

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Analýza vysílaného signálu základnových stanic GSM

Jiří Kočárník

Bakalářská práce

2009

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektrotechniky
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří KOČÁRNÍK**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**

Název tématu: **Analýza vysílaného signálu základnových stanic GSM**

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

Teoretická část: Náplní teoretické části bude rozbor komunikace při navazování spojení a komunikaci mezi základnovou a mobilní stanicí v systému GSM na vybraných kanálech, popis typů burstů využívaných především na nultém kanále a popis tvorby datového toku v systému GSM. Praktická část: Záznam a analýza signálu systému GSM a jeho převod na I/Q složky, porovnání reálně naměřených spekter signálů se signálem simulovaného systému GSM, porovnání časových průběhů signálů reálného a simulovaného systému.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

Václav Žalud, Moderní radioelektronika, Ben - technická literatura, 2000

Stanislav Hanus, Bezdrátové a mobilní komunikace, Vysoké učení technické v Brně, 2003

<http://www.emc.york.ac.uk/reports/linkpcp/appD.pdf>

Karel Zaplatílek a Bohuslav Doňar, Matlab - začínáme se signály, Ben - technická literatura, 2006

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.

Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2009**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15. května 2009**



doc. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2009

Prohlašuji:

Tuto práci jsem 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 7. 5. 2009

Jiří Kočárník

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce, Ing. Zdeňku Němcovi, Ph.D., za rady, připomínky a návrhy týkající se bakalářské práce.

Anotace

Práce je věnována popisu signálu systému GSM mezi mobilní a základnovou stanicí. Praktická část postihuje analýzu naměřeného a simulovaného signálu základnových stanic a jejich vzájemné porovnání.

Klíčová slova

GSM; GMSK; modulace; demodulace;

Title

Analysis of the signal emitted by GSM base stations

Annotation

The work deals with description of GSM signal transmitted between mobile and base station. The practical part of work involves measured and simulated analyses of base stations signal and their mutual comparison.

Keywords

GSM; GMSK; modulation; demodulation;

Obsah

Úvod	10
1. Systém GSM.....	11
1.1. Přidělená kmitočtová pásma	11
1.2. Architektura systému.....	13
1.3. Plošná struktura systému GSM	14
2. Bursty	16
2.1. Normální burst (Normal burst).....	17
2.2. Burst pro kmitočtovou korekci (Frequency Correction Burst)	18
2.3. Synchronizační burst (Synchronisation Burst)	19
2.4. Přístupový burst (Access burst)	20
2.5. Prázdný burst (Dummy burst).....	22
3. Kanály systému GSM.....	23
3.1. Fyzické kanály	23
3.2. Logické kanály	23
3.2.1. Vysílané řídicí kanály BCH (Broadcast Channels)	24
3.2.2. Společné řídicí kanály CCCH (Common Control Channel)	25
3.2.3. Vyhrazené řídicí kanály DCCH (Dedicated Control Channel)	25
4. Komunikace mezi základnovou a mobilní stanicí	26
4.1. Skládání TDMA rámců.....	26
4.1.1. Multirámeček provozních kanálů.....	27
4.1.2. Multirámeček řídicích kanálů	28
4.2. Režimy mobilní stanice	29
4.2.1. Zapnutí mobilní stanice.....	30
4.2.2. Pohotovostní režim mobilní stanice.....	31
4.2.3. Aktivní režim mobilní stanice	32
5. Modulace GMSK	33
5.1. Kvadraturní modulátor	33
5.2. Kmitočtová filtrace signálu.....	34
5.3. Simulace GMSK modulace.....	35
5.3.1. Gaussovská dolní propust	35
5.3.2. I/Q složky signálu	38
5.3.3. Signál GMSK	39
5.3.4. Spektrum signálu	40
6. Měření a analýza signálu	42
6.1. Časový průběh signálu.....	44
6.2. Spektrum signálu	46
6.3. Demodulace signálu	48
7. Závěr.....	51

Seznam obrázků

Obr. 1	Rozdělení rádiových a účastnických kanálů.....	12
Obr. 2	Zjednodušená architektura systému GSM.....	13
Obr. 3	Vícenásobné využití kmitočtového pásma	14
Obr. 4	Blokové schéma zpracování hovorového signálu.....	16
Obr. 5	Normální burst	17
Obr. 6	Toleranční výkonový diagram pro normální burst	18
Obr. 7	Burst pro kmitočtovou korekci	19
Obr. 8	Synchronizační burst	20
Obr. 9	Přístupový burst	21
Obr. 10	Logické kanály systému GSM.....	24
Obr. 11	Vznik signálu pro jednoho účastníka	26
Obr. 12	Zpoždění mezi downlinkem a uplinkem	26
Obr. 13	Hierarchie rámců.....	27
Obr. 14	Časová organizace provozních kanálů TCH/F	27
Obr. 15	Časová organizace řídicích kanálů.....	28
Obr. 16	Společné uspořádání provozních a řídicích kanálů.....	30
Obr. 17	Kvadraturní modulátor GMSK.....	34
Obr. 18	Impulzní odezva GLPF	36
Obr. 19	Signál $b(t)$ za GLPF.....	37
Obr. 20	Signál $c(t)$ za integrátorem	38
Obr. 21	I/Q složky signálu	39
Obr. 22	Signál GMSK.....	40
Obr. 23	Amplitudové spektrum signálu GMSK.....	41
Obr. 24	Spektrální analyzátor Rohde & Schwarz FSQ3.....	42
Obr. 25	Měřicí pracoviště se spektrálním analyzátozem Rohde & Schwarz FSQ3.....	43
Obr. 26	Spektrum signálu GSM zachycené spektrálním analyzátozem	44
Obr. 27	Signál z blízké BTS se všemi využitými TimeSloty.....	45
Obr. 28	Signál ze vzdálené BTS (méně využitý)	45
Obr. 29	Spektrum signálu na 107. kanálu	47
Obr. 30	Průměrované spektrum signálu na 107. kanálu	47
Obr. 31	Určení odstupu signál/šum	48
Obr. 32	Demodulátor reálného signálu GSM.....	49
Obr. 33	I/Q složky získané demodulací reálného signálu.....	49
Obr. 34	Bitová posloupnost po demodulaci.....	50

Seznam tabulek

Tab. 1	Rozdělení kmitočtového pásma.....	12
Tab. 2	Část informací přenášených synchronizačním burstem.....	20

Seznam zkratk

ARFCN	(Absolute Radio Frequency Channel Number) – označení rádiového kanálu
BER	(Bit Error Rate) – bitová (symbolová) chybovost
BSC	(Base Station Controller) – základnová řídicí jednotka
BSIC	(Base Station Identity Code) – identifikační kód základnové stanice
BSS	(Base Station Subsystem) – subsystém základnových stanic
BTS	(Base Transceiver Station) – základnová rádiová stanice
FSK	(Frequency Shift Keying) – digitální modulace s klíčováním kmitočtu
GLPF	(Gaussian Low Pass Filter) – Gaussovská dolní propust (filtr)
GMSK	(Gaussian Minimum Shift Keying) – digitální modulace, kmitočtové klíčování s minimálním zdvihem a předmodulačním Gaussovským filtrem
GSM	(Global System for Mobile) – systém pro mobilní komunikaci
ISI	(Inter Symbol Interference) – intersymbolové interference
LAI	(Location Area ID) – identifikační kód oblasti
MSC	(Mobile Switching Centre) – mobilní rádiová ústředna
MSK	(Minimum Shift Keying) – digitální modulace, kmitočtové klíčování s minimálním zdvihem
NRZ	(Non Return To Zero) – formát signálu bez návratu k nule
NSS	(Network and Switching Subsystem) – síťový a spínací (přepojovací) subsystém
OSS	(Operation Support Subsystem) – operační subsystém
PLMN	(Public Land Mobile Network) – kód operátora
SABM	(Set Asynchronous Balanced Mode) – konečná zpráva z MS
TDMA	(Time Division Multiple Access) – mnohonásobný přístup s časovým dělením
UMTS	(Universal Mobile Telecommunication System) – univerzální mobilní telekomunikační systém

ÚVOD

Bakalářská práce je zaměřena na analýzu reálně naměřených signálů základnových stanic GSM a jejich porovnání se simulovaným signálem. Cílem práce je především zachycení signálů pomocí spektrálního analyzátoru a jejich analýza pomocí vhodného matematického softwaru, jako je demodulace signálů, časové průběhy a spektra signálů. Dále simulace modulace GMSK, která se primárně využívá v systému GSM, s následnou simulací spektra signálu GMSK a časového průběhu. Před veškerou simulací a analýzou je teoreticky rozebrána vlastní tvorba a složení signálů mezi mobilní a základnovou stanicí.

První kapitola je věnována historii systému GSM a celkové architektuře systému spolu s přiděleným kmitočtovým pásmem a se způsobem jeho efektivního využívání. Druhá kapitola se stručně zabývá způsobem zpracování signálů před tím, než je sestaven do burstů. Dále pak především dostatečně podrobným popisem jednotlivých burstů používaných v systému GSM. Třetí kapitola je věnována rozdělení kanálů systému na fyzické a logické a popisu logických kanálů tak, aby bylo zřejmé jejich využití v konkrétních situacích. Na třetí kapitolu plynule navazuje čtvrtá, kde jsou rozebrány základní kombinace logických kanálů a dále rozbor komunikace mezi základnovou a mobilní stanicí po zapnutí mobilní stanice a při navazování spojení s přihlédnutím na uvedené kombinace logických kanálů. V páté kapitole je nejprve teoreticky rozebrána modulace GMSK. Poté následuje simulace činnosti modulátoru včetně výsledného časového průběhu signálu GMSK a jeho spektra. V šesté kapitole je popsáno vlastní měření signálu na spektrálním analyzátoru. Dále zobrazení časových průběhů a spekter reálně naměřených signálů. Nakonec je ukázána činnost demodulátoru aplikovaného na naměřený signál, kdy se tak získá původní datový tok ze základnové stanice BTS. V závěru jsou shrnuty dosažené výsledky měření a simulací signálu základnových stanic systému GSM.

1. SYSTÉM GSM

V osmdesátých letech minulého století svět zaznamenal rychlý nárůst analogových celulárních systémů, které jsou označovány jako systémy první generace. Každá země měla svůj systém, který byl však neslučitelný se systémy z jiných zemí. To platilo v Evropě, zatímco v USA byla pouze jedna síť (systém). V roce 1982 proto Evropská komise pro pošty a telekomunikace spustila projekt GSM (Groupe Spéciale Mobile), která měla vyvinout celoevropskou mobilní telefonní síť. Bylo rozhodnuto, že nová síť bude plně digitální. V roce 1989 převzal zodpovědnost nad vývojem GSM Evropský telekomunikační institut a o rok později byl zveřejněn první návrh standardu. Standard byl tedy vydán v roce 1991 a nese označení GSM-Phase 1. V současné době se pod zkratkou GSM skrývá označení Global System for Mobile Communications. V roce 1995 byl definován rozšiřující standard GSM-Phase 2, který zavedl nové služby (např. datové přenosy).

Celulární radiotelefonní systém GSM patří mezi systémy druhé generace. V současné době pozorujeme postupný přechod na systém třetí generace, který je označován UMTS (Universal Mobile Telecommunications System).

1.1. Přidělená kmitočtová pásma

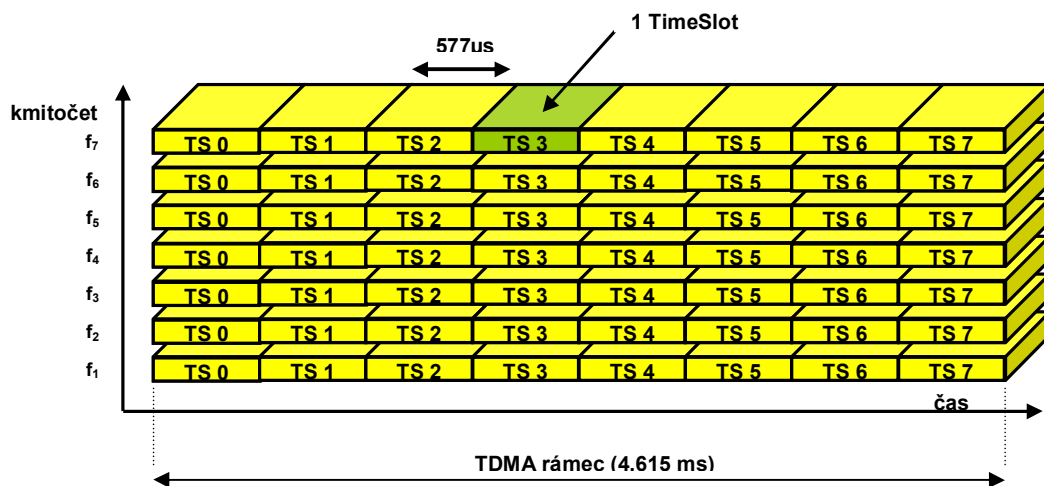
Primární systém GSM, označovaný PGSM (Primary GSM) nebo GSM 900, má přidělené kmitočtové pásmo 890 MHz až 960 MHz rozděleno na dvě části. Pro spojení mobilní stanice MS (Mobile Station) – základnová rádiová stanice BTS (Base Transceiver Station), tzv. uplink, je vyhrazeno pásmo 890 MHz až 915 MHz. Pro spojení BTS – MS, tzv. downlink, je vyhrazeno pásmo 935 MHz až 960 MHz.

Základnové stanice vysílají na vyšším kmitočtu duplexního páru, jehož rozteč je 45 MHz. Uvnitř každého pásma je vytvořeno 124 rádiových kanálů, každý s šířkou pásma 200 kHz. Zbývá 125. část je rozdělena na poloviny (2·100 kHz), z nichž jedna tvoří oddělovací úsek na horním a druhá na dolním konci každého pásma. Pro číslo rádiového kanálu, které může nabývat hodnot od 1 do 124, se používá označení AFCN (Absolute Radio Frequency Channel Number). Systém GSM 900 používá tedy 124 duplexních kanálů. Rozdělení pásma na jednotlivé rádiové kanály je naznačeno v Tab. 1.

Tab. 1 Rozdělení kmitočtového pásma

ARFCN	f_{uplink} [MHz]	f_{downlink} [MHz]
1	890,2	935,2
2	890,4	935,4
3	890,6	935,6
.	.	.
.	.	.
.	.	.
122	914,4	959,4
123	914,6	959,6
124	914,8	959,8

V každém rádiovém kanálu je metodou časového multiplexu TDMA (Time Division Multiple Access) vytvořeno 8 časových intervalů, tzv. TimeSlotů TS, které tvoří rámec TDMA. Do každého TimeSlotu je „vložen“ jeden účastnický kanál, při použití zdrojového kodéru s plnou rychlostí (full rate) nebo dva kanály, při použití zdrojového kodéru s poloviční rychlostí (half rate). Celkový počet účastnických duplexních kanálů je při použití kodéru s plnou rychlostí 992. Při použití kodéru s poloviční rychlostí $124 \cdot 16 = 1984$. Rozdělení rádiových a účastnických kanálů je přehledně naznačeno na Obr. 1.



