

# Nejnovější vývojové trendy v mobilní komunikaci

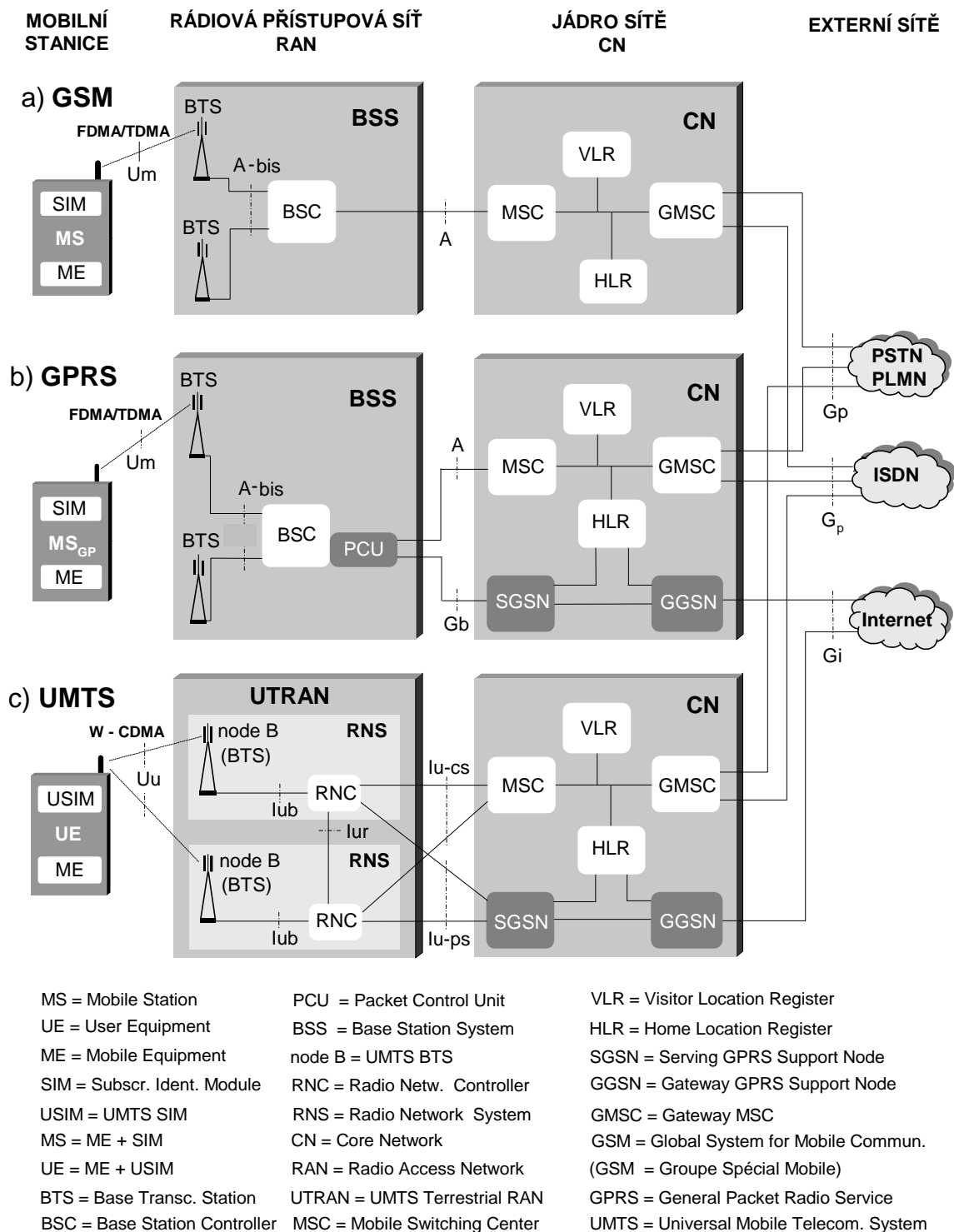
Doc. Ing. Václav Žalud, CSc, Katedra radioelektroniky

