

Systemy mobilních komunikací

Garant předmětu:

Ing. Jan Prokopec, Ph.D.

Autoři textu:

Ing. Jan Prokopec, Ph.D.

Prof. Stanislav Hanus, CSc.

Obsah

1	GSM	10
1.1	Frekvenční pásma a přístupové metody	10
1.1.1	Kapacita systému	11
1.2	Rádiové rozhraní	12
1.2.1	Modulace a její vlastnosti	12
1.2.2	Používané výkonové úrovně	13
1.3	Architektura systému	15
1.3.1	BSS Base Station Subsystem	17
1.3.2	NSS Network Switching Subsystem	19
1.3.3	OSS Operating Subsystem	21
1.4	Struktura rámců a jejich vytváření	22
1.4.1	Zdrojová data a zdrojové kódování	23
1.4.2	Zabezpečení proti chybám při přenosu	23
1.4.3	Interleaving	23
1.4.4	Časová organizace TDMA rámců, kanálu atd...	24
1.4.5	Typy burstů	25
1.5	Přehled logických kanálů GSM	29
1.5.1	Provozní kanály	30
1.5.2	Signalizační kanály	30
1.5.3	Časová organizace logických kanálů	32
1.6	Vrstvový model systému GSM	33
1.7	Procedury v síti GSM	35
1.7.1	Základní procedury	36
1.7.2	Ověření totožnosti	37
1.7.3	Šifrování	40
1.7.4	Provozní procedury	40
1.7.5	Handover v síti GSM	41
1.8	Datové přenosy v sítích GSM a jejich evoluce	43
1.8.1	HSCSD High Speed Circuit Switched Data	43
1.8.2	GPRS	43
1.8.3	Přenosové rychlosti	44
1.8.4	Struktura rámců GPRS	46
1.8.5	EDGE	51
1.8.6	Modulační a kódová schémata pro EDGE	53
2	UMTS	57
2.1	Vývoj standardů mobilních systémů 3G	57
2.1.1	IMT2000	57
2.1.2	Vlastnosti IMT 2000	57
2.1.3	3GPP 3G Partnership Project	58
2.1.4	3GPP2	59
2.2	UMTS - používané technologie bezdrátového přenosu	59
2.2.1	Rádiové rozhraní UTRA	59

2.2.2	Frekvenční pásma a parametry přenosového kanálu	59
2.2.3	CDMA	60
2.2.4	Frequency Hopping Spread Spectrum	62
2.2.5	Direct Sequence Spread Spectrum DSSS	62
2.2.6	Přenos signálů více uživatelů v systému s CDMA	64
2.3	Rozprostírací posloupnosti	66
2.3.1	Channelization Codes	66
2.4	Architektura systému UMTS	70
2.4.1	Rádiové rozhraní UTRAN	71
2.4.2	Core Network	78
2.5	Vlastnosti UMTS	79
2.5.1	Zpracování hlasového signálu	79
2.5.2	Handover	79
2.5.3	Power Control	82
2.6	Vrstvový model UMTS	84
2.6.1	Logické kanály	85
2.6.2	Transportní kanály	86
2.6.3	Fyzické kanály	89
2.6.4	Fyzické kanály pro řízení systému	91
2.6.5	Kanálové kódování	94
2.7	High Speed Downlink Packet Access HSDPA	96
2.8	Radio Resources Management a jejich optimalizace	99
2.8.1	RRC v UMTS	99
2.8.2	Procedury a funkce RRC	101
2.8.3	RR Management	103
2.8.4	Třídy QoS Quality of Service	106
3	Bezdrátové sítě PAN 802.15	107
3.1	Standard 802.15.3 Bluetooth	107
3.1.1	Fyzická vrstva PHY	108
3.2	Standard 802.15.4	110
3.2.1	Fyzická vrstva PHY	113
3.2.2	Vrstva MAC	114
	Literatura	116

Seznam obrázků

1.1	Blokové schéma modulátoru GMSK	12
1.2	Impulsní charakteristika Gaussova filtru	13
1.3	Filtrovaný NRZ signál	13
1.4	Časový průběh výstupního signálu GMSK a vstupního signálu NRZ	14
1.5	Struktura GSM	16
1.6	Architektura systému GSM	17
1.7	Blokový diagram základnové stanice BTS [10]	18
1.8	Blokové schéma BSC [10]	19
1.9	Transcoding and Rate adaptation unit [10]	19
1.10	Síťový subsystém NSS [10]	20
1.11	Hierarchie NSS [10]	21
1.12	Kódování hlasových rámců	24
1.13	Konvoluční kódování datových rámců	24
1.14	Prokládání bitů v GSM	25
1.15	Časová struktura rámců [8]	26
1.16	Časový průběh výkonu mobilní stanice během jednoho burstu	26
1.17	Normální burst	27
1.18	Přístupový burst	28
1.19	Timing Advance	29
1.20	Burst pro frekvenční korekci	29
1.21	Synchronizační burst	30
1.22	Přehled používaných kanálů	30
1.23	Využití Stealing Flag pro mapování signalizace do normálního burstu	32
1.24	Mapování logických kanálů do fyzických	32
1.25	mapování rámců v downlinku [10]	34
1.26	Mapování rámců v uplinku [10]	35
1.27	Struktura IMSI	36
1.28	Location Area Identification	36
1.29	Základní procedury v síti	37
1.30	Základní procedury v síti	38
1.31	Výpočet A3 [10]	39
1.32	Ověření účastníka v síti	39
1.33	Výpočet A8 [10]	39
1.34	Generování tripletu	39
1.35	Šifrování	40
1.36	Procedura při volání z MS	41
1.37	Ukončení spojení	41
1.38	Architektura GPRS sítě	44
1.39	CS1 [?]	45
1.40	CS2, CS3 [?]	45
1.41	CS4 [?]	46
1.42	Rozlišení CS pomocí Stealing Flag [?]	46

1.43	GPRS rámec [6]	48
1.44	Multirámec GPRS	49
1.45	Kanály GPRS	49
1.46	OSI model GPRS sítě [5]	49
1.47	Přenos IP paketu pomocí GPRS [23]	50
1.48	Struktura vytváření přenášených dat pro normální burst v jednotlivých vrstvách [5]	50
1.49	Rádiové bloky pro přenos signalizace a dat [5]	51
1.50	Konstelační diagram 8 PSK modulace [23]	52
1.51	Vektorový diagram EDGE modulace	53
1.52	Vliv tvarovacího filtru na PSD EDGE signálu [23]	54
1.53	Normální burst při použití 8PSK modulace [23]	54
1.54	Princip Incremental Redundancy, [23]	56
2.1	Standardy pod iniciativou IMT2000	57
2.2	Rozdělení spektra definované v rámci IMT 2000	58
2.3	Rozprostírání spektra	61
2.4	Princip metody Frequency Hopping Spread Spectrum	62
2.5	Princip přímého rozprostírání	63
2.6	Dorozprostírání přijatého signálu	63
2.7	Příjem signálu se správným kódem	64
2.8	Příjem signálu s nesprávným kódem	65
2.9	Výhody CDMA při přenosu	65
2.10	Kapacita systému s CDMA	66
2.11	Walshovy funkce	67
2.12	Rademacherovy funkce	68
2.13	Generátor pseudonáhodných posloupností	69
2.14	Rozprostírací kódy s proměnlivým rozprostíracím faktorem	69
2.15	Architektura UMTS	70
2.16	Model systému UMTS	71
2.17	Propojení sítí GSM a UMTS	72
2.18	Propojení RNC přes rozhraní	73
2.19	Přenos signálu v UMTS	73
2.20	Spojení UE se sítí	74
2.21	Módy User Equipment	76
2.22	Hlasový kodér AMR	79
2.23	Princip makrodiversity	81
2.24	Nárůst interferencí při použití makrodiversity	81
2.25	Soft Handover	82
2.26	Softer Handover	82
2.27	Power Control v UMTS	83
2.28	Uzavřená smyčka	84
2.29	Vrstvy UMTS [?]	85
2.30	Logické kanály	86
2.31	Transportní kanály	87

2.32	Mapování transportních kanálů do logických	88
2.33	Transportní bloky	89
2.34	Transporation Format	90
2.35	Přehled fyzických kanálů	90
2.36	Přehled fyzických kanálů	91
2.37	Přehled mapování kanálů UMTS FDD v downlinku [13]	92
2.38	Přehled mapování kanálů UMTS FDD v uplinku [13]	92
2.39	Přehled mapování kanálů UMTS TDD v downlinku [13]	93
2.40	Přehled mapování kanálů UMTS TDD v uplinku [13]	93
2.41	Kanálové kódování	95
2.42	Kompozitní kanály	95
2.43	Rádiový rámec pro uplink	96
2.44	Rádiový rámec pro downlink	96
2.45	Kanály definované pro HSDPA [internet]	98
2.46	Princip AMC [internet]	98
2.47	Hybrid ARQ [internet]	99
2.48	Stavy RRC [25]	100
2.49	Bearer services v UMTS [25]	102
2.50	RRM - rozdílné požadavky [22]	104
2.51	RRM - plánování sítě [22]	105
2.52	RRM - optimalizace sítě [22]	105
2.53	Cíle RRM v UMTS [22]	106
3.1	Blokové schéma zařízení Bluetooth	107
3.2	Topologie sítí Bluetooth	108
3.3	Časové řazení paketů v systému Bluetooth	109
3.4	Časové řazení dlouhých paketů v systému Bluetooth	109
3.5	Struktura paketů v systému Bluetooth	110
3.6	OSI model komunikačního protokolu pro zařízení ZigBee	111
3.7	Topologie sítí ZigBee	112

Seznam tabulek

1.1	Výkonové úrovně systému GSM	15
1.2	Výkonové třídy pro specifikaci mikro a piko buněk	15
1.3	Vztahy pro výpočet útlumu a zisku	16
1.4	Srovnání dat v HLR a VLR	22
1.5	Authentication and Cipherring	22
1.6	dynamická vs. statická data v HLR a VLR	22
1.7	Training Sequence Code pro jednotlivé timesloty	28
1.8	Bitové rychlosti CS	44
1.9	Třídy GPRS	51
1.10	Struktura normálního burstu v EDGE	54
1.11	Přehled MCS ve standardu EDGE	55
1.12	Parametry kódování pro různá MCS [23]	55
1.13	Coding Families systému EDGE	56
2.1	Rádiová pásma UMTS	60
2.2	Parametry jednotlivých režimů AMR kodéru	80
2.3	Struktura AMR rámců	80
2.4	Přehled použitých zabezpečovacích kódů v UMTS	94
3.1	Frekvenční pásma a datové rychlosti	111
3.2	Srovnání ZigBee s ostatními systémy	112

Seznam zkratek

A

ASK	Amplitude Shift Keying - amplitudové klíčování
AWGN	Additive White Gaussian Noise - aditivní gaussovský šum
AuC	Authentication Center - centrum pro ověření identity účastníka v GSM

B

BCCH	Broadcast Common Control Channel - společný řídicí kanál systému GSM
BER	Bit Error Ratio - bitová chybovost
BSC	Base Station Controller - řadič základnových stanic systému GSM
BSS	Base Station Subsystem - subsystém základnových stanic, GSM
BTS	Base Transceiver Station - základnová stanice systému GSM

C

CCCH	Common Control Channel - společný řídicí kanál
CDMA	Code Division Multiple Access - Vícenásobný přístup s kódovým dělením

D

DECT	Digital European Cordless Telephone - digitální systém bezšňurových telefonů
DPSK	Differential Phase Shift Keying

E

EDGE	Enhanced Data Rates for GPRS Evolution
EIR	Equipment Identification Register - databaze telefonních přístrojů

F

FCCH	Frequency Correction Channel - kanál pro frekvenční synchronizaci
FDD	Frequency Division Duplex - frekvenčně duplexní přenos
FDMA	Frequency Division Multiple Access - mnohonásobný přístup s frekvenčním dělením
FER	Frame Error Rate
FSK	Frequency Shift Keying - Klíčování frekvenčním zdvihem

G

GGSN	Gateway GPRS Support Node - GPRS přípojný bod do jiných sítí
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying - modulace používaná v GSM
GSM	Global System for Mobile Communications
GSM-P	Primary GSM
GSM-E	Extended GSM
GSM-R	GSM-Railway - systém GSM pro železnici
GPRS	General Packet Radio Service

H

HLR	Home Location Register
-----	------------------------

I

IMSI	International Mobile Subscriber Identification - mezinárodní identifikační číslo
ISDN	Integrated Services Digital Network

J**K****L**

LA	Location Area - oblast několika BTS, které spadají pod jeden BSC
LDPC	Low Density Parity Check - kódy s řídkou zabezpečovací maticí
LTP	Long Time Prediction - metoda analýzy hlasových vzorků v kodeku GSM
LU	Location Update - procedura pro změnu Location Area

M

MAHO	Mobile Assisted Handover - handover provedený s podporou mobilní stanice
MCHO	Mobile Controlled Handover - handover řízený mobilní stanicí
MCS	Modulation and Coding Scheme modulační a kódovací schéma EDGE
MQAM	M-ary Quadrature Amplitude Modulation
MSC	Mobile Switching Center - ústředna mobilní sítě
G-MSC	Gateway MSC - ústředna pro připojení externích sítí

N

NCHO	Network Controlled Handover
NSS	Network Switching Subsystem

O**P**

PLMN Public Lincensed Mobile Network
PSK Phase Shift Keying - klíčování fázovým zdvihem

Q

QoS Quality of Service

R

RPE Rectangular Pulse Excitation - buzení modelu hlasového traktu

S

SCH Synchronization Channel - synchronizační kanál
SER Symbol Error Rate - symbolová chybovost
SF Stealing Flag
SF Spreading Factor - faktor rozprostření u CDMA systémů
SGSN Serving GPRS Support Node - GPRS ústředna
SIM Subscriber Identification Module

T

TDD Time Divission Duplex - časově duplexní přenos
TDMA Time Division Multiple Access - mnohonásobný přístup s časovým dělením
TMSI Temporary Subscriber Identification Number
TRAU Transcoding and Rate Adaptation Unit - jednotka pro transkódování a přizpůsobení přenosové rychlosti

U

UMTS Universal Mobile Telecommunication System

V

VLR Visitor Location Register

W

WCDMA Wide Band Code Division Multiple Access

X

Y

Z

1 GSM

Vývoj standardu digitální mobilní sítě pro hlasovou komunikaci začal v první polovině 80. let minulého století společnostmi Nordic Telecom a holandským PTT. Evropská komise navrhla použití pásma 900 MHz a vydala nařízení pro vyhrazení tohoto pásma v jednotlivých státech pro zajištění roamingu.

V roce 1987 byla založena skupina Group Speciale Mobile. Zahrnovala 13 operátorů a regulačních orgánů. Tato skupina začala pracovat na standardu. Hlavní principy bezdrátového přenosu byly stanoveny v roce 1986, v roce 1989 byl přijat ETSI standard GSM pro digitální mobilní síť a skupina GSM se stala technickou komisí ETSI.

V roce 1990 došlo ke zmrazení vývoje GSM Phase 1, aby bylo možné tuto síť uvést do provozu. První pokusy byly provedeny v roce 1991 a komerční spuštění sítě GSM proběhlo v lednu 1992 ve Finsku.

V dalších letech došlo k rychlému rozšíření technologie GSM nejen v Evropě, ale i na ostatních kontinentech. Další vývoj již jen heslovitě:

1995 Zavedení základních datových přenosů (fax), zavedení SMS roamingu

1996 Start mobilních sítí GSM v ČR

1997 První duální mobilní telefon

1998 Testování rychlých datových přenosů HSCSD

1999 WAP, experimentální GPRS síť

2000 komerční provoz GPRS

1.1 Frekvenční pásma a přístupové metody

Základním frekvenčním pásmem je tzv. Primary GSM. Další frekvenční pásma byla postupně přidávána z důvodu zvýšení kapacity systému. Koncepce přístupu k fyzickému kanálu spočívá ve využití kombinace frekvenčního FDMA a časového dělení TDMA fyzického kanálu. Systém používá plně duplexní provoz s frekvenčním dělením FDD. Frekvenční rozteč duplexního páru je

$$f_{\text{cdl}} - f_{\text{cul}} = 45\text{MHz},$$

kde f_{cdl} je frekvence přenosového kanálu v downlinku a f_{cul} je frekvence kanálu v uplinku. Přenosový kanál s vyšší frekvencí je tzv downlink, tzn. přenos ze systému k mobilní stanici, kanál s nižší frekvencí je uplink, od mobilní stanice směrem do systému.

Jednotlivá frekvenční pásma jsou dána následovně:

Primary GSM základních 124 duplexních kanálů

- ARFCN (Absolute Radio Frequency Channel Number) - číslo kanálu n
- uplink

$$890 \div 915\text{MHz}, f_{\text{cul}} = 890 + 0,2n \quad n \in (1 \dots 124),$$

- downlink

$$935 \div 960\text{MHz}, f_{\text{cdl}} = 935 + 0,2n \quad n \in (1 \dots 124),$$

Extended GSM rozšíření frekvenčního pásma pod stávajícím pásmem o 10 MHz (50 duplexních kanálů)

- uplink

$$880 \div 890\text{MHz}, 890 + 0,2(n - 1024) \quad n \in (975 \dots 1024)$$

- downlink

$$925 \div 935\text{MHz}, 925 + 0,2(n - 1024) \quad n \in (975 \dots 1024)$$

GSM-Railway je speciální GSM síť pro železniční přepravce

- neveřejná síť, má implementovány některé speciální hovorové funkce ASCI (Advanced Speech Call Items)
 - VGCS (Voice Group Call Service)
 - VBS (Voice Broadcast Service) Multi-Level
 - Precedence and Pre-emption Service (eMLPP). This gives priority to some users above others.
 - Emergency Call Functional number management
- uplink 876 ÷ 880 MHz,
- downlink 921 ÷ 925 MHz,

DCS 1800 je nadstavbou systému GSM, používá se zejména pro zvýšení kapacity systému

- frekvenční rozteč $f_d - f_u = 95 \text{ MHz}$
- uplink 1710 ÷ 1785 MHz, $1710 + 0,2(n - 511) \quad n \in (512 \dots 885)$
- downlink 1805 ÷ 1880 MHz, $1805 + 0,2(n - 511) \quad n \in (512 \dots 885)$

1.1.1 Kapacita systému

Celková kapacita systému GSM je dána počtem rádiových kanálů. Každý rádiový kanál je rozdělen pomocí časového dělení na 8 timeslotů. Potom lze kapacitu systému určit následovně:

- Kapacita Primary GSM pro Full Rate¹ kódér je

$$124 \times 8 = 992$$

hovorových kanálů, pro Half Rate je to 1984 hovorových kanálů

¹viz dále

- Enhanced GSM přidává dalších 400 hovorových kanálů
- DCS, pracující v pásmu 1800 MHz, přidává

$$374 \times 8 = 2992$$

hovorových kanálů

- Teoretická kapacita systému GSM a jeho rozšíření je tedy

$$992 + 400 + 2992 = 3384$$

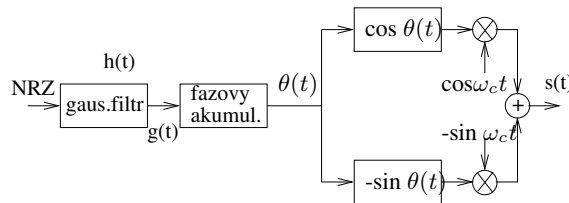
hovorových kanálů pro FR kodek

1.2 Rádiové rozhraní

Rádiové rozhraní definuje používané modulační techniky a dále vysílané výkony BTS a mobilních stanic. Modulační technika použitá pro bezdrátový přenos informace je vždy kompromisem mezi přenosovou rychlostí, vysílaným výkonem, náročností přijímače a dalších parametrů.

1.2.1 Modulace a její vlastnosti

Systémy 2. generace, jmenovitě GSM a NA-TDMA (USA), používají modulaci typu FSK (Frequency Shift Keying)-modulace klíčováním frekvence. Pro systém GSM byla vybrána verze GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying).



Obrázek 1.1: Blokové schéma modulátoru GMSK

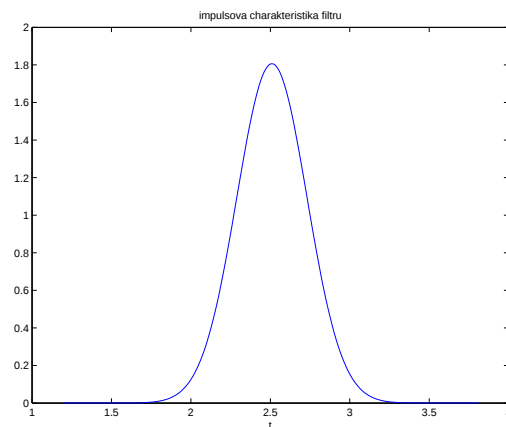
Blokové schéma modulátoru GMSK je na Obr. 1.1. Modulační signál NRZ je nejprve filtrován dolní propustí s Gaussovskou impulsní charakteristikou

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \beta \exp(-(\beta t)^2),$$

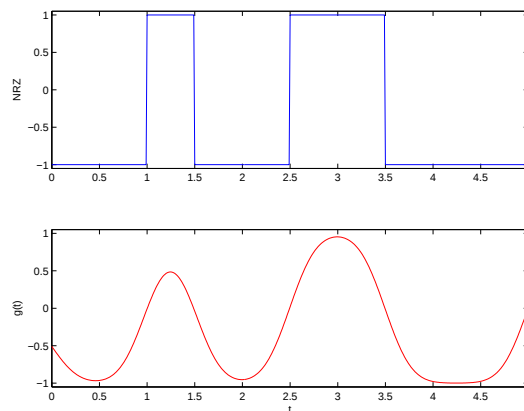
která je zobrazena na Obr. 1.2. Gaussovský filtr zabráňuje skokové změně frekvence v okamžiku změny symbolového prvku. Projevuje se výrazným omezením postranních pásem ve spektrální oblasti, jak je vidět z Obr. 1.1.

Filtrovaný vstupní signál (Obr. 1.3) následně vstupuje do fázového akumulátoru, takže výstupní signál fáze nosné vlny lze vyjádřit jako

$$\theta(t) = \frac{\pi}{2T} \int_0^t g(t) dt,$$



Obrázek 1.2: Impulsní charakteristika Gaussova filtru



Obrázek 1.3: Filtrovaný NRZ signál

který moduluje VF nosnou vlnu. Výstupní signál modulátoru GMSK lze popsat vztahem

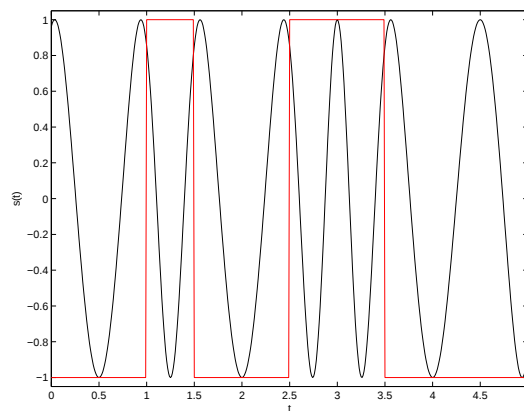
$$s(t) = \cos(2\pi f_c t + \theta(t)).$$

Důležitým parametrem modulátoru GMSK je hodnota tzv. normované šířky pásma $b = BT_b$, kde B je frekvenční šířka kanálu a T_b je bitová perioda. Pro systém GSM je $BT_b = 0,3$.

1.2.2 Používané výkonové úrovně

Systém GSM používá buňkovou strukturu. Ta je založena na principu opakovaného využívání stejných frekvenčních kanálů v dostatečné prostorové vzdálenosti. Proto je velmi důležité optimálně využívat definované výkonové třídy BTS a MS tak, aby nedocházelo k interferencím od vzdálených BTS. Výkonové třídy GSM jsou definovány v Tab. 1.1.

V souvislosti s výkonovými úrovněmi systému GSM je nutné zmínit i tzv. radiokomunikační rovnici, která udává vztah mezi vysílaným a přijatým výkonem v závislosti na vlastnostech



Obrázek 1.4: Časový průběh výstupního signálu GMSK a vstupního signálu NRZ

přenosového prostředí, charakterizovaného především útlumem prostředí a útlumem vzniklým při šíření elektromagnetické vlny prostorem

$$P_t G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 L_a L_\phi L_p \frac{G_r}{kT_0} = \frac{P_r}{N_0}. \quad (1.1)$$

Radiokomunikační rovnici lze rozdělit na tři samostatné části, a to:

- Vysílač
 - P_t výkon na vstupu vysílací antény
 - G_t zisk vysílací antény
- Prostředí
 - L_a ztráty v atmosféře
 - L_ϕ úhlové ztráty
 - L_p ztráty polarizační
 - ztráty šířením elektromagnetických vln ve volném prostoru

$$L = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

- Přijímač
 - G_r zisk přijímací antény
 - P_r výkon na vstupu přijímače
 - $N_0 = kT_0$ spektrální výkonová hustota šumu

Tabulka 1.1: Výkonové úrovně systému GSM

Třída	Max. výkon MS		Max. výkon BTS	
	dBm	W	dBm	W
1	43	20	55	320
2	39	8	52	160
3	37	5	49	80
4	33	2	46	40
5	29	0,8	43	20
6			40	10
7			37	5
8			34	2,5

Tabulka 1.2: Výkonové třídy pro specifikaci mikro a piko buněk

Třída	Max. výkon BTS	
	dBm	W
M1	24	0,25
M2	19	0,08
M3	14	0,03

Mobilní stanice má definován jako minimální vysílaný výkon 20 mW (13dBm). Ve specifikaci GSM Phase2 došlo k definici mikro a piko buněk pro městské prostředí, které mají definovány výkonové úrovně v Tab. 1.2. Minimální výkon MS je 2,5 mW.

V souvislosti s výkonovými úrovněmi, šířením vln a dalšími faktory uvedu následující tabulku vzájemných souvislostí mezi výkonem vyjádřeným v absolutních jednotkách a decibelech.

1.3 Architektura systému

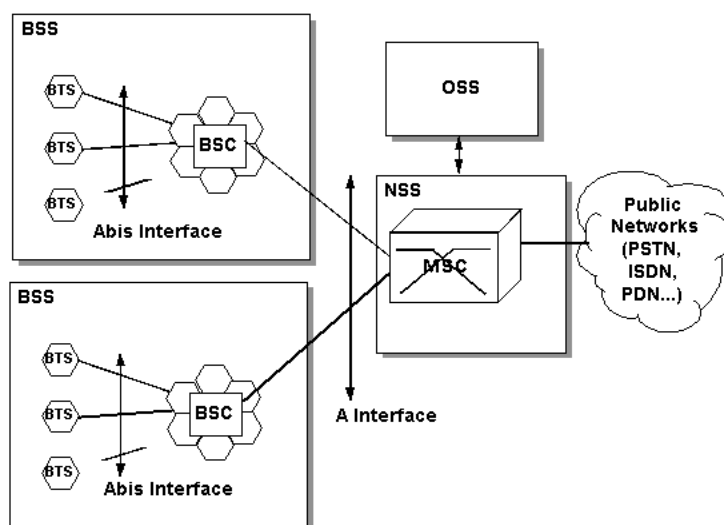
Radiotelefonní systém GSM byl původně navržen pouze pro přenos hlasu. Až v inovované specifikaci GSM Phase2 byl doplněn o přenos dat. Základní bloková struktura systému sestávající ze subsystému základnových stanic BSS, subsystému sít'ového spojení NSS a subsystému pro kontrolu a řízení sítě OSS je na obr. 1.5.

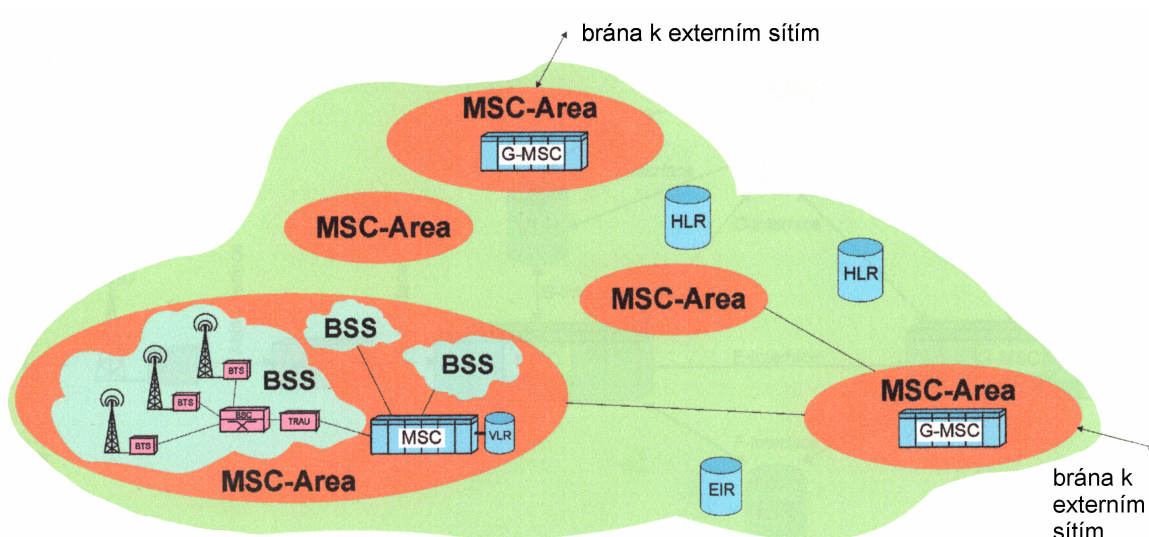
Na obr. 1.6 je podrobnější zobrazení architektury sítě GSM.

Systém je navržen s velmi vysokým stupněm zabezpečení proti odposlechu na rádiovém rozhraní, kterého je dosaženo využitím šifrování přenášených dat, a to jak uživatelských, tak i signalizace.

Tabulka 1.3: Vztahy pro výpočet útlumu a zisku

Výkonový zisk	$A[\text{dB}] = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$ $A[\text{dB}] = 10 \log P_2 - 10 \log P_1$
Útlum	$L[\text{dB}] = A^{-1} = 10 \log \frac{P_1}{P_2}$ $L[\text{dB}] = 10 \log P_1 - 10 \log P_2$
dB	$A[\text{dB}] = 10 \log \frac{P_2}{1\text{W}}$
dBm	$A[\text{dBm}] = 10 \log \frac{P_2}{1\text{mW}}$
dBi	Výkon vztažený k vyzářenému výkonu ideálního izotropního zářiče

**Obrázek 1.5:** Struktura GSM



Obrázek 1.6: Architektura systému GSM

1.3.1 BSS Base Station Subsystem

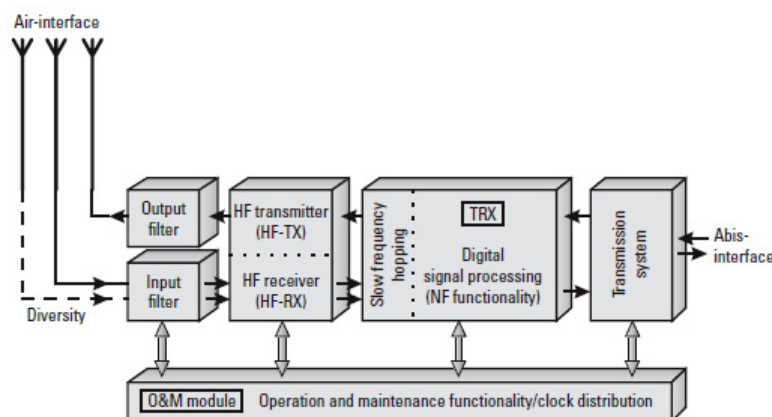
Subsystem základnových stanic zajišťuje spojení MS a MSC (Mobile Switching Center). BSS zahrnuje následující entity sítě:

- rádiové rozhraní mezi MS a BTS (Base Transceiver Station)
- jednotlivé BTS jsou řízeny BSC (Base Stations Controller)
- mezi BSC a MSC je zařazena jednotka TRAU (Transmission Rate and Adaptation Unit) (nebo mezi BTS a BSC)

Každý BSS obsahuje jednotku TRAU, jeden BSC a několik BTS.

BTS Base Transceiver station zajišťuje funkce, které se přednostně týkají přenosu na fyzické vrstvě. Jedná se tedy zejména o:

- modulace a demodulace GMSK
- kanálové kódování, interleaving a rovnání pořadí
- šifrování a dešifrování
- formátování burstů
- frekvenční skákání
- měření síly signálu aktivních spojení
- předávání výsledku měření do BSC



Obrázek 1.7: Blokový diagram základnové stanice BTS [10]

Každá základnová stanice vysílá na kanálu s nejnižší frekvencí, který se označuje jako TRX 0, tzv. BCCH (Broadcast Control Channel). Slouží pro přístup mobilních stanic do sítě.

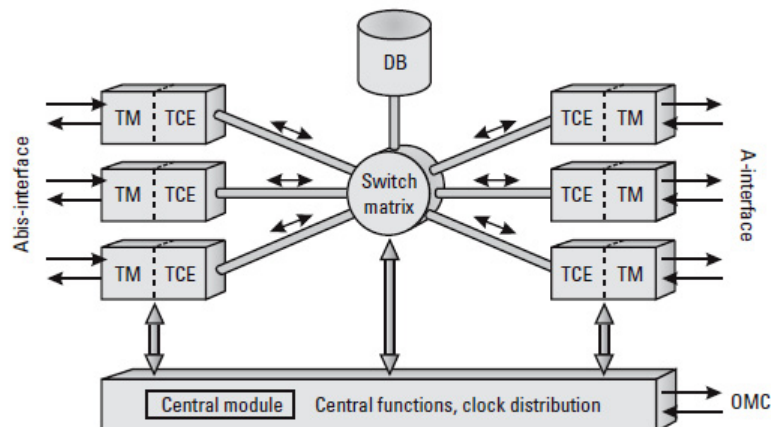
BSC Base Station Controller lze charakterizovat jako zjednodušenou ústřednu, případně cross connect, která provádí spojení požadované BTS s MSC.

- přepíná spojení z A-interface (MSC) na správnou BTS (A-bis interface)
- Terminal Module je řízen Terminal Control Elements
- TCE pro rozhraní A-bis a A-interface
- TCE může přidělovat rádiové zdroje (power control,...), nebo to přenechá Central Module
- řízení intracell a intra BSC HO (bez zásahu MSC)

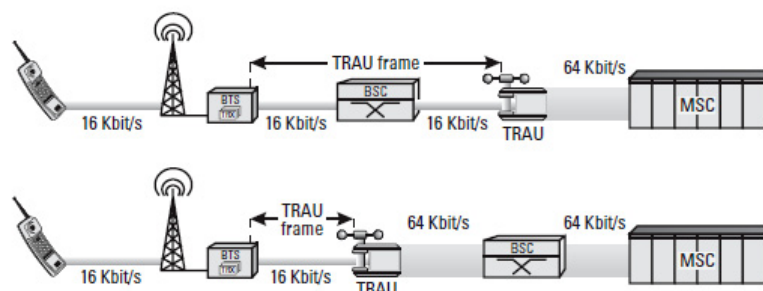
TRAU Transcoding And Rate Adaptation Unit slouží pro kompresi a dekompresi přenášeného hlasového hovoru mezi MS a MSC. Lze umístit kdekoli mezi BTS a MSC, jak je vidět z Obr. 1.9. Jejím úkolem je převod komprimovaného hlasového signálu, který se na rádiovém rozhraní přenáší s rychlostí 16 kbit.s^{-1} na standardní přenosovou rychlost 64 kbit.s^{-1} , která se používá v digitálních ústřednách.

Přenos se provádí pomocí tzv. TRAU frames, které procházejí transparentně BSC, protože jsou přenášeny pomocí provozních kanálů, nikoliv pomocí kanálů určených pro signalizaci, viz dále.

Jednotka TRAU bývá nejčastěji umístěna co nejbližší telefonní ústředně, protože snižuje požadavky na přenosovou kapacitu k BTS. Její fyzické umístění by spíše spadalo pod síťový subsystém, ale z hlediska architektury sítě je zahrnuta do BSS.



Obrázek 1.8: Blokové schéma BSC [10]



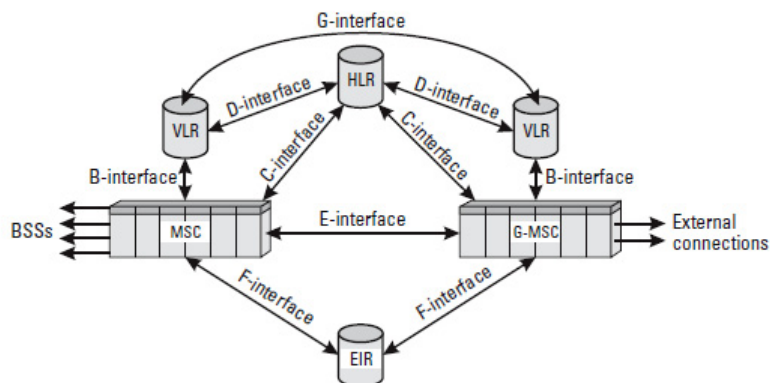
Obrázek 1.9: Transcoding and Rate adaptation unit [10]

1.3.2 NSS Network Switching Subsystem

Subsystem základnových stanic BSS zajišťuje přenos na rádiovém rozhraní, NSS zajišťuje funkce pro sestavení a řízení spojení (generování šifrovacích klíčů, autentifikace účastníka, roaming, atd.) a obsahuje databázové údaje pro identifikaci účastníka. Základní entity NSS jsou:

- MSC Mobile Switching Center, telefonní ústředna
- HLR Home Location Register/Authentification Center AuC Registr stálých účastníků a centrum ověřování
- VLR Visitor Location Register registr dočasných účastníků
- EIR Equipment Identity Register databáze mobilních zařízení

MSC Mobile Switching Center



Obrázek 1.10: Síťový subsystém NSS [10]

- Pro GSM se používají standardní typy digitálních ústředěn (Siemens EWSD, Alcatel S12, Alcatel S10)
- mají drobné nadstavby specifické pro mobilní síť (např. řízení handoveru)
- pro propojení s okolními sítěmi slouží Gateway MSC
- IWF (Inter Working Function) zajišťuje propojení hlasových a datových služeb do externích sítí

EIR Equipment Identification register je databáze mobilních stanic, pomocí které lze řídit přístup do sítě. Je to volitelná část infrastruktury. Skládá se ze tří částí:

- White List - seznam IMEI, které se mohou připojit do sítě,
- Black List - seznam kradených mobilních přístrojů, kterým do sítě nebude umožněn přístup
- Gray List - seznam přístrojů, které se mají sledovat

HLR Home Location Register je nejdůležitější částí NSS, protože obsahuje záznamy o všech účastnících mobilní sítě. Je to velká databáze (může obsahovat záznamy až několika set tisíc účastníků), která musí mít 100% dostupnost a velmi nízkou přístupovou dobu. Je to databáze, která se stará o zabezpečení v síti.

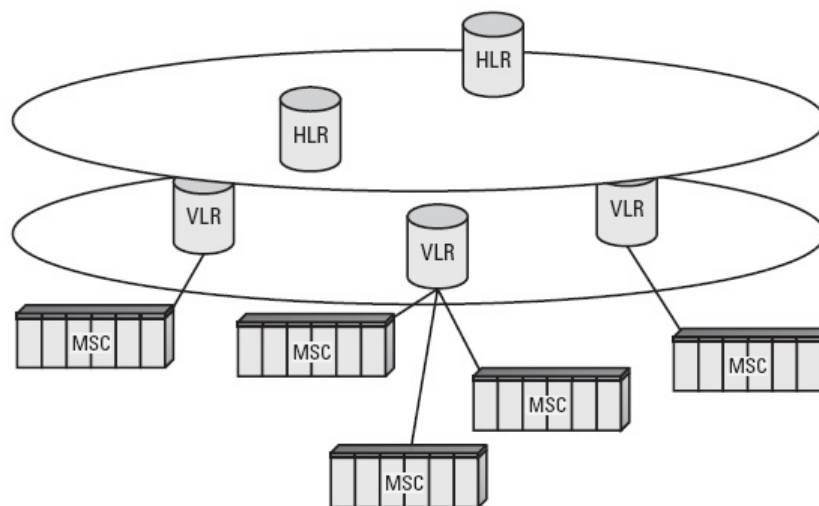
- databáze všech údajů o SIM
- HLR obsahuje údaje o všech SIM v síti,
- je to jediné místo systému, kde jsou uloženy šifrovací klíče K_i
- v každé síti může být několik HLR, minimálně však jeden

Rozdělení HLR na několik nezávislých databází je výhodné zejména z technických důvodů, aby při jejím výpadku nebyla postižena celá síť a zlepšuje se rychlost odezvy.

