequency Shift Keying - frekvenční klíčování

GGSN - Gateway GPRS Support Node

GMSK - Gaussian Minimum Shift Keying - Gaussianova modulace s minimálním zdvihem

GPRS - General Packet Radio Service - rádiový přenos datových paketů

GSM - Global System for Mobile Communications - globální systém mobilní komunikace

HR-DSSS - High Rate - Direct Sequence Spread spectrum - vysoko rychlostní kódově rozprostřené spektrum

HSCSD - High Speed Circuit Switched Data – vysoko rychlostní přepínání datových okruhů

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers – institut elektrického a elektronického inženýrství

IP – internet protokol

ISM - Industrial, Scientific, Medical – průmysl , věda, lékařství

ITU - International Telecommunications Union - Mezinárodní telekomunikační unie

MCS - Modulation Coding Scheme – modulační kódové schéma

NRZ - Non Return to Zero - nenavrací k nule

NMT - Nordic Mobile Telecommunication – mobilní telekomunikace ve Skandinávských státech v systémech první generace

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplex - ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením

PCU - Packet Control Unit – jednotka řízení paketového provozu

PLCP - Physical Layer Convergence Procedure

PMD - Physical Medium Dependent

RLC/MAC - Radio Link Control, Medium Access Control – řízení radiové linky/jedinečný identifikátor síťového zařízení

RPE - LTP - Regular někdy Residual Pulse Excitation - Long Term Prediction - kódování s

SFD - Start Frame Delimiter - informační začátek rámce

TDMA - Time Division Multiple Access – vícenásobný přístup s časovým dělením

SGSN - Serving GPRS Support Node

TCH - Traffic Channel - provozní kanál

UMTS - Universal Mobile Telecommunication System – universální mobilní telekomunikační systém

Wi-Fi - Wireless Fidelity – bezdrátová věrnost

QPSK - Quadrature Phase Shift Keying - čtyřstavové fázové klíčování

8 PSK - 8 Phase Shift keying - osmistavové fázové klíčování

16QAM - quadrature amplitude modulation - šestnáctistavová digitální modulace

64QAM - quadrature amplitude modulation - šedesátičtyřstavová digitální modulace

Úvod

Bakalářská práce se zabývá porovnáním dvou bezdrátových systémů Wi-fi a GSM z hlediska přenosu dat, jakým způsobem jsou data přenášena, jakých teoretických a praktických přenosových rychlostí jsou schopna dosáhnout. U Wi-fi je kladen důraz na standard 802.11 a/b/g, u systému GSM na techniku GPRS.

V první části práce jsou uvedeny teoretické informace o obou systémech a seznamují čtenáře s jejich možnostmi.

Druhá část je věnována simulacím v Matlabu a v hlavně jeho nadstavbě Simulink, kde byly modelovány jednotlivé modulace pro přenos dat.

Ve třetí části jsou uvedeny výsledky a shrnutí praktického měření převážně při běžném používání.

Poslední kapitoly jsou věnovány celkovému shrnutí a porovnání vlastností obou systémů převážně z pohledu praktického použití.

1. GSM

GSM vzniklo v roce 1982 na základě požadavků evropských mobilních operátorů na CEPT (Conference of European Post and Telecommunications). Jejich požadavkem bylo vytvořit celoevropský mobilní komunikační standard. Ustanovila se pracovní skupina Groupe Special Mobile. Odtud zkratka GSM, dnes známá jako Global System for Mobile Communications (globální systém mobilní komunikace).



Obr. 1 - Logo GSM

Prvním krokem skupiny GSM bylo vytvořit seznam požadavků na mobilní systém:

- Hlavní prioritou byla propojitelnost s pevnou linkou.
- Použitelnost ve všech účastnících se zemích.
- Podpora všech služeb podporovaných pevnou telefonní sítí, ISDN, dalšími veřejnými sítěmi.
- Maximální flexibilita pro telekomunikační služby.

Kvalita služeb a bezpečnost:

- Kvalita hlasu musí být srovnatelná či lepší v porovnání s prvními analogovými systémy v pásmu 900 MHz.
- Podpora bezpečného přenosu bez citelného finančního zatížení pro účastníky.

Síťové aspekty:

- Číslovací a identifikační plán musí respektovat doporučení CCITT.
- Nesmí být požadovány větší změny pevné telefonní sítě pro spolupráci s mobilní sítí.
- Návrh systému musí dovolovat různé obměny struktury a rozšíření v jednotlivých sítích.
- Signalizační a síťové ovládací řídicí informace musí být chráněné. [20]

1.1. Rozdělení GSM systémů z hlediska generací

Generace 1 – analogové systémy – NMT, AMPS, TACS

Tato generace je ve znaku analogových systémů. Jejich zaměření se orientuje na hlasové služby. Jako přístupové techniky je použito systému FDMA (Frequency Division Multiple Access) a modulace FM (Frequency Modulation).

Příkladem těchto systémů jsou systémy NMT (Nordic Mobile Telecommunication). NMT je používán v Evropě ve Skandinávských státech na frekvencích 450 nebo 900 Mhz. Tento systém již umožňoval mezinárodní roaming.

Systém AMPS (Advanced Mobile Phone System/Service American Mobile Phone Standard), který našel uplatnění zejména v USA a Jižní Americe, pracuje ve frekvenčním pásmu 800 Mhz. Nevýhodou této generace je, že jeden kanál má pouze jeden uživatel.

Generace 2 – digitální systémy – GSM 900, DCS (GSM) 1800, PCS 1900, D-AMPS, PCS, CdmaOne, Digital CDMA, Digital TDMA

Podle používaného pásma se často hovoří o GSM 900, GSM 1800 (někdy nazýváno DCS 1800 - Digital Cellular System), GSM 1900 (někdy nazýváno PCS 1900 – Personal Communication System).

Principy, typy rámců, protokoly používané všemi výše uvedenými odnožemi GSM jsou shodné, jediná odlišnost je právě ve frekvenčním pásmu používaném pro přenos signálu mezi mobilní stanicí a sítí.

Jako přístupovou metodu používají tyto systémy techniku TDMA a digitální modulační techniky. I když jsou systémy digitální, jsou hlasové služby stále prioritou.

Generace 2.5 (2.75) – HSCSD, EDGE, GPRS

Tato generace je pouze upgradem druhé generace a je orientována na vysokorychlostní přenosy dat, především GPRS (viz kapitola GPRS). GPRS je technika pro paketově orientovaný přenos dat, proto není potřeba souvislý kanál pro přenos a příjem dat, ale vysílá a přijímá se v paketech. Tím je dosaženo účelného využití radiofrekvenčního spektra .

Generace 3 – digitální systémy – UMTS, CDMA 2000, 3G

U této generace je kladen důraz jen na vysokorychlostní přenos dat. V Evropě se tyto sítě nazývají UMTS, ve Spojených státech amerických CDMA 2000. Jde o systémy, které pracují v 2 GHz pásmu a dosahují rychlostí až 2Mbit/s.

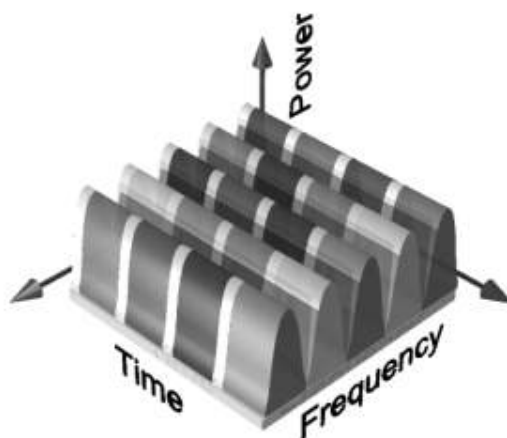
Následující tabulka (Tab. 1) ukazuje přenosové rychlosti využitelné pro uživatele dosažitelné různými systémy. [20]

Technologie	Komerčně zprovozněno	Přenosové rychlosti
GSM	1992	9.6 kbit/s
HSCSD	1999	57.4 kbit/s
GPRS	2000	192 kbit/s
EDGE	2001	384 kbit/s
UMTS	2002	144kbit/s až 2 Mbit/s

Tab. 1 - Porovnání rychlostí V GSM

1.2. Frekvenční pásmo GSM 2 a 2.5 (2.75) generace

Systém GSM 2. a 2.5 (2.75) generace využívá frekvenčního FDMA a časového TDMA dělení rádiového prostoru. FDMA (Frequency Division Multiple Access) je metoda mnohonásobného přístupu frekvenčním dělením, kdy dané frekvenční pásmo rozdělíme do subpásem, každému takovému subpásmu odpovídá jeden rádiový kanál. Princip TDMA (Time Division Multiple Access) rozděluje každý rádiový kanál na dalších 8 kanálků, které nazýváme timesloty. Délka jednoho timeslotu je 0.577ms (8 timeslotů = rámeček TDMA = 4.615 ms). To znamená, že o společný rádiový kanál se dělí více uživatelů v pevně stanoveném časovém sledu (obr. 2).



Obr. 2 - Frekvenční a časový multiplex

Celkový počet 156.25 bitů vysílaných v jednom timeslotu, dává datový tok celého TDMA rámce 270.833 kbps (22.8 kbps x 8 timeslotů + pomocné bity bursty). TDMA rámce jsou seskupovány do multirámců.

Protože se uživatel s mobilní stanicí (MS) pohybuje, je nutné vyřešit problém předávání hovoru (Handover). GSM používá handover řízený za spoluúčasti mobilní stanice, kdy mobilní stanice neustále měří kvalitu spojení (chybovost BER nebo poměr signál/šum) a výsledky předává na svoji základnovou stanici. Všechny základnové stanice v dosahu mobilní stanice také měří kvalitu spojení. Výsledky vzestupné a sestupné trasy se vyhodnotí v systému GSM a je-li třeba provést handover, zašle příslušná základnová stanice příkaz k přeladění.

Pro standard GSM bylo nejprve určeno pásmo v okolí kmitočtu 900 MHz (GSM 900), později s narůstající potřebou většího počtu účastníků bylo vyhrazeno i pásmo okolo 1800 MHz (GSM 1800, DCS 1800). U GSM 900 je pro uplink určeno 890 MHz – 915 MHz a pro downlink 935 MHz – 960 MHz. Souhrnná šířka pásma u obou směrů je 25 MHz. Systém umožňuje duplexní přenos metodou frekvenčního dělení FDD. Nosné vlny mají odstup po 200 kHz. Metodou FDMA tak vznikne 125 rádiových kanálů pro každý směr, přičemž pro zajištění okrajové rezervy se jich používá jen 124.

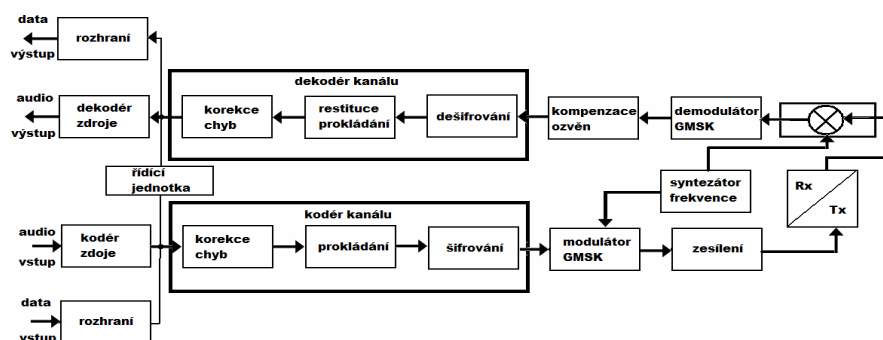
U GSM 1800 je pro uplink užíváno pásmo 1710 MHz – 1785 MHz, pro downlink 1805 MHz – 1880 MHz. Šířka pásma je větší než u GSM 900 a to 75 MHz a počet kanálů je 374 pro každý směr.

FDMA a TDMA rozděluje fyzickou vrstvu do fyzických kanálů. Fyzickým kanálem se rozumí kombinace přiděleného rádiového kanálu o šířce 200 kHz a časového intervalu.

Některé fyzické kanály se nepoužívají a jsou vyhrazeny jako oddělovací. Do fyzických kanálů jsou procesem mapování vloženy logické kanály. Pro hovor či data je určen provozní kanál TCH (Traffic Channel) a pro signalizaci či řízení pak kanál CCH (Control Channel). [19], [17]

1.3. Mobilní stanice

Mobilní stanice (obr. 3) je jak přijímač, vysílač, tak i modul SIM, který zajišťuje unikátní identifikaci uživatele. [19]



Obr. 3 - Blokové schéma mobilní stanice

1.4. Kódování zdroje

Zde se spojitý signál převádí na nespojitý číslicový. Na číslicové straně dochází k odstranění nadbytečných informací a tak se sníží datový tok na minimum. Na to se používá metoda parametrická, kde se přenášejí jen parametry signálu místo přímého kódování samotného tvaru signálu. Toto se označuje zkratkou RPE - LTP (Regular někdy Residual Pulse Excitation - Long Term Prediction, v češtině kódování s dlouhodobým odhadem). [19]

1.5. Kódování kanálu

Kvalitu přenosu ovlivňuje celá řada jevů (např.: rozptyl a lom signálu, Dopplerův efekt, rušení jiným zdrojem signálu). K odstranění těchto nežádoucích se používá kódování signálu.