FEL ČVUT v Praze (tel.: 224352204, e-mail: [zalud@fel.cvuz.cz](mailto:zalud@fel.cvuz.cz))

## 1. Stručný přehled vývoje hlavních systémů pozemní mobilní komunikace

V posledních zhruba dvaceti letech náleží mezi nejrychleji se rozvíjející oblasti telekomunikací veřejná pozemní mobilní komunikace. Její nejdůležitější složkou jsou zatím veřejné **celulární telefony**, které zajišťují totální pokrytí daného území (státu, kontinentu), a to při nižší až střední intenzitě provozu. Ty se začaly dostávat do praxe již asi před dvaceti lety, a to nejprve v různých analogových variantách označovaných jako „první generace“ (1G). V roce 1992 se začíná v Evropě provozovat jednotný digitální celulární systém GSM „druhé generace“ (2G). Ten se vyznačuje efektivnějším využitím frekvenčního spektra, kvalitnějším přenosem signálů a možností realizovat kromě hlasových přenosů ještě datové přenosy se základní přenosovou rychlostí 9,6 kbit/s resp. 14,4 kbit/s, ve vylepšených variacích potom až cca 115 kbit/s (GPRS) a případně i 384 kbit/s (EDGE). Tyto vývojové stupně potom umožňují zavádění některých dalších nových služeb, zejména služby krátkých zpráv SMS a multimediálních zpráv MMS. V současné době se v nejvyspělejších státech však již začínají prosazovat celulární systémy třetí generace (3G), které kromě přenosu řeči a rychlých dat umožní i přenos živého videa a nejrůznějších multimediálních informací, a to rychlostí až 2 Mbit/s. V Evropě je to standard UMTS, který se však zřejmě uplatní i v jiných světových regionech. Souběžně s celulárními sítěmi se rozvíjejí i **bezšňůrové telefony** (evropský DECT aj), které sice neusilují o totální územní pokrytí, zato však mohou ve vybraných lokalitách zajišťovat až extrémně vysokou intenzitu provozu. Základní koncepce (architektury) standardu GSM (2G), jeho varianty GPRS (2<sup>1/2</sup> G) a UMTS (3G), jsou uvedeny na obr. 1. Standard GPRS vzniká z GSM doplněním o tři nové hardwarové bloky (PCU, SGSN a GGSN). Standard UMTS využívá zpočátku jádro sítě CN stejné s GPRS, jeho rádiová přístupová síť je však zcela nová. Kombinovaný přístup s frekvenčním a časovým dělením FDMA/TDMA, aplikovaný v sítích GSM/GPRS, je totiž u UMTS nahrazen přístupem s kódovým dělením W-CDMA, který je od prvních dvou zcela odlišný.

V posledních letech začala prudce narůstat také potřeba mobilní širokopásmové velmi rychlé komunikace, která by kromě výše uvedených služeb umožňovala výkonným přenosným počítačům (notebookům, kapesním počítačům PDA ap) rádiový přístup k rychlým fixním sítím, poskytujícím živé multimediální přenosy, velmi rychlý přístup na Internet apod. Uvedené potřeby sice částečně uspokojují celulární systémy, avšak svou maximální přenosovou



Obr. 1 Základní koncepce evropských celulárních standardů pro mobilní komunikaci: a) standard 2. generace GSM ( $f_b = 9,6/14,4$  kbit/s); b) standard 2,5 generace GPRS ( $f_b \sim 115$  kbit/s); c) standard 3. generace UMTS ( $f_b \sim 2$  Mbit/s ... 10 Mbit/s pro HSDPA)

rychlostí řádu stovek kilobitů nebo nejvýše několika málo megabitů za sekundu nejnáročnějším požadavkům na rychlost přenosu již nevyhovují. V tomto procesu proto začínají hrát mimořádně důležitou úlohu **rádiové (bezdrátové)**