Záznamy uchovávané v HLR jsou statické povahy, které mají vztah k autentizaci účastníka. Autentizace a generování šifrovacích klíčů probíhá v tzv. Authentication Center, které je fyzicky ve většině případů nedílnou součástí HLR, i když je mezi AuC a HLR definováno rozhraní H, které však není součástí standardu. Důvodem pro spojení je rychlost odezvy a bezpečnost.

VLR Visitor Location Register je databáze, která obsahuje data potřebná pro management mobility účastníka, tzn. např. data pro handover, poloha MS v rámci LAI (Location Area Identification) a další. Databáze VLR neobsahuje údaje o velkém počtu účastníků kvůli rychlosti odezvy. V síti GSM je většinou součástí MSC.

Hierarchie sítíového subsystému je na Obr. 1.11. Jak je vidět, v síti musí být minimálně jeden HLR a dále několik VLR, které mohou podporovat několik MSC současně, případně má každá MSC vlastní VLR.



Obrázek 1.11: Hierarchie NSS [10]

Následující tabulky srovnávají data ukládaná ve VLR a HLR. Pro přehlednost jsou tabulky rozděleny podle jejich vazby k účastníkovi (Tab. 1.4), data pro ověření účastníka a šifrování (Tab. 1.5) a data pro mobilitu účastníka (Tab. 1.6).

1.3.3 OSS Operating Subsystem

Operační subsystém, někdy též nazývaný OMC Operating and Maintenance Center, je část systému sloužící pro řízení a dohled sítě. Je to dohledové centrum sítě, které pomocí datových linek přes BSC umožňuje řízení a údržbu každé BTS v síti. Dále se stará o zpoplatnění služeb atd.

Tabulka 1.4: Srovnání dat v HLR a VLR

Subscriber Specific		
Parametr	HLR	VLR
IMSI	✓	✓
K_i	✓	
TMSI		✓
Service restrictions	✓	
Supplementary services	✓	✓
MSISDN (basic)	✓	✓
MSISDN (other)	✓	

Tabulka 1.5: Authentication and Ciphering

Authentication and Ciphering		
Parametr	HLR	VLR
A3	✓	
A5/X (BSS)		
A8	✓	
RAND (až 5 tripletů)	✓	✓
SRES	✓	✓
K_c	✓	✓
CKSN		✓

Tabulka 1.6: dynamická vs. statická data v HLR a VLR

Subscriber Location/Call forwarding		
Parametr	HLR	VLR
HLR number		✓
VLR number	✓	
MSC number	✓	✓
LAI		✓
IMSI detach		✓
MSRN		✓
LMSI (other)	✓	✓
Handover number		✓

1.4 Struktura rámců a jejich vytváření

Zdrojovými daty se v systému GSM rozumí hlasový signál. Podrobný popis kódování řeči lze nalézt zejména zde [8], ostatní metody kódování jsou např. zde [14].

1.4.1 Zdrojová data a zdrojové kódování

Hlasový signál je přiváděn do A/D převodníku. A/D převod se provádí s kvantováním na 8192 úrovní (tj. 13 bitů). Vzorkovací frekvence je 8 kHz, stejně jako u PCM systému. Z toho vyplývá bitová rychlost na výstupu převodníku (8kHz, 13bitů, $f_b = 104\text{kbit.s}^{-1}$).

Tento datový proud přichází na vstup kodéru LTP-RPE (Rectangular Pulse Excitation - Long Term Prediction), který patří do skupiny tzv. parametrických kodérů. Princip kodéru lze nalézt opět v xxxx. Bitová rychlost na výstupu kodéru je 13kbit.s^{-1} .

1.4.2 Zabezpečení proti chybám při přenosu

Bezdrátové přenosové prostředí klade vysoké požadavky na kódové zabezpečení proti chybám. V systému GSM se používá kombinace kódování a prokládání pro zajištění chybovosti cca 10^{-3} , která je dostačující pro hlasové služby. Popis kódování je naznačen pro jeden blok bitů z výstupu hlasového kodéru.

Výstup hlasového (zdrojového) kodéru je 260 bitů za 20 ms. Blok bitů je rozdělen na 3 třídy podle významu:

- třída 1a (nejdůležitějších 50 bitů) je kódováno blokovým kódem a jsou k nim přidány 3 paritní bity
- třída 1b (132 bitů) je rozšířena o 4 nulové bity
- třída 2 se nekóduje (78 bitů)

Používaný blokový kód je tzv. Fireho kód. Podrobnosti k jeho vlastnostem lze nalézt např. v [28, 30].

Všechny bity 1. třídy $(50+3)+(132+4)=189$ bitů jsou kódovány konvolučním kódem $K(2,1)$, $R=1/2$, délka působení je 5. Na výstupu konvolučního kodéru je tedy celkem 378 bitů. Výsledný počet bitů na výstupu kanálového kodéru je $378+78=456$ bitů za 20ms. Z toho vyplývá výsledná bitová rychlost za kanálovým kódem $22,8\text{kbit.s}^{-1}$. Postup kódování je na Obr. 1.12.

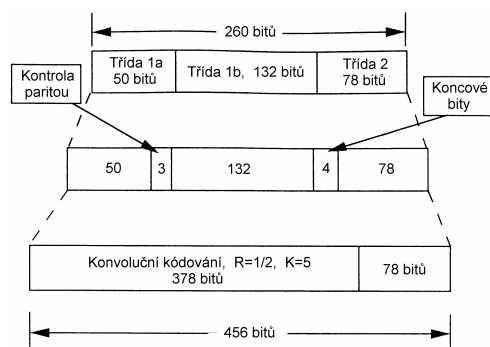
Pro datové rámce je postup kódování uveden na Obr. 1.13. Vstupem do kodéru je 184 bitů, které jsou doplněny 40 paritními bity a 4 nulovými bity. Všechny bity jsou kódovány pomocí konvolučního kodéru, který má stejné parametry jako pro hlasový přenos.

1.4.3 Interleaving

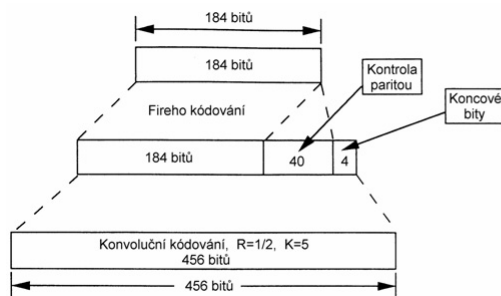
Interleaving neboli prokládání slouží k zamezení vzniku shlukových chyb v přenášení signálu. V systému GSM je použito nejjednoduššího způsobu prokládání, a to pomocí blokového prokládacího členu.

Výstup konvolučního kodéru, tj. 456 bitů je ukládáno do matice, která má rozměr 57×8 . Ukládání do matice probíhá po řádcích. Následně jsou data z matice čtena po sloupcích, tj. vytvoří se 8 skupin po 57 bitech, v Obr. 1.14 je označena písmenem B.

Následuje skládání skupin do jednotlivých TDMA rámců GSM. Skládání probíhá tak, že první čtveřice skupin se prokládá s předcházejícím hlasovým segmentem a druhá čtveřice se prokládá s následujícím segmentem.



Obrázek 1.12: Kódování hlasových rámců



Obrázek 1.13: Konvoluční kódování datových rámců

Na úrovni jednoho časového rámce potom dochází ke kombinování jednotlivých bitů ze skupin, tj. bity z následujícího hlasového segmentu se vkládají na liché pozice (bity označené C ve spodní části Obr. 1.14) a bity z aktuálního hlasového segmentu se vkládají na sudé pozice.

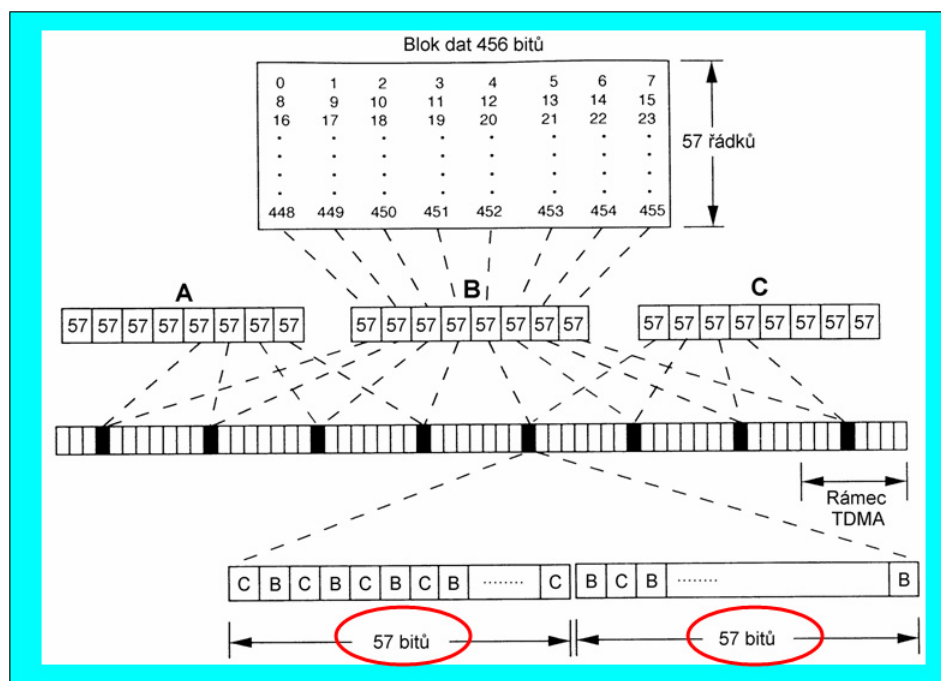
1.4.4 Časová organizace TDMA rámců, kanálu atd...

System GSM je založen na kombinaci FDMA-TDMA přístupu k přenosovému médium a používá plně duplexní provoz z kmitočtovým dělením FDD (jiné frekvenční kanály pro uplink a downlink).

Základní jednotkou časově multiplexovaných systémů je tzv. rámec. Jeden rámec se skládá z 8 timeslotů, které slouží pro přenos základní datové jednotky systému GSM, která se nazývá burst. Jednotlivé rámce jsou vkládány do nadřazených struktur, které se nazývají Multirámce. System GSM používá dva typy multirámců, a to multirámec používaný pro řídicí (signalizační) kanály a multirámec pro přenos hlasu v tzv. provozních kanálech.

Časová organizace signalizačních a provozních multirámců je zobrazena na obr. 1.4.4. Multirámec pro signalizaci obsahuje 51 TDMA rámců, multirámec pro provozní kanály obsahuje 26 TDMA rámců. Tyto multirámce se vkládají do tzv. superrámců.

Jeden superrámec obsahuje 51 provozních multirámců nebo 26 signalizačních rámců, aby byl dodržen časový rastr. 2048 superrámců tvoří hyperrámec, jehož perioda opakování je při-



Obrázek 1.14: Prokládání bitů v GSM

bližně 3 hodiny a 15 minut.

1.4.5 Typy burstů

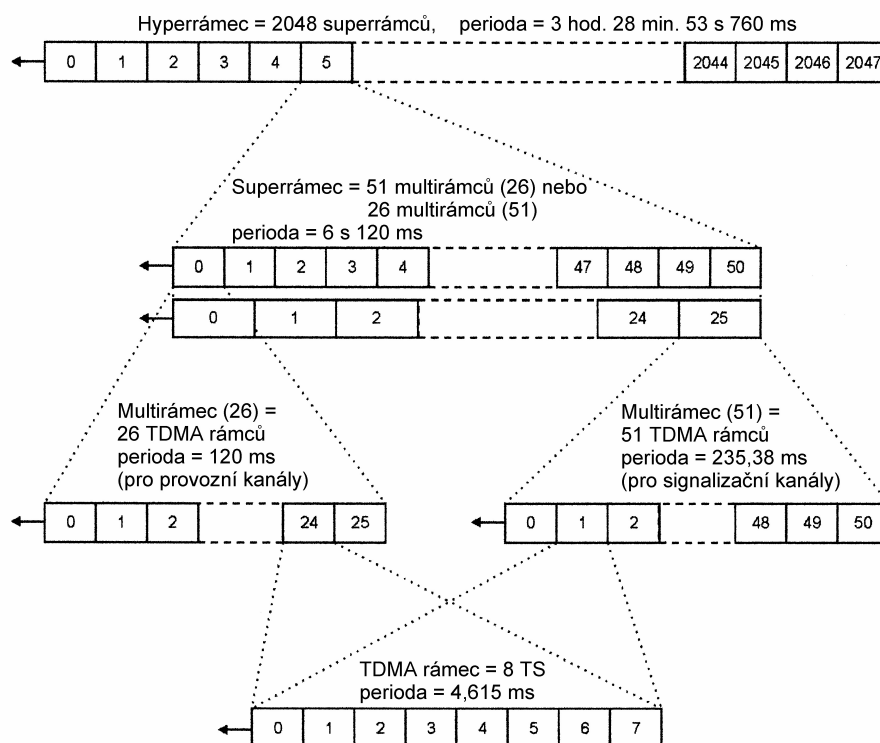
Základní časovou jednotkou v systému GSM, tzv. Radio Resource Unit RRU je jeden timeslot pro přenos základní datové jednotky, nazývané burst. Burst je základní datový prvek systému GSM, doba trvání $\frac{15}{26}$ ms (0,577 ms). Celkem 156,25 bitů = 1 burst. Přenosová rychlost v jednom frekvenčním kanálu GSM je $270,833 \text{ kbit.s}^{-1}$.

V GSM je definováno celkem 5 typů burstů:

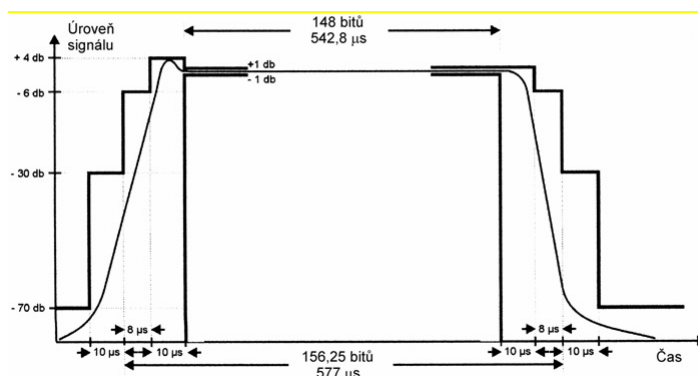
- normální burst
- přístupový burst
- burst pro frekvenční korekci
- synchronizační burst
- prázdný burst

Normální burst je to nejpoužívanější typ burstu. Jeho struktura je na obr. 1.17 a obsahuje následující části

- dva bloky hovorového signálu (2×57 bitů)
- tréninková sekvence 26 bitů



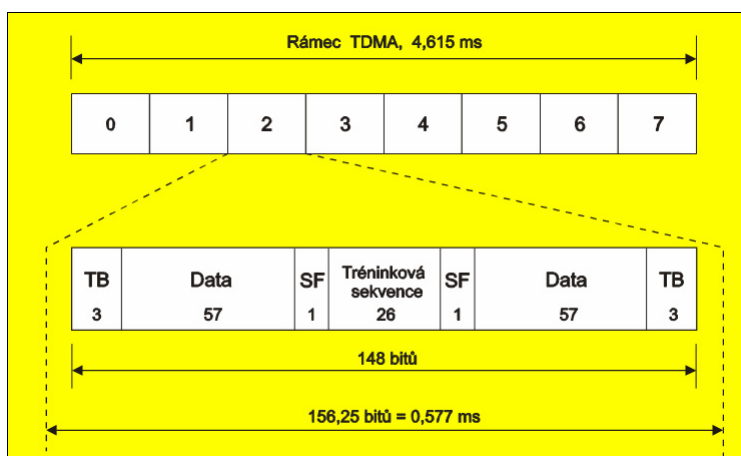
Obrázek 1.15: Časová struktura rámců [8]



Obrázek 1.16: Časový průběh výkonu mobilní stanice během jednoho burstu

- Tail bity (2×3 bity)
- řídicí bity SB (2×1 bit)
- ochranné bity 8,25 bitů

Jednotlivé bity se označují BN0÷BN156. Přenášených 114 bitů hovorového signálu vzniká prokládáním dvou sousedních časových segmentů bit po bitu. Na začátku a konci burstu



Obrázek 1.17: Normální burst

jsou vkládány tzv. Tail bits (jalové bity), které nepřenášejí žádnou informaci a jsou vždy nulové.

Velmi důležitou součástí normálního burstu jsou tzv. Stealing Flag bity, které ohraničují tréninkovou sekvenci. Jejich podrobnější popis bude v části o mapování logických kanálů do fyzických.

Tréninková sekvence dat je používána ke dvěma velmi důležitým úkolům. Prvním je ekvalizace přenosového kanálu. Pomocí této sekvence bitů dlouhé 26 bitů se provede odhad frekvenční charakteristiky kanálu a dojde k nastavení ekvalizačního filtru v přijímači, aby došlo ke kompenzaci frekvenční selektivity kanálu. Druhým úkolem tréninkové sekvence je identifikace timeslotu, protože každý z timeslotů má tuto posloupnost odlišnou, viz. Tab. 1.7.

Na konec užitečných dat se vkládá tzv. Guard Period. Je ochranný interval reprezentovaný ochrannými bity z důvodu pohybu MS ($8, 25 \times 3, 692 \mu s$), kompenzuje změnu vzdálenosti $\Delta d = 9, 62 \text{ km}$

Přenosová rychlost pro účastnický kanál je $33,864 \text{ kbit.s}^{-1}$, bitová perioda $T_b = 3, 692 \mu s$

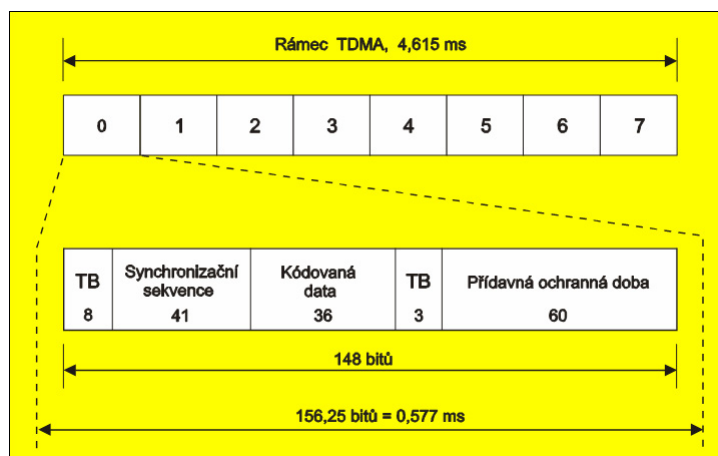
Přístupový burst jak již z názvu tohoto burstu vyplývá, používá se v okamžiku přístupu MS do sítě. Jeho formát je proto odlišný od ostatních burstů. V okamžiku přístupu MS do sítě (Channel Request) systém nezná její vzdálenost od BTS a proto je nutné tuto vzdálenost určit, aby bylo možné předat MS hodnotu parametru Timing Advance (viz dále).

Přístupový burst je kratší na úkor prodlouženého ochranného intervalu, který slouží pro měření parametru TA. Tail bity na počátku mají vždy stejné hodnoty 0011 1010 a společně se synchronizačními bity slouží k identifikaci AB (normal burst se nevejde do *receiver window*, jestliže není známé zpoždění).

Timing Advance slouží pro korekci zpoždění vlivem šíření signálu mezi BTS a MS. Proto MS vysílá o několik bitů dříve, než by odpovídalo 3 TS časového posunu mezi downlinkem a uplinkem.

Tabulka 1.7: Training Sequence Code pro jednotlivé timesloty

Training Sequence Code (TSC)	Training sequence bits (BN61, BN62 .. BN86)
0	(0,0,1,0,0,1,0,1,1,1,0,0,0,0,1,0,0,0,1,0,0,1,0,1,1,1)
1	(0,0,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,0,1,0,1,1,0,1,1,1)
2	(0,1,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,0)
3	(0,1,0,0,0,1,1,1,1,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,1,1,0)
4	(0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1)
5	(0,1,0,0,1,1,1,0,1,0,1,1,0,0,0,0,0,1,0,0,1,1,1,0,1,0)
6	(1,0,1,0,0,1,1,1,1,1,0,1,1,0,0,0,1,0,1,0,0,1,1,1,1,1)
7	(1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0)

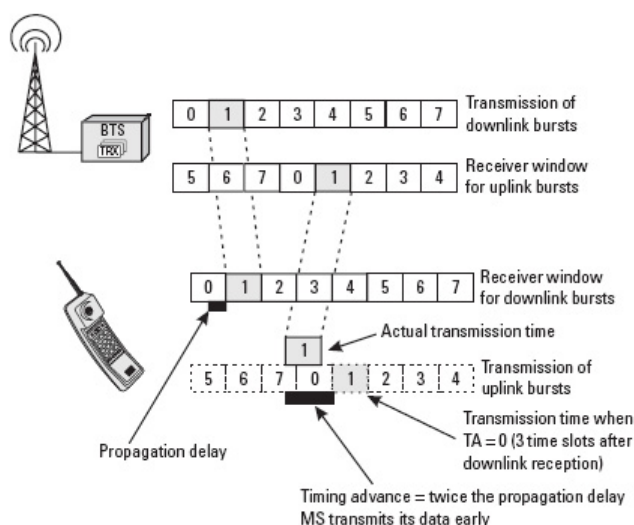
**Obrázek 1.18:** Přístupový burst

Burst pro frekvenční korekci jak z názvu vyplývá, používá se např. při připojování MS do sítě (po zapnutí MS) pro zajištění přesného nalazení kanálu v MS. Tento burst obsahuje pouze 0, proto je

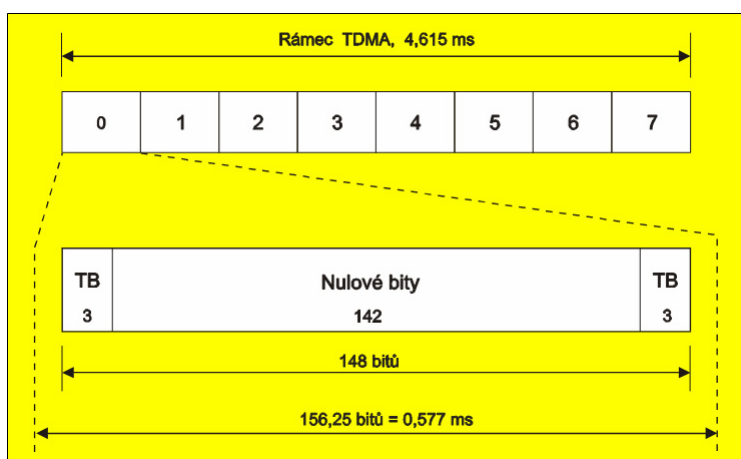
$$f_{\text{FCCH}} = f_{\text{BCCH}} + 67,7 \text{ kHz}$$

Synchronizační burst] přenáší menší množství uživatelských dat, protože obsahuje tzv. prodlouženou tréninkovou sekvenci dat. Tato prodloužená sekvence je stejná pro všechny BTS v systému a slouží pro identifikaci sítě

Prázdný burst obsahuje náhodně generovaná data pro omezení vzniku interferencí, které by vznikly při kolísání vysílaného výkonu.



Obrázek 1.19: Timing Advance

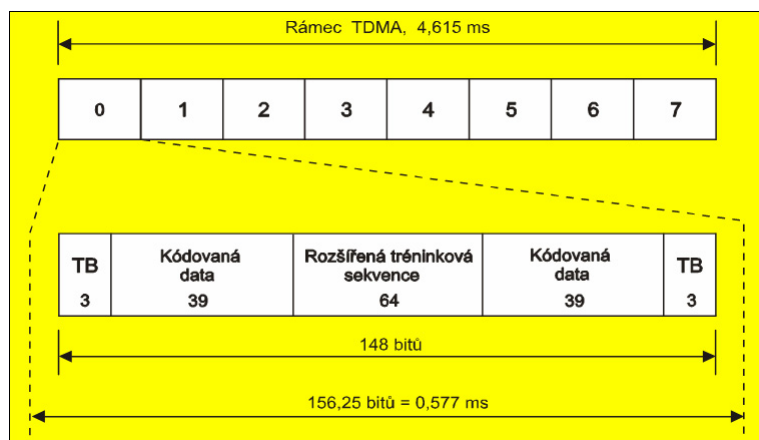


Obrázek 1.20: Burst pro frekvenční korekci

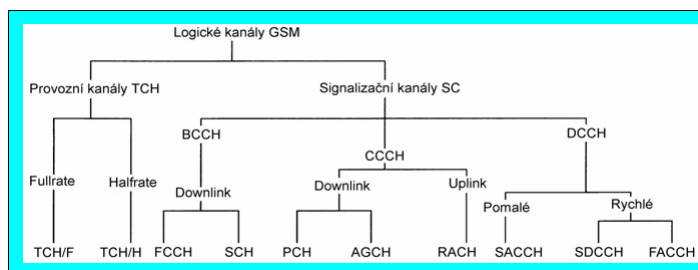
1.5 Přehled logických kanálů GSM

Systém GSM má definované tři vrstvy dle OSI modelu. Fyzická vrstva slouží k přenosu hlasu a signalizace. Fyzický kanál je proto nutné využívat střídavě pro provoz a řízení hovoru, dále je nutné uvažovat provozní procedury jako Handover a měření pro zajištění kvality spojení. Toto se děje pomocí mapování logických kanálů do kanálu fyzického.

Logické kanály jsou rozděleny na tzv. provozní kanály (Traffic Channels) a kanály signalizační (Signalling Channels). Provozní kanály slouží pro přenos hlasu a datových služeb, signalizační kanály slouží pro sestavení a řízení spojení. Tyto logické kanály jsou časově multiplexovány a přenášeny fyzickým kanálem mezi MS a MSC.



Obrázek 1.21: Synchronizační burst



Obrázek 1.22: Přehled používaných kanálů

1.5.1 Provozní kanály

- Traffic Channel zajišťuje přenos veškerých uživatelských dat mezi MS a BTS
- pro řízení sítě a MS se používají signalizační kanály

1.5.2 Signalizační kanály

Signalizační kanály se dělí do tří skupin. První skupinou jsou tzv. Broadcast Channels BCH, které jsou určeny pouze pro downlink a slouží k přenosu základních informací o síti. Druhou skupinou jsou tzv. společné řídicí kanály (Common Control Channels CCCH). CCCH kanály se přenášejí vždy pouze v jednom směru, přičemž existují samostatné kanály pro downlink a samostatné kanály pro uplink. CCCH jsou určeny pro několik uživatelů. Poslední skupinou jsou vyhrazené řídicí kanály (Dedicated Control Channels DCCH), které jsou obousměrné (uplink i downlink) a jsou sestaveny vždy pouze pro jednoho uživatele.

BCH Broadcast Channels

- BCCH – Broadcast Control Channel slouží pro přenos informací, které jsou nutné pro přístup MS do sítě. Jsou to zejména:

- kód státu (Country Code, pro ČR je to 230), kód sítě MNC (Mobile Network Code, 01 T-Mobile CZ, 02 Telefonica O2, 03 Vodafone), kód oblasti LAI (Location Area Identification) a další informace
- BCCH Allocation list - seznam BCCH na okolních BTS,
- skokové posloupnosti pro Frequency Hopping,

Přenosová rychlost je 782 bps.

- FCCH – Frequency Correction Channel využívá burst pro frekvenční korekci, který obsahuje samé 0 a tím zajišťuje přesné nalazení přijímače MS na frekvenci BCCH, viz Obr. 1.20.
- SCH – Synchronization Channel slouží pro přesnou synchronizaci MS. Používá Synchronizační burst s rozšířenou tréninkovou sekvencí, viz. Obr. 1.21.

CCCH – Common Control Channels jsou společné řídicí kanály, které slouží pro přenos informací v obou směrech (uplink i downlink). Mapované kanály jsou rozděleny na kanály vysílané pouze v downlinku, kam patří:

- PCH – Paging Channel pro vyhledávání MS při příchozím hovoru
- AGCH – Access Grant Channel je společný řídicí kanál, který se přenáší pouze v sudých timeslotech, typicky na TS0 kanálu BCCH. Slouží k přidělení SDCCH kanálu. Přenosová rychlost je 782 bps.
- SDCCH
- CBCH – Cell Broadcast Channel, pouze pro downlink, lze nahradit SDCCH.

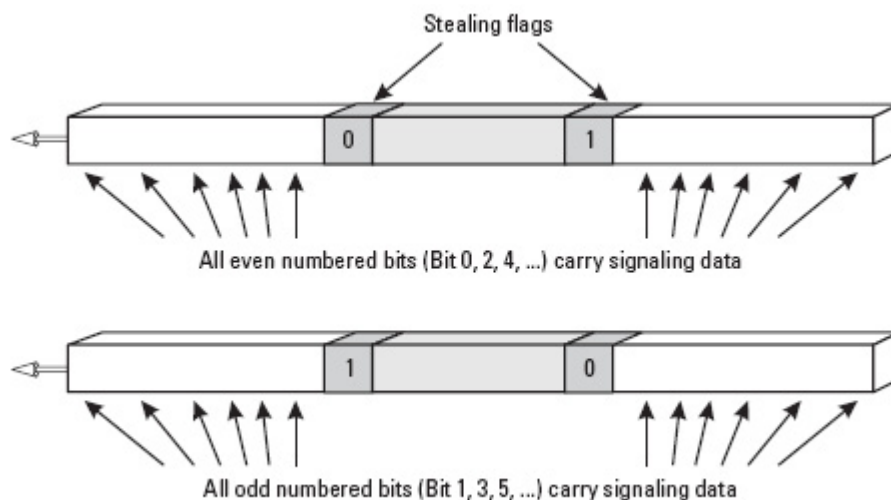
Kanál pro uplink je jeden:

- RACH – Random Access Channel slouží pro přenos požadavku o spojení od MS. Tento kanál vždy využívá přístupový burst, viz Obr. 1.18. Přenosová rychlost RACH kanálu je 34 bps.

Tyto kanály slouží pro přenos signalizace mezi sítí a MS při požadavku přístupu do sítě (sestavení hovoru).

DCCH – Dedicated Control Channels jsou vyhrazené řídicí kanály pouze pro jednoho účastníka. Zahrnují tyto řídicí kanály:

- SDCCH – Standalone Dedicated Control Channel je kanál pro přenos signalizace při sestavení spojení a při proceduře Location Update.
- SACCH – Slow Associated Control Channel je logický kanál, který se mapuje do TCH nebo do SDCCH (označuje se jako Inband Control Channel). Přenáší se pouze jednou během multirámce.
- FACCH – Fast Associated Control Channel je stejně jako SACCH řídicí kanál mapovaný do provozního kanálu. Využívá se v okamžiku požadavku na přenos signalizace, kdy není možné čekat na SACCH kanál (1 během multirámce). FACCH kanál se mapuje do normálního burstu. Pomocí Stealing Flag bitů se rozlišuje přenos signalizace na lichých nebo sudých pozicích, jak je vidět na Obr. 1.23.

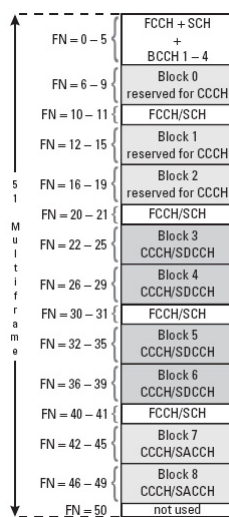


Obrázek 1.23: Využití Stealing Flag pro mapování signalizace do normálního burstu

1.5.3 Časová organizace logických kanálů

GSM poskytuje velké množství různých kombinací mapování logických kanálů. Tyto kombinace se liší podle konfigurace dané BTS (počet rádiových kanálů, číslo kanálu na dané BTS) a jsou určeny pro signalizační multirámec.

Řídící kanály se přenášejí na C0 TS0 (je to kanál s nejnižším ARFCN dané BTS). Nejprve se přenáší časová a frekvenční synchronizace (FCCH a SCH). Po logických kanálech sloužících pro synchronizaci se přenášejí další logické kanály, jejichž možné kombinace jsou na Obr. 1.24.



Obrázek 1.24: Mapování logických kanálů do fyzických

BCCH se vysílá po první kombinaci FCCH a SCH v několika timeslotech (např. 4).

Provozní kanály pro hlasové služby přenášejí s plnou nebo poloviční přenosovou rychlostí a jejich struktura je zobrazena pro uplink i downlink na Obr. 1.25 a Obr. 1.26. Provozní kanál s plnou přenosovou rychlostí TACH/F obsahuje TCH a SACCH (hlas, data + měření síly signálu pro HO). SACCH je přenášen na 13. pozici multirámce, 26. pozice je volná.

1.6 Vrstvový model systému GSM

Vrstvový model OSI slouží pro jednodušší popis komunikačních systémů. V následujících odstavcích bude popsán pouze velmi stručně síťový model GSM.

Fyzická vrstva (*Physical Layer*) zajišťuje přenos informace pomocí přenosového média, v systému GSM zejména pomocí bezdrátového rozhraní mezi BTS a MS. Je nutné si uvědomit, že např. rozhraní A mezi BTS a BSC může být realizováno několika způsoby, např. pomocí mikrovlnného spoje (většina případů), optického kabelu nebo metalického vedení.

Důležitou vlastností fyzické vrstvy je, že přenášená data procházejí fyzickou vrstvou transparentně, tj. nedochází k rozlišování uživatelských dat (hlasový hovor, přenos dat) a signalizace (řízení a sestavení spojení, mobility management).

Linková vrstva (*Data Link Layer*) je zodpovědná za vytváření datových paketů, které se mají přenášet. Takto vytvářené pakety jsou předávány do fyzické vrstvy k přenosu. Typicky se používá HDLC (High-Level Data Link Protocol). Na tomto protokolu jsou vytvořeny signalizační protokoly SS7 a LAPD.

Důležitým úkolem druhé, linkové vrstvy je kódové zabezpečení proti chybám. Na základě zabezpečovacích algoritmů dochází k řízení provozu (např. opakování přenosu ztraceného paketu).

Protokoly linkové vrstvy jsou platné vždy pro dvě sousední entity (MS - BTS, BTS-MSC), nelze použít stejný protokol pro přenos mezi MS-BSC, protože je nutné v BTS provést konverzi použitého protokolu LAPD mezi MS a BTS na signalizační protokol SS7, který se používá mezi BTS a BSC.

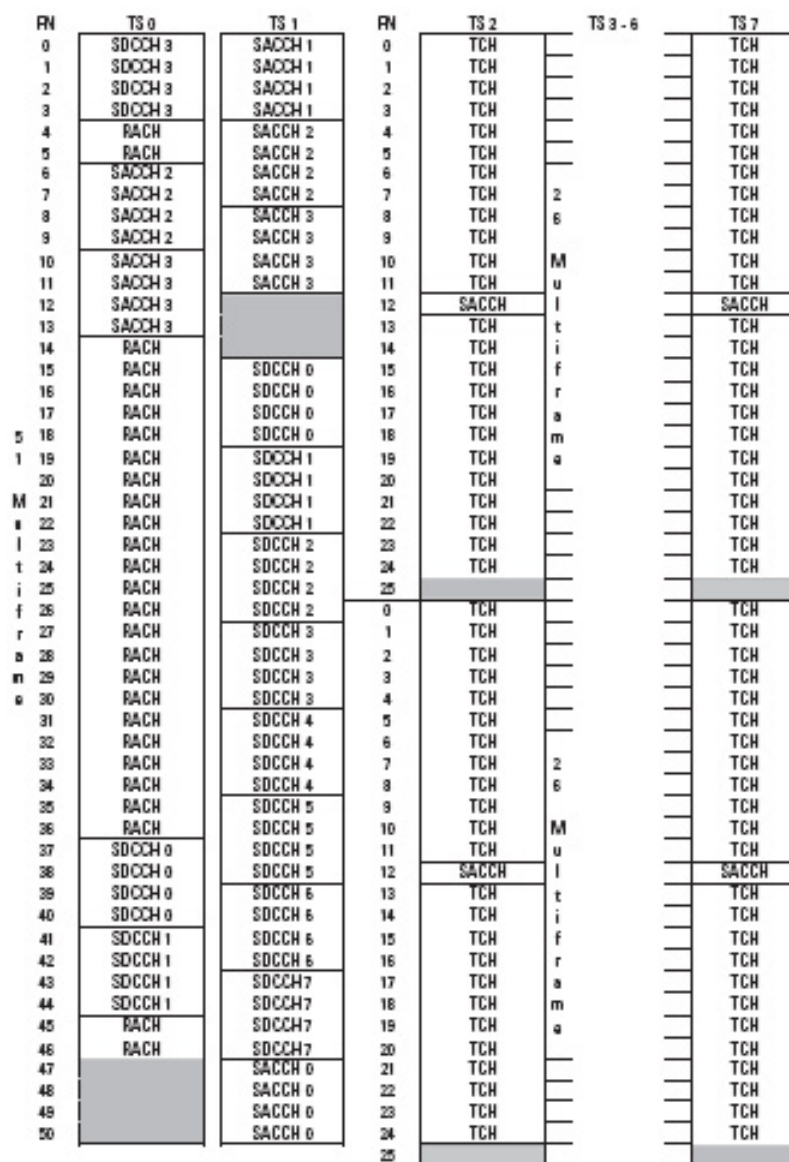
Síťová vrstva (*Network Layer*) je zodpovědná za definování cesty pro danou zprávu z vyšších vrstev a určení příjemce dané zprávy. Zprávy třetí vrstvy jsou analyzovány v každém uzlu sítě, tj. MS, BTS, BSC, MSC a každý uzel sítě je může modifikovat. Zprávy třetí vrstvy přenášejí zejména takové zprávy, které se týkají řízení rádiových zdrojů (Radio Resources). Zprávy třetí vrstvy slouží pro transparentní přenos zpráv týkajících se řízení mobility účastníka, Mobility Management (MM) a řízení spojení, Call Control (CC).

Transportní vrstva (*Transport Layer*) slouží pro správné řazení paketů během přenosu mezi koncovými body komunikace (End to end), na rozdíl od druhé a třetí vrstvy, které jsou definovány pouze pro komunikaci na rozhraní.

Relační vrstva (*Session Layer*) je určena pro koordinaci komunikace mezi prvky sítě (MS $\Leftrightarrow$ MSC). Pomocí páté vrstvy se rozlišuje typ hovoru MOC (Mobile Originating Call) nebo MTC (Mobile Terminating Call) a procedura Location Update.

FN	TS 0	TS 1	FN	TS 2	TS 3 - 6	TS 7
0	FCCH	SDCCH 0	0	TCH		TCH
1	SCH	SDCCH 0	1	TCH		TCH
2	BCCH 1	SDCCH 0	2	TCH		TCH
3	BCCH 2	SDCCH 0	3	TCH		TCH
4	BCCH 3	SDCCH 1	4	TCH		TCH
5	BCCH 4	SDCCH 1	5	TCH		TCH
6	AGCH/PCH	SDCCH 1	6	TCH	26	TCH
7	AGCH/PCH	SDCCH 1	7	TCH		TCH
8	AGCH/PCH	SDCCH 2	8	TCH	M	TCH
9	AGCH/PCH	SDCCH 2	9	TCH		TCH
10	FCCH	SDCCH 2	10	TCH	u	TCH
11	SCH	SDCCH 2	11	TCH		TCH
12	AGCH/PCH	SDCCH 3	12	SACCH	l	SACCH
13	AGCH/PCH	SDCCH 3	13	TCH		TCH
14	AGCH/PCH	SDCCH 3	14	TCH	t	TCH
15	AGCH/PCH	SDCCH 3	15	TCH		TCH
16	AGCH/PCH	SDCCH 4	16	TCH	i	TCH
17	AGCH/PCH	SDCCH 4	17	TCH		TCH
18	AGCH/PCH	SDCCH 4	18	TCH	f	TCH
19	AGCH/PCH	SDCCH 4	19	TCH		TCH
20	FCCH	SDCCH 5	20	TCH	r	TCH
21	SCH	SDCCH 5	21	TCH		TCH
22	SDCCH 0	SDCCH 5	22	TCH	a	TCH
23	SDCCH 0	SDCCH 5	23	TCH		TCH
24	SDCCH 0	SDCCH 6	24	TCH	m	TCH
25	SDCCH 0	SDCCH 6	25			
26	SDCCH 1	SDCCH 6	0	TCH	e	TCH
27	SDCCH 1	SDCCH 6	1	TCH		TCH
28	SDCCH 1	SDCCH 7	2	TCH	26	TCH
29	SDCCH 1	SDCCH 7	3	TCH		TCH
30	FCCH	SDCCH 7	4	TCH	M	TCH
31	SCH	SDCCH 7	5	TCH		TCH
32	CBCH	SACCH 0	6	TCH	u	TCH
33	CBCH	SACCH 0	7	TCH		TCH
34	CBCH	SACCH 0	8	TCH	l	TCH
35	CBCH	SACCH 0	9	TCH		TCH
36	SDCCH 3	SACCH 1	10	TCH	t	TCH
37	SDCCH 3	SACCH 1	11	TCH		TCH
38	SDCCH 3	SACCH 1	12	SACCH	i	SACCH
39	SDCCH 3	SACCH 1	13	TCH		TCH
40	FCCH	SACCH 2	14	TCH	f	TCH
41	SCH	SACCH 2	15	TCH		TCH
42	SACCH 0	SACCH 2	16	TCH	r	TCH
43	SACCH 0	SACCH 2	17	TCH		TCH
44	SACCH 0	SACCH 3	18	TCH	a	TCH
45	SACCH 0	SACCH 3	19	TCH		TCH
46	SACCH 1	SACCH 3	20	TCH	m	TCH
47	SACCH 1	SACCH 3	21	TCH		TCH
48	SACCH 1		22	TCH	e	TCH
49	SACCH 1		23	TCH		TCH
50			24	TCH		TCH
			25			

Obrázek 1.25: mapování rámců v downlinku [10]



Obrázek 1.26: Mapování rámců v uplinku [10]

Prezentační vrstva (*Presentation Layer*) zajišťuje definování a předzpracování dat pro aplikační vrstvu.