Blokové kódy se používají při přenosu hovorů i dat. Tyto kódy jsou účinné při odstraňování rozptýlených chybných bitů, nehodí se však pro více chybových bitů vedle sebe. Na výstupu zdrojového kodéru jsou každých 20ms hovorové rámce o velikosti 260 bitů.

Tyto bity jsou rozděleny do tříd podle jejich funkce a významu:

- Třída 1a - 50 bitů nejvýznamnějších
- Třída 1b - 132 bitů méně významných
- Třída 2 - 78 bitů nejméně významných

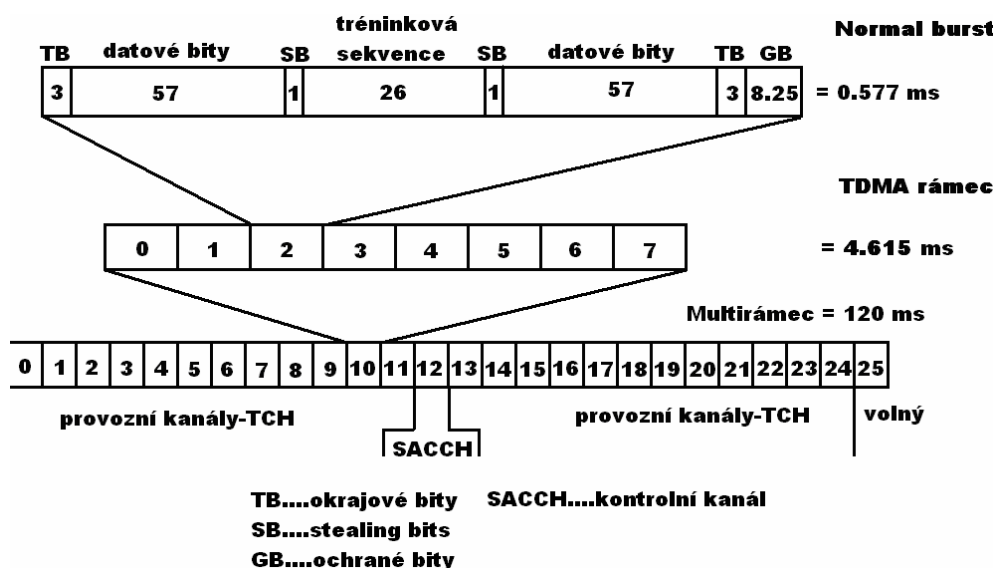
Třída 1a má ochranný 3bitový CRC kód (cyklický redundantní kód), je-li rámec poškozený natolik, že se s ním nedá pracovat, je odstraněn. 53 bitů spolu s 132 bity třídy 1b a 4 okrajové bity, tedy celkem 189 bitů, přicházejí na vstup konvolučního kodéru. Každý bit je zakódován do 2 bitů výstupních na základě určité kombinace 4 vstupních bitů. Zbylých 78 bitů třídy 2 se již nekóduje. Na výstupu konvolučního kodéru je 378 + 78 bitů. Konvolučním kódováním je vstupní signál o rychlosti 13

kbit/s (hovorový rámeček 260 bit / 20 ms), zvětšen a urychlen na rychlost 22.8 kbit/s (kódové bloky 456 bitů / 20 ms). [19]

1.6. Prokládání

Prokládáním (interleaving) se zvyšuje odolnost signálu proti shlukům chyb. Na vstup přicházejí každých 20 ms kódové bloky o velikosti 456 bitů, které jsou následně rozděleny do 8 skupin, každé o velikosti 57 bitů. Ty jsou potom prokládány se 4 posledními skupinami předchozího kódového bloku a 4 prvními následujícího bloku. Tímto proložení se zabraňuje vzniku shluku chybových bitů. Dojde-li k zarušení signálu a ke vzniku více chybných bitů pohromadě, je potom tento shluk chyb opačnou operací rozředen (odborně se tomu říká restituce prokládání - deinterleaving) zpět do bitových skupin a s těmito rozptýlenými chybnými bity si konvoluční dekodér už umí poradit. Samotnou restitucí může také vzniknout shluk chyb, ale pravděpodobnost je malá.

2 sousední proložené skupiny o 57 bitech tvoří burst o délce 114 bitů. Burst je doplněn tréninkovou sekvencí o délce 26 bitů, dále okrajovými a ochrannými bity, a to vše dohromady tvoří normal burst (*time slot*) o délce trvání cca 0.577ms. 8 normal burstů tvoří TDMA rámeček, 26 TDMA rámečků tvoří multirámeček, viz obr. 4. [19]



Obr. 4 - Normal burst, TDMA rámeček, multirámeček

1.7. Ekvalizace

Tréninková sekvence zmiňovaná výše je vkládána proto, aby za její pomoci byl přijímač schopný nastavit vnitřní obvody tak, aby přijatý signál byl co nejméně zkreslený a s co nejmenší chybovostí.

Přijímač v pravidelných intervalech odhaduje přenosovou funkci frekvenčního kanálu právě pomocí tréninkové sekvence vyslané uprostřed každého normal burstu a porovnává ji s referenční hodnotou uloženou v paměti. Na základě porovnání je nastaven korekční adaptivní filtr tak, aby jeho přenosová funkce byla v každém okamžiku inverzní k přenosové funkci frekvenčního kanálu. Tím je dosaženo co nejmenšího zkreslení. [19]

1.8. Šifrování

Šifrování je používáno k ochraně dat před nežádoucím odposlechem. Používá se proudové šifrování. Jakmile dojde k autentizaci mobilní stanice v síti, je vypočten na straně MS (mobilní stanice) a sítě GSM tajný klíč K_c o délce 64b. Tento klíč K_c a číslo TDMA rámce o délce 22 bitů jsou vstupy pro algoritmus A5 (obsažen v telefonu, ne na SIM kartě), který na výstupu generuje pseudonáhodnou posloupnost.

Na tuto posloupnost a 114 bitové bursty je použita operace XOR, čímž dojde k zašifrování přenášených dat. [19]

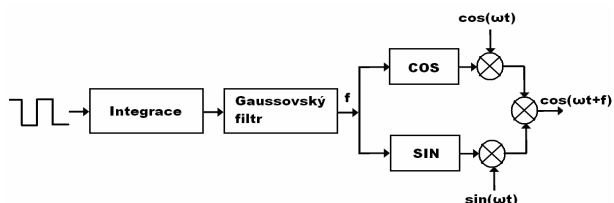
1.9. Modulace nosné vlny GMSK

Modulace GMSK (obr. 6) je speciálním případem modulace CPM (Continuous Phase Modulation, modulace se spojitou fází). Ta je zobecněním modulace CPFSK (Continuous Phase frequency Shift Keying, frekvenční klíčování se spojitou fází), jejímž základem je modulace FSK (frekvenční klíčování).

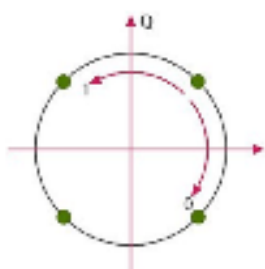
GMSK je 2 stavová modulace, jejímž základem je klíčování frekvenčním zdvihem (posuvem). Změní-li se vstupní signál z 0 na 1, dojde k posunutí (zdvihu) kmitočtu nosné vlny. Na tomto kmitočtu nosná zůstane do doby než se znovu změní logické úrovně na vstupu modulátoru. Schéma modulátoru GMSK nalezneme na obr. 5.

Základní princip GMSK má nedostatky, které je třeba řešit a omezit. Musí být zamezeno skokovým změnám fáze při změnách logických úrovní vstupního signálu, které způsobují nežádoucí zvýšení výkonové spektrální hustoty postraních laloků. Tomu se zamezuje tak, že bity přicházejí na vstup modulátoru v okamžiku, kdy

nosná vlna prochází nulou. Navíc jsou vstupní bity filtrovány dolní propustí gaussovského typu a tím zaobleny. Prodlouží se jejich doba náběhu a nosná vlna se může plynule přeladovat na danou frekvenci. [19]



Obr. 5 - Blokové schéma GMSK modulátoru



Obr. 6 - Klíčovací diagram GMSK modulace

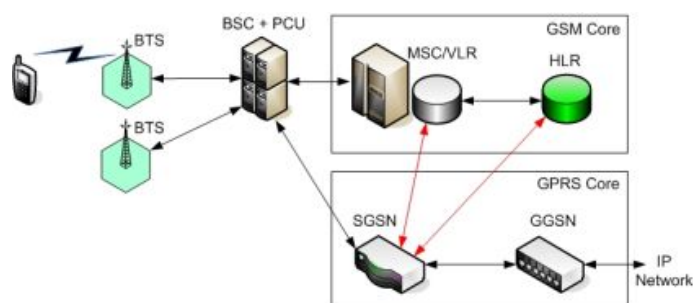
1.10. Frekvenční skoky nosné vlny

V GSM jsou nosné vlny od sebe vzdáleny 200 kHz a na jednu nosnou se vejde celkem 8 hovorů časově za sebou poskládaných v TDMA rámci trvajícím 4.615 ms.

Mobilní telefon a BTS (základnová stanice) nekomunikují pořád na stejné nosné vlně, ale přeskakují na jiné nosné a to přibližně 217krát za 1s. Pomalé frekvenční skoky (SFH - Slow Frequency Hopping) a algoritmus, který to vše řídí, je vysílán na kontrolním kanálu. [19]

2. GPRS (General Packet Radio Service)

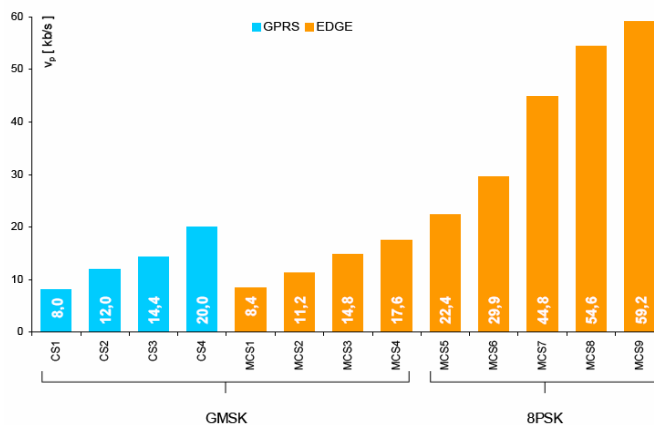
GSM síť se rozšířila tak, aby bylo možné používat přenos pomocí paketů. Tato nadstavba dostala označení GPRS (General Packet Radio Service). Rozšíření v podstatě spočívá v implementování další sítě, která využívá pouze stávající rádiové rozhraní. Řídící základnová jednotka (BSC) je doplněna o jednotku PCU (Packet Control Unit), která zajišťuje správu přenosových prostředků pomocí protokolů RLC/MAC (Radio Link Control, Medium Access Control) a konverzi paketů na rámce. Dalším blokem je SGSN (Serving GPRS Support Node), který je odpovědný za řízení spojení s mobilní stanicí, autentizaci, interakci s částmi GSM sítě, účtování a konverzi protokolů mezi IP a protokoly užívanými mobilní stanicí. Rozhraní mezi externí IP sítí tvoří zařízení GGSN (Gateway GPRS Support Node), které zajišťuje směrování paketů, alokaci IP adres a slouží jako Firewall. Po rozsáhlém upgradu sítě se síť začala označovat jako 2.5G. [13]



Obr. 7 - Včlenění GPRS do GSM 2.generace

2.1. Kódová schémata GPRS

Pro GPRS byla definována čtyři kódová schémata, označovaná CS1 až CS4 (Coding Scheme). Jednotlivá kódová schémata se liší množstvím ochranných informací. Tyto redundantní informace zajišťují správný příjem dat i při zvýšené chybovosti. A právě na základě chybovosti, dané rušením na rádiovém kanálu, se jednotlivá kódová schémata nasazují. Při silném rušení je nutné použít robustní kódové schéma CS1, které, na rozdíl od CS2 a CS3, používá kromě konvolučního kódování v poměru 1:2 i další přídavné kontrolní bity. Naproti tomu kódové schéma CS4 používá jen slabou ochranu. To mu umožňuje přenést větší množství užitečných dat, ovšem jen v případě příznivých podmínek na rádiovém kanálu.



