

# Mobilní sítě

Zdeněk Bečvář, Pavel Mach, Ivan Pravda

**Autoři:** Zdeněk Bečvář, Pavel Mach, Ivan Pravda  
**Název díla:** Mobilní sítě  
**Vydalo:** České vysoké učení technické v Praze  
**Zpracoval(a):** Fakulta elektrotechnická  
**Kontaktní adresa:** Technická 2, Praha 6  
**Tel.:** +420 2 2435 2084  
**Tisk:** (pouze elektronicky)  
**Počet stran:** 104  
**Vydání:** 1.  
  
**ISBN** 978-80-01-05305-8  
  
**Recenzent:** Karel Holinka

**Innovative Methodology for Promising VET Areas**  
<http://improvet.cvut.cz>



Program  
celoživotního  
učení

Tento projekt byl realizován za finanční podpory Evropské unie.  
Za obsah publikací odpovídá výlučně autor. Publikace (sdělení) nereprezentují názory Evropské komise a Evropská komise neodpovídá za použití informací, jež jsou jejich obsahem.

## VYSVĚTLIVKY



Definice



Zajímavost



Poznámka



Příklad



Shrnutí



Výhody



Nevýhody

---

## ANOTACE

Modul přehledově popisuje základní principy používané v různých generacích mobilních sítí. Dále přibližuje charakteristiky různých technologií implementovaných do mobilních sítí, jako jsou GSM, CSD, HSCSD, GPRS, EDGE, UMTS, HSDPA, HSUPA, LTE-(A), atd.

## CÍLE

Výklad se v rámci modulu odvíjí od 2. generace mobilních systémů, tj. od digitálních (buňkových) systémů typu GSM. Student se přehledně seznámí s problematikou mobilních sítí a získá konkrétní představu o funkčním uspořádání moderních mobilních sítí a principu činnosti jejich jednotlivých částí.

## LITERATURA

- [1] M. Sauter, "From GSM to LTE: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband" Wiley, 2011.
- [2] H. Holma, A. Toskala, "LTE for UMTS Evolution to LTE-Advanced," Second edition, Wiley, 2011.
- [3] G. Heine, H. Sagkob, „GPRS: Gateway to Third Generation Mobile Networks“, ISBN: 1-58053-159-8, 2003.
- [4] T. Halonen, J. Romero, J. Melero, „GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Towards 3G/UMTS“, ISBN: 0-470-86694-2, 2004.
- [5] H. Holma, A. Toskala, „WCDM for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications, third edition, ISBN: 978-0-470-87096-9, 2006.
- [6] H. Holma, A. Toskala, „HSDPA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communication“ ISBN: 978-0-470-01884-2, 2006.
- [7] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, "4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband," Academic Press, 2011.
- [8] METTALA, , Riku. Bluetooth Protocol Architecture, Version 1.0. White Paper, 1999.
- [9] Specification of the Bluetooth System: Wireless Connection Made Easy, Profiles, Volume 2, February 2001.
- [10] Specification of the Bluetooth System: Wireless Connection Made Easy, Core Package version 2.0 + EDR, Volume 0 – 3, November 2004.

- [11] Specification of the Bluetooth System: Wireless Connection Made Easy, Core Package version 2.1 + EDR, Volume 0 – 4, July 2007.
- [12] Specification of the Bluetooth System: Wireless Connections Made Easy, Core Package version 3.0 + HS, Volume 0, April 2009
- [13] Specification of the Bluetooth System: Experience More, Core Package version 4.0, Volume 0, June 2010
- [14] Global Positioning System Standard Positioning Service: Performance Standard, 4th edition, September 2008
- [15] Global Positioning System Standard Positioning Service: Signal Specification, 2nd edition, June 1995
- [16] Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces: Interface Specifications, Revision D, December 2004
- [17] Galileo Open Service: Signal In Space Interface Control Document, Draft 0, May 2006
- [18] S. Steiniger, M. Neun, A. Edwardes, "Foundations of Location Based Services", University of Zurich.
- [19] ROYER, Elizabeth. A Review of Current Routing Protocols for Ad-Hoc Mobile Wireless Networks. 1999.
- [20] GAST, Matthew. *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*. 1st edition, 2002. 464s. ISBN 0-596-00183-5.
- [21] BESTAK, R. - PRAVDA, I. - VODRAZKA, J.: *Principle of Telecommunication Systems and Networks*. 1. ed. Prague: *Ceska technika - nakladatelstvi CVUT*, 2007. 134 p. ISBN 978-80-01-03612-9.
- [22] JANSEN H., RÖTTER H. and coll.: *Informationstechnik und Telekommunikationstechnik (Lernmaterialien)*, Europa-Lehrmittel, Haan 2003. ISBN 3-8085-3623-3.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>8</b>
1.1	Radiové přenosové cesty .....	8
1.2	Základní způsoby dělení radiových prostředků.....	10
1.3	Přehled využívaných technologií .....	11
<b>2</b>	<b>Mobilní telekomunikační síť.....</b>	<b>13</b>
2.1	Úvod do problematiky .....	13
2.2	Buňkové mobilní telefonní síť .....	15
2.3	Princip sektorizace .....	17
2.4	Přístupové metody .....	19
2.5	Provoz s automatickým přepojením (Handover).....	21
2.6	Mnohocestné šíření radiových vln .....	24
<b>3</b>	<b>Mobilní síť GSM – mobilní síť 2. generace .....</b>	<b>25</b>
3.1	Základy systému GSM .....	25
3.2	Síť GSM a používané standardy .....	27
3.3	Služby & Aplikace .....	28
3.4	Architektura sítě GSM.....	29
3.5	Vrstvový model GSM .....	31
3.6	Struktura a princip funkce mobilní stanice.....	33
3.7	Mobilní stanice v GSM a její návaznost na základnovou stanici BTS .....	36
3.8	Přenos dat v síti GSM a generace 2.5G mobilních systémů .....	38
3.9	Přenos dat typu CSD v síti GSM.....	40
3.10	Přenos dat typu HSCSD v síti GSM.....	42
3.11	Přenos dat typu GPRS v síti GSM.....	44
3.12	Přenos dat typu EDGE v síti GSM.....	46
<b>4</b>	<b>Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) .....</b>	<b>48</b>
4.1	Úvod .....	48
4.2	Frekvenční pásma přiřazené technologii UMTS.....	49
4.3	Vícenásobný přístup založený na WCDMA .....	50
4.4	Standardizace a vývoj UMTS.....	51
4.5	Architektura sítě .....	52
4.6	HSDPA .....	54
4.7	HSUPA.....	59
4.8	Služby a kvalita služeb v UMTS .....	61
<b>5</b>	<b>Long Term Evolution (Advanced) - LTE(-A).....</b>	<b>63</b>

5.1	Úvod .....	63
5.2	Architektura sítě .....	65
5.3	Fyzická vrstva LTE/LTE-A.....	67
5.4	Tvarování paprsku.....	71
5.5	Technologie využívající více antén.....	72
5.6	Sdružování nosných .....	73
5.7	Služby a aplikace v LTE/LTE-A.....	75
5.8	Femtobuňky.....	77
5.9	Retranslační stanice .....	79
<b>6</b>	<b>Sítě Ad Hoc .....</b>	<b>81</b>
6.1	Sítě Ad hoc .....	81
6.2	Přístupové protokoly .....	84
6.3	Směrovací protokoly .....	85
6.4	Zabezpečení.....	87
6.5	Technologie využívající topologii ad hoc .....	88
6.6	Senzorové sítě.....	91
6.7	Sítě založené na mesh topologii .....	92
<b>7</b>	<b>Širokopásmové distribuční systémy .....</b>	<b>94</b>
7.1	Širokopásmové distribuční systémy LMDS.....	94
7.2	Širokopásmové distribuční systémy MMDS.....	96
<b>8</b>	<b>Lokalizace .....</b>	<b>98</b>
8.1	Služby založené na lokalizaci.....	98
8.2	Satelitní navigační systémy .....	99
8.3	Určování polohy pomocí mobilní sítě .....	103
<b>9</b>	<b>Trendy pro budoucí generace mobilních sítí.....</b>	<b>104</b>

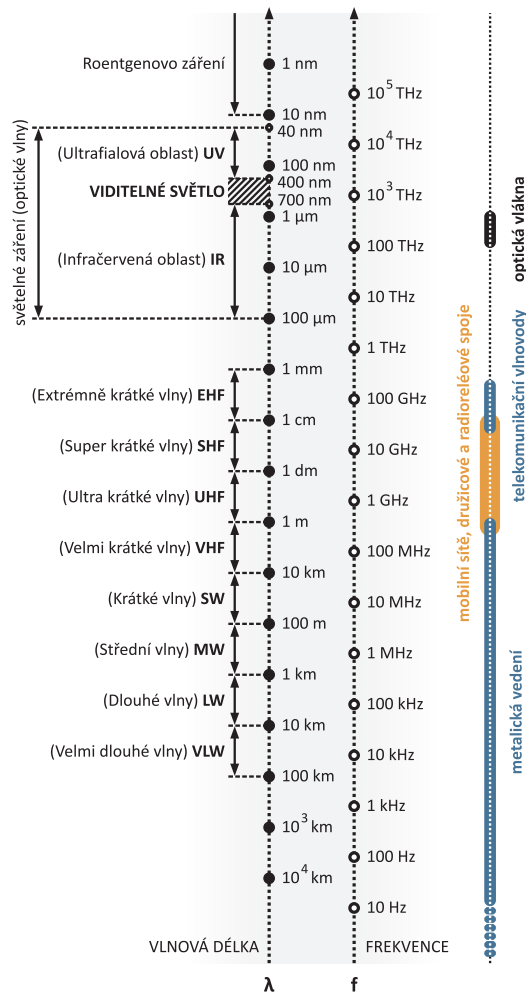
# 1 Úvod

## 1.1 Radiové přenosové cesty

K realizaci radiového přenosu se využívají elektromagnetické vlny specifických kmitočtů, které lze efektivně šířit volným prostorem. Množinu vhodných elektromagnetických vln označujeme termínem radiové vlny. Radiové vlny lze dle jejich využití rozdělit do několika následujících kategorií (viz následující výčet a obrázek):

- rozhlasová pásma (oblast stovek kHz až desítek MHz) – dlouhé, střední, krátké a velmi krátké vlny
- televizní pásma (oblast desítek až stovek MHz)
- mobilní sítě a mikrovlnná pásma (nosné kmitočty jednotky GHz)
- družicové spoje, radioreléové spoje a širokopásmové přístupové sítě (nosné kmitočty až desítky GHz)





Kmitočtová pásma využívaná radiovémi prostředky



Radiové systémy mohou velmi vhodně doplňovat pevné (kabelové) přístupové prostředky, a to zejména všude tam, kde je to výhodné nebo lze pomocí nich vytvářet svébytné mobilní i pevné sítě poskytující široké portfolio služeb.



Nejekonomičtějšího uplatnění dosahují radiové systémy zejména v těžko přístupných oblastech a v oblastech s řídkým osídlením, kde se nevyplatí budovat kabelové rozvody, a to především díky rychlosti, se kterou lze radiové prostředky nasadit do provozu. Dají se přechodně využít také tam, kde zákazník potřebuje připojit k síťové infrastruktuře ihned.

## 1.2 Základní způsoby dělení radiových prostředků



---

Radiové prostředky lze rozlišovat dle celé řady různých hledisek. Uvedme si pro představu několik základních a klíčových kategorií:

- dle šířky kmitočtového pásma na úzkopásmové a širokopásmové radiové systémy,
  - dle směru přenosu na jednosměrné (distribuční) a obousměrné radiové systémy,
  - dle uspořádání na radiové systémy typu bod-bod (*Point-to-Point*) a typu bod-více bodů (*Point-to-Multipoint*),
  - dle mobility účastníka na pevnou bezdrátovou přípojku a plně mobilní terminál,
  - dle využitých přenosových prostředků na pozemní a družicové radiové systémy,
  - dle využití licencovaného nebo nelicencovaného pásma (zásadní pro návrh a budování bezdrátových sítí)
- 



---

Dále můžeme dělit radiové prostředky a síť podle portfolia poskytovaných služeb na telefonní, datové, apod.

---



---

Dalšími možnostmi dělení radiových prostředků jsou např.:

- dle používaného kmitočtového pásma,
- dle používané modulace, resp. kódování,
- dle způsobu sdílení přenosové kapacity na frekvenční **FDM** (*Frequency Division Multiplex*) a časové **TDM** (*Time Division Multiplex*)
- dle přístupu ke sdíleným prostředkům na frekvenční **FDMA** (*Frequency Division Multiple Access*), časové **TDMA** (*Time Division Multiple Access*), kódové **CDMA** (*Code Division Multiple Access*) a frekvenčně-ortogonální **OFDMA** (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*)

V neposlední řadě je pak možné rozdělit radiové prostředky na veřejné a privátní, atd.

---

## 1.3 Přehled využívaných technologií

Pro úplnost a celistvost našeho úvodního přehledu je zde zcela jistě na místě uvést ještě komplexní souhrnný přehled používaných technologií, které mají úzkou vazbu k tématu prezentovaného modulu.

Do první kategorie technologií radiokomunikačních sítí lze zařadit analogové i digitální bezšňůrové systémy, které doplňují a v některých případech i zcela nahrazují klasické telefonní přístroje. Do této kategorie bezesporu patří systémy **CT** (*Cordless Telephone*) ve verzích CT0, CT1 a CT2 a systémy **DECT** (*Digital European Cordless Telephone*). Účelem výše uvedených systémů je především nahradit pevné kabelové připojení účastníka a zároveň mu umožnit mobilitu v rámci určité omezené oblasti. Jedná se tedy většinou v principu o typický úzkopásmový přístupový systém pro realizaci pevného bezdrátového připojení účastníka telefonní sítě **WLL** (*Wireless Local Loop*).

Druhou kategorií zastupují analogové i digitální buňkové (celulární) systémy tvořící infrastrukturu svébytných mobilních radiokomunikačních sítí. Jako příklad zde uvedme systémy 1. generace (analogové) typu **NMT** (*Nordic Mobile Telephone*), dále pak systémy 2. generace (digitální) typu **GSM** (*Global System for Mobile Communication*), taktéž systémy 3. generace typu **UMTS** (*Universal Mobile Telecommunication System*) a v neposlední řadě také systémy nově nastupující 4. generace typu **LTE-A** (*Long Term Evolution-Advance*). Všem těmto technologiím se budeme podrobněji věnovat dále.

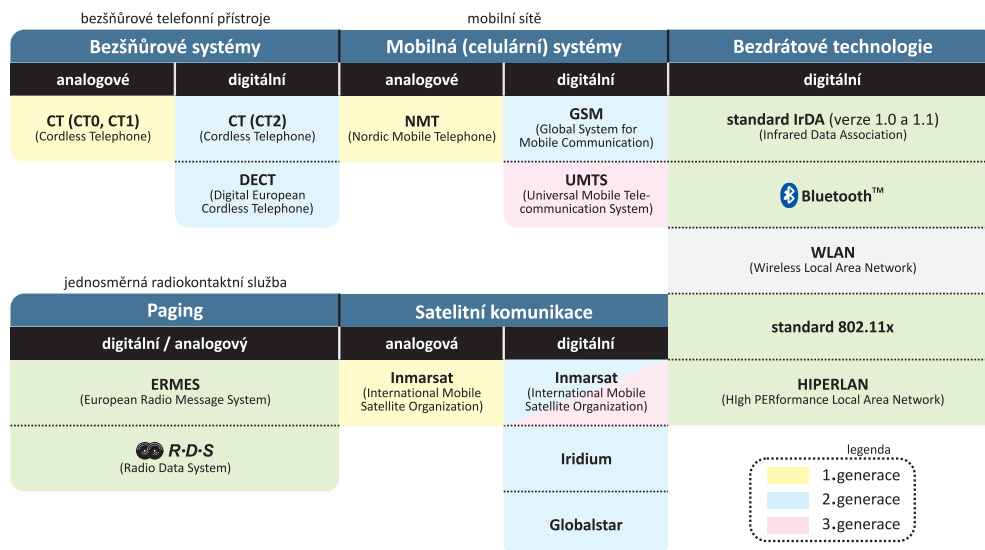
Do třetí kategorie můžeme začlenit bezdrátové technologie sloužící pro pokrytí požadavků a potřeb účastníků v rámci personálních, lokálních, metropolitních a rozlehlých sítí typu **PAN** (*Personal Area Network*), **LAN** (*Local Area Network*), **MAN** (*Metropolitan Area Network*) a **WAN** (*Wide Area Network*). Patří sem standard **IrDA** (*InfraRed Data Association*) ve verzích 1.0 a 1.1, dále pak v současnosti dynamicky se rozvíjející technologie **Bluetooth™**. Pro úplnost přehledu zde uvedme technologie sítí **WLAN** (*Wireless Local Area Network*) založené na standardech 802.11x a v Evropě vyvíjenou technologii **HIPERLAN** (*High PERFORMANCE Local Area Network*), která je evropskou alternativou standardům řady 802.11x.

Čtvrtou kategorií lze spojit s technologiemi zajišťujícími tzv. paging. Pod pojmem paging je v rámci radiových systémů chápána jednosměrná radiokontaktní služba. Mezi pagingové radiové systémy patří např. evropský systém **ERMES** (*European Radio Message System*) nebo globální systém **RDS** (*Radio Data System*).

Poslední pátou a svým způsobem i trochu specifickou kategorií radiových systémů tvoří satelitní (družicová) komunikace. Nejedná se totiž o přístupové systémy v pravém slova smyslu, protože jejich pokrytí zahrnuje podstatnou část zemského povrchu a vedle mezikontinentálního spojení mají význam především pro lodní a leteckou dopravu a pokrytí nepřístupných, resp. řídko osídlených oblastí. Jako zástupce této kategorie je možné zde uvést např. analogové i digitální systémy **INMARSAT** (*International Mobile Satellite Organization*), dále pak systémy **IRIDIUM** nebo **GLOBALSTAR** a bylo by možné uvést i celou řadu dalších. Družicové navigační systémy jsou pak doplňkovou podkategorií našeho stručného přehledu. Patří sem např. americký lokalizační systém **GPS** (*Global*

*Positioning System*), nově vznikající evropský navigační systém **GALILEO**, a také ruský lokalizační systém **GLONASS**. Všechny výše uvedené systémy lze ve zkratce označit jako systémy **GNSS** (*Global Navigation Satellite System*).

Přehled všech kategorizovaných technologií používaných pro mobilní komunikaci souhrnně uvádí následující obrázek.



Přehled technologií pro mobilní komunikaci

## 2 Mobilní telekomunikační sítě

### 2.1 Úvod do problematiky

Vedle bezdrátových řešení suplujících pevné připojení lze v současnosti pro datovou komunikaci využít i rostoucích možností mobilních sítí. Mobilní sítě totiž vedle vlastní přístupové radiové části zahrnují i celou infrastrukturu sítě umožňující plošné poskytování služeb. Pro blízkou i vzdálenější budoucnost mají dnes význam výhradně digitální systémy.



---

Digitální mobilní sítě GSM představují druhou generaci mobilních systémů a lze je charakterizovat jako digitální buňkové mobilní radiotelefonní systémy.

---



---

Pro označení třetí generace mobilních systémů se používá zkratka UMTS. Jde o digitální systémy, které pracují v pásmu 2 GHz, a které sjednocují různé bezdrátové přístupové technologie používané v současnosti do jedné celistvé síťové infrastruktury, schopné nabídnout široký rozsah multimediálních služeb s garantovanou kvalitou.

---



---

Nastupující čtvrtá generace mobilních systémů je označována jako LTE-A. Je primárně zaměřena na další navyšování dostupné přenosové kapacity, a to především s ohledem na nárůst požadavků ze strany uživatelů, a dále na dosažení nízkých hodnot celkového zpoždění pro široké portfolio poskytovaných služeb.

---

Generace mobilních systémů

Generace	Název/Zkratka	Vlastnosti
1. generace (1980 až 1995)	NMT (Nordic Mobile Telephone); FIN, S, N, DK <b>AMPS</b> ( <i>Advanced Mobile Telephone System</i> ); USA <b>TACS</b> ( <i>Total Access Communication System</i> ); UK, IRL RADIOCOM 2000; FR	Analogové systémy Národní systémy HOVOR
2. generace (od roku 1992)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GSM (Global System for Mobile Communication)</li> <li>• <b>DAMPS</b> (<i>Digital AMPS</i>), resp. IS136; USA</li> <li>• <b>PCS 1900</b> (<i>Personal Communication System</i>); USA</li> <li>• <b>PDC</b> (<i>Personal Digital Communication</i>)</li> <li>• <b>GPRS</b> (<i>General Packet Radio Service</i>); označován jako 2,5. generace</li> <li>• <b>EDGE</b> (<i>Enhanced Data rates for Global Evolution</i>); označován jako 2,75. generace</li> </ul>	Digitální systémy HOVOR + DATA
3. generace (od roku 2004)	CDMA 2000 (1×EV-DO, 1×EV-DV) UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) <b>HSPA</b> ( <i>High Speed Packet Access</i> ), <b>HSPA+</b> ; označován jako 3,5. generace <b>LTE</b> ( <i>Long Term Evolution</i> ); označován jako 3,9. generace	MULTIMÉDIA
4. generace (prozatím není dostupná)	LTE-A (Long Term Evolution-Advanced)	MULTIMÉDIA

## 2.2 Buňkové mobilní telefonní sítě

Mobilní telefonní spojení je možné realizovat použitím rádiových telekomunikačních prostředků, jejichž provoz zpravidla navazuje na provoz pevných telefonních sítí. Výslednou sestavu tvoří:

- soustava pevných (základnových) stanic **BTS** (*Base Transceiver Station*)
- mobilní stanice **MS** (*Mobile Station*)



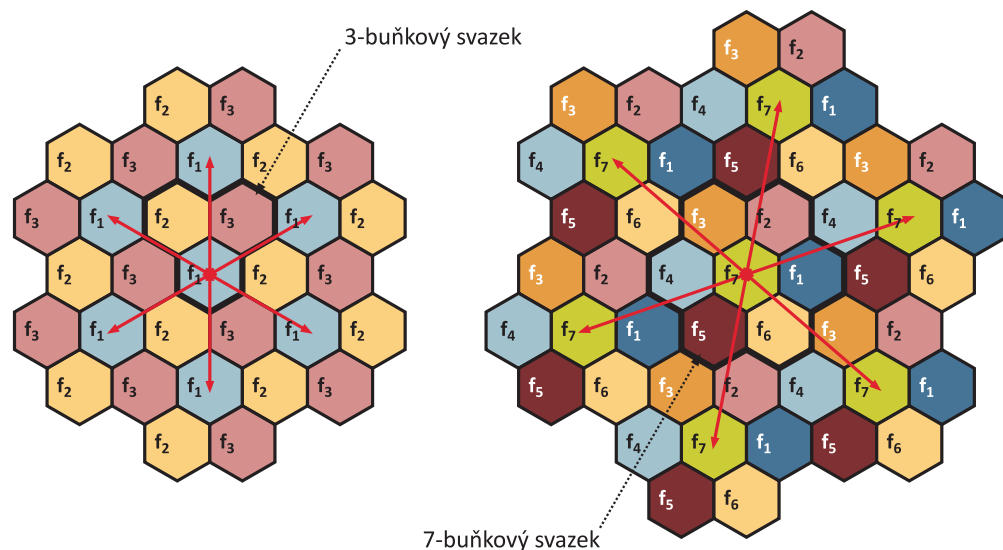
---

Jeden z nejdůležitějších základních principů aplikovaný u moderních mobilních telekomunikačních systémů spočívá v rozdělení celého obsluhovaného území na dílčí elementární oblasti, tzv. buňky (*Cells*), které obsluhuje vždy konkrétní základnová stanice.

---

Velikosti buněk užívaných v různých mobilních systémech závisejí především na typu a účelu mobilního systému a lze je například klasifikovat následujícím způsobem:

- femtobuňka (místnosti nebo kanceláře) - určena pro pokrytí oblastí se zhoršenou dostupností signálu z jiných typů buněk, obvykle to bývají buňky v rámci vnitřních prostor s poloměrem maximálně několika metrů
- pikobuňka (kancelářské a bytové prostředí) – dosah signálu je maximálně několik desítek metrů
- mikrobunčka (městské aglomerace s hustou zástavbou) – zaměřuje se zejména na pomalejší účastníky (např. auta v městském provozu, chodci), pokrytí signálem v rámci jedné buňky je maximálně několik stovek metrů
- makrobunčka (velké a řídké osídlené oblasti) – je primárně určena pro rychle se pohybující účastníky (např. vozidla na silnicích), průměr buňky je maximálně několik kilometrů
- satelitní buňka (oblast dosažitelná telekomunikační družicí) – umožňuje spojení i v místech, která jsou pro předešlé typy buněk nedostupná, dosah signálu je závislý na poloze družice, resp. na její oběžné dráze a na parametrech vysílacího a přijímacího zařízení



Rozdělení obsluhované oblasti do buněk



Buňková struktura mobilní sítě bývá nejčastěji vytvářena použitím makrobuněk o průměru maximálně několik desítek kilometrů. Příklad radiového pokrytí určité oblasti založený na buňkovém principu znázorňuje předchozí obrázek. Pro buňkovou strukturu mobilní sítě je nutné a charakteristické tzv. kmitočtové plánování. Kmitočtový plán pracuje se třemi nebo sedmi frekvencemi. V libovolném svazku pak mohou být použity stejné frekvence ( $f_1$  až  $f_3$ , resp.  $f_1$  až  $f_7$ ), pokud dodržíme podmínku, že oblast všech tří, resp. sedmi buněk svazku se přibližně rovná průměru interferenční zóny.

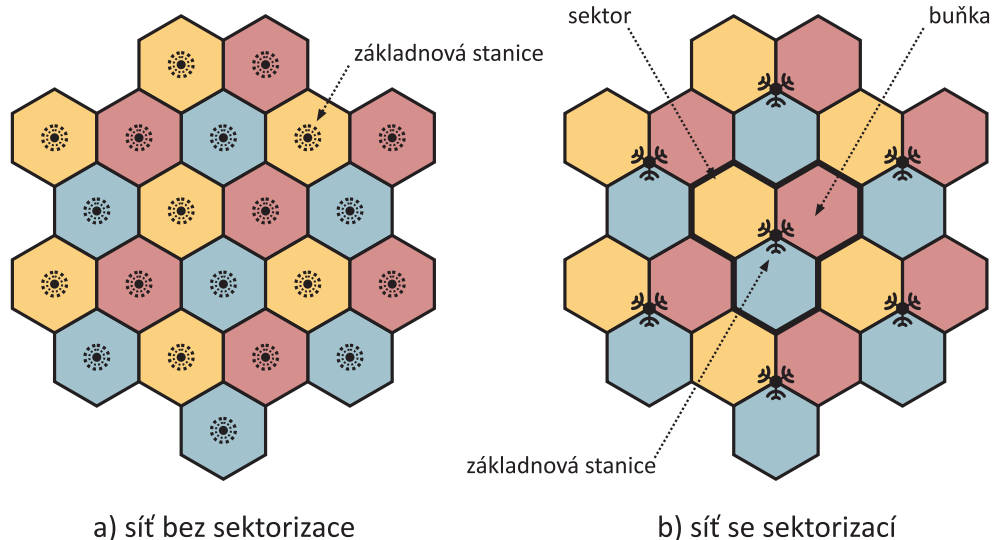


## 2.3 Princip sektorizace

V předchozí kapitole jste se dozvěděli, že každá libovolná buňka mobilní sítě je obsluhována vždy jednou konkrétní základnovou stanicí. Při pokrytí velkého území technickými prostředky mobilních sítí však není tato koncepce příliš vhodná, a to především z hlediska příliš vysokého počtu potřebných základnových stanic. Tento počet však lze výrazně zredukovat použitím principu tzv. sektorizace.



Jeden svazek z předchozího obrázku rozdělme na 21 menších buněk (viz následující obrázek – sekce a)). Počet dostupných kanálů se tak nezměnil, ale stoupl počet potřebných základnových stanic právě na hodnotu 21. Jejich počet však můžeme výrazně redukovat sektorizací na 7, a to za podmínky, kdy jednotlivé základnové stanice neumístíme ve středech buněk, ale ve společných bodech tří sousedících buněk vytvářejících jeden sektor (viz následující obrázek – sekce b)).