Aplikační vrstva (*Application Layer*) je to vlastně rozhraní mezi aplikací a komunikačním procesem.

1.7 Procedury v síti GSM

Identifikace účastníka se v síti GSM provádí pomocí tzv. SIM Subscriber Identity Module karty. SIM kartu lze popsat jako databázi údajů na straně účastníka. Obsahuje zejména údaje pro

přístup do sítě, a to jsou:

- K_i ověřovací klíč
- IMSI International Mobile Subscriber Identification number

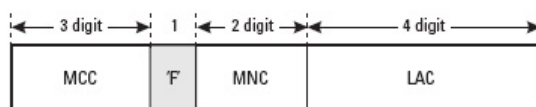


Obrázek 1.27: Struktura IMSI

- TMSI Temporary MSI - dočasné identifikační číslo, které zajišťuje anonymitu
- podporované a povolené služby sítě
- přístupová třída (0–15).

Na SIM kartě se dále ukládají uživatelské informace, jako jsou SMS, kontakty (tel. čísla, seznamy hovorů).

Poloha účastníka se v GSM síti určuje pomocí kódu LAI Location Area Identification. Tento kód obsahuje informaci o BSS, ve kterém se daná MS nachází, tím je možné zkrátit dobu vyhledání MS při pagingu. Struktura kódu LAI je na Obr. 1.28.



Obrázek 1.28: Location Area Identification

1.7.1 Základní procedury

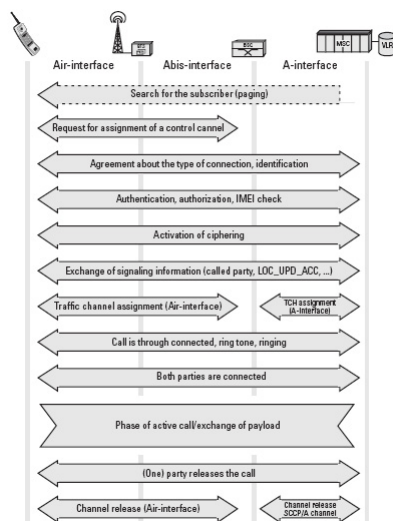
Základní procedury v síti zahrnují zejména přidělení přenosového kanálu, ověření účastníka a sestavení spojení. Tyto činnosti jsou zobrazeny na Obr. 1.29.

Jestliže dochází ke spojení ze sítě k MS, provede se nejprve vyhledávání MS pomocí pagingu. Druhou možností je zaslání požadavku na přidělení řídicích kanálů od MS směrem do systému. Po vytvoření řídicího kanálu dochází k potvrzení přidělené služby a identifikaci SIM karty.

Dalším krokem je provedení autentifikace, autorizace a kontrola IMEI mobilní stanice. Jedním z výstupů autentifikačního procesu je šifrovací klíč, který je následně použit pro šifrování přenášených dat na bezdrátovém rozhraní.

Následuje výměna signalizace potřebné pro sestavení spojení a přidělení hovorového kanálu. Jakmile je vytvořen provozní kanál, dochází k vyzvánění a sestavení hovoru.

Ukončení hovoru se provede nejprve pomocí signalizace a posledním krokem je uvolnění přenosového kanálu na rádiovém rozhraní.



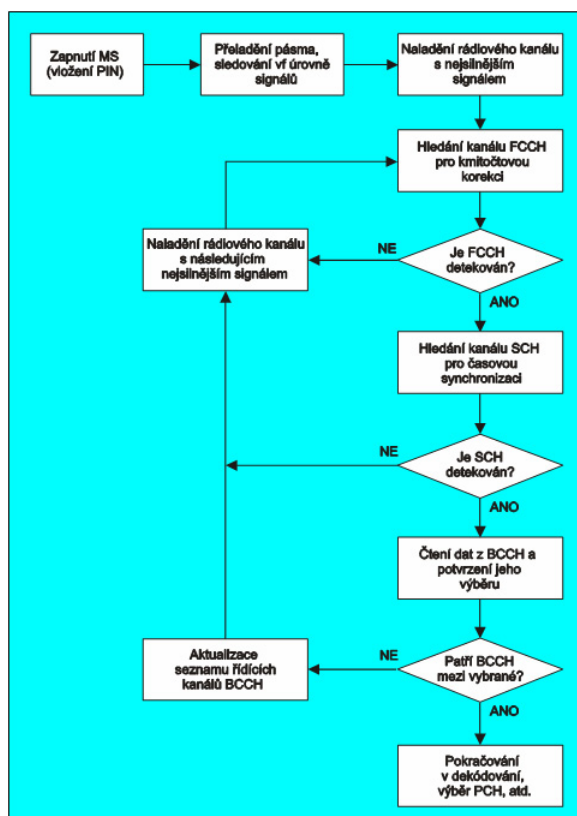
Obrázek 1.29: Základní procedury v síti

Proceduru připojení MS do sítě lze popsat pomocí následujících kroků (Obr. 1.30):

- Ověření PIN dané SIM karty.
- Frekvenční synchronizace (MS hledá FCCH, přijímač má nastavenou malou citlivost, aby našel kanál s největší úrovní, MS ladí přes celé frekvenční pásmo). Pokud se na nejsilnějším kanálu nenachází FCCH, stanice hledá následující nejsilnější kanál až do okamžiku nalezení FCCH.
- Po nalezení kanálu přenášejícího FCCH dojde k frekvenční synchronizaci.
- Dalším krokem je časová synchronizace pomocí SCH (provádí se korelace synchronizační sekvence SCH (Obr. 1.21), která je shodná pro všechny BTS systému GSM).
- Po synchronizaci MS čeká na informace přenášené pomocí BCCH (kód sítě, kód oblasti, seznam BCCH atd.) a porovnává je s pamětí MS (změna polohy během vypnutí).
- Jakmile MS zná všechny informace z BCCH, čeká na PCH a přechází do Idle módu.

1.7.2 Ověření totožnosti

Standard GSM má definované velmi silné zabezpečení na rádiovém rozhraní. Základem jsou dva algoritmy, algoritmus A3 slouží pro ověření totožnosti a algoritmus A8 pro výpočet šifrovacího klíče. Posledním algoritmem je A5 pro šifrování přenášených dat.



Obrázek 1.30: Základní procedury v síti

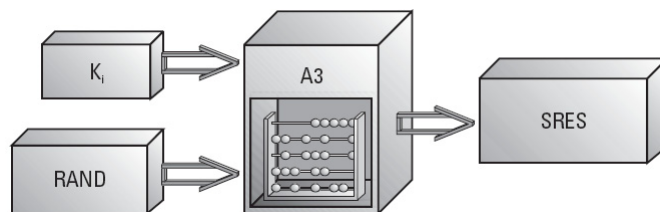
Po zapnutí MS a ověření PIN dochází k zaslání čísla IMSI z mobilní stanice do sítě. Síť generuje číslo TMSI (Temporary Subscriber Identification Number), které zajišťuje anonymitu účastníka. Po přidělení TMSI dochází k ověření totožnosti.

V centru autentifikace, které je spojeno s databází HLR, se generuje náhodné číslo RAND, které má délku 128 bitů. Z databáze HLR se bere autentifikační číslo K_i , které je přiřazeno číslu IMSI a tato dvě čísla jsou vstupními daty pro algoritmus A3, jak je vidět z Obr. 1.31. Jeho výstupem je posloupnost SRES Signed Response.

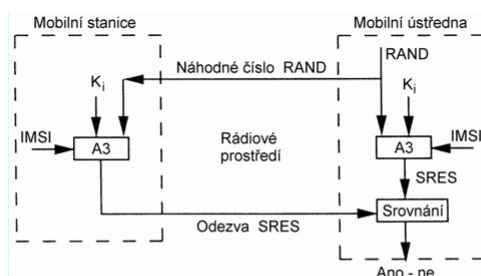
Ověření účastníka proběhne postupem dle Obr. 1.32. Z MSC se do MS přenáší náhodné číslo RAND, které slouží pro výpočet odezvy SRES v MS. Tato odezva se přenáší zpět do AuC, kde se porovnává s hodnotou SRES v tripletu. Pokud se odezvy SRES shodují, je účastník ověřen, pokud se neshodují, není účastníkovi povolen přístup do sítě.

Pro procedury ověření a šifrování se zasílá do HLR tzv. triplet. Triplet obsahuje náhodně generované číslo RAND, šifrovací klíč K_c a posloupnost SRES.

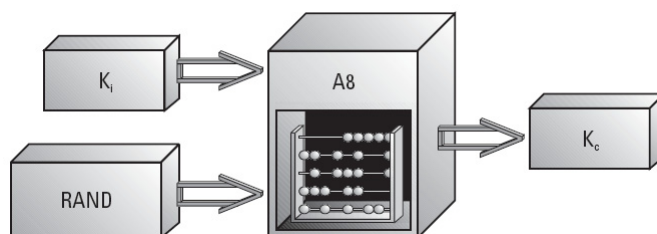
Šifrovací klíč K_c se počítá pomocí algoritmu A8. Pro jeho výpočet se používá stejně jako pro výpočet SRES autentifikační číslo K_i a náhodná posloupnost RAND. Algoritmus A8 je stejný pro všechny sítě GSM. Pokud dojde k úspěšnému ověření účastníka pomocí SRES, předává se šifrovací klíč K_c do šifrovacího algoritmu A5.



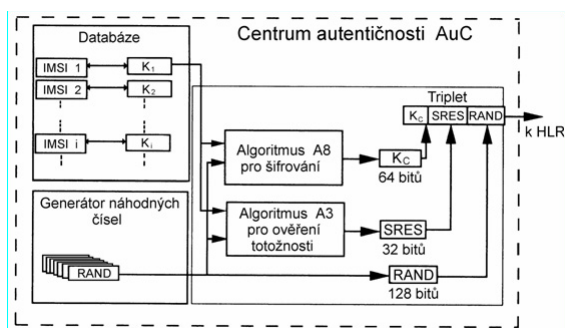
Obrázek 1.31: Výpočet A3 [10]



Obrázek 1.32: Ověření účastníka v síti



Obrázek 1.33: Výpočet A8 [10]

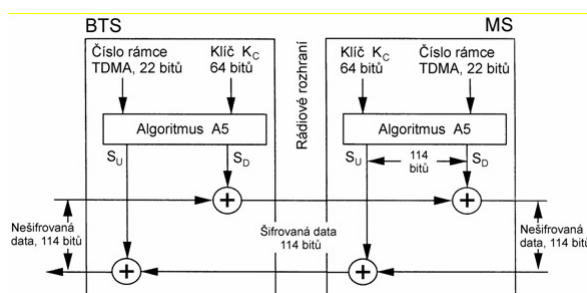


Obrázek 1.34: Generování tripletu

1.7.3 Šifrování

Postup šifrování je na Obr. 1.35. Šifrovací algoritmus A5 je implementován v MS, nikoliv na SIM, na rozdíl od algoritmů A3 a A8. Existuje několik variant tohoto algoritmu, označují se jako A5/X, v současné době je definováno $X = 1 \dots 7$. V MS nemusí být implementovány všechny varianty algoritmu.

Algoritmus pracuje se šifrovacím klíčem K_c a číslem TDMA rámce. Šifrovací klíč se mění pro každé spojení = pro každý hovor. Tento fakt, v kombinaci s číslem rámce, zajišťuje velmi nízkou pravděpodobnost úspěšného odposlechu telefonního hovoru na rádiovém rozhraní. Je nutné si však uvědomit, že mimo rádiové rozhraní již nejsou data šifrována. Na rádiovém rozhraní lze šifrovat hlas, data i signalizaci.



Obrázek 1.35: Šifrování

1.7.4 Provozní procedury

Hovor MS - MS - volající MS

- žádost o spojení
- volitelně identifikace
- ověření totožnosti
- šifrování
- přenos volaného čísla
- potvrzení, zpracování v NSS

Hovor MS - MS II - volaná MS

- hledání BTS podle LAI
- přenos informace o příchozím hovoru
- potvrzení o příchozím hovoru
- identifikace
- autentifikace

Charakteristika HO z hlediska entity sítě:

Intra BTS - jiný timeslot nebo ARFCN v rámci jedné BTS

Intra BSC - bez zásahu MSC (ale lze jej provádět i z MSC)

Intra MSC - BSC+BTS provádí měření, MSC rozhoduje (BSC1 rozhodne, zda je potřeba změnit BTS v BSC2, předá MSC a čeká)

Inter MSC - procedura, která zahrnuje všechny vrstvy sítě

HO v rámci BSC nejčastější případ, nejmenší pravděpodobnost rozpadu spojení. Většina HO v rámci BSC nastává z důvodu poklesu kvality spojení, proto se realizuje Intra Cell HO (změna TS nebo ARFCN)

HO v rámci MSC během HO musí dojít k Location Update (přechod mezi BSC), tato procedura vyžaduje rozpojení hovoru.

HO v rámci PLMN • nejhorší situace

- dochází ke změně LA, VLR, ...

1.8 Datové přenosy v sítích GSM a jejich evoluce

1.8.1 HSCSD High Speed Circuit Switched Data

Síť GSM byla navržena jako síť se spínáním okruhů, která je typická pouze pro hlasový provoz. Datové služby byly do standardu vloženy aktualizací specifikace označované jako GSM Phase 2.

Základní přenosová rychlost je $9,6 \text{ kbit.s}^{-1}$. Kanálové kódování pro datové přenosy je zobrazeno na obr. 1.13. Datový rámec, který má 184 bitů, je nejprve kódován Fireho kódem, doplněn o 4 koncové bity a poté je aplikováno konvoluční kódování. Konvoluční kodér má stejné parametry jako pro hlasové rámce.

Základní přenosová rychlost pro datové služby nebyla dostačující. Proto byla navržena inovace systému HSCSD, která zaváděla možnost přidělování více timeslotů pro jednoho uživatele. Tím došlo k vytvoření několika přenosových kanálů na rádiovém rozhraní a dosažení vyšší přenosové rychlosti pro jednoho uživatele. Dalším krokem pro zvýšení uživatelské rychlosti je změna kanálového kódování. Snížením redundance kanálového kódu dojde ke snížení zabezpečení na úkor zvýšení přenosové rychlosti. Maximální přenosová rychlost v jednom timeslotu je u HSCSD $14,4 \text{ kbit.s}^{-1}$.

Přidělení více timeslotů jednomu uživateli má za následek snížení kapacity sítě pro ostatní uživatele. To je ve svém důsledku nežádoucí, protože je nutné zvyšovat kapacitu sítě přidáváním rádiových kanálů.

Hlavní výhodou HSCSD je jeho implementace do sítě bez změny hardwarového vybavení infrastruktury. Pro zajištění funkce postačuje softwarový update na straně sítě a mobilní stanice. Obvyklá konfigurace pro uživatele potom bývá 3 timesloty pro downlink a 1 timeslot pro uplink, to je dáno převážně nesymetrickým provozem na Internetu. V downlinku je potom maximální rychlost $43,2 \text{ kbit.s}^{-1}$. Je nutné si uvědomit, že přidělování více timeslotů jednomu uživateli nemá význam, protože přenos dat mezi MSC a BTS je omezen na maximálně 64 kbit.s^{-1} .

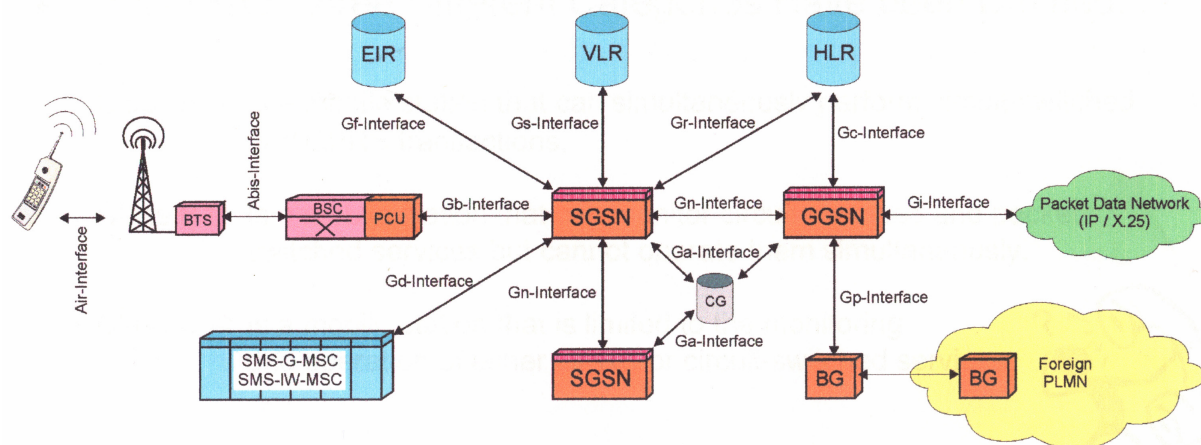
S dalším rozvojem GSM služeb byla zavedena varianta Enhanced HSCSD, někdy též označovaná jako ECSD, která pro přenos dat využívá modulaci 8PSK. Tento systém se však příliš nerozšířil, protože byl nahrazen systémem GPRS a EDGE. V České Republice je technologie HSCSD implementována v síti O2, původně Eurotel.

1.8.2 GPRS

První systém pro rychlé datové přenosy HSCSD využívá spínané okruhy, které nejsou výhodné pro datové služby. Společnost Ericsson proto vytvořila rozšíření infrastruktury sítě GSM, které umožňuje paketový přenos souběžně s hlasovými službami. Toto rozšíření se označuje jako GPRS (General Packet Radio Service).

Přechod na paketový přenos je výhodný, protože umožňuje dynamickou změnu přenosové rychlosti pro jednoho uživatele. Tu lze realizovat pomocí regulace přidělených timeslotů nebo změnou tzv. kódovacích schémat.

Struktura sítě GSM zobrazená na Obr. 1.6 byla doplněna a rozšířena o několik bloků. Síť podporující datové přenosy GPRS je zobrazena na Obr. 1.38. Základem systému je SGSN (Serving GPRS Support Node), což je ústředna podporující paketové přenosy, na tento blok lze nahlížet jako na router. Data směrem k uživateli přicházejí do jednotky PCU (Packet Control



Obrázek 1.38: Architektura GPRS sítě

Unit), která zajišťuje řazení paketů do bloků pro přenos přes rádiové rozhraní. Směrem do ostatních sítí je SGSN připojeno pomocí GGSN (Gateway GPRS Support Node).

Tabulka 1.8: Bitové rychlosti CS

Kódovací schéma	Přenosová rychlost [kb.s^{-1}]	Uživatelská rychlost [kb.s^{-1}]
CS1	9,1	6,7
CS2	13,4	10,0
CS3	15,6	12,0
CS4	21,4	16,7

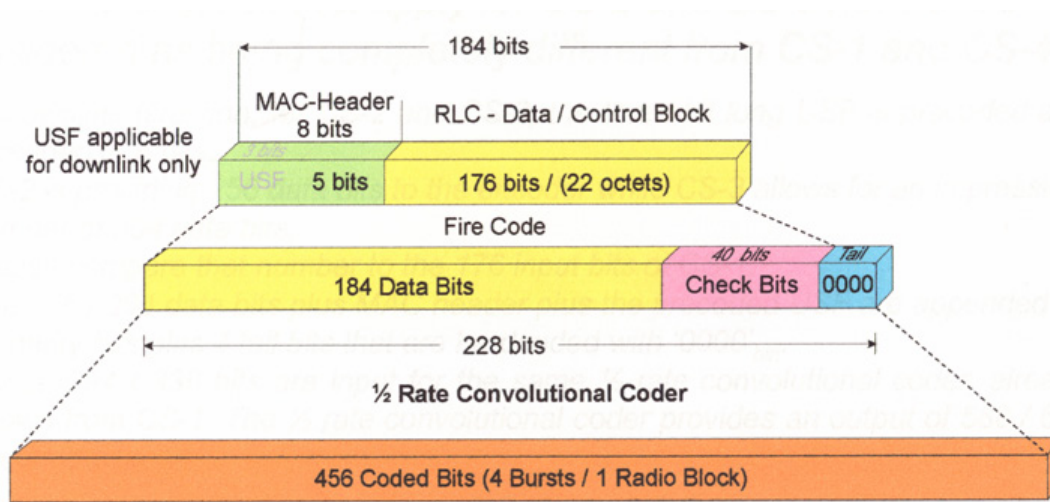
1.8.3 Přenosové rychlosti

Pro kódování signálu na rádiovém rozhraní specifikovala ETSI pro GPRS čtyři různá kódovací schémata CS (Coding Scheme).

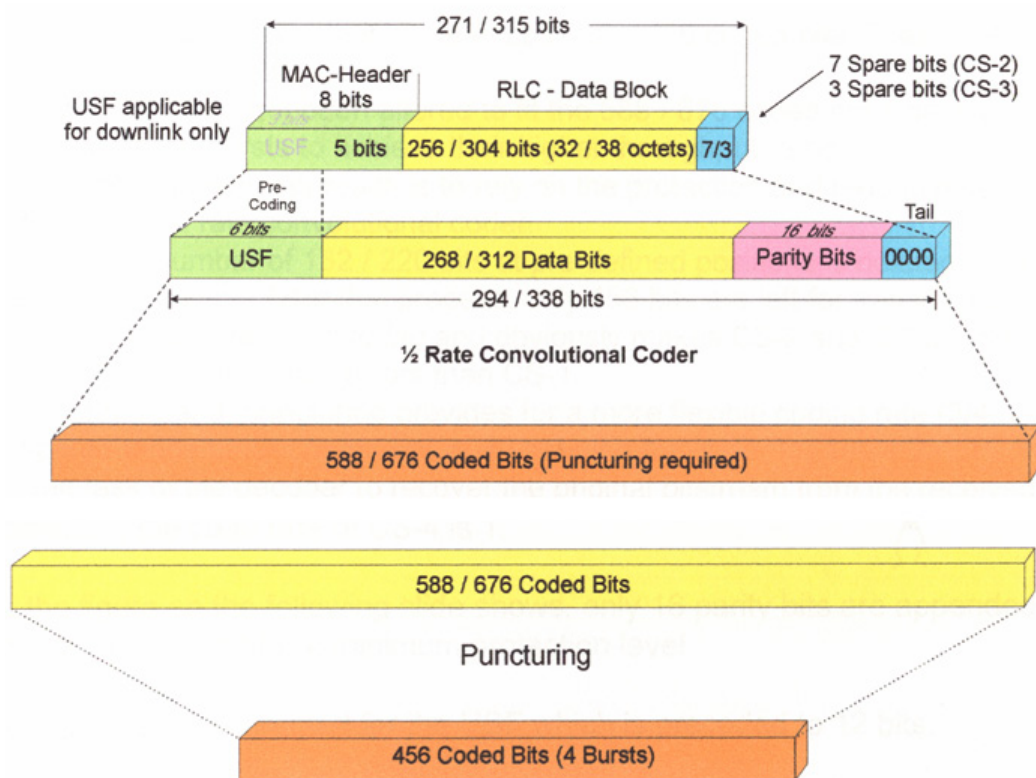
Kódovací schéma CS1, viz. Tab. 1.8, představuje nejbezpečnější způsob kódování s vysokou odolností proti chybám na rádiovém rozhraní. Použití kódu s velkou redundancí má však za následek nízkou výslednou přenosovou rychlost. CS1 odpovídá běžnému datovému burstu systému GSM.

Naproti tomu kódovací schémata CS2 - CS4 jsou z pohledu odolnosti vůči chybám nejméně bezpečné, avšak umožňují dosáhnout nejvyšších přenosových rychlostí. CS2 a CS3 mají stejný postup kódování, ale po provedení konvolučního kódu se provádí puncturing (tečkování), dojde ke snížení přenosové rychlosti, čímž se snižuje zabezpečení.

CS4 nemá žádné kódované zabezpečení proti chybám - musí být velmi kvalitní signál. Pro rozlišení typu CS se používá Stealing Flag bit normálního burstu, viz. Obr. 1.17.

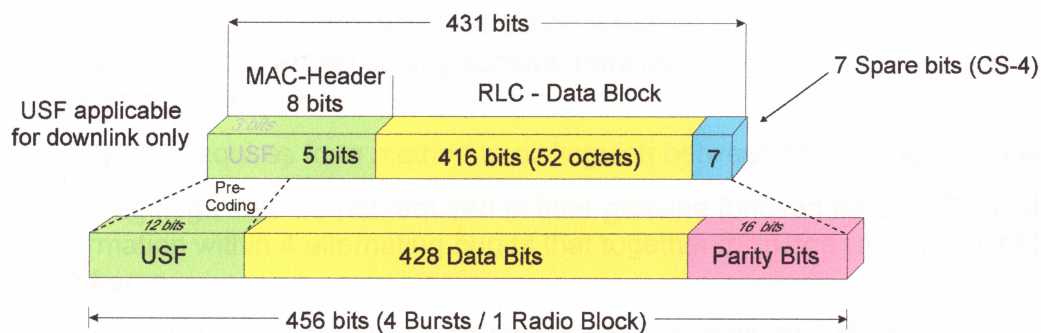


Obrázek 1.39: CS1 [?]



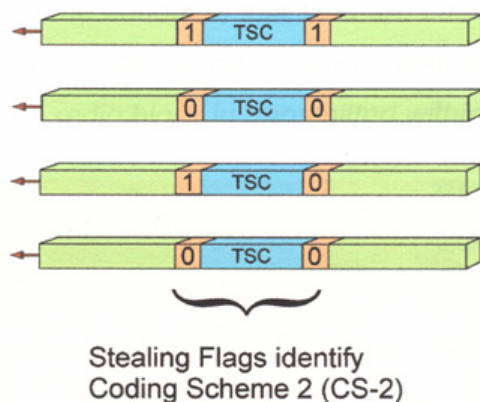
Obrázek 1.40: CS2, CS3 [?]

Při využití všech 8 timeslotů jednoho rádiového kanálu lze pro kódovací systém CS4 stanovit teoretickou přenosovou rychlost fyzické vrstvy systému GPRS na $21,4 \cdot 8 = 171,2 \text{ kbit.s}^{-1}$.



Obrázek 1.41: CS4 [?]

Uživatelská rychlost je vždy nižší než přenosová rychlost (neuvažuje přenos dodatečných informací použitých přenosových protokolů fyzické vrstvy). Pro kódovací systém CS4 lze stanovit uživatelskou rychlost GPRS na $16,7 \cdot 8 = 133,6$ kbit/s (v praxi 3 – 4 timesloty). Mobilní stanice musí „zpracovat“ všechna kódovací schémata (v downlinku), zatímco systém vyžaduje pouze podporu kódovacího schématu CS1. Výběr CS provádí systém a nelze změnit během přenosu jednoho datového bloku.



Obrázek 1.42: Rozlišení CS pomocí Stealing Flag [?]

1.8.4 Struktura rámců GPRS

Časová organizace rámců je rozšířena o nový typ multirámce, který má dobu trvání 240 ms a obsahuje 52 TDMA rámců. Do jednoho superrámce GSM se vkládá 25,5 multirámce pro GPRS přenos.

Další novinkou je tzv. Radio Block. Rádiové bloky jsou určeny pro mapování PDCH (Packet Data Channels). Rádiový blok je tvořen 4 timesloty se shodným Timeslot Number TN v po sobě

jdoucích TDMA rámcích. Rozdělení přenosu v uplinku a downlinku, tj. vyhrazení počtu timeslotů pro daný směr přenosu, se provádí na úrovni bloků.

Rámce na 12. a 38. pozici multirámce jsou vyhrazeny pro měření Timing Advance, rámce na pozici 25. a 51. jsou využity pro měření interferencí, které vznikají vlivem přepínání paketů. Interference se měří za účelem Power Control, tj. regulace vysílaného výkonu s cílem minimalizace interferencí v přenosovém kanálu.

Paketový přenos dat pomocí GPRS definuje nové logické kanály. Jejich rozdělení je na Obr. 1.45. Logické kanály jsou mapovány do fyzických kanálů PDCH (jednoho nebo více timeslotů na jedné nebo více nosných).

Novými logickými kanály jsou:

PBCCH (Packet Broadcast Control Channel) přenáší informace o buňce pro všechny MS, které se v ní nacházejí. Na rozdíl od BCCH může být mapován do každého timeslotu každého ARFCN

PCCCH Packet Common Control Channel je množina kanálů, která obsahuje

- PRACH (Packet Random Access Channel) pro přenos úvodní zprávy z MS do PCU při přístupu do sítě (pouze pro uplink)
- PAGCH (Packet Access Grant Channel) je využíván pro přenos informací o kanálech v uplinku i downlinku pro mobilní stanici (přidělování rádiových zdrojů (Radio Resources))
- PPCH (Packet Paging Channel) používá se pro přenos pagingové informace GPRS (požadavek pro sestavení spojení v downlinku)
- PNCH (Packet Notification Channel) pouze pro downlink v případě přenosu broadcast paketů pro větší množství MS současně.

PCCCH kanály jsou dostupné, pouze pokud je vysílán PBCCH kanál v dané buňce. Pokud není PBCCH vysílán, přenáší se společná signalizace pomocí GSM CCCH kanálů.

PDTCH (Packet Data Traffic Channel) jsou mapovány do fyzického kanálu na jedné frekvenci - může být využito 8 timeslotů pro přenos. Jsou určeny pro přenos dat v obou směrech, označují se PDTCH/U pro uplink a PDTCH/D pro downlink.

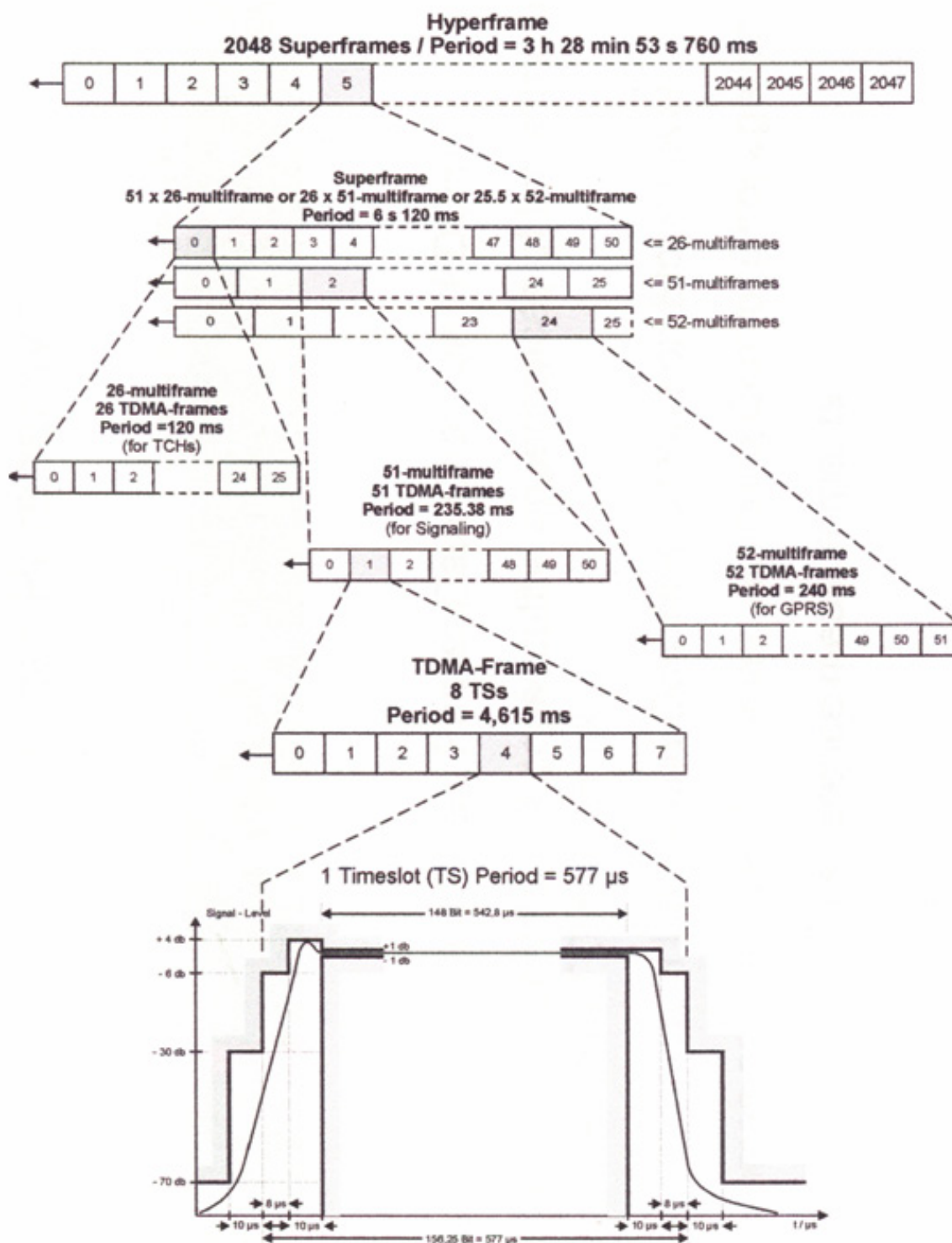
PACCH (Packet Associated Control Channel) řídicí kanál pro jednu MS. Je vždy vázán pro jeden nebo více PDTCH vyhrazených pro danou MS.

PTCCH Packet Timing Advance Control Channel obousměrný kanál pro průběžné měření zpoždění při přenosu. Přenáší se v 12. a 38. rámci GPRS multirámce.

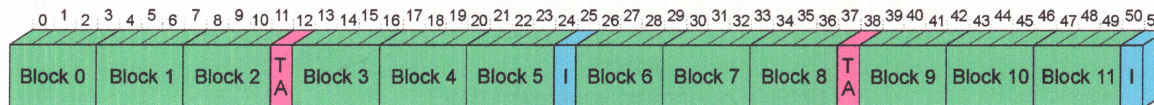
Pro porozumění převodu IP paketu do normálního burstu pro přenos přes fyzické rozhraní je nutné uvažovat OSI vrstevný model, který je na Obr. 1.46.

Síť GPRS poskytuje přenos paketů k uživateli. Na Obr. 1.47 je zobrazen postup převodu IP paketu na fyzické rozhraní sítě GSM.

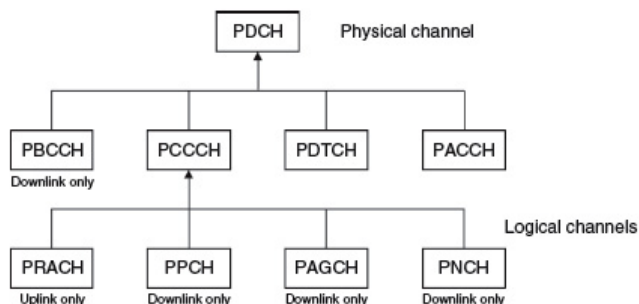
Příchozí IP pakety jsou nejprve ve vrstvě SNDCP komprimovány a k paketům je přidáno krátké záhlaví. Následuje segmentace komprimovaných paketů na části, které mají maximální



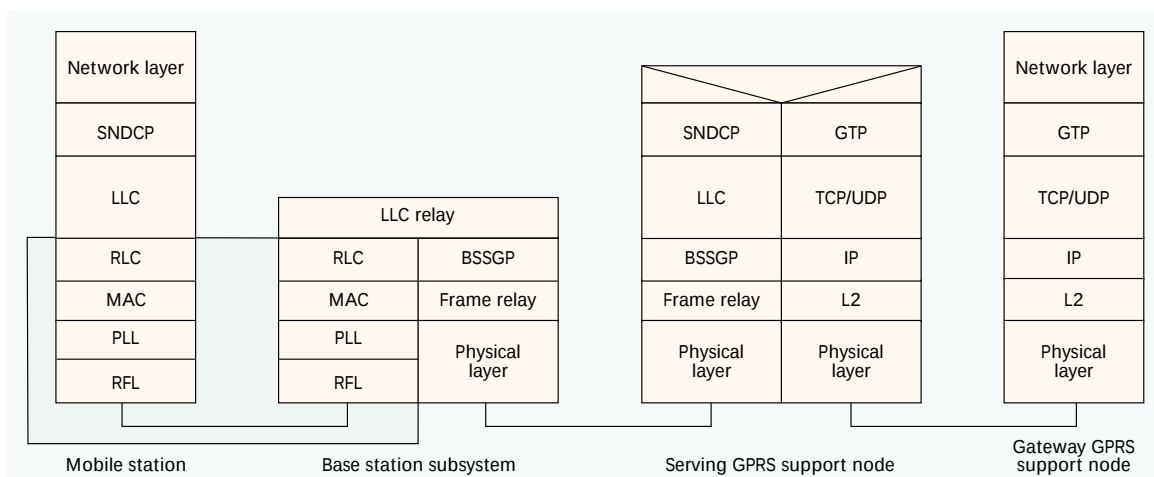
Obrázek 1.43: GPRS ráfec [6]



Obrázek 1.44: Multiráamec GPRS



Obrázek 1.45: Kanály GPRS



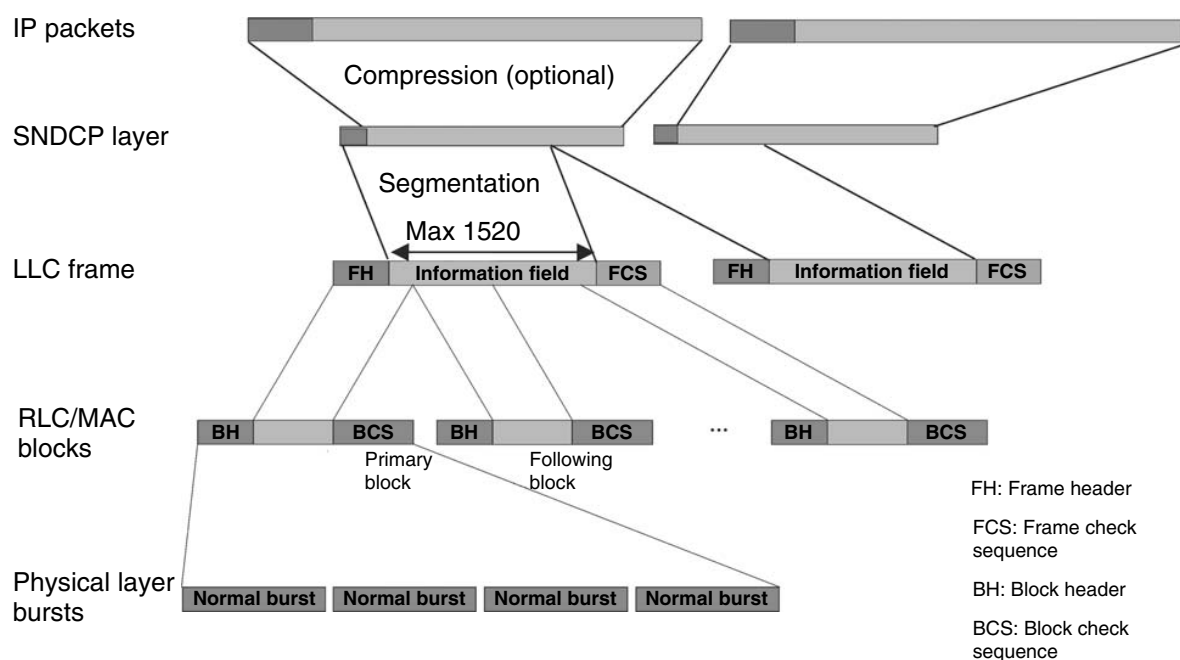
Obrázek 1.46: OSI model GPRS sítě [5]

délku 1520 B. Jestliže byl příchozí IP paket delší, část nad 1520 bytů se spojuje do dalšího LLC rámce, viz Obr. 1.47.