**lokální síť W LAN.** Ty jsou schopné zajistit stacionárním, nebo pomalu se pohybujícím účastníkům ve vybraných lokalitách, vybavených tzv. přístupovými body, rádiové přenosy o rychlostech až několika desítek megabitů za sekundu. Zrychlujícím se tempem se budují také **rádiové a optické personální síť W PAN** (Wireless Personal Area Network), které jsou určeny hlavně k propojení nejrůznějších zařízení drobné elektronické výpočetní a kancelářské techniky, nacházejících se na jediném pracovišti uživatele. Specifickou předností některých sítí W LAN a W PAN je možnost pracovního módu „ad hoc“, kde celý systém obsahuje jen mobilní stanice. Ty potom musí umožňovat nejen vlastní účastnickou komunikaci, ale musí také zastupovat funkce fixní infrastruktury, jež zde prakticky neexistuje. Síť W PAN v módu ad hoc mají velkou výhodu snadného přemísťování s osobou uživatele a prakticky okamžité aktivace v nové personální lokalitě.

Koncem minulého desetiletí se začaly výrazně prosazovat dvě hlavní třídy standardů W LAN. Vývoj první z nich byl koordinován institutem IEEE (USA), přičemž úvodní verze IEEE 802.11b z roku 1997 využívá bezlicenční pásmo ISM (Industrial, Scientific, Medical) v okolí frekvence 2,4 GHz. Při aplikaci zdokonaleného přístupu se snímáním nosné vlny CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) umožňuje dosažení přenosových rychlostí až 11 Mbit/s. Další standard IEEE 802.11a využívá bezlicenční pásmo v okolí 5 GHz, kde díky přechodu na přenos s ortogonálním frekvenčním multiplexem OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) nabízí přenosové rychlosti až 54 Mbit/s. Druhá skupina standardů, s označením ETSI BRAN Hiperlan (High Performance Radio Local Area Network), vznikala pod patronací evropského telekomunikačního standardizačního institutu ETSI. Její poslední varianta Hiperlan2 potom umožňuje při aplikaci techniky OFDM rovněž přenos rychlostí až 54 Mbit/s. Standardu Hiperlan2 je značně podobný japonský standard HiSWAN (High Speed Wireless Access System).

## **2. Přenosové formáty v systémech pozemní mobilní komunikace**

V systémech pozemní mobilní komunikace 2G se uplatňují konvenční modulace s jedinou nosnou vlnou (GMSK a  $\pi/4$ -QPSK), v kombinaci s mnohonásobným přístupem FDMA/TDMA. Ty však vyžadují v pozemských rádiových kanálech s mnohocestným šířením korekci přenosových charakteristik těchto kanálů, realizovanou pomocí adaptivní ekvalizace, jejíž složitost při zvyšování přenosových rychlostí na cca 10 až 300 kHz neúnosně narůstá. Pro systémy 3G se ukazuje jako mnohem vhodnější širokopásmový přístup s kódovým dělením W-CDMA, založený na technice rozprostřeného spektra DS-SS (Direct Sequence Spread Spectrum). Pro ještě rychlejší rádiové lokální síť W-LAN, ale i pro celulární síť čtvrté a vyšších generací B3G (Beyond 3G), je potom v určitých případech optimálním řešením technika rozprostřeného