Princip sektorizace buňkové sítě



Pro každou z těchto sedmi stanic potom budou použity tři samostatné směrové antény se třemi vysílači/přijímači. V tomto případě bude tedy počet základnových stanic stejný jako na obrázku s rozdělením obsluhované oblasti do buněk, ale vytvoříme síť s mnohem lepšími provozními vlastnostmi (např. nižší vysílací výkony a zvětšení počtu současně obsluhovaných mobilních stanic).



---

V oblastech s velkou hustotou radiotelefonních stanic bude tedy nutné používat malé buňky (dosah 300 až 500 m), v oblastech s nižší hustotou pak postačí buňky s většími rozměry (dosah 1 až 5 km) a ve velmi málo zatížených oblastech může být průměr buňky až jednotky kilometrů.

---

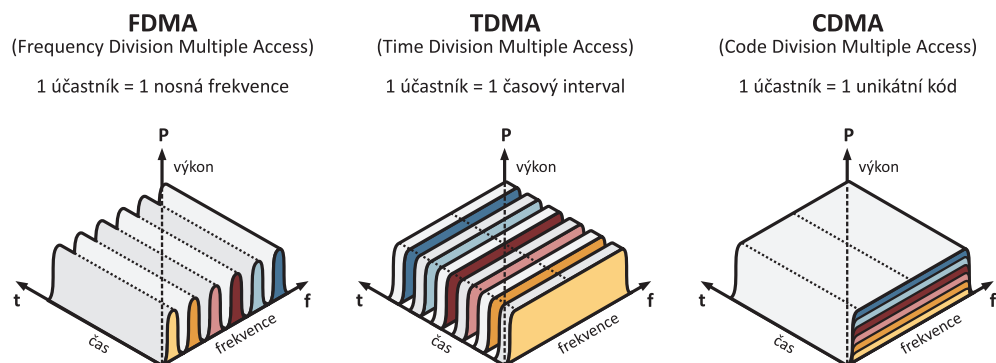
## 2.4 Přístupové metody



V rámci jedné buňky musí být zajištěno, aby mohlo být ve stejném časovém intervalu navazováno a provozováno spojení mezi základnovou stanicí a větším počtem mobilních stanic. K tomu účelu slouží metody umožňující tzv. vícenásobný přístup (*Multiple Access*).

Máme-li pro daný radiokomunikační systém k dispozici určité vyhrazené frekvenční pásmo, můžeme použít některou z následujících základních přístupových metod:

- vícenásobný přístup s kmitočtovým dělením FDMA rozděluje přidělené frekvenční pásmo na dílčí subpásma, kterým pak přiřazuje jednotlivé komunikační kanály.
- vícenásobný přístup s časovým dělením TDMA vytváří v určitém konkrétním frekvenčním subpásmu časový rámec a jeho jednotlivé kanály pak přiděluje na principu časového multiplexu.
- vícenásobný přístup s kódovým dělením CDMA zpracovává datovou posloupnost na vysílací straně každého komunikačního kanálu procesem dalšího kódování dle unikátního kódovacího předpisu, který je záměrně odlišný od kódovacího předpisu všech ostatních kanálů. Signály všech komunikačních kanálů se tedy přenášejí ve stejném frekvenčním pásmu a bez nutnosti časového rozlišení. Na přijímací straně jsou pak od sebe jednotlivé komunikační kanály rozlišeny pouze na základě unikátního kódovacího předpisu, který byl použit pro jejich kódování.
- vícenásobný přístup OFDMA je kombinací časového a kmitočtového dělení. Dostupné zdroje jsou v tomto případě rozděleny v kmitočtové oblasti do subnosných a také zároveň v časové oblasti do několika časových intervalů. Jednotliví uživatelé pak mají přidělenou nejen jednu ale hned několik subnosných, a také určitý časový interval pro komunikaci.



Metody vícenásobného přístupu



---

V praktických aplikacích jsou často výše uvedené základní metody přístupu kombinovány (např. FDMA/TDMA).

---

Pro účastnickou radiovou komunikaci se nejčastěji vyžaduje tzv. duplexní přenos. Ve většině případů se pro každý směr přenosu využívá odlišného frekvenčního pásma a příslušná metoda pro vytvoření duplexní komunikace se označuje jako různopásmový duplexní přenos **FDD** (*Frequency Division Duplex*). V některých případech je však možné oba kanály příslušející témuž okruhu rozlišit na základě časového multiplexu, tj. dopřednému kanálu je přiřazen jeden interval v časovém rámci a zpětnému kanálu pak časový interval odlišný. Takový způsob vytvoření duplexního přenosu se označuje jako stejnopásmový duplexní přenos s časovým dělením **TDD** (*Time Division Duplex*).

## 2.5 Provoz s automatickým přepojením (Handover)

Mobilní stanice komunikuje vždy s nejbližší základnovou stanicí, přesněji řečeno se stanicí poskytující v místě mobilní stanice nejsilnější signál. Pokud se však při svém pohybu dostane mobilní stanice do oblasti sousední buňky, dojde k automatickému přepojení probíhajícího spojení na základnovou stanicí této sousední buňky.



---

Tento provozní režim je označován jako provoz s automatickým přepojením neboli dle anglického termínu „Handover“.

---

Handover má za úkol správu změn aktuální pozice uživatele s ohledem na cílovou pozici, které jsou způsobeny pohybem uživatele napříč buňkovou strukturou sítě. Hlavním účelem Handoveru v mobilních sítích je zajištění nepřetržitého spojení s vysokou QoS nebo tzv. bilanční zatížení v síti.

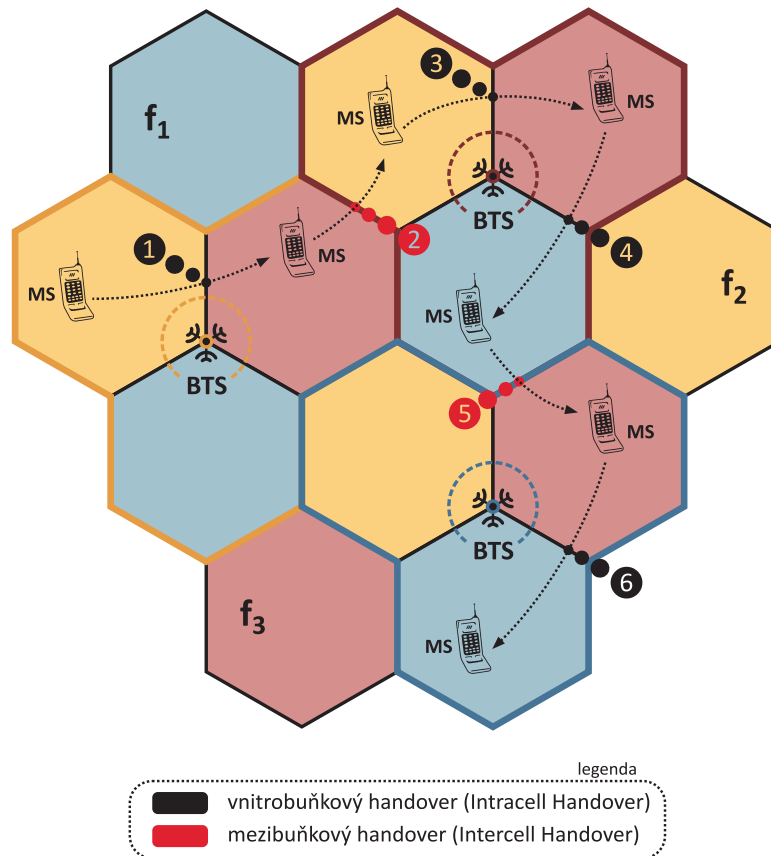
Sledování polohy mobilních stanic v síti zajišťuje neustálé automatické navazování spojení mezi mobilní a základnovou stanicí. Tento údaj se v mobilní síti dále registruje, což umožňuje směřovat spojení k volanému účastníkovi přímo do oblasti, kde se jeho stanice s velkou pravděpodobností právě nachází.



---

V sousedních buňkách se na základě kmitočtového plánování vždy používají komunikační kanály s odlišnými frekvencemi. Při přechodu mobilního účastníka přes hranici ležící mezi dvěma odlišnými buňkami je tak vždy nutné přeladit jeho mobilní stanici.

---



Princip Handoveru

V mobilních sítích lze však z hlediska vlastního provozu sítě odlišit dva typy „Handoveru“:

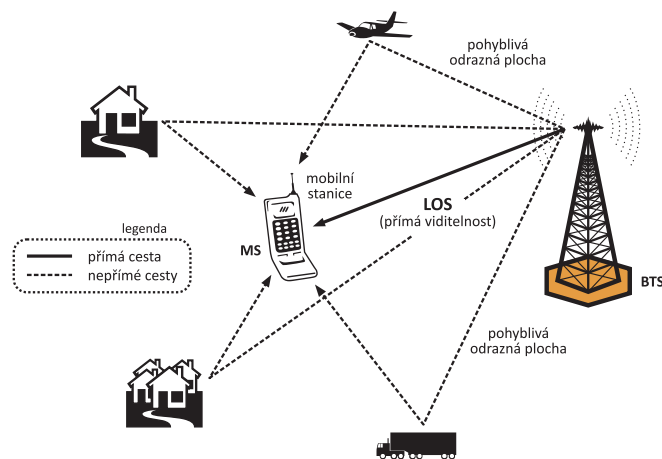
- mezibuňkový handover (*Inter-cell Handover*, resp. *Hard Handover*) – pokud se v provozu mobilní sítě uplatní *Hard Handover*, pak MS nejprve ukončí všechna spojení s BS, která jej obsluhovala. Jakmile je připojení k původní BS ukončeno, je vytvořeno nové spojení s BS, která obsluhu převzala. Proto je tento typ handoveru také známý jako „*break-before-make*“, protože dochází ke krátkému přerušení mezi komunikujícími účastníky. Doba trvání přerušení při přepojení je závislá na charakteru toku řídicích zpráv vyměňovaných mezi MS a sítí. Délka přerušení také závisí na dalších faktorech, kterými jsou použité bezdrátové technologie (např. LTE nebo WiMAX), délka rámce na fyzické vrstvě, nebo také aktuální zatížení sítě. Obecně však platí, že délka přerušení v mobilní síti se pohybuje v řádu desítek až stovek milisekund.
- vnitrobuňkový handover (*Intracell Handover*, resp. *Soft Handover*) – umožňuje současné připojení a provoz MS k několika BS najednou. V důsledku toho je uskutečněno automatické přepojení bez přerušení, které by bylo pozorovatelné uživateli v průběhu komunikace. Toto přepojení je také známo jako „*make-before-break*“. *Soft Handover* je možné realizovat jako **MDHO** (*Macro Diversity HandOver*) nebo **FCS** (*Fast Cell Selection*), který také bývá často označován jako **FBSS** (*Fast Base Station Switching*).

V případě MDHO je realizována makrodiverzita signálů přijatých z několika různých BS a to přímo v aktivní sadě (ve WiMAXu je označována jako sada výběrového příjmu). Významnou nevýhodou tohoto přístupu je jeho vysoká složitost a obtížná implementace. V případě FCS, je vybrán a zpracován nejlépe přijatý rámeček vysílaný současně od všech stanic a následně je zahrnut do aktivního souboru. I přesto, že je přepojení typu FCS výrazně jednodušší v porovnání s přepojením typu MDHO, je stále podstatně složitější než v případě Hard Handoveru. Proto je Hard Handover považován za povinný v mobilních sítích, zatímco jiné typy handoverů jsou volitelné.

## 2.6 Mnohocestné šíření radiových vln



U pozemních (terestriálních) mobilních telekomunikačních systémů se velice často mezi mobilní a základnovou stanicí nacházejí nejrůznější překážky, jako terénní jsou nerovnosti, domy a další různé objekty, takže není možno docílit přímé viditelnosti **LOS** (*Line Of Sight*) mezi těmito dvěma stanicemi. Tento případ je velice častý v městských aglomeracích, některé z uvedených překážek se však mohou vyskytovat i ve venkovských oblastech. Nastane-li tedy taková situace, nepřijímá přijímač pouze vlny vysílané základnovou stanicí, ale i vlny, které přicházejí vlivem ohybu, odrazu a rozptylu na zmíněných překážkách. Dochází zde tedy k tzv. mnohocestnému šíření radiových vln (Multipath Propagation).



Problematika šíření radiového signálu



Odraz se objevuje v případě, kdy radiová vlna dopadá na hladkou překážku velikostně srovnatelnou s délkou vlny. Část výkonu této vlny může vnikat do překážky a část se odrazí.



Ohyb vzniká při dopadu radiové vlny na překážku, která má ostré obrysové kontury a zastiňuje přímou trasu LOS. V důsledku toho stínící efekt této překážky není zcela dokonalý a příjem je tak možný i v jejím stínu. Ohyb vzniká např. na hřebenech střech, ostrých vrcholcích hor, apod.



Rozptyl nastává tehdy, jestliže radiová vlna prochází nebo dopadá na takovou překážku, která je složena z většího počtu elementů, které jsou výrazně menší v porovnání s délkou vlny. K rozptylu dochází při dopadu vln např. na předměty s hrubým resp. zrnitým povrchem.



## 3 Mobilní síť GSM – mobilní síť 2. generace

### 3.1 Základy systému GSM

I v současné době je stále výrazně rozšířeným digitálním buňkovým systémem globální systém pro mobilní komunikaci GSM. Tento systém byl budován jako otevřený celoevropský standard a svým nasazením umožnil vyřešit tzv. mezinárodní roaming, tedy provozování jedné a téže mobilní stanice s jedním očíslováním, a to ve všech státech, které tento systém přijmou.



---

Důležitý je systém identifikace účastníka založený na kartě **SIM** (*Subscriber Identity Module*).

---



Karta SIM obsahuje nejen základní identifikační údaje účastníka, ale i řadu dalších specificky individuálních informací, jako je např. identifikační číslo účastníka **IMSI** (*International Mobile Subscriber Identity*), ověřovací klíč, informace o předplacených službách nebo telefonní seznam účastníka. Mobilní stanici pak lze využívat pouze s aktivací karty příslušného provozovatele, ale i zde jsou specifikovány výjimky v podobě tísňových volání. Z hlediska uživatele je důležitý i systém kódování a šifrování přenášené informace, který podstatnou měrou znemožňuje možnost odposlechu.

---

Spojovací proces při aktivním volání začíná nejprve výměnou signalizačních údajů. Jedním z nejdůležitějších úvodních procesů je kontrola oprávněnosti přístupu mobilní stanice do sítě.

---



Mobilní stanice MS vyšle své identifikační číslo IMSI prostřednictvím BS a **BSC** (*Base Station Controller*) až do **MSC** (*Mobile Switching Centre*). Blok **AuC** (*Authentication Centre*) vyšle směrem k mobilní stanici náhodné číslo, které je zde přeměněno na základě individuálních údajů a algoritmů SIM karty na jiné číslo, které je jako originální odezva zasláno zpět do MSC. V bloku **VLR** (*Visitor Location Register*) je pak tento zcela individuální údaj porovnán s databázovými údaji účastníka a v případě shody je pak mobilní stanici povolen přístup do sítě.

---



Pro zajištění anonymity účastníka je komunikující stanici dále přiděleno prozatímní identifikační číslo **TMSI** (*Temporary Mobile Subscriber Identity*), pod kterým se mobilní stanice identifikuje v oblasti příslušné MSC. Při přechodu mobilní stanice do oblasti jiné MSC, se jí přidělí i jiné TMSI. Teprve po skončení těchto procesů může dojít k vlastnímu přenosu uživatelských údajů.

---

System GSM pak navazuje na ostatní telekomunikační sítě **PSTN** (*Public Switched Telephone Network*), **ISDN** (*Integrated Services Digital Network*), družicové telekomunikace. Vlastní provoz GSM sítí potom zajišťují provozovatelé mobilních sítí tzv. operátoři (*providers*), tedy společnosti vlastníci příslušnou licenci na provozování tohoto typu sítí.

## 3.2 Sítě GSM a používané standardy

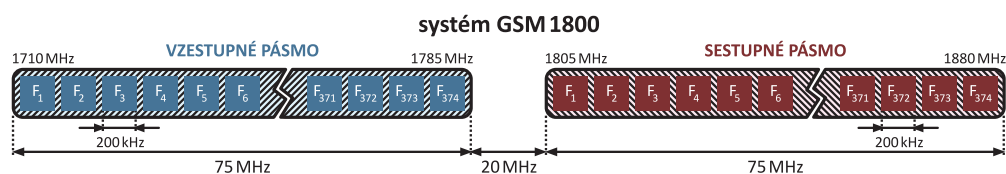
Základní aplikace systému GSM byly realizovány v pásmu 900 MHz. Nárůst provozu však vedl k vývoji dalších variant s více frekvenčními pásmy. Během vývoje tak vznikly tři standardy lišící se především použitým frekvenčním pásmem a počtem kanálů:

- **GSM 900** – pracující v pásmu 900 MHz, max.  $2 \times 124$  kanálů, šířka pásma  $2 \times 25$  MHz
- **GSM 1800** – pracující v pásmu 1800 MHz, max.  $2 \times 374$  kanálů, šířka pásma  $2 \times 75$  MHz
- **GSM 1900** – pracující v pásmu 1900 MHz, max.  $2 \times 298$  kanálů, šířka pásma  $2 \times 75$  MHz



Variety GSM 1800 a GSM 1900 jsou někdy označovány jako systémy DCS (*Digital Communication System* – digitální komunikační systém, nebo *Digital Cellular System* – digitální buňkový systém).

Rozdělení frekvenčního pásma standardu GSM 1800 užívaného na evropském kontinentu ukazuje následující obrázek.



Frekvenční pásmo standardu GSM 1800 a jeho dělení



Systém GSM 1800 nepřináší žádný zásadní technologický zvrát, ale umožňuje uspokojit další zájemce o mobilní komunikaci, a to zejména ve velkoměstech. Systém umožňuje vytvoření buď samostatné sítě nebo propojení se systémem GSM 900, kdy se kombinují mikrobuňky GSM 900 s pikobuňkami GSM 1800, jejichž cílem je obsluha prostor s vysokou koncentrací mobilních telefonů (např. obchodní domy nebo centra velkoměst). To však vyžaduje použití tzv. dvoupásmových (duálních) mobilních stanic.

## 3.3 Služby & Aplikace

---



System GSM umožňuje poskytování zejména telekomunikačních služeb (*Teleservices*) a přenosových služeb (*Bearer Services*).

---

Mezi telekomunikační služby (*Teleservices*) lze zahrnout především:

- telefonie (včetně tísňového volání, a to i v cizí síti)
- služby přenosu krátkých textových zpráv **SMS** (*Short Message Services*) s možností vyslat maximálně 160 znaků mezi dvěma body v obou směrech nebo s možností vyslat zprávy určené všem mobilním stanicím v buňce **CBS** (*Cell Broadcast Service*) jako např. dopravní a meteorologické zprávy
- záznamová služba (hlasová schránka)
- e-mail (služba s návazností na elektronickou poštu sítě Internet)
- bankovní služby
- informační služby, atd.

Mezi přenosové služby (*Bearer Service*) lze zahrnout především:

- asynchronní duplexní přenos dat s přenosovými rychlostmi 300 až 9 600 bit/s
  - synchronní duplexní přenos dat s přenosovými rychlostmi 2 400 až 9 600 bit/s
- 



Služby sítě GSM jsou nadále průběžně rozšiřovány a záleží jen na provozovateli sítě (operátorovi), které z nich budou v jeho síti zavedeny. Jedná se zejména o zvýšení přenosové rychlosti na 14,4 kbit/s, resp. při změně kódování až na 21,4 kbit/s.

---



Rozšiřují se i různé služby pro zvýšení účastnického komfortu. Např. zavedení služby tzv. okamžitého účtování (*Hot Billing*) umožnilo používání předplacených karet i službu jejich následného dobíjení, a tím vytvořilo skupinu anonymních uživatelů, kteří neplatí paušální měsíční poplatky.

---

## 3.4 Architektura sítě GSM

Celková základní struktura systému GSM je uvedena na obrázku níže.



Architekturu systému GSM je možné rozdělit na tři základní části – subsystém základnových stanic **BSS** (*Base Station Subsystem*), síťový spojovací subsystém **NSS** (*Network Switching Subsystem*) a operační subsystém **OSS** (*Operation Support Subsystem*).

### Subsystém základnových stanic

Mobilní stanice komunikují se základnovými stanicemi BS. Několika základnovým stanicím je přiřazena jedna řídicí základnová jednotka BSC, jejímž úkolem je zejména přidělovat a uvolňovat rádiové kanály pro komunikaci s mobilními stanicemi MS a zajišťovat správnou funkci „Handoveru“. Provoz systému vyžaduje, aby každá mobilní stanice, která je v provozu, poskytovala systému informaci o své poloze, a to v rámci buňky, ve které se nachází. Mobilní stanice MS většinou zachytí signály několika nejbližších základnových stanic BS, ze kterých vždy vybere optimální BS, přes níž je pak spojení navázáno.

### Síťový spojovací subsystém

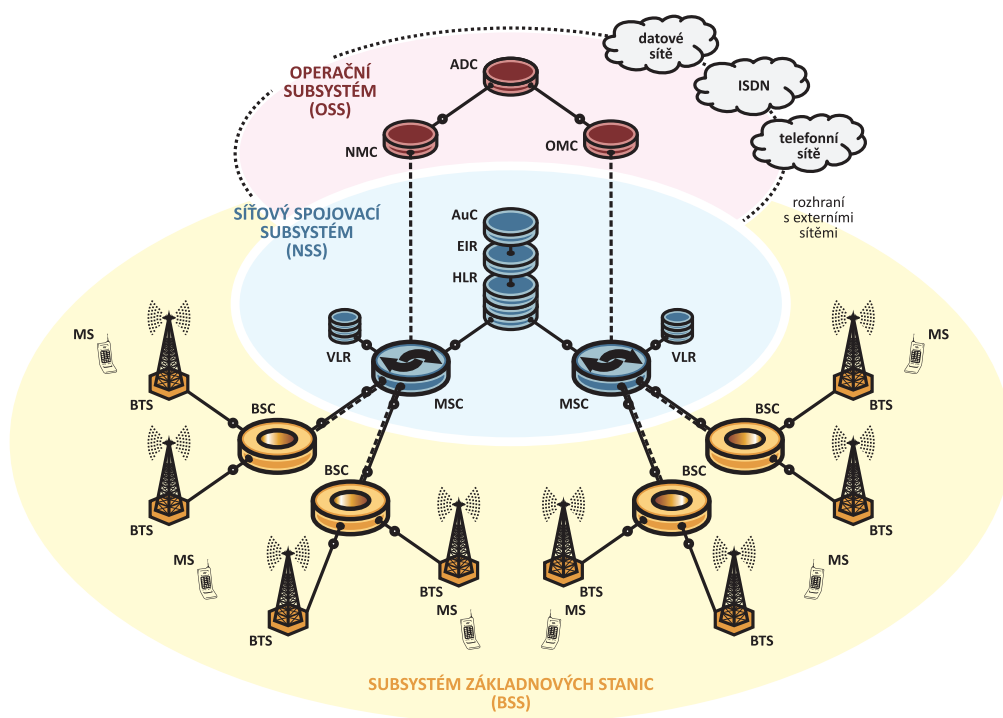
Tento subsystém obsahuje zejména ústřednu MSC, jež je realizována běžným typem telefonní ústředny, která je však doplněna o další funkce plynoucí z mobility přepojovaných účastnických stanic. Tato doplňující zařízení vytvářejí soubor pro tzv. identifikační databáze, obsahující:

- domovský registr **HLR** (*Home Location Register*) – uchovává informace o všech účastnících v dané oblasti. Ověření (identifikaci) účastníka zde zajišťuje autentizační centrum AuC. Každý účastník sítě je uchováván pouze v jediném HLR.
- návštěvnický registr **VLR** (*Visitor Location Register*) – uchovává přechodně aktuální informace o mobilních účastnících pohybujících se v oblasti příslušné ústředny MSC. Registr VLR si data vyžádá vždy z domovského HLR, a pokud účastník opustí navštívenou oblast, jsou vždy tato data zrušena.
- registr mobilních zařízení **EIR** (*Equipment Identity Register*) – uchovává informace o jednotlivých mobilních stanicích (seznam autorizovaných stanic, zcizených stanic, atd.).

### Operační subsystém

Zabezpečuje provoz subsystémů BSS a NSS. Obsahuje především blok dohledového centra **ADC** (*Administrative Centre*) řešící administrativní úlohy (např. zprávu účastnických poplatků, vyúčtování, apod.), dále blok centra řízení sítě **NMC** (*Network Management Centre*) zajišťující celkové řízení toku

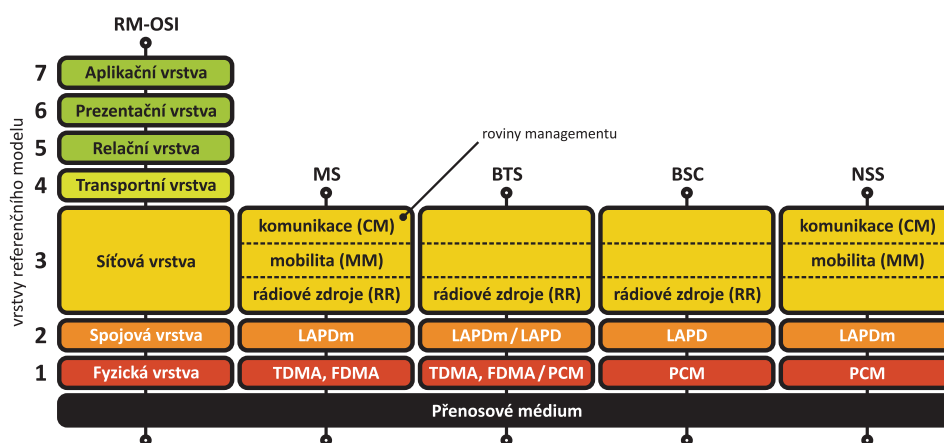
informací v síti, a blok provozního a servisního centra **OMC** (*Operation and Maintenance Centre*), řešící úlohy údržby a zajištění provozu sítě.



Architektura systému GSM

## 3.5 Vrstvový model GSM

Na následujícím obrázku je zobrazen vrstvý model systému GSM, který je definován pro tři nejnižší vrstvy modelu RM-OSI (fyzickou, spojovou a síťovou). Každá vrstva je tvořena skupinou tzv. entit, což jsou všechny do ní spadající funkční jednotky.



Vrstvový model systému GSM



V rámci modelu jsou využívány pojmy fyzický kanál a logický kanál. Fyzickým kanálem je myšlena kombinace radiového kanálu o šířce 200 kHz (označeného pomocí **ARFCN** (*Absolute Radio-Frequency Channel Number*)) a časového intervalu (označené příslušným číslem 0-7). Do každého takto vytvořeného fyzického kanálu potom mohou být v rozdílných časech procesem mapování vloženy různé logické kanály.

### Fyzická vrstva **PH** (*Physical Layer*)

Definuje radiové fyzické kanály, tedy parametry TDMA, FDMA, modulace a mapuje do těchto kanálů kanály logické.

### Spojová vrstva **DL** (*Data Link Layer*)

Na této vrstvě je použit protokol *LAPDm* (*Link Access Procedure for D-channel in mobile networks*), což je varianta protokolu LAPD, přizpůsobená pro použití v systému GSM. Na této vrstvě jsou vytvářeny a obsluhovány logické kanály.

## Síťová vrstva **NL** (*Network Layer*)

Tato vrstva je dále rozdělena na následující podvrstvy:

- management rádiových zdrojů **RR** (*Radio Resource Management*), který zajišťuje spojení mezi mobilní stanicí a subsystémem základnových stanic BSS, řídí handover, výkony vysílačů apod. Relace této podvrstvy existují mezi MS a BSS.
- management mobility **MM** (*Mobility Management*), zajišťující funkce vycházející z mobility účastníků. Na starost tedy má aktualizaci polohy, identifikaci a ověření účastníka. Vazby na této podvrstvě existují mezi MS a MSC/VLR, HLR a AuC.
- management komunikace **CM** (*Communication Management*) je opět podrobněji dělen na tyto části:
  - řízení hovoru **CC** (*Call Control*) zajišťuje vytváření, udržení a ukončení hovorů. Komunikace zde probíhá mezi MS a MSC.
  - doplňkové služby **SS** (*Supplementary Services*) má na starost registraci, řízení a rušení doplňkových služeb, poskytovaných danou sítí. SS procedury existují mezi MS a MSC/VLR, HLR a AuC.
  - služba krátkých textových zpráv **SMS** (*Short Message Service*): Zajišťuje mobilní stanicí možnost přijímání a odesílání krátkých textových zpráv. Komunikace probíhá mezi MS a SMS Centrem **SMSC** (*Short Message Service Centre*).

