

Technologie k připojení základnových stanic mobilní sítě k páteřní síti

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

Doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.
Ing. Zdeněk Brabec, CSc.

V Praze, květen 2015

1 Obsah

2	Úvod	3
3	Rozbor	3
3.1	Vymezení předmětu analýzy	3
4	Popis technologií	6
4.1	Připojení optickými vlákny	6
4.1.1	Využití klasických telekomunikačních technologií	8
4.1.2	Optický Ethernet	9
4.1.3	Nenasvícené vlákno	10
4.2	Metalické vedení	11
4.3	Bezdrátové sítě	12
4.3.1	Dělení bezdrátových sítí	12
4.3.2	Bilance radioreléového spoje	13
4.3.3	Vývoj v oblasti radioreléových spojů	14
4.3.4	Možnosti rozšíření kanálů	15
4.3.5	Navýšení kapacity spojů z pohledu nákladů na realizaci a provoz	16
5	Výběr technologií s ohledem na rozvoj mobilních služeb	18
5.1	Struktura přípojné sítě	18
5.1.1	Topologie sítě	18
5.1.2	Komunikační požadavky	19
5.2	Odhad potřebné přenosové kapacity	20
5.2.1	Odhad datového provozu	20
5.2.2	Nároky plynoucí z přístupové radiové části mobilní sítě	23
5.2.3	Agregace přenosu z více základnových stanic	24
5.2.4	Zhodnocení klíčových technologií z hlediska dosažitelné přenosové kapacity	24
5.3	Souhrn	25
6	Odkazy	26

2 Úvod

Následující text byl zpracován na základě požadavku Českého telekomunikačního úřadu (dále jen „Úřad“), jako podklad pro případné vymezení, stanovení a následnou analýzu trhu velkoobchodních koncových segmentů pronajatých okruhů k zajištění pronajaté nebo vyhrazené kapacity pro účely připojení mobilních základnových stanic – trh mobilního páteřního propojení (tzv. backhaul).

Úkolem analýzy je zejména:

Zpracování přehledu dostupných i perspektivních technologií (infrastruktur), které je či bude možno v horizontu 6 let v podmínkách ČR využít pro připojení základnových stanic (BTS, resp. Node B a eNode B) pro LTE síť (4G síť).

Přehled technologií, jak již v současné době využívaných tak dostupných v horizontu následujících 6 let pro zajištění mobilního backhau, by měl být primárně rozdělen na backhaul realizovaný prostřednictvím optických sítí (vláken) a prostřednictvím bezdrátových technologií (např. mikrovlnné spoje v licencovaných/volných pásmech apod.), případně lze identifikovat i jiné technologie. Bude zkoumána odhadnuta teoretická i reálně dosažitelná kapacita jednotlivých technologií při jejich nasazení pro připojení základnových stanic, u bezdrátových technologií i s ohledem na využitou šířku pásma. Tento přehled dostupných technologií by měl též zahrnovat analýzu či zhodnocení vhodnosti jednotlivých typů mobilního backhau v závislosti na daném typu území – zejména z pohledu hustoty osídlení, topologie mobilní sítě (jiné ve městech a na venkově) a předpokládané vzdálenosti základnové stanice od koncentračního bodu mobilní sítě, ve které dochází k propojení na páteřní síť operátorů.

Posouzení, zda výše uvedené jednotlivé způsoby realizace mobilního backhau budou schopny pokrýt předpokládané potřeby zákazníků na objemy přenášených dat ve výhledu 6 let.

Toto posouzení by mělo být postaveno na odhadu očekávaného rostoucího objemu přenášených dat v mobilních sítích ve stanoveném výhledu 6 let, i s ohledem na předpokládaný budoucí vývoj technologií mobilních sítí (4G/5G – jejich teoretická i reálná kapacita), a porovnáním s kapacitními možnostmi jednotlivých technologií pro mobilní backhaul.