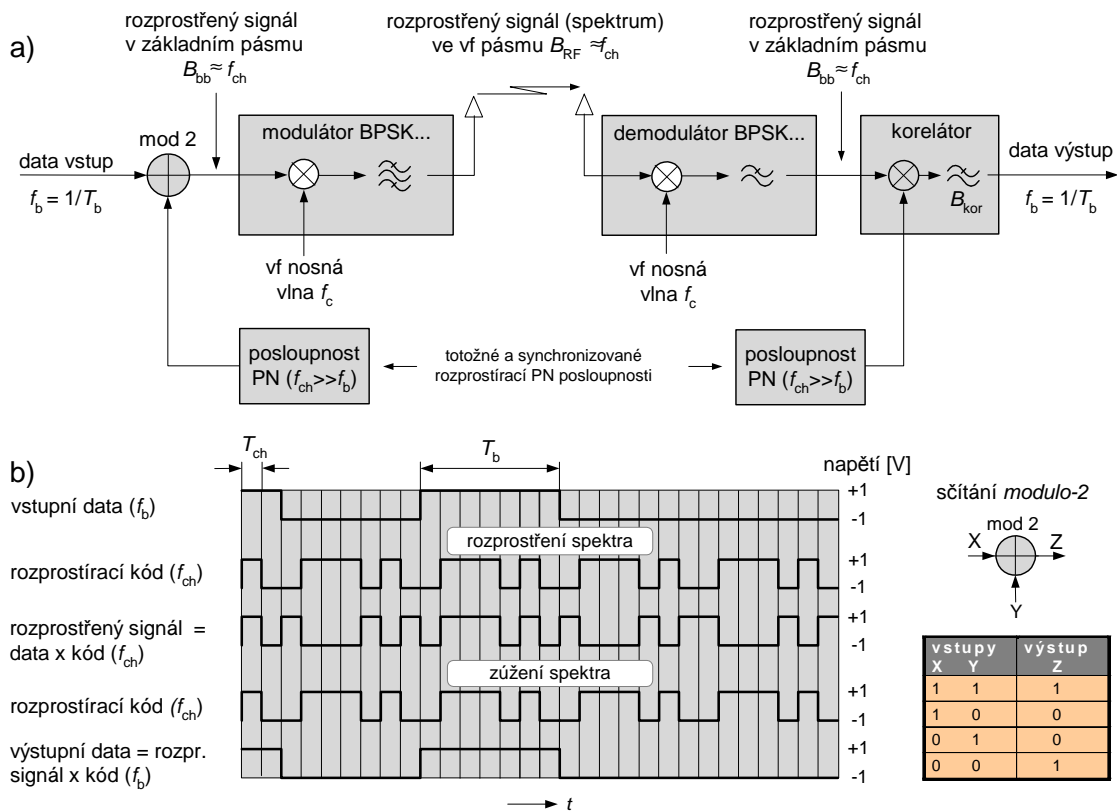
spektra, kombinovaná se systémem s mnoha nosnými (MC – CDMA tj. Multicarrier CDMA).

U perspektivních mobilních systémů je nezbytné zajistit ochranu přenosu před chybovostí vhodným kanálovým kódováním. Vedle běžných konvolučních a blokových kódů, využívaných již v systémech 2G, se zde začínají uplatňovat také moderní turbo kódy, které poskytují již téměř ideální ochranu přenosu blížící se hranicím, odpovídajícím tzv. Shannonovu limitu. Dále jsou stručně probírány nejdůležitější ze zmíněných progresivních přenosových formátů.

### ***Mnohonásobný přístup s kódovým dělení CDMA***

U konvenčních radiokomunikačních systémů je přístup účastníků do rádiového rozhraní realizován na principech frekvenčního dělení (FDMA) a časového dělení (TDMA). Přístup CDMA (Code Division Multiple Access) je založen na technice rozprostřeného spektra, a to nejčastěji na její variantě s přímým rozprostřením DS-SS (Direct Sequence Spread Spektrum). Přístup CDMA se nesnaží zajistit každému účastníkovi systému jeho zcela vlastní frekvenční kanály, nebo časové sloty, nýbrž naopak frekvenční jakož i časový prostor je zde společný všem z nich (ovšem v rámci určitého omezeného souboru). Ke vzájemnému oddělení účastníků, nezbytnému k realizaci nerušeného spojení, se potom využívá kódování jejich informačních signálů vhodnými binárními pseudonáhodnými sekvencemi PN (Pseudo Noise), jež jsou pro každého z nich odlišné; (v některých případech se k danému účelu využívají také tzv. ortogonální sekvence). Tyto sekvence, vytvářené z bitů značených termínem „čipy“, jsou ve skutečnosti jednoznačně determinované, avšak jejich statistické vlastnosti se blíží vlastnostem sekvencí náhodných. V uvažovaných aplikacích mají PN sekvence o několik řádů vyšší čipovou rychlost  $f_{ch}$ , než je bitová rychlost  $f_b$  užitečného přenášeného signálu. Tím se sice výrazně rozšíří frekvenční spektrum zaujímané takto zakódovaným signálem (zhruba v poměru  $f_{ch}/f_b$ ), avšak do tohoto zvětšeného frekvenčního prostoru je potom možné umístit signály většího počtu účastníků, které se vzájemně liší právě rozdílnými PN sekvencemi tj. jsou rozdílně kódovány. Přenosem rozprostřeného spektra se však získá celá řada unikátních předností. K nejdůležitějším náleží značná imunita vůči šumu a interferencím, vysoká inherentní odolnost proti různým formám zneužití a v celulárních sítích také velká spektrální účinnost (cca o řád vyšší, než u systémů 2G). Problém mnohocestného šíření se zde úspěšně řeší aplikací techniky přijímačů RAKE, nebo mnohoživatelské detekce MUD (Multiuser Detection), čímž se zcela odstraní nutnost použití náročné ekvalizace.