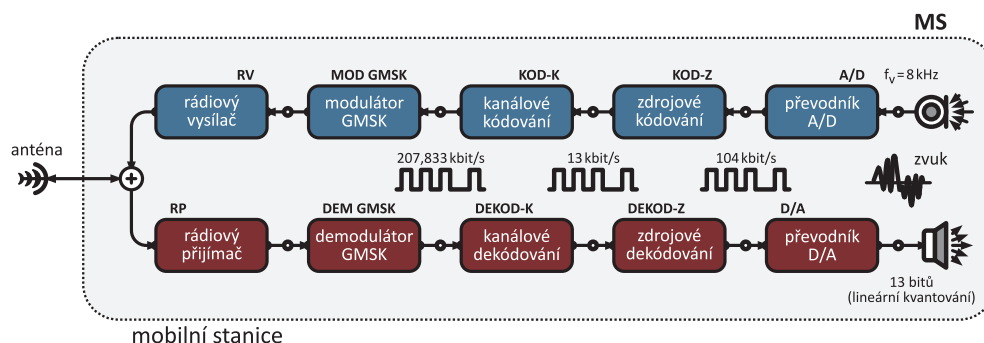


## 3.6 Struktura a princip funkce mobilní stanice

V následujících dvou kapitolách se pokusíme názorně popsat strukturu a princip funkce mobilní stanice a její návaznost na základnovou stanici.



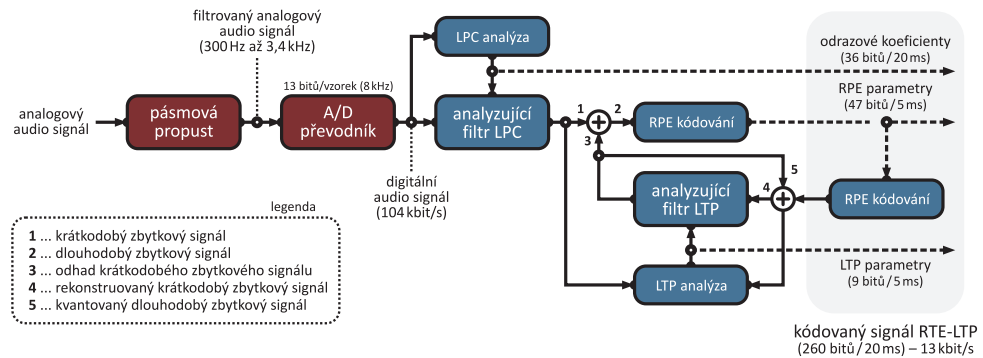
Mobilní stanice MS se skládá z vysílací a přijímací části, řídicího mikroprocesoru, SIM karty a dalšího příslušenství (mikrotelefon, klávesnice, displej, atp.).



Blokové schéma mobilní stanice

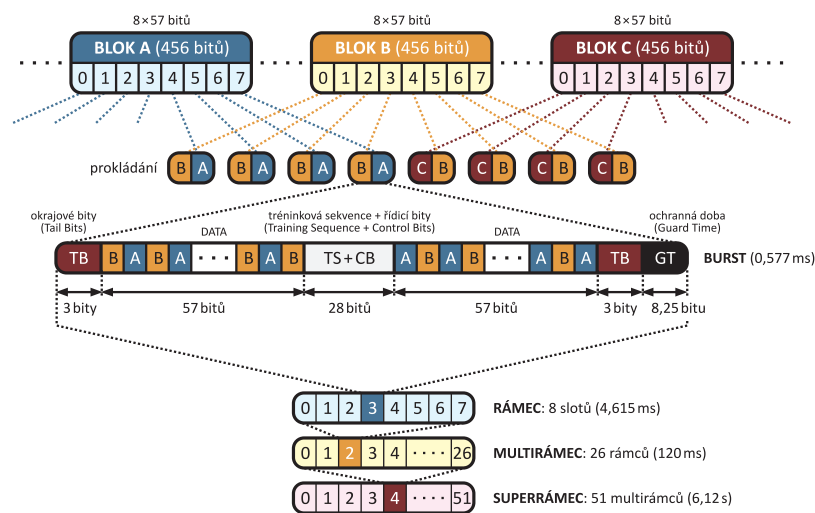
Analogový hovorový signál na výstupu mikrofону je digitalizován A/D převodníkem, který pracuje na principu PCM modulace (vzorkovací frekvence 8 kHz, vzorek o 13 bitech, lineární kvantování, přenosová rychlost signálu  $v_p = 8000 \times 13 = 104 \text{ kbit/s}$ ).

Další blok (KOD-Z) provádí na principu vokodéru, tj. řečového syntetizátoru, tzv. zdrojové kódování, realizované metodou buzení **RPE-LTP** (*Regular Pulse Excitation – Long Time Prediction*), čímž dochází k redukci přenosové rychlosti na hodnotu  $v_p = 13 \text{ kbit/s}$ . Pro buzení filtru na přijímací straně je přenášen zakódovaný zbytkový rozdílový signál mezi původním signálem a signálem syntetizovaným. Dlouhodobá predikce spočívá ve využití korelací mezi sousedními periodami základního tónu hovorového signálu k predikci hodnoty signálu v následující periodě.



Principiální blokové schéma zdrojového kodéru RPE-LTP

V bloku (KOD-K) je pak realizováno tzv. kanálové kódování, které redukovaný digitální hovorový signál zabezpečuje proti chybám vzniklým při přenosu. Navíc dochází k prokládání (*Interleaving*), jehož účelem je zvýšit odolnost signálu proti shlukům chyb. Každý bitový blok o délce 456 bitů vytvořený při kanálovém kódování, je následně rozdělen na 8 skupin po 57 bitech. Ty jsou poté metodou diagonálního prokládání proloženy s posledními čtyřmi skupinami z předchozího bloku a prvními čtyřmi skupinami z bloku následujícího. V takto upraveném signálu již dvě sousední skupiny 57 bitů nenáleží jedinému, ale dvěma různým blokům. Na přijímací straně se pak podle inverzního předpisu přijímaná proložená posloupnost přemění na posloupnost původní. Dojde-li při přenosu ke znehodnocení několika za sebou následujících bitů (shluk chyb), budou tyto bity v původní posloupnosti od sebe vzdáleny, a tím mohou být pomocí uvedených zabezpečovacích procesů opraveny.



Princip formátování a prokládání burstů

Kromě toho je část signálu, která obsahuje uživatelskou informaci, ještě podrobena procesu šifrování, za účelem znemožnění odposlechu radiové

komunikace. Po všech těchto úpravách činí přenosová rychlost v jednom kanálu  $v_p = 22,8$  kbit/s.

Do modulátoru GMSK (MOD GMSK) pak vstupuje takto zpracovaná posloupnost začleněná do TDMA rámce celkovou přenosovou rychlostí  $v_p = 270,833$  kbit/s (kanálový rámec o délce 156,25 bitu je přenesen za 0,577 ms).

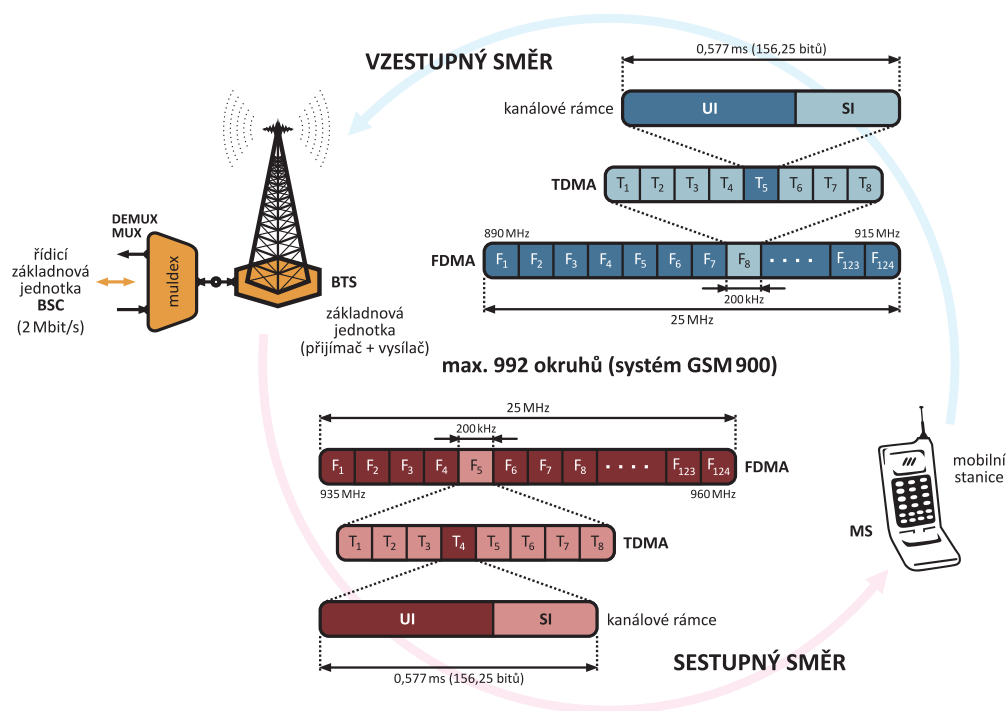
Po zpracování v dalších obvodech rádiového vysílače (RV) je signál vyzářen anténou mobilní stanice. Z hlediska vysílacího výkonu se mobilní stanice dělí do pěti tříd v rozmezí 0,1 až 20 W.

V přijímacím směru probíhají transformace signálu opačně než ve směru vysílacím. Signál přichází z antény do bloku rádiového přijímače (RP), odtud do demodulátoru (DEM) a obou dekodérů (DEKOD-K, DEKOD-Z). V převodníku D/A je pak digitální signál přeměněn na analogový a zaveden do telefonního sluchátka.

### 3.7 Mobilní stanice v GSM a její návaznost na základnovou stanicí BTS



Ve standardu GSM 900 jsou k přenosu signálů vyhrazena dvě frekvenční pásma o šířce 25 MHz se vzájemným odstupem 45 MHz. Pro přenos signálu ve směru základnová stanice → mobilní stanice je určeno pásmo 935 MHz až 960 MHz. Pro opačný směr je pak vyhrazeno pásmo 890 MHz až 915 MHz. Přístupová metoda pro realizaci radiového okruhu mezi mobilní stanicí a základnovou stanicí je založena na kombinaci frekvenčního (FDMA) a časového (TDMA) přístupu. V rámci FDMA jsou obě frekvenční pásma rozdělena na 124 subpásem ( $F_1$  až  $F_{124}$ ) o šířce 200 kHz. V každém subpásmu je pak dále metodou TDMA vytvořeno 8 (časových) kanálů ( $T_1$  až  $T_8$ ).



Principiální blokové schéma mobilní stanice standardu GSM 900 a její vazby na základnovou stanicí



Každý kanálový rámec (*Burst*) o délce 156,25 bitů s dobou trvání 0,577 ms obsahuje bity uživatelské informace **UI** (*User Information*) a služební informace **SI** (*Service Information*). Znamená to, že základnová stanice BS má celkovou kapacitu maximálně  $124 \times 8 = 992$  použitelných dvojic kanálů, resp. radiových okruhů.



---

Takt je ve standardu GSM odvozen od frekvence taktovacího generátoru  $f_t = 13 \text{ MHz}$ . Základní přenosová rychlost je  $v_p = 13\,000\,000/48 = 270\,833,33 \text{ bit/s}$ . Jeden rámeček TDMA (8 časových kanálů) má trvání 4,615 ms (multirámeček je složen z 26 rámečků a má trvání 120 ms, superrámeček je složen z 51 multirámečků a má trvání 6,12 s a nejvýše v této hierarchii stojí tzv. hyperrámeček).

---

## 3.8 Přenos dat v síti GSM a generace 2.5G mobilních systémů

Základní rychlost mezi mobilní stanicí MS a sítí GSM je 13 kbit/s obousměrně (pro přenos hovoru). Tento kanál lze užít nejen pro přenos hovoru, ale běžně i pro přenos dat založeném na přepojování okruhů typu **CSD** (*Circuit Switched Data*) rychlostí 9,6 kbit/s. V dalším kroku pak došlo ke zvýšení přenosové rychlosti až na 14,4 kbit/s, a to především díky snížení redundantní informace v podobě ochranných kódů.

Výraznější zvýšení přenosových rychlostí umožňují až systémy dvou a půlté generace označované jako 2+, resp. 2.5G, a to buď využitím:

- pomocí přepojování okruhů **HSCSD** (*High Speed Circuit Switched Data*) s dostupnou přenosovou rychlostí až 115 kbit/s symetricky nebo
- přenosu založenému na přepojování paketů **GPRS** (*General Packet Radio Service*) s dostupnou přenosovou rychlostí až 171 kbit/s.



---

Další zvyšování přenosových rychlostí je možné použitím systému **EDGE** (*Enhanced Data for GSM Evolution*). V porovnání s konvenčním systémem GSM je zde použita modulace s vyšším počtem stavů, konkrétně 8-PSK. Celkové přenosové rychlosti datových přenosů se pohybují až kolem 473,6 kbit/s.

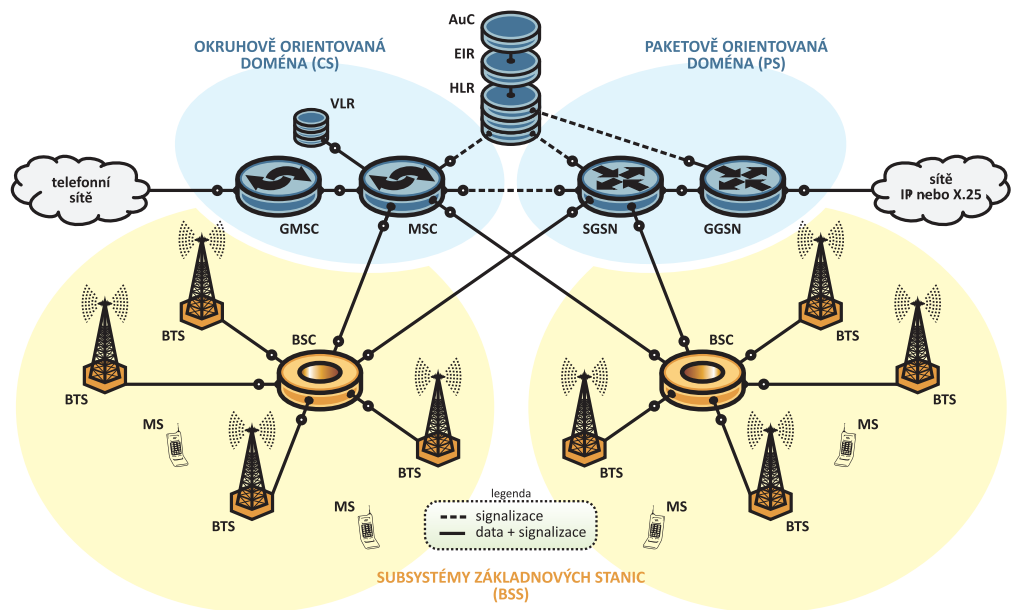
---



---

Infrastrukturu sítě GSM bylo u systémů 2.5G nutné doplnit o datový uzel **SGSN** (*Serving GPRS Support Node*), který komunikuje s radiovou částí sítě GPRS. Pro přenos dat do jiných paketových sítí, např. Internetu, byl následně implementován datový uzel **GGSN** (*Gateway GPRS Support Node*), který plní funkci směrovače. Zjednodušenou infrastrukturu mobilní sítě 2.5G si můžete prohlédnout na následujícím obrázku.

---



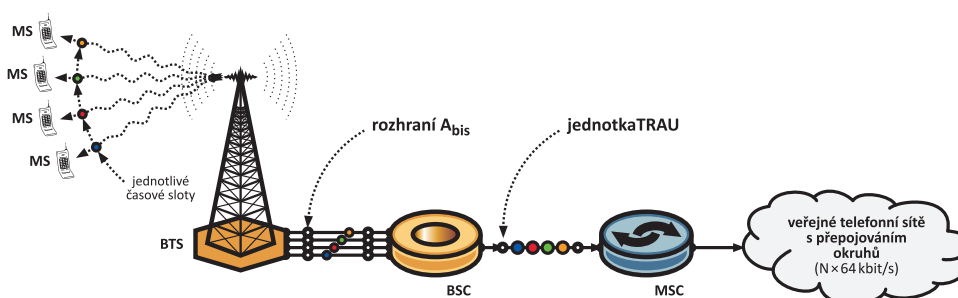
Zjednodušená infrastruktura mobilní sítě 2.5G

## 3.9 Přenos dat typu CSD v síti GSM

Digitální mobilní sítě typu GSM byly sice primárně vyvinuty pro potřebu přenosu hlasu, nicméně i lidský hlas přenášejí v digitálním tvaru. Díky tomu je pak pro ně relativně snadné přenášet namísto hlasu i obecná data. Přesto však existují jistá omezení související převážně s maximální dosažitelnou přenosovou rychlostí.



Samotný radiový kanál systému GSM disponuje přenosovou rychlostí 33,8 kbit/s. Z principu fungování sítě GSM je však pro každý časový interval (hovorový kanál) k dispozici jen 22,8 kbit/s. Zbylých 11 kbit/s je využito jako režijní přenosová kapacita sloužící pro zajištění funkcionality sítě GSM. Kapacitu časového intervalu nelze beze zbytku využít výhradně k přenosu vlastních uživatelských dat, protože i zde je třeba z důvodu zajištění spolehlivosti přenosu vyhradit určitý počet režijních bitů. Přenos dat je tedy ve výsledku realizován přenosovou rychlostí 9,6 kbit/s. Zbývající kapacita 13,2 kbit/s je tedy využito pro zajištění spolehlivosti přenosu, ošetření chyb a výpadků. Tento princip přenosu dat je stále velmi často používán a je označován jako CSD, což znamená, že se jedná o přenos dat na základě principu přepojování okruhů.



Přenos dat prostřednictvím CSD



Po určité době však bylo úspěšně odzkoušeno, že datové přenosy nepotřebují vždy tak vysoce robustní ochranné mechanismy a je tedy možné tyto procedury omezit, a tím navýšit dostupnou přenosovou rychlost pro vlastní přenos dat. Konkrétně se tak rychlost přenášených dat zvýšila na hodnotu 14,4 kbit/s, ale ovšem za podmínky, že bude dostupný kvalitnější signál. V okrajových částech buňky a stejně tak i v místech se slabým signálem se však efektivní využitelnost navýšení přenosové rychlosti výrazně snižuje.

Zvýšit spolehlivost datových přenosů přidáváním režijních bitů k bitům přenášeným však není jedinou možností. Je možné využít řešení využívající zpětnou vazbu mezi odesílatelem a příjemcem. Pokud příjemce přijme data poškozená, pošle o tom odesílateli žádost a ten na tuto žádost data opětovně pošle. Tento proces samozřejmě vyžaduje, aby byly obě strany domluveny na tomto postupu a je tedy nutno definovat protokol. Tento protokol se nazývá **RLP** (*Radio Link Protocol*).





---

Bitový tok je zde rozdělen na rámce po 200 bitech a k nim jsou přidány bity pro detekci chyb a číslování rámců. Na přijímací straně je pak testováno správné přijetí každého rámce a v případě chybného přenosu je požadováno jeho opětovné odeslání. Protokol RLP je implementován v koncových bodech sítě GSM, a to jednak v samotné mobilní stanici MS a jednak v ústředně MSC, resp. v na ní navazující jednotce spolupráce s externími sítěmi **IWF** (*InterWorking Function*)

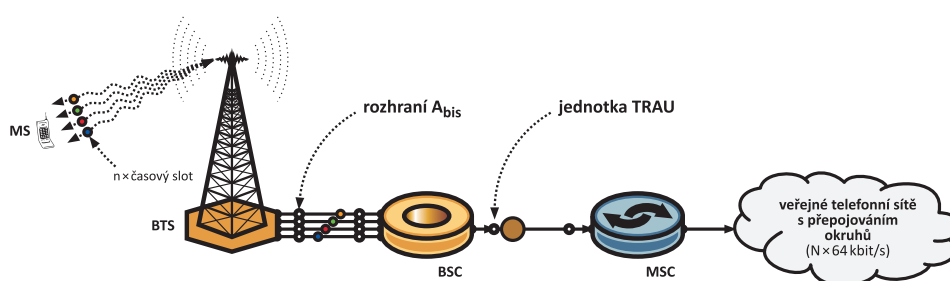
---

## 3.10 Přenos dat typu HSCSD v síti GSM

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, na jednom časovém slotu jsou data přenášena buď rychlostí 9,6 kbit/s nebo za pomoci zefektivnění zabezpečovacího mechanismu a omezením prostoru pro režijní bity rychlostí až 14,4 kbit/s. Toto je maximální dostupná přenosová rychlost, kterou lze využít v rámci jednoho časového slotu.



Jednou z možností, kterou je možné navýšit rychlost přenášených dat ve stávající síti GSM, je využít více časových intervalů současně. Tento režim přenosu dat je označován zkratkou HSCSD. Jedná se v principu stále o přenos dat s přepojováním okruhů, který však oproti klasickému přenosu dat typu CSD přináší výrazné zrychlení.



Přenos dat prostřednictvím HSCSD



Jak je vidět z předchozího obrázku, komunikace mobilního terminálu a základnové stanice BTS probíhá po více časových slotech současně podle toho, kolik je jich dané stanici přiděleno. Přidělení slotů je závislé na momentálním počtu dostupných kanálů a dále na schopnostech samotné mobilní stanice. Mezi základnovou stanicí BTS a základnovou řídicí jednotkou BSC (rozhraní  $A_{bis}$ ) jsou data přenášena po kanálech s rychlostí 16 kbit/s (v celkové přenosové rychlosti 2 Mbit/s je 32 kanálů rychlých 64 kbit/s, z nichž každý je dále rozdělen na  $4 \times 16$  kbit/s).



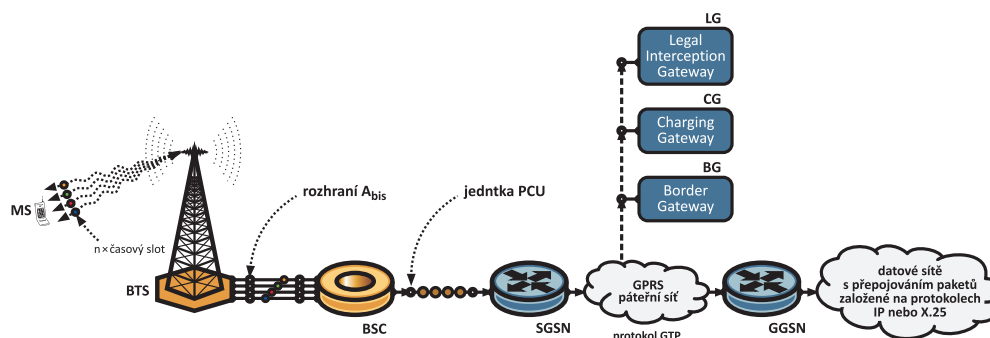
Těchto 16 kbit/s může být využito k přenosu hovorových dat (13 kbit/s) nebo pro přenos dat rychlostí 14,4 kbit/s. Ke sloučení do kanálu s přenosovou rychlostí 64 kbit/s dochází v základnové řídicí jednotce BSC, případně jednotce TRAU (*Transcoder and Rate Adaptation Unit*). Tato jednotka má za úkol převádět kódovaná hovorová data 13 kbit/s do standardních 64 kbit/s hovorových kanálů nebo upravovat rychlost přenášených dat rovněž na rychlost 64 bit/s. Odtud také vychází maximální přenosová rychlost 64 kbit/s, které je možné pomocí této technologie dosáhnout.

Přenos tímto způsobem může být, a ve většině případů tomu tak skutečně je, asymetrický, to znamená, že ve směru od mobilní stanice k síti jsou například

přiděleny tři časové intervaly a ve směru k mobilní stanici je například přidělen interval jeden. Tento způsob přidělování je velmi často používán a je vhodný například pro připojení k Internetu, kdy data směřují převážně směrem od sítě k uživateli. Standard, který režim HSCSD definuje, rozděluje dostupné režimy do 18 tříd podle toho, kolik kanálů je možno v jednotlivých směrech použít.

## 3.11 Přenos dat typu GPRS v síti GSM

Aby bylo možné v původní síti GSM, která je výhradně okruhově orientovaná, zavést paketově orientovaný přenos, bylo nutné původní síť doplnit o vybavení dle následujícího obrázku. Tento nový systém přenosu dat se nazývá GPRS.



Přenos dat prostřednictvím GPRS



Datový uzel SGSN komunikuje s radiovou částí sítě GPRS. Pro přenos dat do jiných paketových sítí, např. Internetu, pak slouží datová brána GGSN, která plní funkci směrovače. Prostřednictvím přiděleného jména přístupového bodu **APN** (*Access Point Name*) je umožněn uživateli přístup do definovaných sítí. Operátor může tímto způsobem vyhradit přístup na dané APN pouze definované množině SIM karet a vytvořit tak v síti GPRS privátní skupinu uživatelů, jejichž provoz je striktně oddělen od provozu ostatního. Z předchozího tedy plyne, že lze tímto způsobem vytvářet jak veřejné, tak i privátní datové sítě a rovněž je možné dle APN rozdílným způsobem tarifkovat jednotlivé služby operátora, jako například **WAP** (*Wireless Application Protocol*) či **MMS** (*Multimedia Messaging Service*).



Přístup na Internet je možný díky technologii WAP, která zpřístupňuje obsah webových serverů a jejich informační služby na mobilních terminálech i pomocí nízkokapacitních kanálů a displejů s omezeným rozsahem zobrazení. Aplikaci datové komunikace a WAP dovoluje v celém rozsahu technologie GPRS s paketově orientovaným přenosem a rozšířenou přenosovou rychlostí teoreticky až do 192 kbit/s. Zavedení této služby ovšem vyžadovalo mnohem rozsáhlejší a nákladnější zásahy nejen do struktury GSM sítě, ale také do mobilních zařízení.



V rámci sítě GSM s GPRS již dochází ve spolupráci SGSN a BSC k efektivnímu přidělování přenosových prostředků, což znamená, že přenosové prostředky jsou mobilní stanici přiděleny pouze tehdy, pokud má data k odeslání nebo pokud data přijímá.

+

---

Na rozdíl od přenosu dat v klasické síti GSM využitím HSCSD nedochází u systému GPRS k trvalému blokování přenosových cest.

---

Zvýšení přenosové rychlosti je u technologie GPRS možné díky sdružení více kanálů pro jednoho účastníka v radiové části sítě a volbou vhodného kódovacího systému pro tento kanál. V této souvislosti se hovoří o přenosu pomocí 3+1, 4+1, popř. 4+2 kanálů (směrem k účastníkovi + směrem od účastníka). V případě technologie GPRS je tedy využíván asymetrický přenos dat, kde směr k účastníkovi má vyšší přenosovou rychlost.



---

Hodnoty reálně dostupné přenosové rychlosti jsou silně závislé na konkrétní lokalitě a jejím zatížení.

---

—

---

V síti GSM s implementovaným GPRS je zřejmý negativní vliv zpoždění datových paketů způsobený průchodem paketů sítí. Hodnota zpoždění je silně závislá na velikosti paketů. Krátké pakety (do 100 bytů) mají při přenosu zpoždění od 0,5 do 1 sekundy, a to v závislosti na stavu a zatížení sítě. Naopak pakety s velikostí až 1 kB mohou mít zpoždění třeba i několik sekund.