3 Rozbor

3.1 Vymezení předmětu analýzy

Telekomunikační síť můžeme obecně rozdělit do dvou základních hierarchických úrovní:

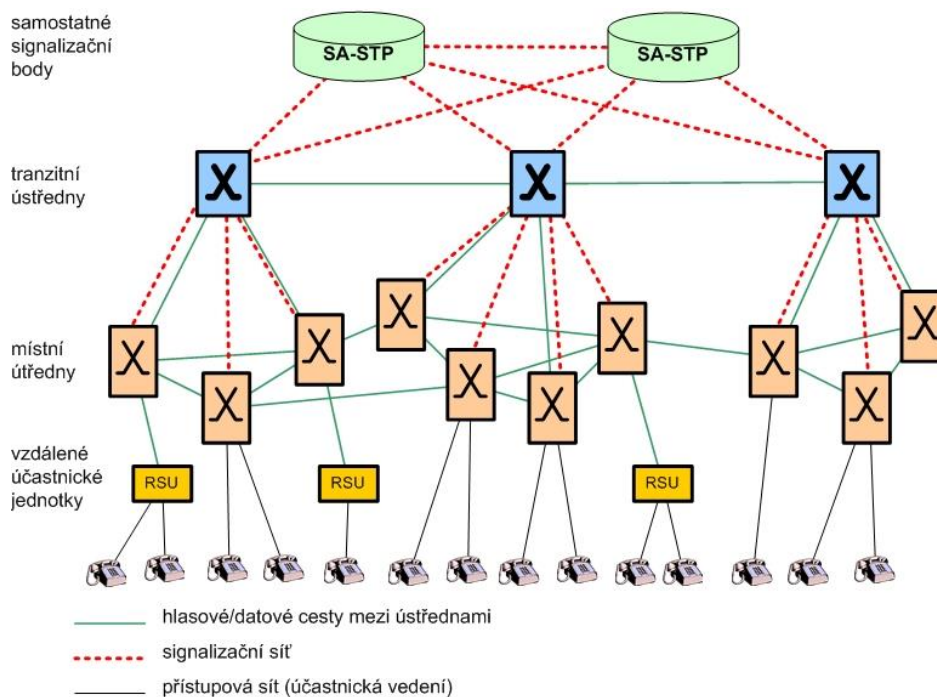
- Páteřní síť (Backbone, Core) sloužící k přenosu dat mezi uzly sítě operátora
- Přístupová síť (Access) sloužící k připojení jednotlivých účastníků k síťovým uzlům operátora

Předmětem této analýzy je „Backhaul“, což můžeme přeložit jako přípojná část sítě k síti páteřní. Výše uvedené rozdělení se obvykle rozšiřuje o tuto přípojnou úroveň a dále dělí do podúrovní takto:

- Páteřní (Backbone, Core)
 - Tranzitní (např. mezinárodní, na národní úrovni zahrnuje největší města, např. krajská)
 - Regionální (např. úroveň okresních měst)
- Přípojná (Backhaul, např. připojení místních uzlů, RSU, DSLAM, BTS makrobuněk)
- Přístupová (radiová část mobilních či FWA sítí), případně dále dělená na
 - Primární (typicky optická sekce fixní přístupové sítě, např. připojení vysunutých DSLAM, BTS mikrobuněk)
 - Sekundární (typicky metalická sekce fixní přístupové sítě)

Nadále v textu budeme používat originální označení „backhaul“ bez skloňování, protože neexistuje výstižný český ekvivalent a také z toho důvodu, aby byl na první pohled jasný vztah k předmětu analýzy. Dále budeme používat obecné označení „základnová stanice“ bez rozlišení, které generaci mobilní sítě náleží.

Výše uvedená hierarchie souvisí úzce s úrovněmi klasické telefonní/ISDN sítě. Další typy sítě, včetně sítě mobilní základní hierarchické úrovně více či méně kopírují.



Obr. 1 – Struktura klasické telefonní/ISDN sítě.