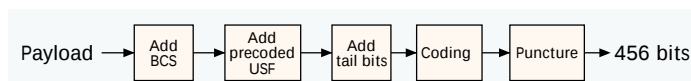
Vrstva LLC přidává k uživatelským datům, které jsou označovány jako Payload, záhlaví, tzv. Frame Header FH a na konec připojuje zabezpečení Frame Check Sequence FCS. Tyto rámce jsou předány do vrstvy Radio Link Control/ Media Access Control RLC/MAC.

Ve vrstvě RLC dochází k rozdělení rámců na rádiové bloky. Každý blok má své vlastní záhlaví Block Header BH a přídatnou sekvenci Block Check Sequence BCS. Rádiový blok, který

obsahuje záhlaví FH z vrstvy LLC, je označen jako primární blok, další bloky se označují jako následující. Rádiové bloky jsou v poslední fázi mapovány do normálního burstu a přenášeny k uživateli, případně od uživatele do sítě.



Obrázek 1.47: Přenos IP paketu pomocí GPRS [23]



Obrázek 1.48: Struktura vytváření přenášených dat pro normální burst v jednotlivých vrstvách [5]

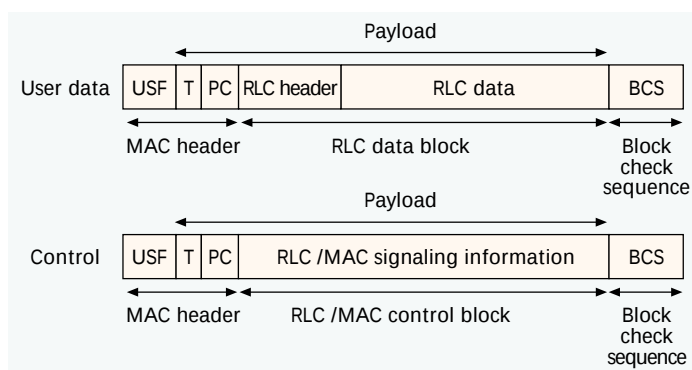
Schopnosti MS

Class A – třída A zahrnuje přístroje, které jsou schopny poskytovat současně GPRS přenos a další služby GSM, zejména hlasové.

Class B – MS je připojena k oběma sítím a automaticky reaguje na Paging Channel v Idle mode režimu, v jednom okamžiku ale umožňuje využití pouze jedné množiny služeb.

Class C – Třída C zahrnuje MS, které mají pouze jeden operační mód. Používaný typ služby se vybírá manuálně před připojením MS do sítě.

GPRS je velmi variabilní v možnostech konfigurace parametrů sítě pro přenos a počtu použitých timeslotů pro uplink a downlink. Z pohledu uživatele je postačující základní rozdělení



Obrázek 1.49: Rádiové bloky pro přenos signalizace a dat [5]

MS podle počtu timeslotů do tříd, tak jak je uvedeno v Tab. 1.9. V současné době jsou patrně nejrozšířenější mobilní stanice třídy 10, které poskytují 4 TS pro downlink a 2 TS pro uplink. Konkrétní přidělení timeslotů pro přenos závisí na konfiguraci daného sektoru/buňky.

Tabulka 1.9: Třídy GPRS

Multislot class	Maximum number of slots		
	Rx	Tx	Sum
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

1.8.5 EDGE

EDGE Enhanced Data Rates for GPRS Evolution je dalším krokem na cestě poskytnout rychlé připojení k internetu v mobilních sítích. Největší změnou oproti GPRS a GSM technologii je změna modulace, která umožňuje dosáhnout ve stejně širokém frekvenčním kanálu vyšší přenosové rychlosti.

Přenosová kapacita rádiového kanálu je dána Shannon-Hartleyovým teorémem jako

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad [\text{bit.s}^{-1}, \text{Hz}, -], \quad (1.2)$$

kde

- C je přenosová rychlost
- B je šířka pásma přenosového kanálu
- S je výkon užitečného signálu
- N je výkon šumu v přenosovém kanálu $N = N_0 B$.

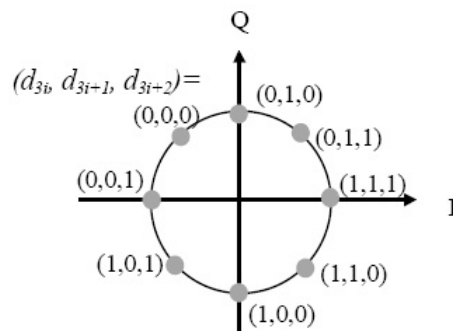
Vzhledem k dostupným možnostem zvýšení přenosové rychlosti v omezeném frekvenčním kanálu je v mobilní síti použita změna počtu stavů modulační techniky. Jako kompromis mezi vlastnostmi modulační techniky s ohledem na SNR, přenosové prostředí, náročnost realizace modulátoru a demodulátoru byla zvolena modulace 8PSK.

Použitou modulační technikou je osmistavové fázové klíčování 8PSK. Její velice nežádoucí vlastností je průchod nulou při přechodu mezi jednotlivými stavy, protože dochází k parazitní amplitudové modulaci. Ta se projeví na nelinearitě výkonového zesilovače vznikem vyšších harmonických složek. Proto je v standardu EDGE použito speciálního tvarovacího filtru pro omezení mezisymbolových interferencí a přidán fázový posuv každého symbolu. Fázový posuv symbolu se projevuje v označení modulační techniky - $\frac{3\pi}{8}$ 8PSK. Konstelační diagram této modulační techniky je na Obr. 1.50.

Symbolový prvek je vyjádřen jako

$$s_i = e^{j2\pi \frac{l}{8}}.$$

Symbole v konstelačním diagramu jsou před mapováním kódovány pomocí Grayova kódu, takže sousední symbole se liší pouze v jednom bitu.

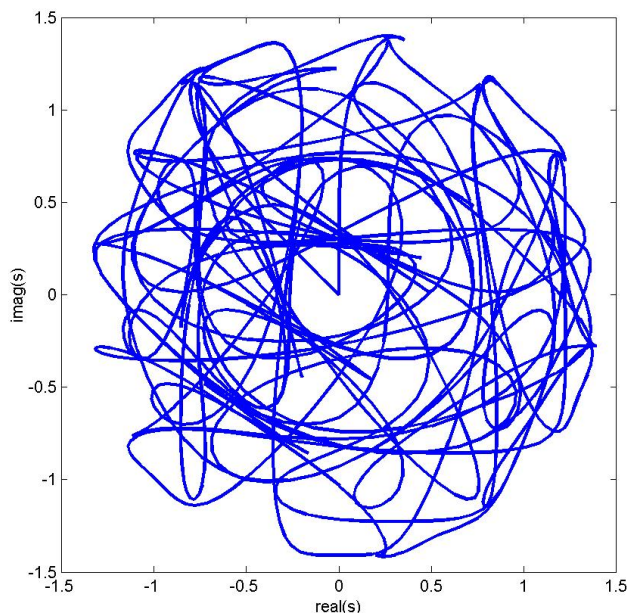


Obrázek 1.50: Konstelační diagram 8 PSK modulace [23]

Kódované symboly jsou následně fázově otočeny o $\frac{3\pi}{8}$. Výsledná fáze symbolu lze vyjádřit jako

$$\hat{s}_i = s_i e^{j\frac{3\pi}{8}}.$$

Fázové otočení se projeví v konstelačním diagramu zvýšením počtu bodů na 16. Vektorový diagram EDGE modulace je zobrazen na Obr. 1.51.



Obrázek 1.51: Vektorový diagram EDGE modulace

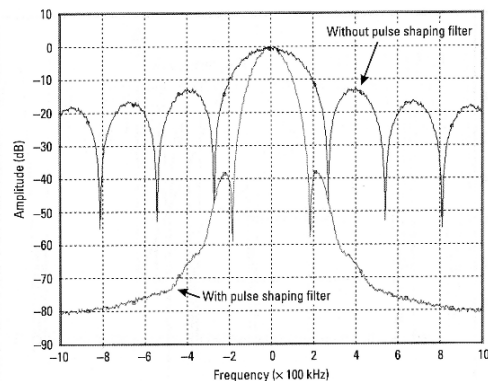
Modulace $3\pi/8$ 8PSK přenáší 3 bity v jednom symbolu, proto dochází ke změně počtu bitů v normálním burstu. Normální burst obsahuje 156,25 symbolů včetně ochranného intervalu, u modulace GMSK je to 156,25 bitů, protože symbol obsahuje právě jeden bit. U EDGE se v jednom symbolu přenáší 3 bity. Normální burst pro EDGE tedy obsahuje 476,75 bitů. Struktura normálního burstu je uvedena v Tab. 1.10 a zobrazena na Obr. 1.53.

Další změnou oproti normálnímu burstu v GSM je použití hodnoty 1 v Tail bitech. Použití samých jedniček totiž přiřazuje symbol, který leží na reálné ose v konstelačním diagramu, viz. Obr. 1.50.

Poslední změnou je kódování čísla TS pomocí tréninkové sekvence. Pro EDGE je tréninková sekvence třikrát delší, sekvence lze nalézt ve specifikaci [1].

1.8.6 Modulační a kódová schémata pro EDGE

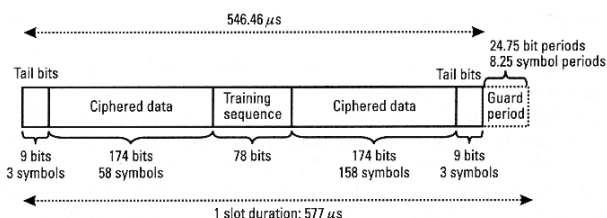
GPRS má definována 4 kódovací schémata pro změny přenosové rychlosti podle kvality přenosového kanálu. Standard EDGE rozšiřuje možnosti změny přenosové rychlosti o jinou modulaci a tím vznikají tzv. Modulation and Coding Schemes, označované MCS.



Obrázek 1.52: Vliv tvarovacího filtru na PSD EDGE signálu [23]

Tabulka 1.10: Struktura normálního burstu v EDGE

Bit Number BN	Length of field (bits)	Contents
0 - 8	9	tail bits
9 - 182	174	encrypted bits (e0 . e173)
183 - 260	78	training sequence bits
261 - 434	174	encrypted bits (e174 . e347)
435 - 443	9	tail bits
444 - 468	24,75	guard period



Obrázek 1.53: Normální burst při použití 8PSK modulace [23]

Standard EDGE definuje celkem 9 MSC, které jsou uvedeny v Tab. 1.11. Podrobný přehled parametrů MCS je uveden v Tab. 1.12.

Standard EDGE nepřináší změny v převodu IP paketů pro přenos na rádiovém rozhraní, ale zavádí několik podstatných vylepšení pro řízení přidělování rádiových zdrojů.

Modulace 8PSK musí být podporována na straně MS pro downlink, v uplinku nemusí být podporována. Subsystem základnových stanic BSS má modulaci 8PSK volitelnou pro uplink i downlink. Pokud tedy není modulace 8PSK podporována ze strany BSS, nedochází ke zvýšení možné přenosové rychlosti, ale síť může využívat výhod vylepšeného Radio Resources

Tabulka 1.11: Přehled MCS ve standardu EDGE

MCS	Modulation	kbit.s ⁻¹	MCS	Modulation	kbit.s ⁻¹
MCS-9	8-PSK	59,2	MCS-4	GMSK	17,6
MCS-8	8-PSK	54,4	MCS-3	GMSK	14,8
MCS-7	8-PSK	44,8	MCS-2	GMSK	11,2
MCS-6	8-PSK	29,6	MCS-1	GMSK	8,8
MCS-5	8-PSK	22,4			

MCS	USF	Precoded USF	Header	HCS	Header Code Rate	Data	BCS	Data Code Rate	Data Rate in Kbps
MCS-1 DL	3	12	28	8	≈1/2	178	12	≈1/2	8.9
MCS-1 UL			31	8	≈1/2	178	12	≈1/2	8.9
MCS-2 DL	3	12	28	8	≈1/2	226	12	0.64	11.3
MCS-2 UL			31	8	≈1/2	226	12	0.64	11.3
MCS-3 DL	3	12	28	8	≈1/2	298	12	0.83	14.9
MCS-3 UL			31	8	≈1/2	298	12	0.83	14.9
MCS-4 DL	3	12	28	8	≈1/2	354	12	≈1	17.7
MCS-4 UL			31	8	≈1/2	354	12	≈1	17.7
MCS-5 DL	3	36	25	8	≈1/3	450	12	≈1/3	22.5
MCS-5 UL			37	8	≈1/3	450	12	≈1/3	22.5
MCS-6 DL	3	36	25	8	≈1/3	594	12	≈1/2	29.7
MCS-6 UL			37	8	≈1/3	594	12	≈1/2	29.7
MCS-7 DL	3	36	37	8	≈1/3	2*450	12	≈3/4	45
MCS-7 UL			46	8	≈1/3	2*450	12	≈3/4	45
MCS-8 DL	3	36	37	8	≈1/3	2*546	12	0.90	54.6
MCS-8 UL			46	8	≈1/3	2*546	12	0.90	54.6
MCS-9 DL	3	36	37	8	≈1/3	2*594	12	≈1	59.4
MCS-9 UL			46	8	≈1/3	2*594	12	≈1	59.4

Tabulka 1.12: Parametry kódování pro různá MCS [23]

Management RRM.

Nejdůležitější body vylepšeného řízení RRM jsou:

- řízení kvality spojení,
- nové schéma ARQ (Incremental Redundancy) (Hybrid ARQ type II),
- Link Adaptation Measurements,
- měření BEP - chybovost vyhodnocena burst po burstu, lepší vyhodnocení kvality přenosu (zohlednění variability kanálu) než pomocí RXQual.

Řízení kvality spojení spočívá v zavedení tzv. Coding Families. Při přenosu dat pomocí GPRS nelze změnit CS během přenosu. Pokud tedy při zhoršení kvality přenosového kanálu (rychlý únik) dojde ke ztrátě GPRS paketu, bude tento paket vyslán znovu se stejným CS. To může mít za následek několikanásobné opakování přenosu, pokud zhoršení podmínek na rádiovém rozhraní má trvá delší dobu.

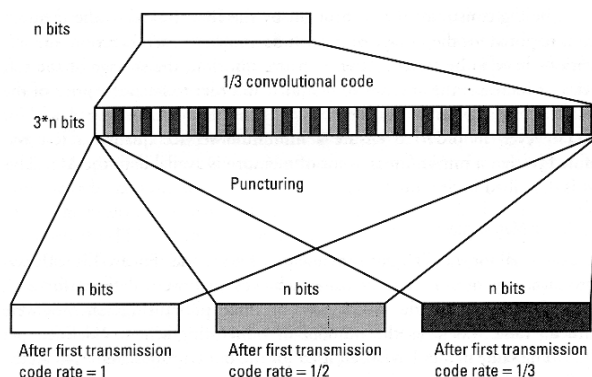
Každá "family" se skládá z několika MCS, které obsahují vždy stejnou velikost přenášených dat, tzv. payload. Tento blok je přenášen v základní MCS a ve vyšších MSC z dané Family se používají násobky délky bloku, jak je vidět z Tab. 1.13.

Tabulka 1.13: Coding Families systému EDGE

Family	Modulation and Coding Scheme	Payload (byte)
A	MCS9, MCS6, MCS3	$3 \times 37, 2 \times 37, 1 \times 37$
A'	MCS8, MCS6, MCS3	$3 \times 34, 2 \times (34 + 3), 1 \times (34 + 3)$
B	MCS7, MCS5, MCS2	$3 \times 28, 2 \times 28, 1 \times 28$
C	MCS4, MCS1	$2 \times 22, 1 \times 22$

Pokud během přenosu dojde ke ztrátě přenášených dat způsobené rušením, sníží se MCS v dané family. Tím je zajištěno lepší využití přenosové kapacity, protože nedochází ke zbytečnému opakování přenosu s nevhodným kódovým zabezpečením.

Dalším inovací v EDGE je zavedení nového schématu ARQ (Auto Repeat Request), označovaného jako Hybrid ARQ type II (Incremental Redundancy). Oproti běžnému ARQ, které přenáší data se stejným zabezpečením, dochází v případě Hybrid ARQ k opakovanému přenosu dat s jiným (lepším) zabezpečením (Obr. 1.54). Na straně příjmu jsou potom původní data a znovu přenesená data kombinována a v případě správného přenosu jsou předána do vyšších vrstev.



Obrázek 1.54: Princip Incremental Redundancy, [23]

2 UMTS

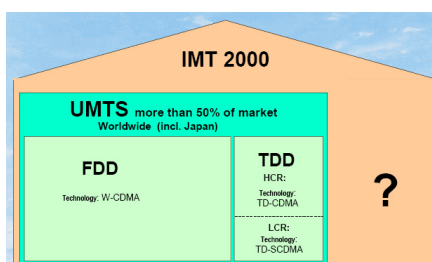
2.1 Vývoj standardů mobilních systémů 3G

2.1.1 IMT2000

Mobilní systémy byly vyvíjeny v 80. a 90. letech samostatně v Evropě, ve Spojených státech a v Asii. V Evropě se rozšířil systém GSM, ve Spojených státech byly prvotní mobilní sítě založeny na technologii CDMA (Code Division Multiple Access), kterou vyvinula společnost Qualcomm a která je chráněna patenty.

Vzhledem k výše uvedenému roztržštění mobilních standardů vznikla asociace International Mobile Telephone year 2000 - IMT 2000, která si dala za cíl navrhnout mobilní standard shodný pro celý svět se širokou paletou nabízených služeb. Tento pokus se nezdařil a definice IMT se stala pouhou kostrou pro nové standardy, které i nadále vznikají samostatně, ale mají stejné principy páteřní sítě (Core Network), přičemž se liší zejména na bezdrátovém rozhraní.

IMT 2000 zastřešuje několik standardů mobilních sítí, které jsou rozdílné v přístupových metodách, šířce přenosového kanálu, duplexní metodě atd. Na Obr. 2.1 je zobrazena stávající situace na trhu, kdy dominantní segment obsahuje standard UMTS.



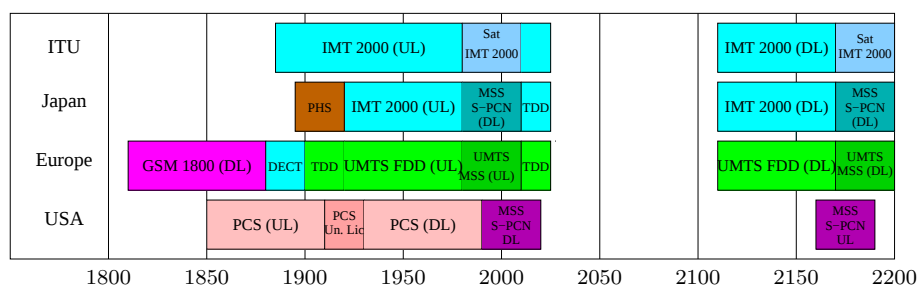
Obrázek 2.1: Standardy pod iniciativou IMT2000

2.1.2 Vlastnosti IMT 2000

Z pohledu uživatele patří mezi nejdůležitější parametry mobilní sítě poskytovaná přenosová rychlost. IMT 2000 definuje tři různé přenosové rychlosti pro různou mobilitu účastníka:

- stacionární účastník 2048 kbit.s^{-1} , včetně pohybu chodců,
- běžná doprava do 120 km.h^{-1} , přenosová rychlost 384 kbit.s^{-1} ,
- pohyb nad 120 km.h^{-1} , přenosová rychlost 144 kbit.s^{-1} .

Pro různé služby sítě existuje 5 typů rádiového rozhraní pro pozemní službu. Důležitou inovací představuje zavedení podpory satelitních služeb. Tato podpora umožňuje zajistit pokrytí a dostupnost služby ve velmi odlehlých oblastech (polární oblasti, pouště, atd.). MSS (Mobile Satellite System) obsahuje 6 typů rádiových spojení.



Obrázek 2.2: Rozdělení spektra definované v rámci IMT 2000

Obr. 2.2 zobrazuje rozdělení spektra v pásmu 1800-2200 GHz pro jednotlivé varianty definované IMT 2000 v jednotlivých kontinentech a původní návrh ITU. Primární pásmo pro IMT 2000 je dle ITU v rozsahu 1880 - 1970 MHz pro uplink a v rozsahu 2100 - 2200 MHz pro downlink. Dále je definováno pásmo pro satelitní spojení. Na něj pak navazuje pásmo pro časový duplex.

Velká variabilita služeb a přístupových technologií klade větší požadavky na MS, které musí být řešeny jako multimódové a musí poskytovat možnost handoveru mezi systémy.

Výše uvedené požadavky lze shrnout v následujících bodech:

- účastník nepozná, který systém je používán (plynulý přechod - Intersystem HO),
- Software Defined Radio pro MS, zajišťuje schopnost využití jiné přístupové technologie, jiného kódování signálu, atd.,
- konvergence služeb,
- vyšší efektivita v rádiovém rozhraní - přidělování spektra "on demand", Power Control atd.,
- nižší latence na rádiovém rozhraní.

2.1.3 3GPP 3G Partnership Project

Standard UMTS vyvíjí skupina 3GPP, která zahrnuje velké množství organizací a výrobců. Základ tvoří standartizační orgány ETSI - European Telecommunication Standardisation Institute a další regulační a standartizační orgány z Číny, Japonska, USA a Korey. Velkou skupinu tvoří také společnosti a organizace zodpovědné za vývoj a prodej služeb.

3GPP má za cíl vývoj technické specifikace, dokumentace atd. pro telekomunikační systém, který vychází z principů síťového subsystému GSM a z technologií rádiového přístupu UTRA-FDD (Universal Terrestrial Radio Access - Frequency Division Duplex) a UTRA-TDD (Time Division Duplex). 3GPP zároveň zajišťuje specifikace inovací systému GSM (zejména GPRS, EDGE a připravovaná verze EDGE II).

Vývoj standardu byl rozdělen do čtyř skupin označovaných TSG (Technical Specifications Group), ve kterých se řeší vývoj jednotlivých částí systému:

TSG-GERAN – GSM EDGE Radio Access Network - zajišťuje vývoj rádiového rozhraní GSM sítě, připravuje se EDGE II.

TSG-RAN – Radio Access Network - rozvoj, inovace a optimalizace rádiové přístupové sítě UMTS.

TSG-SA – Systems&Services Aspects - definice nových služeb, jejich implementace.

TSG-CT – Core Networks & Terminals - vývoj infrastruktury páteřní sítě a mobilních terminálů.

2.1.4 3GPP2

Pro vývoj druhého standardu sítě 3G, označované jako CDMA2000, která je velmi rozšířena ve Spojených státech, byla založena organizace 3GPP2 - 3G Partnership Project 2.

Mezi zakládající členy patří standartizační komise a skupiny zajišťující služby. Z technického hlediska je podstatné dělení 3GPP2 na skupiny zodpovědné za vývoj standardu (stejně jako u 3GPP označované Technical Specifications Group):

- TSG-A (Access Network Interfaces),
- TSG-C (cdma2000®),
- TSG-S (Services and Systems Aspects),
- TSG-X (Core Networks).

2.2 UMTS - používané technologie bezdrátového přenosu

2.2.1 Rádiové rozhraní UTRA

Systém UMTS používá na rádiovém rozhraní mnohonásobný přístup s kódovým dělením - CDMA. Na rozdíl od systému GSM, kde má každý uživatel vyhrazený jeden timeslot na jednom rádiovém kanálu, u systémů CDMA má velké množství uživatelů vyhrazeno ve stejném okamžiku stejné frekvenční pásmo. Jednotliví uživatelé jsou odděleni vlastním kódem.

Pro rádiovou přístupovou síť se používá několik různých označení. Nejčastějším označením je UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network), dalším označením je UTRA (Universal Terrestrial Radio Access). Posledním užívaným značením je DS-WCDMA (Direct Sequence Wideband CDMA), širokopásmové CDMA s přímým rozprostíráním. Rozdíly mezi jednotlivými označeními budou popsány později.

2.2.2 Frekvenční pásma a parametry přenosového kanálu

Rozdělení frekvenčního pásma pro jednotlivé verze sítí UMTS je zobrazeno v Tab. 2.1. Frekvenční pásmo je rozděleno na párovou část a nepárové části. Párová část je určena pro variantu UMTS-FDD (frekvenční duplex, samostatné frekvenční kanály pro downlink a uplink), nepárová část je určena pro UMTS-TDD (časový duplex, přenos ve vyhrazených timeslotech v jednom frekvenčním kanálu).

Tabulka 2.1: Rádiová pásma UMTS

Pásmo	Kmitočtové pásmo	Šířka pásma	Schváleno
-	1710–1885	175	2000
1	1885–1900	15	1998
2	1900–1920	10	1998
3	1920–1980	60	1998
4	1980–2010	30	1998
5	2010–2025	15	1998
6	2110–2170	60	1998
7	2170–2200	30	1998
-	2500–2690	190	2000

Pásmo bez označení využívá systém GSM-DCS, označovaný jako GSM 1800. Pásmo 1 je obsazeno systémem pro bezšňůrové telefony DECT, pásmo 2 je využíváno pro UMTS-TDD (nepárové pásmo). Párová pásma 3 a 6 slouží pro UMTS-FDD (3. pásmo pro uplink, 6. pásmo pro downlink).

Systém UMTS má pro obě varianty, časový i frekvenční duplex, šířku kanálu 5 MHz. Pro systémy využívající CDMA je jedním z nejdůležitějších parametrů tzv. Chiprate - přenosová rychlost rozprostírací posloupnosti. UMTS má chiprate $3,84 \text{ Mchip.s}^{-1}$. Původní návrh IMT 2000 navrhoval chiprate $4,096 \text{ Mchip.s}^{-1}$, který by umožnil maximální přenosovou rychlost uživatelských dat 2 Mbit.s^{-1} .

Standard obsahuje definici přenosových kanálů s větší šířkou přenosových kanálů, konkrétně $B=10 \text{ MHz}$ s chipovou rychlostí $8,192 \text{ Mchip.s}^{-1}$ a přenosový kanál se šířkou 20 MHz a chipovou rychlostí $16,384 \text{ Mchip.s}^{-1}$. Tyto přenosové kanály však nejsou z technologických důvodů v tuto chvíli implementovány do používaných sítí.

2.2.3 CDMA

Technika CDMA byla vyvinuta v USA jako vojenská technologie pro přenos informace bezdrátovým prostředím bez možnosti přímého odposlechu. Narozdíl od FDMA a TDMA zde nejsou vytvořeny oddělené kanály, ale mnoho účastníků sdílí přenosový kanál ve stejném čase a na stejné frekvenci. Jednotliví účastníci jsou odděleni kódem (rozprostírací posloupností).

Výhodami této technologie je zejména malá náročnost na vysílaný výkon, protože se informace přenáší v širokém spektru. Způsob oddělení účastníků pomocí kódu zajišťuje odolnost vůči odposlechu, protože bez znalosti správné posloupnosti nelze dekodovat užitečnou informaci.

Rozprostření signálu do širokého kanálu poskytuje výbornou odolnost proti rychlému frekvenčně selektivnímu úniku. Pro mobilní komunikace je typické vícecestné šíření signálu mezi základnou a mobilní stanicí. V prostředí s takovým typem šíření lze s výhodou využít systém s CDMA technologií, protože přijímač CDMA signálu umí zpracovávat signály z více přenosových cest.

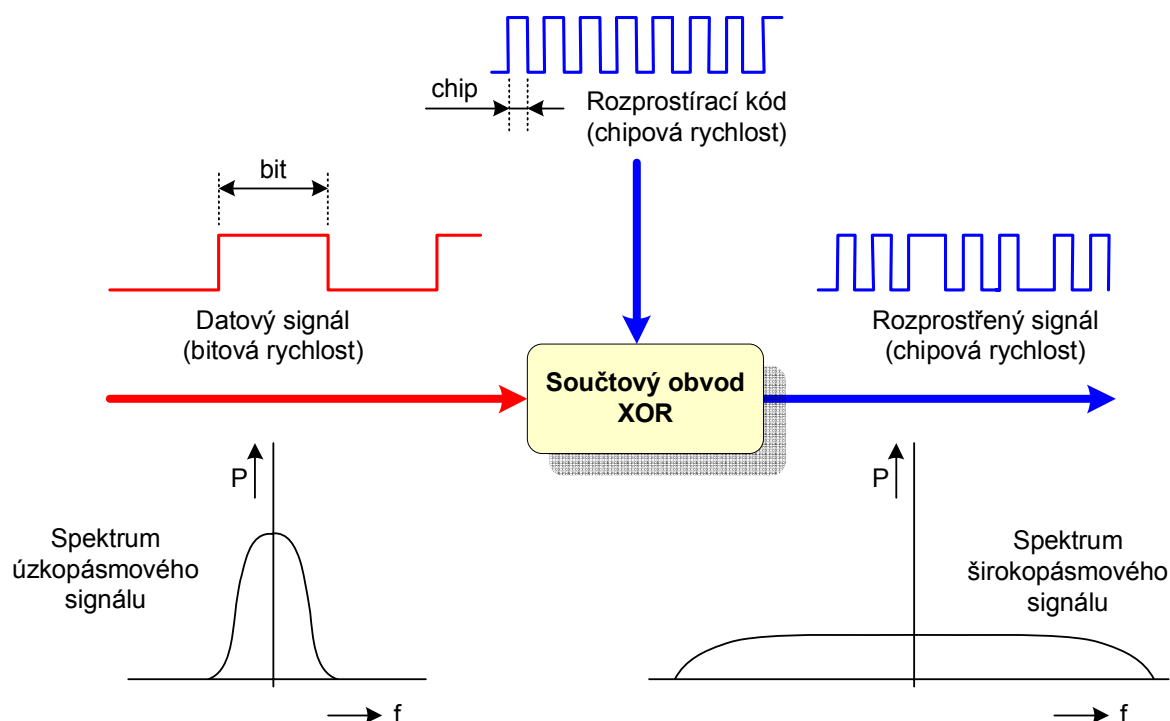
Nevýhodou CDMA systémů je technologická náročnost mobilní stanice, která vyplývá z nutnosti zajištění přesné časové synchronizace, požadavku na generování rozprostíracích posloupností a musí obsahovat přijímač pro vícecestné šíření (RAKE receiver) atd.

Signál CDMA lze charakterizovat pomocí základních parametrů a relací mezi nimi. Těmito parametry jsou

- bitrate - uživatelská data s periodou jednoho bitu T_b ,
- chiprate - rozprostírací posloupnost s periodou jednoho chipu T_c ,
- spreading factor SF (faktor rozprostření)

$$SF = \frac{T_b}{T_c} = \frac{f_b}{f_c}.$$

Souvislost mezi chipovou a bitovou rychlostí je vidět z Obr. 2.3. Datový signál s nízkou přenosovou rychlostí má úzké spektrum. Rozprostírací signál má oproti tomu spektrum několika násobně širší. Výsledný rozprostřený signál má tedy spektrum stejně široké jako rozprostírací posloupnost. Zjednodušeně lze říci, že výkon přenášeného signálu se rozprostře ve stejném poměru jako spektrum. Tento poměr je roven faktoru rozprostření. Přenášený signál se proto jeví pro ostatní uživatele a systémy jako širokopásmový aditivní šum.



Obrázek 2.3: Rozprostírání spektra

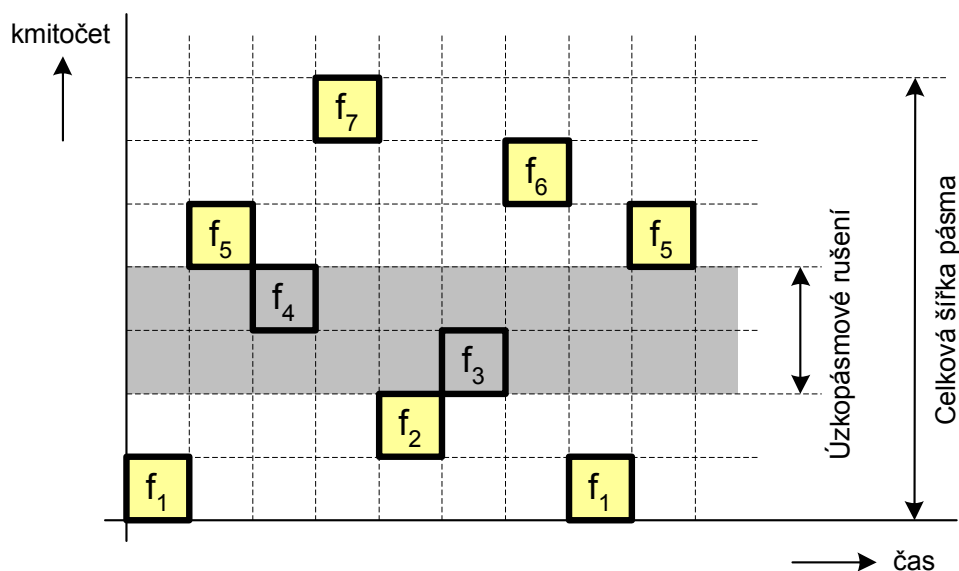
Pro přenos pomocí CDMA jsou velmi důležité vlastnosti použitých rozprostíracích posloupností. Ty lze shrnout do několika bodů:

- rozprostírací posloupnosti by měly být ortogonální. Ortogonalita posloupností zajistí jejich vzájemné jednoznačné rozlišení, takže nedochází k rušení uživatelských dat od jiných účastníků.
- Bez znalosti rozprostírací sekvence nelze odposlouchávat.
- Autokorelace má impulsní průběh. Pomocí impulsní autokorelační funkce lze provádět časovou synchronizaci.

Pro rozprostírání uživatelského signálu existuje několik způsobů, které budou popsány v následujících odstavcích.

2.2.4 Frequency Hopping Spread Spectrum

Rozprostírání spektra pomocí frekvenčního skákání pracuje na principu změny frekvence nosné vlny, na kterou je namodulován uživatelský signál, po krátkých časových intervalech. Jedná se řádově o jednotky tisíc přeskoků za sekundu. Princip FHSS ukazuje Obr. 2.4.



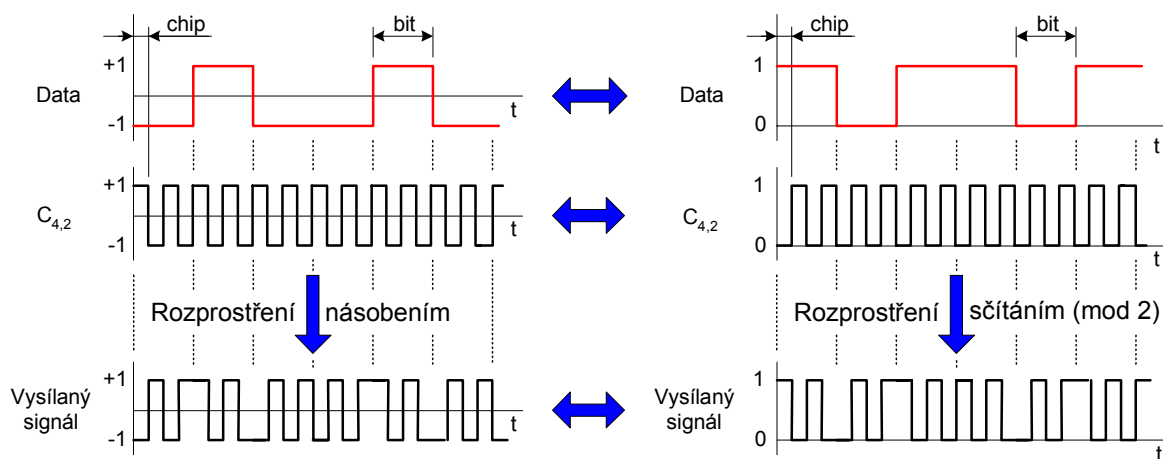
Obrázek 2.4: Princip metody Frequency Hopping Spread Spectrum

Pokud dochází při přenosu k frekvenčně selektivnímu rušení, nastává výpadek pouze v krátkých časových intervalech. Tyto výpadky signálu lze kompenzovat použitým kódovým zabezpečením proti chybám. Pro správnou činnost systému je rozhodující zajištění synchronizace skokové posloupnosti mezi vysílačem a přijímačem. FHSS využívá např. systém Bluetooth.

2.2.5 Direct Sequence Spread Spectrum DSSS

Nejčastěji používanou technikou CDMA je rozprostírání signálu přímou sekvencí. DSSS lze realizovat dvěma způsoby, a to pomocí operace násobení (Obr. 2.5 vlevo) pro signály vyjádřené

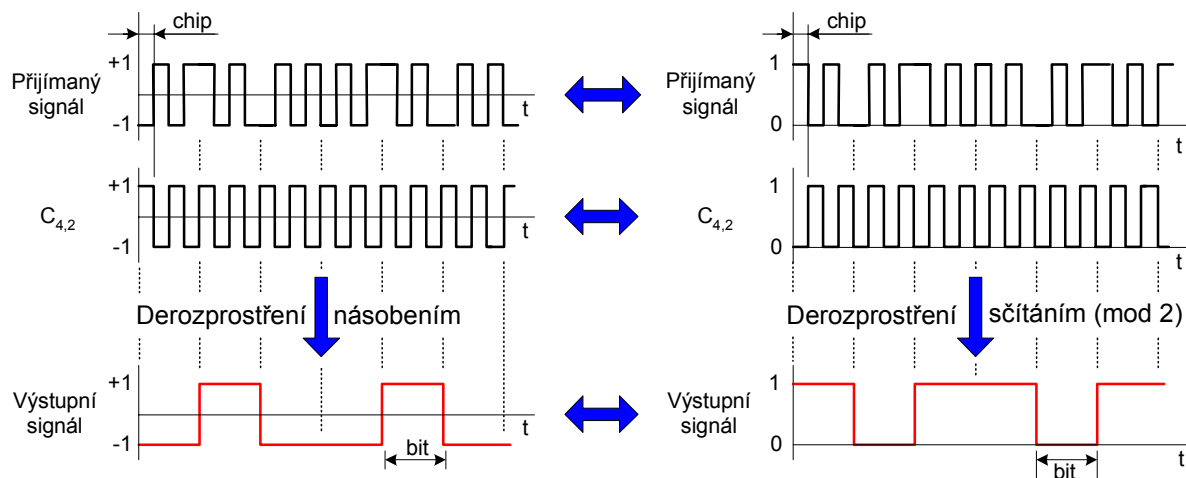
hodnotami ± 1 (např. modulace BPSK nebo vhodný linkový kód) nebo operací Exclusive OR (Obr. 2.5 vpravo), která je využívána pro logické vyjádření signálů.



Obrázek 2.5: Princip přímého rozprostírání

Poměr mezi bitovou a chipovou periodou SF určuje maximální dosažitelnou přenosovou rychlost uživatelských dat. Systémy s CDMA mají totiž chipovou rychlost konstantní a proto rozprostírací faktor určuje přenosovou rychlost dat.

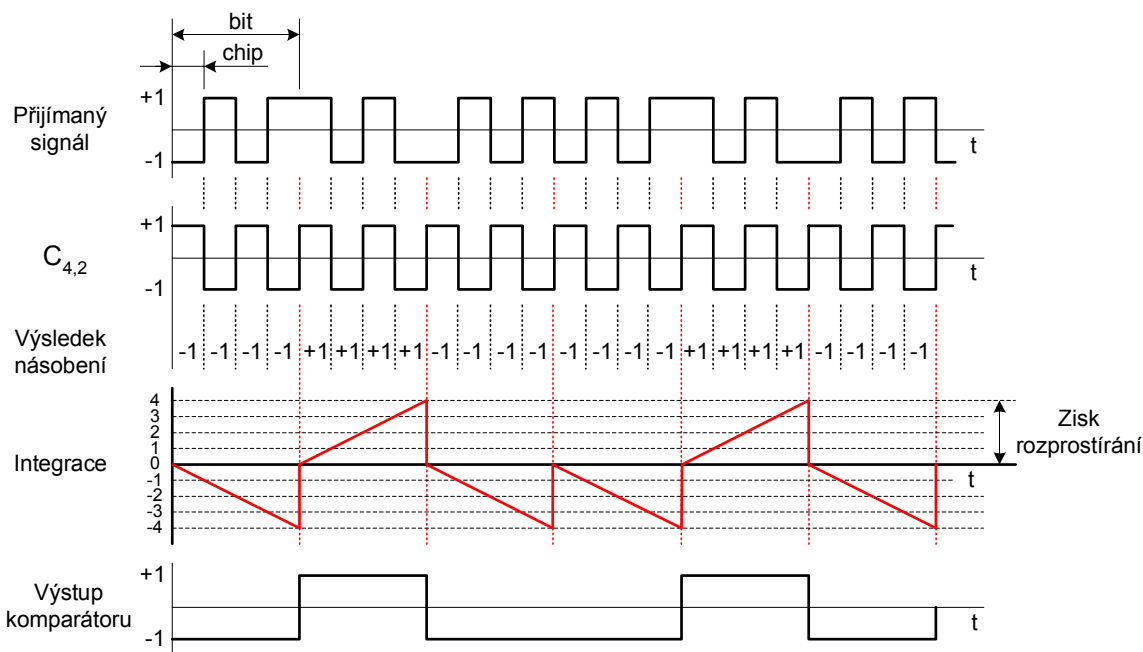
V přijímači se provádí inverzní operace - tzv. derozprostírání (Despreading). Násobením, případně součtem XOR mezi přijatým signálem a rozprostírací posloupností dostaneme uživatelský signál, jak je vidět z Obr. 2.6.