Obr. 1 Rozdělení rádiových a účastnických kanálů

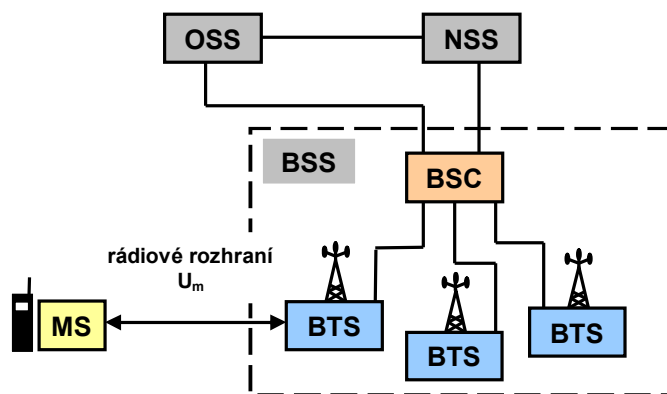
Rozšířený systém GSM, označovaný EGSM (Extended GSM), se v současné době běžně používá. Pásma, která využívá systém PGSM, jsou na spodních okrajích rozšířena o 10 MHz. Kapacita systému se tak zvýší o 50 duplexních kanálů.

Některé státy vznesly požadavek na specifikaci systému, který by byl založen na principech GSM, ale umožnil připojení většího počtu uživatelů. Následkem toho vznikl systém DCS-1800 (GSM 1800), který se běžně používá i v ČR. Má přidělená pásma 1710 MHz až 1785 MHz pro uplink a 1805 MHz až 1880 MHz pro downlink. V těchto pásmech je umístěno 374 rádiových kanálů, každý s šířkou pásma 200 kHz. Celkový počet účastnických kanálů je $374 \cdot 8 = 2992$ (při použití kodéru s plnou rychlostí). Na horních a spodních okrajích obou pásem jsou opět oddělovací úseky 100 kHz. Rozteč duplexního páru je 95 MHz.

1.2. Architektura systému

Systém GSM můžeme rozdělit na tři základní subsystémy (Obr. 2):

- Subsystém základnových stanic BSS (Base Station Subsystem) neboli rádiový subsystém, se kterým prostřednictvím rádiového rozhraní U_m přímo komunikují mobilní stanice,
- síťový a spínací (přepojovací) subsystém NSS (Network and Switching Subsystem) označovaný někdy jako radiotelefonní ústředna s rozšířenými úkoly a funkcemi,
- operační subsystém OSS (Operation Support Subsystem) zajišťuje servis a koordinuje funkce celého systému (provoz, údržba, opravy poruch, atd.).



Obr. 2 Zjednodušená architektura systému GSM

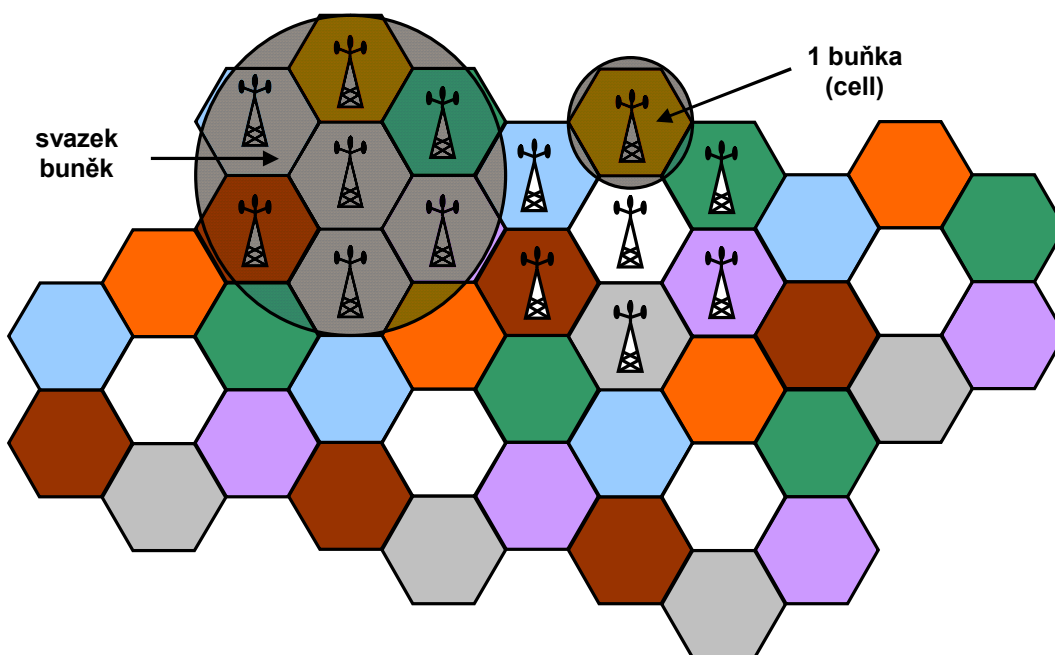
Mezi jednotlivými částmi systému jsou přesně definovaná rozhraní. Mezi MS a BTS je tzv. rádiové rozhraní označované U_m , kterému se práce věnuje.

1.3. Plošná struktura systému GSM

Požadované území je rozděleno na velké množství malých území, buněk. Obvykle uprostřed každé buňky je umístěna BTS, která zajišťuje spojení mobilních účastníků v této buňce se systémem přes rádiové rozhraní.

Několik buněk tvoří svazek buněk, jehož činnost řídí základnová řídicí jednotka BSC (Base Station Controller), např. handover, přidělování rádiových kanálů mobilním stanicím, atd. Je umístěná obvykle s BTS v buňce ležící uprostřed svazku. Plošná struktura systému GSM je tedy buňková (celulární).

Systém GSM velice efektivně využívá přidělené kmitočtové pásmo tak, že je možné s omezeným kmitočtovým pásmem pokrýt nekonečně rozlehlé území. Způsob realizace tohoto principu ukazuje Obr. 3.



Obr. 3 Vícenásobné využití kmitočtového pásma

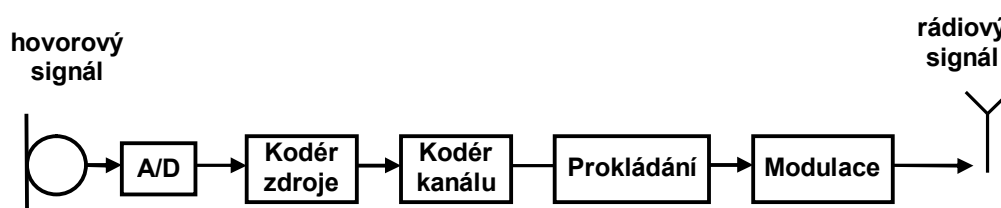
Obsluhovaná oblast je rozdělena na buňky, které vytvářejí svazky po 7 buňkách. Uprostřed každé buňky je základnová stanice, obsahující základnový vysílač a přijímač, pracující s určitou skupinou rádiových kanálů (nejčastěji 3 až 5 rádiových kanálů, tj. 24 až 40 účastnických kanálů), tzv. CA (Cell Allocation). Ve zbývajících šesti buňkách téhož svazku jsou využity jiné skupiny rádiových kanálů. Pokud budou v obdobném duchu rozmístěny na území i další svazky se stejnou konfigurací buněk

a rádiových kanálů, lze tedy s omezeným kmitočtovým pásmem pokrýt teoreticky nekonečně rozlehlé území.

Velikost jednotlivých buněk není stejná a liší se v závislosti na hustotě provozu. Zjednodušeně pro místa s vysokou koncentrací účastníků se staví buňky s poloměrem v řádech metrů nebo do jednoho kilometru (pikobuňky, mikrobuněk). Naopak v oblasti s malou hustotou provozu se setkáme s makrobuněkami, které mají poloměr až desítky kilometrů.

2. BURSTY

Bursty jsou základní jednotky datového toku mezi mobilní a základnovou stanicí. Než je hovorový (datový) signál účastníka systému sestaven do burstů, modulován na příslušnou nosnou vlnu a přenášen přes rádiové rozhraní, projde několika operacemi, které signál různými způsoby upravují. Tyto operace jsou v jednoduchém blokovém schématu naznačeny na Obr. 4.

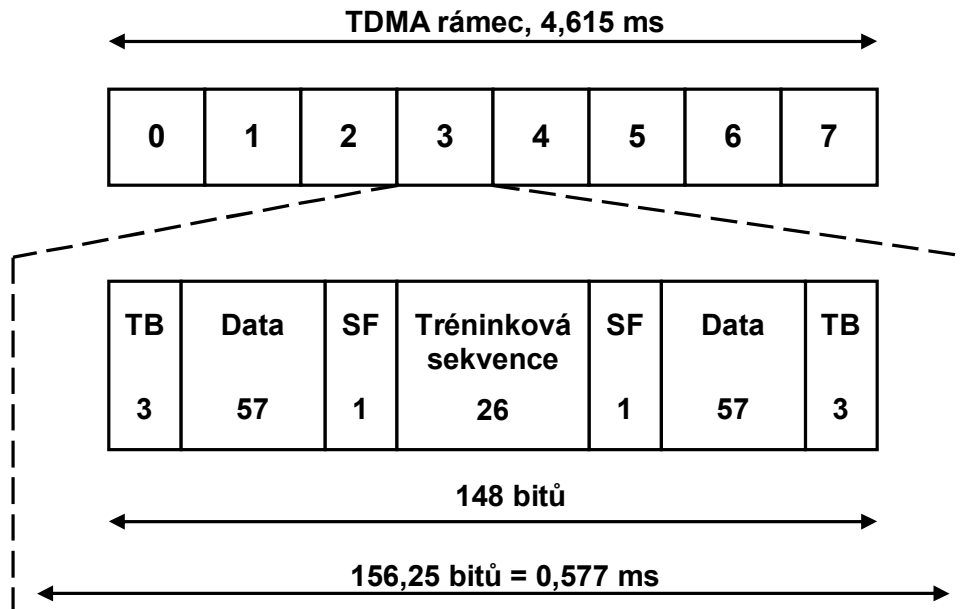


Obr. 4 Blokové schéma zpracování hovorového signálu

Analogový hovorový signál je v A/D převodníku digitalizován. Bitová rychlost signálu na výstupu převodníku je 104 kbit/s. Následuje kodér zdroje, jehož úkolem je odstranit ze signálu redundantní (nadbytečné) a irelevantní (nepodstatné, zbytečné) informace, případně je snížit na co nejmenší míru. Jeho výstupní přenosová rychlost je 13 kbit/s. Poté signál vstupuje do kodéru kanálu. Cílem kanálového kódování je zabezpečit signál proti chybám vznikajícím při přenosu v komunikačním kanálu. Chyby signálu mohou být způsobeny šumem, různými druhy rušení, únikem signálu, odrazy, přepnutím signálu při handoveru, atd. Podstatou zabezpečení signálu je mírné, úmyslné a kontrolované zvýšení jeho redundance (např. přidáním jistého počtu kontrolních bitů). To se projeví malým zvýšením přenosové rychlosti signálu, při výrazném snížení chybovosti signálu BER (Bit Error Rate). Přenosová rychlost signálu po kanálovém kódování je 22,8 kbit/s. Doplnkem kanálového kódování je tzv. prokládání (interleaving). To se používá jako ochrana signálu proti skupinovým chybám (shluku chyb). Výsledkem prokládání jsou skupiny po 114 bitech příslušející jednomu hovorovému signálu, které se doplní 26 bity tzv. tréninkové sekvence, 2 bity řídicími, dvěma trojicemi koncových (okrajových) bitů a 8,25 bity ochrannými. Tak dostáváme základní jednotku přenosu v systému GSM označovanou názvem burst. Rozlišujeme několik druhů burstů, které se používají pro různé účely.

2.1. Normální burst (Normal burst)

Celkové uspořádání normálního burstu pro přenos hovorových signálů a některých řídicích signálů je nakresleno na Obr. 5.



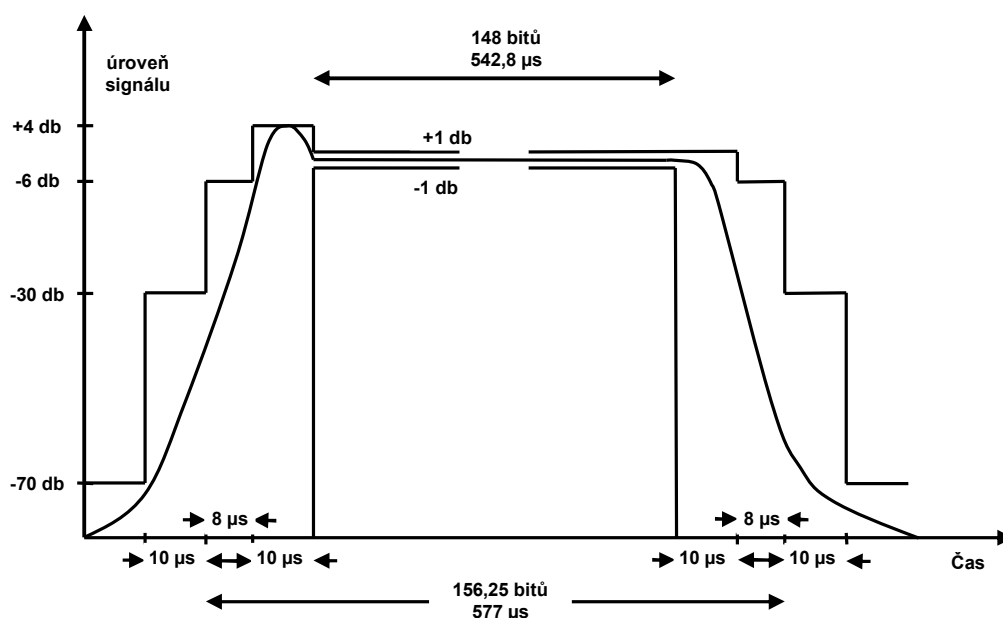
Obr. 5 Normální burst

Burst obsahuje celkem 156,25 bitů a jeho doba trvání je 0,577 ms. Z těchto dvou údajů lze vypočítat přenosovou rychlost signálu v rádiovém kanálu

$$f_{bc} = \frac{156,25}{0,577 \cdot 10^{-3}} = 270,833 \text{ kbit} / \text{s} .$$

Poněvadž je v rádiovém kanálu přenášeno osm účastnických kanálů, vychází na jeden účastnický kanál přenosová rychlost signálu $f_{bu} = 270,833/8 = 33,854 \text{ kbit/s}$. Každá bitová pozice v burstu je označena svým číslem BN (Bit Number). První bit je označen BN0, poslední bit (čtvrtinový) je označen BN156. Dvě trojice koncových (okrajových) bitů TB (Tail Bits) jsou na pozicích BN0, BN1, BN2, resp. BN145, BN146, BN147 a obsahují vždy pouze 0. Řídicí bity označené SF (Stealing Flag) udávají, zda je v burstu přenášén hovorový signál nebo řídicí informace. Tréninková sekvence dat TS (Training Sequence) přenášéná uprostřed burstu sestává z 26 bitů. Používané tréninkové sekvence jsou uloženy v paměti každé mobilní stanice, která je využívá pro funkci ekvalizace. Ochranné bity na konci burstu nejsou skutečnými bity, ale reprezentují tzv. ochrannou dobu GP (Guard Period), o kterou se může burst

časově posunout ve vyhrazeném TimeSlotu. Tato situace může nastat v důsledku zpoždění signálu při pohybu mobilní stanice během komunikace. Ze vztahu f_{bc} vyplývá, že bitová perioda signálu v rádiovém kanálu je $T_b = 3,692 \mu\text{s}$. Okrajové bity tedy reprezentují ochrannou dobu $8,25 \cdot 3,692 = 30,459 \mu\text{s}$. Uvažujeme-li rychlost šíření signálu $v = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, odpovídá ochranné době změna vzdálenosti mezi MS a BTS o $d \cong 9,14 \text{ km}$. Druhým důvodem pro zavedení ochranné doby je nutnost rychlého nárůstu a poklesu výkonu vysílače, který pracuje v impulzním (burstovém) režimu. Toleranční výkonový diagram (Power Ramping Time Mask) je pro normální burst nakreslen na Obr. 6. Vyplývá z něj, že nárůst i pokles výkonu vysílače musí splňovat přísná kritéria, aby signál nepronikal do sousedních TimeSlotů a nerušil sousední účastnické kanály.