Základní koncepce techniky rozprostřeného spektra je znázorněna na obr. 2a. Rozprostírání spektra pomocí posloupnosti PN ve vysílači se zde realizuje v obvodu *sčítání modulo 2* (hradlo X-OR). Zpětná komprese spektra v přijímači

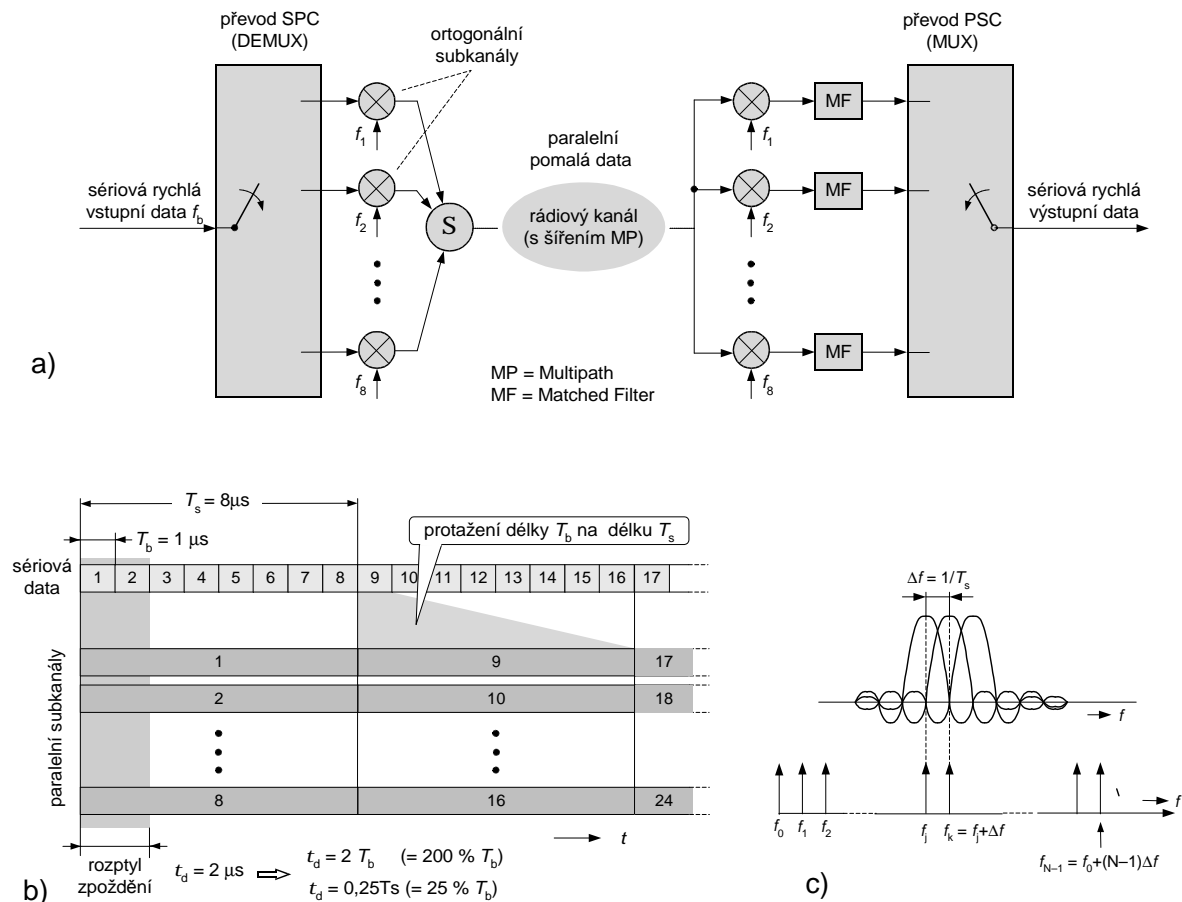


Obr. 2 Systém s rozprostřeným spektrem s přímou modulací PN kódovou posloupností: a) základní koncepce vysílače a přijímače, s rozprostíráním a kompresí spektra v základním pásmu; b) časové průběhy signálů v základním pásmu, ilustrující metodu rozprostření a komprese spektra

se provádí v korelátoru, složeném např. z násobiče a dolní propusti, a to opět za využití identické posloupnosti, jaká je aplikována ve vysílači. Funkci systému dokreslují časové průběhy některých signálů základního pásma na obr. 2b; znázornění předpokládá, že datové i rozprostírací signály mají formu NRZ, kdy totiž lze obvod sčítání modulo 2 nahradit jednoduchým analogovým násobičem.

### Ortogonální frekvenční multiplex OFDM

V pozemských rádiových kanálech je maximální rychlost přenosu dat omezena intersymbolovými interferencemi ISI (Inter Symbol Interference), které jsou důsledkem časové disperze přijímaného signálu, přicházejícího k přijímači po více drahách. Interference ISI lze potlačit ekvalizací, jejíž složitost však rychle narůstá se zvětšujícím se součinem datové rychlosti  $f_b$  a rozptylu zpoždění  $t_d$ . Mnohocestné disperzi