Obrázek 2.6: Derozprostírání přijatého signálu

V předchozích odstavcích bylo zmíněno, že v systému CDMA není možné správně dekodovat signál bez znalosti použité rozprostírací posloupnosti. Obr. 2.7 ukazuje dekodování na

straně přijímače při použití správného kódu. Označení rozprostírací posloupnosti $C_{4,2}$ vyjadřuje, že daná posloupnost je Walshova funkce 4. řádu s indexem 2, podrobněji viz dále. Po provedení násobení mezi přijatým signálem a kódem se provádí integrace. V případě použití správného kódu je na výstupu integrátoru po jedné periodě datového signálu úroveň, která odpovídá hodnotě rozprostíracího faktoru. Pokud vhodně nastavíme rozhodovací úroveň komparátoru, např. na hodnoty ± 3 , dostáváme na jeho výstupu posloupnost přijatých bitů.

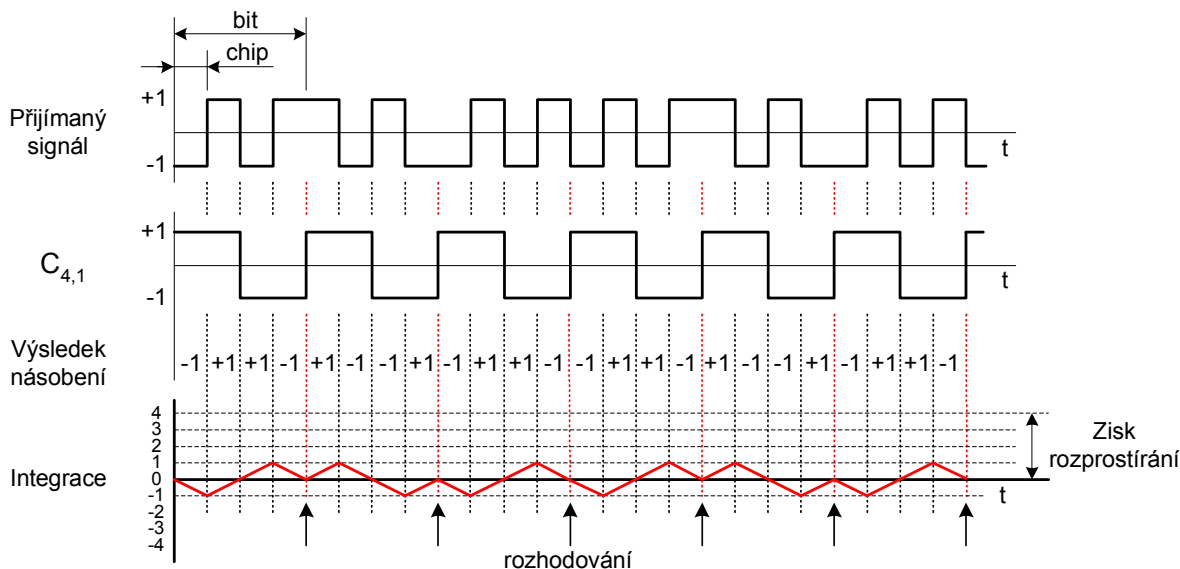


Obrázek 2.7: Příjem signálu se správným kódem

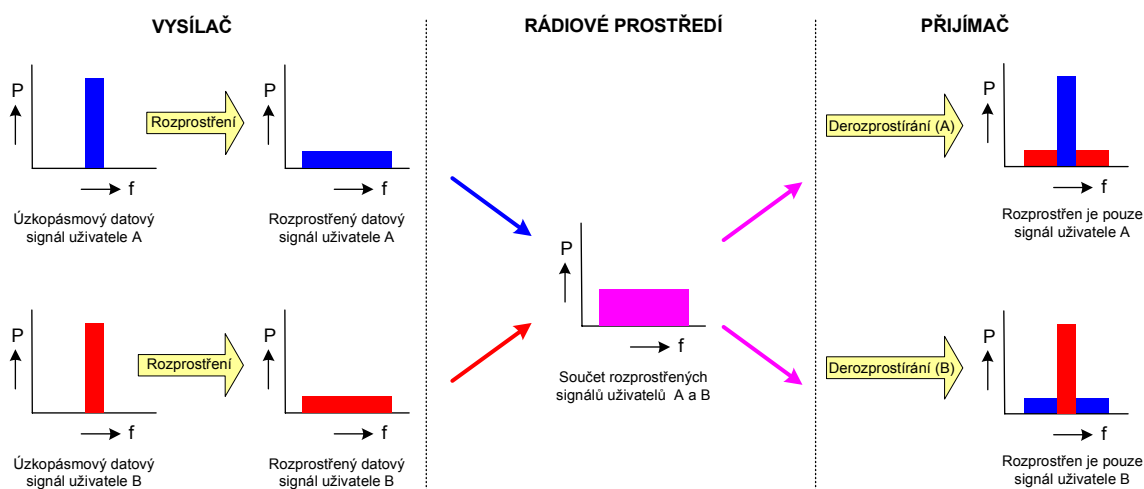
Obr. 2.8 zobrazuje případ použití nesprávného kódu v přijímači pro derozprostření přijatého signálu. Po integraci výsledku násobení přijatého signálu a kódové sekvence, v tomto případě Walshova funkce 4. řádu s indexem 1, přes jednu periodu užitečného signálu dostáváme na vstupu komparátoru signál, který lze chápat jako šum. Protože nepřesahuje komparační úroveň, nelze rozhodnout o hodnotě přijatého bitu.

2.2.6 Přenos signálů více uživatelů v systému s CDMA

V předchozí části bylo uvedeno, že rozprostřený signál představuje pro ostatní uživatele bez znalosti rozprostíracího kódu širokopásmový šum. Obr. 2.9 zobrazuje přenos signálu dvou uživatelů v jednom přenosovém kanálu. Rozprostřené signály navzájem představují aditivní šum a sčítají se v přenosovém prostředí. V přijímači každého uživatele dochází k derozprostírání aditivně smíchaných signálů. Oba uživatelé používají správný kód a proto dojde ke správnému dekódování odpovídajících dat, viz Obr. 2.7. CDMA systémy mají kapacitu (množství uživatelů v dané buňce) omezenou úrovní interferencí. Jestliže je v dané lokalitě malé množství uživatelů,



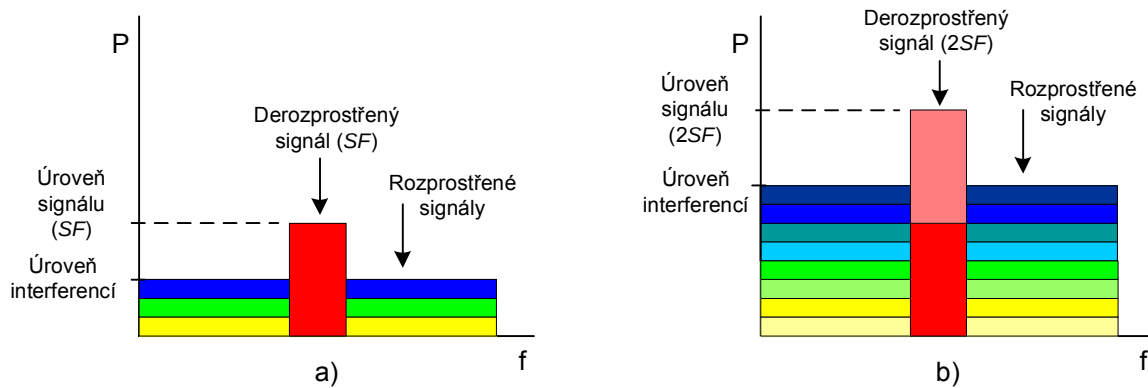
Obrázek 2.8: Příjem signálu s nesprávným kódem



Obrázek 2.9: Výhody CDMA při přenosu

jak ukazuje Obr. 2.10a, převyšuje po derozprostírání úroveň užitečného signálu šumové pozadí, tj. úroveň signálů od ostatních uživatelů.

Jestliže dojde ke zvýšení počtu uživatelů tak, že úroveň užitečného signálu po derozprostření nepřesahuje úroveň rušení (červeně zobrazené spektrum na Obr. 2.10b), není možné komunikovat. Tuto situaci lze jednoduše odstranit použitím vyšší hodnoty rozprostíracího faktoru. Tím dojde ke snížení uživatelské přenosové rychlosti, ale lze odlišit datový signál od ostatních.



Obrázek 2.10: Kapacita systému s CDMA

2.3 Rozprostírací posloupnosti

Koncepce systému UMTS umožňuje současné vytvoření více přenosových kanálů k jednomu uživateli. Současný přenos po více kanálech poskytuje použití dvou různých typů rozprostíracích posloupností. Prvním typem jsou posloupnosti pro rozlišení kanálů jednoho uživatele, druhým typem pak posloupnosti pro rozlišení jednotlivých účastníků v systému.

Rozlišování přenosových kanálů jednoho účastníka se provádí pomocí tzv. Channelization Codes, český ekvivalent "kódy pro rozlišení kanálů" je poněkud zdoluhavý. Channelization Codes se realizují pomocí systémů ortogonálních funkcí. V systému UMTS se používají Walshovy kódy s proměnlivým rozprostíracím faktorem, viz dále.

Druhým typem rozprostíracích kódů jsou tzv. Scrambling Codes (skramblovací kódy). Scrambling Codes nejsou ortogonální, ale jejich vlastnosti jsou výhodné pro rozlišování účastníků. Používají se pseudonáhodné sekvence, které se generují pomocí posuvných registrů a zapojení sčítaček XOR mezi jednotlivými registry.

2.3.1 Channelization Codes

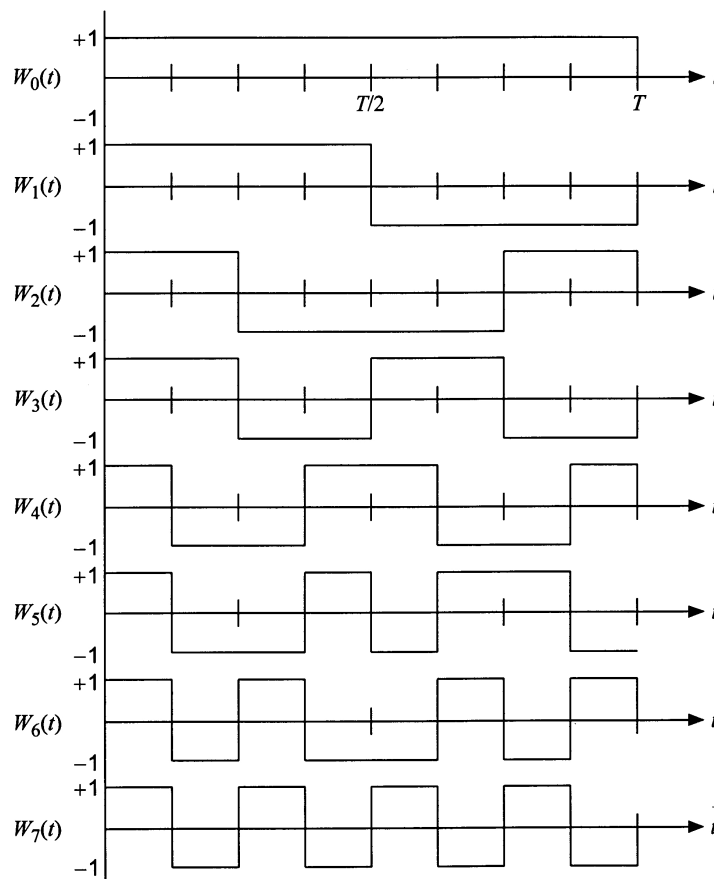
Kódy pro rozlišení přenosových kanálů vyhrazených pro jednoho uživatele musí být ortogonální, aby nedošlo k záměně dat přenesených v těchto kanálech. Pro systém UMTS byly zvoleny Walshovy kódy.

Walshovy funkce tvoří ortogonální systém.

$$W_j(t) t \in (0, T), j = 0, 1 \dots N \quad (2.1)$$

Vlastnosti:

- $W_j(t) = \pm 1$
- $W_j(0) = 1, \quad j = 0, 1 \dots N$
- $W_j(t)$ j označuje počet znaménkových změn



Obrázek 2.11: Walshovy funkce

- $W_j(t)$ j je sudé, pak jsou funkce sudé dle středu
- $W_j(t)$ j je liché, pak jsou funkce liché dle středu
- $\int_0^T W_j(t)W_k(t)dt = T\delta_{jk}$
 $j, k = 0, 1 \dots N$
- tvoří množinu pod operací násobení (multiplicative group)

Walshovy sekvence

- funkci $W_j(t) = \pm 1$ zobrazením $+1 \Leftrightarrow 0$ a $-1 \Leftrightarrow 1$ převedeme na Walshovu sekvenci
- $W_3(t) = (1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, -1) \Leftrightarrow W_3 = [0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1]$
- tvoří množinu pod logickou operací XOR (modulo 2) (additive group)

Generování Walshových sekvencí

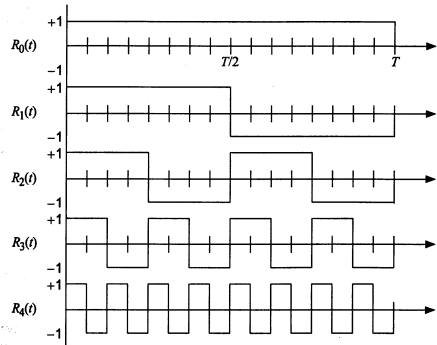
- využití symetrických vlastností WF,

- použití Rademacherových funkcí,
- využití Hadamardových matic.

Symetrie

- vyjádříme index sekvenční pomocí binárního čísla $j = (j_1, j_2, \dots, j_N)$, j_1 je na pozici nejvýznamnějšího bitu.
- potom pro určení symetrie platí, že pokud je $j_n = 1$, pak je symetrie lichá v čase $T/2^{N-n+1}, (T/16, T/8, \dots)$

Rademacherovy funkce



Obrázek 2.12: Rademacherovy funkce

$$R_n(t) t \in (0, T), n = 0, 1 \dots \log_2(N) \quad (2.2)$$

$$R_n(t) = \text{sign}(\sin(2^n \pi t)) \quad (2.3)$$

$$t \in (0, T), n = 0, 1 \dots \log_2(N) = K \quad (2.4)$$

Vlastnosti:

- $R_n(t) = \pm 1$
- $R_0(t) = 1$

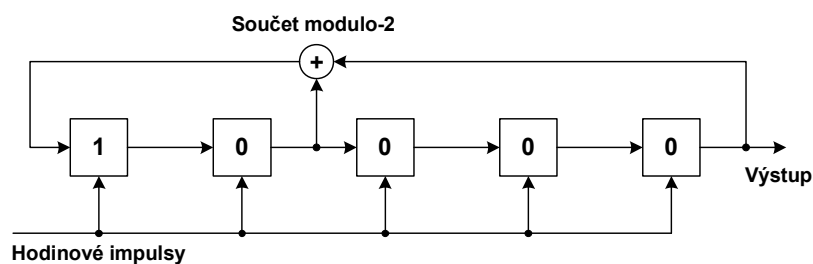
Vytváření Walshových sekvencí

- převod indexové sekvenční WS na Grayův kód $g_{i1} = x_{i1}, g_{ij} = x_{i,j-1} \oplus x_{ij}$ Potom

$$W_i = R_0 \oplus \sum_{j: g_{ij}=1} R_{K+1-j} \quad (2.5)$$

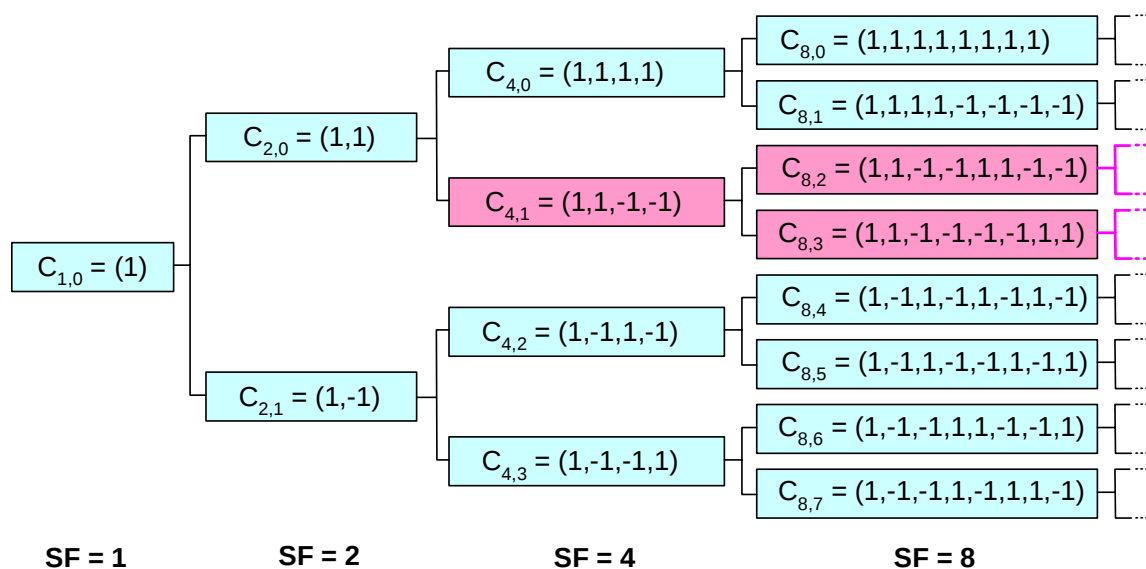
Pseudonáhodné rozprostírací sekvenční

- slouží k rozprostření spektra a rozlišení účastníků,
- musí být synchronní ve vysílači a přijímači,
- proto musí být reprodukovatelné,
- využití LFSR Linear Feedback Shift Register, schéma na Obr. 2.13.



Obrázek 2.13: Generátor pseudonáhodných posloupností

Orthogonal Variable Spreading Factor Codes



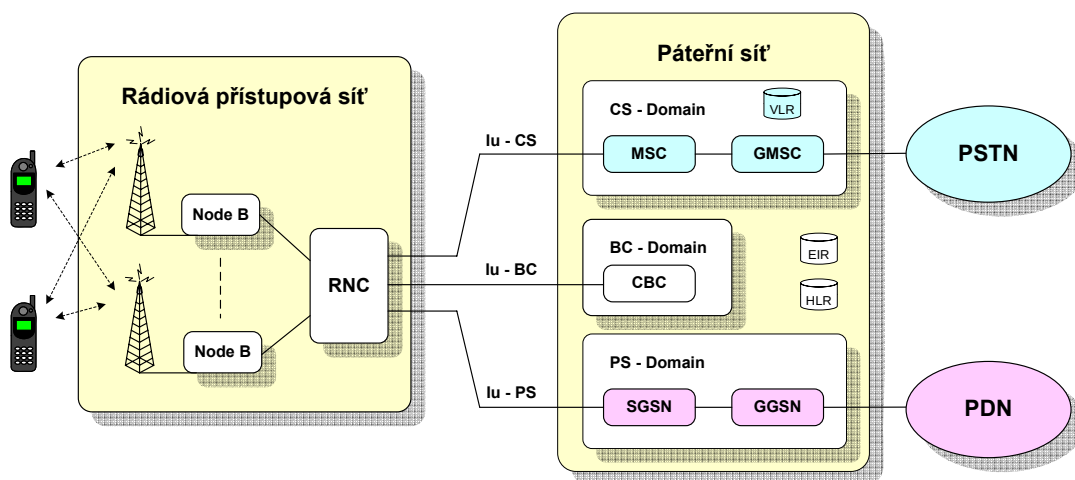
Obrázek 2.14: Rozprostírací kódy s proměnlivým rozprostíracím faktorem

- opakování kódů,
- minimální SF=4,
- nelze používat kódy z daného substromu,
- proměnná délka kódu při stejné rychlosti - omezení přenosové rychlosti.

2.4 Architektura systému UMTS

Mobilní systém třetí generace UMTS lze rozdělit na dvě části - rádiovou přístupovou síť UTRAN a páteřní síť, označovanou jako CORE Network. UMTS poskytuje 3 možné typy přenosu uživatelské informace. První typ představuje režim spojování okruhů, označovaný jako Circuit Switched, který je typický pro hlasové služby. Druhým režimem je paketový přenos (Packet Switched), tzv. přepínání paketů. Posledním režimem přenosu je Broadcasting, to je přenos shodných dat většímu množství uživatelů pouze jedním směrem.

Pro každý typ přenosu je definováno rozhraní mezi páteřní a rádiovou přístupovou sítí, jak je vidět na Obr. 2.15. Rádiovou přístupovou síť tvoří uživatelský terminál, který je označován UE (User Equipment), Node B, který je základnovou stanicí systému UMTS a Rádiový kontrolér RNC (Radio Network Controller), který řídí několik Node B. Rozhraní mezi UTAN a CORE



Obrázek 2.15: Architektura UMTS

network je označeno Iu a pracuje ve třech režimech:

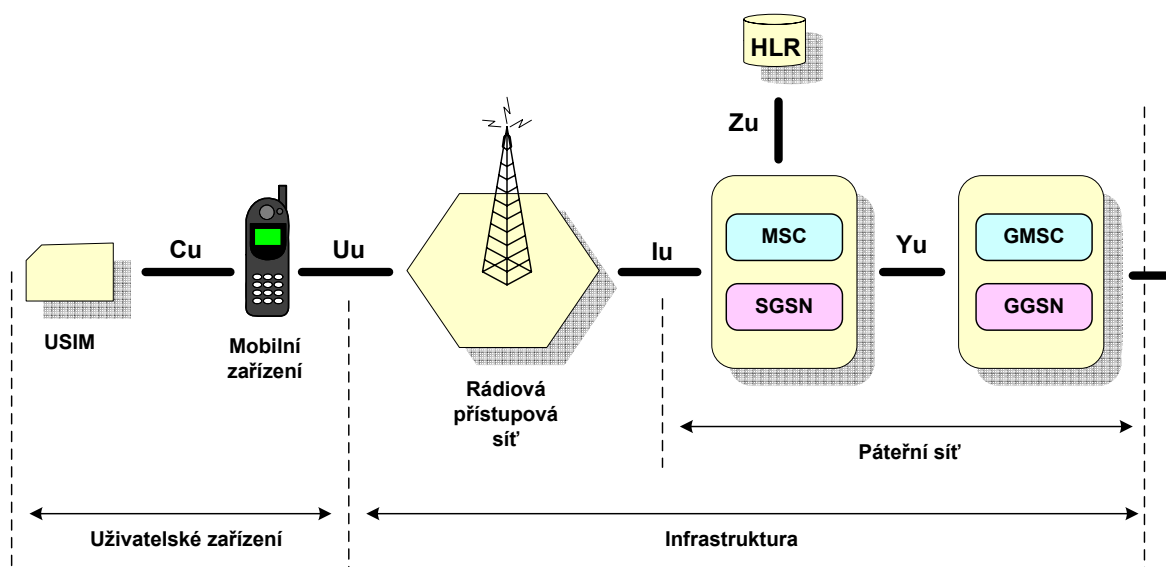
- Iu CS Circuit switched hlasové služby,
- Iu BC Broadcast Control,
- Iu PS Packet Switched pro data.

Někdy je pro modelování systému výhodné použít zjednodušenou variantu, která je zobrazena na Obr. 2.16. V tomto modelu je systém rozdělen na dvě části, na UE a infrastrukturu.

Uživatelské zařízení se skládá z USIM (Universal Subscriber Identify Module nebo UMTS Subscriber Identification Module) a obsahuje rozhraní Cu, které je definováno mezi USIM a zařízením.

Infrastruktura zahrnuje bezdrátovou přístupovou síť UTRAN a páteřní síť Core Network. Core network obsahuje několik částí:

- část obsluhující UE nebo mobilní stanice GSM (MSC, SGSN, VLR),



Obrázek 2.16: Model systému UMTS

- část pro spojení s ostatními sítěmi (GMSC, GGSN),
- rozhraní mezi jednotlivými částmi pro zajištění modularity systému,
- poslední částí je CBC (Cell Broadcast Control) pro koordinaci Broadcast vysílání v jednotlivých buňkách.

Z předchozích řádků je vidět, že páteřní síť obsahuje entity shodné se sítí GSM, a proto lze snadno propojit síť UMTS a GSM. Komplexní síť ukazuje Obr. 2.17.

Síť GSM a GPRS/EDGE používají následující propojení přístupové sítě k síťovému subsystému:

- propojení na MSC (SGSN) pomocí rozhraní A (Gb),
- A rozhraní pro datové služby,
- Gb pro paketové přenosy.

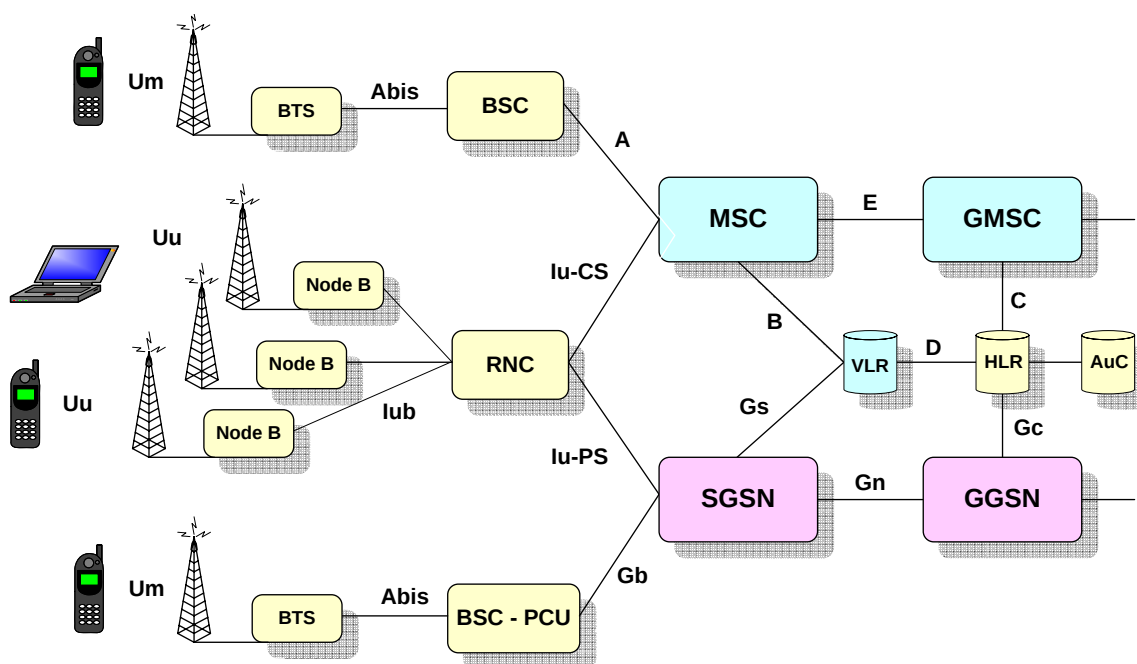
Rádiová přístupová síť UTRAN systému UMTS je propojena:

- propojení na MSC (SGSN) přes I_u (CS, CS/PS nebo PS).

2.4.1 Rádiové rozhraní UTRAN

Rádiová přístupová síť UTRAN se obdobně jako u GSM rozlišuje na menší části, které jsou označovány jako RNS. Každý RNS zahrnuje následující entity:

- několik mobilních zařízení UE. Každé UE má vlastní SIM kartu USIM,



Obrázek 2.17: Propojení sítí GSM a UMTS

- 1-3 základnové stanice Node B,
- 1 Radio Network Controller RNC, který řídí spojení k UE a provádí řízení Node B.

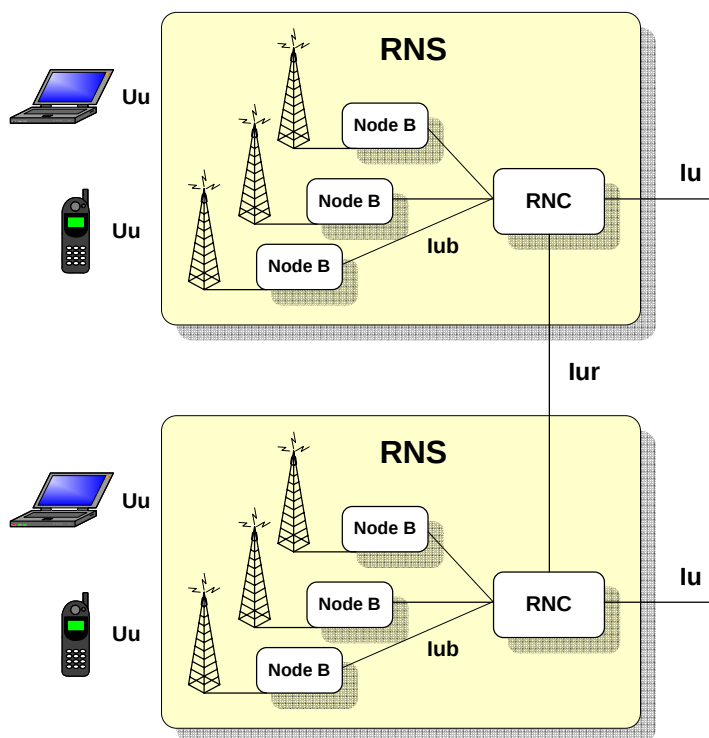
Struktura RNS je velmi podobná BSS u systému GSM. Podstatným rozdílem je nové rozhraní I_{ur} pro přímou komunikaci mezi jednotlivými RNC. Přímá komunikace mezi RNC poskytuje větší flexibilitu sítě např. při řízení handoverů mezi RNC.

Přenos signálu jednoho uživatele na rádiovém rozhraní ukazuje Obr. 2.19. V jednom okamžiku může být současně přenášeno $1 \dots N$ datových signálů, které jsou rozprostírány pomocí OVFS kódů. OVFS kódy jsou ortogonální. Rozprostírání se provádí na chipovou rychlost $3.84 \text{ Mchip.s}^{-1}$. Použitý rozprostírací kód určuje výslednou přenosovou rychlost daného datového kanálu, lze tedy vytvářet různé kombinace kanálů s různou přenosovou rychlostí.

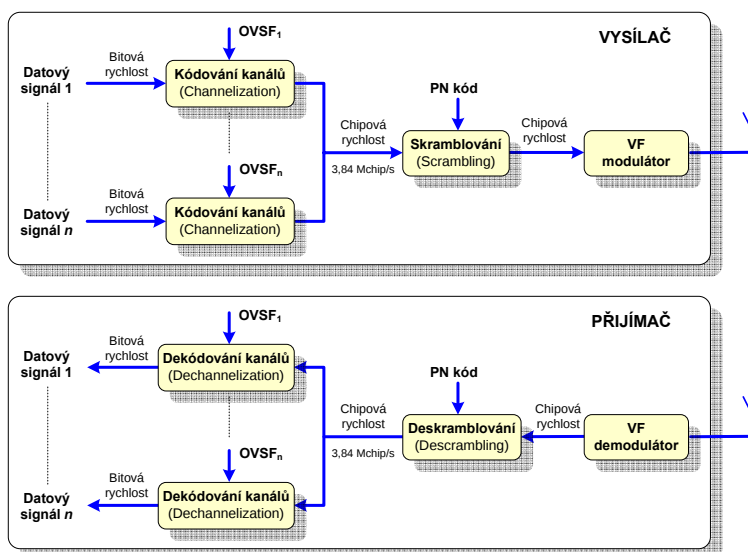
Zakódované kanály se poté skládají do datového toku s chipovou rychlostí $3.84 \text{ Mchip.s}^{-1}$. V následujícím bloku označeném jako Scrambling, dochází ke druhému kódování pomocí scrambling kódu. Scrambling kód je pseudonáhodná posloupnost, která má stejnou přenosovou rychlost $3.84 \text{ Mchip.s}^{-1}$ jako vstupní signál scrambleru, nedochází zde tedy ke změně přenosové rychlosti, ale pouze ke kódování dat. Scramblovací kód je jedinečný pro každého uživatele a bez jeho znalosti nelze dekodovat přijatý signál.

Výstupní signál scrambleru vstupuje do modulátoru. UMTS používá modulaci QPSK.

Na straně přijímače dochází nejprve k demodulaci VF signálu. Demodulovaný signál je dekodován v deskrambleru. Po deskramblingu následuje poslední krok a tím je dekodování jednotlivých datových kanálů pomocí OVFS kódů. Na výstupu potom získáváme $1 \dots N$ datových kanálů.



Obrázek 2.18: Propojení RNC přes rozhraní



Obrázek 2.19: Přenos signálu v UMTS

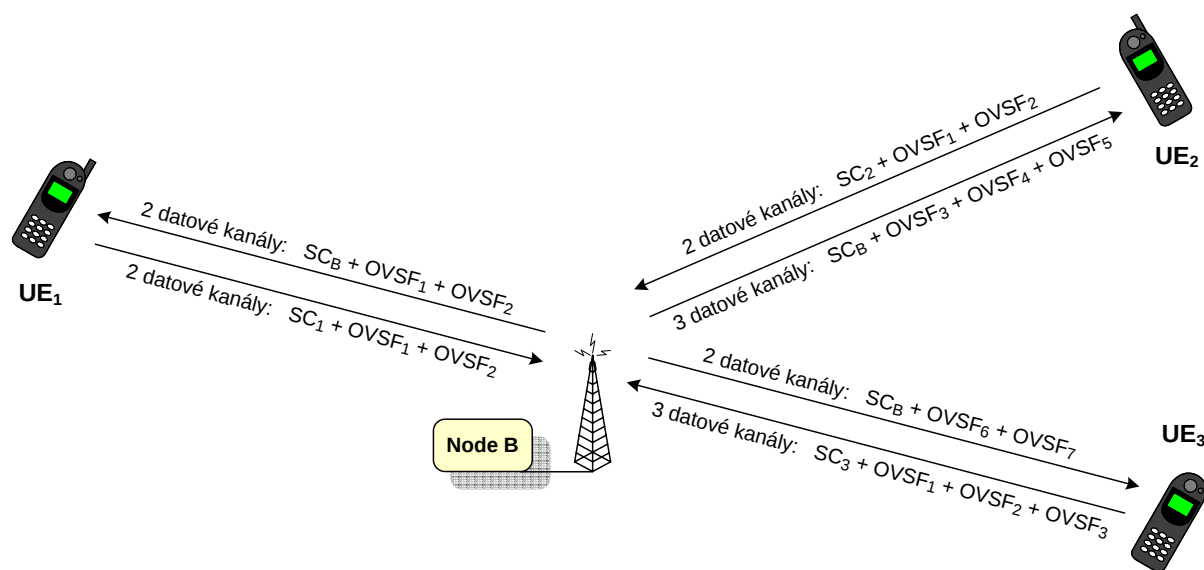
Bezdrátové rozhraní mezi Node B a UE popisují následující parametry:

- frekvenční pásmo je rozděleno na přenosové kanály se šířkou 5 MHz,
- každý rádiový kanál je rozdělen na rádiové rámce,
- doba trvání rádiového rámce je 10 ms,
- rádiové rámce jsou časově rozděleny na 15 timeslotů ($666.7 \mu\text{s}$).

Systém UMTS pracuje s kombinací multiplexů CDMA-TDMA, tedy s rozlišením jednotlivých účastníků pomocí kódů, přičemž se používá časové dělení pro zvýšení kapacity systému.

Systém UMTS má odlišné maximální dosažitelné přenosové rychlosti pro uplink a pro downlink. Při přenosu v downlinku jsou časově multiplexována účastnická data a signalizace. Maximální přenosová rychlost je 1920 kbit.s^{-1} . V uplinku se data a signalizace přenáší separátně pomocí tzv. komplexního skramblování, kdy se v konstelačním diagramu na souřádné složce přenáší uživatelská data a na kvadraturní větvi se přenáší signalizace. Maximální přenosová rychlost dat je 960 kbit.s^{-1} .

Protože je používána metoda časového dělení kanálů, je nutné zajistit přesný časový posuv mezi uplinkem a downlinkem. V systému GSM je časový posuv 3 timesloty, časový posuv mezi DL/UL v UMTS je 1024 ± 148 chipů.



Obrázek 2.20: Spojení UE se sítí

Jednotliví uživatelé jsou v UMTS rozlišení pomocí jedinečného pseudonáhodného kódu, který má stejnou rychlost jako chipy (pseudonáhodné scramblovací kódy nerozprostírají užitečnou informaci, pouze ji kódují). Důležitou vlastností scramblovacích kódů (SC) je, že nejsou ortogonální, ale mají výborné autokorelační vlastnosti. Autokorelační funkce má impulsní průběh a vzájemná korelace je (≈ 0).

Pro rozlišování Node B se používají tzv. dlouhé kódy (je to 512 kódů Goldova stromu, podrobnosti viz xxxxx). Každý Node B má jedinečný SC. Pro rozlišování UE se používají krátké SC (256 chipů). UE může rozlišit 512 Node B.

Spojení mezi několika UE a jedním Node B je na Obr. 2.20. Každý UE má přidělen svůj scrambling kód, který je označen SC_1 , SC_2 , SC_3 . Rozlišovací kód Node B je označen SC_B . Komunikace mezi Node B a UE probíhá pomocí následujících kanálů:

- UE_1 je rozlišen pomocí SC_1 . Pro downlink je sestaveno spojení na dvou kanálech s rozprostíracími kódy $OVSF_1$ a $OVSF_2$, které jsou scramblingovány pomocí kódu SC_B . Pro uplink je použit rozlišovací kód SC_1 a dva kanály s rozprostíracími kódy $OVSF_1$ a $OVSF_2$.
- UE_2 je rozlišen pomocí SC_2 . Pro downlink je sestaveno spojení na třech kanálech s rozprostíracími kódy $OVSF_3$, $OVSF_4$ a $OVSF_5$, které jsou scramblingovány pomocí kódu SC_B . Pro uplink je použit rozlišovací kód SC_2 a dva kanály s rozprostíracími kódy $OVSF_1$ a $OVSF_2$.
- UE_3 je rozlišen pomocí SC_3 . Pro downlink je sestaveno spojení na dvou kanálech s rozprostíracími kódy $OVSF_6$ a $OVSF_7$, které jsou scramblingovány pomocí kódu SC_B . Pro uplink je použit rozlišovací kód SC_3 a tři kanály s rozprostíracími kódy $OVSF_1$, $OVSF_2$ a $OVSF_3$.

Obecně může každý UE využívat současně $(1 \div N)$ přenosových kanálů, rozlišených pomocí OVFSF kódu z Walshova stromu. SF pro jednotlivé kanály je $4 \div 512$ pro UE na downlinku, přenosová rychlost na fyzické vrstvě je $15 \div 1920 \text{ kbit.s}^{-1}$.

Pro uplink je používán $SF = 4 \div 256$, přenosová rychlost na fyzické vrstvě je $15 \div 960 \text{ kbit.s}^{-1}$.

Mobilní terminál UE je koncepčně mnohem složitější než v systému GSM. Terminály provádí různé operace zpracování signálů a používají několik technologií:

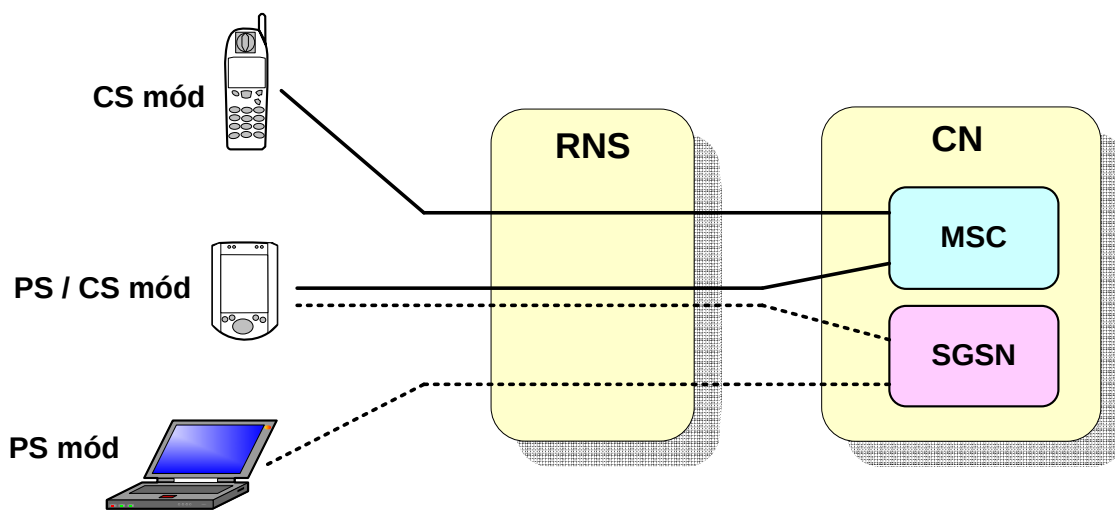
- různé typy kanálového kódování (turbo a konvoluční kódy),
- RAKE receiver,
- generování Walshových sekvencí,
- rozprostírání,
- multiuser detekce,
- Adaptive Multirate speech coding.