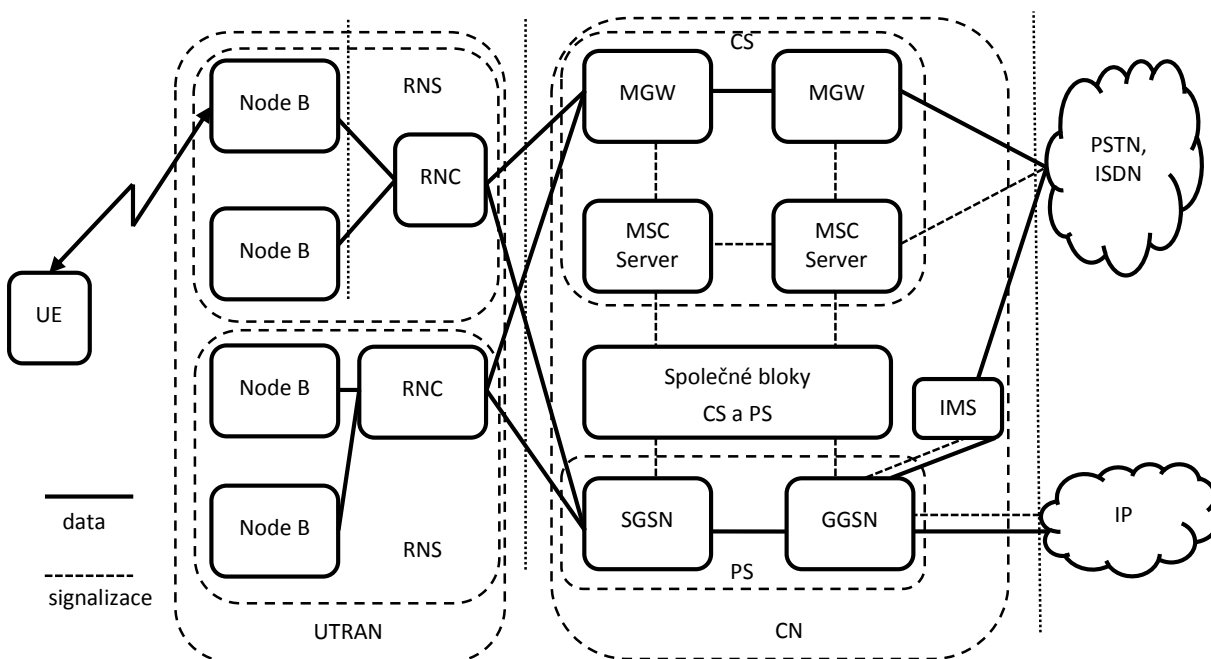
Předmětem analýzy je backhaul mobilní sítě. V dnešní době jsou v provozu tyto technologie mobilních sítí:

- **GSM** (*Global System for Mobile Communications*) – standardizovaná technologie pro digitální buňkové mobilní radiotelefonní systémy. Systémy GSM se ve světě používají od roku 1992. GSM se využívá různá frekvenční pásma (900, 1800, 1900 MHz), ale principy, typy rámců a protokoly jsou vždy shodné. GSM umožňuje v základní variantě realizaci datových přenosů o rychlosti 9,6 kbit/s.
 - **GPRS** (*General Packet Radio Service*) – Služba GPRS umožňuje přenos dat v mobilní telekomunikační síti GSM prostřednictvím komutace paketů. Služba GPRS je dostupná všude tam, kde je pokrytí signálem GSM od daného operátora a dovoluje přenášet data teoretickou rychlostí až 171,2 kbit/s.
 - **EDGE** (*Enhanced Data for GSM Evolution*) – Technologie EDGE je rozšířením principu GPRS, je zde použit jiný druh modulace a vylepšeny stávající protokoly. Celkové teoretická přenosová rychlost se zvýšila až na 384 Kbit/s.
- **UMTS** (*Universal Mobile Telecommunications System*) – mobilní telekomunikační systém třetí generace. Teoreticky je možné dosáhnout rychlosti 384 kbit/s s plnou mobilitou (v dopravních prostředcích do 120 km/h) a až 2 Mbit/s s omezenou mobilitou (pohyb chůzí méně než 10 km/h).
 - **HSDPA** (*High-Speed Downlink Packet Access*) – technologie HSDPA je zdokonalením stávající sítě UMTS. Teoreticky dovoluje dosáhnout přenosovou rychlost až

14,4 Mbit/s u terminálu s omezenou mobilitou a 1,8 Mbit/s u terminálu s plnou mobilitou.