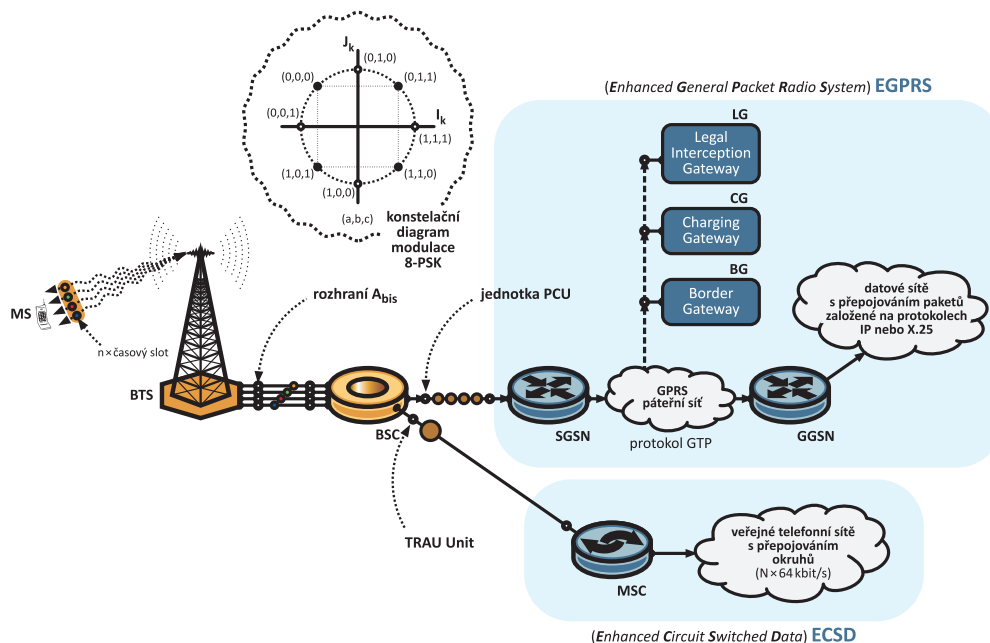
---

## 3.12 Přenos dat typu EDGE v síti GSM

Technologie přenosu dat v mobilních sítích 2.75G nesoucí zkratku EDGE navyšuje kapacitu sítě a dostupnou přenosovou rychlost, a to v kontextu s technologií HSCSD a GPRS uvedených v přechozích kapitolách. Cesta k vyšší efektivitě přenosu dat založené na bázi dokonalejšího kódování a sdružování hovorových kanálů (slotů) je již vyčerpána, a tak při maximální snaze zachovat vyhrazená frekvenční pásma, jejich rozdělení na frekvenční kanály o šířce 200 kHz a jejich další členění pomocí techniky časového multiplexu TDMA zbývá již jen možnost poslední, a tou je použití odlišné techniky modulace.



Způsob, jakým technologie EDGE dosahuje navýšení přenosové rychlosti, vychází z použití nového a „dokonalejšího“ způsobu modulace. Touto modulací je osmistavová fázová modulace **8-PSK** (*Phase Shift Keying*) použita namísto původní modulace **GMSK** (*Gaussian minimum Shift Keying*).



Přenos dat prostřednictvím EDGE



Symbolová rychlost na jednom frekvenčním kanálu o šířce 200 kHz zůstává stejná jako dříve, tj. 270,833 ksymbolů/s, avšak díky použití osmistavové modulace oproti původní dvoustavové, je nyní bitová rychlost trojnásobná. Maximální uváděná využitelná přenosová rychlost po odečtení režijních bitů pro zajištění datového přenosu je 473,6 kbit/s. To však platí při současném využití všech 8 slotů, a při vhodných podmínkách umožňujících optimální šíření signálu.



---

Nasazení této technologie však vyžaduje implementaci nového typu transceiveru do sítě. Tato změna se týká každé buňky, kde bude nová technologie nasazena. V dalším kroku pak úpravy souvisí především s aktualizací vlastního programového vybavení. Velmi výhodnou se jeví kombinace technologie EDGE spolu s technologiemi GPRS a HSCSD, kde stávající princip přenosu rozšířený o nový způsob modulace přináší výrazné zrychlení datových přenosů. Společným nasazením vznikají principy nazývané **ECSD** (*Enhanced Circuit Switched Data*) a **EGPRS** (*Enhanced General Packet Radio System*). Technologie EDGE je obecně považována za poslední krok ve „vylepšování“ původního systému typu GSM před zaváděním sítě 3. generace, např. UMTS.

---

## 4 Universal Mobile Telecommunication System (UMTS)

### 4.1 Úvod

Druhá generace mobilní systémů (2G), zastoupených především systémem GSM, umožňuje bezproblémový přenos hlasu prostřednictvím rádiových vln. Nicméně nedostatkem GSM je především velmi pomalý přenos dat, jejichž množství neustále roste. Důvodem je především vývoj stále nových mobilních aplikací, které kladou vysoké nároky na přenosovou kapacitu a vysokou kvalitu služby (např. video na vyžádání, stahování či posílání obrázků s vysokým rozlišením, atd.). Z toho důvodu se začalo koncem minulého století pracovat na nové generaci mobilních systémů, nyní známých pod označením 3G, neboli mobilní systémy třetí generace.

Pro tyto potřeby byla založena v roce 1998 pracovní skupina označená jako **3GPP** (*Third Generation Partnership Project*). Do této pracovní skupiny lze zařadit standardizační orgány z celého světa, jako je např. ETSI pocházející z Evropy, ANSI z USA či ARIB z Japonska. Skupina 3GPP měla tedy na starost vytvořit nový standard 3G, který je často označován pod názvem UMTS. Nicméně, když mluvíme o standardu 3G, nemyslíme tím konkrétní technologii, ale postupně vyvíjející se řadu technických specifikací, které postupně vylepšují a obohacují standard 3G.

V několika následujících kapitolách se zaměříme ve větším detailu především na frekvenční pásma přidělená pro UMTS, základní principy přenosu prostřednictvím vícenásobného přístupu **WCDMA** (*Wideband Code Division Multiple Access*). Dále také rozebereme vývoj a evoluci standardů 3G se speciálním zaměřením na vysokorychlostní datové přenosy. Na závěr pak bude naše pozornost zaměřena na kvalitu služeb **QoS** (*Quality of Service*) a aplikace použitelné v sítích založených na 3G.



## 4.2 Frekvenční pásma přiřazené technologií UMTS

Provozní kmitočtová pásma systému UMTS jsou nastavena přibližně na 2 GHz, které stále ještě zajišťují rozumné přenosové vlastnosti vyznačující se nízkým útlumem signálu a snadným pronikáním signálu do vnitřního prostředí a do budov. Přidělená kmitočtová pásma závisí především na tom, zda UMTS pracuje v tzv. časovém duplexu **TDD** (*Duplex Time Division*) nebo ve frekvenčním duplexu **FDD** (*Frequency Division Duplex*).

UMTS může pro provoz použít spektrum 2 x 5 MHz určené pro párované kmitočtové pásmo UMTS FDD a 5 MHz pro nepárované kmitočtové pásmo sloužící pro UMTS TDD. Je nutno podotknout, že přidělená kmitočtová pásma jsou poněkud odlišná pro Evropu a USA. V Evropě jsou pro UMTS TDD alokovány frekvence v rozmezí 1900-1920 MHz pro vzestupný směr a v rozmezích 2010-2025 MHz pro sestupný směr. Vzhledem k tomu, že FDD má být použita přednostně, je pro UMTS FDD k dispozici mnohem širší pásmo než je tomu pro UMTS TDD. Co se týče směru od uživatele, jsou přiděleny kmitočtová pásma od 1920 MHz do 1980 MHz. Na druhé straně, kmitočtová pásma v rozmezí 2110-2170 MHz jsou přidělena pro směr opačný, tedy sestupný.



---

Důvodem, proč se kmitočtová pásma pro vzestupný směr nachází na nižších frekvencích než pro opačný směr je ten, že mobilní terminály jsou značně limitovány výdrží baterie a tím i omezeným vysílacím výkonem. Protože použití nižších kmitočtových pásem je charakteristické nižším útlumem signálu, lze v sestupném směru snadněji zaručit přenos signálu od uživatele k základnové stanici. Všimněte si, že maximální vysílací výkon základnové stanice je obvykle 43-46 dBm, přičemž vysílací výkon mobilního terminálu je obvykle pouze do 23 dBm.

---

## 4.3 Vícenásobný přístup založený na WCDMA

Použití klasické přístupu TDMA nebo FDMA, původně používaného v sítích 2G, není pro síť 3G nadále dostatečné. Z toho důvodu je v případě UMTS zvolena značně sofistikovanější metoda přístupu založená na CDMA, který byl vysvětlen v kapitole **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Nicméně, v případě UMTS se nejedná přímo o CDMA, nýbrž o techniku WCDMA. Ve WCDMA jsou informační bity uživatelů rozloženy do mnohem širšího pásma, než tomu je v původním CDMA. Tímto způsobem je podstatně zvýšená kapacita systému, která se samozřejmě projeví zvýšením přenosových rychlostí dosažitelné jednotlivými uživateli připojenými k dané základnové stanici. Podobně jako v případě CDMA jsou informační bity násobeny kvazi-náhodnou sekvencí bitů, tzv. čipů, odvozených z rozprostřených kódů CDMA. UMTS používá čipovou rychlost 3,84 Mcps (Mega chip za sekundu) a šířku pásma 5 MHz. Další významná charakteristika systému založená na WCDMA je ta, že stejné pásmo lze použít ve všech buňkách, aniž by se navzájem rušily. V případě GSM využívá každá buňka jiné frekvence, aby se minimalizovalo rušení. Proto jsou v případě WCDMA radiové zdroje mnohem efektivněji využity.

Použití WCDMA přináší hned několik důležitých vlastností co se týče standardu UMTS:

- Rake přijímač – V mobilních sítích při šíření radiového signálu a jeho propagaci dochází k odrazům a útlumu signálu z důvodu různých překážek, jako jsou budovy, kopce, vegetace, atd. To má za následek tzv. vícecestné šíření a pomalé a rychlé úniky, neboli silný útlum signálu na určitých frekvencích. Systém UMTS založený na WCDMA bojuje s těmito negativními jevy za pomoci Rake přijímače, který je schopen efektivně přijímat a kombinovat jednotlivé komponenty signálu.
- Řízení výkonové úrovně - Jedním z nejdůležitějších aspektů týkajících se WCDMA je velmi rychlá regulace výkonu, a to zejména ve vzestupném směru. Pokud by toto výkonové řízení nebylo použito, jeden uživatel by byl schopen zablokovat celou buňku při použití nepřiměřeně vysokého vysílacího výkonu. Proto je snaha, aby síla přijímaného signálu na straně základnové stanice byla od všech uživatelů stejná, nezávisle na vzdálenosti či výše zmíněným vícecestným šířením. Poznamenejme ale, že v případě HSPA, je toto tvrzení jen z části pravdivé, jak bude vysvětleno později.
- Měkký handover - Vzhledem k tomu, že sousední buňky používají stejnou frekvenci, mohou být uživatelé současně připojeni ke dvěma základovým stanicím (pro tyto účely musí být použity dva různé rozprostřené kódy). To má za následek tzv. měkký (nebo také bezešvý) handover mezi dvěma buňkami bez jakéhokoliv přerušení spojení.

## 4.4 Standardizace a vývoj UMTS

Vývoj sítí 3G byl zahájen v roce 1999 vydáním úplně první verze UMTS známou pod označením Release 99. Od té doby byla schválena řada dalších doporučení jak je popsáno v této kapitole.

### Release 99

Tento standard je založen na GSM síti a je tedy i zpětně kompatibilní. Ve srovnání se sítí 2G přináší Release 99 zcela nový typ radiové přístupové sítě, známé jako **UTRAN** (*UMTS Universal Radio Access Networks*). Teoretické maximální dosahované přenosové rychlosti jsou 2 Mbit/s ve směru k uživateli a 384 kbit/s ve směru opačném.

### Release 4

Release 4 byl schválen v roce 2001 a zavádí několik podstatných změn týkající se především páteřní sítě. Hlavními rysy jsou oddělení uživatelských dat a kontrolních informací ve spojově orientovaném přenosu **CS** (*Circuit Switched*). Dále jsou definována nová rozhraní umožňující zavedení subsystému **IMS** (*IP Multimedia Subsystem*).

### Release 5

Hlavní vylepšení tohoto standardu je umožnění vysokorychlostních přenosů ve směru k uživateli, označovaného jako **HSDPA** (*High Speed Downlink Packet Access*). Pomocí HSDPA lze zvýšit přenosovou kapacitu na jednu buňku až na 14,4 Mbit/s.

### Release 6

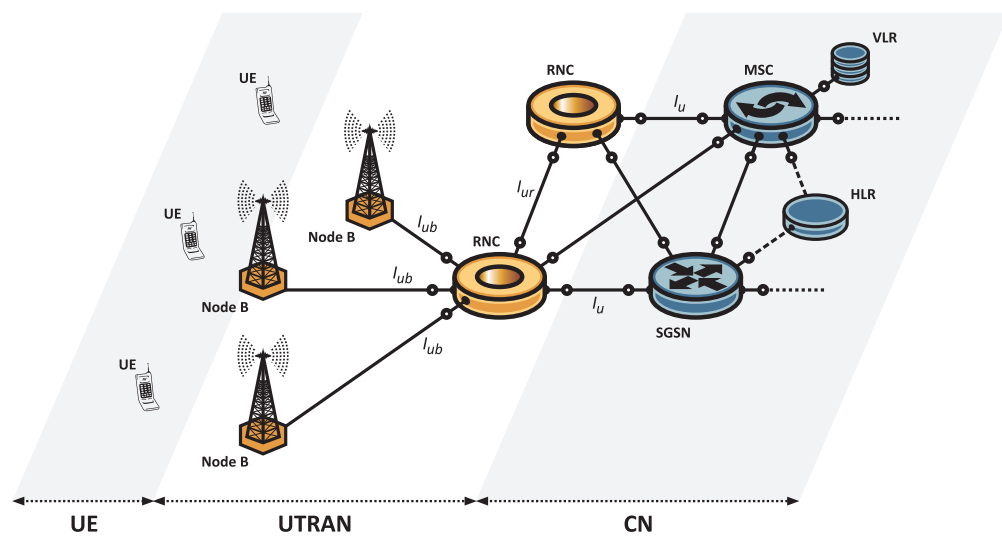
Podobně jako předchozí standard, Release 6 umožňuje podstatné navýšení přenosových rychlostí, ale tentokrát ve směru od uživatele. Jedná se o tzv. **HSUPA** (*High Speed Uplink Packet Access*) dosahující přenosových rychlostí až 5,76 Mbit/s. Dále tento standard přináší značné vylepšení subsystému IMS.

### Release 7

Jedná se o poslední standard v rámci UMTS, který dále vylepšuje přenosové rychlosti v obou směrech přenosu. Datové přenosy bývají často označovány jako HSPA+. Zlepšení je umožněno zavedením efektivnějšího typu modulace (64 QAM) a použitím techniky **MIMO** (*Multiple Input Multiple Output*), kdy lze použít většího počtu antén na přijímači a vysílači. V důsledku toho jsou maximální teoretické přenosové rychlosti až 42 Mbit/s ve směru k uživateli a až 11,5 Mbit/s ve směru opačném.

## 4.5 Architektura sítě

Síťová architektura UMTS se skládá ze tří hlavních částí, jak je ukázáno na obrázku. Je důležité si uvědomit, že hlavní bloky sítě zůstávají stejné i pro novější verze UMTS, pouze jejich funkce jsou postupně změněny či rozšířeny. Síťová architektura UMTS je logicky rozdělena do tří částí, **UE** (*User Equipment*), rádiová část **UTRAN** a páteřní síť **CN** (*Core network*). Jednotlivé části jsou od sebe odděleny rozhraními definovanými 3GPP. Hlavním účelem rozhraní je umožnit přímou komunikaci mezi jednotlivými síťovými entitami a usnadnit tak jejich optimální spolupráci a koordinaci.



Architektura sítě UMTS

První část sítě architektury UMTS (tj. UE) obsahuje dva bloky:

- **MT** (*Mobilní terminál*) - Zařízení, které má na starost veškerou komunikaci na Uu rozhraní. Jedná se tedy např. o mobilní telefon, notebook nebo PDA. MT je identické zařízení jako MS definovaná v sítích 2G.
- **USIM** (*UMTS Subscriber Identity Module*) – Karta obsahující specifické údaje o uživateli, jako je identifikace, autentizační algoritmus, atd. Karta USIM je analogická ke kartě SIM používanou v sítích 2G.

Druhá část síťové architektury UMTS je reprezentována rádiovou částí UTRAN. Tato část je také nejvíce upravena v porovnání se sítí 2G. UTRAN se skládá ze dvou síťových prvků:

- **Základnová stanice NodeB** – NodeB je obdobou BTS v síti 2G. Za tímto účelem se NodeB skládá ze stožáru, vysílací/přijímací antény a potřebného hardwaru a softwaru. Hlavním cílem NodeB je umožnit uživatelům připojení k 3G síti pomocí rádiového kanálu (tj. přes Uu rozhraní) a zajišťuje přenosové funkce rádiového kanálu.

- **RNC** (*Radio Network Controller*) – Blok RNC je obdobou uzlu BSC, používanou v sítích 2G. Proto je také RNC zodpovědný za řízení několika připojených NodeB. Bloky RNC a BSC mají několik podobných funkcí jako je odpovědnost za radiové zdroje (alokace radiových zdrojů, řízení přístupu, ochrana proti přetížení, atd.). Nicméně blok RNC má větší odpovědnost co se týká pohybu uživatelů a řízení jednotlivých uživatelů než blok BSC. V sítích 2G toto mají převážně na starosti bloky MSC a SGSN.



Zajímavý fakt týkající se NodeB je samotný název pro něj vybraný. Lze se ptát, proč právě NodeB? V sítích 2G (GSM) je základnová stanice logicky pojmenovaná jako BTS, což v Anglickém jazyce znamená "Base Transceiver Station". Když 3G síť byla původně navržena, byly jednotlivé subjekty v síti označeny jednoduše jako uzly (z angličtiny Node), aby se odlišily jména uzlů pojmenovaných v síti 2G. Z toho důvodu bylo mobilní zařízení označeno jako NodeA, základnová stanice jako NodeB, atd. Všechny subjekty byly jeden po druhém přejmenovány, ale název pro základnové stanice zůstal jako NodeB, protože žádné vhodnější jméno nebylo nalezeno.

Poslední část UMTS se skládá z páteřní části CN, která je logicky rozdělena na okruhově přepínanou část CS a paketově přepínanou část **PS** (*Packet Switched*). Vzhledem k tomu, že struktura CN je téměř stejná jako v případě sítě 2G, jsou zde uvedeny pouze hlavní rozdíly (detailní popis jednotlivých prvků částí sítě CN lze nalézt v kapitole 12):

- Jak už bylo řečeno výše, řízení mobility bylo v UMTS přeneseno z CN části do radiové části UTRAN.
- Bezpečnostní a zabezpečovací funkce jsou v UMTS rozšířeny v porovnání s 2G. Jedná se především o nové šifrovací algoritmy, které jsou ale prováděny už v RNC místo CN.
- Řízení klasických hovorů je prováděno v CN místo v BSS.

## Subsystém IMS

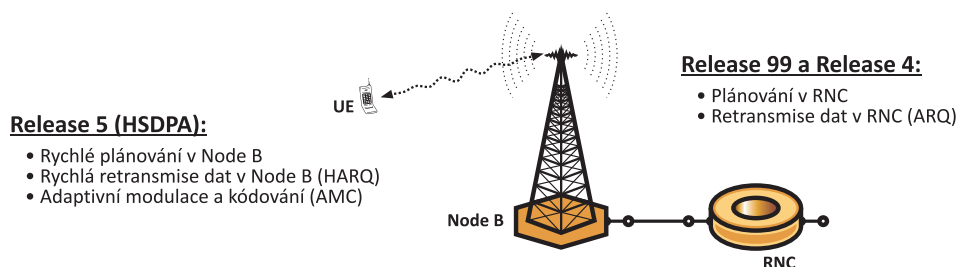
Nedílnou součástí páteřní sítě UMTS je subsystém IMS, který umožňuje flexibilní a rychlý vývoj nových služeb 3G. Chceme-li být konkrétnější, tak IMS dovoluje zavádět širokou škálu nových aplikací založených na bázi paketového přenosu jako přenosy dat, videa a textu.

IMS byla poprvé zavedena ve verzi UMTS Release 4, kde byla její architektura oddělena od přístupové sítě s cílem zajistit nezávislou kontrolu provozu. V UMTS Release 6 se potom subsystém IMS stává úplně nezávislým na přístupové části sítě. V důsledku toho může být IMS integrovaná také s jinými přístupovými sítěmi např. přístupovými systémy na základě technologie GPRS nebo EDGE.

Jako signalizační protokol je v IMS použit protokol **SIP** (*Session Initiation Protocol*), který vytváří paketové spojení mezi více mobilními terminály (např. pro hlasové nebo video konference) nebo paketové spojení mezi jedním mobilním terminálem a aplikačním serverem.

## 4.6 HSDPA

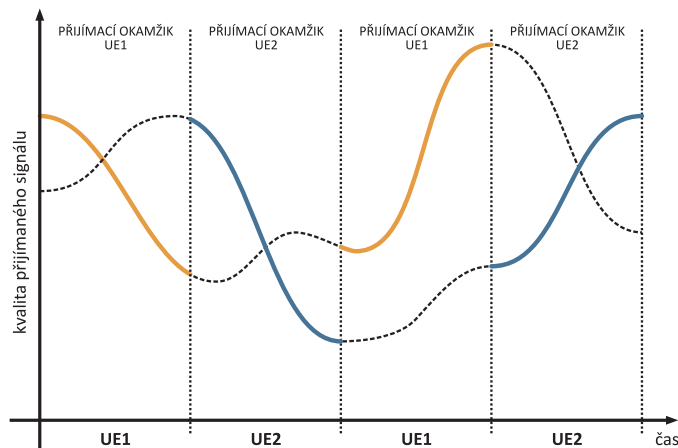
Vysokorychlostní přenos HSDPA je poprvé nově zaveden v UMTS Release 5. HSDPA přijímá nové techniky umožňující podstatně zvýšit přenosové rychlosti ve směru k uživateli (datový tok ve směru od uživatele zůstává stejný). V důsledku toho je nejvyšší teoretická přenosová rychlost na jednu buňku zvýšena z předchozích 2 Mbit/s až na 14,4 Mbit/s. Změny v architektuře sítě jsou patrné především v radiové části UTRAN. Klíčová myšlenka byla přesunout několik procedur pro správu radiových zdrojů do základnové stanice NodeB. Dříve, tj. v UMTS Release 99 a v UMTS Release 4, byla většina procedur prováděna dále od uživatele až v bloku RNC. Výhodou tohoto kroku je, že NodeB je mnohem "blíže" k uživatelům. Proto může mnohem efektivněji reagovat na měnící se kvalitu radiového kanálu a požadavků jednotlivých uživatelů. Procedury, které byly přesunuty do NodeB jsou znázorněny na níže uvedeném obrázku.



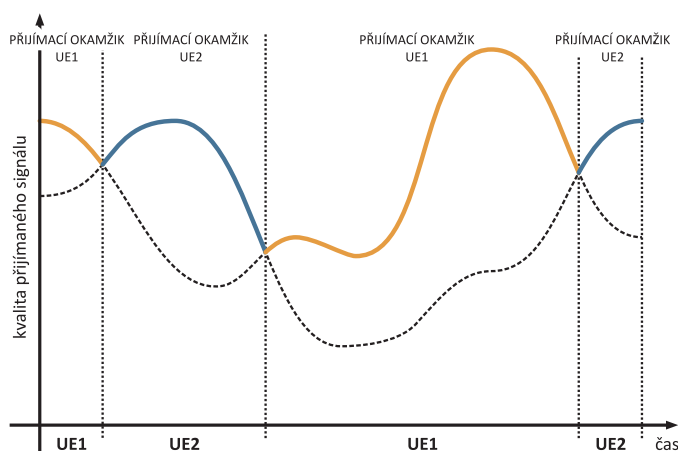
Porovnání procedur prováděných v základnové stanici pro HSDPA (Release 5) a pro Release 99/Release 4

### Rychlé plánování datových přenosů

Důležitým aspektem týkající se HSDPA je, že většina radiových zdrojů je sdílena mezi jednotlivými aktivními uživateli. Zbytek radiových zdrojů je především určen pro klasické volání či streamované video. Účelem rychlého plánování dat je poté přiřadit radiové prostředky, kterými NodeB disponuje, svým uživatelům. V HSDPA lze dynamicky přiřazovat data uživatelům každé 2 ms. Této době se říká časový interval přenosu **TTI** (*Time Transmission Interval*). Důvod, proč říkáme rychlé plánování přenosu je ten, že u původního standardu UMTS (UMTS Release 99 nebo Release 4), je minimální hodnota TTI 10 ms. Zkrácení hodnoty TTI je umožněno tím, že NodeB přímo komunikuje s připojenými mobilními terminály a přijímá tedy aktuální informace o jejich požadavcích a stavu radiového kanálu. Několik strategií pro přidělování zdrojů uživatelům je ukázáno na následujícím obrázku.



RR PLÁNOVAČ



MAX C/I PLÁNOVAČ

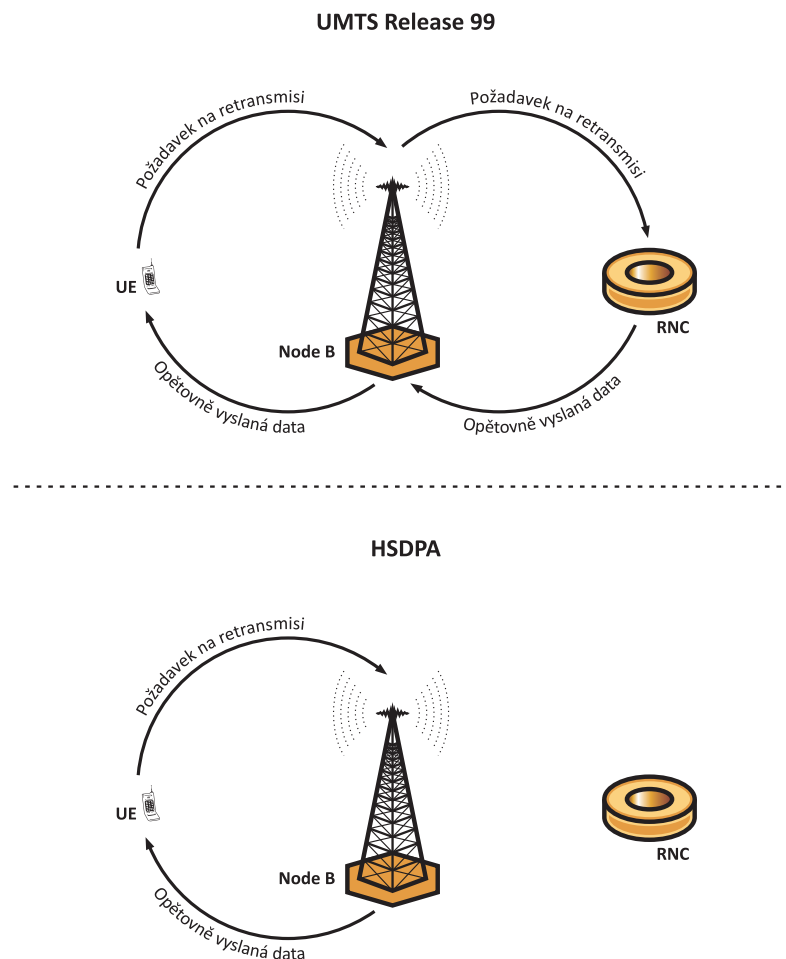
#### Plánování přenosu v HSDPA

Nejpopulárnější a zároveň nejjednodušší strategie se nazývá *Round Robin (RR)*, kde se pravidelně střídají jednotliví aktivní uživatelé a nebere se žádný ohled na stav radiového kanálu. Hlavní nevýhodou této metody je to, že radiové zdroje jsou neefektivně využívány, protože uživatelé mající špatné podmínky na rádiu nemohou přenášet vysokými přenosovými rychlostmi. Důvod je ten, že musí být velká část přenosových prostředků použita pro zabezpečení správného přijetí právě generovaných dat. Druhá metoda plánování datových přenosů preferuje ty uživatele, kteří mají ideální přenosové podmínky. Jinými slovy, uživatel který má největší odstup nosné od šumu přijímá data vyslané základnovou stanicí NodeB. Proto se pro tuto metodu vžil název max-C/I (maximal Carrier to Interference). Výhoda této metody je ta, že přenosová kapacita na buňku je maximalizována, protože je vždy použita nejvyšší možná přenosová rychlost ve směru k uživateli. Na druhou stranu má ale tato strategie i podstatnou nevýhodu, protože uživatelé v blízkosti základnové stanice NodeB jsou preferováni před uživateli nacházející se na okraji buněk a mající podstatně horší podmínky pro přenos dat. Z toho důvodu byla navržena další metoda pro plánování přenosů, která se snaží najít určitý kompromis mezi oběma předchozími metodami. Tato metoda se snaží objektivně plánovat přiřazování radiových prostředků a je nazývána jako

*Proportional Fair (PF)*. Při použití PF jsou přiřazeny přijímací okamžiky pro aktivní uživatele jak v závislosti na kvalitě kanálu, tak i v závislosti na tom, jak dlouho danému uživateli nebyli přiděleny žádné prostředky. Proto se pro neaktivního uživatele neustále zvyšuje pravděpodobnost, že bude moci v příštím TTI přijímat data.