Obr. 8 - Porovnání rychlostí a použití klíčování GPRS a EDGE

Na obr. 8 jsou vidět nejen rychlosti jednotlivých technologií, ale i kódová schémata. U EDGE je dáno devět modulačních kódových schémat (MCS – Modulation Coding Scheme). EDGE používá osmistavové fázové klíčování 8 PSK (8 - Phase Shift keying), ale i klíčování GMSK. Při nevhodných podmínkách na radiovém kanálu není efektivní používat klíčování 8-PSK a velké množství ochranných dat, proto je vhodnější použít klíčování GMSK, které je díky své robustnosti odolné proti rušení samo o sobě. Proto si jsou kódová schémata CS1-CS4 podobná se schématy MCS1-MCS4.

Výsledná rychlost připojení GPRS bude počet timeslotů násobený rychlostí kódování. Pokud tedy používáte při kódování CS-2 (12 kb/s viz obr.4) 4 timesloty $12\text{kb/s} * 4 = 48\text{kb/s}$. [13]

Třída GPRS	Počet timeslotů download	Počet timeslotů upload	Max. počet timeslotů současně
1	1	1	2
2	2	1	3
3	2	2	3
4	3	1	4
5	2	2	4
6	3	2	4
7	3	3	4
8	4	1	5
9	3	2	5
10	4	2	5
11	4	3	5
12	4	4	5

Tab. 2 - Rozdělení GPRS podle tříd

3. IEEE 802.11 a/b/g



Obr. 9 - Logo Wi-Fi

Bezdrátové sítě dle IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.11 a/b/g také označované zkratkou Wi-Fi (Wireless Fidelity) se staly dalším stupněm ve vývoji telekomunikací. Před několika lety se Wi-Fi dostalo mohutného rozmachu. Důvodem byla levná výroba čipů pro bezdrátové sítě v Asii. Bezdrátové sítě standardu IEEE802.11 pracují ve frekvenčním pásmu 2,4 - 2,4835 GHz. Toto pásmo se také často označuje jako ISM (Industrial, Scientific, Medical). V tomto nelicencovaném pásmu pracuje mnoho různých bezdrátových zařízení (např.: bluetooth produkty, ale i mikrovlnné trouby a v zahraničí i bezdrátové telefony). Kromě tohoto pásma se pro Wi-Fi sítě vyhrazuje ještě pásmo 5GHz.

Region	Frekvenční rozsah v GHz	Počet kanálů
USA	2,412 - 2,462	1-11
Evropa	2,412 - 2,472	1-13
Francie	2,457 - 2,472	10-13
Španělsko	2,457 - 2,462	10-11
Japonsko	2,4784	14

Tab. 3 - Povolené radiové frekvence pro Wi-Fi v pásmu 2,4 GHz

4. Vrstvový model 802.11

Obdobně jako u ostatních síťových zařízení a protokolů, vycházejí bezdrátové sítě založené na standardech 802.11 z referenčního modelu ISO/OSI. Standardy 802.11 jsou definovány na prvních dvou vrstvách tohoto modelu. [18]

Spojivá vrstva	LLC					
	IEEE 802.11 MAC					
Fyzická vrstva	IEEE 802.11 IR	IEEE 802.11 DSSS	IEEE 802.11 FHSS	IEEE 802.11a OFDM	IEEE 802.11b HR-DSSS	IEEE 802.11g OFDM

Obr. 10- Referenční model ISO/OSI pro Wi-Fi

4.1. Fyzická vrstva

Nejnižší položená je fyzická vrstva, která realizuje samotné vysílání a příjem dat bezdrátovými prostředky. V případě standardů 802.11 je na fyzické vrstvě definováno několik přenosových mechanismů. [18]

Standart	Přenosový mechanismus	Frekvence	Podporované přenosové rychlosti [Mbit/s]
802.11	FHSS, DSSS, IR	2,4GHz	1; 2
802.11b	HR-DSSS	2.4GHz	1; 2; 5.5; 11
802.11g	OFDM	2.4GHz	6; 9; 12; 18; 24; 36; 48; 54
802.11a	OFDM	5.2 - 5.5GHz	6; 9; 12; 18; 24; 36; 48; 54

Tab. 4 - Přehled Wi-Fi standartů

Standard 802.11 umožňuje na rozdíl od jeho nástupců přenos i pomocí infračervených vln (IR). Tento způsob přenosu se příliš nerozšířil. Hlavní příčinou byl malý dosah, nemožnost překlenout překážky a nízká přenosová rychlost, která nepřesáhla 2 Mbit/s. Dnes používaná rádiová rozhraní využívají přenosové mechanismy FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) a OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex).

Systémy založené na FHSS pracují v pásmu 2.4 GHz a k přeskokům využívají 79 kanálů o šířce 1 MHz. Další systémy pracující v pásmu 2.4 GHz jsou založeny na technice rozprostření spektra DSSS, HR-DSSS (High Rate - Direct Sequence Spread Spectrum) a ERP-PBCC (Extended Rate PHY - Packet Binary Convolutional Coding). Pro tyto mechanismy je vyžadována šířka komunikačního kanálu 22 MHz. Systémy založené na mechanismu OFDM, jsou použitelné v pásmech 2.4 GHz a

5 GHz pro kanály široké 5, 10 a 20 MHz. Přenosová rychlost je u všech standardů 802.11 měněna dynamicky podle kvality a úrovně přijímaného signálu.

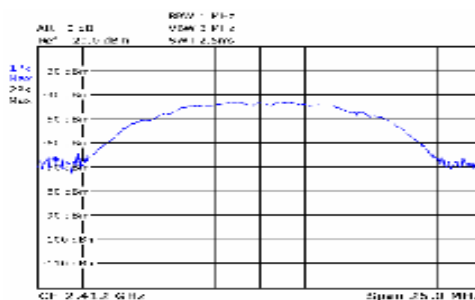
Ve všech standardech 802.11 je fyzická vrstva rozdělena do dvou podvrstev:

- PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) – v této podvrstvě se k datovým rámcům MAC (Medium Access Control) podvrstvy přikládají informace o použitém přenosovém mechanismu a modulaci. Díky této podvrstvě je přenášený datový rámec nezávislý na typu fyzické vrstvy. Do této podvrstvy je implementována rovněž funkce CCA (Clear Channel Assessment), která poskytuje odezvu pro MAC vrstvu o připravenosti přenosového média.
- PMD (Physical Medium Dependent) – tato podvrstva je zodpovědná za přenos dat mezi jednotlivými vysílači a přijímači. Z podvrstvy PLCP jsou data v závislosti na použitém přenosovém mechanismu ve vysílači vysílána do bezdrátového prostředí, kde jsou na straně přijímače pomocí PMD přijímána a předávána podvrstvě PLCP.

V následujícím textu bude postupně popsána struktura PLCP podvrstvy dvou dnes nejpoužívanějších standardů 802.11b, 802.11a a její návaznost na vyšší vrstvy (MAC, LLC atd.). Jelikož jsou v obou standardech použity jiné přenosové mechanismy, liší se i struktury jejich PLCP podvrstev. [18]

4.1.1. Fyzická vrstva 802.11b

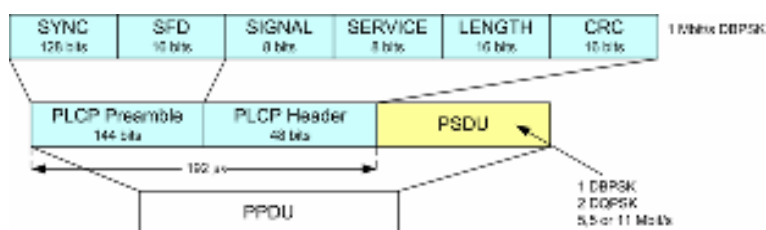
Standard 802.11b je definován v pásmu 2,4 GHz. Komunikační kanál je široký 22 MHz a jsou pro něj definovány přenosové rychlosti 1, 2, 5.5 a 11 Mbit/s. Data jsou modulována pomocí komplementárního kódového klíčování CCK (Complementary Code Keying) a přenášena systémem HR-DSSS (obr. 10).



Obr. 11 - Frekvenční spektrum HR-DSSS signálu

Pokud se použije paketové binární konvoluční kódování PBCC v kombinaci s přenosovým systémem ERP lze propustnost na fyzické vrstvě zvýšit na 22 nebo 33 Mbit/s. Systém ERP-PBCC, uvedený na trh firmou Texas Instruments, byl dlouhou dobu uzavřený standard, a proto se s jeho implementací dnes moc nesetkáme.

U standardu 802.11b jsou definovány dvě možné struktury podvrstvy PLCP (dlouhá a krátká preamble). Všechny systémy kompatibilní se standardem 802.11b musí podporovat dlouhou preamble. Krátká preamble byla zavedena pro zvýšení propustnosti při přenosu dat citlivých na zpoždění (hlas, video-přenosy, apod.). PLCP preamble a hlavička jsou společně s přenášenými daty spojeny do PPDU rámce, který je zobrazen na obr.12.



Obr. 12 - PPDU rámec dle IEEE 802.11b

PPDU rámec dle standardu IEEE 802.11b se skládá z následujících polí:

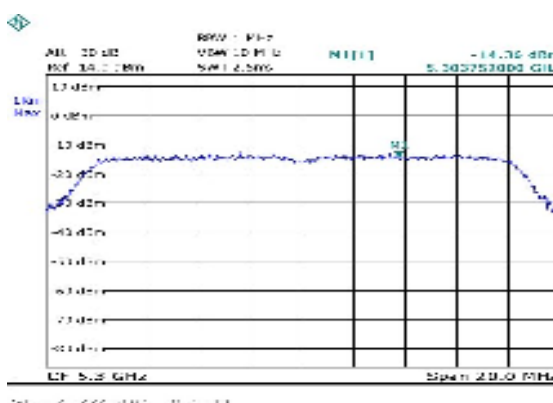
- PLCP preamble - je tvořena synchronizačním polem o délce 128 bitů při dlouhé preamble a 56 bitů v případě krátké preamble. 16-ti bitové pole SFD (Start Frame Delimiter) označuje informační začátek každého rámce.
- PLCP hlavička - je dlouhá 48 bitů a rozdělena do 4 bloků, které mají následující funkci: 8 bitů v poli SIGNAL je vyhrazeno pro určení přenosové rychlosti datového bloku (1; 2; 5,5; 11 Mbit/s). Pole SERVICE o délce 8 bitů informuje o použitém typu modulace (CCK, PBCC) a dalších parametrech pro úspěšné přenesení datového rámce. V tomto poli jsou rovněž některé bity vyhrazeny pro budoucí použití. Šestnáctibitové pole s názvem LENGTH informuje o délce přenášených dat v bloku PSDU. O zabezpečení PLCP hlavičky se stará 16-ti bitový CRC (Cyclic Redundancy Check) kód umístěný v poli s názvem CRC.
- PSDU – tento blok připojený za PLCP preamble a hlavičku obsahuje data z vyšších vrstev MAC. Informace může být zde přenášena vyšší rychlostí

než v předcházejícím PLCP bloku. Maximální velikost bloku PSDU je 2500 bajtů.

Aby byla zaručena kompatibilita i se staršími zařízeními, je celý PLCP blok (preamble + hlavička = 24 bajtů) přenášen základní rychlostí 1 Mbit/s (modulace BPSK). Použití základní přenosové rychlosti u přenosu PLCP bloku způsobuje značnou režii, která se může dostat až na 60 % rychlosti fyzické vrstvy. [18]

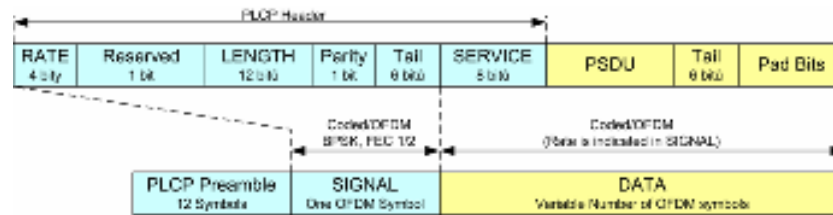
4.1.2. Fyzická vrstva 802.11a/g

V pásmech 2,4 a 5 GHz je pro přenos vysokorychlostního datového toku použitý systém OFDM. V systému OFDM bezdrátových sítí 802.11a a 802.11g je kanál o šířce 20 MHz rozdělen do 52 subkanálů, ze kterých je 48 subkanálů vyhrazeno pro přenos dat, a zbývající čtyři nesou pilotní sekvenci.



Obr. 13 - Frekvenční spektrum OFDM signálu

Každý ze subkanálů je modulován pomocí vícecestavové kvadrurní amplitudové modulace (QAM) nebo modulací s klíčováním fázovým posuvem (PSK). Soubor 52 subkanálů představuje jeden OFDM symbol, který je vysokofrekvenční část systému schopen nejen vyslat do bezdrátového prostředí, ale také jej přijmout. Uživatelská data mohou být přenášena rychlostí 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 a 54 Mbit/s při šířce kanálu 20 MHz. Standard rovněž definuje poloviční a čtvrtinovou šířku kanálu. Při poloviční šířce kanálu 10 MHz jsou dostupné přenosové rychlosti 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24 a 27 Mbit/s. Kanál se šířkou 5 MHz umožňuje komunikovat na rychlostech 1.5, 2.25, 3, 4.5, 6, 9, 12 a 13.5 Mbit/s.