- **HSUPA** (*High-Speed Uplink Packet Access*) – zaměřuje se na vysokorychlostní přenos dat ve směru od koncového uživatele. HSUPA umožňuje dosažení teoretické přenosové rychlosti 5,76 Mbit/s.
- **LTE** (3GPP Long Term Evolution) je koncipována jako nástupce technologií GSM/EDGE a UMTS/HSPA. Jedná se o mobilní bezdrátovou technologii čtvrté generace, která je určena pro vysokorychlostní datovou komunikaci v desítkách až stovkách Mbit/s. Nejvyšších přenosových rychlostí se dosahuje technikou diverzitní komunikace MIMO. Postupně dochází i ke konverzi hovorového provozu na Voice over IP (konkrétně na VoLTE).

Strukturu mobilní sítě si ukážeme na příkladu UMTS, která v podstatě kopíruje strukturu GPRS. Odlišností je přejmenování základnové stanice BTS na Node B a kontroléru základnových stanic BSC na RNC. Mobilní systém UMTS je z logického hlediska rozdělen na dvě hlavní části, přístupovou část sítě AN (Access Network) a řídicí část sítě CN (Core Network), někdy též nazývanou jako páteřní síť. Přístupová část sítě zabezpečuje přístup uživatelského terminálu UE (User Equipment) k řídicí části sítě pomocí radiového rozhraní. Hlavním úkolem řídicí části sítě je zajištění spojovacích funkcí, uchování a aktualizace uživatelských informací a zajištění propojení do externích sítí. Základní blokové schéma sítě je uvedeno na *Obr. 2*.



Obr. 2 – Základní zjednodušené blokové schéma sítě UMTS.

Řídicí část sítě je rozdělena z funkčního hlediska na doménu s přepínáním okruhů CS (Circuit Switched) a doménu s přepínáním paketů PS (Packet Switched). Obě domény se částečně překrývají a společně sdílí některé funkční bloky sítě.

Doména s přepínáním okruhů CS obsahuje všechny části jádra sítě, které jsou nezbytné pro přepínání okruhů účastnického provozu a související signalizace. Hlavním prvkem domény CS je ústředna mobilní sítě MSC (Mobile Switching Centre).

Doména s přepínáním paketů PS zahrnuje všechny funkční bloky řídicích částí sítě, které účastníkům poskytují spojení a služby založené na principu přepínání paketů. Specifické prvky domény PS jsou obsluhující GPRS uzel SGSN (Serving GPRS Support Node) a komunikační GPRS uzel GGSN (Gateway GPRS Support Node).

Radiová přístupová síť (UTRAN, Universal Terrestrial Radio Access Network) je tvořena množinou subsystémů rádiových sítí RNS (Radio Network Subsystem). RNS je část sítě, kterou spravuje jedna radiová řídicí jednotka RNC (Radio Network Controller), ke které je připojeno několik základnových stanic označovaných jako Node B. RNC je zodpovědné např. za přidělování rádiových prostředků, šifrování, řízení handoveru nebo vysílaného výkonu. Základnová stanice Node B realizuje přenos dat mezi přístupovou částí sítě a uživatelským terminálem. Pro svoji funkci využívá radiové přijímače, vysílače a anténní systém. Mezi hlavní funkce základnové stanice patří např. modulace a demodulace, vysílání a příjem nebo kódování fyzických kanálů.

Od UMTS verze 5 při implementaci HSDPA a později HSUPA dochází k přesunu některých funkcí z RNC do Node B. Ta přebírá zodpovědnost např. za plánování přenosu nebo funkce týkající se opakovaného přenosu paketů. K plné integraci funkcí RNC do Node B pak dochází v souvislosti s přechodem na LTE. Takto změněná základnová stanice se označuje jako eNode B. Plným přechodem na VoLTE dále zanikne celá okruhově přepínaná část sítě.