## Rychlé přeposílání chybných dat

Pokud UE není schopna správně dekodovat přijaté datové pakety, je nutné co nejrychleji tyto pakety poslat znovu. V předchozích verzích UMTS, je žádost o přeposílání špatně přijatých paketů zaslána do řídicího bloku RNC, který je zodpovědný za tuto operaci. V HSDPA je za tuto operaci zodpovědný NodeB, který je blíže k uživateli a to je taky hlavní důvod, proč mluvíme o rychlém přeposílání chybně přijatých paketů. Základní princip této metody v porovnání se starším standardem UMTS je znázorněn na následujícím obrázku.



Princip rychlého přeposílání dat v HSDPA

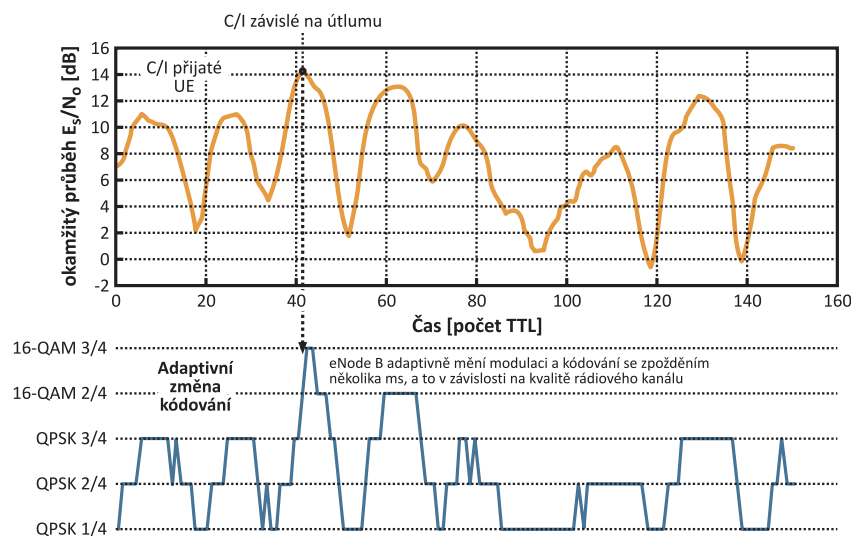
Další novinkou v HSDPA je princip mechanismu mající za úkol samotné přeposílání chybných paketů. Zatímco v původním standardu UMTS je použit



jednoduchý **ARQ** (*Automatic Repeat Request*) princip, HSDPA využívá mnohem sofistikovanější mechanismus známý jako **HARQ** (*Hybrid ARQ*). Základní princip HARQ je ten, že je schopen dočasně uložit poškozená data do vyrovnávací paměti. Ta jsou poté zkombinována s přeposlaným paketem a tím se zvyšuje pravděpodobnost úspěšného dekódování a tedy i úspěšného přijetí paketů.

## Rychlá adaptace rádiového kanálu

Rychlou adaptací rádiového kanálu je myšlena adaptivní změna modulace a kódování (*Adaptive Modulation and Coding (AMC)*) v závislosti na kvalitě kanálu. Rychlá adaptace je prováděna přímo základnovou stanicí NodeB. Pokud je tedy kvalita přenosu špatná, je použita více robustní modulační schéma a kódování, kdy je sice přeneseno méně informačních bitů (menší přenosová rychlost), ale je zajištěna menší chybovost přenosu. Jakmile jsou vlastnosti rádiového kanálu dostatečně zlepšené, což se projeví vyšším odstupem nosné k celkovému rušení (tj. větší poměr C/I), vybere základnová stanice efektivnější modulační schéma. Princip rychlé adaptace rádiového kanálu je zobrazen na následujícím obrázku. Poznamenejme, že ve starších verzích UMTS je rychlá adaptace prováděna řízením výkonu, ne změnou modulace a kódování dat při přenosu. Další významný rozdíl je skutečnost, že HSDPA podporuje rovněž modulaci 16 QAM zatímco starší verze UMTS podporovali pouze modulaci QPSK.



Rychlá adaptace rádiového kanálu v HSDPA

## Vývoj HSDPA

Vzhledem k tomu, že ani původní HSDPA s maximálními přenosovými rychlostmi 14,4 Mbit/s není dostatečné, je HSDPA v novějších verzích standardu upravováno. Další navýšení přenosových rychlostí ve směru k uživateli je umožněno ve verzi 7 (Release 7) pomocí techniky MIMO (podrobnější vysvětlení principu MIMO budou popsány později v kapitole 31). Tímto způsobem může být teoreticky rychlost přenosu až zdvojnásobena, tedy maximální dosahovaná

kapacita na jednu základnovou stanici je až 28,8 Mbit/s. Kromě toho je další navýšení umožněno zavedením ještě efektivnější modulace 64 QAM a tím je zvýšena přenosová kapacita buňky na přibližně 42 Mbit/s. Další zvyšování přenosové kapacity systému lze ve verzi 8 (Release 8) dosáhnout prostřednictvím rozšíření přenosového pásma na dvojnásobek pomocí tzv. metody *Dual Carrier (DC)*. Ve výsledku to znamená, že při použití přenosového pásma 10 MHz místo původních 5 MHz je maximální přenosová rychlost ve směru k uživatelům až 84 Mbit/s.



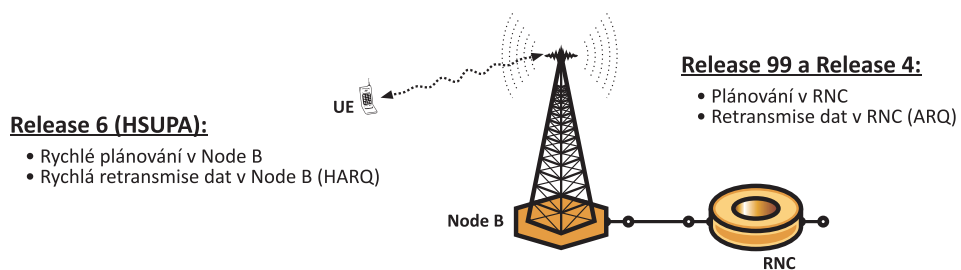
---

Je nutné si uvědomit, že výše uvedené přenosové rychlosti jsou pouze teoretické a uživatel je schopný přenášet data podstatně menšími rychlostmi. To je způsobeno hned z několika důvodů. Prvním důležitým aspektem, který je nutno vzít v úvahu je ten, že maximální teoretické přenosové rychlosti nelze dosáhnout v reálném systému. Dostupná kapacita na jednu buňku je totiž silně závislá na kvalitě rádiového kanálu mezi uživatelem a základnovou stanicí, na maximálním povoleném vysílacím výkonu a na režii přenosu potřebnou pro řízení celého systému. Kromě toho je skutečná dosahovaná kapacita jedné buňky dělena mezi jednotlivé aktivní uživatele. Další důležité omezení se pak vztahuje k samotnému mobilnímu terminálu a jeho schopnostem (např. terminál nemusí podporovat všechny typy modulace a kódování). V důsledku výše zmíněného jsou současné mobilní sítě schopné podporovat pouze přenosové rychlosti v řádu několika Mbit/s na jednoho uživatele.

---

## 4.7 HSUPA

V UMTS Release 6 je poprvé představena nová metoda umožňující rychlé datové přenosy ve směru od uživatele. Teoretická maximální dosahovaná rychlost v tomto směru je až 5,76 Mbit/s na jednu buňku. Zatímco HSDPA, která byla popsána v předcházející kapitole, přináší pouze softwarové úpravy u základnové stanice NodeB a u řídicího bloku RNC, HSUPA přináší modifikace i u mobilního terminálu. To je poměrně logické, protože účel HSUPA je zvýšit kapacitu ve směru od uživatele a tudíž jisté změny je nutné aplikovat i zde. Z technického hlediska je princip HSUPA podobný jakou u HSDPA. Konkrétně se jedná především o rychlé plánování (přidělování) zdrojů přímo v základnové stanici, jak je ostatně ukázáno na následujícím obrázku. Nicméně samotný princip plánování je diametrálně odlišný pro obě metody, jak vysvětlíme dále. Další podstatný rozdíl mezi HSDPA a HSUPA je pak v rychlé adaptaci v závislosti na kvalitě přijímaného signálu. Zatímco u HSDPA je prováděna dynamická adaptace modulační techniky a kódovacího poměru, u HSUPA metody je tento problém řešen rychlou regulací vysílacího výkonu mobilní stanice.



Porovnání procedur prováděných v základnové stanici pro HSUPA (Release 6) a pro předchozí verze UMTS

### Rychlé plánování datových přenosů

Zásadní rozdíl mezi HSDPA a HSUPA spočívá v plánování datových přenosů a jejich přidělování jednotlivým uživatelům. Pro směr k uživateli (HSDPA) jsou rádiové zdroje sdíleny mezi aktivními uživateli. Na druhou stranu ve směru od uživatele (HSUPA) mají všichni aktivní uživatelé přiděleno určité množství zdrojů současně. V závislosti na možnostech mobilního terminálu, je přiřazování prostředků prováděno adaptivně každých 10 ms (musí podporovat všechny terminály) nebo každé 2 ms (nemusí podporovat všechny terminály).

Princip rychlého datového plánování v HSUPA je následující. Kdykoliv má mobilní stanice data, která chce přenést, musí zaslat žádost o přidělení rádiových prostředků základnové stanici. V následujícím kroku základnová stanice zjistí, zda je žádost stanice oprávněna a v pozitivním případě jí přiřadí potřebné datové prostředky.



---

Vzhledem k tomu že v sítích UMTS je používána metoda WCDMA, kde všechny mobilní terminály využívají celé přenosové pásmo, je systém omezen především maximálním vysílacím výkonem a následným vzájemným rušením. Proto, když mluvíme o přidělování zdrojů jednotlivým uživatelům, nemáme na mysli fyzické přenosové prostředky, jako je třeba šířka pásma, ale velikost vysílacího výkonu s kterou může mobilní terminál vysílat. V případě WCDMA mluvíme o tzv. maximálním přijatém výkonu na straně základnové stanice NodeB, která je definována v řídicím bloku RNC. Proto rychlé přidělování rádiových zdrojů v HSUPA pracuje na principu, že aktivní uživatelé adaptivně mění vysílací výkon v závislosti na jejich požadavcích. Pokud potřebují přenést velké množství dat, musí svůj vysílací výkon zvýšit a naopak, pokud má mobilní terminál malé množství dat k odeslání, jeho výkon je snížen na nutné minimum.

---

## Vývoj HSUPA

Podobně jako v případě HSDPA lze navýšit přenosové rychlosti v HSUPA prostřednictvím efektivnější modulace a novými technologickými postupy. Nejzásadnější zlepšení je dosaženo využitím techniky MIMO dovolující zdvojnásobit maximální teoretickou přenosovou rychlost přibližně až na 11,5 Mbit/s.



---

Kombinace HSDPA spolu s technikou HSUPA je většinou označována jako HSPA říkající, že jsou podporovány vysokorychlostní přenosy v obou směrech vysílání. Kromě toho je novější HSDPA/HSUPA na základě UMTS verze 7 (Release 7) často označována jako HSPA +.

---

## 4.8 Služby a kvalita služeb v UMTS

Sítě založené na 2G, tedy sítě GSM, jsou především určeny pro přenos hlasu (klasický telefonní hovor) a pro posílání krátkých textových zpráv (SMS). Použití datových přenosů a tedy multimediálních služeb jsou v sítích GSM prakticky nemožné. I když částečné vyřešení problému bylo dosaženo prostřednictvím GPRS (2.5G) a EDGE (2.75G) umožňující paketové datové služby, jako je procházení webu, WAP nebo posílání multimediálních zpráv (MMS), podporované reálné datové přenosové rychlosti byly stále nedostatečné (přibližně až 50 kbit/s pro GPRS a až 200 kbit/s pro EDGE).

Průlom ve využívání multimediálních služeb přinesly až sítě založené na 3G, tedy sítě UMTS. Tyto sítě podporují širokou škálu nových služeb a aplikací mající požadavky na rychlé datové přenosy až v řádu Mbit/s. Mezi nejvíce známé a využívané služby patří:

- Video na vyžádání (video on demand) - Jedná se o službu, kdy uživatel může na vyžádání sledovat streamované multimediální složky jako jsou např. filmy, koncerty, různé sportovní akce, atd.
- Online hry - Podpora hraní interaktivní her. Hry vyžadující vysokou přenosovou rychlost a nízké zpoždění mohou být podporovány pouze v novějších verzích, jako Release 5 či Release 6.
- Stahování multimediálního obsahu - Uživatel může snadno stahovat písničky (mp3, wav, ogg, atd.), fotky a další interaktivní obsah.
- Posílání krátkých videí - Zatímco v sítích 2G byly podporovány pouze SMS nebo jednoduché MMS (text spolu s obrázkem), sítě 3G sítě podporují i začlenění krátkého videa.
- Videotelefonie a videokonference - Simultánní interakce několika uživatelů, kteří mohou komunikovat online pomocí hlasu či videa.
- Lokalizační služby - Jedná se především o užitečné lokalizační služby jako je navigace uživatelů na určité konkrétní místo, vyhledávání zajímavých míst v blízkém okolí (restaurace, sportovní centra, nákupní střediska, apod.) nebo lepší pohotovostní služby.
- Služba Push-to-talk - Pouhým stisknutím tlačítka na mobilním terminálu, může uživatel okamžitě začít mluvit s jinými uživateli. Jedná se o podobný princip jako v případě vysílačky.

Za účelem podpory výše uvedených služeb v síti UMTS, je definováno několik tříd služeb **QoS** (*Quality of Service*). Každá služba má pak přiřazenu prioritu, která je daná výše zmíněnou třídou. Priorita je pak důležitá v tom, že při větším zatížení systému mají služby s vyšší prioritou přednost před službami s menší prioritou. V sítích UMTS jsou definovány čtyři třídy služeb, kde hlavní parametr je maximální dovolené zpoždění paketů:

Třída služeb	Popis
Konverzační třída	Vysoké nároky na zpoždění dat určené pro symetrické přenosy potřebující konstantní přenosovou rychlost
Streamovaná třída	Nižší nároky na zpoždění paketů než u konverzační třídy, ale stále daná služba potřebuje konstantní přenosovou rychlost
Interaktivní třída	Vysoké nároky na zpoždění, ale není potřeba alokovat konstantní přenosové prostředky
Třída na pozadí	Nízké nároky jak na zpoždění tak i na přenosovou rychlost




---

Konverzační třída spolu se streamovanou třídou je určena pro podporu přenosu dat v reálném čase, jako jsou hlasové služby (konverzační třída) nebo streamované video (streamovaná třída). Na druhé straně, interaktivní třída a třída na pozadí je určena pro použití přenosů, které nejsou v reálném čase a mluvíme o službě *Best Effort* (**BE**). V důsledku toho jsou tyto služby pro např. lokalizační služby (interaktivní třída) nebo www služby (třída na pozadí).

---

## 5 Long Term Evolution (Advanced) - LTE(-A)

### 5.1 Úvod

Další vývojový krok mobilních sítí UMTS je znám jako LTE (Long Term Evolution). Technologie LTE je definována 8. a 9. vydáním standardu 3GPP (Release 8 a 9). Na rozdíl od UMTS, LTE využívá ve směru k uživateli přístup OFDMA a ve směru od uživatele přístup SC-FDMA (Single Carrier OFDMA) místo WCDMA používané v UMTS. Proto se přenosové vlastnosti technologie LTE liší od UMTS. Nicméně, technologie LTE je stále považována za součást systémů 3G, neboť nesplňuje požadavky definované organizací ITU pro síť 4G. První vydání standardu, které je označováno jako 4G je až technologie LTE-A (Long Term Evolution - Advanced) definované standardem 3GPP Release 10 standardizovaným v červnu 2011. LTE-A vychází z LTE Release 8 a 9 a je také založen na podobných principech jako obě verze LTE. Na rozdíl od LTE je LTE-A v souladu se souborem požadavků známých jako IMT-Advanced definovaných organizací ITU. LTE-A k původní technologii LTE přidává nové funkce a možnosti. V porovnání s LTE umožňuje sdružovat nosné, koordinovat interferenci mezi buňkami a vylepšit paralelní přenos s využitím více antén (MIMO). Všechny tyto vylepšení umožňují splnit požadavky IMT-Advanced na mobilní síť 4G a nabízí maximální přenosovou rychlost až 1 Gb/s. Kromě LTE-A, byla pro 4G síť schválena také technologie WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) podle standardu IEEE 802.16m, standardizovaným organizací IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Nicméně, u technologie WiMAX se neočekává v Evropě výrazné nasazení do praxe. Proto je tato kapitola zaměřená pouze na LTE/LTE-A. V prvním kroku se nejprve zaměříme na evoluci z LTE/LTE-A z hlediska vydání jednotlivých verzí a jejich inovaci, které s ohledem na předchozí verze přinášejí.

#### Release 8

Tato vydání využívá modulaci OFDMA pro přístup uživatele. Kromě toho může buňka, zpravidla pouze v sestupném směru, využít větší šířku rádiového kanálu za pomoci sdružení dvou nosných (Dual Carrier). Tím je dosaženo přenosové rychlosti v sestupném směru až 84 Mbit/s (při využití modulace 64 QAM společně s metodou DC).

#### Release 9

Toto vydání zavádí do síťové architektury femtobuňky, označované jako *Home eNodeB* (**HeNB**). Dále je umožněna podpora multimediálních broadcastových a multicastových služeb **MBMS** (*Multimedia Broadcast Multicast Services*) a jsou rozšířeny lokalizační služby **LBS** (*Location Based Services*).

## Release 10

Tato verze je první verzí mobilních sítí 4. generace. Jsou zde využívány nové techniky jako např. sdružování nosných, podpora retranslačních stanic, MIMO ve směru od uživatele a zároveň je rozšířena technika MIMO ve směru k uživateli. Dále jsou definovány pokročilé techniky pro potlačení mezibuňkové interference, aby bylo možné efektivně implementovat femtobuňky.

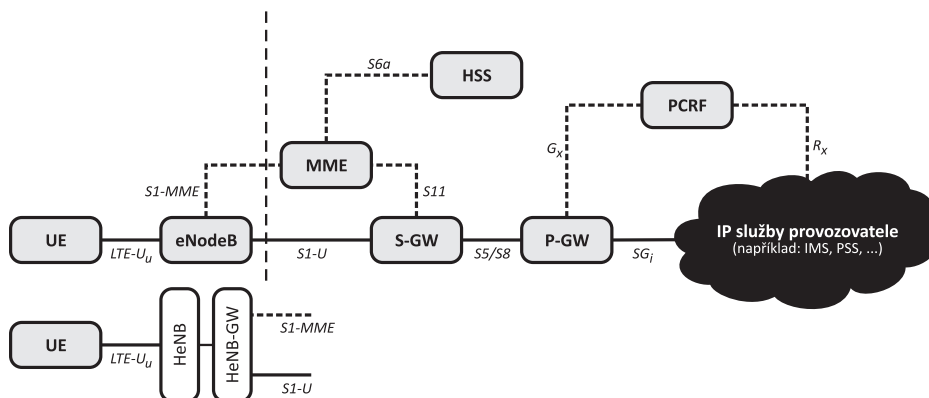
## Release 11

Tato verze standardu je stále ještě ve vývoji a měla by rozšiřovat předchozí verzi zejména v oblasti sdružování nosných, zvýšení efektivity využití rádiového spektra a snížení energetické náročnosti bezdrátových sítí. Kromě toho je uvedena technika kooperativní vícebodová komunikace *Cooperative MultiPoint (CoMP)*.



## 5.2 Architektura sítě

Architektura sítě LTE je odvozena z architektury sítí GSM a UMTS. Narozdíl od obou předchozích architektur je LTE navržena tak, že umožňuje pouze přepojování paketů. Přepojování okruhů již není podporováno. Síť LTE je složena z přístupové části, nazývané **E-UTRAN** (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) a jádra sítě **EPC** (*Evolved Packet Core*), jak je znázorněno na následujícím obrázku.



Síťová architektura LTE

Přístupová část sítě, označovaná jako E-UTRAN, se skládá ze základnových stanic eNodeB (název je odvozen z označení základnových stanic v UMTS a písmeno “e” je zkrácením slova Evolved). Základnové stanice jsou zodpovědné za řízení přidělování rádiových prostředků, řízení mobility uživatelů, plánování přenosu dat pro oba směry, šifrování nebo propojení přístupové části s jádrem sítě (tedy s EPC). V případě, že jsou v síti umístěny femtobuňky, jsou také součástí E-UTRAN. V případě femtobuněk může být navíc mezi femtobuňkou a EPC vložena ještě brána (HeNB GW), díky které je možné připojit najednou větší množství femtobuněk.

Jádro sítě obsahuje několik prvků. Prvním je obsluhující brána S-GW, která přenáší IP pakety od všech uživatelů v síti. Kromě toho také směruje a přeposílá pakety od a k uživatelům nebo se stará o aktivity spojené s poplatky mezi operátory při roamingu. Druhým prvkem je MME, který se stará o řídicí signalizaci mezi uživatelem a jádrem sítě. Mezi nejvýznamější úkoly MME patří autentifikace a autorizace uživatelů, zajištění bezpečnosti přenosu dat, vytvoření spojení mezi uživatelem a sítí, roamingem, a procedurami spojenými s polohou uživatele. Posledním prvkem je P-GW, který se stará o úkony spojené s kvalitou služeb a řízením toku dat. To znamená například filtrování uživatelských paketů, vynucování kvality služby, garance přenosové rychlosti nebo řízení úrovně služeb jak ve směru k uživateli tak i od uživatele.

Kromě těchto tří prvků jsou součástí jádra LTE-A také dvě logické funkce:

- **PCRF** (*Policy Control and Charging Rules Function*), která definuje pravidla pro účtování a dodržování pravidel. To znamená, že určuje procedury a akce pro případ, že uživatelský profil a poskytované služby nejsou v souladu.
- **HSS** (*Home Subscriber Server*) obsahuje uživatelské informace jako je profil kvality služeb nebo profil pro roaming. Také zajišťuje informace o domovském MME pro každého uživatele. Domovským MME se v tomto případě rozumí MME, ke kterému je uživatel připojen.

## 5.3 Fyzická vrstva LTE/LTE-A

Komunikace na fyzické vrstvě u technologie LTE(-A) se od UMTS výrazně liší. V LTE i v LTE-A je ve směru k uživateli použit přístup OFDMA a ve směru od uživatele pak SC-FDMA. Navíc je pro LTE/LTE-A definováno větší spektrum frekvenčních pásem. V současné době je to 25 frekvenčních pásem (17 párových pro FDD a 8 nepárových pro TDD). Mezi pásma určená pro přenos dat pomocí LTE/LTE-A patří například pásma v okolí 2 a 2,6 GHz, 3,5 GHz nebo i pásma pod 1 GHz (700 – 900 MHz).

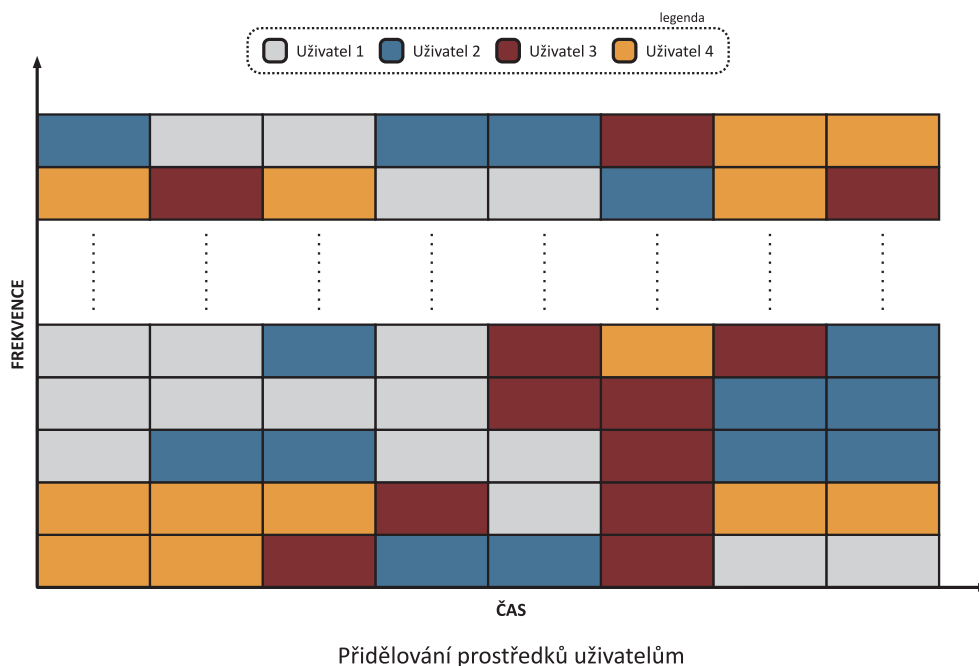
Přístupová multiplexní metoda OFDMA vychází z metody OFDM, která reprezentuje přenos na více nosných a kombinuje časový (TDMA) a frekvenční (FDMA) přístupový multiplex (jak je ukázáno na následujícím obrázku). Celé frekvenční pásmo je rozděleno do velkého množství subnosných. Jednotlivé subnosné jsou od sebe poměrně málo vzdáleny, čímž je dosaženo velkého počtu těchto subnosných v rámci pásma. Aby bylo možné subnosné umístit blízko sebe, tak musí být modulovány tím způsobem, aby spektrum signálu bylo na jednotlivých subnosných ortogonální. To znamená, že maximum spektra na jedné subnosné se překrývá s minimy spektra ostatních subnosných. Každá subnosná je dále dělena mezi uživatele ještě v časové oblasti. To znamená, že každý uživatel má přiřazen časový interval, ve kterém je mu umožněno na dané subnosné přenášet data. Ve výsledku je pak tedy celé pásmo rozděleno jak v časové tak i ve frekvenční oblasti mezi více uživatelů. Každý časový interval na jednotlivých subnosných je označován jako symbol OFDM, který obsahuje modulovaná data, přičemž modulace každého symbolu může být vždy jiná (podporovány jsou modulace QPSK, 16-QAM a 64-QAM). Aby nedocházelo k rušení mezi sousedními symboly tím, že by docházelo k jejich překryvu v časové oblasti, je vždy několik posledních vzorků symbolu zkopírováno na začátek symbolu jako tzv. cyklická předpona (anglicky cyclic prefix).



---

V LTE/LTE-A jsou jako přenosové prostředky na fyzické vrstvě označovány jednotlivé OFDMA symboly.