Obr. 14 - PDU rámeček dle IEEE 802.11a/g

Obdobně jako u předchozího standardu jsou přenášená data organizována do PDU rámečků. Struktura rámečku je zobrazena na obr. 14. PDU rámeček uvozuje preamble, za ní následuje řídicí blok, který je vždy tvořen jedním OFDM symbolem a jeho subkanály jsou modulovány BPSK modulací a doplněny ochranným konvolučním kódem s poměrem počtu bitů užitečné informace k celkovému počtu bitů včetně redundance 1:2 (tzv. kódový poměr – coding rate).

V následujícím datovém bloku již není použita fixní modulace, ale lze ji dynamicky měnit podle kvality přijímaného signálu.

PPDU rámeček dle standardu IEEE 802.11a/g se skládá z následujících polí:

- PLCP preamble – tvoří dvanáct OFDM symbolů, kdy je prvních 10 krátkých (0,8 us) a další dva jsou dlouhé (4 us). Oba uvedené časy odpovídají přenosu OFDM symbolu v kanálu širokém 20 MHz.
- PLCP hlavička - je rozdělena na dvě části. První část, která má 24 bitů, je umístěna v bloku SIGNAL. Druhá je umístěna v datové části bloku SERVICE a její délka je 16 bitů. Údaje, důležité pro správné přečtení datové části, jsou uloženy v blocích RATE a LENGTH. Blok RATE specifikuje přenosovou rychlost datového bloku (DATA) a LENGTH jeho délku. Zbylé bloky jsou určeny k řízení a synchronizaci komunikujících zařízení.
- DATA – v tomto bloku jsou přenášena nejen uživatelská data z vyšších vrstev (PSDU), ale i servisní informace. Celá datová část může být přenášena na rozdíl od předchozích částí (PLCP preamble a hlavička) vyššími rychlostmi. [18]

5. Modulace WI-FI

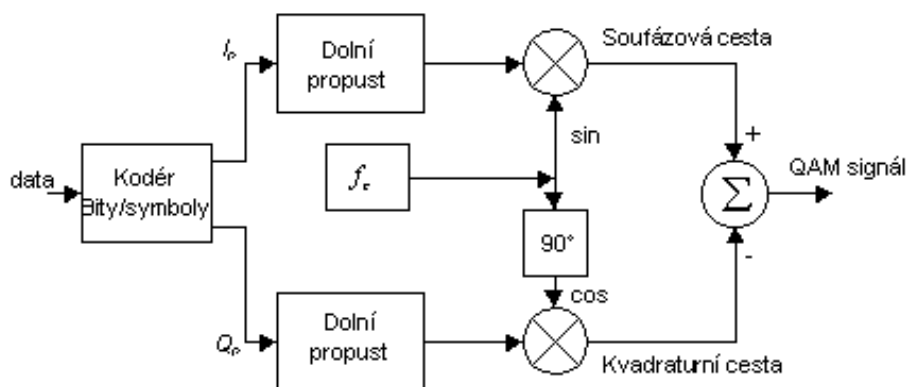
Použité modulace u WI-FI jsou 64QAM, 16QAM, QPSK, BPSK. V následující kapitole si popíšeme jednotlivé typy těchto modulací.

Modulace	Kódový poměr	Počet všech bitů na subkanál	Počet bitů na OFDM symbol	Počet datových bitů na OFDM symbol	Přenosová rychlost pro kanál 20 MHz [Mbit/s]	Přenosová rychlost pro kanál 10 MHz [Mbit/s]	Přenosová rychlost pro kanál 5 MHz [Mbit/s]
BPSK	1/2	1	48	24	6	3	1,5
BPSK	3/4	1	48	36	9	4,5	2,25
QPSK	1/2	2	96	48	12	6	3
QPSK	3/4	2	96	72	18	9	4,5
16-QAM	1/2	4	192	96	24	12	6
16-QAM	3/4	4	192	144	36	18	9
64-QAM	2/3	6	288	192	48	24	12
64-QAM	3/4	6	288	216	54	27	13,5

Tab. 5 - Přehled modulací v 801.11

5.1. Modulace 16 a 64 QAM

Modulace QAM (Quadrature amplitude modulation) představuje běžně používanou a propracovanou modulační techniku, používanou ve velké míře v modemech pracujících v hovorovém pásmu a v mikrovlnných radiových systémech. Přicházející data jsou nejprve rozdělena do dvou toků s poloviční přenosovou rychlostí a potom modulována na dvojici ortogonálně vzájemně posunutých nosných (obr. 15).

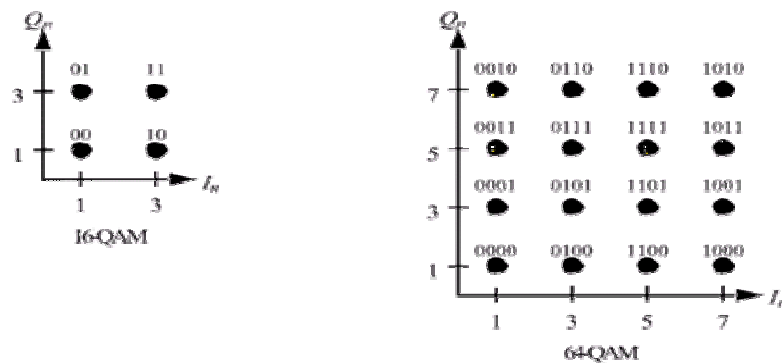


Obr. 15- Blokové schéma QAM modulace

Na obr. 16 jsou vidět 16-ti a 64 stavové QAM uspořádání (znázorněn je vždy první kvadrant). Například u 16-ti stavové QAM je možné přenášet 4 bity pomocí jednoho symbolu. Zvýšení počtu bodů signálového uspořádání má stejný efekt jako zvýšení počtu signálových úrovní u jednodimenzionální PAM modulace. Proto je

nutné udělat kompromis mezi používanou šířkou pásma a nezbytným odstupem signál/šum, aby se spolehlivě přeneslo zvolené uspořádání. Pravoúhlé uspořádání 16-QAM vyžaduje velikost SNR (odstup signál/šum) 21,5 dB a 64-QAM vyžaduje 27,5dB.

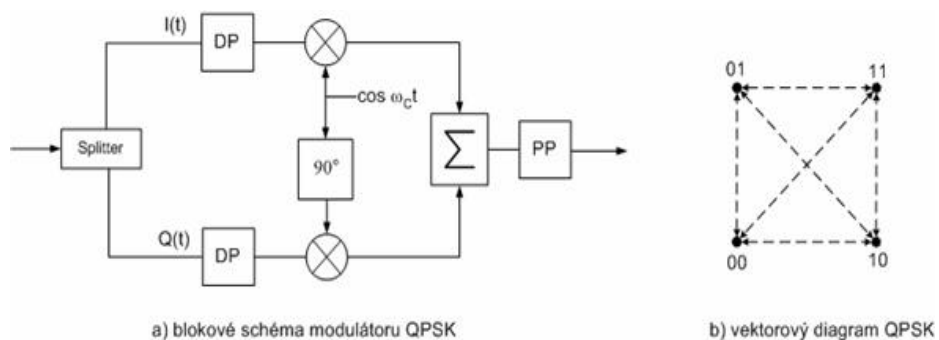
Velikost symbolového toku u QAM systémů určuje šířku pásma přenášeného signálu. To je určitou nevýhodou QAM systémů. Přizpůsobení rychlosti přenášeného datového toku je možné změnou počtu stavů QAM modulace signálu. To ale dovoluje pouze několik extrémně velkých skoků a tudíž nepostačuje pro plné využití kapacity přenosového média. Další možnost pro přizpůsobení velikosti přenášeného datového toku je změna symbolové rychlosti. To ale vyžaduje následné přizpůsobení nosné frekvence (nutné pro dosažení optimálního přenosového pásma) a způsobuje zvýšení složitosti QAM systémů. [12]



Obr. 16 - 16 a 64 bodové QAM uspořádání.

5.2. Modulace QPSK

Jedná se o čtyřstavové fázové klíčování. Blokové schéma je znázorněno na obr. 17a.



Obr. 17- QPSK

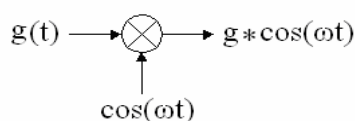
Do modulátoru QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) vstupuje digitální signál. Nejdříve je rozdělen vstupní signál do dvou větví I a Q . Signál je dále filtrován a

následně modulován nosným signálem. Z obou větví je sečten a znovu filtrován. Získáme tím modulovaný signál QPSK.

Obr. 17b znázorňuje vektorový diagram QPSK modulace. Při změnách stavů, kdy se současně mění oba bity ($11 \leftrightarrow 00$ nebo $01 \leftrightarrow 10$) se amplituda nosné postupně zmenšuje až k nule a potom se opět zvětšuje na původní hodnotu, avšak s fází posunutou o 180° . Doba přechodu z jednoho do druhého stavu je sice velice krátká, přesto vzniká v modulovaném signálu parazitní amplitudová modulace s hloubkou modulace 100%. Průchodem signálu QPSK přes nelineární obvod dochází k obohacení spektra a zvýšení nežádoucích spektrálních složek signálu, což je nevýhoda modulace QPSK. [20]

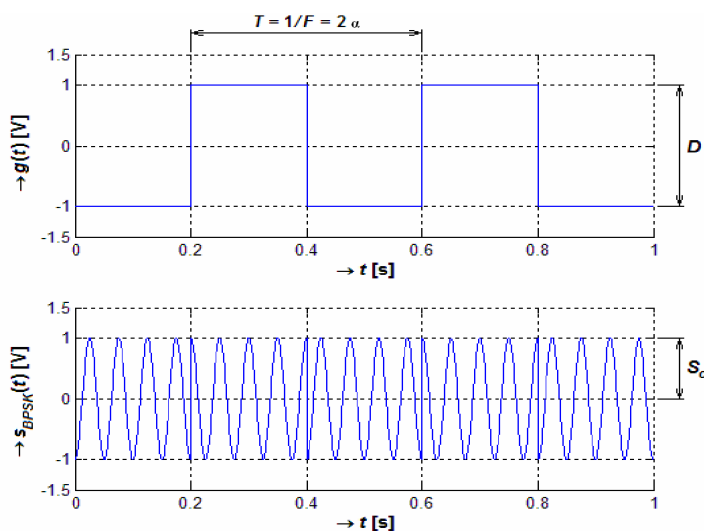
5.3. Modulace BPSK

Jedná o dvoustavovou fázovou modulaci. Na obrázku 18 do násobičky vstupuje modulační signál obdélníkový (bipolární NRZ) a signál harmonický nosný, na výstupu je fázově modulovaný signál.



Obr. 18 - modulátor BPSK

Např. (obr. 19): Obdélníkový modulační signál $g(t)$ (bipolární NRZ) s výškou pulsu $D = 2$ V a dobou trvání signálového prvku $\alpha = 0.2$ s, nosný signál $\cos(2\pi 20t)$. [15]



Obr. 19 - příklad BPSK signálu

6. Simulace systémů pro přenos dat

V následujících kapitolách budou popsány jednotlivé systémy pro přenos dat. Každá kapitola obsahuje popis modelu šíření signálu, popis použité modulační techniky a stručný popis výsledků simulací pro různé typy šíření signálu (šíření bez odrazu, s odrazy, za různých poměrů signál/šum). Podrobnější porovnání jednotlivých metod a typů přenosu je uvedeno v závěru této kapitoly. Jako hlavní porovnávací parametr bude sloužit BER (Bit Error Rate, Bitová chybovost). BER je definována poměrem chybně přijatých bitů ku celkovému počtu přijatých bitů za určitou dobu měření.

6.1. Systém 802.11g

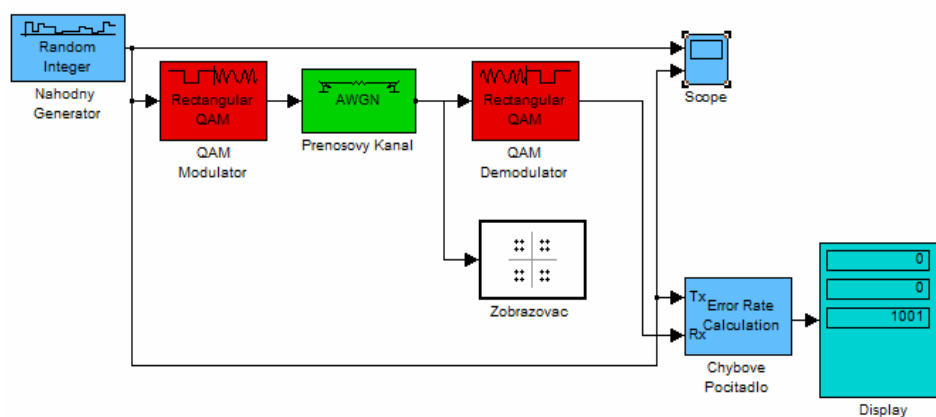
Tento systém pracuje s modulačními technikami 64QAM, 16QAM, QPSK, BPSK. Systémy modulací jsou podrobněji popsány v kapitolách 5.1, 5.2, 5.3.