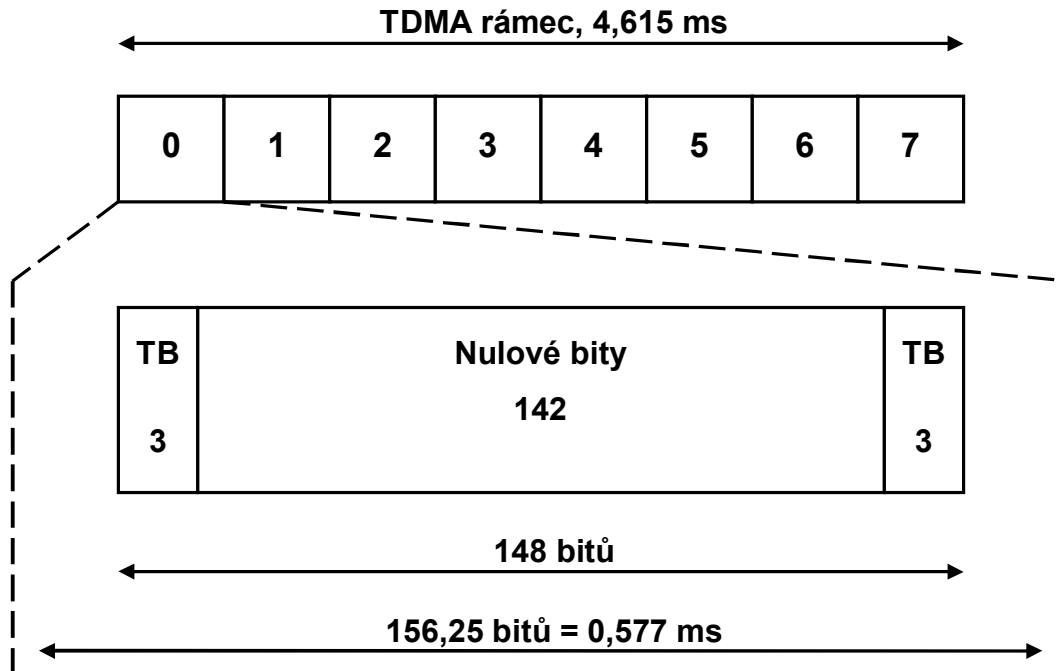


Obr. 6 Toleranční výkonový diagram pro normální burst

2.2. Burst pro kmitočtovou korekci (Frequency Correction Burst)

Tento burst obsahuje samé nuly, jak je nakresleno na Obr. 7. Používá se pro kmitočtovou synchronizaci mobilní stanice. Sekvence samých 0 (neboť i okrajové bity jsou nulové) odpovídá nemodulovanému signálu s kmitočtovým posuvem 67,7 kHz nad nosnou. Pokud přijímá mobilní stanice tento burst, určí nosnou tak,

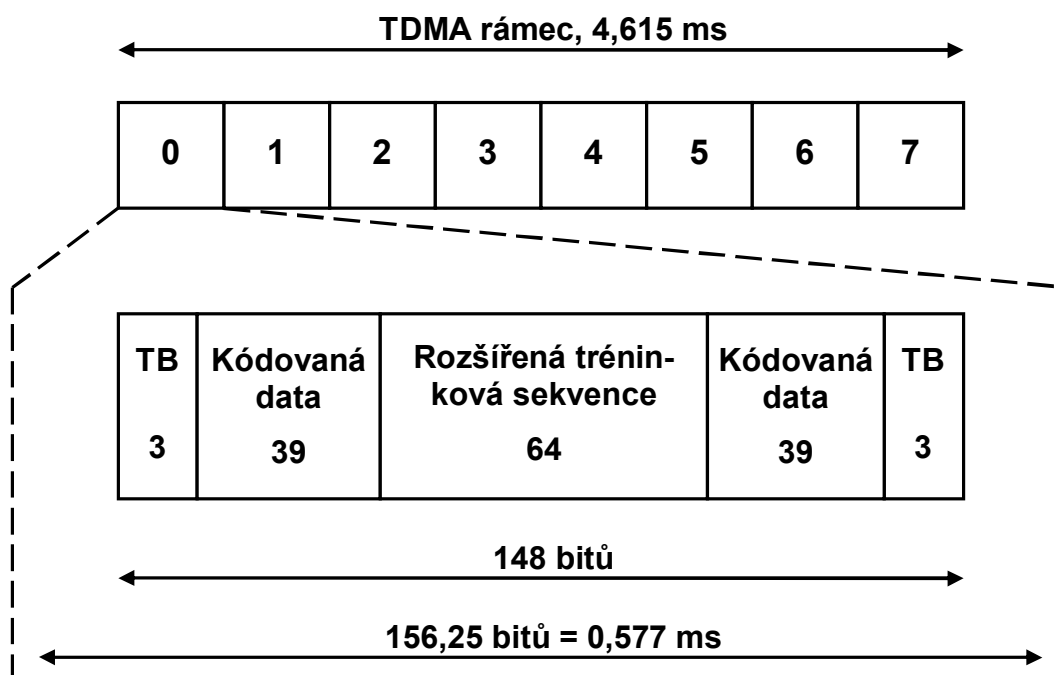
že od kmitočtu přijímaného signálu (horní signalizační kmitočet) odečte hodnotu $\Delta f = 67,7 \text{ kHz}$.



Obr. 7 Burst pro kmitočtovou korekci

2.3. Synchronizační burst (Synchronisation Burst)

Používá se pro časovou synchronizaci mobilní stanice a je vysílán vždy za burstem pro kmitočtovou korekci. Jeho struktura je nakreslena na Obr. 8.



Obr. 8 Synchronizační burst

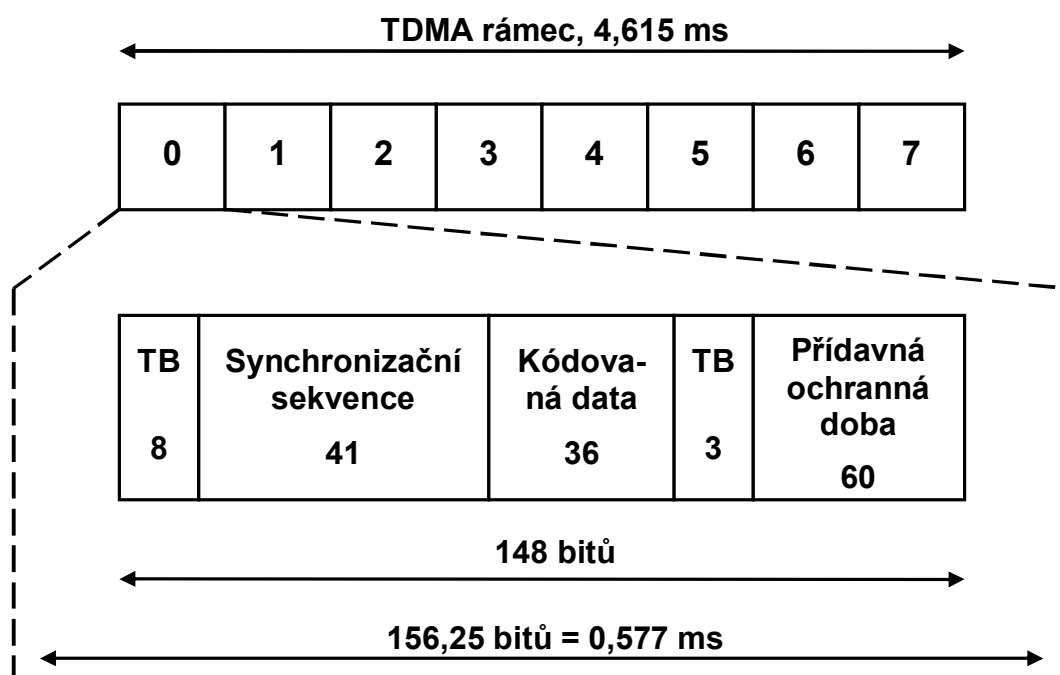
Obsahuje dlouhou, rozšířenou tréninkovou sekvenci na pozicích BN42, BN43, BN105. Zakódovaných 78 bitů nese informaci o pořadí TDMA rámce, kódu operátora PLMN (Public Land Mobile Network) a kódu základnové stanice, jak je uvedeno v Tab. 2.

Tab. 2 Část informací přenášených synchronizačním burstem

Kód operátora PLMN	Kód BS	T1 číslo superrámce	T2 číslo multirámce	T3 číslo rámce
3 bity	3 bity	11 bitů	5 bitů	3 bity
BSIC (Base Station Identity Code) 6 bitů		RFN (Reduced TDMA Frame Number) 19 bitů		

2.4. Přístupový burst (Access burst)

Přístupový burst (Obr. 9) se používá při náhodném přístupu do systému, např. po zapnutí MS, a má dlouhou ochrannou dobu.



Obr. 9 Přístupový burst

Jak je naznačeno na Obr. 9, ochranný interval tvoří $60 + 8,25 = 68,25$ bitů, což odpovídá ochranné době $68,25 \cdot 3,692 = 252 \mu\text{s}$. Pro nastavení tzv. časového posuvu TA (Timing Advance) se však využívá pouze 63 bitů, aby základnová stanice mohla po změření časového posuvu zaslat mobilní stanici informaci ve formě šestibitového slova. Na základě této informace upraví mobilní stanice dobu vysílání tak, aby eliminovala vliv zpoždění signálu a vysílané bursty přicházely k základnové stanici v požadovaných časových relacích. Pro 63 bitů (tj. 63 časových posuvů) vychází ochranná doba $t_{ZP\text{MAX}} = 63 \cdot 3,692 = 232,6 \mu\text{s}$, což odpovídá vzdálenosti $d_{\text{MAX}} = 232,6 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8 = 69780 \text{ m} = 69,78 \text{ km}$. Vypočítaná ochranná doba $t_{ZP\text{MAX}}$ vyjadřuje maximální možné zpoždění signálu na cestě od BTS k MS a zpět od MS k BTS. Odpovídající vzdálenost $d_{\text{MAX}} = 2 \cdot r_{\text{MAX}}$ určuje dvojnásobek maximální vzdálenosti MS od BTS. Odtud vyplývá, že systém GSM je navržen na maximální poloměr buňky $r_{\text{MAX}} = d_{\text{MAX}}/2 = 34,89 \text{ km}$.

V případě, kdy není třeba zpoždění signálu v účastnickém kanálu uvažovat nebo MS již časový posuv upravila, vysílá BTS vždy o 3 TimeSloty dříve než MS. Někdy vznikne situace, kdy MS musí upravit začátek vysílání v důsledku velkého

zpoždění signálu. Na pokyn BTS začíná vysílat MS dříve, aby signál, který se na cestě zpozdí, dorazil k BTS přesně o 3 TimeSloty později než byl okamžik vysílání.

Kromě bitů reprezentujících ochrannou dobu, má přístupový burst rozšířené okrajové bity na pozicích BN0, BN1, ..., BN7, resp. BN85, BN86 a BN87. Synchronizační sekvence složená z 41 bitů je na pozicích BN8, ..., BN48.

2.5. Prázdný burst (Dummy burst)

Prázdný burst má stejnou strukturu jako normální burst s tím rozdílem, že na datových pozicích jsou přenášeny přesně známé sekvence 1 a 0. V případě potřeby je zasílán k MS, avšak nenesení žádnou informaci.

3. KANÁLY SYSTÉMU GSM

Před sestavením spojení mezi dvěma účastníky, během komunikace i po jejím skončení, je mezi MS a BTS přenášeno velké množství různých uživatelských a řídicích informací. Podle druhu těchto informací rozlišujeme různé logické kanály. Tyto logické kanály jsou sdružovány v určitých konfiguracích do fyzických kanálů. Fyzickým kanálem se rozumí skutečný přenosový kanál definovaný číslem TimeSlotu a číslem rádiového kanálu ARFCN. Uvedený způsob sdružování se označuje jako mapování logických kanálů do kanálů fyzických.

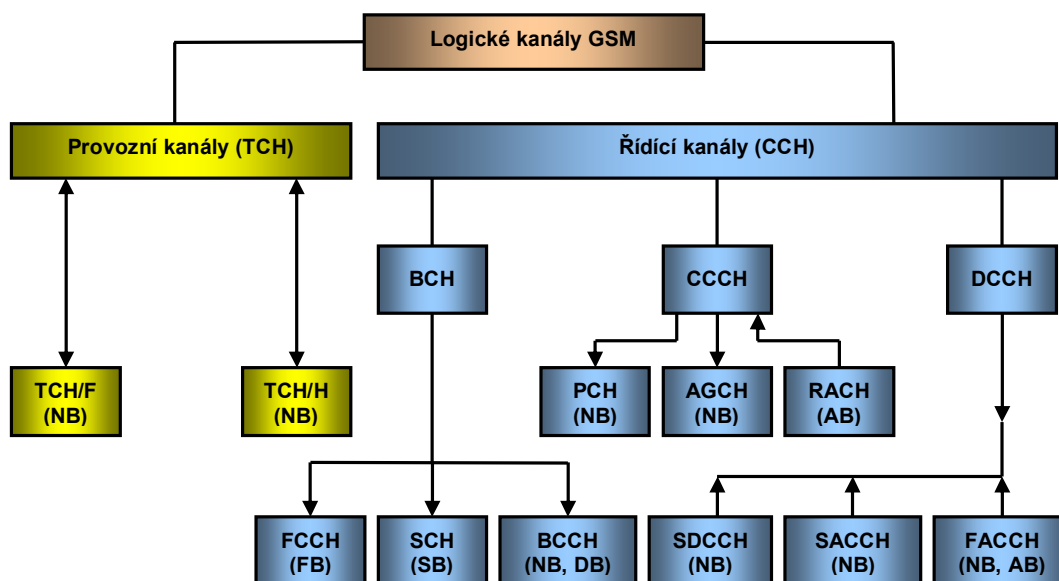
3.1. Fyzické kanály

Přidělené fyzické kanály definované číslem rádiového kanálu ARFCN a číslem TimeSlotu uvnitř kanálu byly dostatečně popsány v kapitole 1.1.

Na tomto místě je ale potřeba zmínit jeden fyzický kanál, který je pro přenos (řídicích kanálů) zásadní. Je jím tzv. Beacon kanál (Beacon channel). Jak už bylo zmíněno v kapitole 1.3., každá základnová stanice vysílá na několika rádiových kanálech (od 1 do 12 kanálů), označených např. C0, C1, ... C12, a v každém takovém kanálu je osm TimeSlotů TS0, TS1, ... TS7. Beacon kanál přísluší prvnímu slotu na prvním kanále dané základnové stanice, tedy C0, TS0. Jeho vysílací výkon je neměnný.

3.2. Logické kanály

Logický kanál představuje druh informace, která se v určitém čase přenáší prostřednictvím fyzického kanálu. V systému GSM se dělí na provozní kanály TCH (Traffic Channel) a řídicí kanály CCH (Control Channel). Přehledné uspořádání všech logických kanálů systému GSM je znázorněno na Obr. 10 (v závorkách jsou uvedeny používané typy burstů).