To má za následek nárůst potřebného HW výkonu UE oproti MS systému GSM cca 2x (100 MIPS).

UE se nedělí na třídy, protože existuje příliš mnoho kombinací, ale dělí se podle skupin parametrů. UE musí pracovat ve třech provozních režimech (Obr. 2.21:

CS Circuit switched pro hlasovou službu,

CS/PS kombinovaný režim hlas/data,



Obrázek 2.21: Módy User Equipment

PS Packet switched pouze pro datové služby.

Pro ilustraci je v následujících bodech naznačeno, jaké skupiny parametrů se používají pro charakterizování UE.

RF a multimode parametry jsou

- výkonová třída, rozteč duplexního páru Tx/Rx pro FDD, šířka kanálu (5, 10, 20 MHz), mód TDD/FDD,
- chip rate ($3,84 \text{ Mchip.s}^{-1}$, ...),
- další technologie (GSM, EDGE, CDMA 2000, ...).

Parametry fyzických kanálů charakterizované pomocí

- počet současně přijímaných DPCH/PDSCH kódů (1, 2, ..., 8), podpora kanálu PCPCH (ano/ne),
- max. počet bitů v rámci kanálů DPCH, PDSCH, SCCPCH (600, 1200, ..., 67200, 76800),
- max. počet bitů v rámci kanálu DPDCH (600, 1200, ..., 57600).

Parametry transportních kanálů charakterizované pomocí

- maximální počet bitů ve všech transportních blocích (640, 1280, ..., 81920, 63840),
- počet bitů konvolučních/turbo kódů,
- počet souběžně vysílaných transportních kanálů.

Existuje jediné kritérium porovnání UE: max. přenosová rychlost (32, 64, 128, 384, 768, 2048 Mbit.s⁻¹).

Základnovou stanicí Node B lze charakterizovat pomocí následujících bodů:

- jako BTS systému GSM,
- převod transportních kanálů na rozhraní Iub na fyzické kanály WCDMA - rozhraní Uu a naopak,
- řízení výkonu mobilních stanic (inner loop), viz dále,
- měření úrovně signálu v rádiovém prostředí pro procedury handoveru,
- frekvenční synchronizace,
- časová synchronizace:
 - chipová,
 - bitová,
 - slotová,
 - rámcová,
- přenos systémových informací generovaných v RNC.

Poslední entitou, která patří do RNS, je Radio Network Controller. RNC odpovídá BSC systému GSM, ale s větší vestavěnou "inteligencí". Charakteristika RNC v několika bodech:

- transformace signálů z rozhraní Iu $\Leftrightarrow$ Iub,
- řízení HO,
- Power control pro dosažení minimálních interferencí v buňce (buňkách),
- řízení přístupu a rádiových prostředků a řazení paketů pro minimalizaci kolísání bitové rychlosti,
- zajištění bezpečnosti UTRAN,
- databáze potřebných údajů pro UE a Node B,
- rozhraní Iur pro komunikaci mezi několika RNC.

Rádiové kontrolery se dále rozlišují podle svých funkcí, které poskytují danému UE nebo Node B. Toto rozdělení je:

Controlling RNC CRNC řídí pouze jeden Node B (každý Node B má pouze jeden CRNC)

- systémové informace,
- provoz na používaných kanálech,

- zatížení a kolize v buňkách,
- řízení přístupu a výběr kódu pro nová rádiová připojení.

Serving RNC Serving RNC řídí spojení pouze k jednomu UE

- vymezuje rozhraní Iu pro obsluhovaný UE,
- řízení výkonu (Outer Loop),
- rozhodování o HO a řízení makrodiversity,
- mapování (přidělování) parametrů Radio Resources k parametrům transportních kanálů.

Drift RNC DRNC slouží jako podpora pro SRNC. Jestliže je UE připojen pomocí makrodiversity přes jiný Node B (který řídí jiný RNC), pak je jiný RNC označen jako DRNC.

2.4.2 Core Network

Hlavní funkcí Core network je poskytování hlasových a datových služeb pro UE a dále propojení UE se stávajícími sítěmi, ať už hlasovými službami (PSTN, ISDN), tak i datovými službami (Internet).

Jak již bylo řečeno, UMTS podporuje přenos pomocí spínaných okruhů a spínaných paketů. Proto lze páteřní síť rozdělit na skupiny prvků sítě (entit) pro oba uvedené druhy provozu. Tyto entity v CORE Network pro jednotlivé domény jsou:

Doména CS – hlasové služby

- MSC radiotelefonní ústředna, obsluhuje mobilní zařízení - sestavení a řízení spojení atd.,
- GMSC ústředna, která se stará o připojení k ostatním sítím (Gateway MSC),
- VLR databáze účastníků pro podporu mobility v síti.

Doména PS – datové služby

- SGSN poskytování datových služeb pro účastníky,
- GGSN brána k ostatním paketovým sítím (X.25, ...).

Oba typy provozu mají některé entity společné, a to:

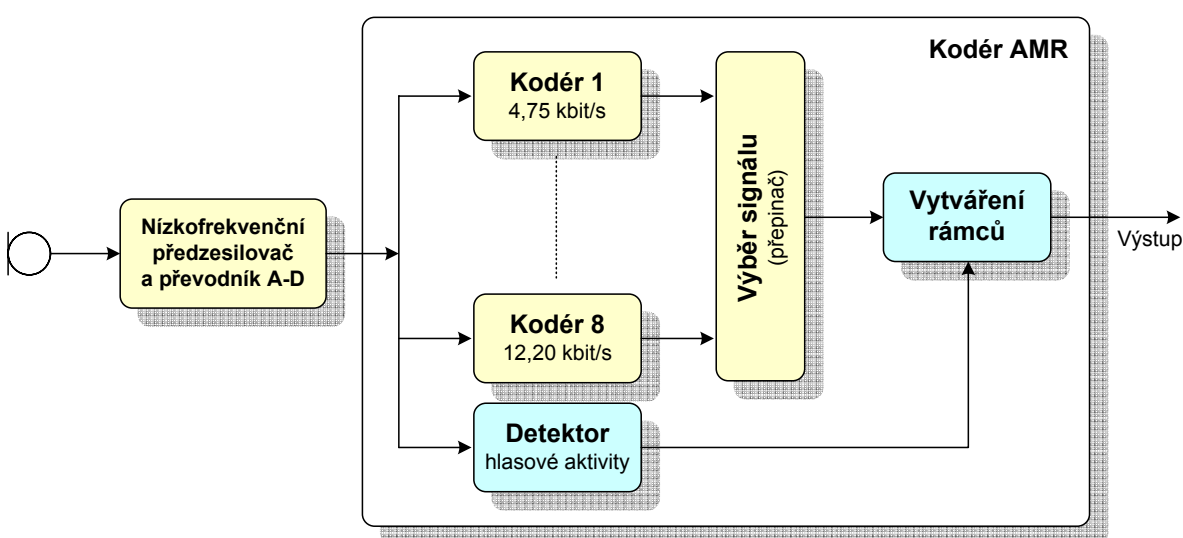
- HLR Databáze všech účastníků v síti,
- AuC centrum pro ověření účastníka a zajištění šifrovacích klíčů,
- EIR databáze povolených/zakázaných mobilních zařízení pro provoz v síti.

2.5 Vlastnosti UMTS

2.5.1 Zpracování hlasového signálu

Při přenosu hlasu je zbytečné kódovat hlas uživatele plnou rychlostí po celou dobu trvání hovoru. Cca 50 % času mluví druhá strana. Proto UMTS používá hlasový kodér s proměnlivou bitovou rychlostí.

Proměnlivá bitová rychlost na výstupu kodéru je určena hlasovou aktivitou. Detektor hlasové aktivity určuje okamžiky vkládání tzv. komfortního šumu (bez mluvení). Tento šum je přenášen v tzv. Silence Descriptor rámcích s nízkou přenosovou rychlostí. Blokové schéma kodéru AMR (Adaptive Multirate Speech Coder) je na Obr. 2.22.



Obrázek 2.22: Hlasový kodér AMR

Parametry AMR jsou uvedeny v Tab. 2.2.

Řeč je segmentována na 20 ms bloky po 160 vzorcích, v kodéru jsou kódovány na $95 \div 244$ bitů. Výstup kodéru je vkládán do rámců, jejichž struktura je uvedena v Tab. 2.3.

2.5.2 Handover

V mobilních systémech dochází vlivem šíření vln a vlivem vlastností přenosového kanálu k tzv. rychlým únikům. Proto omezení jejich dopadu na kvalitu přenosu je výhodné používat diverzitní příjem. Pod pojmem diverzitního příjmu se rozumí vytváření několika přenosových cest pro přenos informace pomocí různých technik. Rozlišujeme tři základní typy diverzity

- prostorová, na straně přijímače nebo vysílače je použito více antén, které jsou od sebe vzdáleny násobky vlnové délky,
- frekvenční, stejná informace se vysílá na dvou různých frekvencích, přijímač musí obsahovat dva lokální oscilátory

Tabulka 2.2: Parametry jednotlivých režimů AMR kodéru

Mód kodéku	Přenosová rychlost	Mód kodéku	Přenosová rychlost
AMR 12,2	12,2 kbit.s ⁻¹ (GSM EFR)	AMR 10,2	10,2 kbit.s ⁻¹
AMR 7,95	7,95 kbit.s ⁻¹	AMR 7,4	7,4 kbit.s ⁻¹ (IS-64)
AMR 6,7	6,7 kbit.s ⁻¹ (PDC EFR)	AMR 5,9	5,9 kbit.s ⁻¹
AMR 5,15	5,15 kbit.s ⁻¹	AMR 4,75	4,75 kbit.s ⁻¹
AMR SID		1,8 kbit.s ⁻¹	

Tabulka 2.3: Struktura AMR rámců

AMR Leader		AMR Auxiliary Information			AMR Core Frame
Frame type	Quality	mode	mode	CRC	speech parameters
4	1	3	3	8	

- časová, dochází k opakování přenosu po určitém čase.

Diverzitní příjem zajišťuje minimalizaci dopadu frekvenčně selektivního úniku v přenosovém kanálu. Nevýhodou časové a frekvenční diversity však je snížení přenosové kapacity systému, protože dochází k duplicitnímu přenosu informace. U prostorové diversity se nevýhoda snížení přenosové kapacity nevyskytuje, nicméně nutnost použití více antén přináší technické omezení (zejména u MS).

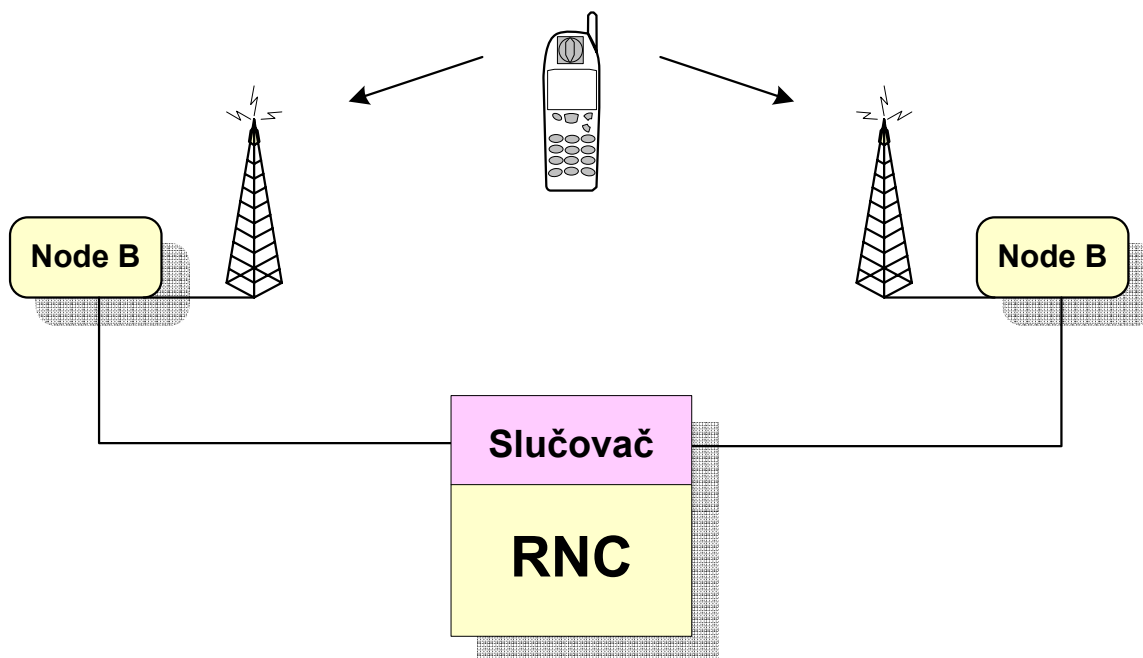
V systému UMTS se používá tzv. makrodiversita. Pojem makrodiversity vysvětluje Obr. 2.23. Stejný signál pro jeden UE je současně vysílán ze dvou Node B. Při downlinku se vysílání stejného signálu z více Node B projeví nárůstem interferencí v dané oblasti, viz Obr. 2.24. Při uplinku k nárůstu interferencí nedochází, protože vysílaný signál z UE je přijímán dvěma Node B a poté slučován před zpracováním v RNC.

S makrodiverzitou úzce souvisí handover v síti UMTS. Síť UMTS používá Soft Handover (Měkký handover). Při soft HO je UE připojen současně alespoň ke dvěma Node B. Princip ukazuje Obr. 2.25.

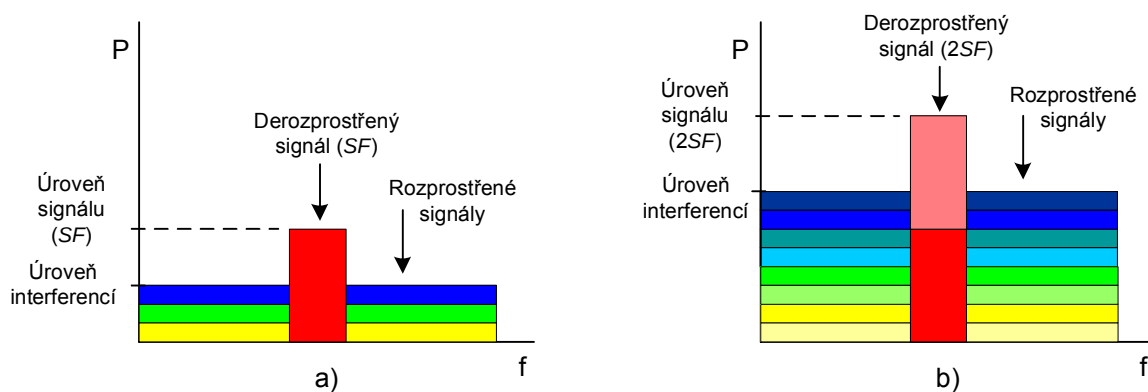
Novým typem HO, který se používá v UMTS, je Softer HO. Jeho princip je na Obr. 2.26. Tento typ HO se používá na rozhraní dvou sektorů v rámci jednoho Node B.

V předchozích částech bylo uvedeno, že UE je koncipován jako multimódové zařízení, tj. musí podporovat více režimů přenosu. Tento fakt souvisí se zavedením speciálních typů handoverů, které se v UMTS používají:

Interfrequency Handover mezi dvěma přenosovými frekvencemi v rámci Node B. Provádí se jako tvrdý HO, protože UE obsahuje pouze jeden přijímač a je nutné jej přeladit na novou frekvenci,



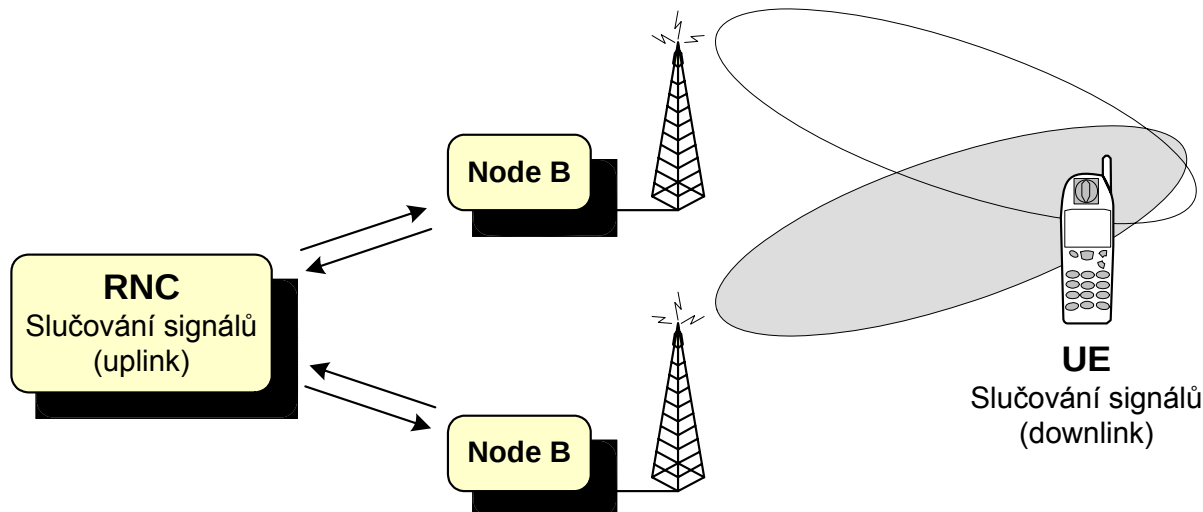
Obrázek 2.23: Princip makrodiversity



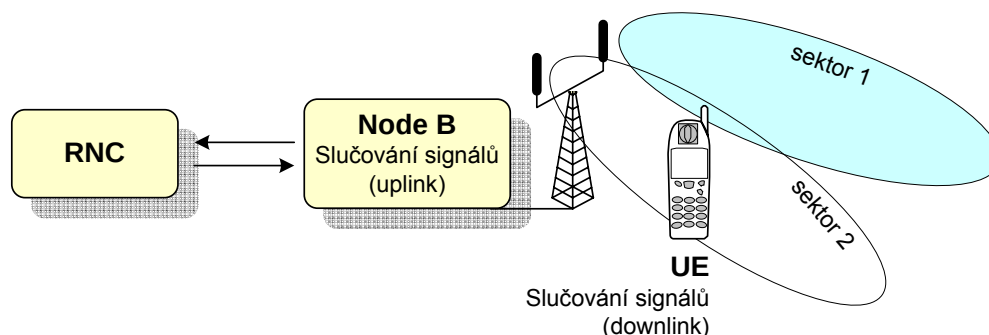
Obrázek 2.24: Nárůst interferencí při použití makrodiversity

Intersystem handover mezi UMTS a GSM, případně dalšími technologiemi,

- UE se v důsledku špatné kvality služby přepne ze sítě UMTS do sítě GSM,
- komplikovaná procedura, kdy musí dojít k ověření účastníka, služeb, MS atd.,
- v následujících Release se předpokládá přepínání mezi sítěmi UMTS a WiFi.



Obrázek 2.25: Soft Handover



Obrázek 2.26: Softer Handover

Intermode přepnutí mezi UMTS-FDD a UMTS-TDD.

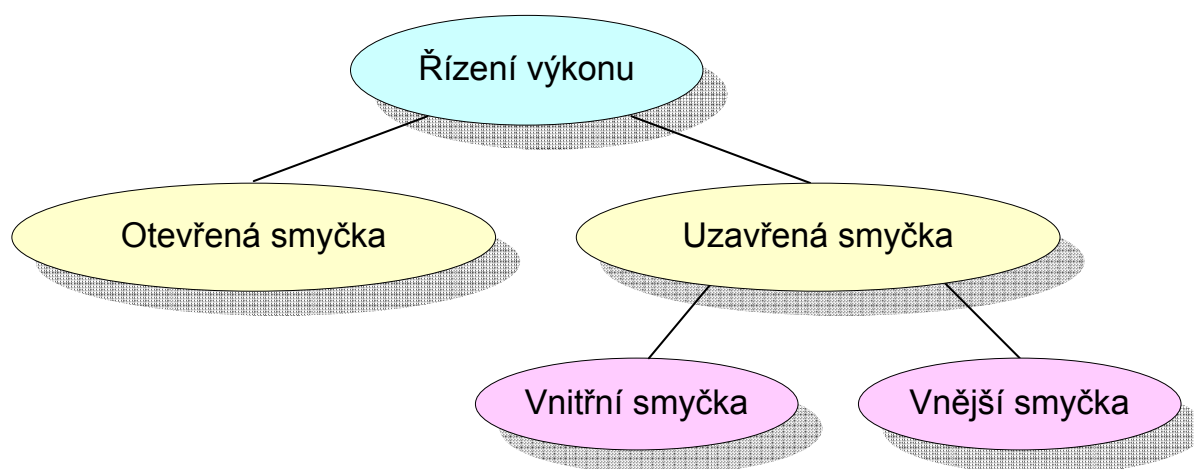
- pokud je terminál dvoumódový, dochází k přepnutí mezi TDD a FDD módem
- tento přechod se předpokládá na rozhraní dvou typů sítí,
 - TDD pro datové asynchronní přenosy pro malé oblasti pokrytí,
 - FDD pro hlasové služby s velkým pokrytím (velká oblast).

2.5.3 Power Control

Systémy pracující s CDMA jsou odolné vůči úzkopásmovému rušení. Širokopásmové rušení, které v těchto systémech představují pro jednoho uživatele ostatní účastníci, hraje klíčovou roli při příjmu užitečného signálu, jak je vidět z Obr. 2.24. Pokud je v dané buňce příliš vysoká úroveň rušení, nelze komunikovat mezi UE a Node B.

Proto systém UMTS zahrnuje několik mechanismů regulace vysílaného výkonu jednotlivých uživatelů s cílem minimalizace interferencí na rádiovém rozhraní. Mechanismy řízení výkonu se označují Power Control.

Dalším přínosem Power Control je zajišťování požadované kvality spojení, minimalizace Near-Far efektu a zvýšení životnosti baterií UE. Typy Power Control jsou zobrazeny v diagramu na Obr. 2.27.



Obrázek 2.27: Power Control v UMTS

Open Loop Vysílaný výkon Tx UE je přímo závislý na přijatém výkonu Rx z Node B, pracuje bez zpětné vazby,

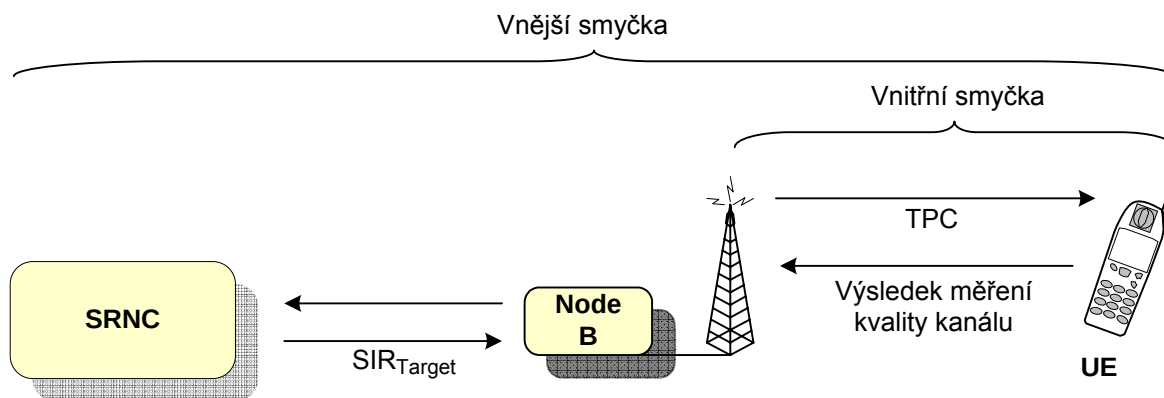
$$UE_{TxPower} = NodeB_{TxPower} + UL_{Interference} + ConstantValue - UE_{RxPower}, \quad (2.6)$$

- $UE_{TxPower}$ vyjadřuje výkon vysílaný UE na uplinku,
- $NodeB_{TxPower}$ je výkon vysílaný Node B,
- $UL_{Interference}$ označuje úroveň interferencí v přenosovém kanálu,
- ConstantValue pro definování přídavného útlumu,
- $UE_{RxPower}$ značí přijatý výkon UE,

Metoda řízení výkonu otevřenou smyčkou nezahrnuje frekvenční selektivitu přenosového kanálu (zbytečné vysílání velkého výkonu v uplinku, který je o několik stovek MHz posunutý, při nekvalitním kanálu na downlinku).

- všechny informace se přenášejí po downlinku,
- využívá se při přihlašování UE do sítě, kdy ještě není sestaveno spojení a tudíž nelze využít zpětný kanál.

Closed Loop má vytvořen zpětný kanál pro přenos výsledků měření UE do Node B a provádí řízení výkonu na základě měření obou entit (UE a Node B), Obr. 2.28. Měření výkonu se provádí ve vnější a vnitřní smyčce.



Obrázek 2.28: Uzavřená smyčka

Inner Loop měření v uzavřené smyčce mezi Node B a UE

- měření parametru SIR (Signal to Interference Ratio) na rádiovém rozhraní,
- Node B řídí výkon UE pomocí TPC (Transmit Power Control) tak, aby bylo dosaženo $SIR_{Target} = SIR_{Meas}$,
- interval opakování měření je 1500 Hz (0,667 ms).

Outer Loop znamená, že měření probíhá mezi SRNC a UE

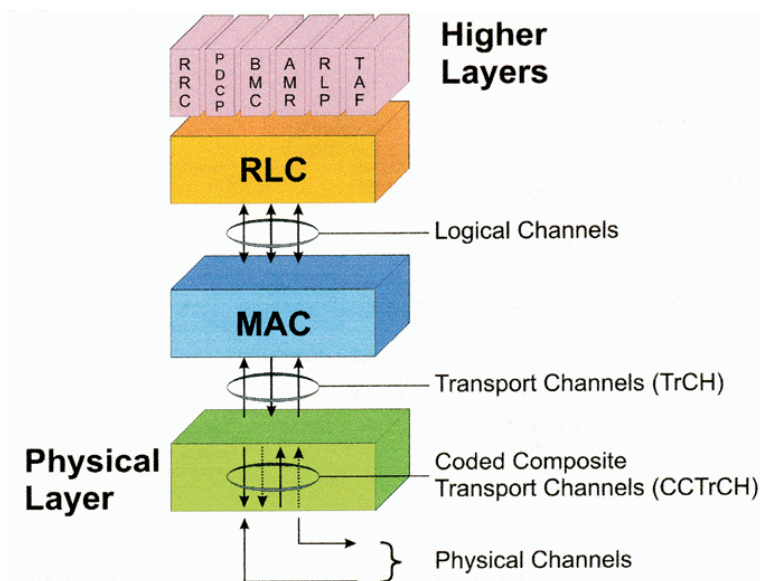
- výsledek měření SIR_{Meas} je předán do SRNC,
- následuje porovnání s původním požadavkem SIR_{Target} ,
- na základě výsledku je stanovena nová hodnota SIR_{Target} ,
- opakování měření cca $10 \div 100 \times$ za sekundu ($10 \div 100$ Hz).

Vlivem interferencí dochází ke kolísání počtu účastníků, kteří jsou připojeni k jednomu Node B. Po odpojení několika z nich dochází ke snížení interferencí a proto se počet účastníků může opět zvýšit. Tato dynamická změna počtu uživatelů v buňce se označuje jako Cell Breathing, dýchání buňky.

2.6 Vrstvový model UMTS

Vrstvový model UMTS má mezi nejnižšími třemi vrstvami definováno několik typů kanálů, které slouží pro komunikaci mezi vrstvami. Z pohledu rádiového rozhraní a přenosu informace jsou ve vrstevném modelu důležité právě tyto vrstvy a kanály.

Data z vyšších vrstev jsou zpracována ve vrstvě RLC, Radio Link Control. Úkolem RLC je řízení a přidělování rádiových zdrojů pro přenos. Mezi vrstvou RLC a MAC (Media Access Control) jsou definovány tzv. logické kanály. Vrstva MAC zajišťuje řízení přístupu do fyzického rádiového kanálu. Mezi vrstvou MAC a vrstvou PHY jsou definovány transportní kanály. Ty jsou velmi důležité pro systém UMTS, protože zajišťují variabilitu přenosové rychlosti. Ve PHY (Physical Layer) dochází ke kódování transportních kanálů do tzv. Coded Composite Transport Channels, což jsou kanály přizpůsobené pro přenos přes fyzické rozhraní. CCTrCH již obsahují kódové zabezpečení proti chybám při přenosu (FEC).



Obrázek 2.29: Vrstvy UMTS [?]

2.6.1 Logické kanály

Logické kanály (mezi vrstvou RRC a MAC), jsou buď jednosměrné (unidirectional - daný logický kanál slouží pro přenos v uplinku nebo downlinku) nebo obousměrné (bi-directional, přenos v obou směrech).

Podobně jako u systému GSM jsou logické kanály rozděleny na kanály řídicí (Control Channels) a kanály provozní (Traffic Channels).

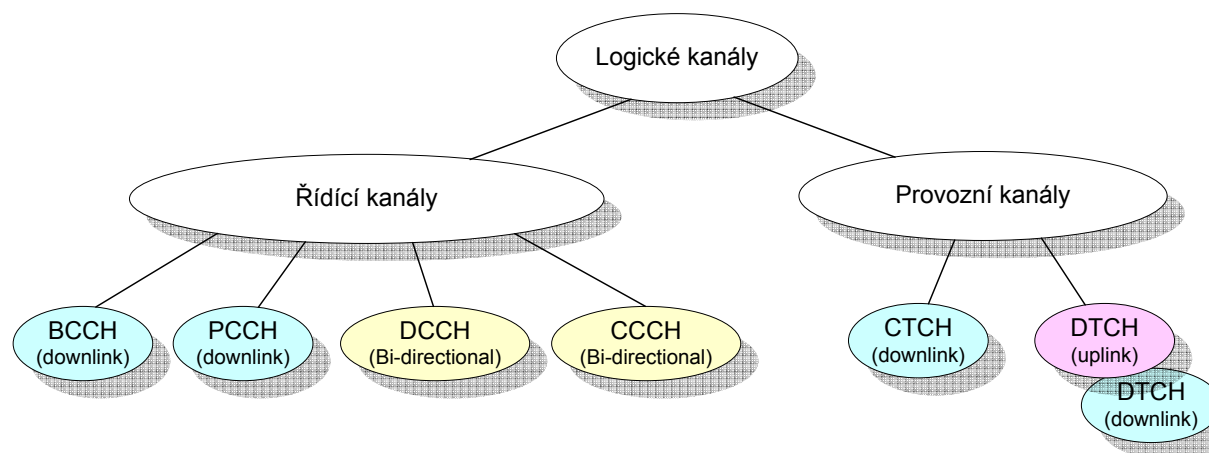
Řídicí kanály se dělí na jednosměrné nebo obousměrné. Jednosměrné jsou vyhrazeny pouze pro downlink, obousměrný kanál slouží pro přenos signalizace v downlinku i uplinku:

- downlink

BCCH Broadcast Control Channel slouží k přenosu řídicích informací o buňce,

PCCH Paging Control Channel obsahuje pagingové informace,

- bi-directional



Obrázek 2.30: Logické kanály

DCCH Dedicated Control Channel slouží pro obousměrný přenos informací k UE, používá se při připojení do sítě (pro jeden UE),

CCCH Common Control Channel slouží pro více UE, když ještě není vytvořen DCCH, probíhá výměna informací mezi UE a sítí.

Provozní kanály jsou jednosměrné (provozní kanál jen pro jeden směr přenosu) nebo obousměrné (tj. před přenosem dojde k určení směru přenosu). Jednosměrné jsou vyhrazeny pouze pro downlink, obousměrný kanál slouží pro přenos signalizace v downlinku i uplinku:

- downlink

CTCH Common Traffic Channel kanál pro spojení Point to Multipoint pro přenos uživatelských informací ke skupině uživatelů,

- downlink/uplink

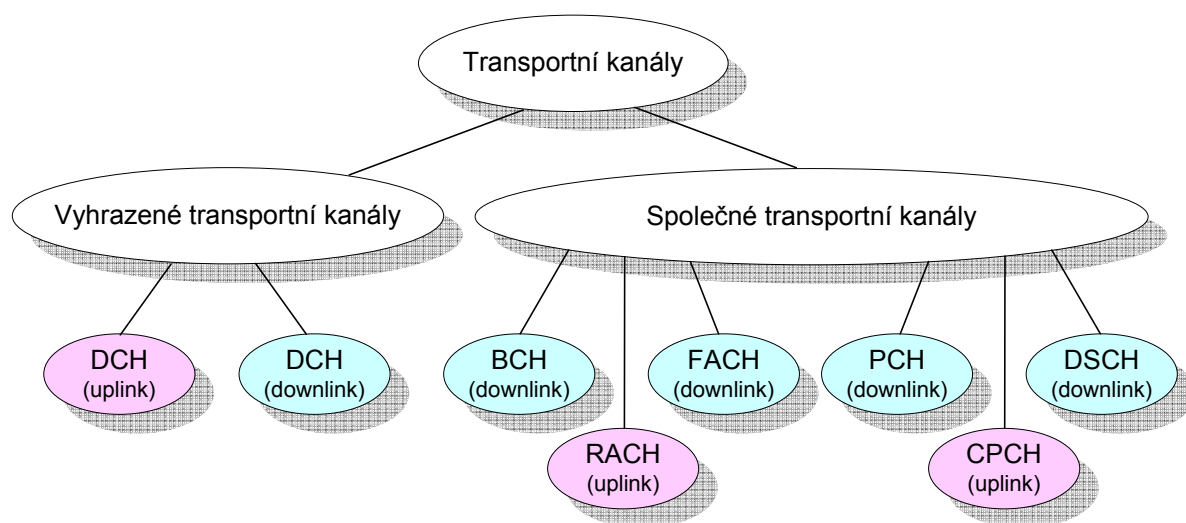
DTCH Dedicated Traffic Channel kanál pro spojení Point to Point pro přenos uživatelských informací mezi sítí a UE, může být sestaven v downlinku nebo uplinku, ale není obousměrný.

2.6.2 Transportní kanály

Transportní kanály slouží pro přenos informace mezi MAC a PHY vrstvou. Jejich koncept je velmi důležitý pro vlastnosti UMTS, protože poskytují variabilní přenosovou rychlost.

Transportní kanály jsou vždy pouze jednosměrné. Při jejich sestavování je dán směr přenosu - uplink nebo downlink. Transportní kanály slouží k přenosu informace bez ohledu na její význam, proto se nerozdělují na řídicí a provozní, ale na společné nebo vyhrazené.

Společné řídicí kanály slouží pro přenos dat více uživatelům, vyhrazené transportní kanály pro přenos dat pouze jednomu uživateli.



Obrázek 2.31: Transportní kanály

Společné transportní kanály pro přenos více uživatelům současně (v downlinku jsou to broadcast kanály)

- downlink

BCH Broadcast Channel přenáší systémové informace ke všem UE v buňce $\Leftrightarrow$ jeho parametry jsou známy všem UE, proto může být dekódován,

FACH Forward Access Channel přenáší malé množství informací, parametry FACH jsou přenášeny v systémových informacích,

PCH Paging Channel přenáší důležitá data pro proceduru paging, tím je využito klidového režimu UE a šetří se baterie,

DSCH Downlink Shared Channel je vždy pro několik uživatelů společný, podporuje rychlé řízení výkonu, přiřazuje se k DCH,

CTCH Common Traffic Channel kanál pro spojení Point to Multipoint pro přenos uživatelských informací ke skupině uživatelů.

- uplink

RACH Random Access Channel přenáší informace z UE do sítě, např. pro proceduru náhodného přístupu, je využíván všemi UE, tj. velká pravděpodobnost kolize. Parametry kanálu se přenáší v systémových informacích kanálu BCH, použití open loop pro řízení výkonu při přístupu,

CPCH Common Packet Channel pro zabránění kolizí na rádiovém rozhraní používá speciální CPCH proceduru.

Vyhrazené transportní kanály pouze pro jednoho uživatele

DTCH Dedicated Traffic Channel kanál pro spojení Point to Point pro přenos uživatelských informací mezi sítí a UE, může být sestaven v downlinku nebo uplinku, ale

není obousměrný

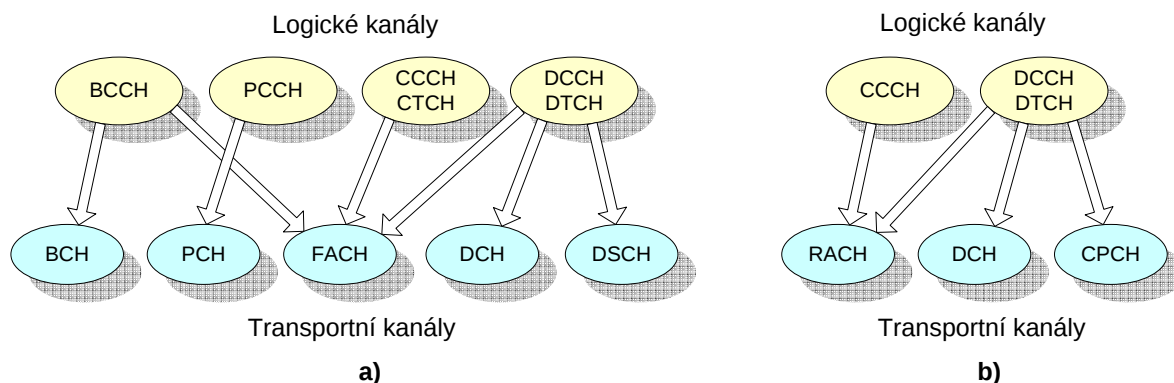
Mapování logických kanálů do transportních provádí vrstva MAC a předává přenášenou informaci do fyzické vrstvy. Mapování neprobíhá v poměru 1:1, ale podle stavu UE, požadované služby a množství přenášených dat. Parametry transportního kanálu určuje SRNC (Serving RNC)

Typ služby pro hlasové služby se používají dedicated kanály, protože mají menší zpoždění, pro datové služby (email, http, ...) se využívají CPCH.

Zatížení společných kanálů Sdílení kanálů funguje na principu časového dělení. Uživatelé používají shodný kód, čímž se snižuje potřebný počet OVFS kódů. Jestliže příliš mnoho uživatelů sdílí stejné rádiové prostředky, trvá přidělení kanálu delší dobu. Pokud je zpoždění při přidělování rádiových prostředků příliš velké, dojde k přidělení dedicated kanálu.

Úroveň interferencí Čím více uživatelů má přiděleno DCH, tím vyšší je úroveň interferencí v dané buňce. DCH však poskytují Power Control ve vnitřní smyčce (rychlá změna) a soft HO, které umožňují snižovat úroveň interferencí.

Objem přenášených dat Pro přenos většího objemu dat je výhodnější použít DCH, protože pro CPCH platí princip časového dělení (procedury pro přidělení prostředků), což snižuje přenosovou kapacitu.