6.2. Modulace 64QAM

Při použití této modulační techniky obdržíme největší přenosovou rychlost 54 Mbit/s. S tím jsou však samozřejmě spojeny vysoké nároky na přenosovou cestu v tom smyslu, že musíme dodržet značně vysoký odstup S/N. Ten by měl podle doporučení být alespoň 27,5 dB.

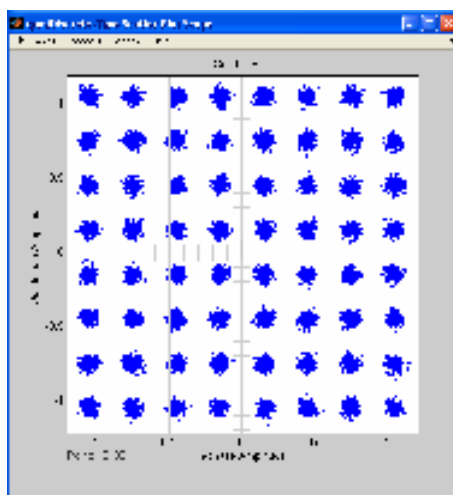
6.2.1. Modulace 64QAM pro šíření přímou cestou

Na obr. 20 je uveden model přenosového systému využívajícího modulaci 64QAM. Model se skládá z náhodného generátoru celých čísel, QAM modulátoru, přenosového kanálu, QAM demodulátoru, konstelačního zobrazovače a chybového počítadla. Jedná se o model uvažující pouze signál přímého šíření.



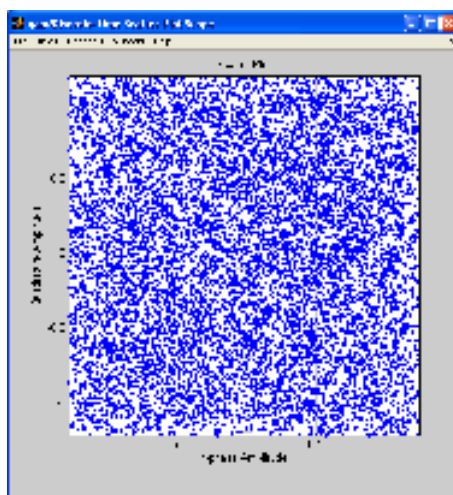
Obr. 20 - Model systému s modulací 64QAM – šíření signálu bez odrazu

Na obr. 21 je uveden konstelační diagram modulační techniky 64QAM, který je zobrazen za ideálních podmínek (tzn. minimální odstup signál šum je 27.5dB). Všechny modulační techniky uváděné v dalších kapitolách vycházejí z předpokladu používání stejného maximálního výkonu. To nám umožňuje srovnání jednotlivých modulačních technik především z hlediska poměru signál/šum, případně při šíření s jedním nebo více odrazy signálu.



Obr. 21 - Zobrazení 64QAM šíření signálu bez odrazu při S/N 27.5dB

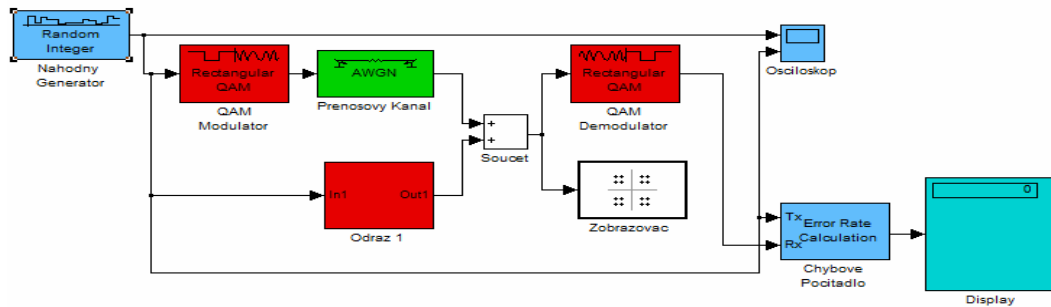
Na obr. 22 je uveden konstelační diagram 64QAM. Pro názornost byl zvolen mezní poměr S/N 12dB, při kterém dochází k velkému chybovému přenosu (BER = 0,466).



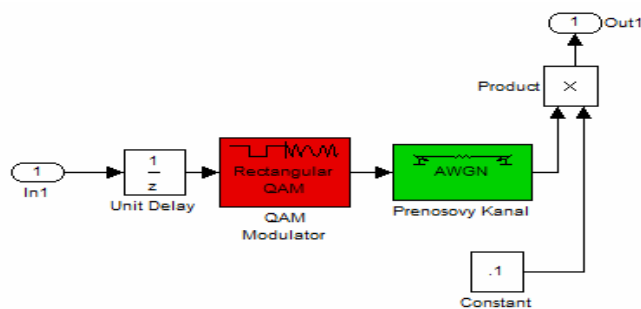
Obr. 22 - Zobrazení 64QAM bez odrazu s S/N 12dB

6.2.2. Modulace 64QAM s jedním odrazem při S/N 12dB

Model pro simulaci s jedním odrazem, který se velice podobá modelu šíření přímou cestou (obr. 20 viz kapitola 6.2.1), s tím rozdílem, že byl přidán další přenosový kanál (na obr. 23. jako Odraz 1 a na obr. 24 řešení odrazu), který měl změněné parametry vůči cestě přímé. Změny se týkaly zpoždění signálu a jeho zesílení. Zesílení bylo nastaveno na 10% signálu původního. Pro tento model byl stanoven S/N 12dB.

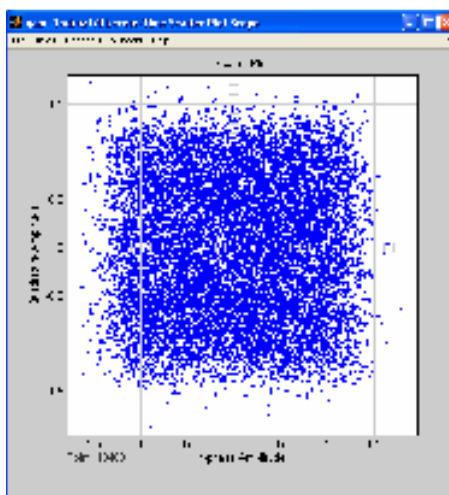


Obr. 23 - Model 64QAM s jedním odrazem



Obr. 24 - Model odrazu u 64QAM s výkonem 10% původního signálu

Na obr. 25 je konstelační diagram 64QAM s jedním odrazem při odstupu signál/šum 12dB. Při tomto měření dosáhl BER hodnoty 0.65.



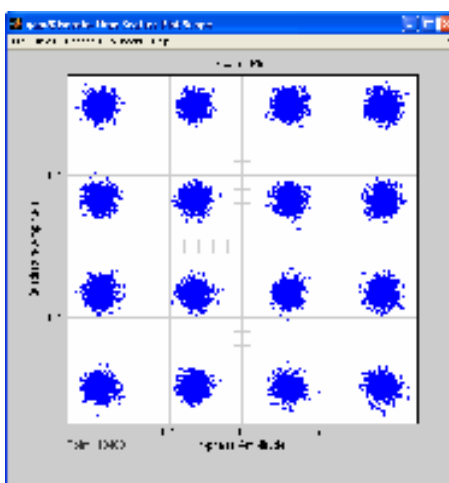
Obr. 25 - zobrazení 64QAM s jedním odrazem s S/N 12dB

6.3. Modulace 16QAM

Modulační technika 16QAM je použita pro WI-FI v tom případě, že nároky na přenosovou cestu jsou větší než je 64QAM schopna pojmout. Při poměrně vysokém rušení je schopna přenášet rychlostí až 11Mbit/s. Doporučený odstup signál/šum je 21.5dB. Rozestup mezi jednotlivými symboly byl nastaven na hodnotu 0.66, aby odpovídal výkonu 64QAM.

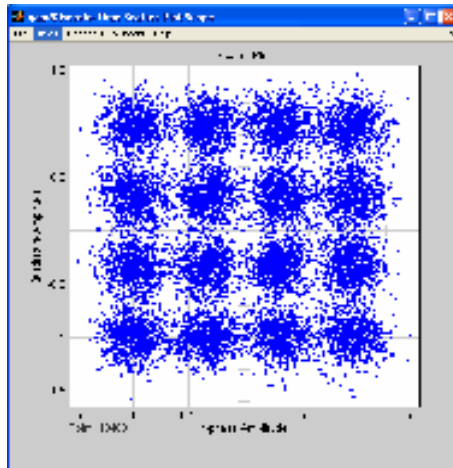
6.3.1. Modulace 16QAM pro šíření přímou cestou

V simulacích se v podstatě jedná o model 64QAM (viz kapitola 7.2.1 a obr. 19), s tím rozdílem, že v modulátoru, demodulátoru a generátoru byla nastavena hodnota M-ray z 64 na 16.



Obr. 26 - zobrazení 16QAM bez odrazu při S/N 21.5dB

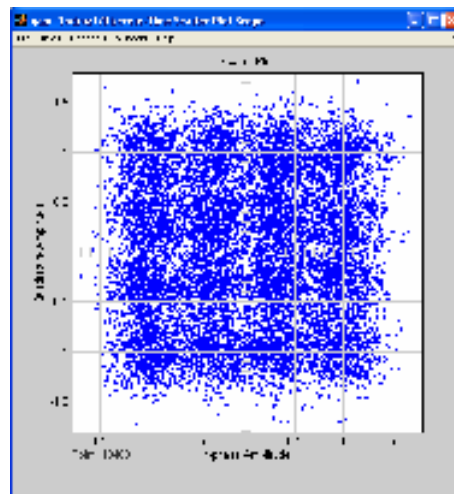
Na obr. 26 je zobrazený konstelační diagram při BER = 0, kde je hodnota odstupu signál/šum nastavena na 21.5dB. Obr. 27 obrazuje situaci, kdy BER dosahuje hodnoty 0.04 při S/N 12dB.



Obr. 27 - Zobrazení 16QAM bez odrazu a s S/N 12dB

6.3.2. Modulace 16QAM s jedním odrazem při S/N 12dB

Opět v simulacích se v podstatě jedná o model 64QAM (viz kapitola 6.2.2 a obr. 23 a obr. 24), s tím rozdílem, že v modulátoru, demodulátoru a generátoru byla nastavena hodnota M-ray z 64 na 16 a toto nastavení bylo provedeno i pro odraz.



Obr. 28 - Zobrazení 16QAM s jedním odrazem při 12dB S/N

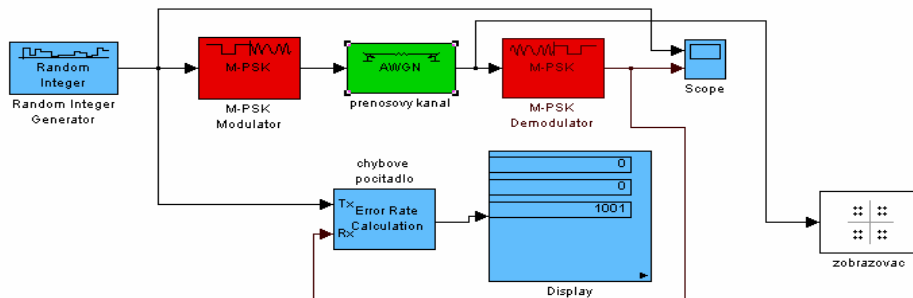
Obr. 28 popisuje situaci, kdy S/N je nastaven na 12dB a BER se vyšplhala na hodnotu 0.16.

6.4. Modulace QPSK

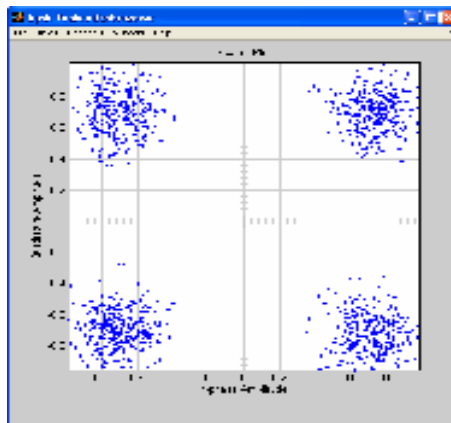
Tato modulace je použita, když je opravdu velmi špatná přenosová cesta. Např., kdy mezi vysílačem a přijímačem stojí překážka jako je strom nebo jsou nevhodné podmínky pro přenos. To může být nevhodné počasí (hydrometeory) nebo rušení od jiných vysílačů pracujících na stejné nebo blízké frekvenci. QPSK dosahuje rychlosti až 11Mb/s.