Obr. 10 Logické kanály systému GSM

Některé logické kanály jsou obousměrné, některé slouží jen pro směr uplink, jiné pouze pro směr downlink (v Obr. 10 naznačeno šipkami, přičemž šipka směrem dolů představuje downlink). Provozní kanály TCH jsou určeny k přenosu digitalizovaných hovorových nebo datových uživatelských signálů a označují se zkratkami TCH/F, TCH/H, TCH/F9.6, TCH/H4.8 atd. Symbol za lomítkem značí přenos s plnou (F-full rate) nebo poloviční (H-half rate) rychlostí a číslo za lomítkem označuje přenosovou uživatelskou rychlost datového signálu (text nebo obraz) v kbit/s. Řídící kanály CCH se dělí do dalších 3 podskupin, které jsou popsány dále.

3.2.1. Vysílané řídicí kanály BCH (Broadcast Channels)

Tyto kanály jsou vysílány základnovou stanicí (downlink) na Beacon kanálu. Podle druhů informací, které přenášejí, se dělí do následujících skupin:

- FCCH (Frequency Correction Channel) – pomocí burstu pro kmitočtovou korekci umožňuje mobilní stanici přesně doladit frekvenci,
- SCH (Synchronisation Channel) – s využitím synchronizačního burstu se v něm vysílají data nutná pro časovou (rámcovou) synchronizaci,
- BCCH (Broadcast Control Channel) - jsou v něm informace nezbytné pro registraci MS v systému, dále korekce výkonu MS, číslo rádiového kanálu, číslo sekvence FH, kódy státu, sítě a oblasti.

3.2.2. Společné řídicí kanály CCCH (Common Control Channel)

Společné řídicí kanály jsou vysílány v obou směrech (downlink, uplink) na Beacon kanálu. Používají se zejména při navazování spojení a handoveru. Dělí se do následujících skupin:

- PCH (Paging Channel) – pomocí tohoto kanálu je mobilní stanici zasílána informace o požadavku na komunikaci ze strany BSS (s mobilní stanicí chce nějaký účastník komunikovat),
- RACH (Random Access Channel) – mobilní stanice tímto kanálem žádá pomocí přístupového burstu o přístup k síti, pokud chce zahájit přenos, ať už na základě vlastního požadavku nebo na základě pagingu,
- AGCH (Access Grant Channel) – základnová stanice tímto kanálem potvrdí nebo zamítne mobilní stanici přístup k síti (odpověď na RACH).

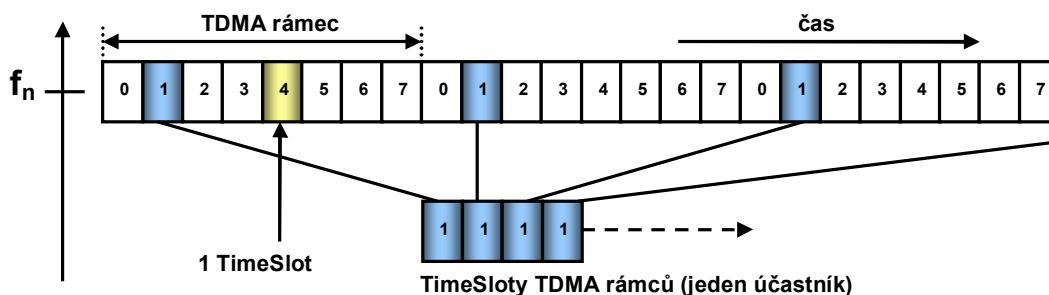
3.2.3. Vyhrazené řídicí kanály DCCH (Dedicated Control Channel)

Všechny tyto jednoúčelové řídicí kanály jsou vysílány v obou směrech (downlink, uplink) a jejich bursty jsou určeny pro konkrétní mobilní stanici. Dělí se do následujících skupin:

- SDCCCH (Standalone Dedicated Control Channel) – používá se pro přenos signalizace do MS v pohotovostním režimu a dále pro vzájemnou komunikaci MS a systému před přidělením provozního kanálu,
- SACCH (Slow Associated Control Channel) – využívá se pro přenos signalizačních zpráv, jakmile je aktivní některý provozní kanál,
- FACCH (Fast Associated Control Channel) – tzv. přepadový kanál, používá se během komunikace účastníka, kdy je třeba zaslat důležitou zprávu, např. pro handover.

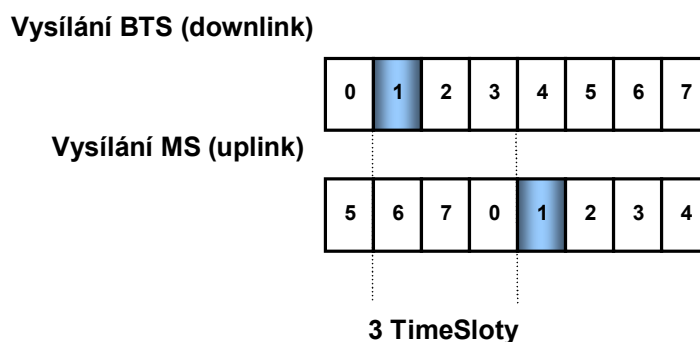
4. KOMUNIKACE MEZI ZÁKLADNOVOU A MOBILNÍ STANICÍ

Účastnický signál sestavený do burstů je mezi MS a BTS přenášen v TimeSlots na konkrétním fyzickém kanálu. Přenáší se v pravidelně se opakujících časových intervalech TDMA rámců tak, jak je naznačeno na Obr. 11.



Obr. 11 Vznik signálu pro jednoho účastníka

TDMA rámce pro uplink jsou na BTS o 3 TimeSloty zpožděny za rámci pro downlink. Aby toto na BTS platilo, musí jednotlivé MS vysílat TimeSloty na uplinku s předstihem odpovídajícím jejich vzdálenosti od BTS (Obr. 12). Tato doba se označuje TA (Time Advance).



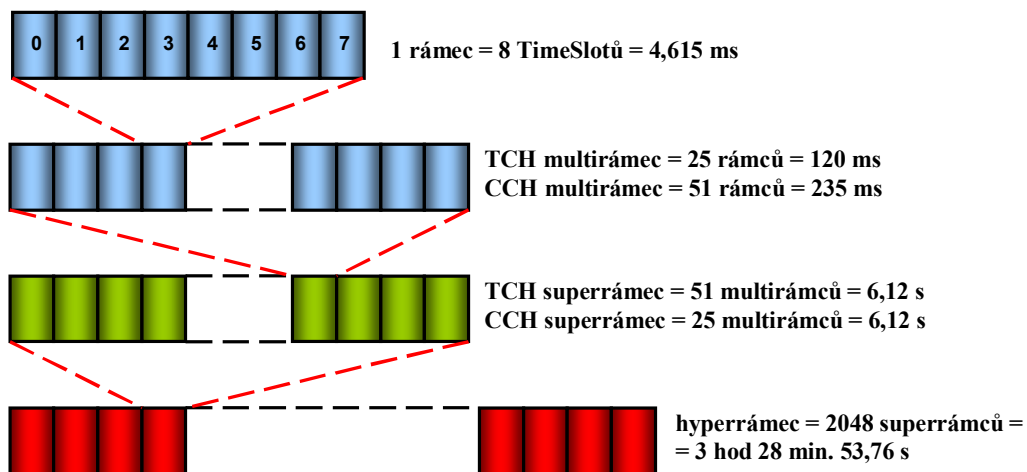
Obr. 12 Zpoždění mezi downlinkem a uplinkem

4.1. Skládání TDMA rámců

Spojením 26 hovorových TDMA rámců vzniká jeden multirámeček. Dalším spojením 51 multirámečků vznikne jeden superrámeček a konečně spojením 2048 super-

rámců vznikne jeden hyperrámec s dobou periody 3 hodiny, 28 minut, 53 sekund a 760 ms.

V případě, že v TDMA rámcích jsou přenášeny řídicí signály (kanály), potom jeden multirámec vznikne spojením 51 TDMA rámců. Spojením 26 těchto multirámeců vznikne jeden superrámec. Hierarchie rámců v systému GSM je přehledně znázorněna Obr. 13.

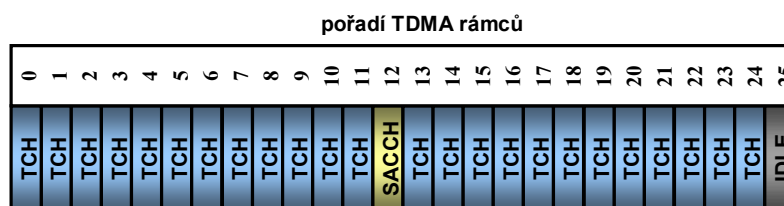


Obr. 13 Hierarchie rámečků

Uvedená struktura všech rámečků spolu s použitou ekvalizací, dovolují používat mobilní stanice až do rychlosti 250 km/hod.

4.1.1. Multirámec provozních kanálů

Multirámec provozních kanálů vznikne spojením 26 TDMA rámečků. Časová organizace provozních kanálů s plnou přenosovou rychlostí TCH/F (13 kbit/s pro hovor a 9,6 kbit/s pro data) je pro jeden multirámec symbolicky znázorněna na Obr. 14.



Obr. 14 Časová organizace provozních kanálů TCH/F

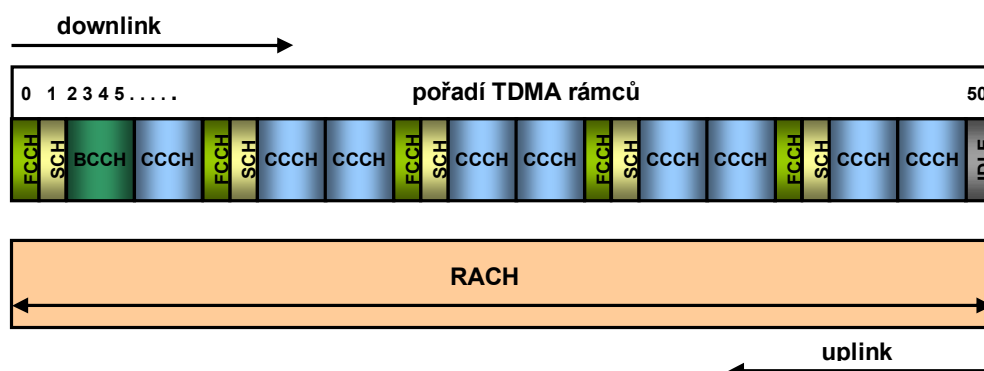
Mezi jednotlivými TDMA rámcí je mezer 7 TimeSlotů. Multirámece obsahuje kromě provozních kanálů TCH/F i jeden kanál SACCH (13. pozice multirámece). Jeho přenosová rychlost je $114 \text{ bitů}/120 \text{ ms} = 950 \text{ bit/s}$. 26. pozice multirámece je volná.

Organizace provozních kanálů s poloviční přenosovou rychlostí (6,5 kbit/s pro hovor a 4,8 kbit/s pro data) je obdobná jako na Obr. 14, avšak zatímco v předchozím případě je pro jeden účastnický kanál využíván každý 8. TimeSlot TDMA rámece, v tomto případě je využíván až každý 16. TimeSlot. V TimeSlotech se stejným číslem se tedy přenáší dva účastnické kanály (střídají se každý následující TDMA rámece).

4.1.2. Multirámece řídicích kanálů

Řídicí kanály se vysílají na Beacon kanálu. Podle účelu, ke kterému se používají existuje několik kombinací kanálů. V následujícím textu bude uvedena pouze základní konfigurace.

Multirámece řídicích kanálů vznikne spojením 51 TDMA rámců. Časová organizace řídicích kanálů je nakreslena na Obr. 15.



Obr. 15 Časová organizace řídicích kanálů

Na začátku každého multirámece se přenáší kanál pro kmitočtovou korekci FCCH, za kterým následuje (ve stejném slotu následujícího TDMA rámece) kanál pro časovou synchronizaci SCH. Dvojice kanálů FCCH a SCH se opakuje po osmi TDMA rámcích. V jednom multirámece je takových dvojic celkem pět. Za první

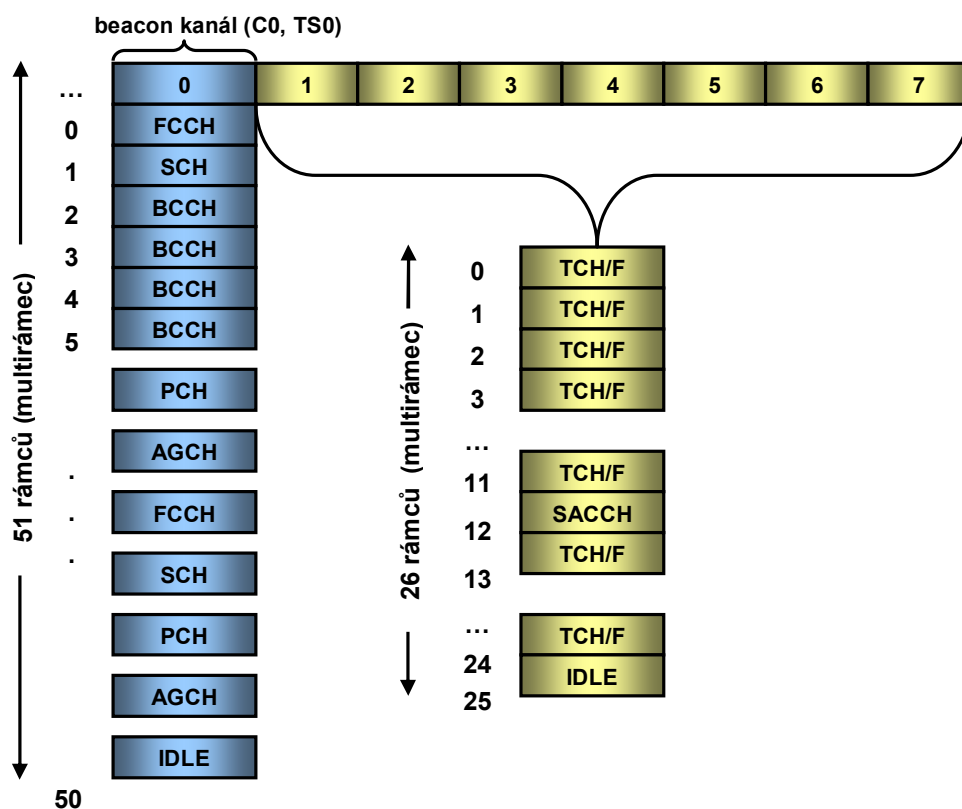
dvojicí těchto kanálů se vysílají čtyři kanály BCCH. Následuje kombinace kanálů PCH a AGCH.

V případě, že žádá o přístup do systému mobilní stanice, vysílají se na uplinku v multirámci pouze kanály náhodného přístupu RACH/F (RACH/H).

4.2. Režimy mobilní stanice

V zásadě existují dva režimy, v kterých se může mobilní stanice v systému GSM nacházet. Prvním je režim, kdy je mobilní stanice zapnutá, ale zůstává pasivní v síti (mobilní účastník nekomunikuje s jiným účastníkem). Říkáme, že je mobilní stanice v pohotovostním režimu (idle mode). Druhý případ nastává, když existuje spojení mezi mobilní a základnovou stanicí (mobilní účastník komunikuje s jiným účastníkem). Říkáme, že je mobilní stanice v aktivním režimu (dedicated mode).

V následujícím textu budou postupně popsány situace od zapnutí mobilní stanice až po přidělení služby mobilní stanici (uskutečnění hovoru). Jde o podrobnější popis organizace provozních a řídicích kanálů tak, jak jsou využívány v jednotlivých fázích komunikace mezi mobilní a základnovou stanicí. Společné uspořádání provozních a řídicích kanálů (směr downlink) znázorňuje Obr. 16.