4 Popis technologií

Následující přehled uvádí popis technologií, které jsou dle našeho názoru využitelné a v perspektivě 6 let perspektivně k napojení základnových stanic k páteří sítě.

S různou mírou významnosti lze využít podle potřeby všechna tři základní přenosová média v uvedených modifikacích:

- Optické prostředí:
 - optické vlákno (jednovidová vlákna - SM) - nejperspektivnější způsob připojení;
 - optické směrové spoje využívající volného prostoru (FSO) – využitelné jen na krátké vzdálenosti, nízká spolehlivost.
- Metalické vedení:
 - symetrické páry v místních úložných nebo samonosných kabelech – v omezené míře je využitelná technologie VDSL2 pro připojování základnových stanic v městské zástavbě;
 - nesymetrické páry – koaxiální kabely – v omezené míře je využitelná technologie kabelových modemů DOCSIS 3 pro připojování základnových stanic v městské zástavbě.
- Radiové prostředí:
 - radioreléové směrové spoje bod-bod – v současné době nejrozšířenější způsob připojení základnových stanic;
 - distribuční a přístupové systémy (FWA) bod-mnoho bodů.

4.1 Připojení optickými vlákny

Pro řešení komunikace mezi jednotlivými částmi mobilní sítě (mimo radiové rozhraní k účastníkovi) je možné využít následující přenosové technologie a systémy:

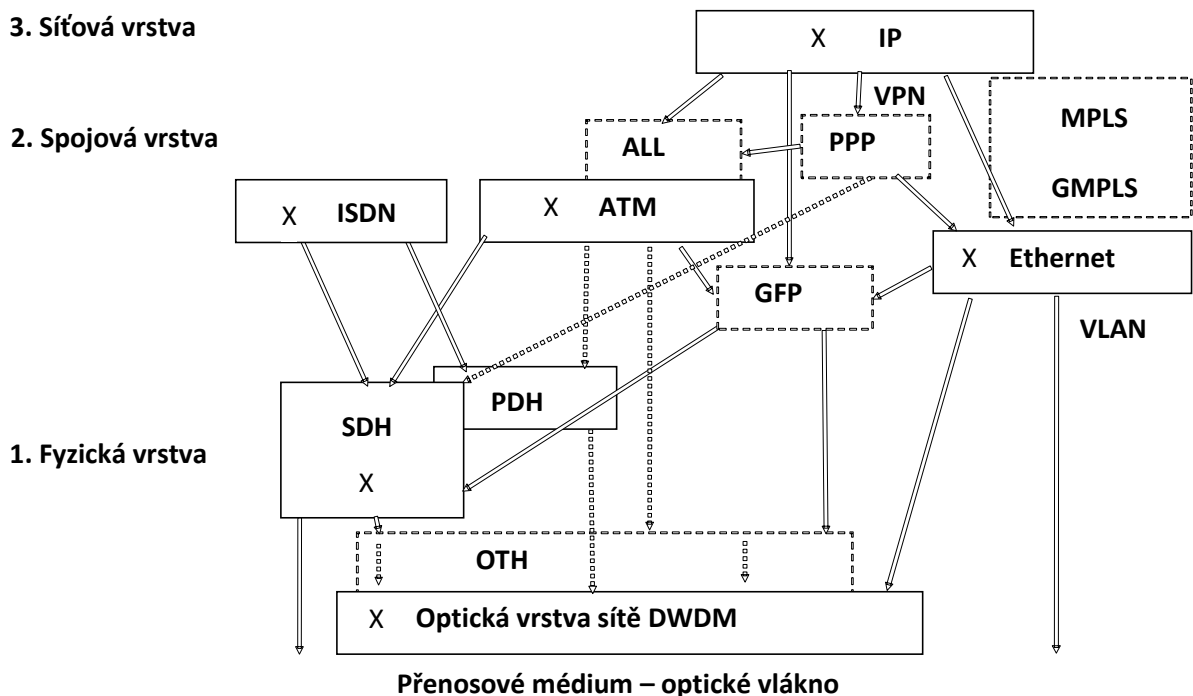
- **PCM 30/32** – rozhraní E1 dle ITU-T G.703 – digitální signál původně pro telefonní přenos s rychlostí 2,048 Mbit/s. Všechny přenášené signály jsou multiplexováním sdruženy do jednoho rámce dle ITU-T G.704. V mobilní síti používáno zejména pro okruhově přepínanou část sítě.
- **SDH** (*Synchronous Digital Hierarchy*) dle ITU-T G.707 – přenos po optických vláknech synchronními transportní moduly STM-N, kde N vyjadřuje hierarchický stupeň od STM-1 (155,52 Mbit/s) do STM-256 (39 813,12 Mbit/s). Pro různé příspěvkové signály jsou určeny