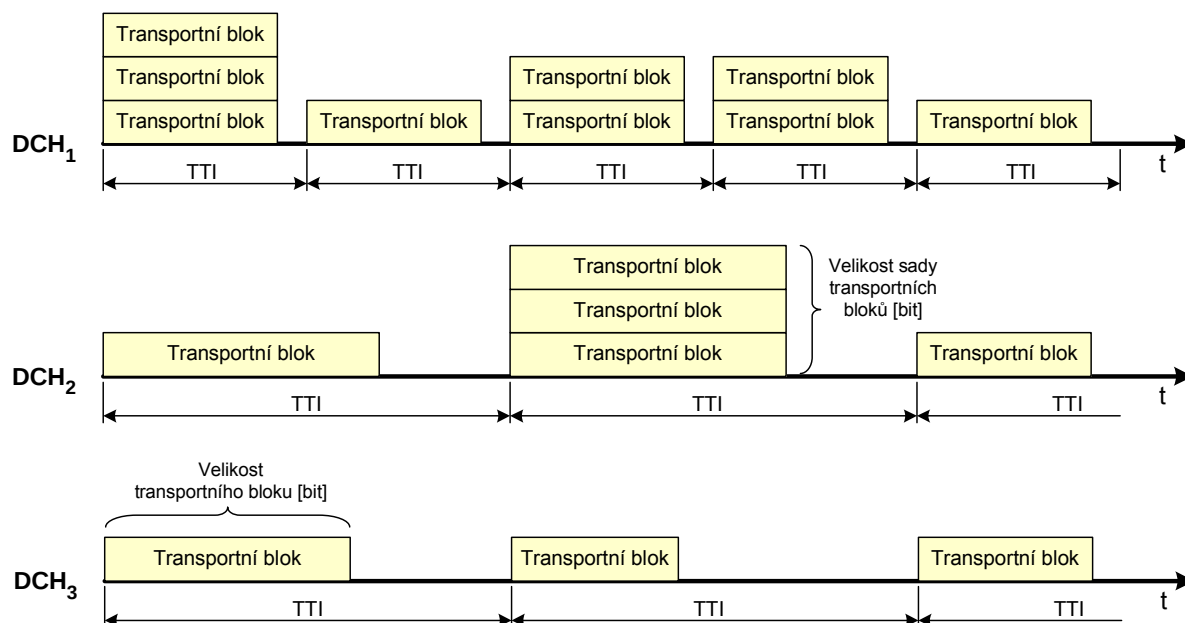
Obrázek 2.32: Mapování transportních kanálů do logických

Transportní kanál přiděluje SRNC na základě vyhodnocení přenosové rychlosti, interferencí atd. CPCH pracují s TDMA (provádí se časový multiplex jednotlivých uživatelů), DCH s CDMA (každý vyhrazený kanál je určen pouze pro jednoho uživatele, musí být odlišen jedinečným kódem). Výběr je proveden vzhledem k požadované službě, viz výše.

Přenos dat mezi MAC vrstvou (2) a fyzickou vrstvou (1) se provádí pomocí tzv. *Transportation Block* a přenos probíhá vždy pouze v jednom směru. V časovém intervalu 10 ms a jeho násobcích, viz dále, je v MAC generován nový transportní blok (nebo skupina bloků).

Proměnná přenosová rychlost je dosažená díky možnosti přenášet několik transportních bloků (**sada transportních bloků**) v jednom transportním kanálu a jednom timeslotu současně. Tato možnost je zobrazena na Obr. 2.33.

Doba mezi přesunem Transportation Block mezi vrstvou MAC a PHY je označována TTI Transmission Time Interval. TTI nabývá 10, 20, 40 nebo 80 ms.



Obrázek 2.33: Transportní bloky

Struktura transportních bloků, množství přenášených dat a způsob jejich zpracování fyzickou vrstvou se definuje pomocí Transportation format. Skládá se z semistatické a dynamické části:

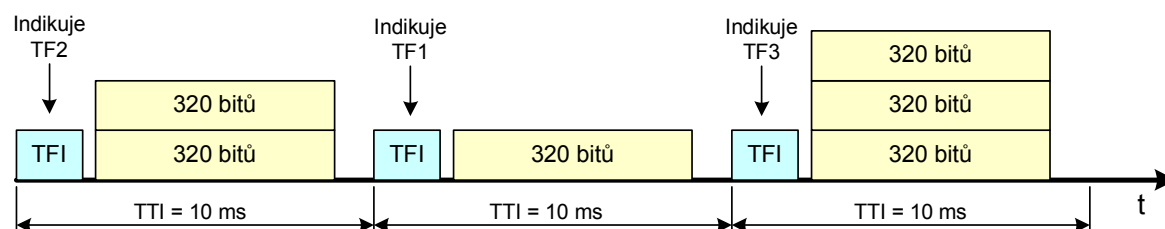
Semistatická část udává TTI, schéma FEC, velikost CRC. MAC zpracovává pouze TTI. Schéma FEC a CRC se uvádí pouze pro fyzickou vrstvu kvůli kanálovému kódování a řízení QoS.

Dynamická část údaje o velikosti transportního bloku a velikosti sady transportních bloků. Velikost sady se rovná celočíselnému násobku velikosti transportních bloků, tím je určena přenosová rychlost v transportním kanálu TF(dynamic{320 bitů, 640 bitů}, semi static{ 10 ms, *FEC scheme*, *CRC*})

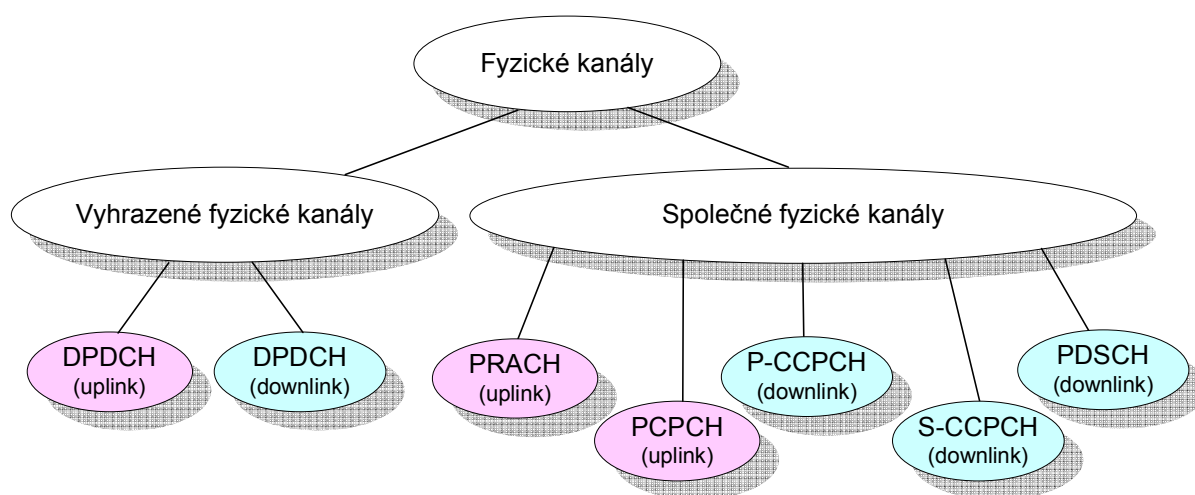
Sada transportních formátů TFS sdružuje několik různých transportních formátů. Transportní formát se může měnit každý TTI $\Leftrightarrow$ lze měnit přenosovou rychlost. TFI Transport Format Indicator slouží pro přenos informací o transportním bloku.

2.6.3 Fyzické kanály

Vyhrazené fyzické kanály - kanály pouze pro jednoho účastníka



Obrázek 2.34: Transposition Format



Obrázek 2.35: Přehled fyzických kanálů

DPDCH Dedicated Physical Data Channel je kanál pro datový přenos transportních kanálů, využívá se v uplinku i downlinku.

Společné fyzické kanály - kanály pro více uživatelů v dané oblasti:

- downlink

P-CCPCH Primary Common Control Physical Channel se používá pro přenos BCH s konstantní bitovou rychlostí 30 kbit.s^{-1} ,

S-CCPCH Secondary CCPCH přenáší FACH a PCH, podporuje proměnné datové rychlosti,

PDSCH Physical Downlink Shared Channel je určen pro přenos DSCH. Pomocí časového multiplexu je přenášen s DPDCH (viz dále) a slouží k řízení rádiových zdrojů (výkon, OVSF).

- uplink

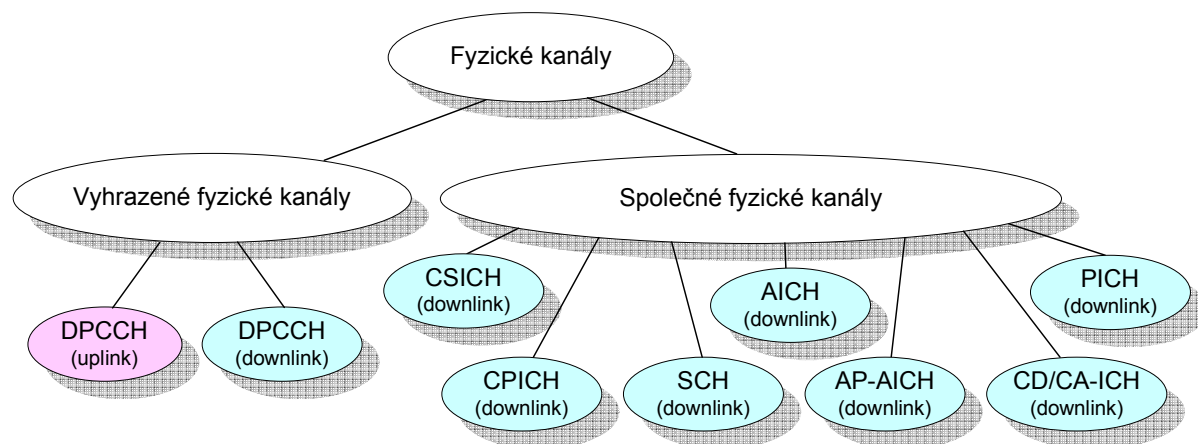
PRACH - Physical Random Access Channel přenáší RACH. Z důvodu inicializování spojení má proměnlivou délku jeden nebo dva rámce (proměnlivá vzdálenost mezi Node B a UE).

PCPCH - Physical Common Packet Channel je sdílen množstvím různých uživatelů (přenáší CPCH). Může trvat až 64 rámců, používá rychlé řízení výkonu.

PRACH a PCPCH mají speciální přístupovou proceduru pro nastavení počáteční výkonové úrovně.

2.6.4 Fyzické kanály pro řízení systému

Tyto kanály nepřenášejí informaci do vyšších vrstev, slouží pouze pro komunikaci mezi fyzickou vrstvou UE a Node B.



Obrázek 2.36: Přehled fyzických kanálů

Vyhrazené pro jednoho uživatele

DPCCH – Dedicated Physical Control Channel se vysílá současně s DPDCH, slouží pro přenos informací o stavu fyzické vrstvy pro optimalizaci spojení (power control atd...).

Společné fyzické kanály potřebné pro řízení systému, pro více uživatelů současně

CPICH – Common Pilot Channel je používán k vysílání nepřetržitě definovaného vzorku pro identifikaci skramblovacího kódu Node B, zároveň slouží pro synchronizaci.

SCH – Synchronization Channel vyžaduje UE při hledání buňky a počáteční synchronizaci, skládá se z primárního a sekundárního subkanálu.

AICH – Acquisition Indicator Channel pro přístupovou proceduru PRACH.

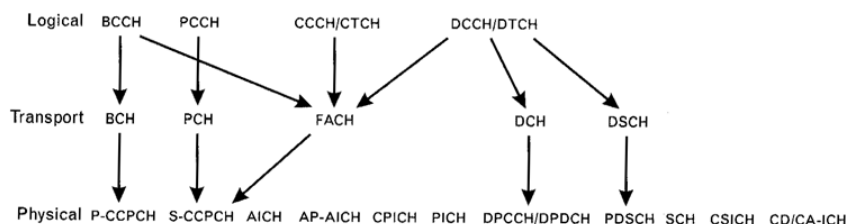
CSICH, AP-AICH, CD/CA-ICH – CPCH Status Indicator Channel, Access Preamble-Acquisition Indicator Channel, Collision Detection/Channel Assignment - Indicator Channel jsou kanály pro přístupovou proceduru pomocí PCPCH.

PICH – Page Indication Channel přenáší indikátory přítomnosti pagingových zpráv na PCH. Slouží k podpoře DTX.

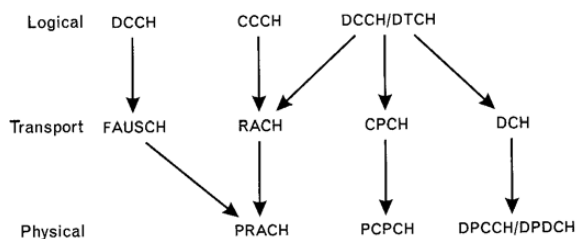
V systému GSM byly všechny logické kanály mapovány do fyzického kanálu, který tvoří 1 timeslot na daném frekvenčním kanálu. UMTS obsahuje několik fyzických kanálů a proto je nutné znát možné způsoby mapování jednotlivých typů logických a transportních kanálů do fyzického kanálu.

Shrnutí mapování kanálů pro UMTS FDD je na Obr. 2.37 pro downlink a na Obr. 2.38 pro uplink.

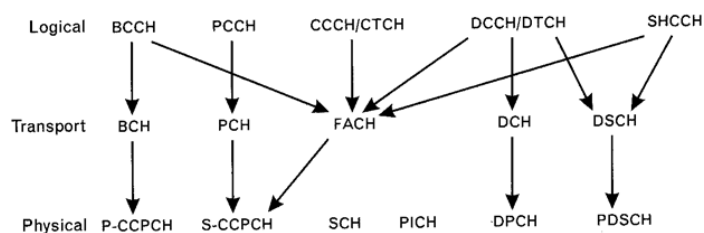
Shrnutí mapování kanálů pro UMTS TDD je na Obr. 2.39 pro downlink a na Obr. 2.40 pro uplink.



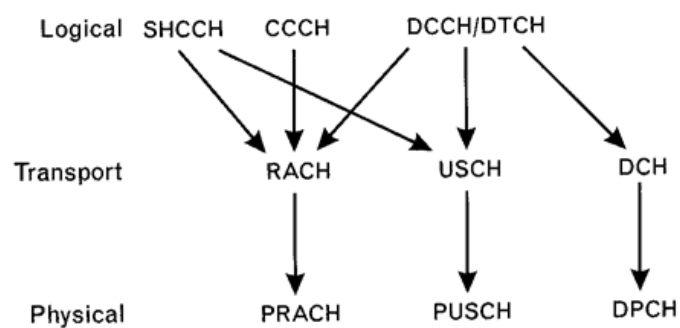
Obrázek 2.37: Přehled mapování kanálů UMTS FDD v downlinku [13]



Obrázek 2.38: Přehled mapování kanálů UMTS FDD v uplinku [13]



Obrázek 2.39: Přehled mapování kanálů UMTS TDD v downlinku [13]



Obrázek 2.40: Přehled mapování kanálů UMTS TDD v uplinku [13]

2.6.5 Kanálové kódování

Kanálové kódování patří do funkcí fyzické vrstvy, která zajišťuje přizpůsobení datového toku pro přenos bezdrátovým kanálem. Další funkce fyzické vrstvy ukazuje následující přehled:

- mapování transportních kanálů
- multiplexování transportních kanálů
- rozprostírání a derozprostírání
- modulace
- řízení výkonu vysílaného signálu

Tabulka 2.4: Přehled použitých zabezpečovacích kódů v UMTS

Transportní kanál	Kódovací schéma	Kódový poměr
BCH	Konvoluční kódování	1/2
PCH		
RACH		
CPCH,DCH DSCH,FACH		1/2, 1/3
	Turbo kódování	1/3
	Bez kanálového kódování	

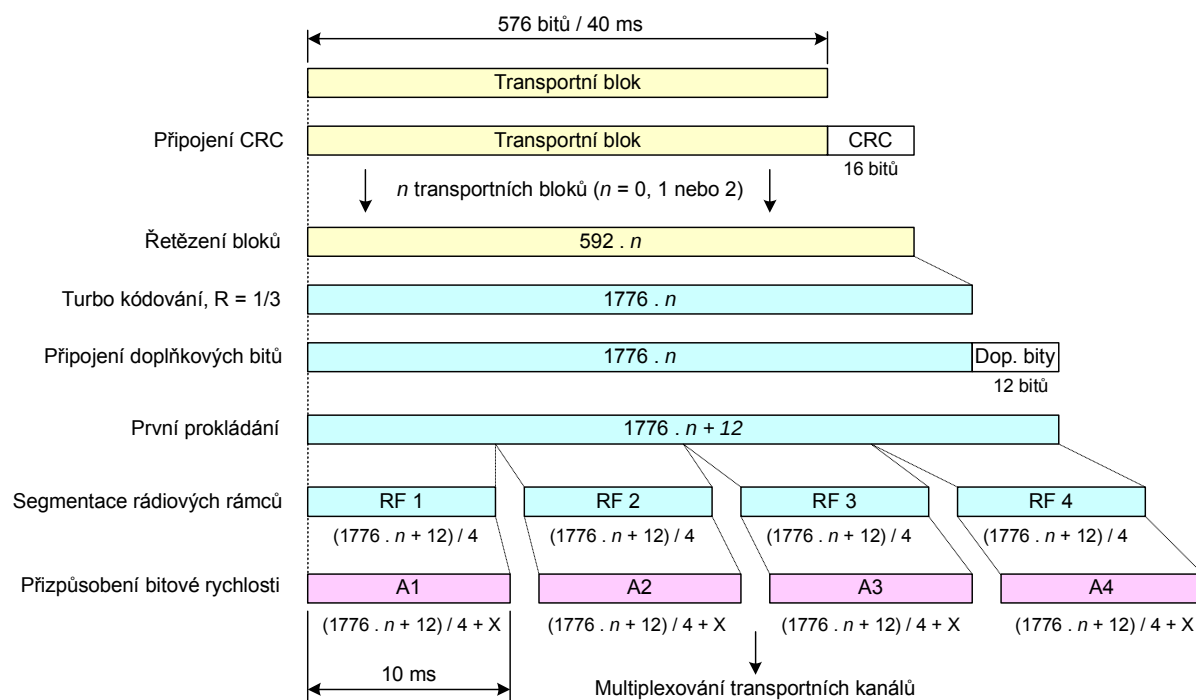
Kanálové kódování systému UMTS umožňuje měnit použité schéma zabezpečení podle podmínek v přenosovém kanálu a podle důležitosti přenášené informace. Používají se konvoluční a turbo kódy. Ve speciálních případech se přenášená informace nekóduje vůbec. Přehled kódů naleznete v Tab. 2.4.

Fyzická vrstva transformuje transportní kanály pro přenos ve fyzických kanálech. Transformace používá tzv. CCTrCH kanál (Coded Composite Transport Channel). CCTrCH kanály mají konstantní přenosovou rychlost, která je stejná jako bitová rychlost na fyzickém rozhraní.

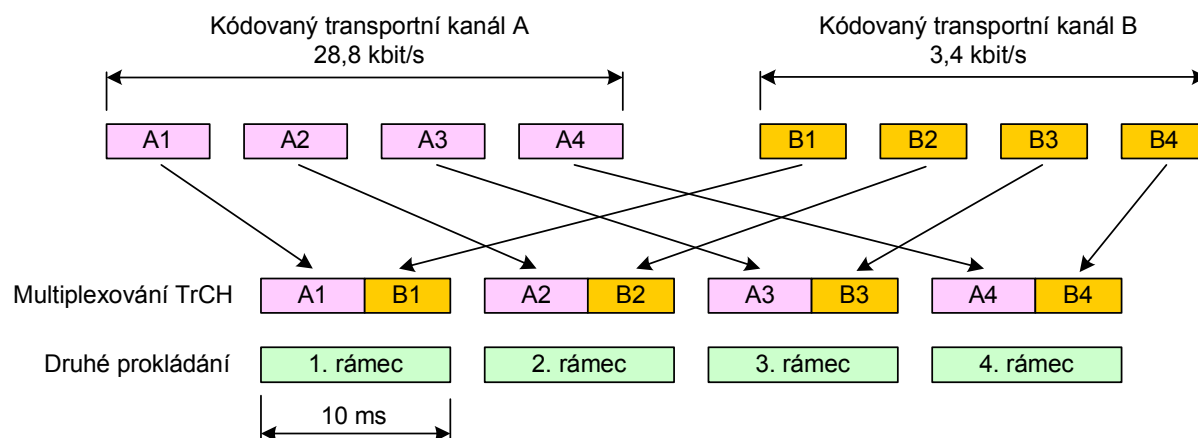
Transportní kanály jsou před mapováním do fyzických kanálů multiplexovány, takže k účastníkovi lze současně přenášet různé transportní kanály = různé služby s různou rychlostí.

Výstupem z fyzické vrstvy je jeden rádiový rámec, který se skládá z 15 timeslotů. Jeho struktura je na Obr. 2.43 pro uplink, na Obr. 2.44 je rádiový rámec pro downlink.

- v uplinku se přenáší vždy DPCCCH a DPDCH současně, jsou odlišeny OVFSF
- DPDCH má proměnlivou hodnotu SF, změna vždy po 10 ms
- DPCCCH slouží pro řízení systému
- SF je vždy 256, bitová rychlost je 15 kbits^{-1}
 - Pilot - definovaný vzorek bitů pro měření rádiového prostředí (SIR) a pro potřeby Power Control



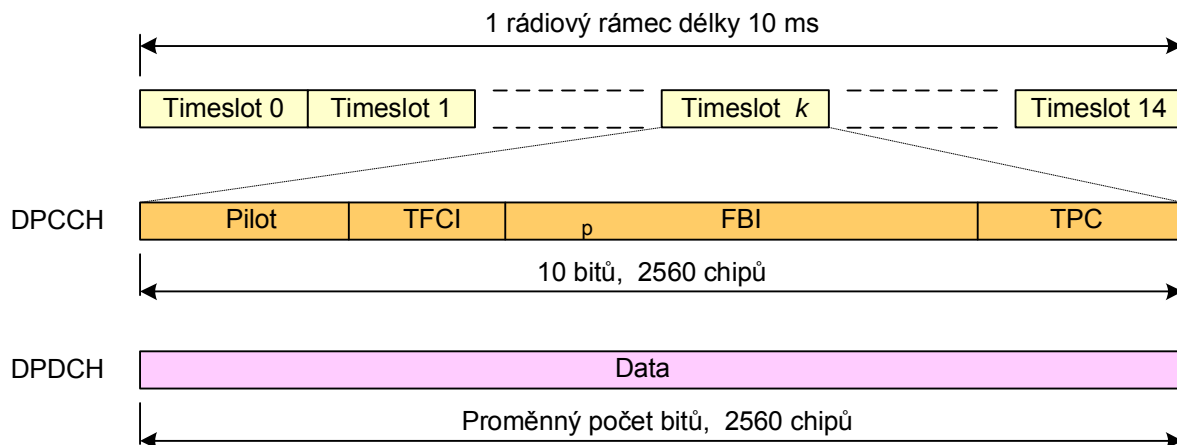
Obrázek 2.41: Kanálové kódování



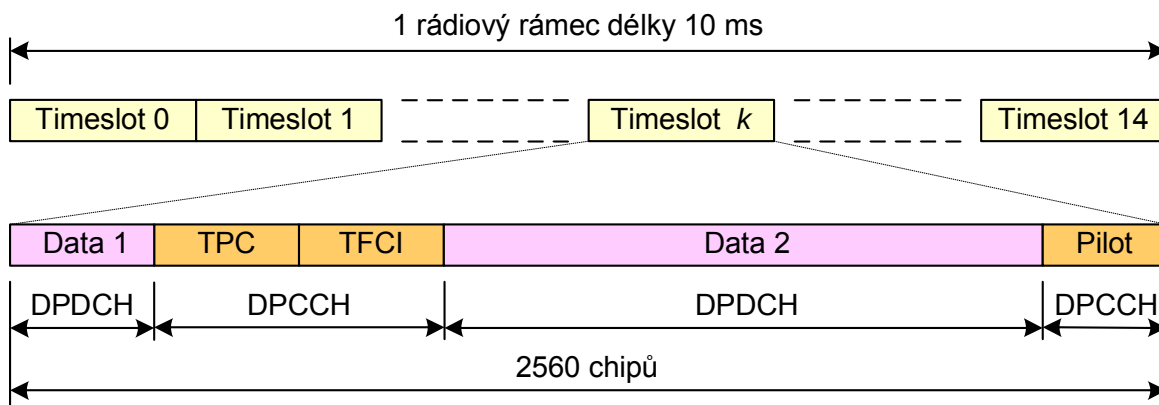
Obrázek 2.42: Kompozitní kanály

- FTCTI Transport Format Combination Identifier informace o transportních formátech
- FBI Feedback Information pro procedury vyžadující zpětnou vazbu z UE do UTRAN
- TPC Transmit Power Control - řízení výkonu v Closed Loop

- rozdělení DPDCH a DPCCH do časového multiplexu



Obrázek 2.43: Rádiový rámeček pro uplink



Obrázek 2.44: Rádiový rámeček pro downlink

- pro DPDCH je opět proměnlivý SF $4 \div 512$
- v downlinku není přenášeno pole FBI kanálu DPCCH
- DTX se uplatňuje pouze pro DPDCH, nelze aplikovat na DPCCH (systémové informace)

2.7 High Speed Downlink Packet Access HSDPA

HSDPA se stala součástí standardu v revizi Release 04. Je to technologie pro poskytování datových služeb s nejvyšší přenosovou rychlostí v dostupných sítích 3G. Rychlé datové přenosy pomocí HSDPA, jak již z názvu vyplývá, jsou dostupné pouze v downlinku. Release 05 obsahuje HSUPA High Speed Uplink Packet Access, který zavádí obdobné principy i pro přenos dat v uplinku.

- UMTS neumožňuje rychlé přidělování DCH kanálu (cca 500 ms),
- proto zahrnuje DSCH (Dedicated Shared Channel) pro časový multiplex více uživatelů,
- HSDPA zavádí nový typ sdíleného transportního kanálu v downlinku HS-DSCH (High Speed Downlink Shared Channel),
- další inovací je AMC (Adaptive Modulation and Coding),
- zavádí kratší TTI (Transportation Time Interval), změna z 10 ms na 2 ms,
- Hybrid ARQ s využitím Node B - nezávisle na RLC (snížení latence o přenos do RNC)
- kombinace klasického ARQ (opakování přenosu paketu) a Incremental Redundancy
- adaptace podle rádiového kanálu
- přesun plánování paketů z RNC do Node B

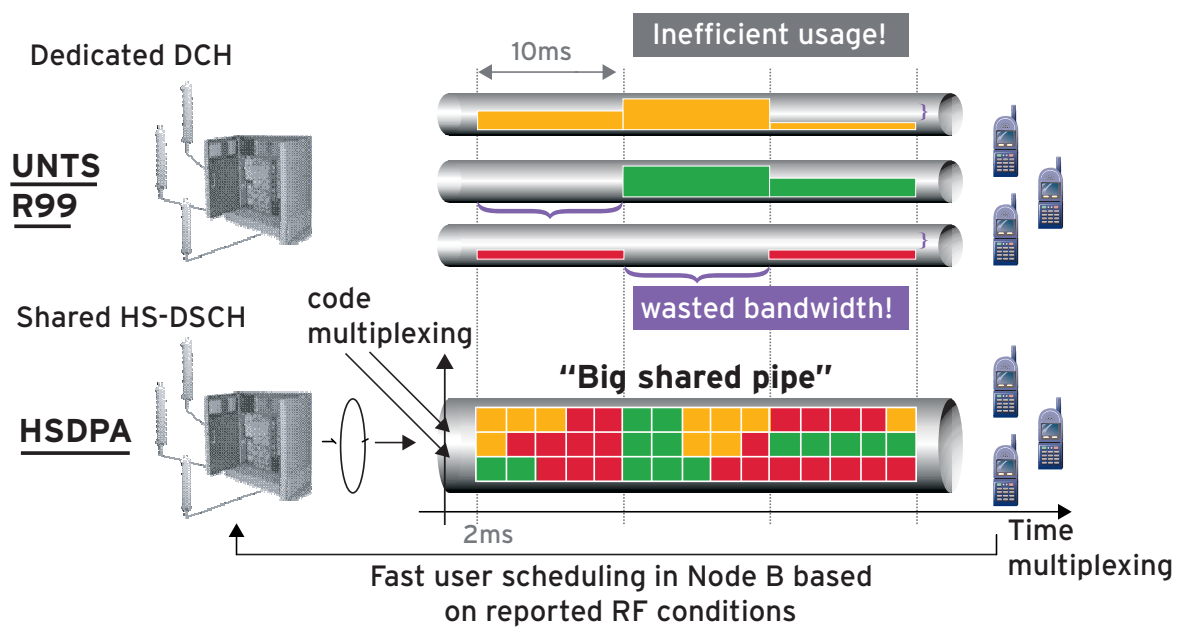
HS-DSCH

- rozdělení TTI na tzv. Subframes (2 ms)
- zajišťuje rychlejší AMC
- kratší čas přenosu = menší zpoždění mezi UE a Node B
- během TTI je využito SF 16
- všechny kódy lze využít pro jednoho uživatele nebo rozdělit pro více uživatelů
- řídicí kanály pro HS-DSCH:
 - HS-SCCH přenos parametrů ARQ, informací o TTF, SF 128
 - HS-DSCH - řídicí kanál pro ARQ - zasílání ACK/NACK, SF 256

Adaptive Modulation and Coding

- na základě vyhodnocení rádiového prostředí dochází k optimalizaci
 - použité modulace
 - použitých kódů
 - kódování (turbo kodér s tečkováním a Rate Matching)
 - korekce vysílaného výkonu pro jednotlivé kódy pomocí CQI feedback z UE

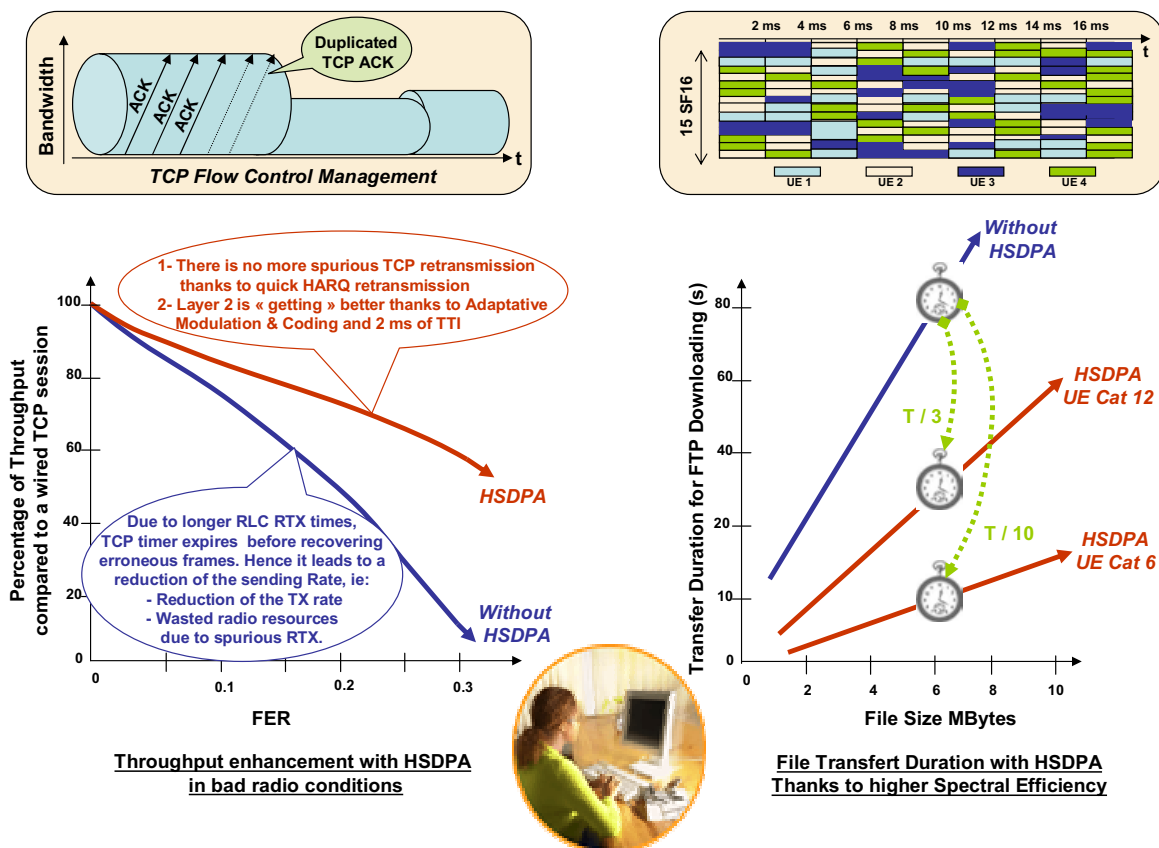
Hybrid ARQ



Obrázek 2.45: Kanály definované pro HSDPA [internet]

HS-DSCH Category	Max number of HS-DSCH codes (SF16) received	Minimum inter TTI interval	Modulation	Max peak rate
Category 1	5	3	QPSK & 16-QAM	1.2Mbps
Category 2	5	3	QPSK & 16-QAM	1.2Mbps
Category 3	5	2	QPSK & 16-QAM	1.8Mbps
Category 4	5	2	QPSK & 16-QAM	1.8Mbps
Category 5	5	1	QPSK & 16-QAM	3.6Mbps
Category 6	5	1	QPSK & 16-QAM	3.6Mbps
Category 7	10	1	QPSK & 16-QAM	7.3Mbps
Category 8	10	1	QPSK & 16-QAM	7.3Mbps
Category 9	15	1	QPSK & 16-QAM	10.2Mbps
Category 10	15	1	QPSK & 16-QAM	14.4Mbps
Category 11	5	2	QPSK only	900kbps
Category 12	5	1	QPSK only	1.8Mbps

Obrázek 2.46: Princip AMC [internet]



Obrázek 2.47: Hybrid ARQ [internet]

2.8 Radio Resources Management a jejich optimalizace

2.8.1 RRC v UMTS

Radio Resources Control RRC zahrnuje procedury pro řízení přidělování rádiových zdrojů. Rádiovými zdroji se rozumí např. fyzický kanál, vysílaný výkon, rozprostírací kód.

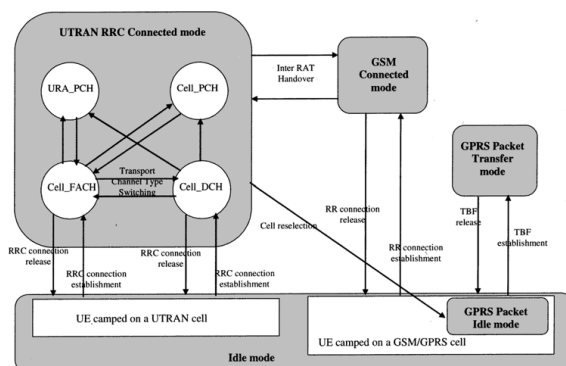
Základní funkce RRC jsou:

- Session Management,
- Connection Management,
- Mobility Management,
- GPRS Mobility Management.

Řízení rádiových zdrojů se provádí pomocí zpráv vyšších vrstev (4. až 7. vrstva). Pravidla pro tyto zprávy lze shrnout do následujících bodů:

- zprávy (předávané z vyšších vrstev nebo generované v RRC) jsou předávány do nižších vrstev systému pomocí tzv. Signalling Radio Bearers

- tyto "nosiče" specifikují typ, vlastnosti, charakteristiku logických, transportních a fyzických kanálů, které budou použity pro přenos informace
- Například SRB#0 určuje přenos po logickém kanálu CCCH, přenáší se počáteční informace pro sestavení spojení RRC, používá se RACH transportní kanál na downlinku a FACH na uplinku



Obrázek 2.48: Stavy RRC [25]

User Equipment je během připojení do sítě v některém z definovaných stavů, přičemž jsou možné pouze přechody mezi určitými stavy, které jsou způsobeny nějakou z událostí. Základní rozlišení stavu UE je na Dedicated (Connected) nebo Idle Mode. Pokud je UE v Idle Mode $\Leftrightarrow$ nemá přiřazené žádné RR.

Popis stavů UTRAN RRC Connected:

Cell_DCH – v tomto stavu je vytvořen DCH v obou směrech, tj. v downlinku i uplinku, může být přenášena signalizace i data mezi sítí a terminálem. Sít' zná polohu UE v buňce, může dojít k handoveru, případně k uvolnění ze stávající buňky a v případě Soft HO připojení k sousední buňce.

Cell_FACH – Terminál nemá sestavený DCH, takže komunikace se sítí může probíhat pouze skrze RACH nebo CPCH v uplinku a přijímat pouze FACH kanál v downlinku. V některých případech může být vytvořen logický kanál DCCH pro přenos signalizace a DTCH pro přenos dat. Stejně jako v předchozím stavu je známa poloha UE. K přechodu do Cell_FACH může dojít z Idle módu (žádost o spojení) nebo z Cell_DCH v případě, že nastala dlouhá prodleva při přenosu (web browsing) - uvolnění DCH, optimalizace sítě.

Cell_PCH – V tomto stavu terminál nemůže vysílat v uplinku, pouze přijímat broadcast nebo paging informace. V případě přechodu do jiné buňky dochází k proceduře Cell Reselection, stanice přechází do Cell_FACH, po ukončení procedury se vrací do Cell_PCH, sít' má informaci o poloze UE v rámci buňky.

URA_PCH – Stejně jako při stavu Cell_PCH, sít' nemá informaci o poloze UE v buňce, ale pouze v registrační databázi, při změně buňky pod stejnou databází nedochází k Cell Reselection proceduře.

2.8.2 Procedury a funkce RRC

Procedury pro RRC Connection Management Přenos systémových informací – tato procedura umožňuje přenos systémových zpráv z UTRAN k UE v dané oblasti pomocí System Information Block (SIB) s číslem 1-18. Tyto bloky jsou periodicky přenášeny pomocí BCCH. Blok označovaný jako Master Information Block obsahuje referenční informaci o ostatních blocích, měl by být dekodován jako první po přepnutí UE do jiné buňky (obsahuje tagy na změněné SIB)

Paging procedura pro přenos Paging informace k danému UE v Idle módu nebo Cell_PCH nebo URA_PCH. Nastává v případě MTC, Cell Update, session connection, ...

RRC Connection – pro požadavek UE na sestavení RRC spojení z Idle modu. Procedura začíná zprávou Connection Request mapovanou do logického CCCH a přenášeného pomocí RACH. UE se identifikuje (IMSI, TMSI) a předává důvod žádosti o spojení (MOC, přenos signalizace vyšších vrstev, ...). Požadavek může být přijat nebo odmítnut, přenáší se zpráva po CCCH mapovaném do FACH.

RRC Release – je generováno sítí pro ukončení spojení RRC. Terminál potvrzuje ukončení spojení RRC

Přenos informací o možnostech UE Podpora různých kanálů, typů přenosu, ...

Sestavení a rozpojení signalizace mezi UE a CN – slouží pro přímý přenos zpráv mezi CN a UE = signalizační zprávy přenášené v rovině Non Access Stratum v uplinku i downlinku

Přenos signalizace mezi UE a CN

Řízení zabezpečení – procedura pro zahájení šifrování dat mezi terminálem a UTRAN nebo pro restartování šifrovacích algoritmů s novými parametry. Rovněž slouží pro kontrolu integrity signalizačních zpráv

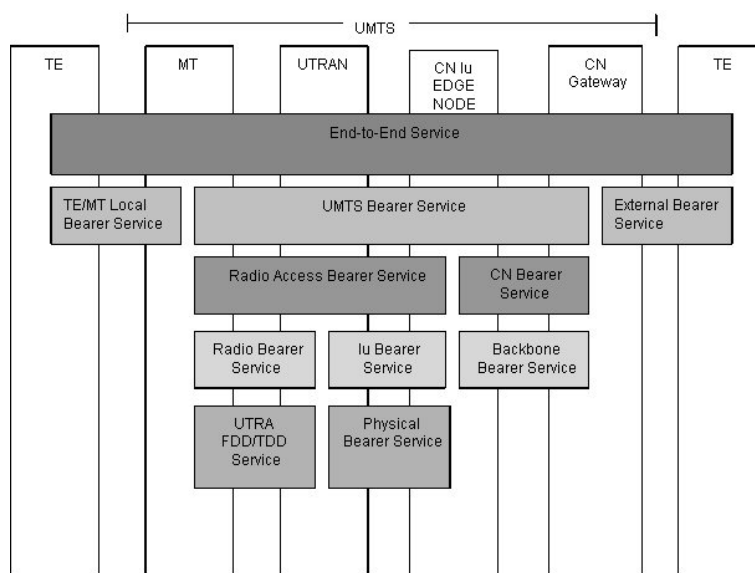
Ověření objemu přenesených dat – pro ověření stejného objemu dat ve zprávách při RRC sestavení spojení (zabránění změny signalizace třetí stranou)

Inter RAT handover – jestliže je UE připojen pomocí jiné rádiové technologie (GSM) a chce se připojit pomocí UTRAN

Radio Bearer Control procedury Bearer Service

- je to "nosná služba", někdy "nosič služby" definovaná mezi dvěma rozhraními, která slouží k přenosu užitečných dat
- Radio Bearer Service je definována mezi UE a RNC

Sestavení a rozpojení Radio Bearer – je to procedura, která sestavuje spojení z vyšších vrstev na straně sítě s mobilním terminálem, který již má přiděleny Radio Resources. Jedná se o přidělení rádiových prostředků pro uskutečnění služby sítě (hlas, data). V této proceduře se přenášejí kompletní informace o nastavení vrstev RLC/MAC/PFPHY, tj., jaké transportní a fyzické kanály budou použity pro přenos v uplinku i downlinku.