Obr. 16 Společné uspořádání provozních a řídicích kanálů

Výsledný datový tok je tedy tvořen řadou logických kanálů, resp. burstů, které v Obr. 16 čteme zleva doprava postupně až k 8. TimeSlotu 51. rámece.

4.2.1. Zapnutí mobilní stanice

Po zapnutí MS (kdy v paměti nejsou uloženy informace o sousedních buňkách), se její přijímač nastaví na určitou (malou) citlivost a přeladuje se přes všechny rádiové kanály. Hledá kanál FCCH a současně měří průměrnou hodnotu všech signálů. Po přeladění celého pásma má MS dostatečně přesný přehled o velikostech jednotlivých signálů (důležité pro handover). Přeladování může trvat i několik sekund. Jestliže MS v průběhu přeladování nenajde FCCH, zvýší citlivost přijímače a postup opakuje. Je-li FCCH detekován, je provedeno kmitočtové naladění s ohledem na ofset 67,7 kHz (burst obsahuje samé nuly). Po nastavení kmitočtového syntezátoru je MS kmitočtově naladěna a prohlásí tento kanál za C0, TS0.

V následujícím TDMA rámci hledá potom MS známou sekvenci 64 bitů v kanálu SCH. Tato sekvence je korelována se vzorkem uloženým v paměti MS a při maximu této funkce je MS časově zasynchronizovaná. Ze stejného burstu určí MS kód BSIC (Base Station Identity Code) a jednoznačnou identifikaci operátora.

Nyní může MS dekódovat informace v kanále BCCH (následující čtyři rámce), jako např. seznam sousedních buněk, minimální úroveň přijímaného signálu (všechny BCCH jsou vysílány se stejnou standardní úrovní), identifikační kód oblasti LAI (Location Area ID), kmitočty řídicích kanálů sousedních BTS, číslo rádiového kanálu, číslo sekvence FH (Frequency Hopping), kódy státu. Souhlasí-li číslo kanálu BCCH s údajem uloženým v paměti, MS na tomto kanálu zůstane. Jestliže údaje nesouhlasí (MS byla vypnuta a účastník se s ní přesunul z dosahu původních i sousedních BTS) nebo je úroveň přijímaného signálu nízká, MS hledá další řídicí kanál. Po provedení těchto činností by měla mít mobilní stanice informace o signálu nejméně šesti sousedních BTS.

4.2.2. Pohotovostní režim mobilní stanice

Mobilní stanice v pohotovostním režimu (po zasynchronizování a určení správného kanálu BCCH) sleduje kanál PCH a čeká na příchozí požadavek nebo může sama o nějakou službu požádat pomocí kanálu RACH.

Pokud mobilní stanice zachytí příchozí požadavek na kanálu PCH, musí do určité doby odpovědět na kanálu RACH (žádá o určitou službu). Tato odpověď obsahuje 3 bity, které určují důvod žádosti (odezva na paging, žádost o hovor, atd.) a pětibitové náhodné číslo. Jestliže na žádost nepříjde ze systému odpověď v nastavené době (např. z důvodů kolize na RACH), MS žádost opakuje se změnou čekací doby. Tuto operaci provádí tak dlouho, dokud nedostane odpověď. Po přijetí zprávy posílá BSS její potvrzení spolu se stejným náhodným číslem s jakým zprávu přijala, a to přes kanál AGCH spolu s číslem kanálu pro SDCCH. SDCCH se používá právě v případě, kde ještě není přidělen žádný provozní kanál, ke kterému by se dal asociovat kanál SACCH nebo FACCH. MS zasílá do sítě konečnou zprávu „SABM frame“ (Set Asynchronous Balanced Mode). Jako odpověď na SABM zprávu posílá BSS požadavek MSC (SSCP message), ke které přidává informaci o požadované službě. MSC tuto zprávu potvrdí.

4.2.3. Aktivní režim mobilní stanice

V aktivním režimu mobilní stanice, kdy např. účastník komunikuje s jiným účastníkem, má přidělený provozní kanál TCH. Během komunikace se musí přenést řada řídicích informací (např. regulace vysílaného výkonu, informace z MS o měření velikosti signálů rádiových kanálů servisní (aktuální) i sousedních BTS). K tomuto účelu se používá kanál SACCH (13. pozice multirámce provozních kanálů). Pomocí tohoto kanálu se posílají i SMS zprávy (pokud účastník hovoří). V některých situacích, kdy je potřeba zaslat důležitou zprávu, např. pro handover, nestačí rychlost kanálu SACCH. Proto se dočasně vytváří rychlý kanál FACCH „ukradením“ poloviny nebo celého burstu provozního kanálu TCH, což účastníci komunikace vůbec nepostřehnou.

5. MODULACE GMSK

Modulace GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) je variantou modulace MSK. Narozdíl od pravoúhlých modulačních impulzů u modulace MSK procházejí u modulace GMSK tyto impulzy před modulátorem Gaussovskou dolní propustí GLPF (Gaussian Low Pass Filter), která je zaoblená, což má potom za následek výrazné potlačení nežádoucích postranních složek spektra modulovaného signálu.

U modulace GMSK je kmitočtový zdvih (kmitočtová deviace) rovna čtvrtině bitové rychlosti modulačního signálu, tedy $\Delta f = f_b/4$ (tj. 67,7 kHz) a index modulace (deviační poměr) $h = 2 \cdot \Delta f / f_b = 0,5$. Tento index odpovídá minimálnímu kmitočtovému odstupu, při němž jsou signalizační kmitočty ještě ortogonální a umožňují koherentní (ortogonální) demodulaci, jež vystačí s podstatně menším poměrem signál/šum. Kmitočet nosné vlny se rovná celistvému násobku čtvrtiny bitového kmitočtu $f_b/4$ modulačního signálu. Signalizační kmitočty f_1, f_2 a rozdíl jejich posuvů fáze $\Delta\varphi$ za dobu bitové periody modulačního signálu T_b jsou potom určeny relacemi

$$f_1 = f_c - f_b/4 \text{ a } f_2 = f_c + f_b/4 ; \Delta\varphi = \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 = 2\pi f_2 T_b - 2\pi f_1 T_b = \pi .$$

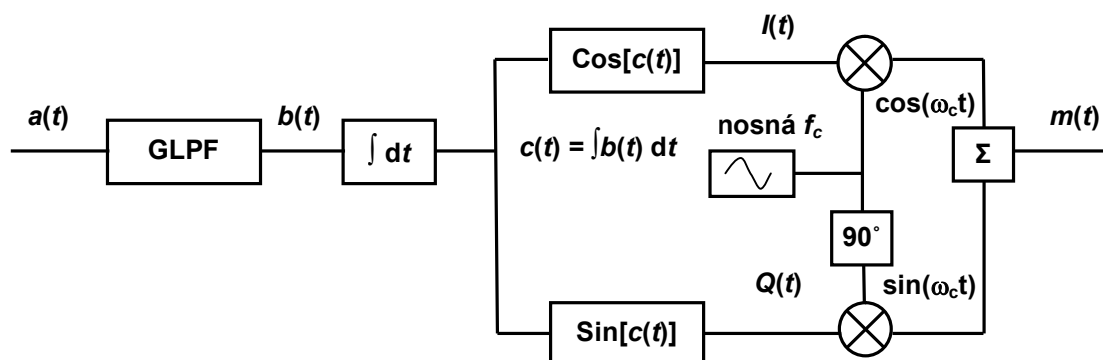
Modulaci GMSK by bylo možné realizovat pomocí sériového modulátoru FSK s oscilátorem a s předmodulační propustí GLPF. Toto řešení však není vhodné u systému GSM, kdy používaná modulace GMSK má hodnotu indexu modulace $h = 0,5$, které odpovídá fázový zdvih modulovaného signálu za dobu T_b právě $\pm \pi/2$, tj. $\pm 90^\circ$. Ten je nutný dodržovat s velkou přesností. Té však modulátor s oscilátorem nemůže vzhledem ke značnému driftu jím generovaných kmitočtů dosáhnout, což potom brání v aplikaci koherentní demodulace. Výhodnější je zde paralelní (kvadraturní) modulátor.

5.1. Kvadraturní modulátor

Signál GMSK můžeme vyjádřit vztahem

$$m(t) = U_c \cos(2\pi f_c t) \cos\left[2\pi k_{FM} \int_0^t b(t) dt\right] - U_c \sin(2\pi f_c t) \sin\left[2\pi k_{FM} \int_0^t b(t) dt\right].$$

Jak je patrné, signál GMSK je možné vytvářet ze dvou složek. Tomuto způsobu modulace odpovídá blokové schéma kvadraturního modulátoru (Obr. 17).



Obr. 17 Kvadraturní modulátor GMSK

Do obou větví modulátoru se přivádějí shodné a tedy plně korelované modulační signály $c(t)$. První ze dvou složek signálu je synfázní (kosinová) nosná vlna, násobená signálem

$$I(t) = \cos\left[2\pi k_{FM} \int_0^t b(t) dt\right],$$

ten vzniká ze vstupního modulačního signálu $a(t)$ filtrací dolní propustí GLPF, následující integrací a tvarováním funkcí kosinus. Druhou složkou je kvadraturní (sinusová) nosná vlna, násobená signálem

$$Q(t) = \sin\left[2\pi k_{FM} \int_0^t b(t) dt\right],$$

vzniklým ze vstupního filtru opět filtrací a integrací, avšak s následným tvarováním funkcí sinus.

5.2. Kmitočtová filtrace signálu

Digitální signál (NRZ) na vstupu GLPF má podobu pravoúhlých impulzů. Obálka jeho výkonového spektra sleduje funkci $(\sin x/x)^2$ a zabírá tedy nekonečně široké kmitočtové pásmo. Přenos všech složek tohoto spektra následujícím komunikačním kanálem však není realizovatelný a byl by i zbytečný, neboť podstatná část jeho energetického obsahu je soustředěna pouze do hlavního laloku. Potřebné kmi-

točtové omezení je tedy realizováno pomocí GLPF, což se v časové oblasti projeví zaoblením uvažovaného pravoúhlého signálu. Je-li přenášen takovým pásmově omezeným systémem krátký impulz o době trvání T_b , jsou kmitočtové složky jeho spektra různě tlumeny. Co je však podstatnější, vykazují také časovou disperzi, tj. rozdílné doby průchodu tímto filtrem. V důsledku toho je impulz objevující se za vstupní dolní propustí rozptýlen do intervalu delšího než je jeho bitová perioda T_b . Prochází-li potom systémem sekvence takových impulzů, reprezentujících určitý binární signál, výstupní odezvy těchto impulzů se vzájemně časově překrývají a právě v důsledku toho mohou vznikat nežádoucí intersymbolové interference ISI (Inter Symbol Interference).

Základním parametrem modulace GMSK je relativní (poměrná) šířka pásma $BN = B \cdot T_b$, kde B je šířka pásma Gaussova filtru pro pokles o 3 dB a T_b je bitová perioda modulačního signálu. Při $BN \rightarrow \infty$ přechází modulace GMSK v modulaci MSK a spektrum výstupního signálu má velké postranní laloky. Při zmenšování parametru BN se postranní laloky výrazně zmenšují. Současně s tím se však mění tvar modulačních impulzů a vznikají již zmíněné intersymbolové interference ISI. Původní systém s plnou odezvou (modulační impulz nepřesáhne bitovou periodu T_b) se začíná měnit na systém s částečnou odezvou (modulační impulzy na výstupu propusti přesahují více než jednu periodu). Volba parametru BN pro určitý systém je tedy kompromisem mezi dostatečně potlačenými postranními laloky spektra a přijatelnými intersymbolovými interferencemi ISI a tím i bitové chybovosti BER (Bit Error Rate). Pro celoevropský radiotelefonní systém GSM byla zvolena hodnota $BN = 0,3$.

5.3. Simulace GMSK modulace

Pro ukázkou modulace GMSK se bude předpokládat signál ve formátu NRZ. Veškerá simulace byla provedena pomocí matematického softwaru Matlab.

5.3.1. Gaussovská dolní propust

Gaussovská dolní propust má impulsní odezvu danou vztahem

$$g(t) = \frac{1}{2T_b} \left[Q\left(2\pi B \frac{t - T_b/2}{\sqrt{\ln 2}}\right) - Q\left(2\pi B \frac{t + T_b/2}{\sqrt{\ln 2}}\right) \right]$$

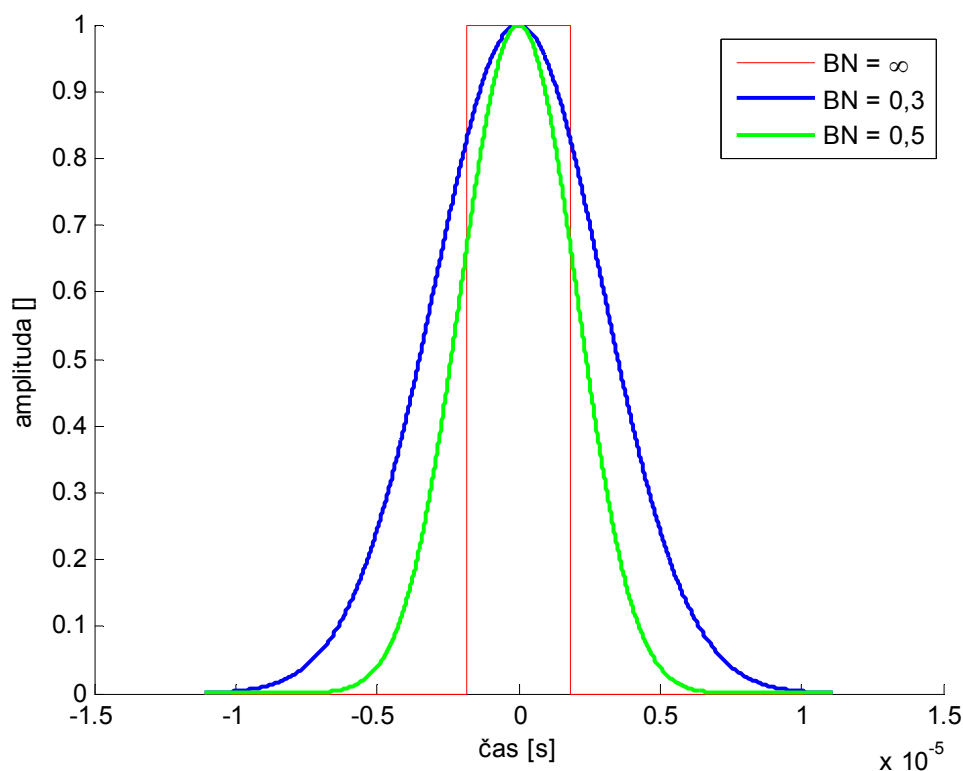
pro

$$0 \leq BT_b \leq \infty$$

kde $Q(t)$ je

$$Q(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(-x^2 / 2) dx = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{t}{\sqrt{2}}\right).$$

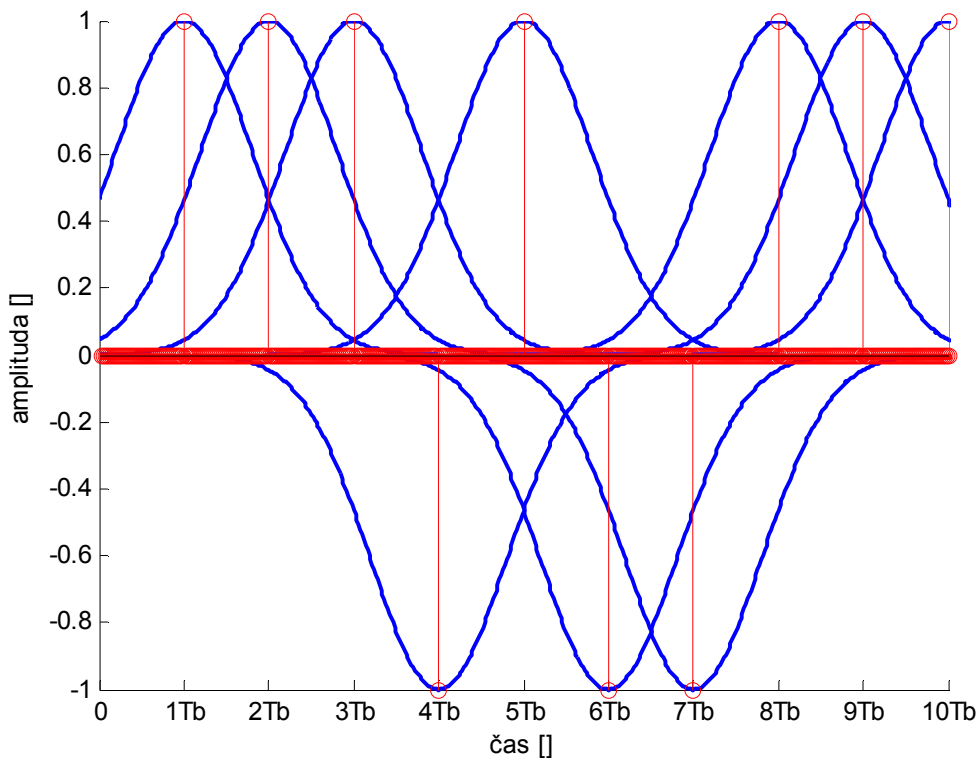
Impulsní odezva filtru je naznačena na Obr. 18. Odezva filtru je znázorněna pro několik hodnot relativní šířky pásma BN . Červenou barvou je znázorněn průběh s relativní šířkou pásma, která se blíží k nekonečnu (signál bez filtrace). Zelenou barvou je znázorněn průběh s $BN = 0,5$ a nakonec modrou barvou je znázorněn průběh s $BN = 0,3$.