---



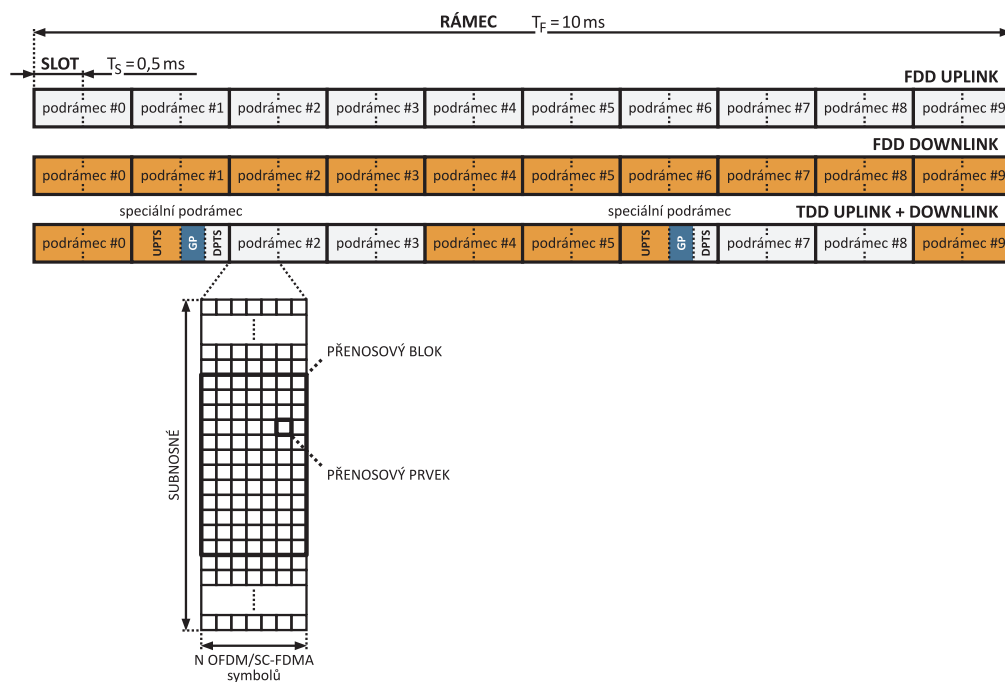
Přidělování přenosových prostředků v LTE/LTE-A prostřednictvím OFDMA

Nevýhodou OFDMA přístupu je výrazný rozdíl mezi energií alokovanou na jednotlivé subnosné, protože data od uživatelů jsou modulována po jednotlivých symbolech a mezi jednotlivými symboly není žádná spojitost. To může vést k tomu, že na jednu subnosnou je alokováno velké množství energie a na jinou velmi malé množství. Pak dochází k častému střídání vysoké a nízké úrovně vysílané energie (parametr, který definuje poměr mezi maximem a střední hodnotou se nazývá **PAPR** (*Peak to Average Power Ratio*)). Při vysokých hodnotách parametru PAPR, jako je tomu v případě OFDMA, dochází k vysoké spotřebě energie, což je nežádoucí zejména na straně mobilních uživatelských zařízení. Tento problém může být omezen použitím SC-FDMA. V případě SC-FDMA jsou jednotlivé symboly navzájem závislé. To znamená, že při modulování každého symbolu jsou zohledněna i data modulovaná v okolních symbolech. Přesněji, všechna data vysílaná v rámci jednoho časového intervalu jsou modulována jako lineární kombinace všech symbolů v daném časovém intervalu. Tímto způsobem je zajištěn pozvolnější přechod úrovně vysílané energie, čímž je snížen PAPR a zároveň i spotřeba na straně uživatelského terminálu.

Stejně jako v UMTS, i LTE/LTE-A podporuje jak TDD, tak i FDD duplex pro přenos dat. Z toho důvodu jsou definovány dva typy rámce, Typ 1 a Typ 2. První typ je určen pro přenos dat pomocí plného nebo polovičního duplexu FDD, zatímco Typ 2 je určen pro TDD. V obou případech jsou data přenášena na fyzické vrstvě v rámci o délce 10 ms. Každý rámec je rozdělen na deset stejně dlouhých podrámců a každý podrámec je poté ještě rozdělen na dva sloty s délkou trvání 0,5 ms. Sloty se skládají z přenosových elementů (resource elements), které jsou seskupeny do tzv. přenosových bloků (resource blocks). Počet elementů v jednom bloku je dán součinem počtu subnosných a počtu symbolů. Počet symbolů závisí na délce cyklické předpony a může nabývat hodnoty šest (pro prodlouženou cyklickou předponu) nebo sedm (pro normální předponu). Šířka

jednoho bloku ve frekvenční oblasti je 180 kHz. Jelikož jsou subnosné od sebe vzdáleny 15 kHz je jich v jednom bloku sdruženo 12.

Stejně jako v HSDPA je pro přenos dat využito adaptivní modulace a kódování. To znamená, že aktuální modulační a kódové schéma (MCS - Modulation and Coding Scheme) je vybráno na základě kvality signálu měřené na straně přijímače. Proto je i počet bitů přenášených v jednom elementu závislý na úrovni přijímaného signálu.



Struktura rámce LTE-A pro TDD a FDD

V případě frekvenčního dělení je vyhrazeno oddělené frekvenční pásmo pro sestupný i vzestupný směr přenosu dat. V obou směrech pak může být současně využito všech deset subrámečků pro každý z přenosových směrů.

Naopak, v případě TDD je stejné frekvenční pásmo sdíleno jak pro sestupný tak pro vzestupný směr. V tomto případě je tedy deset subrámečků rozděleno mezi oba směry. Poměr v jakém jsou subrámečky přiděleny pro sestupný a vzestupný směr se pohybuje mezi 2:3 až do 9:1 a jsou definovány tzv. konfigurací DL-UL. Obecně může být každý ze subrámečků vyhrazen sestupnému (v tabulce označen jako D) nebo vzestupnému (U) směru nebo jejich kombinaci v takzvaném speciálním subrámečku (S). První a šestý subrámeček jsou vždy přiřazeny sestupnému směru. Druhý subrámeček je naopak vždy vyhrazen pro speciální subrámeček a třetí je vždy pro vzestupný směr. V závislosti na délce přepínací periody mezi vzestupným a sestupným směrem je pak subrámeček číslo šest (sedmý subrámeček) vyhrazen pro sestupný směr (pro přepínací periodu 10 ms) nebo speciálnímu subrámečku (5 ms). Obsah ostatních subrámečků je definován pro různé DL-UL konfigurace podle tabulky.

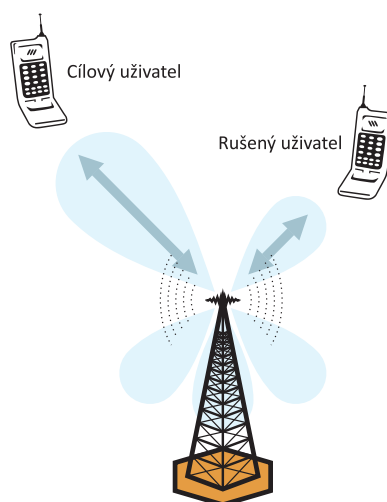
Přiřazení subrámců podle DL-UL konfigurace pro TDD

DL-UL konfigurace	Přepínací perioda [ms]	Číslo subrámce									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Speciální subrámec se skládá ze tří částí: přenos v sestupném směru (*Downlink Pilot Time Slot - DwPTS*), ochranný interval (*Guard Period - GP*) a přenos v vzestupném směru (*Uplink Pilot Time Slot - UpPTS*). Část DwPTS je zpravidla využívána pro přenos dat stejně jako v subrámcí D, pouze s omezenou délkou. Její délka se pohybuje mezi třemi a dvanácti symboly podle konfigurace S subrámce. Část UpPTS není narozdíl od DwPTS určena pro přenos uživatelských dat, ale je využívána pro přenos řídicích kanálů. Její rozsah je jeden až dva symboly. Ochranný interval GP je umístěn mezi oběma částmi pro přenos a slouží k přepnutí antény z vysílacího do přijímacího módu a naopak. Proto v této části nemohou být přenášena žádná uživatelská data. Doba trvání GP je úměrná velikosti buňky, protože je odvozena od doby šíření signálu mezi nejvzdálenějším uživatelem a základnovou stanicí. To znamená, že pro větší poloměr buňky musí být pro GP vyhrazen větší počet symbolů.

## 5.4 Tvarování paprsku

V případě, že je pro vysílání použita jedna anténa, tak jsou každá data vyslaná jednomu uživateli zároveň zdrojem interference (rušení) pro ostatní uživatele, kteří také přijímají data. Pokud by bylo na vysílací straně využito více antén pro přenos dat, může dojít k snížení interference pomocí tzv. tvarování paprsku (anglicky beamforming). Tento způsob je založen na principu směřování vysílané energie pouze ve směru k cílovému uživateli, zatímco energie vysílaná ostatními směry je snížena a tím je omezena i interference k ostatním uživatelům. V praxi je toto realizováno vynásobením vysílaného signálu komplexními čísly (kódy) s různou vahou tak, aby došlo k požadované úpravě amplitudy a fáze signálu na jednotlivých vysílacích anténách. Komplexní váhované kódy musí být nastaveny na základě znalosti směru, ve kterém se daný uživatel, přijímající data, nachází. Komplexní váhy jsou poté buďto vypočítány nebo je vybrán vektor vah z předdefinované tabulky kódů určené standardem. Problém nalezení polohy uživatele není definován standardem. Jednou z možností je určení polohy na základě měření kvality signálu uživatelským zařízením.



Princip tvarování paprsku

## 5.5 Technologie využívající více antén

Pro zvýšení přenosové rychlosti je možné využít paralelního přenosu dat mezi více anténami na vysílací straně a/nebo na přijímací straně. Využití více antén navíc umožňuje zmírnit některé selektivní nepříznivé jevy, jako například pomalé nebo rychlé úniky, jejichž následkem dochází k dočasnému zhoršení kvality signálu, zejména pokud jsou vysílací (nebo přijímací) antény umístěny v dostatečné vzdálenosti od sebe. Více antén může být použito buďto na jedné z komunikujících stran (pouze u přijímače nebo pouze u vysílače) nebo na obou stranách (přijímač a zároveň i vysílač). První případ lze rozdělit podle toho, zda je více antén umístěno na přijímací nebo vysílací straně na SIMO (Single Input/Multiple Output) nebo MISO (Multiple Input / Single Output). Pokud je více antén na obou stranách, pak se jedná o tzv. MIMO (Multiple Input / Multiple Output). Komunikace se dvěma anténami na vysílací a přijímací straně je umožněna už v technologii UMTS. V LTE byla tato možnost rozšířena na čtyři antény a v LTE-A dokonce na osm antén.

Jelikož dochází k paralelnímu přenosu dat po více cestách, je nutné určit, jaká část modulovaných dat (symbolů) bude přenášena po jaké cestě. O to se stará blok mapování dat. Tento blok musí zajistit, aby si data přenášená ve stejný čas na stejné frekvenci mezi různými anténami nezpůsobovala vzájemné rušení. Toho je dosaženo, podobně jako v případě tvarování paprsku, pokročilým zpracováním signálu. To znamená, že každý datový tok přicházející z antény je vynásoben komplexním váhovaným kódem, který zajistí změnu fáze signálu tak, aby nedocházelo k vzájemnému rušení mezi jednotlivými toky.

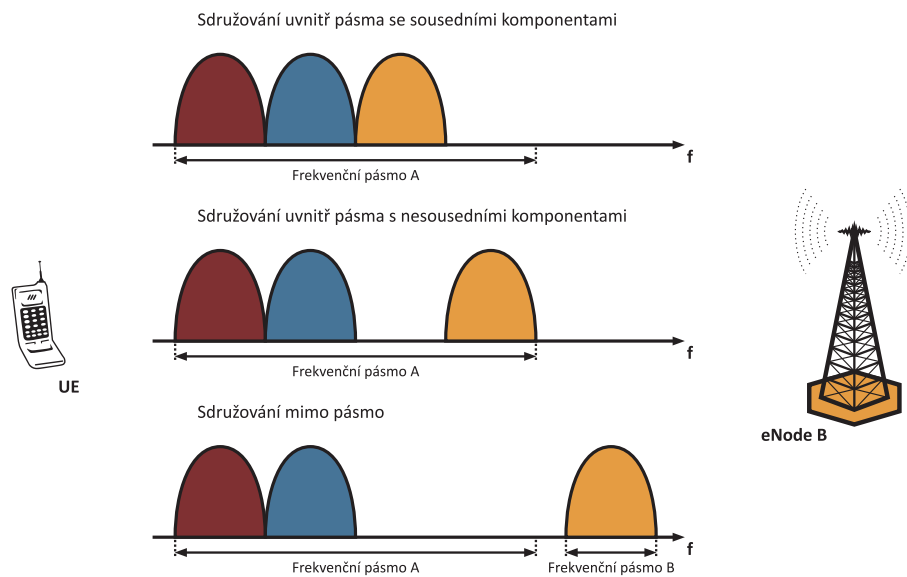


## 5.6 Sdružování nosných

I když LTE-A podle Release 10 ve srovnání s LTE zaručuje vyšší spektrální účinnosti, nelze dosáhnout maximální rychlosti 1Gbit/s, kterou vyžaduje IMT-Advances pro mobilní síť 4G. Důvodem je nedostatečná šířka frekvenčního pásma se šířkou do 20 MHz. Pro splnění požadavků na síť 4G se musí šířka vlnového pásma navýšit. Z toho důvodu umožňuje LTE-A spojení radiových zdrojů z více pásem a provádět paralelní přenos dat směrem k UE. Tento postup je znám jako sdružování nosných. Jedná se o rozšíření techniky DC využívané v UMTS, kde mohou být spojena až dvě pásma. Každé ze sdružovaných frekvenčních pásem je v LTE-A označována jako nosná komponenta. LTE-A umožňuje použití až pěti nosných komponent ve směru k uživateli a pěti ve směru od uživatele. Výsledkem je šířka vlnového pásma až do 100 MHz. Ve směru od uživatele i k uživateli je jedna komponenta označována jako primární a všechny ostatní jako sekundární. To znamená, že každé UE má jednu primární komponentu a žádnou nebo více (až čtyři) sekundární komponenty. Primární komponenta je využita pro trvalou signalizaci v klidovém režimu (baterie je v úsporném režimu a nedochází k přenosu dat). Sekundární komponenty jsou využívány ke zvýšení vlnového rozsahu pro přenos dat, ale ne k signalizaci v klidovém režimu. Přidělení primární a sekundární komponenty je specifické pro každé UE, to znamená, že se může lišit pro jednotlivé UE.

Komponenty přiřazené jedné UE nemusí být ve frekvenční oblasti souvislé. Existují tři typy přiřazení:

- Sdružování uvnitř pásma se sousedními komponentami – tento typ je nejjednodušší způsob sdružování nosných, protože pásmo může být považováno za jednu komponentu z hlediska UE. Z toho důvodu nejsou kladeny žádné speciální požadavky na UE nebo HeNB (žádné přidané vysílače nebo přijímače nejsou nutné).
- Sdružování uvnitř pásma s nesousedními komponentami – přijímaný signál není možné považovat za přenos v jednom pásmu, protože jednotlivá pásma spolu nesousedí. Proto je vyžadováno více vysílačů/přijímačů. Toto způsobuje nárůst nákladů na vybavení.
- Sdružování mimo pásmo (s nepřilehlými komponenty) – opět, je vyžadováno více vysílačů/přijímačů, kvůli oddělení frekvencí pásem.



### Typy sdružování nosných

Všechny UE s podporou sdružených nosných mohou přistupovat ke všem komponentám paralelně. Pokud ale UE nepodporuje sdružené nosné, pak se z důvodu zajištění zpětné kompatibility přistupuje ke každé komponentě individuálně, tak jak je obvyklé v LTE.



Sdružování nosných je možné jak v režimu TDD tak i FDD, ale pro všechny komponenty užívané UE musí být použit vždy stejný režim. Kromě toho se musí použít stejná konfigurace podrámců určených pro sestupný a vzestupný směr v režimu TDD. Naopak, konfigurace speciálního podrámcu může být odlišná v jednotlivých komponentách.

## 5.7 Služby a aplikace v LTE/LTE-A

Stejně jako v předchozích technologiích mobilních sítí, i LTE/LTE-A umožňuje současný běh více aplikací s různou úrovní QoS (jako je hlasový hovor a FTP stahování nebo video konference). Je zřejmé, že hlasový nebo video hovor vyžadují nižší rozptyl zpoždění jednotlivých paketů (neboli menší jitter) než např. v případě stahování dat s využitím přenosového protokolu FTP. Na druhou stranu, stahování prostřednictvím FTP vyžaduje vyšší přenosové rychlosti a nižší ztrátovost paketů, aby byla minimalizována doba stahování souborů. Aby bylo možné splnit různé úrovně požadavků uživatelů na kvalitu služby, LTE-A umožňuje definovat několik různých typů nosných služeb (bearers) se specifickými požadavky každého z nich. K rozlišení jednotlivých požadavků je zaveden tzv. identifikátor třídy QoS (*QoS Class Identifier - QCI*). QCI definuje devět tříd v závislosti na čtyřech přenosových parametrech, jak je ukázáno v tabulce.

První parametr určuje, zda je garantována přenosová rychlost (**GBR - Guaranteed Bit rate**) nebo ne (Non-GBR). Pro GBR je trvale přiděleno určité množství radiových zdrojů, a není nutné pravidelně a opakovaně žádat o přidělení radiových prostředků pro přenos dat. Množství radiových prostředků je nastaveno na začátku spojení a odpovídá maximální očekávané přenosové rychlosti danou službou. V případě Non-GBR nejsou přenosové prostředky trvale rezervovány pro služby. Velikost přiřazených prostředků závisí na aktuálním požadavku služby a na velikosti dostupných prostředků v síti. Proto tento typ služeb neumožňuje garanci přenosové rychlosti.

Druhý důležitý parametr definuje důležitost (prioritu) paketů při jejich zpracování. Tento parametr je využit například, jestliže je přenosový uzel přetížen. Pak jsou pakety s vyšší prioritou zpracovány dříve než pakety s nižší prioritou.

Další parametr označuje zpoždění paketů a představuje maximální dovolené zpoždění pro danou třídu QCI.

Poslední parametr, ztrátovost a chybovost paketů, je spojený s frekvencí ztráty paketů během přenosu. Představuje množství ztracených paketů nebo paketů obdržených s chybou vzniklou při přenosu. Tyto pakety není možné dále zpracovávat a musí být přeposlány.

Třídy služeb v LTE-A

QCI	GBR/Non-GBR	Priorita	Zpoždění paketů	Chybovost a ztrátovost paketů	Příklad služby
1	GBR	2	100	$10^{-2}$	Hlasový hovor (konverzace)
2	GBR	4	150	$10^{-3}$	Video hovor (konverzace)
3	GBR	5	300	$10^{-6}$	Streamované video

4	GBR	3	50	$10^{-3}$	Real-time hry
5	Non-GBR	1	100	$10^{-6}$	Signalizace
6	Non-GBR	7	100	$10^{-3}$	Hlas, video (přímý přenos)
7	Non-GBR	6	300	$10^{-6}$	Video (zpožděný stream, film)
8	Non-GBR	8	300	$10^{-6}$	WWW, FTP, email, messaging
9	Non-GBR	9	300	$10^{-6}$	Jako QCI 8, ale nižší prioritá

## 5.8 Femtobuňky

Jak ukazuje několik studií, většina přenášených dat je odesílána z vnitřních prostor (například uvnitř budov). Sítě 4G předpokládají užívání nejen nízkofrekvenčních pásem (např. 800/900 MHz), ale také frekvence vyšší než 2 GHz. S použitím vyšších frekvencí je ale spojeno horší šíření signálu. Tento problém je ještě zvýrazněn zvláště pro prostředí uvnitř budov. Z toho důvodu nejsou často uživatelé uvnitř budov schopni dosáhnout dostatečné kvality signálu odpovídající jejich požadavkům. Tyto problémy jsou řešeny novým konceptem zvaným femtobuňky (v LTE-A, označované jako HeNB). Femtobuňky mohou zvyšovat propustnost pro vnitřní uživatele a také umožňují snížit zátěž makrobuněk, tím že obslouží část uživatelů přijímajících od makrobuněk signál nízké kvality.



---

Femtobuňka je nízkonákladová základnová stanice, u které se předpokládá umístění v uživatelském prostoru jako jsou domy nebo kanceláře. Femtobuňka je připojena na páteřní síť (Internet) skrz kabelové připojení jako jsou například přípojky **DSL** (*Digital Subscriber Line*) nebo optická vlákna. Toto páteřní připojení doručuje uživatelská data z femtobuňky do místa určení (server nebo cílový uživatel) a naopak. Vysílací úroveň femtobuněk je typicky nastavena na pokrytí jen vnitřní oblasti budov tak, aby umožnila poskytnutí dostatečně kvalitního signálu uživatelům v její blízkosti.

---



---

Maximální vysílací výkon femtobuněk je přibližně 21 dBm (125 mW). Proto femtobuňky pokrývají jen řádově desítky metrů.

---

Femtobuňky mohou poskytovat tři typy přístupu:

- Otevřený přístup: Všichni uživatelé v rámci pokrytí femtobuňkami se mohou k otevřeným femtobuňkám připojit. Radiové zdroje i kapacita páteřního připojení jsou sdíleny se stejnou prioritou pro všechny uživatele připojené k femtobuňkám. Výhodou otevřeného přístupu je možnost snížit zatížení makrobuněk tím, že obslouží několik venkovních uživatelů v oblasti s velkými nároky na přenosové prostředky nebo obslouží uživatele daleko od makrobuněk. Na druhou stranu, husté rozmístění femtobuněk s otevřeným přístupem může vést k významnému zvýšení množství handoverů.
- Uzavřený přístup: Femtobuňka s uzavřeným přístupem umožní přístup pouze uživatelům zahrnutých v tzv. seznamu **CSG** (*Close Subscriber Group*). CSG definuje uživatele, kteří mohou využít femtobuňky k přístupu k Internetu. Seznam uživatelů v CSG je upravován a definován majitelem femtobuňky, což je uživatel, který platí za femtobuňku a který si ji zakoupil. Obvykle se předpokládá jen několik málo uživatelů zahrnutých do CSG (je předpokládáno zhruba čtyři až osm uživatelů pro domácí femtobuňky). V případě uzavřeného přístupu, jsou radiové prostředky i prostředky páteřní sítě sdíleny pouze omezeným počtem uživatelů, kteří jsou uvedeni v CSG. Proto těmto uživatelům může být zaručena vyšší kvalita služby ve srovnání s otevřeným přístupem. Na druhou stranu, interference způsobené femtobuňkou uživateli,

který není v CSG, by mělo být omezeno a řízeno, aby se zabránilo zhoršení kvality signálu pro tyto uživatele.

- Hybridní přístup: Hybridní přístup je kombinací otevřeného a uzavřeného přístupu. V tomto případě je definován seznam CSG a část přenosové kapacity femtobuňky (rádiové prostředky i páteřní připojení) je přístupné pouze pro CSG uživatele. Ostatní rádiové zdroje a prostředky páteřní sítě mohou být sdíleny ostatními uživateli, kteří nejsou v CSG.

Zásadní problém týkající se femtobuněk spočívá ve zvýšení rušení. Rušení může být děleno na rušení uživatelů makrobuněk femtobuňkou (cross-tier rušení) a rušení od femtobuňky k ostatním femtobuňkám (co-tier rušení). Úroveň negativního účinku rušení závisí také na rozdělení radiových zdrojů mezi femtobuňky a makrobuňky. Jsou definovány dva způsoby rozdělení radiových zdrojů.

- Společné pásmo (Co-channel): Frekvence pásem pro makro a femtobuňky se překrývají. To znamená, že stejné nosné jsou sdíleny makrobuňkami a femtobuňkami. V tomto případě, může být rušení zmírněno důkladnou kontrolou vysílací úrovně femtobuněk nebo přidělováním radiových zdrojů, tak aby se minimalizovalo rušení.
- Ortogonální přidělování nosných: Různá frekvenční pásma jsou určena pro makrobuňky a femtobuňky. Tento způsob úplně odstraňuje rušení mezi femto a makro rovinou (cross-tier). Na druhou stranu, rádiové zdroje nejsou efektivně využity.

## 5.9 Retranslační stanice

Spolu s femtobuňkami, jsou definovány pro síť 4G také takzvané retranslační stanice. Obecně jsou retranslační stanice zjednodušené základnové stanice, které přeposílají data z eNodeB uživateli a naopak. Data mezi uživatelem a eNodeB mohou být směrována přes jednu nebo několik retranslačních stanic.



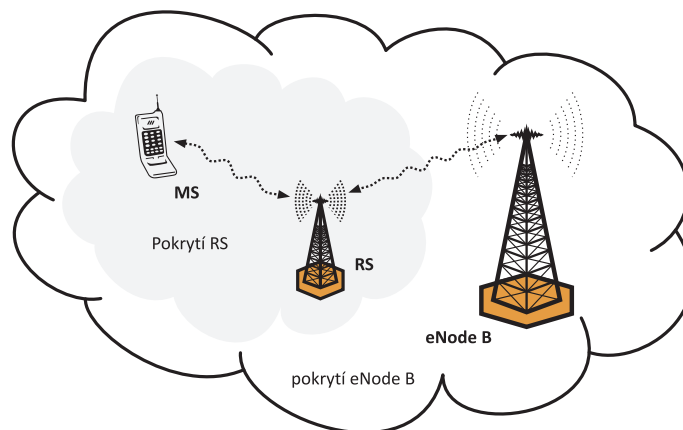
---

Každá část komunikace (např. z UE do retranslační stanice, z retranslační stanice do eNodeB, atd.) představuje tzv. skok. Z toho důvodu je komunikace s využitím retranslačních stanic také známá jako víceskoková komunikace (multi-hop).

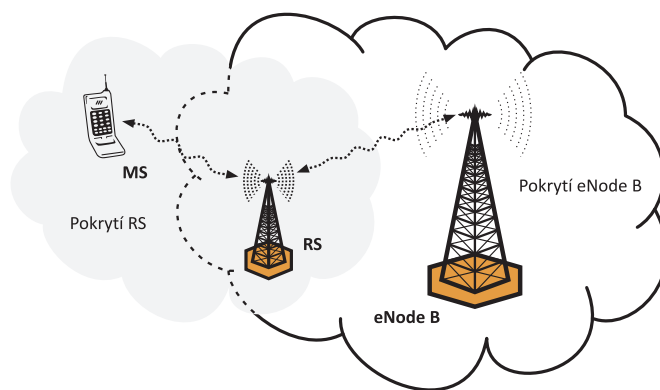
---

Retranslační stanice může být využita buď k rozšíření pokrytí eNodeB nebo ke zvýšení propustnosti ve specifické oblasti jak je ukázáno na obrázku. Pro zvýšení propustnosti jsou retranslační stanice rozmístěny v oblasti pokrytí eNodeB. Zvýšení propustnosti je dosaženo díky snížení vzdálenosti mezi komunikačními jednotkami. Tím dochází ke zvýšení úrovně signálu v cílovém bodě. Pro rozšíření pokrytí je retranslační stanice umístěna blízko kraje buněk nebo může být rozmístěna i mimo oblast buňky. I když by v tomto místě již uživatel nebyl schopen komunikace, retranslační stanice je schopna s eNodeB komunikovat například díky tomu, že je umístěna tak, aby byla mezi eNodeB a jí přímá viditelnost.

Oproti femtobuňkám jsou retranslační stanice plně kontrolovány operátorem a jsou připojeny do sítě bezdrátovým spojením sdíleným s datovými přenosy uživatelů obsluhovanými základnovou stanicí.



a) Zvýšení propustnosti



b) Rozšíření pokrytí

#### Účel a rozmístění retranslačních stanic

Retranslační stanice mohou být klasifikovány podle pohyblivosti na:

- Pevné – jsou trvale umístěny na stejném místě bez možnosti pohybu. Tyto stanice jsou podporovány od LTE-A Release 10.
- Pohyblivé – jsou rozmístěny zpravidla na pohyblivých zařízeních, jako jsou autobusy nebo vlaky. V tomto případě je nutné počítat s handoverem retranslační stanice mezi základnovými stanicemi. Během přesunu pohybu retranslační stanice musí být handover zajištěn i v případě, že jsou obsluhováni uživatelé. Mobilní retranslační stanice nejsou definovány v Release 10, předpokládají se až v pozdějších verzích (pravděpodobně v Release 11).