6.4.1. Modulace QPSK pro šíření přímou cestou

Na obr. 30 je vidět model pro QPSK, který se skládá z generátoru náhodných čísel, M-PSK modulátoru, přenosového kanálu, M-PSK demodulátoru, chybového počítadla, displaye a konstelačního zobrazovače (obr. 29). U celočíselné generátoru, M-PSK modulátoru a demolátoru byla hodnota M-ray nastavena na 4.

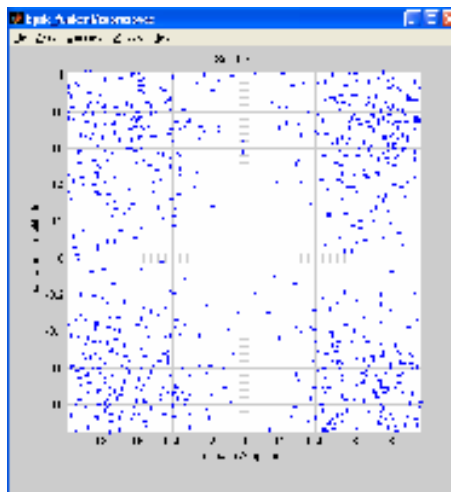


Obr. 29 - Model QPSK



Obr. 30 - Zobrazení QPSK – šíření signálu bez odrazu při S/N 15dB

Na obr. 30 je konstelační diagram modulace QPSK při BER = 0 a S/N 15dB.

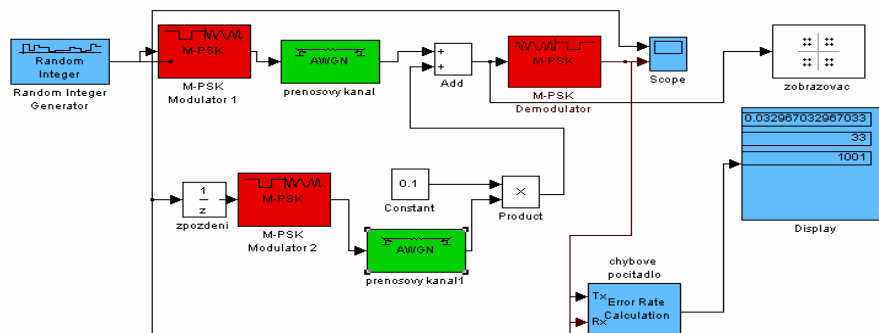


Obr. 31 - Zobrazení QPSK – šíření signálu bez odrazu při S/N 8dB

Obr. 31 představuje situaci, kdy je při S/N 8dB BER = 0.014.

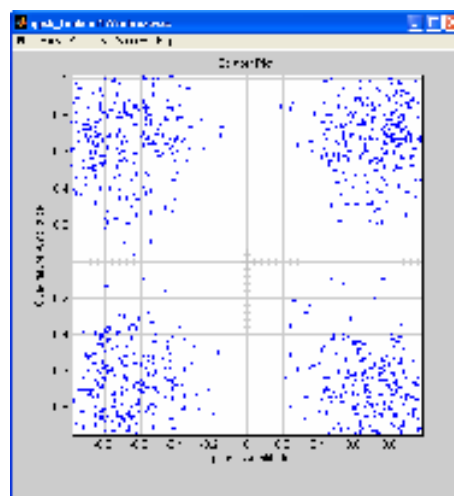
6.4.2. Modulace QPSK s jedním odrazem při S/N 12dB

Na obr. 32 je vidět model QPSK s jedním odrazem, který je řešen na rozdíl od QPSK s přímým šířením, přidáním druhé přenosové cesty, která se skládá ze zpoždění, modulátoru a násobičky. Odraz, jak je vidět, je zpožděný a zesílený na 10% původního signálu.



Obr. 32 - Model QPSK s jedním odrazem

Obrázek 33 zobrazuje konstelační diagram QPSK s jedním odrazem při S/N 12dB, kde dochází k BER = 0.001.



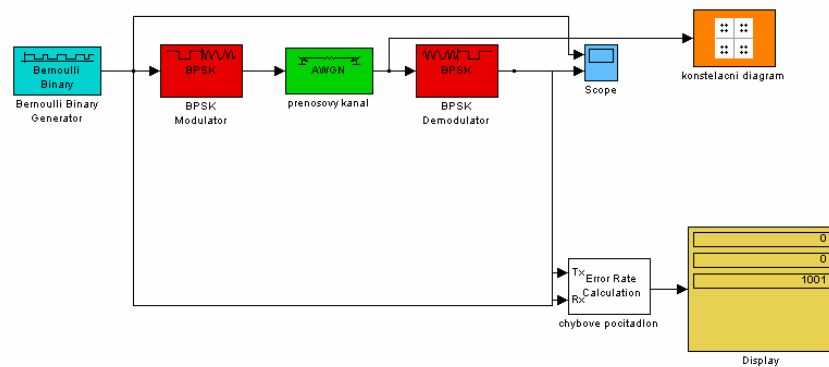
Obr. 33 - Model QPSK s jedním odrazem S/N 12dB

6.5. Modlace BPSK

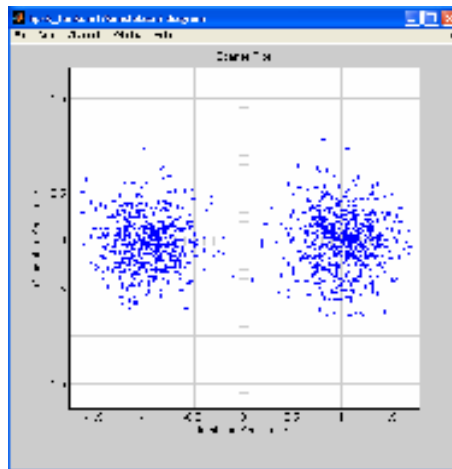
Při použití modlace BPSK je potřeba jeden výstupní symbol modulátoru přenést dvěma změnami fáze, přenosová rychlost je snížena na 5.5 Mb/s.

6.5.1. Modlace BPSK pro šíření přímou cestou

U modelu BPSK (obr. 34) se v podstatě jedná o stejný model jako v předchozích případech, s tím rozdílem, že některé bloky byly vyměněny za požadované pro danou simulaci.

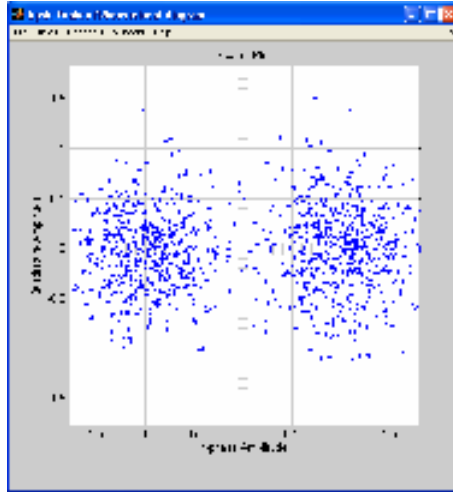


Obr. 34 - Model BPSK



Obr. 35 - Zobrazení BPSK bez odrazu s S/N 8dB

BPSK (obr. 35) při šíření přímou cestou s poměrem signál šum 8dB má BER = 0.

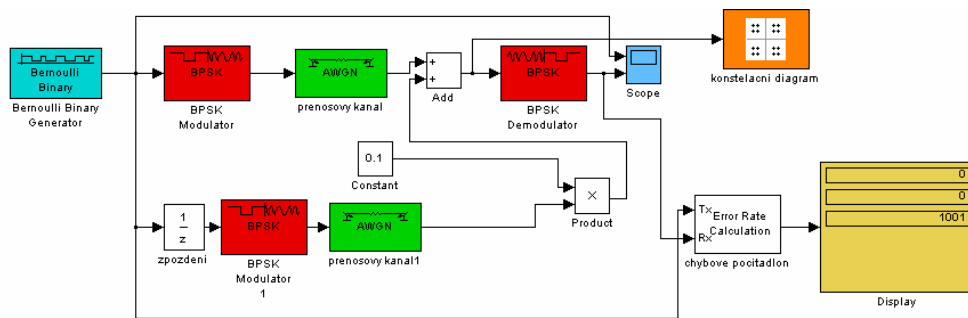


Obr. 36 - Zobrazení BPSK bez odrazu při S/N 5dB

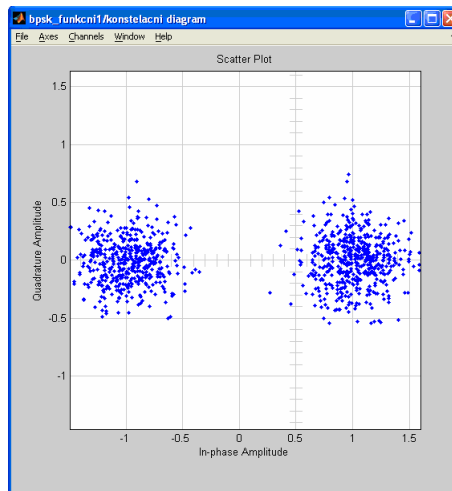
Obr. 36 zobrazuje konstelační diagram BPSK při šíření přímou cestou s odstupem signál šum 5dB, kde BER je velmi nízká a dosahovala hodnoty 0,008.

6.5.2. Modulace BPSK s jedním odrazem při S/N 12dB

Model BPSK s jedním odrazem na obr. 37, který je řešen přidáním druhé přenosové cesty, která se skládá ze zpoždění, modulátoru a násobičky. Odraz má zesílení 10% původního signálu.



Obr. 37 - Model BPSK s jedním odrazem



Obr. 38 - Zobrazení BPSK s jedním odrazem při S/N 12 dB

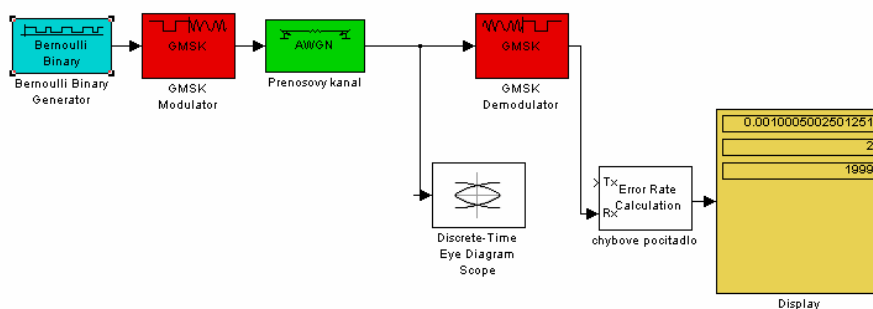
Konstelační diagram na obr. 38 ukazuje BPSK s jedním odrazem s odstupem signál/šum 12dB a BER = 0.

7. Systém GSM a modulace GMSK

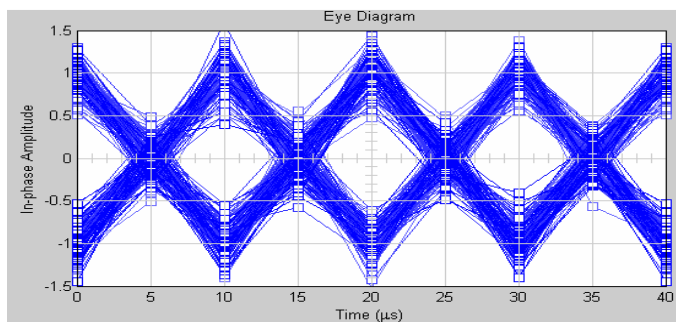
Modulace GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) je jedna ze dvou modulací používaných v systému GSM druhé (2.5, 2.75) generace. Data přenášená pomocí GPRS s modulací GMSK dosahují relativně malých přenosových rychlostí, které by se měly pohybovat od 8 - 20 kb/s v jednom timeslotu.

7.1. Modulace GMSK pro šíření přímou cestou

Na obrázku 39 je vidět model systému GMSK.

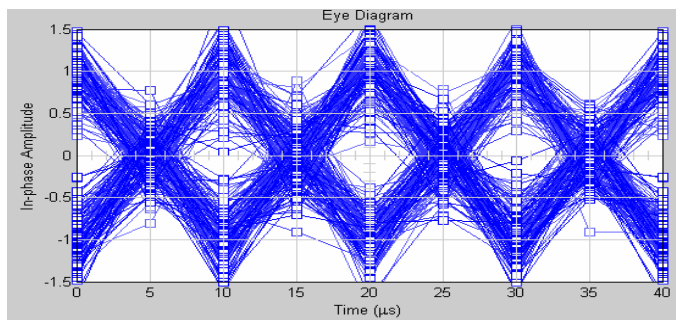


Obr. 39 - Model modulace GMSK



Obr. 40 - Diagram oka GMSK při S/N 12dB

Obrázek 40 ukazuje modulaci GMSK při šíření přímou cestou a S/N 12dB (BER = 0).