lze čelit také technikou rozprostřeného spektra (DS-SS), další možností je potom právě využití ortogonálního frekvenčního multiplexu OFDM. Jeho podstatou je rozdělení sériového datového toku na vstupu vysílače, o bitové rychlosti  $f_b$ , do většího



Obr. 3 Ortogonální frekvenční multiplex OFDM: a) základní koncepce vysílače a přijímače; b) ilustrace převodu vstupního sériového rychlého datového toku na pomalý paralelní tok; c) frekvenční spektrum ortogonálních subnosných vln

počtu  $N$  pomalejších paralelních složek o redukované symbolové rychlosti  $f_s = f_b/N$ , z nichž každá je potom namodulována na jednu subnosnou vlnu. Takto vytvořené symboly OFDM o prodloužené periodě  $T_s = NT_b$  jsou potom podstatně odolnější vůči mnohocestné disperzi, a to tím více, čím lépe je splněna podmínka  $T_s \gg t_d$ . V popisovaném systému je výhodné, tvoří-li subnosné vlny ortogonální soustavu, neboť potom mohou být mnohem blíže vůči sobě, než u konvenčního frekvenčního multiplexu FDM, aniž by se jejich částečně přeložená postranní pásma vzájemně rušila. Na přijímací straně jsou dílčí subnosné vlny separátně demodulovány a demodulované složky jsou převedeny do původní sériové podoby. Odolnost vůči ISI lze ještě dále zvětšit aplikací ochranného intervalu GI (Guard Interval), vkládaného mezi jednotlivé datové symboly, v němž se eliminuje časový rozptyl signálů z různých drah šíření.