Obr. 18 Impulsní odezva GLPF

Nechť na vstup GLPF přichází náhodná datová sekvence $a(t)$ o bitovém kmitočtu $f_b = 1/T_b$. Relativní šířka pásma Gaussovského filtru je nastavena na $BN = 0,3$.

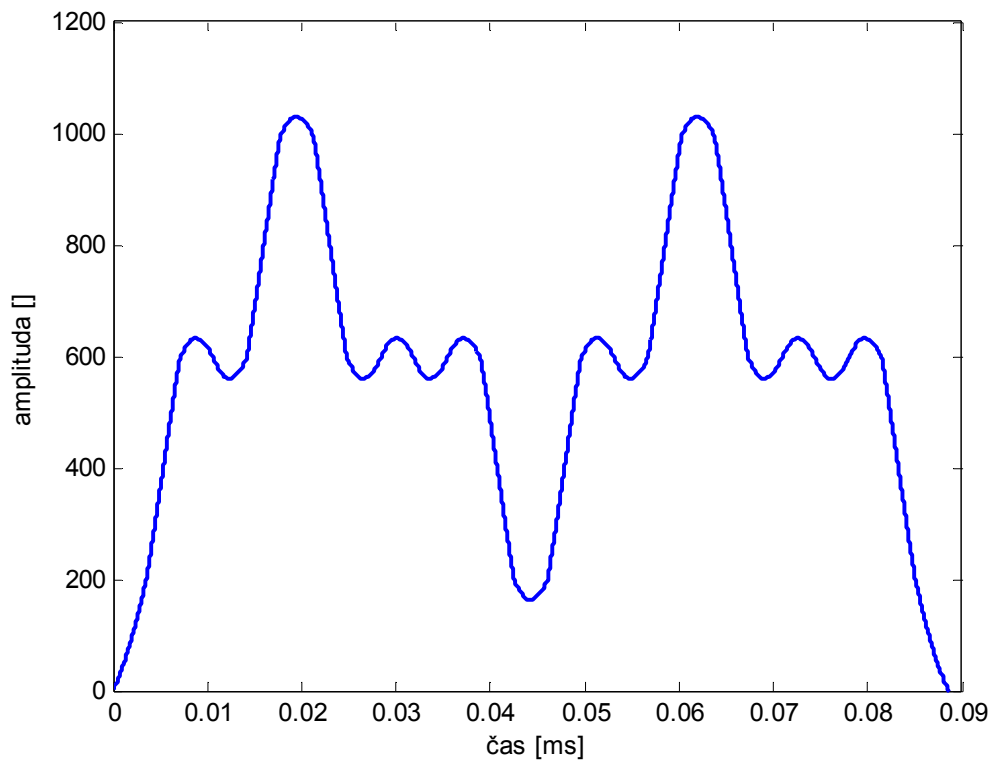
Část náhodného signálu (10 bitů) za GLPF je znázorněna na Obr. 19 (modrou barvou). Červenou barvou je znázorněn signál před filtrací.



Obr. 19 Signál $b(t)$ za GLPF

Čím vyšší bude relativní šířka pásma BN , tím se bude modulační impulz blížit svému průběhu před filtrací. Je-li $BN = \infty$, zaujímá každý modulační impulz pouze jedinou bitovou periodu T_b .

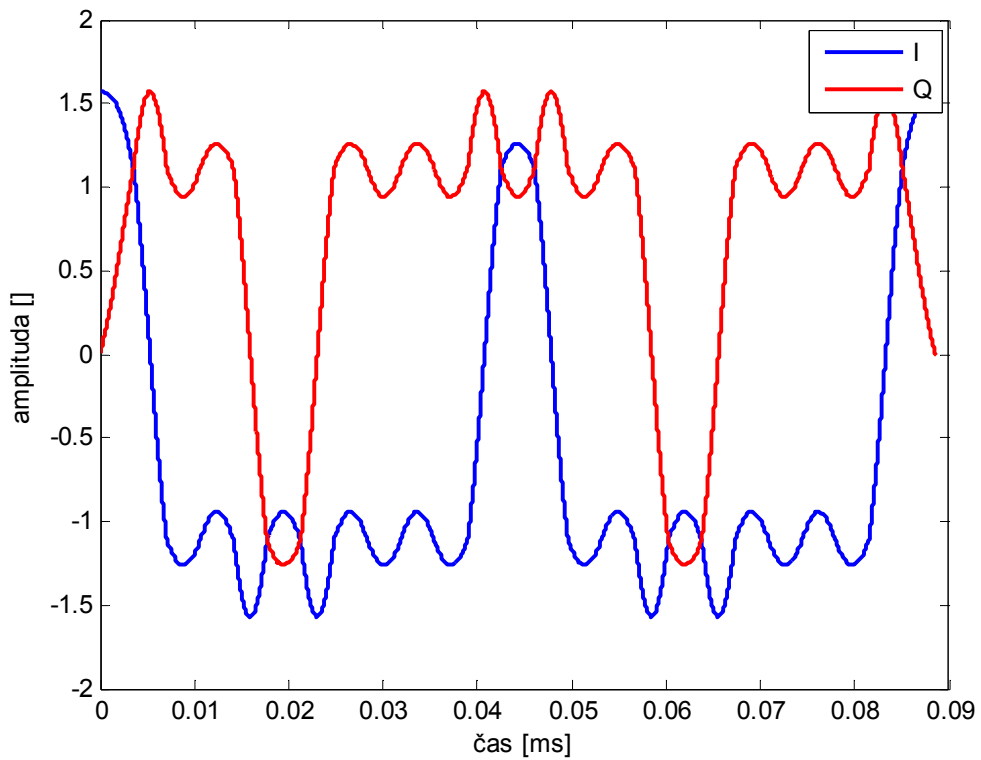
Na vstup integrátoru přichází odfiltrovaný signál $b(t)$. Pro ukázkou je vybrána bitová posloupnost: $\{1,1,-1,1,1,-1,-1,1,-1,1,-1,1,1,-1,-1,1,-1,1,-1,-1\}$. Signál $b(t)$ je integrován a výsledkem integrace je signál $c(t)$, který je znázorněn na Obr. 20.



Obr. 20 Signál $c(t)$ za integrátorem

5.3.2. I/Q složky signálu

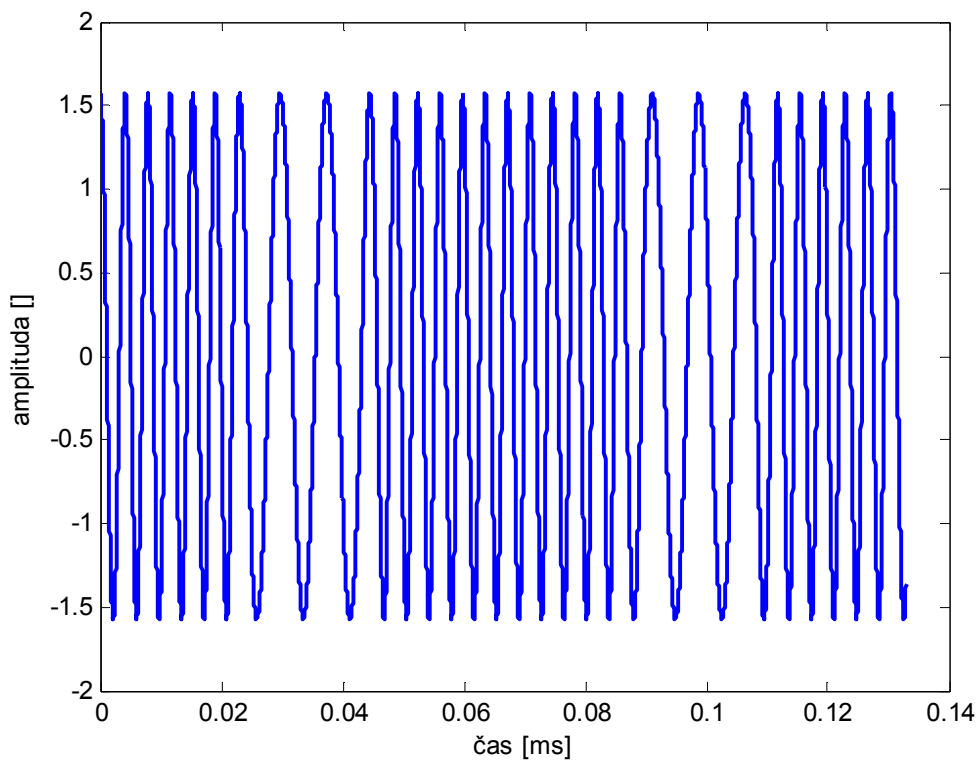
Nyní se signál $c(t)$ rozdělí do dvou větví I a Q , kde se použijí tvarovače. V I větvi je funkce $c(t)$ násobená s funkcí \cos (nosná frekvence). V Q větvi je pak použita funkce \sin (nosná frekvence), s kterou je funkce $c(t)$ násobena. Průběhy v obou větvích jsou znázorněny na Obr. 21 a odpovídají opět již jednou zmiňované bitové posloupnosti na vstupu integrátoru.



Obr. 21 I/Q složky signálu

5.3.3. Signál GMSK

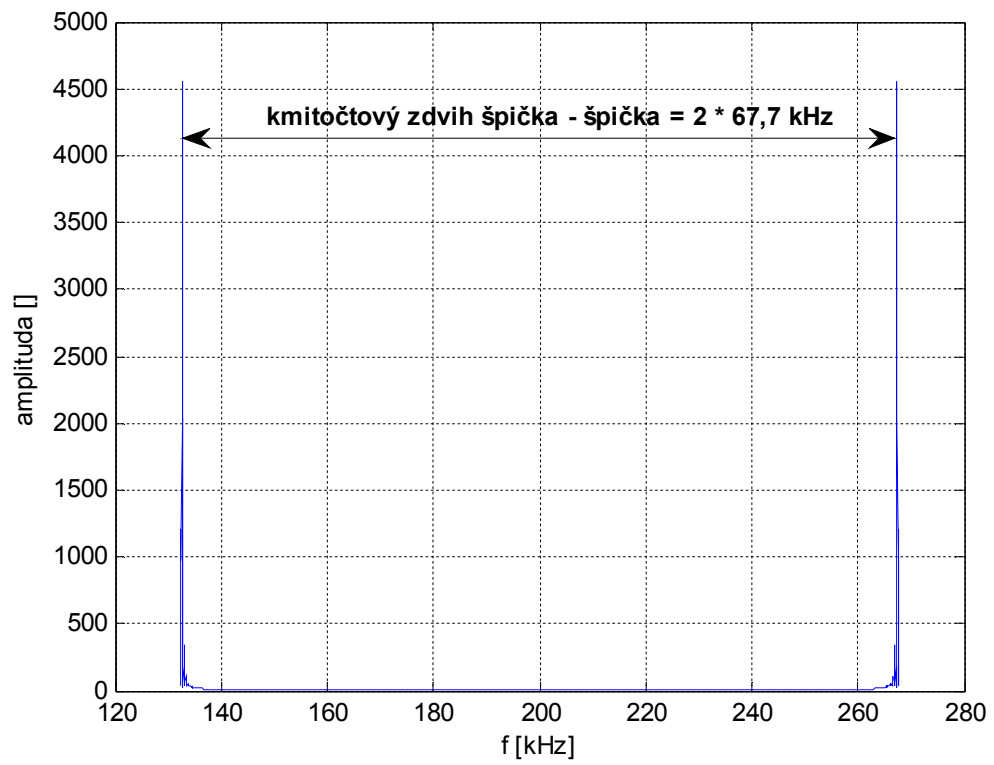
Obě složky signálu $I(t)$ a $Q(t)$ jsou namodulovány na nosný kmitočet (neodpovídá reálně používaným nosným kmitočtům kvůli zřetelnosti). Pro ukázkou je vybrána bitová posloupnost, na které bude zřejmé „přepínání“ kmitočtů mezi jednotlivými stavy modulačního signálu. Časový průběh signálu GMSK je vidět na Obr. 22.



Obr. 22 Signál GMSK

5.3.4. Spektrum signálu

Jak vypadá signál ve spektrální oblasti je vidět na Obr. 23. Signál GMSK je namodulován v přeloženém pásmu na nosnou vlnu f_c o frekvenci 200 kHz. Po obou stranách nosné jsou vidět dvě postranní pásma, tedy signalizační kmitočty f_1 a f_2 . Ty mají frekvence určené relacemi $f_1 = f_c - f_b/4$ a $f_2 = f_c + f_b/4$, kde f_b je kmitočet modulačního signálu.