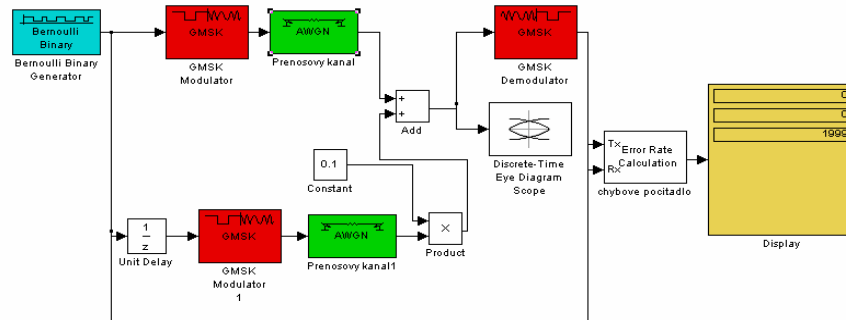


Obr. 41 - Diagram oka GMSK při S/N 8dB

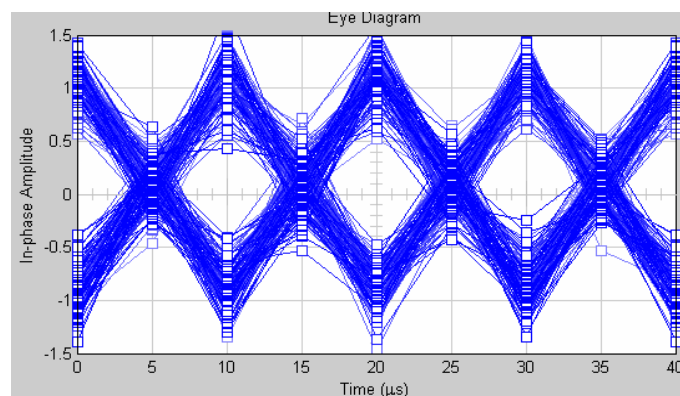
Obr. 41 znázorňuje situaci, kdy BER je 0.001 při S/N 8dB.

7.2. Modulace GMSK s jedním odrazem při S/N 12dB

Obr. 42 udává model s jedním odrazem při S/N 12dB.



Obr. 42 - Model Modulace GMSK s jedním odrazem při S/N 12dB



Obr. 43 - Diagram oka GMSK s jedním odrazem při S/N 12dB

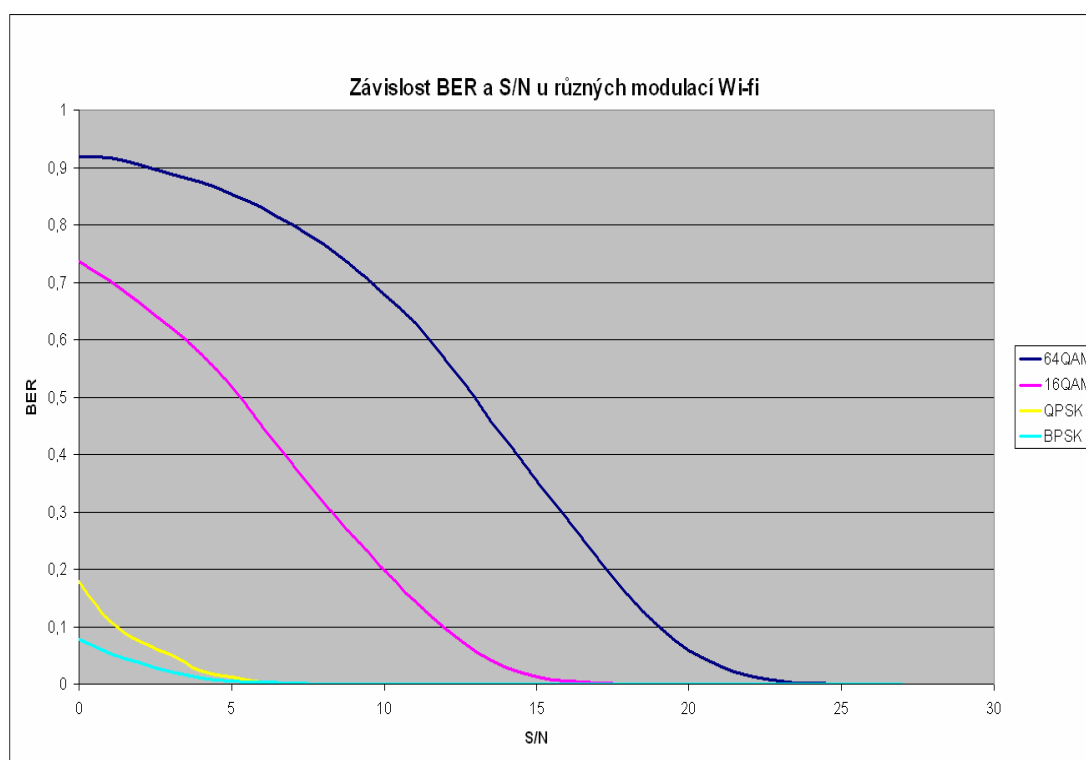
Obr. 43 informuje, že GMSK s jedním odrazem při S/N 12dB má BER roven nule.

8. Vyhodnocení simulací

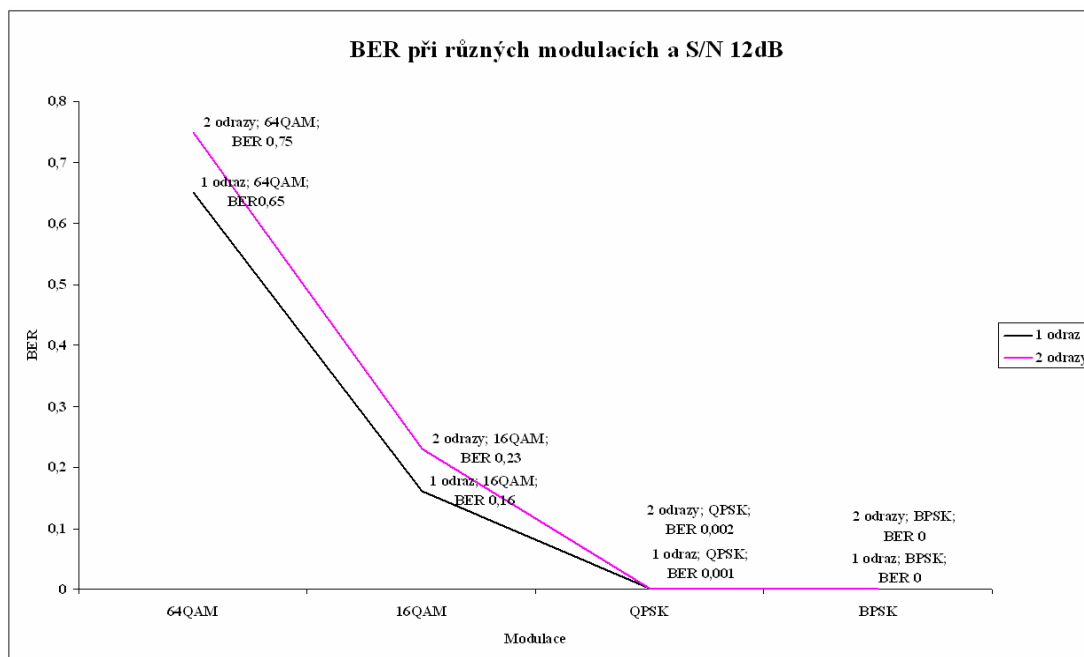
Simulace probíhaly v prostředí Matlab v nadstavbě Simulink. Měření bylo prováděné pro všechny modulační techniky za stejných podmínek (tzn. při stejném výkonu, tomu se musely přizpůsobit rozestupy mezi jednotlivými symboly u různých modulací), abychom je mohli důvěryhodně porovnávat.

Obrázky 44 a 45 ukazují grafy u různých modulací používaných v systémech Wi-fi v závislosti BER na S/N. Simulace dopadly podle předpokladů vyplývajících z principů činnosti jednotlivých modulačních technik, u modulací (16QAM a 64QAM) pro rychlý přenos dat se začal nižší poměr signál šum poměrně rychle projevovat na zvýšené chybovosti .

U QPSK a BPSK modulací určených pro pomalejší přenosové rychlosti je situace znatelně lepší, nízký poměr signál/šum jim moc nevadil.

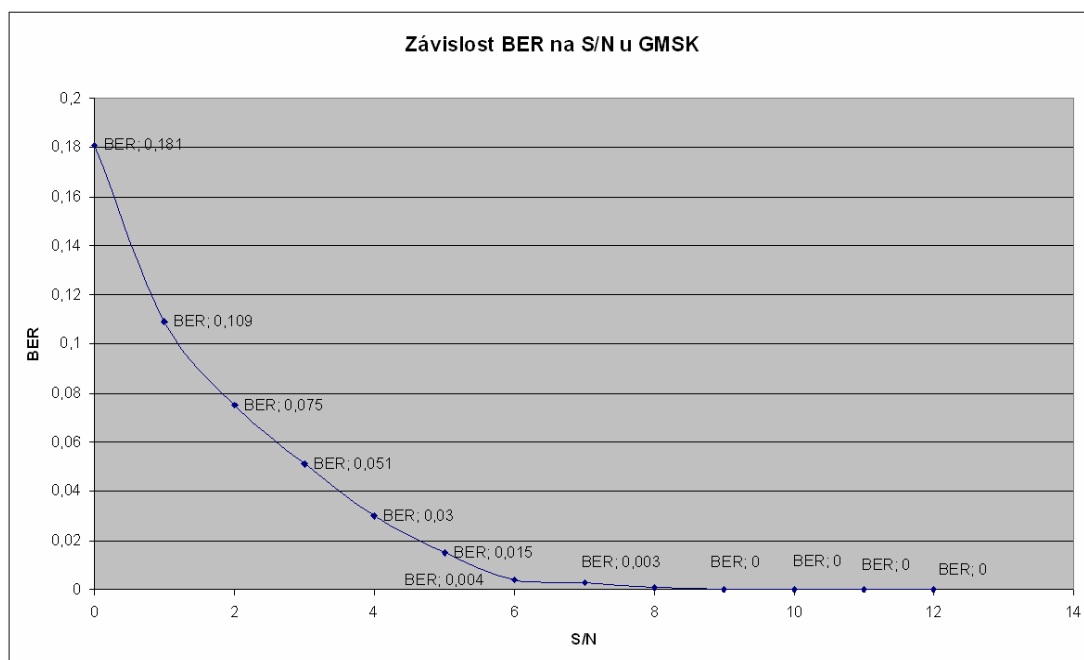


Obr. 44 - Porovnání modulací Wi-fi v závislosti BER na S/N



Obr. 45 - Porovnání BER při S/N 12db při různých modulacích Wi-fi

Modulace GSMK při závislosti BER na S/N (obr. 46) je na tom obdobně jako modulace u Wi-fi při nižších rychlostech.



Obr. 46 - Závislost BER na S/N u modulace GSMK

9. Měření přenosu u Wi-fi

Velkou měrou se na rychlosti přenosu podílí vzdálenost mezi dvěma body bezdrátové komunikace (tab. 6). Toto se nazývá útlum trasy, který může být charakterizován vzorcem:

$$\text{útlum} = 32.4 + 20 \log \text{frekvence}(\text{Mhz}) + 20 \log \text{vzdálenost}(\text{km}) \quad (9.1)$$

Tento vzorec bude platit jen za předpokladu, že bude mezi oběma komunikačními body přímá optická viditelnost a zachována Fresnelova zóna.

Vzdálenost [km]	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	1	1,5	2	3	4
Útlum [dB]	74	80	86	90	94	96	100	103	106	119	112

Tab. 6 - vzdálenosti pro útlum trasy v pásmu 2,4 GHz

Klesne-li úroveň signálu na vstupu přijímače pod určitou hodnotu, nedá se již dosáhnout maximální rychlosti přenosu, ale jen rychlostí nižších. Při určité úrovni signálu bude již rychlost nulová.

Citlivosti pro jednotlivé přenosové rychlosti jsou udávány v technických údajích výrobce u každého typu zařízení. Jednotky (dBm), v nichž se citlivost většinou udává, jsou vztaženy právě k výkonu (1mW), aby bylo možné snadno provádět celkový výpočet trasy.