Obrázek 2.49: Bearer services v UMTS [25]

Rekonfigurace rádiových zdrojů – používá se pro změnu nastavení rádiového rozhraní během probíhající služby. Podle okamžitého stavu v rádiovém prostředí se vybere jeden ze tří typů rekonfigurace. Nejjednodušší je změna parametrů ve fyzickém kanálu - změna frekvence, výkonu nebo kódové sekvence použité pro přenos. Lze ji realizovat během HO, nevyžaduje změnu transportního kanálu. Druhým typem je procedura změny používaného transportního kanálu, která může vyvolat např. změnu fyzického kanálu nebo změnu TFCS (Transport Format Combination Set). Třetím typem je změna transportního a fyzického kanálu, která může vyvolat změny ve vrstvě RLC nebo MAC přepínáním různých logických kanálů.

RRC connection Mobility – tyto procedury slouží pro zajištění rekonfigurace systému (změnu rádiových prostředků) pro daný UE při změně geografické polohy dle jeho aktuální polohy a stavu RRC

Informace o UTRAN mobilitě – slouží pro přidělení nové RNTI (Radio network Temporary identity) nebo pro předávání nových informací o mobilitě, je iniciována sítí.

Cell a URA update – procedury při změně buňky, používají se pro stavy Cell_FACH a Cell_PCH. URA update se používá ve stavu URA_PCH při změně registrační databáze - změna RNTI pro terminál.

Active Set Update – pro UE, které jsou v Cell_DCH a používají Soft HO, je to změna aktivních Node B.

Hard HO – je to procedura pro změnu frekvence kanálu - inter frequency HO.

Inter RAT HO – procedura pro změnu RAT (GSM - UMTS) nebo pro Cell Reselection zahrnující změnu RAT.

Procedury pro měření – slouží pro RRM, pro optimalizaci využívání RR a zachování QoS u daných terminálů. Rozlišují se podle měřeného objektu (buňka, transportní kanál, fyzický kanál), podle typu použití (periodické opakování, jedna realizace), dále na acknowledged nebo unacknowledged. Používá se pouze pro UE ve stavu Cell_DCH nebo Cell_FACH. Typů měření je velké množství, rozdělují se do několika skupin:

Intra Frequency měření – Používá se v downlinku pro fyzický kanál v buňkách se stejnou frekvencí (buňky z Active Set). Měří se pomocí CPICH, parametry E_c/N_0 , ztráty šířením ...

Inter Frequency měření – stejná měření jako v předchozím případě, ale pro fyzické kanály v buňkách s jinou frekvencí než buňky z Active Set

Měření Inter RAT – měří se v buňkách ostatních systémů (GSM/GPRS) a jsou nutná k rozhodování o Inter RAT HO

Měření objemu provozu – měření obsazení RLC bufferu v uplinku

Měření kvality – např. měření transport block error rate v downlinku

Interní měření UE – měření přijatého výkonu a RSSI (Received Signal Strength Indicator), vysílaného výkonu, měření časových zpoždění atd...

Obecné procedury RRC – jsou definovány pro případy, kdy dojde k výpadku části přenášené informace:

- výběr počáteční identity pro RRC Connection Establishment
- akce pro přechod z Dedicated do Idle Mode
- Open Loop Power Control, dokud není sestaven DPCCH v uplinku
- akce pro přechod mezi "out of service area" a zpět do "in service area"
- kritéria pro detekci poruch v rádiovém spoji a jejich řešení
- údržba čísel hyperrámců pro šifrování
- výběr PLMN
- výběr PRACH

2.8.3 RR Management

Radio Resource Management používá pojem RRU Radio Resource Unit:

- pro FDMA je jednotka RRU definována jako šířka kanálu,
- TDMA má RRU definovanou jako jeden timeslot v jednom kanálu (GSM 4,615 ms v kanálu se šířkou pásma 200 kHz),
- CDMA má RRU definovanou pomocí kódové sekvence, frekvencí nosné a výkonovou úrovní. Vysílaný výkon se mění v závislosti na OVSF a úrovni interferencí.

Radio Network Planning – základní koncept rádiového plánování lze popsat



Obrázek 2.50: RRM - rozdílné požadavky [22]

- počet uživatelů, kteří budou využívat služby sítě - potřebný počet základnových stanic
- velikost území, na kterém bude podporována služba
- požadovaná přenosová rychlost - čím větší požadavky, tím více rádiových zdrojů musí být dostupných
- požadovaná QoS - opět vzrůstá požadavek na větší množství rádiových zdrojů
- je nutná optimalizace RR, protože jsou omezené možnosti přidělování a mohlo by docházet ke snížení QoS
- u sítě 2G převažovaly hlasové služby, které lze modelovat pomocí teorie hromadné obsluhy (Erlang)
- sítě 3G jsou navrženy pro podporu datových služeb, kde je složitější modelování zátěže

Funkce RRM Admission Control – řízení přístupu - rozhoduje o sestavení, případně rekonfiguraci rádiových nosičů. Je založena na měření provozu v síti a množství interferencí (nemůže dojít ke zhoršení QoS pro stávající účastníky). Admission Control musí být nastaveno "tak akorát" - příliš volné způsobí vzrůst interferencí, příliš striktní zabránilo zákazníkům komunikovat. Pro uplink i downlink jsou samostatné algoritmy, v downlinku je omezujícím faktorem množství OVFS,

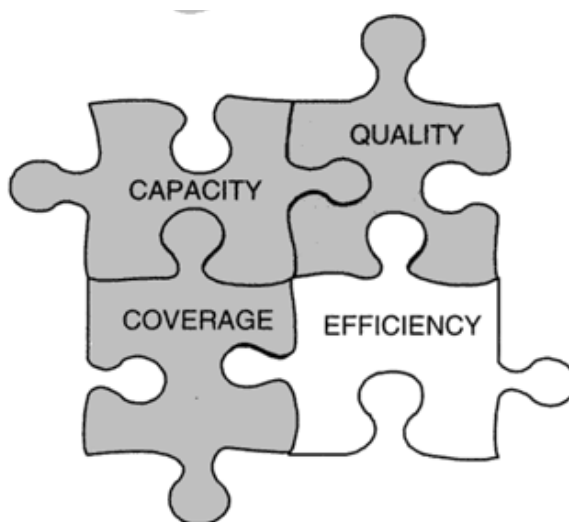
Congestion Control – řízení zatížení je důležité pro dynamické změny v síti (velké množství UE provede HO). Musí zajistit dostatečné QoS při prudkém zvýšení interferencí (částečně lze korigovat pomocí Admission Control)

Code Management – zajišťuje správu OVFS kódů pro optimální rozdělení kódového proudu mezi jednotlivé UE pro zajištění ortogonalitu mezi UE. Je nutné zajistit správné využití kódů, aby nedošlo k blokování kódů.

Handover – má za úkol udržovat optimální rozložení Active Set (buněk, ke kterým je UE současně připojen). Strategie HO je založena na třech bodech



Obrázek 2.51: RRM - plánování sítě [22]



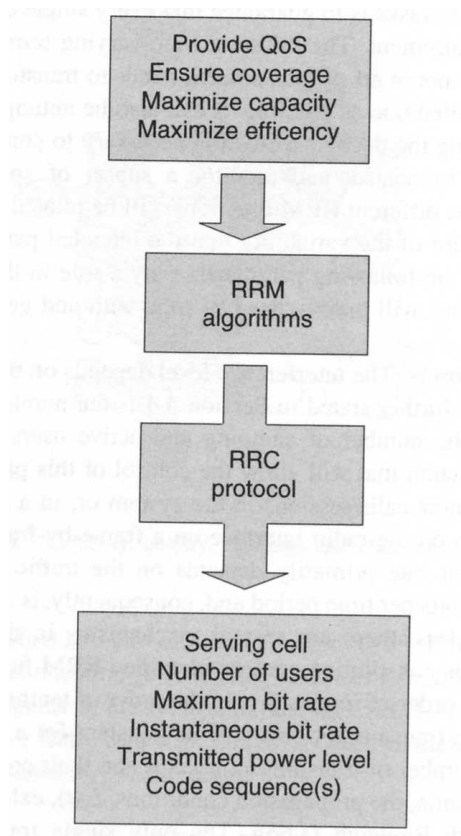
Radio Resource Management

Obrázek 2.52: RRM - optimalizace sítě [22]

- měření
- rozhodnutí
- vykonání

Packet Scheduling pro optimální vytížení DSCH kanálu pro přenos dat - multiplexování paketů od různých uživatelů

Power control viz předcházející přednášky



Obrázek 2.53: Cíle RRM v UMTS [22]

2.8.4 Třídy QoS Quality of Service

Conversational Class – požadavek na nízkou prodlevu mezi zdrojem a příjemcem, maximální přípustné zpoždění je dáno vnímáním hlasu a videa lidskými smysly (nesmí být příliš velká prodleva), typicky hlasové služby, video hovory.

Streaming Class – zpoždění vzniklé při přenosu může být větší, ale musí být dodržen interval mezi pakety (vzorky), aby nedocházelo ke kolísání obrazu.

Interactive Class – třída pro interaktivní služby - typicky surfování.

Background Class – služby na pozadí lze charakterizovat pomocí přenosu SMS, kdy prodleva nehraje velkou roli, nebo u přenosu dat na pozadí (příjemce nepožaduje určitý okamžik doručení).

3 Bezdrátové sítě PAN 802.15

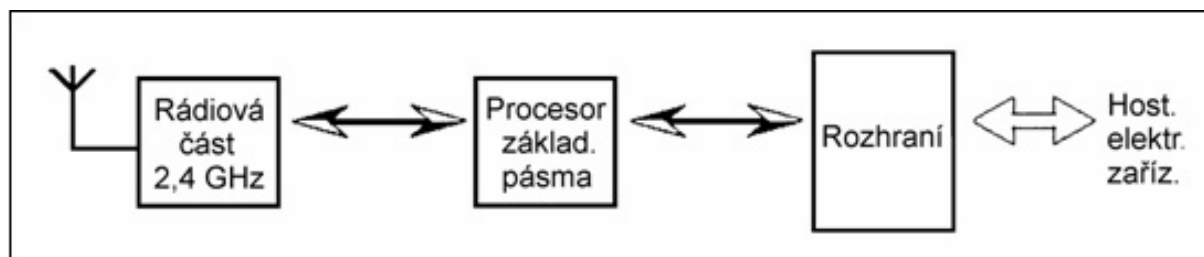
Bezdrátové sítě pro osobní použití se začaly rozvíjet v devadesátých letech minulého století. Jsou primárně určeny pro vytváření sítí s malým počtem uzlů a malým dosahem, jak již vyplývá z jejich názvu. Typicky se používá několik desítek až stovek uzlů, s dosahem desítek metrů. Maximální počet uzlů se pohybuje v řádu desítek tisíc a stovek metrů.

Tyto sítě pracují v bezlicenčním pásmu ISM okolo 2,4 GHz (Industrial, Science and Medicine Band), přesný frekvenční rozsah je $2,4 \div 2,4835$ GHz. Obecně lze říci, že PAN sítě pracují s rozprostřeným spektrem, a to buď metodou FHSS nebo DSSS.

3.1 Standard 802.15.3 Bluetooth

Systém tvoří malé síťové struktury, označované názvem pikonet („pikosít“), která může obsahovat až osm terminálů. Každý terminál může být součástí libovolného elektronického zařízení. Pokud je hostitelské zařízení mobilní telefon nebo PC, lze terminál použít pro přístup do sítě (LAN nebo např. GSM, UMTS atd...)

Každé mobilní nebo pevné elektronické zařízení, které je součástí této sítě, obsahuje malý terminál v němž je umístěn rádiový vysílač a přijímač (transceiver) včetně procesoru základního pásma (baseband processor), viz. *obr. 3.1*.

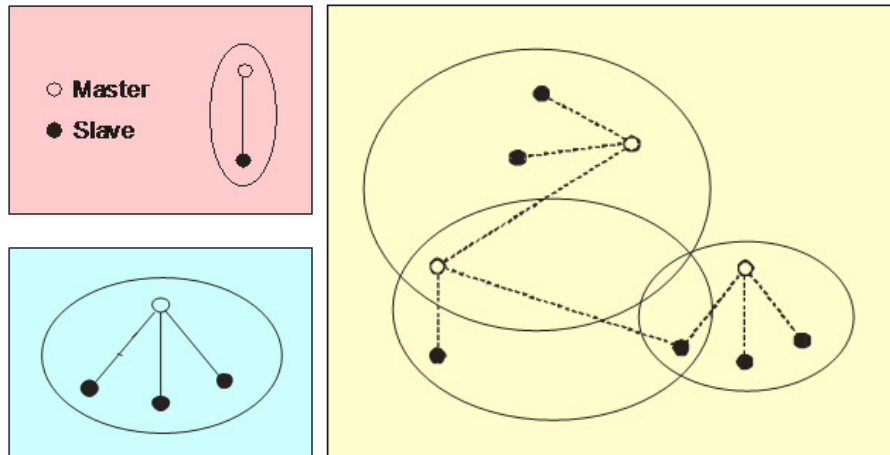


Obrázek 3.1: Blokové schéma zařízení Bluetooth

Procesor základního pásma řídí činnost rádiové části, komunikaci v síti i komunikaci s hostitelským zařízením, které jsou zabudovány přímo do různých hostitelských elektronických zařízení. Zařízení Bluetooth se rozdělují do tzv. tříd, každá třída má definovanou maximální výkonovou úroveň. Při nominálním výkonu jejich vysílačů 0 dBm je možné spojení na vzdálenost až 10 metrů. Při použití pomocných zesilovačů se dosah systému zvýší až na cca 100 metrů.

Základní topologie systému Bluetooth je „ad hoc“ tj. komunikace bod-bod (point to point), případně komunikace bod-více bodů (point to multipoint) (levá část *obr. 3.2*). Při této konfiguraci jsou si všechny terminály (stanice) rovnocenné a spojení funguje bez hierarchické struktury, pouze terminál, který sestavoval spojení je označen jako Master Device a ostatní zařízení jsou Slave Device. Hlavní funkcí Master device je inicializace vytváření sítě a identifikace účastníků, řízení synchronizace atd.. Tyto funkce jsou však dočasné a zanikají s ukončením spojení. Při následující komunikaci může funkci řídící jednotky (Master) plnit libovolný jiný terminál.

V případě, že v oblasti sítě pikonet pracují i jiné sítě pikonet, vzniká rozptýlená ad hoc topologie (scatter ad hoc, scatternet). Tato topologie je na *obr. 3.2* vpravo.



Obrázek 3.2: Topologie sítí Bluetooth

3.1.1 Fyzická vrstva PHY

Systém Bluetooth pracuje v pásmu ISM, frekvenční kanály jsou definovány pomocí vztahu

$$f_c = 2402 + n, \quad n = 0 \dots 78$$

Vzdálenost jednotlivých nosných v kmitočtových pásmech je tedy 1 MHz. Pro snížení vzájemného rušení s rádiovými systémy, které toto pásmo rovněž využívají (bezpečnostní systémy, mikrovlnné trouby, atd.), používá systém Bluetooth přenos s rozprostřeným spektrem, a to variantu s kmitočtovým skákáním nosné vlny FHSS (Frequency Hopping – Spread Spectrum).

Systém Bluetooth používá digitální modulaci GFSK, normovaná šířka pásma je

$$b = BT = 0,5.$$

V modulátoru se používá následující mapování:

- Logická jednička reprezentuje kladnou kmitočtovou odchylku
- Logická nula naopak zápornou kmitočtovou odchylku od nosné.

Frekvenční odchylka je v rozmezí 140 až 175 kHz.

Každá síť má svoji vlastní pseudonáhodnou sekvenci, která je dána řídicí jednotkou (master). Proto i fáze pseudonáhodného signálu je dána hodinovým signálem řídicí jednotky.

Počet přeskoků za jednu sekundu je

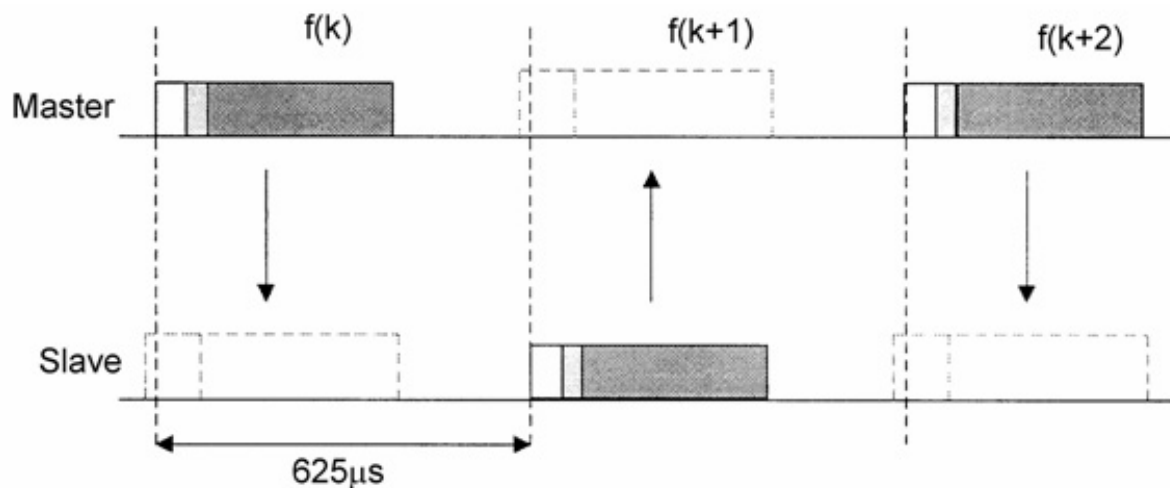
$$f_{FH} = 1600\text{s}^{-1}$$

takže doba trvání vysílání na jedné nosné je

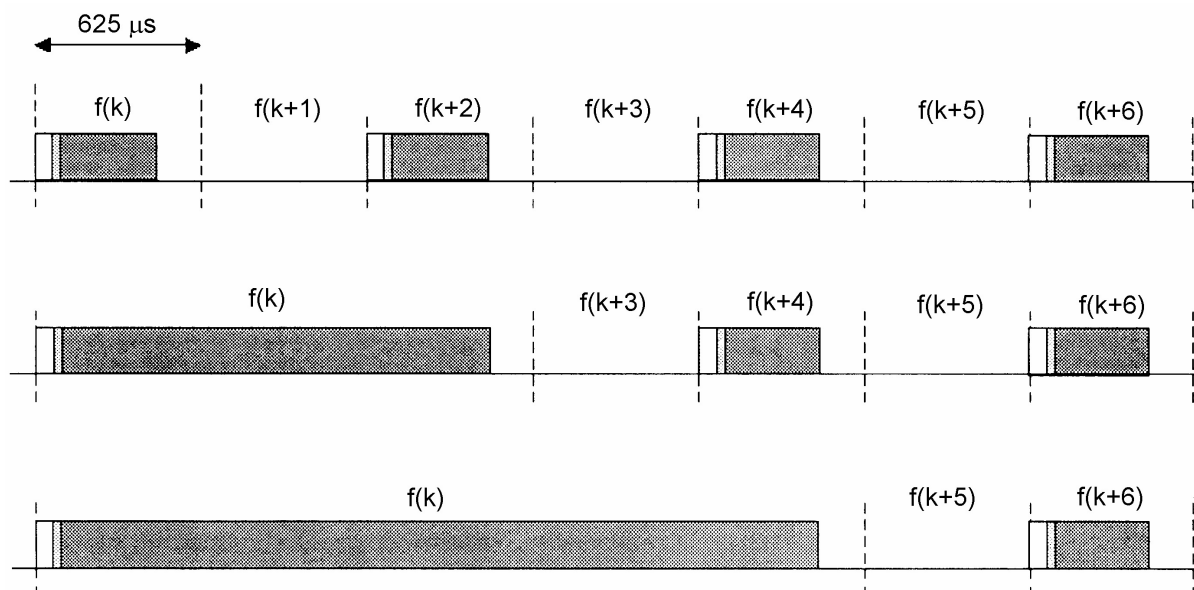
$$T_{FH} = \frac{1}{f_{FH}} = 625\text{ms}.$$

Každý rádiový kanál je rozdělen na časové úseky (time slot) délky 625 μ s. Timesloty jsou číslovány podle hodinového signálu řídicí jednotky. Rozsah číslování je od 0 do $2^{27} - 1$, takže jeden cyklus má délku 2^{27} timeslotů.

Pro komunikaci mezi terminály se používá časový duplex TDD. Řídící jednotka vysílá pouze v každém sudém timeslotu, zatímco podřízená jednotka vysílá pouze v každém lichém timeslotu. Časové závislosti mezi pakety jsou na *obr. 3.3*.

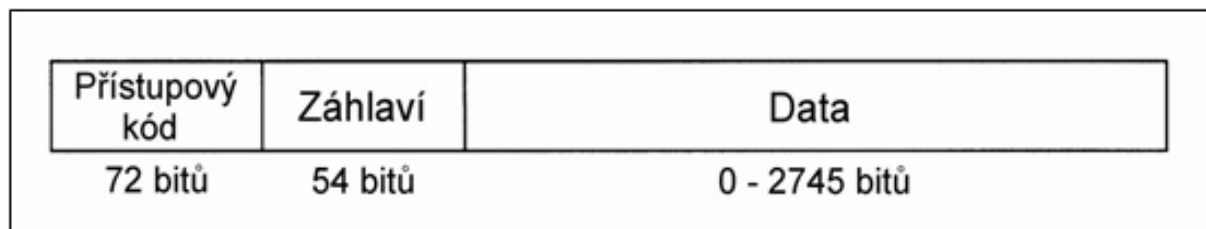


Obrázek 3.3: Časové řazení paketů v systému Bluetooth



Obrázek 3.4: Časové řazení dlouhých paketů v systému Bluetooth

Přenos se uskutečňuje pomocí paketů, které se „vkládají“ do timeslotů. Každý paket je vyslán na jiné nosné (skákání nosné). Jeden paket bývá přenášén obvykle v jednom timeslotu, avšak může být rozšířen tak, že je přenášén ve třech nebo pěti timeslotech. V tom případě je vysílání celého paketu provedeno na téže nosné viz. *obr. 3.4*.



Obrázek 3.5: Struktura paketů v systému Bluetooth

Používané pakety mají stejný formát, jako na obr. 3.5. Na začátku každého paketu je přístupový kód (72 bitů), za ním následuje záhlaví (54 bitů) a nakonec jsou přenášena uživatelská data (0-2745 bitů). Přístupový kód má pseudonáhodné vlastnosti a je unikátní pro každou síť pikonet. Je určen řídicí stanicí a slouží k synchronizaci a autorizovanému přístupu do sítě.

V záhlaví se přenáší 18 informačních bitů, které jsou zabezpečeny kanálovým kódováním FEC na výsledný počet 54 bitů. Obsahují adresu řízení přístupu na medium, informace o typu paketu, řídicí bity, bity pro ochranu (ARQ) a bity pro kontrolu chyb v záhlaví. Celková délka paketu může být v rozmezí 126 až 2871 bitů.

Přenos dat v systému může být synchronní nebo asynchronní. Při synchronním přenosu používaném pro hovorové signály probíhá komunikace s přenosovou rychlostí 64 kbit/s v každém směru. Při asynchronním přenosu datových signálů může být přenos asymetrický, kdy v jednom směru je maximální přenosová rychlost 723,2 kbit/s a v opačném směru 57,6 kbit/s, nebo symetrický, kdy v každém směru může být přenosová rychlost až 433,9 kbit/s.

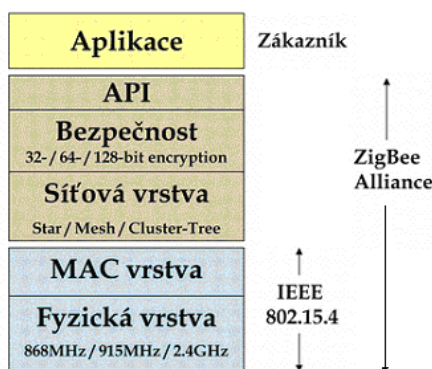
3.2 Standard 802.15.4

Mezinárodní standard IEEE 802.15.4 využívá základní vlastnosti fyzické (PHY) a linkové (MAC) vrstvy standardu IEEE 802.15 pro síť s malým dosahem (Bluetooth). Standard 802.15.4 specifikuje nízkorychlostní komunikační síť (cca $20 \div 200 \text{ kbit} \cdot \text{s}^{-1}$) pro osobní využití (PAN - Personal Area Network) s nízkou spotřebou energie a různými typy přenosu dat (periodický sběr dat ze snímačů, přenos dat vyvolaný událostí, ...).

Zařízení pod názvem ZigBee, o jehož vývoj a výzkum se stará organizace ZigBee Alliance, která dále spolupracuje s celosvětově uznávanými firmami jako Honeywell, Motorola, Philips, Samsung atd., je aplikační nadstavbou nad nejnižšími vrstvami MAC a PHY 802.15.4, jak je vidět z Obr. 3.6.

Standard definuje tři bezlicenční rádiová frekvenční pásma obsahující 27 kanálů (číslovaných 0-26), pracující s rozprostřeným spektrem, použitá technika je DSSS.

První hlavní pásmo je v pásmu ISM okolo frekvence 2,4 GHz. Zde je vytvořeno 16 kanálů s přenosovou rychlostí 250 kbit/s. Pásmo je určeno pro globální celosvětové použití.



Obrázek 3.6: OSI model komunikačního protokolu pro zařízení ZigBee

Vzhledem k odlišnostem mezi světovými technickými normami existují ještě další pásma. Druhé se střední frekvencí 915 MHz pro Ameriku a Austrálii s deseti kanály, přenosová rychlost je 40 kbit.s^{-1} (v Evropě je toto pásmo využito pro GSM).

V Evropě je dostupné ještě pásmo 868MHz s jedním kanálem o přenosové rychlosti 20 kbit/s .

V pásmu ISM se používá modulace O-QPSK (Offset QPSK), v pásmech okolo 900 MHz se používá modulace BPSK.

Obecně se dají šířky jednotlivých pásem popsat následujícími vztahy

$$\begin{aligned}
 f_c &= 868,3\text{ MHz}, & \text{pro } k &= 0 \\
 f_c &= 906 + 2(k-1)\text{ MHz}, & \text{pro } k &= 1, 2 \dots 10 \\
 f_c &= 2405 + 5(k-1)\text{ MHz}, & \text{pro } k &= 11, 12 \dots 26
 \end{aligned}$$

kde k je číslo kanálu.

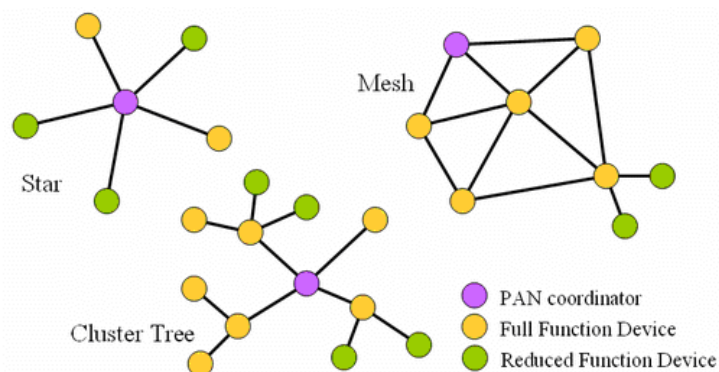
Tabulka 3.1: Frekvenční pásma a datové rychlosti

PHY	Frekvenční pásmo	Parametry modulace		Parametry signálu	
		Chip Rate	Modulace	Bit Rate	Symbol Rate
868	868-868,6	300	BPSK	20	20
915	902-928	600	BPSK	40	40
2400	2400-2483,5	2000	OQPSK	250	62,5

Standard IEEE 802.15.4 využívá při adresaci zařízení dva druhy adresovacích kódů, které mohou být dvojí délky, a to buď dlouhé 64-bitové nebo krátké 16-bitové. Lokální adresa zkráceného adresovacího kódu umožňuje v jedné síti umístit maximálně $2^n - 1$ zařízení, přičemž každá síť má svou vlastní PAN ID (identifikátor sítě ZigBee). O zakládání a chod sítě se stará centrální stanice - koordinátor. Ostatní zařízení mohou být konstruovány buď to jako směrovače k další stanici (zesilovače) nebo jako koncová zařízení. Koncová zařízení podle funkce dělíme na zařízení FFD (plně funkční zařízení - full function device), která mohou zastávat obě tyto

funkce nebo RFD (redukovaná funkční zařízení - reduced function device). RFD zařízení mohou být pouze ve funkci koncového zařízení (PAN coordinator). Toto rozdělení je logickým vyústěním, jednoho z hlavních požadavků sítě ZigBee a to co nejjednodušší funkce a co nejmenší spotřeba.

V těchto sítích se využívá tří typů topologií. Základní topologie je typu hvězda (star), kde jedno zařízení má řídicí funkci a koordinátora a ostatní zařízení mají funkci koncových zařízení. Dalším typem je topologie typu strom (cluster tree topology), kde opět jedno zařízení přebírá funkci koordinátora a ostatní zařízení funkci koncových zařízení, ale s tím rozdílem, že koncová zařízení pro komunikaci mezi sebou nepotřebují nutně využívat koordinátor. Poslední topologií je typ sítě (mesh), která je kompromisem obou předešlých typů. Její hlavní výhodou je flexibilita, to znamená, že jednotlivé sítě můžeme kombinovat. Jedna řídicí jednotka (koordinátor) může spravovat až 254 jednotlivých zařízení.



Obrázek 3.7: Topologie sítě ZigBee

ZigBee zařízení se dělí na dvě základní skupiny. Prvním typem jsou zařízení s plnou funkcí FFD (Full Function Device), druhou skupinou jsou zařízení s omezenou funkcí RFD (Reduced Function Device).

Tabulka 3.2: Srovnání ZigBee s ostatními systémy

System Standard Applikace	ZigBee 802.15.4 Monitorování PAN	Bluetooth 802.15.3 připojení periferií PAN	WiFi 802.11 data WLAN	GPRS/GSM hlas-data WAN
Životnost baterií (dny)	100-1000 i více	1-7	0,5-5	1-7
Velikost sítě	2e64	32		
Bit Rate (kbit/s)	20-250	720	≤ 54000	≤ 384
Dosah	30	1 ÷ 100	≤ 1000	≤ 35000

3.2.1 Fyzická vrstva PHY

PHY (fyzická vrstva) poskytuje vzájemný vztah a komunikaci mezi MAC (media access control) a fyzickým rádiovým kanálem pomocí RF (rádiové frekvence) hardware a firmware. Pojem PHY zahrnuje řídicí jednotku, které říkáme PLME (PHY layer management entity). Toto zařízení (entita) poskytuje vrstvě údržbu rozhraní během doby, kdy je vrstva volána (aktivní). PLME je také zodpovědná za údržbu databáze řízených objektů náležících k PHY. Tato databáze je označována jako PHY PAN (personal area network) informační základna (PIB).

PHY layer je zodpovědná za následující úkoly:

- aktivace a deaktivace rádiového spojení
- ED (energy detection - energická detekce) uvnitř aktuálního kanálu
- LQI (link quality indication - indikace kvality spojení) pro přijímací pakety
- CCA (clear channel assessment - určení volnosti kanálu) pro CSMA-CA
- výběr frekvenčního kanálu
- datový přenos a příjem

Při specifikaci PHY existuje několik protokolů (podklauzulí) této vrstvy, které ji popisují a ovlivňují. Uvažujeme u nich tři procesy (stavy) - požadavek (request), přijetí (confirm) a indikaci (indication). Jsou to PHY service a PHY management service, které dovolují transport hlavních příkazů mezi MLME (MAC sublayer management entity) a PLME, kterou popisuje PLME-SAP (service access points). Tedy PHY service popisuje PD-DATA a PHY management service PLME-SAP, kterou dále popisuje pět následujících funkcí:

- PLME-CCA (clear channel assessment)
- PLME-ED (energy detection)
- PLME-GET (obdržení)
- PLME-SET-TRX-STATE (nastavení stavu vysílače)
- PLME-SET (nastavení)

Další součástí vrstvy je takzvaný PPDU (protocol packet data unit) formát. Každé PPDU je popsáno následujícími částmi :

- synchronizační hlavička SHR, která dovoluje přijímacímu zařízení synchronizovat a udávat do bitového toku
- PHY hlavička, obsahující rámce o délce informace proměnné délky užitečných zařízení, která obsahuje podvrstva MAC

Problém rušení je zde řešený tak, že například kanál 13 je žádoucí kanál, nejbližší frekvenční kanály 12 a 14 jsou označeny jako sousední, kanály 11 a 15 za náhradní kanály. Kanály sousední musí být co nejvíce potlačeny na hodnotu 0dB oproti žádoucímu kanálu a náhradní kanály naopak dostatečně zesíleny, aby mohly žádoucí kanál nahradit. Kanály se nesmí navzájem ovlivňovat. Bezpečnost IEEE 802.15.4 nabízí různé úrovně autentizace, šifrování a integrity dat. Od nulového zabezpečení, přes přístupové seznamy až po autentizaci a šifrování s využitím od 32-bitového po 128-bitový AES (advanced encryption standard). Rozdílné možnosti zabezpečení umožňují výběr podle typu aplikace a podle požadavků na objem přijímaných či vysílaných dat, životnost baterie a procesní kapacity. Např. systém senzorů monitorujících mikroklima v lese nepotřebuje vysoké zabezpečení přenášených dat, takže místo bezpečnosti se bude zřejmě klást důraz na optimalizaci životnosti baterií a snížení nákladů na systém.

3.2.2 Vrstva MAC

MAC vrstva poskytuje vzájemný vztah mezi aplikační vrstvou a PHY vrstvou. MAC poskytuje služby přístupu k aplikační vrstvě přes tyto dvě skupiny funkcí : MAC Management service (nazývaný MAC layer management entity nebo-li MLME) a MAC Data service (nazývaný MAC Common part layer nebo-li také MCPS). MCPS poskytuje služby pro přenos dat mezi vrstvami MAC. MLME poskytuje služby pro přenos přes rozhraní vrstvy, jejíž funkce mohou být volány. MLME je také odpovědný za udržování databáze objektů náležících MAC vrstvě. Tato databáze je nazývána jako MAC layer PAN informační základna (PIB). MLME také poskytuje přístup k údržbě přenosu dat MCPS.

MAC layer zajišťuje a ovládá všechny přístupy k fyzickému rádiovému kanálu a je zodpovědná za následující úkoly

- tvoření síťových beacons pro koordinátora
- synchronizace beacons
- podpora PAN spojení a rozpojení
- zajištění zabezpečení zařízení
- řízení CSMA-CA mechanismů pro přístup k fyzickému kanálu
- ovládání a údržba GTS (guaranteed time slot-zajišťování časových bloků) mechanismů
- poskytování spolehlivého spojení mezi dvěma vrstvami MAC entit

MAC vrstva je specifikována řadou funkcí, které můžeme rozdělit do těchto čtyř základních skupin (typů)

- request - žádost je poslána z aplikační/síťové vrstvy k potvrzení, která je identifikována MAC vrstvou.
- indication - indikace je poslána z MAC vrstvy směrem nahoru. Tato událost může logicky souviset se vzdáleným požadavkem zařízení nebo může být způsobena vnitřní událostí v MAC.

- response - odezva je poslána z aplikační/síťové vrstvy do MAC k ukončení procedury, která byla volána jako první indikace.
- confirm jako první je potvrzení posláno z MAC vrstvy do aplikační/síťové vrstvy k přenosu jednoho i více předešlých skupinových servisních požadavků.

Literatura

- [1] 05.02, G. T. *Multiplexing and multiple access on the radio path*. Technical Specification Group GSM/EDGE, 1999.
- [2] AISSI, S., DABBOUS, N., PRASAD, A., R. *Security for Mobile Networks and Platforms*. Boston: Artech House, 2006. 312. ISBN 1-59693-008-X.
- [3] BENVENUTO, N., CHERUBINI, G. *Algorithms for Communications Systems and their Applications*. Chichester: John Wiley & sons, 2002. 1285 pages. ISBN 0-470-84389-6.
- [4] BURR, A. *Modulation and Coding for Wireless Communications*. Harlow: Pearson Education Ltd., 2001. 377. ISBN 0-201-39857-5.
- [5] CAI, J., GOODMAN, D. J. General Packet Radio Service in GSM. *IEEE Communications Magazine*. 1997, no. 10, p. 122 – 131. ISSN 0163-6804.
- [6] HALONEN, T., ROMERO, J., MELERO, J. *GSM, GPRS and EDGE Performance*. Chichester: John Wiley & sons, 2006. 407. ISBN 0-470-01684-9.
- [7] HANUS, S., FENCL, J., ŠTENČEL, V. *Bezdrátové a mobilní komunikace II*. Brno: VUT, 2005. 172 stran. ISBN 80-214-2817-1.
- [8] HANUS, S. *Rádiové a mobilní komunikace*. Brno: VUT, 2005. ISBN.
- [9] HANZO, L., LIEW, T. H., YEAP, B. L. *Turbo Coding, Turbo Equalisation and Space-Time Coding for Transmission over Fading Channels*. Chichester: John Wiley & sons, 2004. 748. ISBN 0-470-84726-3.
- [10] HEINE, G. *GSM Networks: Protocols, Terminology and Implementation*. Boston: Artech House, 1999. 416. ISBN 1-89006-471-7.
- [11] HEINE, G. *UMTS Signalling & Protocol Analysis UTRAN/UE*. Inacon GmbH, 2003.
- [12] KASERA, N., NARANG, N. *3G Mobile Networks*. New York: McGraw Hill, 1 edition, 2005. 570 pages. ISBN 0-07-145101-3.
- [13] KORHONEN, J. *Introduction to 3G Mobile Communications*. Boston: Artech House, 2006. 560. ISBN 1-58053-287-X.
- [14] LEE, W., C. Y. *Wireless & Cellular Telecommunications*. New York: McGraw Hill, 3 edition, 2005. 820 pages. ISBN 0-07-143686-3.
- [15] MORROW, R. *Wireless Network Coexistence*. New York: McGraw Hill, 3 edition, 2004. 445 pages. ISBN 0-07-051726-6.
- [16] NIEMI, V., NYBERG, K. *UMTS Security*. Chichester: John Wiley & sons, 2006. 273. ISBN 0-470-85314-X.

-
- [17] NOLDUS, R. *CAMEL Intelligent Networks for the GSM, GPRS and UMTS Networks*. Chichester: John Wiley & sons, 2006. 407. ISBN 0-470-01684-9.
- [18] PECHAČ, P. *Šíření vln v zástavbě*. Praha: BEN technická literatura, 2005. 109 stran. ISBN 80-7300-186-1.
- [19] PECHAČ, P., ZVÁNOVEC, S. *Základy šíření vln*. Praha: BEN technická literatura, 2007. 200 stran. ISBN 80-7300-223-7.
- [20] PIETRZYK, P. *OFDMA for Broadband Wireless Access*. Boston: Artech House, 2006. 250. ISBN 1-59693-044-6.
- [21] PROAKIS, J. *Digital Communications*. New York: McGraw Hill, 3 edition, 1995. 928 pages. ISBN 0-07-051726-6.
- [22] PÉREZ-ROMERO, J., SALIENT, O., AGUSTÍ, R., DÍAZ-GUERRA, M., A. *Radio Resource Management Strategies in UMTS*. Chichester: John Wiley & sons, 2005. 345. ISBN 0-470-02277-9.
- [23] SEURRE, E., SAVELLI, P., PIETRI, P. J. *EDGE for Mobile Internet*. London: Artech House, 2003. 230. ISBN 1-58053-597-6.
- [24] SMITH, C., COLLINS, D. *3G Wireless Networks*. New York: McGraw Hill, 2 edition, 2005. 695 pages. ISBN 0-07-226344-X.
- [25] SOLDANI, D., LI, M., CUNY, R. *QoS and QoE Management in UMTS Cellular Systems*. Chichester: John Wiley & sons, 2006. 460. ISBN 0-470-01639-6.
- [26] SOLEYMANI, M. R. GAO, Y., VILAIPORNSAWAI, U. *Turbo Coding for Satellite and Wireless Communications*. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2002. 214. ISBN 1-4020-7197-3.
- [27] VUCETIC, B., YUAN, J. *Turbo Codes Principles and Applications*. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2001. 314. ISBN 0-7923-7868-7.
- [28] WILSON, S., G. *Digital Modulation and Coding*. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1996. 678. ISBN 0-13-210071-1.
- [29] ZIEMER, R. E., TRANTER, W., H. *Principles of Communications Systems, Modulation and Noise*. New York: John Wiley & Sons, 5 edition, 2002. 637 pages. ISBN 0-471-36253-7.
- [30] ŽALUD, V. *Moderní radioelektronika*. Praha: BEN technická literatura, 2000. 652 stran. ISBN 80-86056-47-3.