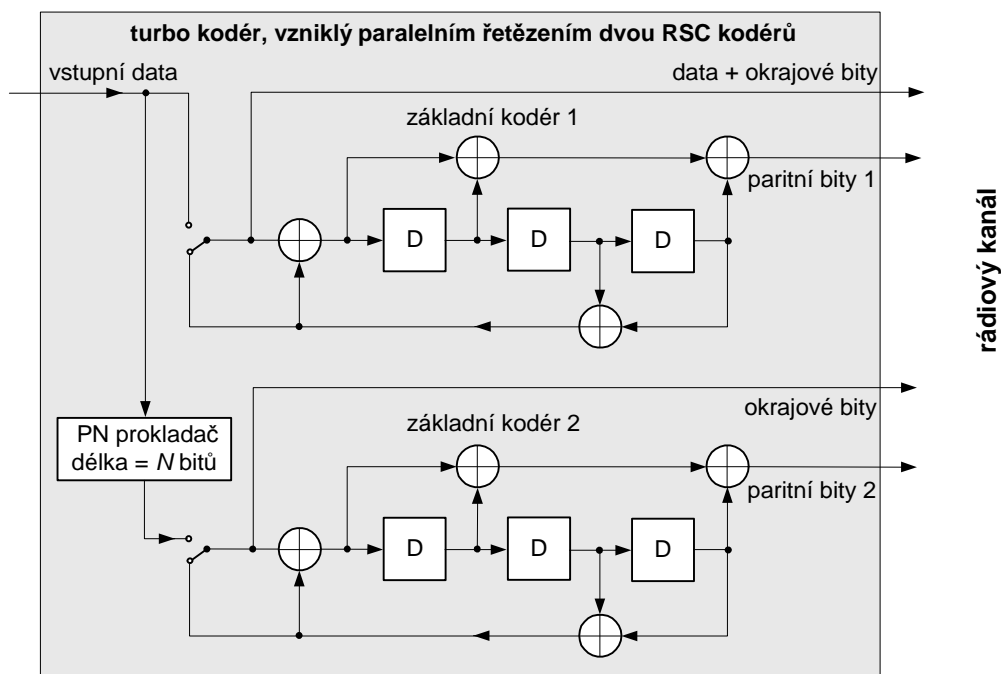
Na obr. 3a je znázorněna základní koncepce systému OFDM. Obr. 3b ilustruje převod rychlého sériového datového toku na pomalý paralelní tok, a to

pro případ osmi subnosných vln. V praxi je však počet subnosných podstatně větší; tak například standardů IEEE 802.11a je to 52 subnosných, u digitálního rozhlasu DAB dokonce 1536 subnosných atd. Na obr. 3c je znázorněno frekvenční spektrum několika subnosných vln systému OFDM. Ortogonalitu zřejmě zajišťuje rozestup mezi nosnými o velikosti  $Df_c = f_s = 1/T_s$ .

Implementace systému OFDM v podobě podle obr. 3a je vzhledem k potřebnému velkému počtu dílčích modulátorů a demodulátorů pro praxi nevhodná. Ke generaci kompozitního signálu OFDM ve vysílači lze však využít inverzní Fourierovu transformaci IFT, resp její zdokonalenou variantu IFFT (Inverse Fast Fourier Transform), využívající některý vhodný algoritmus pro výrazné urychlení potřebných výpočtů. Podobně v přijímači lze realizovat demodulaci velkého počtu subnosných vln pomocí přímé rychlé Fourierovy transformace FFT. Velkosériovou výrobu potřebných procesorů IFFT a FFT soudobá monolitická technologie již bez problémů zvládá, takže uvedenou techniku lze efektivně nasadit do praxe.

### ***Turbo kódy pro systémy 3G a B3G***

Na obr. 4 je znázorněno základní uspořádání turbo kodéru, specifikovaného institucí 3GPP (3G Partnership Project) pro standardy mobilní komunikace 3. generace (UMTS aj).