## 6 Síť Ad Hoc

### 6.1 Síť Ad hoc

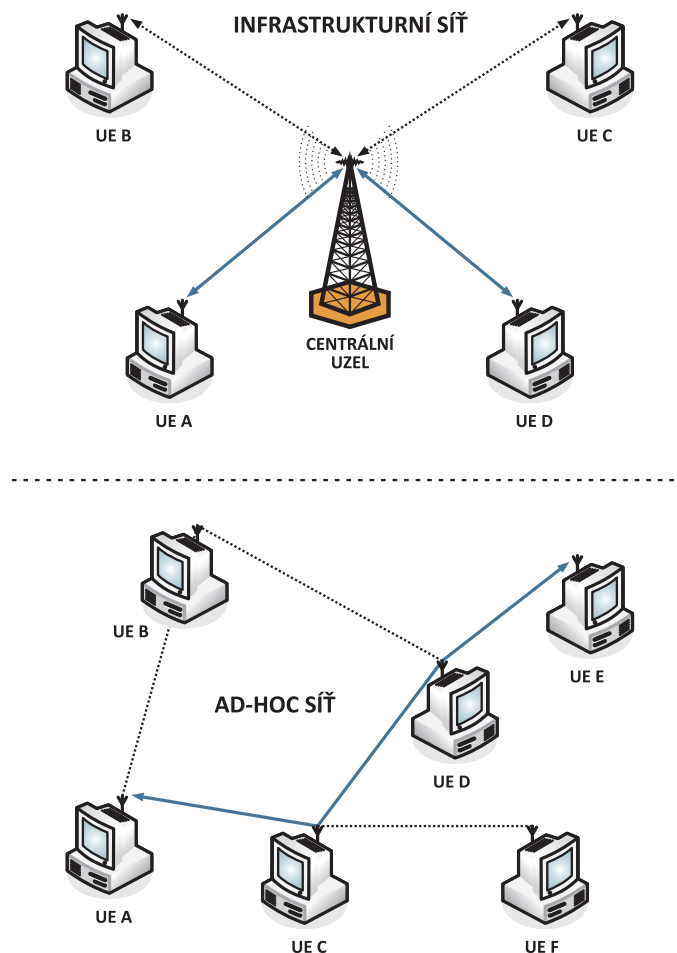
Hlavním charakteristickým rysem sítí typu Ad hoc je ten, že neexistuje žádná centrální řídicí jednotka jako v případě sítě infrastrukturní (např. síť 2G/3G/4G). To tedy znamená, že v síti Ad hoc není přítomná žádná základnová stanice, jako v případě buňkové sítě (GSM, UMTS, LTE), ani žádný přístupový bod, jako v případě technologie **WiFi** (*Wireless Fidelity*), který by měl na starost řízení sítě. Mimoto, zatímco v klasických buňkových mobilních sítích komunikuje mobilní terminál vždy s tímto centrálním bodem, v síti typu Ad hoc jsou si všechny uživatelské terminály rovny a mohou komunikovat i mezi sebou navzájem. Důležitá vlastnost sítě Ad hoc je také ta, že bývá sestavena jen na určitou dobu a není trvalá jako v případě sítě infrastrukturní.



Význam spojení "ad hoc" je převzat z latiny a ve volném překladu to znamená něco jako "jen pro tento případ", "k této věci", "k tomuto účelu" či "z čista jasna". Abychom byli více konkrétnější, ad hoc znamená něco co je vytvořené bez plánování.

Na úplném počátku spočívala myšlenka sítě Ad hoc v propojení několika zařízení, které byly v takové vzdálenosti, která dovozovala jejich vzájemnou komunikaci (takto je také definována síť Ad hoc v technologii WiFi založené na standardech IEEE 802.11). Jinými slovy, pouze uživatelé, kteří jsou v komunikační vzdálenosti, jsou schopni si mezi sebou vyměňovat data. Další důležitá vlastnost původních sítí Ad hoc byla ta, že uživatelské terminály byly nepohyblivé a tudíž sestavení sítě Ad hoc nebylo zas až tak problémové.

Nicméně jedním z hlavních trendů současnosti je podporovat úplnou mobilitu terminálů, čemuž se museli přizpůsobit i sítě typu Ad hoc. Mobilita terminálu totiž způsobuje to, že se může podstatně měnit v čase její topologie. Jako důsledek tohoto jevu je pak to, že dva terminály, které byly ještě před chvílí v komunikačním dosahu mohou být rozpojeny. Stejně tak se dva terminály mohou dostat dostatečně blízko k sobě, aby spolu mohly začít komunikovat. Síť podporující jak topologii Ad hoc tak i mobilitu uživatelů se označují jako mobilní síť Ad hoc, neboli síť **MANET** (*Mobile Ad Hoc Network*). Důležitou vlastností sítí MANET je to, že data mezi uživateli mohou být posílána přes více uzlů v síti. Této komunikaci se říká komunikace přes více skoků (z anglického multihop communication). Výhoda toho je, že uživatelé už nadále nemusí být dostatečně blízko u sebe, ale stačí aby mezi nimi byl dostatečný počet dalších uživatelů, kteří jejich data přeposílají. Všimněte si, že podobný princip komunikace je umožněn i pomocí retranslačních stanic, které byly popsány dříve. Srovnání síťové topologie Ad hoc a infrastrukturní sítě je znázorněno na následujícím obrázku.



Porovnání sítě Ad hoc s infrastrukturní sítí

Nyní se zaměříme na výhody a také nevýhody sítí ad hoc v porovnání s klasickými infrastrukturními sítěmi:

+

- Síť ad hoc je jednoduché vybudovat v tom smyslu, že neexistují žádné centrální řídicí uzly a není nutné plánovat jejich umístění.
- Jednoduché na konfiguraci a instalaci.
- Není nutná konektivita do externí sítě (Internet), protože hlavním smyslem sítě ad hoc je zabezpečit komunikaci pouze mezi jednotlivými terminály.
- Levná a rychlá výstavba sítě kdekoli je zrovna potřeba.

—

- Uživatel může komunikovat pouze s těmi uživateli, kteří jsou právě v jeho dosahu. Toto omezení ale platí pouze pro terminály podporující jen přímou komunikaci mezi uzly jak bylo původně definováno ve standardu WiFi.

- Vysoké rušení, protože uživatelé komunikují ve stejném frekvenčním pásmu.
  - Časté změny topologie v důsledky pohybu uživatelů. Z toho důvodu je nutné aktualizovat informace o možných cestách, které lze použít pro přenášení dat mezi vzdálenými terminály. Získání těchto informací je ale na úkor přenosových prostředků sítě. Toto omezení platí pouze pro sítě MANET.
  - Omezení z důvodu spotřeby baterie.
  - Velké nároky na bezpečnost přenosu.
- 

Využití sítí ad hoc, a to především sítí MANET, může být následující:

- Aplikace pro vojenské účely
- Pohotovostní služby (pátrací a záchranné operace, policejní akce či požární akce)
- Využití v komerci (dynamický přístup k databázím tam, kde není infrastrukturní síť, využití na sportovních stadionech, veletrhy, atd.)
- Domácí a podnikové sítě
- Universitní sítě (pokrytí kolejí či universitních budov)

Proto, aby sítě ad hoc mohly plnit svůj účel, je nutné implementovat dostatečně efektivní přístup k médiu prostřednictvím přístupového protokolu a také zabezpečit vhodné směrování v síti pomocí směrovacích protokolů (to se samozřejmě týká pouze mobilních sítích MANET).

## 6.2 Přístupové protokoly

Důležitou otázkou týkající se sítě ad hoc je navrhnout vhodné přístupové protokoly, jejichž hlavním cílem je řídit přístup k rádiovému kanálu. Především je snaha zabránit kolizím při vysílání a taky efektivně využívat přenosové médium. Přístupové protokoly lze dělit do dvou kategorií:

- Protokoly, kdy uživatel nemusí "soupeřit" o přístup k médiu (contention-free protokoly) - Namísto toho jsou uživatelům přiřazeny časové okamžiky, kdy mohou vysílat/přijímat data (TDMA), nebo mají oddělené frekvenční pásma (FDMA) či je oddělení zajištěno pomocí kódů (CDMA). Další často používané přístupové metody jsou založeny na metodě "token ring", kde se uživatelé postupně střídají s vysíláním. Hlavní znakem tohoto typu protokolů je to, že nedochází ke kolizím při přenosu a jsou tedy vhodné tam, kde je nutné zajistit vysokou kvalitu služby. Tento typ protokolu je použit např. v technologii Bluetooth kde se používá master-slave mechanismus.
- Protokoly založené na soupeření o přístup k médiu - V podstatě jsou všechny tyto protokoly založeny na přístupu ALOHA a taktovaná (slotted) ALOHA. V případě klasického přístupu ALOHA přistupuje uživatel k médiu jakmile má k dispozici jakákoliv data k odeslání. V důsledku toho, ale může jednoduše dojít ke kolizi, když dva uživatelé využijí médium ve stejný časový okamžik. I když princip založený na principu taktovaná ALOHA částečně řeší problém kolizí, jeho použitelnost je stále příliš omezená (především pro velký počet uživatelů není tato metoda příliš efektivní).

Nejběžnější přístupové metody používané v současných bezdrátových sítích, jako je např. WiFi, jsou založeny na metodě **CSMA** (*Carrier Sensing Multiple Access*). Při této metodě uživatelský terminál nejdříve zkouší, zda je médium v daný okamžik volné. Pokud není volné, čeká se do jeho uvolnění. V případě, že je ale médium volné, uživatel začne okamžitě vysílat data. Pro další minimalizaci pravděpodobnosti kolize, byly postupně zavedeny vylepšené jiné metody, jako **CSMA-CD** (*CSMA with Collision Detection*) nebo **CSMA-CA** (*CSMA with Collision Avoidance*).

## 6.3 Směrovací protokoly

Směrovací protokoly jsou stavebním kamenem sítí MANET, a tudíž jich bylo postupem času navrženo velké množství. Obecně platí, že všechny směrovací protokoly zahrnují tři základní mechanismy:

- Hledání cesty - Účelem tohoto mechanismu je najít optimální trasu mezi dvěma stanicemi, které si navzájem vyměňují data. Nejrozšířenější princip je založen na tzv. "zaplavovacím" algoritmu (z angličtiny flooding algorithm). Při hledání cesty vždy vysílá zdrojová stanice paket **RREQ** (*Route Request*). Když cílová stanice obdrží tento paket, je jí vygenerován paket **RREP** (*Route Response*), který je následně poslán zpět zdrojové stanici. Hlavní cíl při hledání, je najít možné cesty pro směrování paketů a zároveň minimalizovat režii potřebnou pro jejich nalezení.
- Výběr cesty - Během hledání cesty může být nalezeno několik alternativních cest pro směrování dat. Hlavním cílem tohoto mechanismu je pak vybrat nejvhodnější pro směrování dat. Tato cesta je vybrána v závislosti na různých ukazatelích, jako je kapacita linky, počet mezi uzlů na cestě, spolehlivost cesty, její stabilita, atd.
- Údržba cesty – Poté, co je vybrána nejvhodnější cesta, je nutné zajistit, že bude zachována alespoň tak dlouho, jak dlouho trvá samotná komunikace mezi stanicemi. Nicméně, vzhledem k mobilitě uživatelských terminálů může docházet k zásadním změnám topologie sítě, kdy vybraná cesta může zaniknout. Proto cílem tohoto mechanismu je nalézt novou cestu pro směrování, pokud současně používaná cesta už není k dispozici.

### Klasifikace směrovacích protokolů

Směrovací protokoly mohou být zařazeny do několika skupin v závislosti na jejich principu a použití. Nejběžnější směrovací protokoly jsou založeny na topologii sítě. Ty se dají dále dělit na:

- Proaktivní (také známé jako "tabulkové" protokoly) - Hlavním principem proaktivních protokolů je pravidelně aktualizovat informace o stavu sítě. Všechny informace jsou uloženy v "tabulkách" jednotlivých stanic, a proto jsou nazývané jako tabulkové protokoly. Výhodou je, že v případě výpadku právě používané cesty je náhradní cesta pro směrování známa a není zde tedy zavedeno zpoždění nutné pro hledání nové cesty. Nevýhodou těchto protokolů je velká režie potřebná pro uchovávání informací o aktuálních cestách. Proaktivní protokoly jsou většinou vhodné pouze pro malé sítě s malým počtem uživatelů. Nejběžnější proaktivní protokoly jsou **DBF** (*Distributed Bellman-Ford*), **DSDV** (*Distance Source Distance Vector*), **WRP** (*Wireless Routing Protocol*), nebo **OLSR** (*Optimized Link State Routing*).
- Reaktivní (také známé jako protokoly "na vyžádání") - V porovnání s proaktivními protokoly se nesnaží reaktivní protokoly pravidelně získávat informace o možných cestách pro směrování dat. Hledání cesty je inicializované teprve tehdy, když má některá ze stanic data, které chce poslat.

Tímto způsobem jsou limitované rádiové zdroje ušetřeny (nízká režie reaktivních protokolů). Na druhé straně může být časově náročné najít vhodnou cestu v případě potřeby a tím vniká vysoké zpoždění na začátku přenosu. Mezi reaktivní protokoly patří například **DSR** (*Dynamic Source Routing*), **AODV** (*Ad-hoc On Demand Distance Vector*) nebo **SSR** (*Signal Stability Routing*).

- Hybridní - Tyto protokoly kombinují výhody proaktivních a reaktivních protokolů. Mezi nejčastější používané hybridní protokoly lze zařadit například **ZRP** (*Zone Routing Protocol*) nebo **ZHLS** (*Zone-based Hierarchical Link State*).

Kromě protokolů založených na síťové topologii, může být optimální cesta vybrána prostřednictvím protokolů využívajících informace o poloze uživatelských terminálů (např. **DREAM** (*Distance Routing Effect Algorithm for Mobility*)) nebo protokolů snažících se šetřit baterii (např. **CPC** (*Cluster Power Control*)).

## 6.4 Zabezpečení

Slabé místo sítě ad hoc bylo a je její nedostačující zabezpečení. Útoky na sítě ad hoc lze rozdělit do dvou skupin: útoky pasivní a útoky aktivní. Zatímco pasivní útok obvykle spočívá pouze v "pasivním" odposlouchávání, aktivní útok může upravit či dokonce vymazat posílané informace. Shrnutí nejčastějších útoků v sítích ad hoc je uvedeno níže:

- **DDoS** (*Distributed Denial of Service*) - Ve většině případů jde o rušení zabraňující jakékoliv komunikaci.
- **Imitace identity** - Útočník může získat přístup ke konfiguračním datům systému jako super-uživatel, které pak může modifikovat nebo dokonce mazat.
- **Odhalení** - Útočník může získat důvěrné informace odposlechem a poté je využít.
- **Útoky způsobené špatně zabezpečenými směrovacími protokoly** - Bezpečné směrování je obtížný úkol vzhledem k charakteru sítě typu ad hoc. Útočník může např. schválně zahazovat přeposílané pakety, přeposílat pouze vybrané pakety či posílat úplně jiné pakety než které mu byly doručeny.

Komunikace může být považována jako zabezpečená pokud je zajištěna:

- **Dostupnost** - garance, že komunikace nebude narušena z důvodu výše zmíněných útoků.
- **Autentizace** - Uživatel musí být při vstupu do sítě řádně ověřen.
- **Důvěrnost** - Informace posílaná přes bezdrátovou síť musí být chráněna proti jakémukoliv zneužití.
- **Integrita** - Je třeba zaručit, že data nejsou jakkoliv změněna v průběhu jejich přenosu.

Konvenční metody pro zabezpečení komunikace v síti jsou řešeny prostřednictvím symetrických nebo asymetrických kryptografických klíčů. Asymetrické metody vyžadují certifikaci, která je ale obtížně použitelná v sítích s nedostatečnou infrastrukturou, jako jsou právě sítě ad hoc. Pro použití certifikačního procesu je nejčastěji použit algoritmus **TIARA** (*Technique for Intrusion Resistant Ad Hoc routing algorithm*). Pro zvýšení bezpečnosti lze také použít několik zabezpečených směrovacích protokolů jako je **SRP** (*Secure Routing Protocol*) nebo **SAODV** (*Secure AODV*).

## 6.5 Technologie využívající topologii ad hoc

Nejrozšířenější bezdrátové technologie které využívají topologii ad hoc jsou WiFi založeny na standardu IEEE 802.11 a Bluetooth založené na standardu IEEE 802.15.

### WiFi

WiFi je bezdrátová síťová technologie používá zejména pro lokální sítě **LAN** (*Local Area Networks*), tj. sítě s malým dosahem (většinou desítky až stovky metrů) a poskytující vysokou přenosovou rychlost pro uživatele uvnitř domácností, kanceláří, nákupních center, apod. Přenosová rychlost dosažená zařízením WiFi závisí na podporovaném standardu. Nejčastější maximální dosahované rychlosti jsou až 54 Mbit/s na jeden přístupový bod (IEEE 802.11a / IEEE 802.11g) a nově až 300 Mbit/s (IEEE 802.11n).

Výhodou WiFi je hlavně její nízká cena a to, že operuje v bezlicenčním kmitočtovém pásmu **ISM** (*Industry, Scientific and Medical*). Konkrétně se jedná o pásma v okolí 2,4 GHz a 5 GHz:

- 2,4 GHz - Pro většinu zemí v Evropě je vyhrazeno 13 kanálů s šířkou pásma 22 MHz což odpovídá rozsahu od 2,4 GHz do 2,484 GHz. Například pro Ameriku je vyhrazeno pouze 11 kanálů. Vedle sebe ležící kanály se částečně překrývají. V důsledku toho mohou být použity pouze tři kanály, které se nepřekrývají vůbec a tudíž se ani neruší
- 5 GHz - Toto pásmo je dále rozděleno do tří úseků:
  - 1. subpásmo (5150 - 5250 MHz) - použití uvnitř budov
  - 2. subpásmo (5250 - 5350 MHz) - použití uvnitř budov (terminál musí být schopen ovládat svůj vysílací výkon a přejít do jiného pásma pokud dojde k rušení radarů)
  - 3. subpásmo (5350 - 5450 MHz) - platí stejná pravidla jako pro druhé subpásmo

Vzhledem k tomu, že WiFi je široce rozšířená technologie, jsou přidělené rádiové kanály často přetížené. Postupem času bylo navrženo množství doplňujících standardů, které mají za úkol především zefektivnit přenos a navýšit maximální dosahované přenosové rychlosti. Všechny zařízení založené na standardech IEEE 802.11 jsou pak testovány organizací **WECA** (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*), která byla přejmenována v roce 2002 na alianci WiFi. Tato aliance testuje, zda zařízení splňují všechny nezbytné požadavky nebo ne.

IEEE 802.11 standardy definují vrstvu **MAC** (*Medium Access Control*), která se společně s částí **LLC** (*Logical Link Control*) nachází na druhé vrstvě modelu **RM-OSI** (*Reference Model - Open System Interconnection*). Účelem vrstvy MAC je především řízení přístupu k rádiovému kanálu, fragmentace, defragmentace datových paketů, specifikace kontrolních rámců, atd. Kromě toho, WiFi standardy specifikují několik typů fyzických vrstev lišících se zejména v použití různých



modulačních technik (například frekvenční skákání, metoda rozprostřeného spektra nebo OFDM).

## Bluetooth

Bluetooth je technologie pro bezdrátovou komunikaci na krátkou vzdálenost. Je charakterizována nízkým vysílacím výkonem a nízkou cenou. Účelem Bluetooth je nahradit kabelové propojení různých elektrických přístrojů jako je mobilní telefon, sluchátka, notebook, atd.

Základní přenosová rychlost Bluetooth je 1 Mbit/s. U verze Bluetooth 2.0 s **EDR** (*Enhanced Data Rates*) ale může být rychlost zvýšena až na 3 Mbit/s. Vyšší přenosová rychlost, až 24 Mbit/s, může být dosažena u Bluetooth v3.0 + **HS** (*High Speed*). Tato verze umožňuje využít frekvenční pásmo určené pro WiFi. Poslední verze Bluetooth v4.0 dosahuje nižší spotřeby energie. Proto je tato verze označována jako **LE** (*Low Energy*).

K omezení vlivu interference a úniků je ve všech verzích Bluetooth využito rozprostřeného spektra s přeskokováním kmitočtů **FHSS** (*Frequency Hopping Spread Spectrum*). U metody FHSS dochází k pseudonáhodnému přeskoku mezi kmitočty při přenosu dat. Četnost přeskoků mezi frekvencemi je 1600 krát za sekundu.

Přenos dat na fyzické vrstvě technologie Bluetooth je realizován v bezlicenčním pásmu 2.4 GHz s šířkou pásma 83.5 MHz. Konkrétně se jedná o frekvence v rozmezí 2400 MHz a 2483.5 MHz. V základním přenosovém módu a v EDR je šířka pásma rozdělena na 79 přenosových kanálů a dvě ochranná pásma. Spodní a horní ochranné pásmo mají šířku 2 a 3.5 MHz. Jak základní přenosový mód tak i EDR používají pro přenos dat duplexní režim TDD.



---

V Bluetooth v1.0, kde jsou dosahované přenosové rychlosti do 1 Mbit/s, jsou data modulována dvoustavovou modulací **GFSK** (*Gaussian Frequency Shift Keying*). Vyšší přenosové rychlosti lze zaručit až při použití verze EDR prostřednictvím modulace  **$\pi/4$ -DQPSK** ( *$\pi/4$  Rotated Differential Quadrature Phase Shift Keying*), která umožňuje rychlost přenosu dat až 2 Mbit/s a modulací **8 DPSK** (*8 phase Differential Phase Shift Keying*) pro přenos rychlostí až 3 Mbit/s. K dosažení 24 Mbit/s musí být umožněno rozšíření pásma s využitím **AMP** (*Alternate MAC/PHYs*). V tomto případě se nejprve sestaví rádiový kanál EDR a po jeho založení se pomocí AMP najde alternativní širší pásmo, které se posléze použije pro přenos dat.

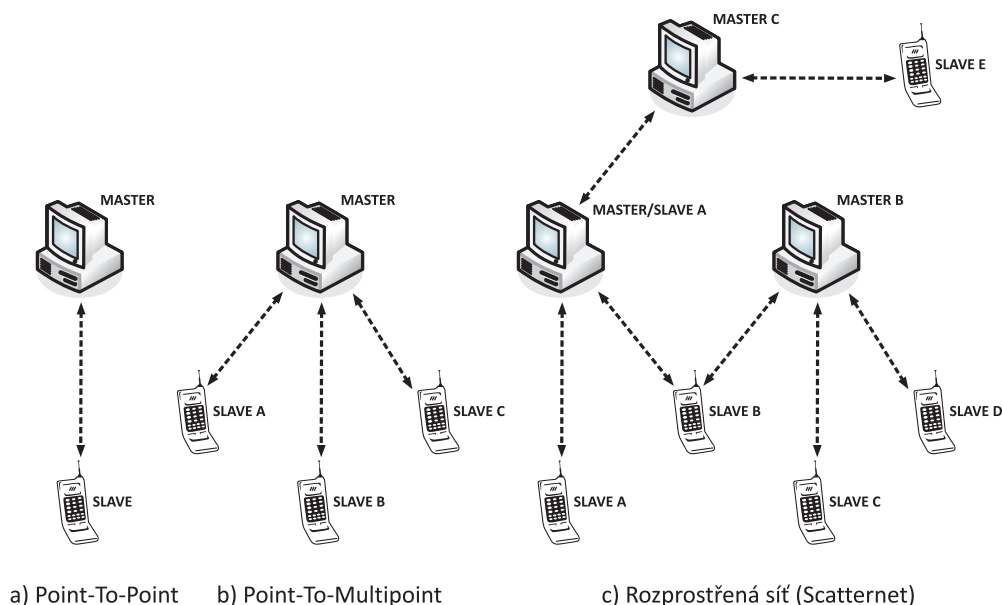
---

Aby bylo možné dosáhnout nižší spotřeby energie, tak je definován odlišný fyzický kanál a přístup ke kanálu. Oproti základnímu přenosu a EDR je u verze LE využita pouze modulace GFSK. Dále je pro LE použito sice stejné frekvenční pásmo, ale s rozdílně přiřazenými kanály. Pásmo je rozděleno do 40 kanálů po 2MHz. Po stranách je navíc vyčleněno ještě 2MHz spodní a 1,5 MHz horní ochranné pásmo. Pro přístup ke kanálům může být použito buď TDMA nebo FDMA. Tři kanály jsou využity pro informaci o tom, co jednotlivá zařízení plánují vykonávat za činnost (např. nastavení připojení nebo příprava pro přenos dat). Zbylých 37 kanálů je pak určeno pro datovou komunikaci.

Bluetooth podporuje přímou komunikaci bod-bod (point-to-point) i bod-více bodů (point-to-multipoint). Všechny komunikující zařízení sdílející stejný kanál jsou sdružena do tzv. pikosíti. V každé pikosíti je jedno zařízení nadřazené (nazývá se "master") všem ostatním zařízením (tyto zařízení se nazývají jako "slave"). Zařízení zahajující komunikaci je vždy označeno jako zařízení typu "master". Všechna zařízení slave musí být synchronizována s hodinami zařízení master a musí následovat stejnou posloupnost frekvenčních přeskoků jako master. Komunikace je možná pouze mezi zařízeními master a slave. Komunikace mezi dvěma zařízeními slave není podporována.

V jedné pikosíti může být až sedm aktivních zařízení slave. Vedle sedmi aktivních slave zařízení může být součástí pikosítě až 255 nekomunikujících zařízení (v tzv. parkovacím stavu). V Bluetooth LE je počet aktivních zařízení limitován množstvím radiových zdrojů stanice master.

Další důležitou vlastností je, že zařízení mohou být zahrnuta do více než jedné pikosítě. V tomto případě se pikosítě vzájemně překrývají a tato topologie je označována jako rozprostřená síť (scatternet). Rozprostřená síť je složena z několika pikosítí, ale stále je nutné zajistit, aby v každé z pikosítí bylo pouze jedno zařízení typu master. V rámci rozprostřené sítě může každé zařízení zastávat funkci master jen v jedné pikosíti. Ve všech ostatních pikosítích musí zařízení převzít roli slave. Proto se role master a slave mohou měnit a přepínat mezi zařízeními v rozprostřené síti, aby se zabránilo situaci, kdy je zařízení ve dvou pikosítích ve funkci master. Jestliže se dvě pikosítě překrývají a v každé je pak jiná stanice v roli master, je posloupnost frekvenčních přeskoků v obou pikosítích různá. Proto zařízení, které je ve více pikosítích musí k jednotlivým pikosítím přistupovat postupně pomocí časového multiplexu.



Topologie sítě Bluetooth

## 6.6 Senzorové sítě

Senzorové sítě, také označované jako **WSN** (*Wireless Sensor Network*), se skládají z uzlů (senzorů) uspořádaných do sítě využívající topologii ad hoc. V podstatě je síť WSN v mnoha ohledech podobná síti MANET. Hlavním důvodem je to, že jak WSN tak i MANET se vyznačují tím, že síť je schopná se sama vytvářet a konfigurovat, uzly jsou propojeny prostřednictvím bezdrátového připojení a komunikace mezi uzly je většinou přes několik skoků. Přesto se síť WSN a MANET liší v několika základních bodech, jak je uvedeno v následující tabulce.

Porovnání sítě MANET a WSN

Kritérium	MANET	WSN
Použití a aplikace	Pro běžné použití lidmi využívajícími mobilní aplikace	Umístěny přímo v prostředí a sloužící především pro sběr dat (měření teploty, vlhkosti, detekce požárů, apod.)
Velikost zařízení	Notebooky, PDA, mobilní telefony	Malé senzory v řádech milimetrů
Počet zařízení v síti	Řádově desítky až stovky	Řádově i tisíce senzorů
Hlavní důvod pro změnu topologie	Pohyb uživatelů	Selhání senzoru

Podobně jako v případě sítě MANET jsou u WSN nejvíce kritické otázky spojené s efektivním přístupem k médiu a optimálnímu směrování dat. Protokoly MAC používané v sítích MANET nejsou pro WSN vhodné. Hlavním cílem u WSN je použít protokolů zaručujících nízkou spotřebu elektrické energie a které mají zároveň malé nároky na velikost paměti.

## 6.7 Síť založené na mesh topologii

Topologie mesh je perspektivní síťová topologie kombinující vlastnosti infrastrukturní a ad hoc sítě. Podobně jako v síti infrastrukturní obsahuje mesh centrální uzly (např. základnové stanice, přístupové body, atd.), které poskytují připojení do sítě Internet. Nicméně, hlavní rozdíl ve srovnání s mobilními sítěmi je ten, že v síti mesh mohou dvě zařízení komunikovat přímo mezi sebou, aniž by k tomu byl potřeba centrální uzel. Ve srovnání se sítěmi ad hoc a především Manet je síť mesh permanentně vystavěna (alespoň co se týká centrálních uzlů) a uzly jsou většinou nemobilní. Na druhou stranu, síť mesh podporují přeposílání dat přes mezilehlé uzly. V důsledku toho musí být použito směrovacích protokolů pro nalezení optimální cesty podobně jako v sítích MANET.