Obr. 23 Amplitudové spektrum signálu GMSK

6. MĚŘENÍ A ANALÝZA SIGNÁLU

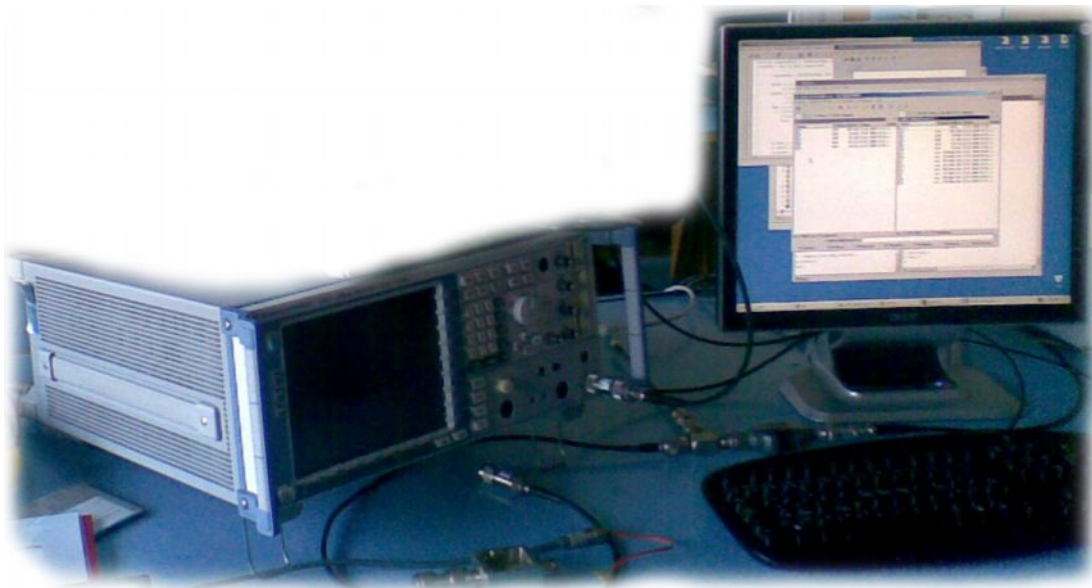
Pro záznam reálných signálů byl použit spektrální analyzátor Rohde & Schwarz FSQ3 (Obr. 24) pro několik kanálů. Tento přístroj je v základní verzi ze série označení FSQ a umožňuje zachytit signál až do frekvence 3,6 GHz. Přístroj dále disponuje nejširším rozlišovacím filtrem 50 MHz. Zachycený signál rozkládá rovnou do I/Q složek, na které se dá využít kapacita paměti až 16 milionů vzorků.

Při měření byla využívána všesměrová anténa, která byla umístěna v prostoru laboratoře. Toto řešení velkou měrou přispívalo k příjmu odražených signálů od okolních budov, protože laboratoř s anténou byla hluboko pod úrovní střech okolních budov.



Obr. 24 Spektrální analyzátor Rohde & Schwarz FSQ3

Vstupní filtr na analyzátoru byl nastaven na 300 kHz, aby ořízl 200 kHz široké pásmo pro jeden kanál a zároveň ho kmitočtově nezkreslil. Signál byl zaznamenáván se vzorkovací frekvencí 5 MHz a 10 MHz. Kapacita paměti pro I/Q složky byla plně využita.

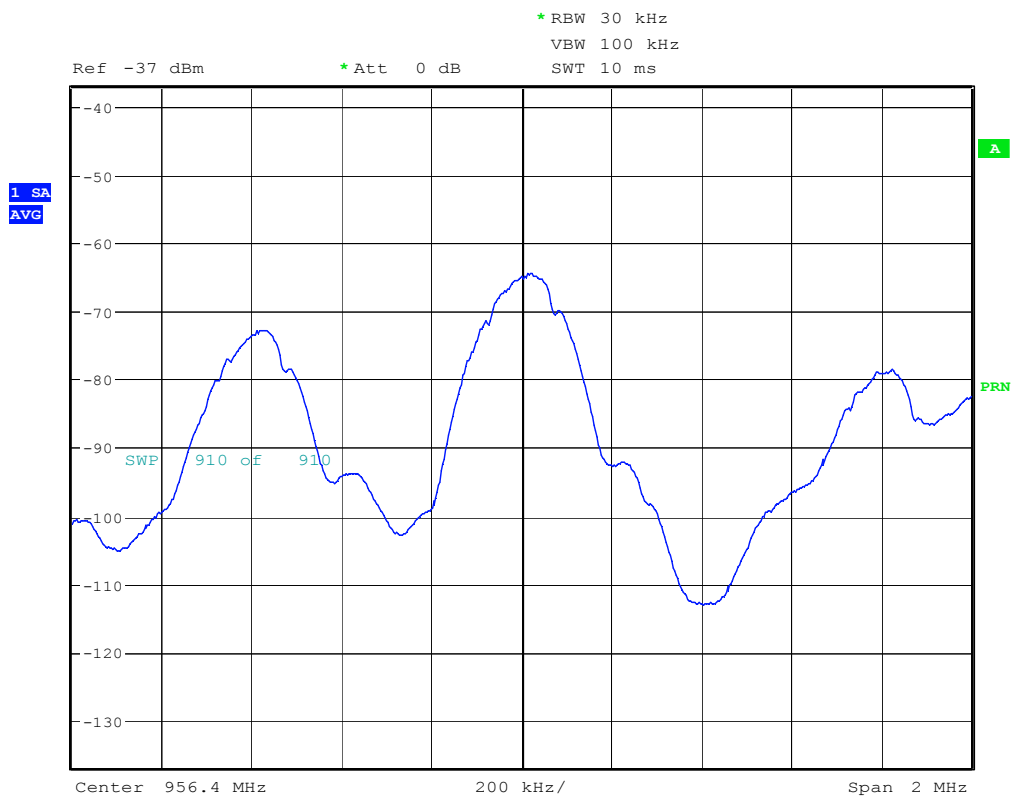


Obr. 25 Měřicí pracoviště se spektrálním analyzátozem Rohde & Schwarz FSQ3

Měřicí pracoviště (Obr. 25) založené na spektrálním analyzátozu s připojenou všesměrovou anténou bylo doplněno o předzesilovač a počítač. Sledovaný signál se vždy nejprve zaznamená do paměti analyzátozu a následně se po sériové lince načte do PC. Jako prostředí pro komunikaci bylo využito prostředí Matlab.

Z několik zachycených signálů na určitých kanálech se pro analýzu vybíral ten nejvhodnější. Nakonec byl vybrán zachycený signál na 107. kanálu, tedy na nosném kmitočtu 956,4 MHz (Obr. 26).

Veškeré analýzy časových záznamů, demodulace signálu a výpočty spekter byly prováděny v prostředí Matlab.



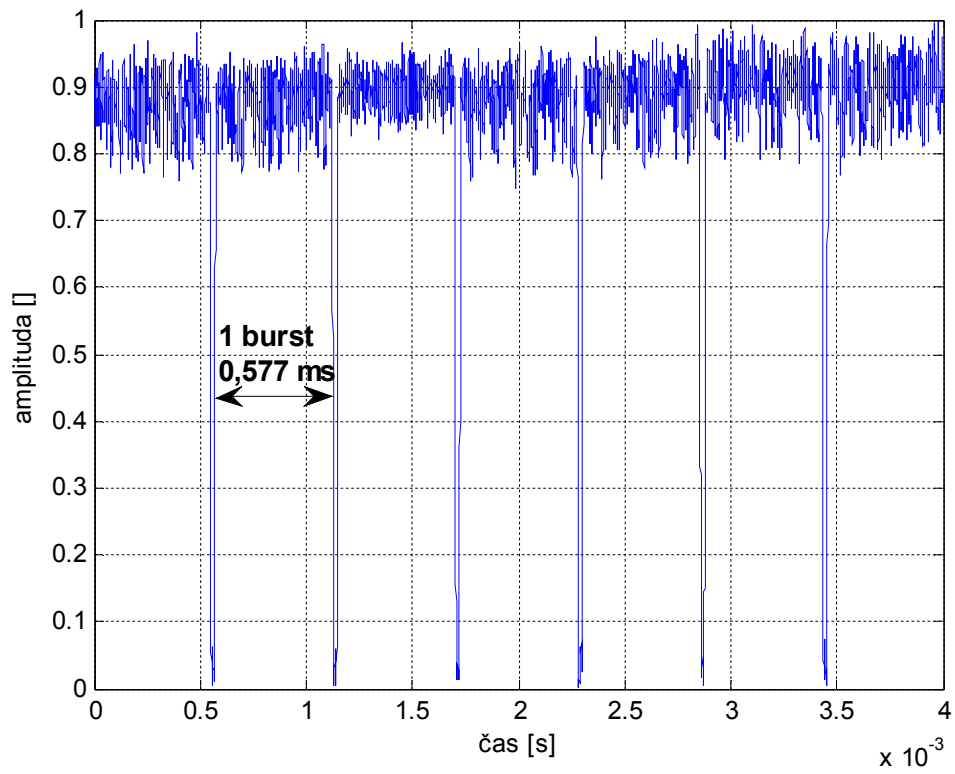
Date: 22.JAN.2009 10:31:05

Obr. 26 Spektrum signálu GSM zachycené spektrálním analyzátořem

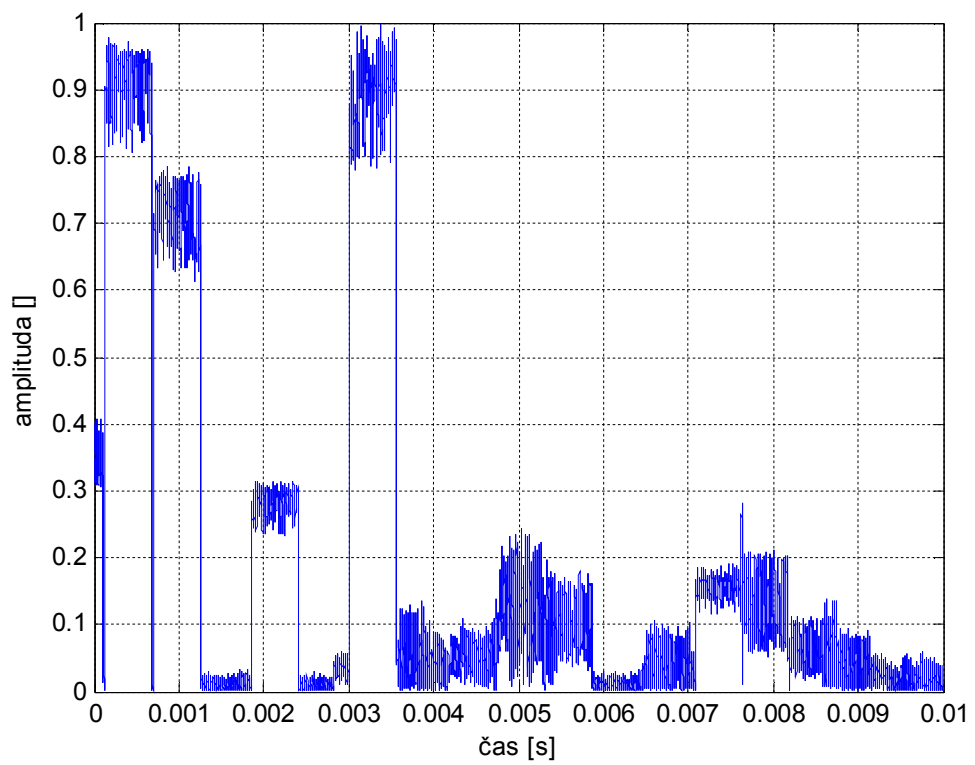
6.1. Časový průběh signálu

Záznam signálu byl proveden na dvou různých kanálech, které byly v okolí dostupné. Vzhledem k charakteru signálu, možností přístroje byly pro záznam zvoleny vzorkovací frekvence 5 MHz a 10 MHz. Vhodné nastavení dalších parametrů (vstupní filtr, zesilovač signálu) při těchto vzorkovacích frekvencích umožňuje demodulaci signálu a následnou obnovu původního datového toku.

První typ signálu byl zaznamenáván se vzorkovací frekvencí 5 MHz na kanálu z blízké BTS, kanál byl plně využíván, tzn. byly naplněny všechny TimeSlots, jak je vidět na Obr. 27. Signál nevykazoval významnější kolísání úrovně. Ze zaznamenaného signálů jsou patrné časové prodlevy mezi vysílanými bursty, což odpovídá teoretickým předpokladům vyplývajícím z tolerančního výkonového diagramu.



Obr. 27 Signál z blízké BTS se všemi využitými TimeSloty



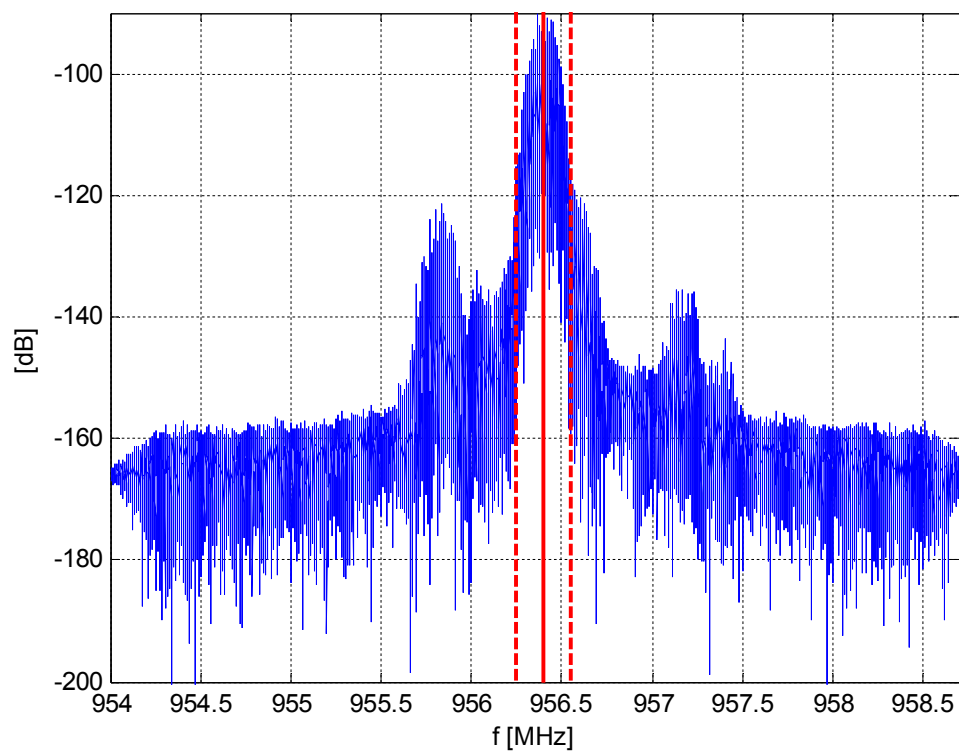
Obr. 28 Signál ze vzdálené BTS (méně využitý)

Druhý typ signálu byl zachycen ze vzdálené, méně využívané BTS se vzorkovací frekvencí 10 Mhz. Signál byl mnohem více zašuměn, některé TimeSloty nebyly v přenosu využívány, jak je vidět na Obr. 28. Opět jsou patrné, i když méně, časové prodlevy mezi vysílanými bursty. Na obrázcích jsou pouze absolutní hodnoty zaznamenaných signálů.