*Obr. 4 Turbo kodér určený evropskou institucí 3GPP pro celulární standardy 3G*

Kodér je složen ze dvou základních paralelně řazených 8-stavových rekurzivních systematických (RSC) kodérů, oddělených pseudonáhodným (PN) prokladačem. Výstupní zakódovaná data kodéru, procházející dále rádiovým kanálem, se potom skládají ze sekvence originálního vstupních datových bitů, následovaných paritními bity, generovanými v obou základních kodérech. Uvedená koncepce díky synergetické kooperaci obou dílčích kodérů, přispívá k podstatně většímu kódovému zisku, než by poskytoval prostý součet zisků těchto kodérů. Turbo dekodér se skládá rovněž ze dvou základních dekodérů, pracujících v režimech s tzv. měkkým vstupem a výstupem SISO (Soft Input-Soft Output). Vlastní dekodování zde probíhá v několika iteračních krocích, při nichž se postupně redukuje zbytková chybost přijímaného signálu. Kódový zisk poskytovaný turbo kódy je potom v souhrnu až o 3 dB lepší, než u nejlepších konvolučních resp. blokových kódů.

### *Přehled nejdůležitějších celulárních systémů 3G a rádiových sítí W LAN*

V tab. 1 jsou shrnuty nejdůležitější parametry rádiového rozhraní hlavních celulárních standardů 3G. Podobným způsobem jsou v tab. 2 uspořádány některé důležité parametry rádiových lokálních sítí W LAN.

	<b>WCDMA</b>	<b>cdma2000</b>	<b>TD-SCDMA</b>
	hlavní standardy celulárních sítí 3G, určených pro totální pokrytí velkých území		
přístup	DS-CDMA	DS-CDMA	TDMA / DS-CDMA
kanál. kódování	konvoluční (turbo)	konvoluční (turbo)	konvoluční (turbo)
nosná vlna	≈ 2 GHz	≈ 2 GHz	≈ 2 GHz
modulace	DL: QPSK; UL: BPSK	DL: QPSK; UL: BPSK	QPSK; 8-PSK (2 Mb/s)
šířka pásma	5 * 2 MHz	1,25*2 MHz / 3,75*2 MHz	1,6 MHz
čipová rychlost	3,84 Mchip/s	1,2288 / 3,6864 Mchip/s	1,28 Mchip/s
max. dat. rychlost	2 Mbit/s	2,4 Mbit/s	2 Mbit/s

*Tab. 1 Přehled parametrů rádiového rozhraní nejdůležitějších celulárních standardů 3G*

### **Závěr**

V tomto příspěvku jsou stručně charakterizovány hlavní systémy pro pozemní mobilní komunikaci třetí vývojové generace (3G). Pozornost je zaměřena hlavně na technologii jejich rádiového rozhraní, umožňující neustálé zvyšování uživatelských přenosových rychlostí, zvyšování kvality a rozšiřování sortimentu nabízených služeb.



parametr	802.11b (WiFi)	802.11a	802.11g	HiperLAN2 (EU, US) HiSWAN (Jap)
hlavní standardy sítí WLAN, určených pro pokrytí malých lokalit s vysokou intenzitou provozu a s potřebou velmi rychlých datových přenosů (řádu až desítek Mbit/s)				
frekvenční rozsahy	2,412-2,472 GHz (EU) 2,41-2,462 GHz (US)	5,150-5,350 GHz 5,725-5,825 GHz (US)	2,41-2,472 GHz (EU) 2,41-2,462 GHz (US)	5,15-5,35 GHz a 5,47-5,725 GHz (EU); 5,15-5,35 GHz a 5,725-5,825 GHz (US)
modulace	DBPSK DQPSK (CCK, PBCC)	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM, OFDM	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM, OFDM	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM, OFDM
přístup	CSMA/CA	CSMA/CA	CSMA/CA	TDMA
duplex	TDD	TDD	TDD	TDD
šířka pásma na kanál	1 MHz (FHSS) 25 MHz (DS-SS)	20 MHz (OFDM)	20 MHz (OFDM)	20 MHz
max. dat. rychlost	11 Mbit/s	54 Mbit/s	54 Mbit/s	54 Mbit/s
maximální vysílaný výkon / dosah	100 mW / 100 m	40 mW (dolní kanály) 200 mW (střed. kanály) 800mW (horní kanály)	100 mW / 30 m	–

*Tab. 2 Přehled parametrů rádiového rozhraní nejdůležitějších rádiových lokálních sítí WLAN*