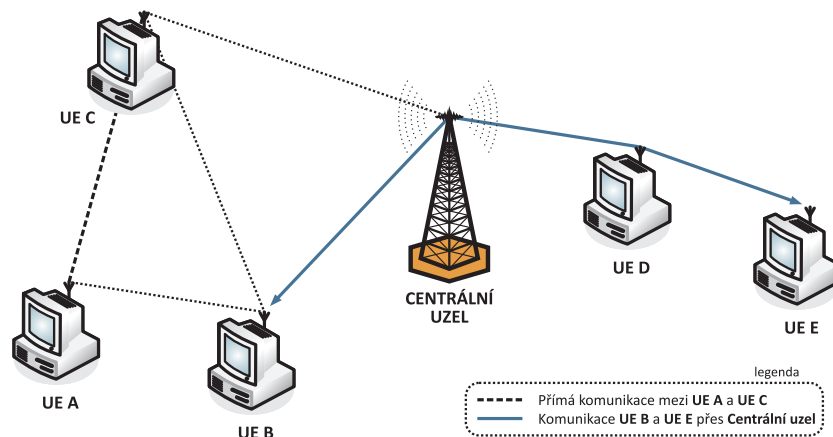
Topologie mesh je podporována standardem 802.11s (WiFi). Kromě toho byla mesh topologie také implementovaná ve standardu IEEE 802.16d (WiMAX), která uvažovala nemobilní uživatele. Nicméně, novější normy podporující mobilitu (IEEE 802.16e/j/m) vylučují mesh síť a jsou čistě zaměřeny na síť infrastrukturní.

+

- Zvýšení dosahu sítě - uživatel, který není v přímém dosahu centrálního bodu se může připojit prostřednictvím jiného uživatele.
- Vysoká flexibilita a spolehlivost - lze nalézt více cest mezi zdrojovou a cílovou stanicí pomocí směrovacích protokolů.

-

- Větší spotřeba baterie, pokud jsou terminály využívány pro přeposílání dat.
- Při užití komunikace přes více uzlů snižuje i celkovou propustnost sítě (stejná data jsou poslána několikrát).
- Vyšší režie než v případě infrastrukturní sítě, protože je nutné získávat informace o možných cestách pro směrování dat.



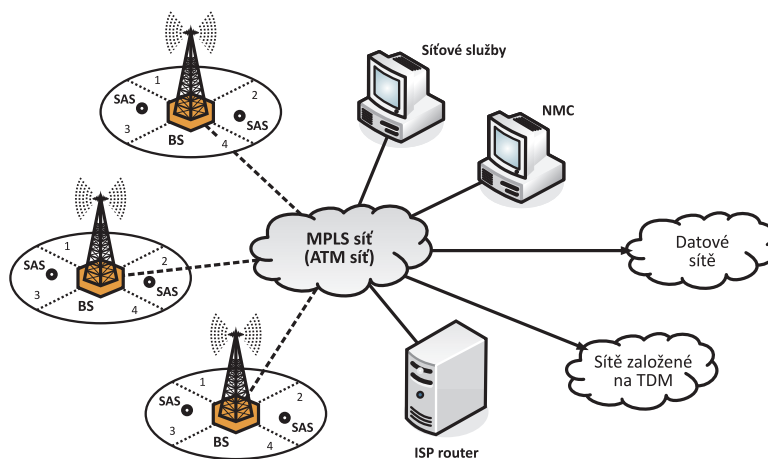
Příklad komunikace stanic v síti mesh

## 7 Širokopásmové distribuční systémy

### 7.1 Širokopásmové distribuční systémy LMDS

Systémy **LMDS** (*Local Multipoint Distributive System*) jsou širokopásmovou bezdrátovou přístupovou technologií původně určenou pro digitální televizní vysílání **DVB** (*Digital Video Broadcast*). Tyto systémy jsou koncipovány jako pevná bezdrátová technologie pokrývající širokou skupinu uživatelů především v tzv. poslední míli přístupových sítí (*Last Mile*). LMDS systémy pracují běžně v mikrovlnném pásmu od 26 GHz do 29 GHz. Ve Spojených státech je též zvažováno frekvenční pásmo od 31.0 do 31.3 GHz.

LMDS systémy využívají pro svůj provoz pevné bezdrátové připojení, které je realizováno prostřednictvím základnových stanic **BS**, k nimž je pomocí radiového rozhraní připojena řada přístupových koncových stanic **SAS** (*Subscriber Access System*). Stanice SAS jsou vybaveny směrovými anténami orientovanými směrem k základnovým stanicím BS.



Síťová struktura LMDS systému



Propustnost a dosažitelná vzdálenost připojení je závislá především na omezeních daných použitým radiovým kanálem a zvolenou modulační metodou např. **PSK** (*Phase Shift Keying*) nebo **AM** (*Amplitude Modulation*). Vzdálenost je obvykle omezena na přibližně 2 až 5 km s ohledem na útlum způsobený např. deštěm. Rozmístění jednotek na vzdálenost vyšší než 8 km od základnové stanice BS je možné pouze za určitých okolností a s omezením na systémy typu „bod-bod“, které mohou překlenout tuto vyšší vzdálenost díky zvýšenému zisku antény.



---

Ačkoli někteří operátoři v Evropě používají LMDS systémy pro plošné poskytování přístupových služeb v různých typech sítí, LMDS systémy jsou však běžně využívány pro vysokokapacitní distribuci provozu v sítích typu GSM, UMTS, WiMAX nebo Wi-Fi.

---

Počet sektorů kolem základnových stanic BS a jejich fyzické rozložení je závislé především na počtu přípojných míst, ale také na celkovém přenášeném objemu dat, který je směrován právě přes tyto základnové stanice. Fyzická sektorizace však není neměnná. Její modifikace je možná v souvislosti s rostoucím zatížením sítě. Základní rozdělení území a jeho pokrytí je realizováno pomocí dvou kanálů s kmitočty A a B, které implementují tzv. dvoufrekvenční plán.

Důvodem pro zavedení dvoufrekvenčního plánu jsou závažné problémy se vzájemnou interferencí mezi jednotlivými sektory. Existuje několik technik, jak tuto vzájemnou interferenci odstranit nebo výrazně redukovat. Základním předpokladem jsou vhodné směrové vlastnosti antén základnových stanic BS obsluhujících daný sektor a samozřejmě i antén účastnických stanic, které by měly být úzce směrové (parabolické) a namířené přímo na obslužnou základnovou stanici BS. Dalšími možnostmi, jak omezit vzájemné interference, jsou např. alokace různých kanálů každému sektoru v okolí BS zvlášť nebo změna polarizace radiových signálů v jednotlivých sektorech na vlnu horizontální nebo vertikální.

## 7.2 Širokopásmové distribuční systémy MMDS

Systémy **MMDS** (*Multichannel Multipoint Distribution Service* nebo *Multipoint Microwave Distribution System*), známé také jako systémy **BRS** (*Broadband Radio Service*) nebo někde také označované jako **Wireless Cable**, jsou bezdrátové telekomunikační technologie primárně využívané pro širokopásmové propojení sítí nebo jako alternativní metoda pro příjem programů kabelové televize.

Systémy MMDS pracují na kmitočtech okolo 2,1 GHz a v mikrovlnném pásmu od 2,5 GHz do 2,7 GHz. Příjem televizních programů respektive datových signálů přenášených systémy MMDS je zajištěn prostřednictvím střešní mikrovlnné antény. Samotná anténa je pak připojena k transceiveru, který umožňuje příjem a vysílání mikrovlnných signálů a konvertuje je na kmitočty kompatibilní se standardními TV tunery (v principu podobně jako je tomu u satelitních antén, kde jsou signály přeměněny na kmitočty kompatibilní se standardy kabelové televize). Některé typy antén mohou využívat tzv. integrovaný transceiver. Digitální televizní kanály pak mohou být dekodovány pomocí standardního set-top boxu nebo přímo v televizoru s integrovaným digitálním tunerem. Datové signály lze souběžně přijímat pomocí kabelového modemu podporujícího standard **DOCSIS** (*Data Over Cable Service Interface Specification*).

Frekvenční pásmo systémů MMDS je rozděleno na jednotlivé kanály se šířkou 34 MHz, které se nachází v kmitočtovém pásmu vyhrazeném pro distribuční systémy. Základní koncept systémů MMDS je primárně zaměřen na přenosy s vysokou provozní kapacitou prostřednictvím rozsáhlé distribuční sítě (např. multiplexy televizních a rádiových programů), v budoucnosti pak libovolná data přenášená po kanálech využívajících výhradně digitálních technologií. Každý kanál je schopen přenášet data rychlostí až 30 Mbit/s použitím modulace **64-QAM**, resp. 42 Mbit/s u modulace **256-QAM**. S ohledem na **FEC** (*Forward Error Correction*) a další režijní a systémová záhlaví je reálná propustnost asi 27 Mbit/s u modulace **64-QAM** a 38 Mbit/s u modulace **256-QAM**.



---

Nejnovější kmitočtová pásma systémů MMDS jsou plánována s ohledem na změnu šířky přenosových kanálů a systém přidělování licencí v souvislosti se zaváděním technologie WIMAX TDD do pevných a mobilních zařízení.

---



---

Systémy LMDS a MMDS vychází ze standardu DOCSIS využívaném v kabelových modemech. Modifikací standardu DOCSIS pro širokopásmové distribuční systémy je standard **DOCSIS+**.

---

Odolnost přenosu dat je u systémů MMDS zajištěna šifrováním toků mezi bezdrátovým širokopásmovým modemem a systémem **WMTS** (*Wireless Modem Termination System*) umístěným v BS poskytovatele pomocí algoritmu **Triple DES** (*Triple Data Encryption Standard*).





---

Systemy MMDS poskytují podstatně vyšší dosah než systémy LMDS. Systémy MMDS jsou také součástí nového standardu 802.16 WiMAX vydaném v roce 2004.

---

## 8 Lokalizace

### 8.1 Služby založené na lokalizaci

Znalost zeměpisné polohy umožňuje uživatelům využít nové služby v oblastech mimořádných událostí, zdravotnictví, zábavy nebo práce. Zeměpisná poloha uživatelů je reprezentována jejich souřadnicemi v prostoru.



**LBS** (*Location Based Services*) jsou služby využívající zeměpisné informace pro uživatele.

Příklad služeb vycházejících z polohy je navigační služba, sledování lidí nebo strojů (např. Latitude), geocaching, nebo turistický průvodce. Další důležitou aplikací LBS je určení polohy v případě nebezpečí (například poloha dopravní nehody, zraněné osoby, atd.). V tomto případě je poloha osoby zjištěna automaticky a vyžadovaná pomoc je navigována na místo bez potřeby zásahu uživatele.

Koncept LBS vyžaduje architekturu složenou z pěti typů zařízení:

- Uživatelské zařízení – zajišťuje rozhraní mezi uživatelem a systémem LBS. Uživatelské zařízení je obvykle mobilní jako např. mobilní telefon, notebook, tablet, navigační zařízení, atd.
- Komunikační síť – je zodpovědná za poskytování uživatelských dat a žádostí od uživatelského zařízení k poskytovateli služeb a zpětné poskytování získaných informací ze systému zpět k uživateli.
- Lokalizační komponenta - určuje zeměpisnou polohu uživatele.
- LBS poskytovatel – nabízí služby uživatelům a je zodpovědný za zpracování žádostí uživatelů.
- Poskytovatel obsahu – zásobuje LBS poskytovatele obsahem, který není uložen v LBS poskytovatele; může to být například zdroj map, pozice objektů, informace vztahující se k objektům, informace o veřejné dopravě, atd.

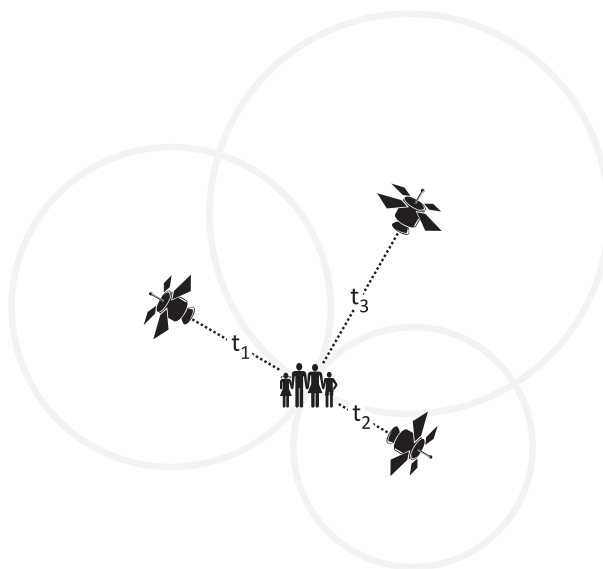
Pro efektivní a přínosné využívání služeb LBS, je rozhodující stanovení polohy pomocí Lokalizační komponenty. Bez přesné polohy by byly možnosti a schopnosti systému LBS podstatně omezeny. Poloha může být určena mnoha způsoby. Nejčastější cestou je využití satelitních navigačních systémů nebo mobilní sítě. Obě hlavní metody jsou popsány v další části.

## 8.2 Satelitní navigační systémy



Možnost použití satelitu pro určení polohy byla objevena týmem vedeným Dr. Richard B. Kershnerem během monitorování radiového přenosu prvního satelitu – Sputniku. Tým zjistil, že frekvence vysílání se kvůli Dopplerovu efektu mění při pohybu satelitu. V závislosti na těchto frekvenčních změnách, byli schopni určit pozici satelitu. Obrácením tohoto postupu, kdy je poloha satelitů známa, získáme polohu uživatele nebo sledovaného objektu.

Satelitní systémy pro určování polohy jsou založeny na měření času šíření signálu vysílaného satelity. Doba šíření signálu,  $t$ , je přepočtena na vzdálenost,  $s$ , mezi satelitem a uživatelem podle vzorce  $s=c*t$ , kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu ( $3 \cdot 10^8$  m/s). Pozice je určena ze znalosti pozice satelitu a doby šíření signálu jako koule složená z bodů umístěných ve stejné vzdálenosti od satelitu. To znamená, že každý satelit umožňuje určit množství potenciálních poloh uživatele. Přesná pozice objektu je definována pomocí čtyř parametrů: zeměpisná šířka, zeměpisná délka, nadmořská výška a čas. Pro odvození všech čtyř parametrů, musíme být schopni definovat čtyři koule. Pak polohu uživatele představuje průsečík těchto čtyř koulí. V ideálním případě s nulovou chybou při určení vzdálenosti mezi satelity a uživatelem se všechny koule protnou v jednom bodě. Jestliže vzdálenost není určena přesně, protnutí čtyř koulí určuje oblast potenciální polohy uživatele. Velikost této oblasti je úměrná chybám při měření vzdálenosti a může být redukována s využitím informací z dalších satelitů.



Princip určování polohy uživatelů

Tento obecný princip určování polohy využívá většina běžných navigačních systémů jako je americký systém GPS, evropský systém Galileo, ruský systém Glonass, nebo čínský COMPASS.

## GPS

GPS je celosvětový satelitní navigační systém vyvinutý Ministerstvem obrany Spojených států amerických pro vojenské účely. Projekt GPS byl započat v roce 1973 a první testovací satelit byl vyslán v roce 1978. Nyní GPS poskytuje služby určení polohy, navigace a určení času nejen pro vojenské účely, ale také pro civilní využití po celém světě. Systém GPS se skládá ze tří částí: vesmírný segment, kontrolní segment a uživatelský segment.

- **Vesmírný segment:** Tento segment se skládá minimálně z 24 satelitů, obíhajících přibližně 20 200 km nad Zemí, s periodou oběžné doby 11 hodin a 58 minut. Satelity jsou rozmístěny v šesti oběžných drahách s nakloněním 55°. Minimální počet satelitů je odvozen z podmínky zajištění viditelnosti alespoň čtyř satelitů z každého bodu na Zemi. Další přidané satelity mohou zvýšit přesnost systému. V roce 2011 byla dřívější konstelace satelitů upravena pro zlepšení pokrytí a do základní konstelace 24 satelitů byly přidány další tři satelity. To znamená, že nyní je za základní konstelaci považováno 27 satelitů. V posledních letech obíhá Zemi zpravidla 31 aktivních satelitů a tři nebo čtyři náhradní satelity. Všechny satelity přenášejí signály s informací vyžadovanou pro odvození polohy uživatele.
- **Kontrolní segment:** Kontrolní část je tvořena pozemními zařízeními pro monitorování, kontrolu a řízení satelitů. Centrem kontrolního segmentu je hlavní řídicí stanice v Coloradu ve Spojených státech. Hlavní kontrolní stanice je zodpovědná za řízení všech kontrolních procesů. Aby se zabránilo vypnutí v případě výpadku hlavní kontrolní stanice, je v Kalifornii umístěna záložní stanice. Hlavní kontrolní stanice přijímá a analyzuje informace ze satelitů (např. informace o stavu satelitů, vysílané navigační informace, a podobně) a navigační informace z 16 pozemních monitorovacích stanic. Monitorovací stanice sledují přenos navigačních informací ze satelitů a sledují polohu satelitů. Na základě nasbíraných informací posílá hlavní kontrolní stanice příkazy satelitům pro zajištění správných a spolehlivých služeb (např. příkaz pro změnu polohy satelitu). Příkazy, informace pro satelity nebo ostatní data jsou posílány skrz pozemní antény. V kontrolním systému je rozmístěno 12 pozemních antén po celém světě.
- **Uživatelská část:** Uživatelská část je reprezentována přijímači GPS, které zpracovávají informace přijaté ze satelitů. Přijímač GPS obsahuje čip GPS s radiovou částí, signálový procesor, paměť, kontrolní a řídicí část a rozhraní pro hostitelské zařízení. Čip GPS poskytuje zpracované navigační informace hostitelskému zařízení pomocí protokolu NMEA (National Marine Electronics Association).

- 

Satelity přenášejí tři typy signálu. První signál, P (přesný kód neboli precision code), je šifrovaný kód s pseudonáhodnou posloupností o frekvenci 10,23 MHz. Tento kód můžeme nahradit druhým kódem, Y kódem, v případě potřeby tzv. anti-spoofing režimu. Poslední kód je kód C/A (coarse/acquisition kód), který je využíván pro civilní účely nebo získávání P (Y) kódů. C/A je složen z pseudonáhodné posloupnosti vysílanou na frekvenci 1,023 MHz. Navigační

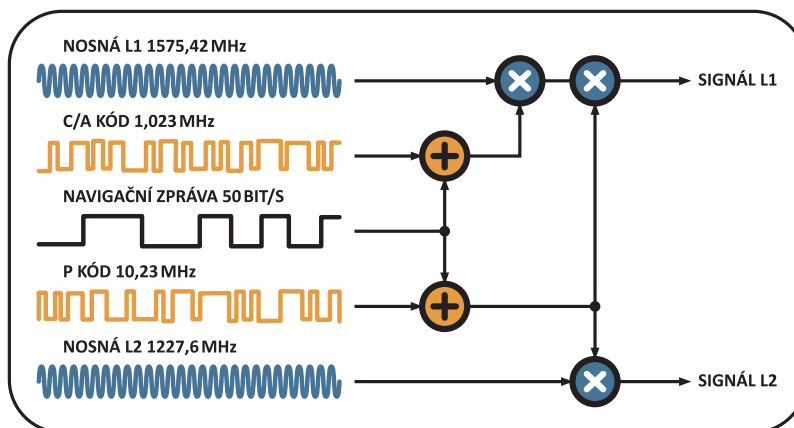
zpráva, tj. zpráva s informací pro určení uživatelské pozice, je přenášena rychlostí 50 bit/s, a je přidána do C/A a P (Y) kódu. Obě výsledné sekvence jsou modulovány na nosnou L1 na frekvenci 1575,45 MHz. Další sekvence vzniklá součtem navigačních zpráv a P (Y) kódu je modulována na nosné L1 a L2 na frekvenci 1227,6 MHz. Oba výstupy L1 a L2 jsou poté vyslány k uživatelskému přijímači GPS. Kromě toho, další signály L2C (1227 MHz), L5 (1176 MHz) a L1C (1575 MHz) mohou být přenášeny pro minimalizování chyby určení pozice pro komerční účely, služby spojené se záchranou životů (safety-of-life), a pro interoperabilitu s ostatními systémy. Jelikož všechny satelity vysílají na stejných nosných, tak je využita přístupová technika CDMA pro příjem signálu z více satelitů.



Kompletní navigační zprávy jsou přenášeny v rámci s délkou 1500 bitů. Každý rámec je složen z pěti podrámců obsahujících různé informace jako je pozice satelitu, stav satelitu, korekce času, vliv zpoždění ionosféry, nebo informace o oběžných drahách satelitů. K přenosu celé navigační zprávy je potřeba 30 sekund (1500 bitů přenášeno s rychlostí 50 bit/s).

Jelikož je čas potřebný k doručení kompletní informace o všech satelitech (tj. čas mezi zapnutím zařízení a určením polohy uživatele) velmi dlouhý, tak mohou satelitní navigační systémy využít mobilní komunikační sítě pro doručení některých informací přes mobilní síť místo obvyklého doručení přímo přes satelity. Tento způsob je znám jako asistovaná GPS (Assisted GPS). Takto je výrazně zrychlen proces inicializace GPS.

Přesnost určení polohy je ovlivněna několika faktory: měření času doručení signálu, atmosférické vlivy (zvláště vlivy ionosféry), vícecestné šíření, aktuálnost polohy satelitu, synchronizace hodin a počet viditelných satelitů. Nejvýznamnější chybu způsobuje ionosféra; nicméně, její efekt můžeme minimalizovat využitím několika signálů přenášovaných na různých nosných (např. L1 a L2), jelikož vliv ionosféry je rozdílný pro různé frekvence. Celková chyba určení polohy pomocí GPS je v řádech metrů (typicky do 8 metrů). Přesnost můžeme dále zlepšit použitím diferenční GPS (differential GPS), která využívá síť pozemních stanic přesně definovanou pozicí pro zpřesnění polohy získané z informací ze satelitů.



Signály vysílané GPS satelitem

## Galileo

Evropská alternativa k systému GPS je navigační systém Galileo. Ve vesmírné části se Galileo skládá z 27 operujících satelitů a 3 náhradních satelitů. Satelity jsou umístěny ve třech orbitálních rovinách se vzájemným náklonem 56°. Výška satelitů je 23 222 km nad zemí s oběžnou dobou 14 hodin. Kontrolní segment Galilea zahrnuje dvě řídicí centra, v Oberpfaffenhofenu v Německu a ve Fucinu v Itálii. Další dvě centra **LEOP** (*Lunch and Early Operations*) jsou v Toulouse ve Francii a v Darmstadtu v Německu. Analogicky k GPS bude po celém světě rozmístěno také 5 telemetrických, sledovacích a kontrolní stanice, 40 senzorových stanic, a 10 vysílacích stanic pro monitorování a řízení satelitů.

Satelity, stejně jako u GPS, přenáší několik navigačních signálů (E1, E5a, E5b, E6). První signál E1, přenáší data a navigační zprávu kódované nešifrovaně s frekvencí 1,023 MHz na nosné frekvenci 1575,42 MHz. Signál s rychlostí 125 bit/s je dostupný pro civilní využití (známý jako Otevřené služby – open services), komerční služby a služby pro záchranu života. Druhý a třetí signál E5 a E5b jsou analogické k E1. Avšak E5a E5b jsou modulovány na frekvenci 1176,450 MHz a 1207,140 MHz. Oba jsou kódovány sekvencí s frekvencí 10,23 MHz. Signál E5 přenáší data pro navigaci a časování. V porovnání s E1 a E5b, využívá E5a robustnější modulace a proto umožňuje přenos rychlostí pouze 25 bit/s a je dostupný pouze pro otevřené služby. Poslední signál E6 je navrhnut pro komerční účely a proto je zakódovaný. Tento signál je modulován na nosnou frekvenci 1278,750 MHz s využitím sekvenčního kódu s frekvencí 5,115 MHz. Podporovaná přenosová rychlost je 500 bit/s.

## Ostatní navigační systémy

Princip stanovení polohy uživatele je analogický také u ostatních navigačních systémů jako jsou:

- **GLONASS** (*GLObalnaja NAVigacionnaja Sputnikovaja Sistema*) – Předpokládá 26 satelitů rozmístěných na tři oběžné dráhy. Zajímavým faktem je ten, že systém není kompatibilní s GPS nebo Galileo, protože používá frekvenční multiplex FDM, tj. každý satelit vysílá na jiné frekvenci. Od roku 2011 však i Glonass podporuje také princip CDMA, aby umožnil kompatibilitu s GPS a Galileem. Pozemní segment pro GLONAS je umístěn v Rusku.
- **COMPASS**, také známý jako BeiDou 2, je čínský navigační systém. V současné době je vyvinut pro národní účely, ale v příštích letech se předpokládá jeho rozšíření i pro účely celosvětové navigace (s 35 satelity).
- **IRNSS** (*Indian Regional Navigational Satellite System*) se skládá ze 7 satelitů ve vesmírném segmentu. Z toho jsou 3 satelity na geostacionární oběžné dráze (přibližně 35 800 km) a 4 satelity jsou na geosynchronní dráze k pokrytí Indického subkontinentu.

## 8.3 Určování polohy pomocí mobilní sítě

Mobilní sítě umožňují odhadnout polohu uživatele v závislosti na znalosti pozic základnových stanic. Existuje několik možností využití mobilní komunikační sítě k lokalizaci. Přístupy se liší v parametrech užívaných k určení polohy.

První způsob je znám jako *Cell Of Origin (COO)*. Využívá identifikaci základní stanice (Cell ID) k určení polohy uživatele. Pozice uživatele odpovídá souřadnicím jeho základnové stanice. Chyba určení polohy se v tomto případě rovná poloměru buněk.

Vyšší přesnost je dosažena pomocí metody *Time of Arrival (TOA)*, která využívá nejen Cell ID, ale také schopnost změřit zpoždění mezi odesláním signálu mobilní stanicí a jeho příjmem základnovou stanicí. Vzhledem k tomu, že se signál šíří rychlostí světla, vzdálenost uživatele od základnové stanice je vypočítána stejným způsobem jako u satelitních systémů.

Když je signál přijímán více než jednou základnovou stanicí, TOA může být rozšířena na *Time Difference of Arrival (TDOA)*. V tomto případě je poloha uživatele vypočítána za pomoci doby šíření signálu, jako průnik odhadovaných vzdáleností od sousedních základnových stanic. V TDOA je čas příjmu signálu zpracováván sítí. Jestliže jsou data zpracována mobilní stanicí, je algoritmus označován jako *Enhanced Observed Time Difference (E-OTD)*. E-OTD vyžaduje implementaci speciálního vybavení, tzv. lokalizační měřicí jednotka - *Location Measurement Unit (LMU)*. LMU zajišťuje přesné časování a přesnost lokalizačních dat.

Jestliže jsou využity směrové antény, buďto v základnové stanici nebo v mobilní stanici, směr ze kterého je signál přijímán může být triangulován, podobným způsobem jako v TDOA. Tato metoda je pak nazývána jako **Angle of Arrival (AOA)**.

## **9** Trendy pro budoucí generace mobilních sítí

U budoucích sítí se předpokládá využití nových technik a algoritmů, které umožní ještě větší přenosové rychlosti a zajistí plnou a bezproblémovou mobilitu uživatelů. Proto je nutné dosáhnout větší spektrální účinnosti (tzn. většího počtu přenesených bitů na Hz) za pomoci kooperace mezi buňkami sítě. Předpokládá se, že buňky budou rozmístěny hustěji a tyto buňky budou mít spíše malý poloměr oblasti pokryté signálem, zejména pak v oblastech s vysokou hustotou uživatelů. Tyto malé buňky by měly mít kvalitní připojení do páteřní sítě, nejpravděpodobněji řešené pomocí optických vláken.

Budoucí sítě také budou směřovat k heterogenitě. To znamená, že terminály a uživatelská zařízení by měla být schopna zpracovat signály různých technologií. Nicméně, toto vše nemusí stačit na splnění požadavků uživatelů. Proto je nutné zajistit a rozšířit dostupná frekvenční pásma. K tomu je zapotřebí vývoj agregace nosných zejména v oblasti fragmentovaného (nesouvislého) pásma a také je vhodné využít kognitivní přístup sdílení pásem mezi operátory. Zároveň by měla být podporována přímá komunikace mezi uživatelskými terminály, čímž dojde k výrazné úspoře rádiových prostředků. Dalším znakem budoucích sítí bude energetická efektivita. Cílem bude vybudovat sítě, které jsou více přátelské k životnímu prostředí a které sníží spotřebu elektrické energie. Proto budou v těchto sítích muset být implementovány prvky pro inteligentní řízení a přidělování rádiových prostředků.