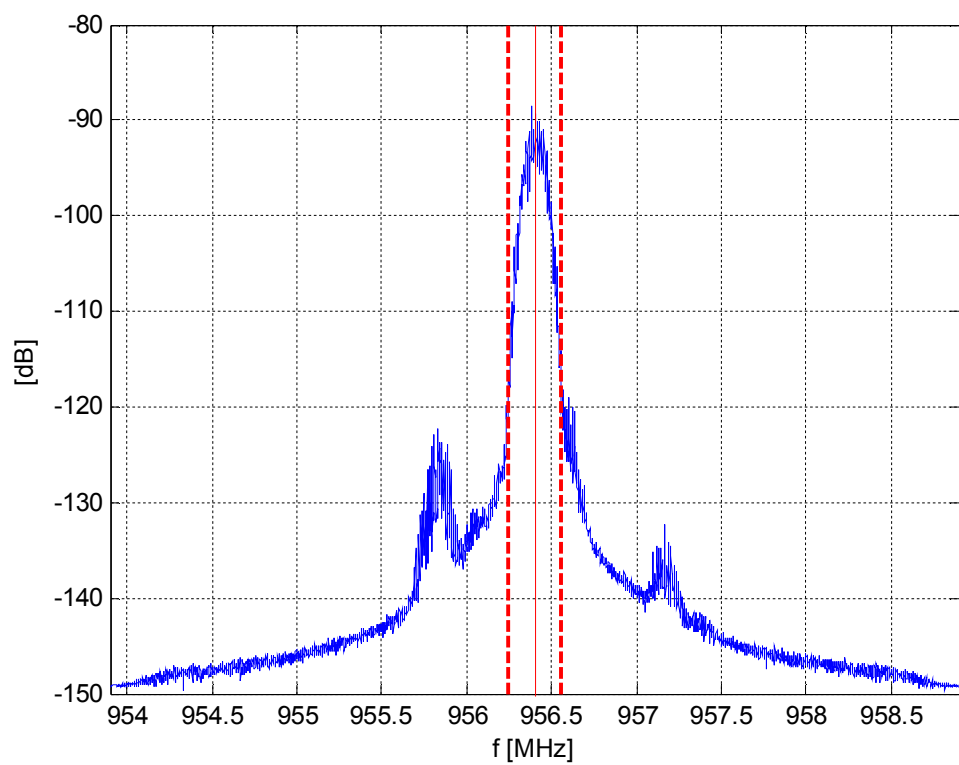
6.2. Spektrum signálu

Před vlastním záznamem signálu bylo nejdříve nutné najít vhodné kanály na okolních základnových stanicích. Kanály byly vybrány podle výkonové úrovně a podle odstupu signálu ve sledovaném kanálu od rušení způsobeného okolními kanály. Vzhledem k tomu, že měření probíhalo v městském prostředí, bylo rušení okolními základnovými stanicemi velmi významné a pro dostatečně kvalitní záznam signálu se hodila pouze nejbližší základnová stanice.

Na obrázku Obr. 29 je spektrum signálu na 107. kanálu (frekvence 956,4 MHz). Odstup signálu od okolních kanálů je přibližně 30 dB. Spektrum odpovídá časovému záznamu signálu z obrázku Obr. 27 se všemi využitými TimeSloty. Plná červená čára označuje kmitočet sledovaného kanálu, přerušované čáry vymezují šířku pásma 200 kHz určené pro každý kanál systému GSM.



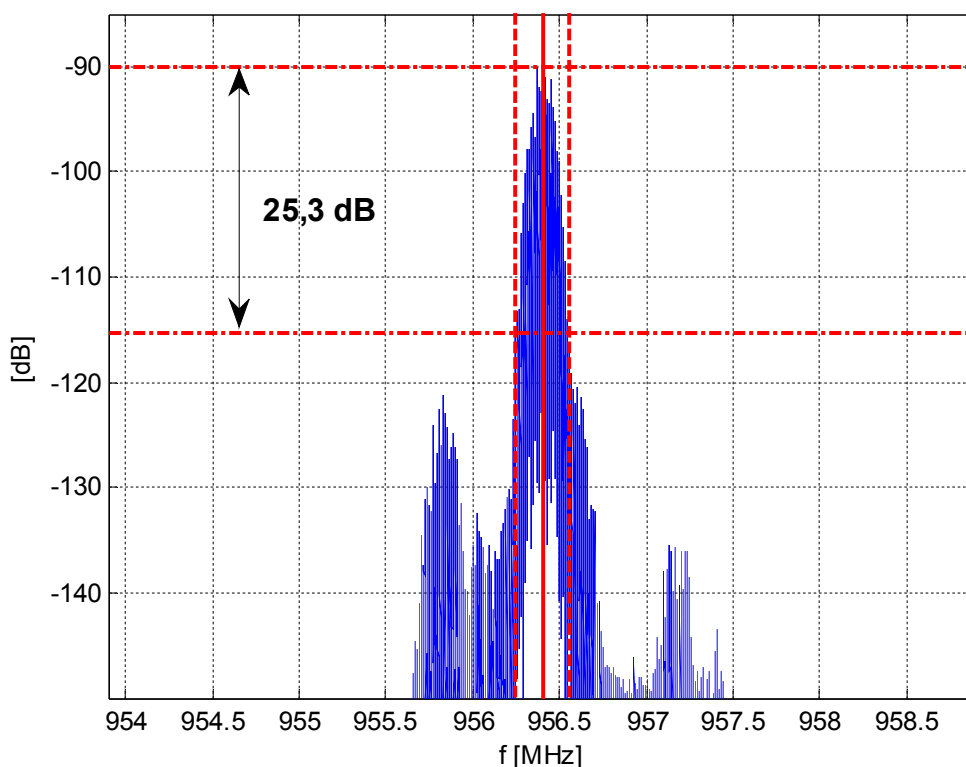
Obr. 29 Spektrum signálu na 107. kanálu



Obr. 30 Průměrované spektrum signálu na 107. kanálu

Na Obr. 30 je vidět průměrované spektrum, které odstraňuje z charakteristiky okamžité vlivy v podobě náhodného šumu a rušení.

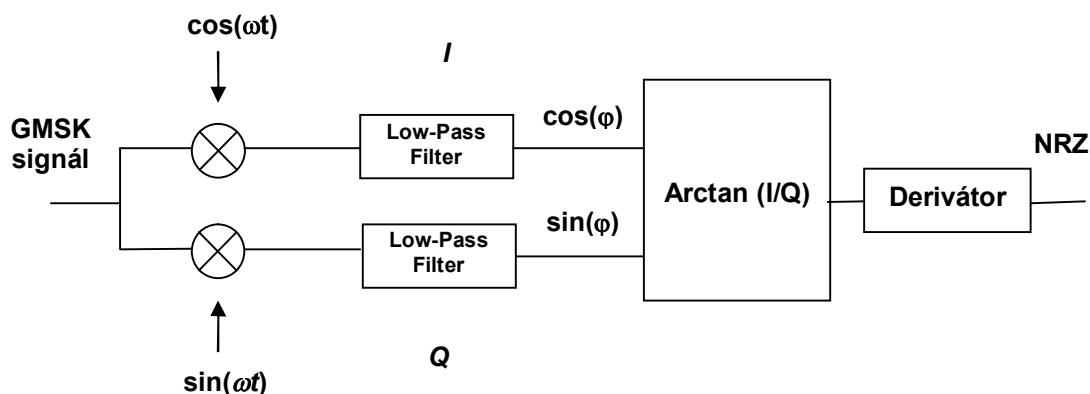
Odstup signálu od šumu je zjednodušeně určen jako poměr maxima výkonu ve spektru a výkonové úrovně na hranici pásma (Obr. 31).



Obr. 31 Určení odstupu signál/šum

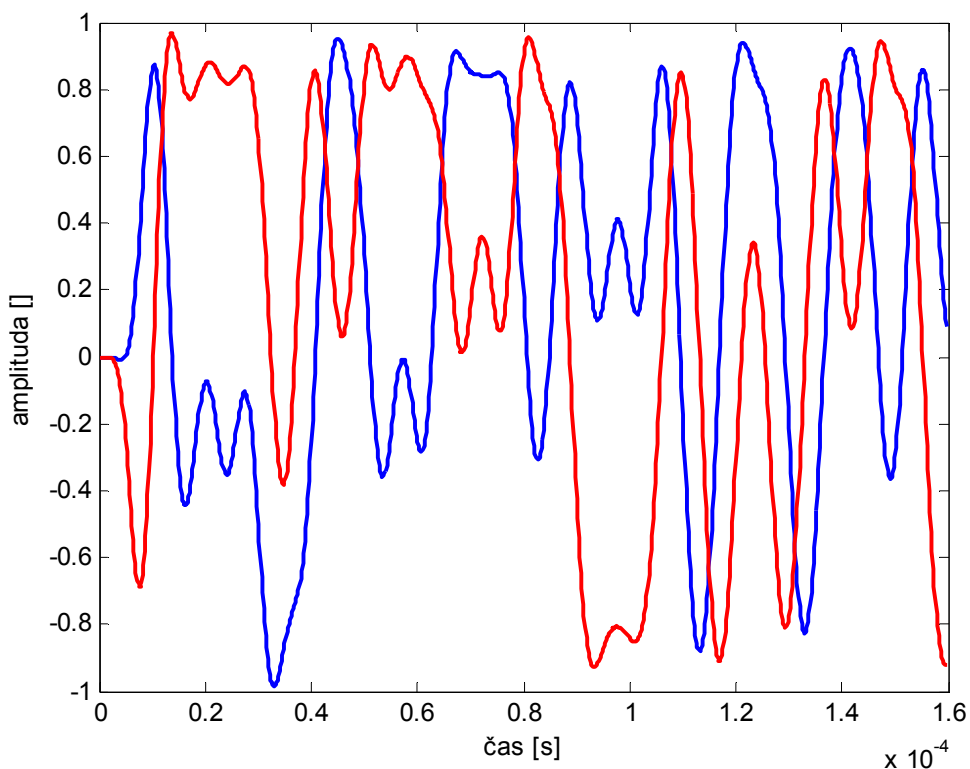
6.3. Demodulace signálu

Pro demodulaci přijímaného signálu je použito jednoduché schéma (Obr. 32). Komplexní signál se nejdříve rozdělí do dvou větví (I a Q složka) a poté se násobí s funkcí sinus nebo kosinus. V každé větvi pak signál prochází dolní propustí, která má mezní kmitočet nastaven nad 200 kHz.

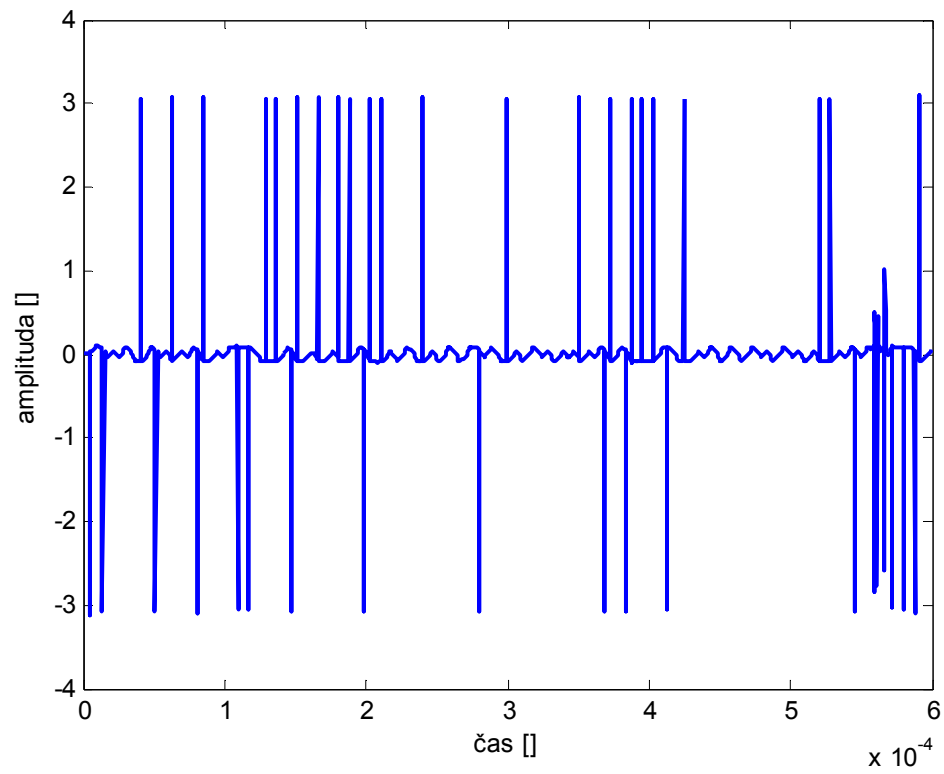


Obr. 32 Demodulátor reálného signálu GSM

Po filtraci obdržíme složky I a Q (Obr. 33), ze kterých se určí okamžitá fáze signálu a derivátorem se jen sledují změny v signálu, které určí logickou úroveň hledané bitové posloupnosti (Obr. 34).



Obr. 33 I/Q složky získané demulací reálného signálu



Obr. 34 Bitová posloupnost po demodulaci

7. ZÁVĚR

V teoretické části jsou popsány nejdůležitější aspekty komunikace mezi mobilní a základnovou stanicí. Zcela jistě nejsou popsány všechny kombinace logických kanálů a mnoho dalších podrobností týkajících se vzájemné komunikace, které jsou nad rámec této práce.

Nejtěžší na celé práci bylo vlastní měření signálu, kdy bylo potřeba zachytit takový signál, který by byl použitelný pro analýzu a dále pak veškeré simulace v prostředí Matlab, jež vyžadují jisté zkušenosti s tímto softwarem. Podařilo se nasimulovat jednotlivé činnosti funkčních bloků modulátoru GMSK, kdy je vidět vznik signálu GMSK až do podoby časového průběhu, který je typický pro tuto modulaci. Dále je nasimulováno spektrum signálu GMSK, na němž je ukázáno „přepínání“ kmitočtu s ohledem na kmitočtový zdvih 67,7 kHz. Analýza naměřeného signálu je soustředěna nejprve na zachycený časový průběh, kdy se podařilo zobrazit poklesy výkonu vysílače mezi jednotlivými bursty (při plném obsazení TimeSlotů), což odpovídá předpokladům rozebíraným v teoretické části. Pro srovnání v jiném zachyceném signálu (na jiném kanálu a s jinou vzorkovací frekvencí) je naopak vidět situace, kdy nejsou všechny TimeSloty zaplněné a není tudíž využit kapacitní potenciál na daném kanálu. Dále jsou analyzována spektra signálu, kde narozdíl od simulace jsou u reálně naměřených signálů vykreslena spektra v [dB]. Je vidět, že největší část energetického obsahu je soustředěna do pásma o šířce 200 kHz určeného pro jeden kanál v systému GSM, což opět odpovídá teoretickým předpokladům. Nakonec byla provedena demodulace podle jednoduchého demodulátoru, na jehož výstupu se sledují změny v signálu, které určí logickou úroveň hledané bitové posloupnosti. Tato bitová posloupnost formálně odpovídá signálu NRZ, který vstupuje do modulátoru popsaného v teoretické části práce, kde je popsán vlastní vznik časového průběhu signálu GMSK.

Seznam použité literatury

- [1] Burda J. *Soubor prezentací*. [online]. Dostupný na WWW: <http://mobilnisystemy.cz/sta.php>
- [2] Aircom International: *GSM System Overview*. [online] 2002. Dostupný z WWW: <http://scribd.com/doc/3532542/Gsm-for-EngineerAircom>
- [3] GSM For Dummies: *Logical Channels*. [online]. Dostupný z WWW: <http://gsmfordummies.com/tdma/logical.shtml>
- [4] Nokia: *GSM Air Interface & Network Planning*. [online] 2002. Dostupný z WWW: http://www.roggeweck.net/uploads/media/Student_-_GSM_Air_Interface__NW_Planning.pdf
- [5] Turletti T. *GMSK in a nutshell*. [online] 1996. Dostupný z WWW: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.39.9127&rep=rep1&type=pdf>
- [6] Rambousek A. *Historie mobilní komunikace*. [online]. Dostupný z WWW: http://fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2003/xrambous_index.htm
- [7] Rohde & Schwarz: *Spectrum Analyzers, Product overview*. [online]. Dostupný z WWW: http://www2.rohdeschwarz.com/file_4031/Spektrumanalyse_bro_en_.pdf
- [8] Mikulaščík K. *Rádiové rozhraní GSM prakticky*. [online]. Dostupný z WWW: <http://radio.feld.cvut.cz/personal/mikulak/MK/radioverozhraniGSMprakticky.pdf>