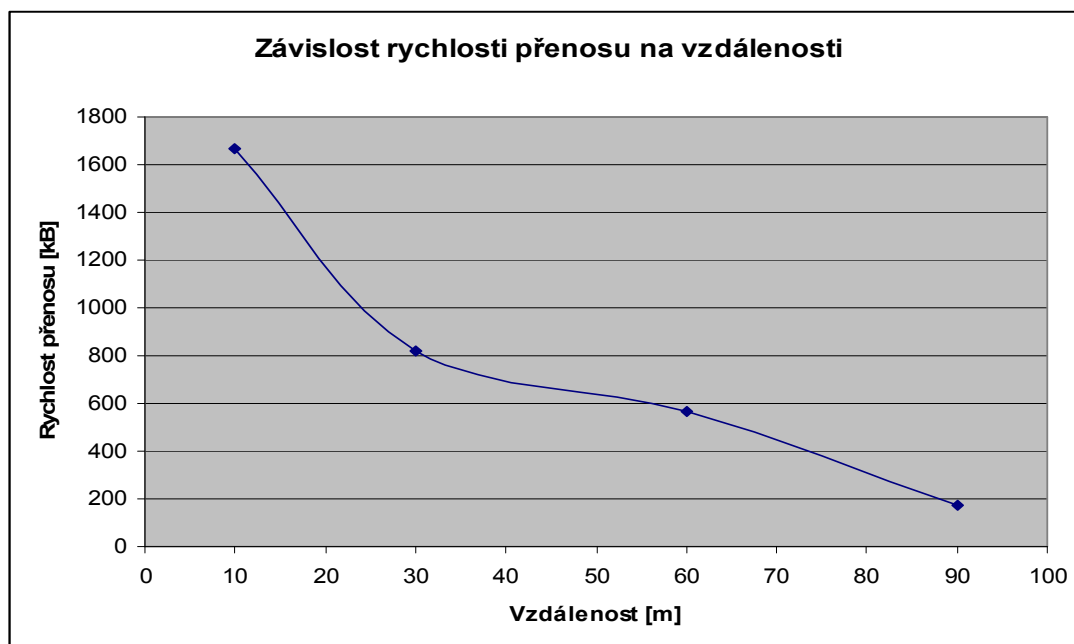
Měření mělo za cíl zjistit reálné přenosové rychlosti. Zvolil jsem miniPCI kartu Intel PRO/Wireless 2200BG Network Connection v notebooku DELL Latitude D600 s integrovanou anténou se ziskem 1dB a AP (Access point) Ovislink Corp WL-5460AP s anténami se zisky 1dB a 5dB, který byl připojený na počítač AMD Athlon 2500+ s 512 MB operační pamětí, na kterém byl nainstalován FTP server (Cesar FPT). Síla signálu a poměr signál/šum byl měřen programem Network Stumbler.

Vzdálenost [m]	Rychlost přenosu [kB]	S/N [dB]	Signál [dBm]
10	1667	36	-53
30	821	29	-52
60	565	27	-52
90	174	26	-52

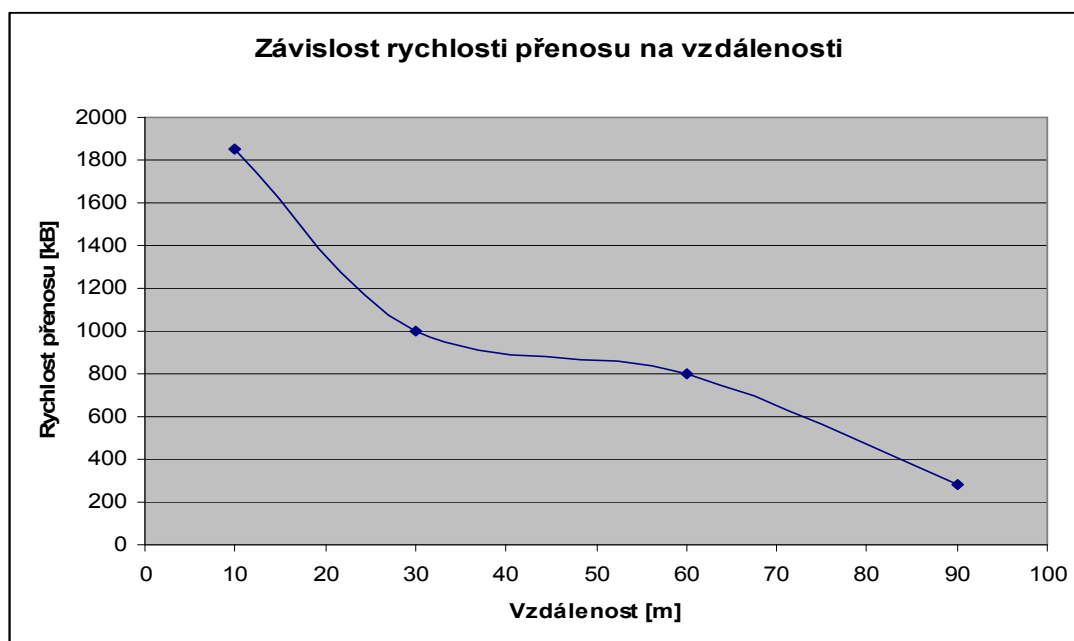
Tab. 7 - Naměřené hodnoty, AP se ziskem antény 1dB

Vzdálenost [m]	Rychlost přenosu [kB]	S/N [dB]	Signál [dBm]
10	1852	40	-53
30	998	33	-52
60	798	33	-52
90	284	29	-52

Tab. 8- Naměřené hodnoty, AP se ziskem antény 5dB



Obr. 47 - Závislost rychlosti přenosu na vzdálenosti, AP anténa se ziskem 1dB



Obr. 48 - Závislost rychlosti přenosu na vzdálenosti, AP anténa se ziskem 5dB

V důsledku nízkých zisků antén a okolního zarušení od ostatních uživatelů jiných sítí dosahovaly naměřené rychlosti velmi malých hodnot (tab. 7 a 8 , obr. 47 a 48).

10. Měření přenosu v GSM u GPRS a EDGE

Zvoleným zařízením pro přenos dat byl mobilní telefon Sony Ericsson P900 (obr. 49), který podporuje jen techniku GPRS a který byl přepnut do módu modem. Telefon SE P900 byl připojen pomocí USB kabelu Prolink PL-2303HX k počítači, na kterém byl prováděn test rychlosti přenosu. Jako referenční soubor sloužil FileZilla 3.1.0 (jeho velikost je 3 473 kB) z webu www.stahuj.cz. Soubor byl stažen za 378 sekund, průměrná rychlost přenosu se pohybovala kolem 9.2 kB/s, což je 73,6 kb/s. Měření potvrdilo předpoklad, že maximální teoretická rychlost telefonu P900, který je GPRS třídy 8, může být $4 \cdot CS4 = 80$ kb/s.



Obr. 49 - Sony Ericsson P900

Jako druhé zařízení byl zvolen komunikátor HP IPAQ 6515 (obr. 50), který je GPRS třídy 10. Tento přístroj je schopen používat jak GPRS tak i EDGE, to znamená že umí pracovat s modulacemi GMSK a 8-PSK. Díky 8-PSK může dosáhnout daleko větších rychlostí než P900, ale za předpokladu, že bude přenosová cesta ideální a že bude minimum uživatelů na stejné BTS.

Předpoklad pro přenos byl, že HP IPAQ 6515 může dosáhnout maximální rychlosti $4 \cdot$ Kódové schéma CS4 nebo MCS9 = 80 kb/s u GPRS nebo 236.8 kb/s u EDGE.

Z měření vyplynulo, že přenosová rychlost byla 106.4 kb/s (13.3kB) a že komunikátor operoval v rámci EDGE na kódovém schématu MCS5. Důvodem byla zřejmě lokalita (nemocnice Písek), kde bylo zřejmě připojeno mnoho účastníků najednou nebo se přístroj nacházel ve větší vzdálenosti od BTS.



Obr. 50 - HP IPAQ 6515

11. Závěr

Wi-fi se ujalo díky poskytovatelům internetu, který je dnes používán v hojné míře. Internet se dostal do mnoha lokalit, kde dříve nebyl. Poskytovatelé nabízejí svá připojení pomocí tzv. hotspotů. Jeden hotspot dokáže obstarat přes 100 uživatelů, kteří sdílejí dostupnou šířku pásma. Maximální užitečná rychlost Wi-fi u standardu 802.11b je 6Mbit/s a u standardu 802.11g/a je 22Mbit/s.

Wi-fi systémy mají relativně vysoké požadavky na přenosovou cestu a to hlavně u modulací 64QAM a 16QAM (nenarušená Fresnelova zóna, minimální odrazy, žádné rušení z jiných zařízení, která pracují na stejných nebo blízkých frekvencích, vzdálenost vysílačů, atd.). Velkou roli hrají i momentální atmosférické podmínky, kde velké rušení způsobují převážně hydrometeory (déšť, sníh, mlha a jiné atmosférické jevy, které obsahují vodu).

Pro Wi-fi hovoří:

- + Možnost dosažení velkých přenosových rychlostí
- + Nízké ceny za nižší rychlosti
- + Široká dostupnost
- + Používané frekvenční pásmo je zdarma

Proti Wi-fi hovoří:

- Vysoké ceny za vysoké rychlosti, nutnost kvalitního zařízení
- Stabilita provozu
- Pomalá odezva
- Velice omezená mobilita v závislosti na rychlosti pohybu
- Velké rozšíření (rušení od ostatních uživatelů Wi-fi)

Přenos dat u systému GSM 2.5 (2.75) generace, používající GPRS nebo EDGE, je dnes relativně pomalý a závislý na možnostech operátora, který službu nabízí, ale pořád dostačuje na přenos videa, na využití služeb e-mailu, faxování, nebo na prohlížení internetových stránek. Hlavní výhodou GPRS je modulace GMSK, která má malou závislost na odrazech a poměru signál/šum. Při zvolení vhodného kódování proti chybám se s touto modulací stává systém GSM velmi odolný proti rušení.

Pro GPRS hovoří:

- + Možnost použití na většině nových mobilních telefonů
- + Použitelnost na většině území ČR
- + Vysoká mobilita a to i při vysokých rychlostech (vlak, automobil)
- + Dobrá funkčnost i při špatných atmosférických podmínkách

Proti GPRS hovoří:

- Poměr cena/rychlost přenosu
- Rychlost přenosu
- Korekce přenosu dat vůči hovorovému přenosu na BTS
- Budoucí existence UMTS 4G

Použitá literatura

- [1] KAPOUN, V.: Přístupové a transportní sítě, VUT FEI, Brno 1999
- [2] FILKA, M.: Telekomunikační vedení, VUT FEI, Brno 1988
- [3] BURDA, J.: Zemské mobilní rádiové sítě a přenos dat, Wirelesscom, Praha2000
- [4] HANUS, S.: Bezdrátové a mobilní komunikace, VUT FEKT, Brno 2002
- [5] Zandl Patrick: Bezdrátové sítě WiFi : praktický průvodce, Computer Press, Brno, 2003
- [6] Hrdina Zdeněk: Vejražka František - Digitální radiová komunikace, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1998
- [7] Šebesta Vladimír: Teorie sdělování, VUT FEI, Brno, 1998
- [8] LAIHO J.: WACKER A., NOVOSAD T.: Radio network planning and optimisation for UMTS, John Wiley & Sons, West Sussex 2002
- [9] SYSTRA: System training document, Nokia, Oy 1998
- [10] MOLNÁR, J.: Provoz v mobilní buňkové síti - Ročníkový projekt 2, VUT FEKT Brno 2002
- [11] NOVOTNÝ, V.: Integrované sítě, VUT FEKT, Brno 2002
- [12] Ing.MartinVejsada: ADSL-1.část, [online]. 2004, [cit. 2008-05-24] dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072903>
- [13] White Papers EDGE: Intoduction to high speed adta in GSM/GPRS network, [online]. 2005, [cit. 2007-04-25], dostupné z: http://www.ericsson.com/solutions/tems/library/tech_papers/tech_related/edge_wp_technical.pdf
- [14] 37MK – přednášky: Doc. Ing. Václav Žalud CSc.
- [15] Teorie sdělování: přenášky 1-15 Radim Číž
- [16] Ing. Bc. Ivan Pravda: Přehled doplňků standardu IEEE 802.11, [online]. 2005, [cit. 2008-06-14] dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=prehled-doplнку-standardu-ieee-802-11&cisloclanku=2005113002> [cit. 2008-06-14]
- [17] Ing. Zdeněk Pikhart: Mobilní sítě, [online]. 2004, [cit. 2008-05-23] dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=mobilni-site&cisloclanku=2004072801>

- [18] Ing. Z. Kocur, Ing. M. Šafránek: Fyzická vrstva Wi-Fi, [online]. 2008, [cit. 2008-06-17] dostupné z:
<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008050006>
- [19] Ing. Petr Daněček: Přenosy dat v sítích GSM, možnosti využití, Ústav telekomunikací Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysoké Učení Technické v Brně. [online]. 2005 [cit. 2007-03-25] dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05005/index.html>
- [20] Jiří Molnár: modulace [online], [cit 2008-06-01] dostupné z: http://www.umts.wz.cz/Mob_radio_site_3G/modulace.htm
- [21] Tomáš Velický: Datové přenosy po GSM sítích, technologie HSCSD, GPRS a UMTS: diplomová práce, Pedagogická fakulta Jihočeské Univerzity - Katedra informatiky