různé typy virtuálních kontejnerů. Do nich lze ukládat a přenášet jimi PCM, PDH toky, ATM buňky, IP pakety, Ethernet rámce. Typická technologie páteřní sítě vhodná pro kombinovaný okruhový a paketový provoz.

- **Ethernet** – dnes nejčastěji nasazovaná technologie pochází z prostřední místních sítí LAN, je specifikována standardy IEEE 802.3. Na fyzické vrstvě je možné použít jak metalické, tak optické vedení a tím dosahovat široké škály přenosových rychlostí od 10 Mbit/s až do 100 Gbit/s. Ethernet reprezentuje první a druhou vrstvu komunikačního modelu RM OSI.
- **Rodina protokolů TCP/IP** – (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) navazuje na Ethernet a zajišťuje komunikaci napříč celou rozlehlou sítí. Propojení na třetí vrstvě RM OSI je založené na protokolu IP (verze 4 (IPv4) nebo 6 (IPv6)), který je doplněn o protokoly TCP a UDP nacházející se na vrstvě čtvrté. Směrování dat lze provádět pomocí některého z dynamických směrovacích protokolů, které jsou schopny provádět i tzv. *Load Balancing*, a tím optimálně vyvažovat provozní zatížení sítě. IP protokol podporuje mechanismy všesměrového (*Broadcast*) a vícesměrového (*Multicast*) vysílání, které jsou využitelné například pro rozesílání hromadných příkazů a nastavení. Transportní protokol TCP (*Transmission Control Protocol*) je spojově orientovaný protokol pro přenos toků se spolehlivým doručováním. Transportní protokol UDP (*User Datagram Protocol*) je orientován na zaslání zpráv, které nevyžadují zpětné potvrzení o doručení. Jedná se o dominantní protokoly, které jednotně řeší po přechodu na VoLTE veškeré komunikační požadavky v mobilní síti.
- **E1 over IP** – též *TDM over IP*, způsob přenosu klasických okruhů 2 Mbit/s přes paketovou síť. Užívá se způsob převzatý z ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) s adaptační vrstvou AAL1, která byla zavedena pro přenos v reálném čase s konstantní přenosovou rychlostí. Vytváří se informační pole buňky s délkou 48 bajtů. Zapouzdření SAToP (*Structure-Agnostic Time Division Multiplexing over Packet*) umožňuje přenos nerámcovaných toků E1 (ITU-T Y.1413, IETF RFC 4553). Zapouzdření rámcovaných toků E1, jednotlivých kanálových intervalů či jejich skupin, se označuje CESoPSN (*Circuit Emulation Service over Packet Switched Network*). Tento způsob přenosu je vhodný pro dožívající část okruhově orientované sítě, pokud se z technologie SDH v páteřní síti přejde na Ethernet.
- **MPLS/IP** (*Multiprotocol Label Switching/Internet Protocol*) je hybridní technologie, která nahrazuje směrování na síťové vrstvě tzv. přepínáním podle návěstí (značek). Tento způsob přepínání umožňuje zrychlit přenos mezi koncovými uzly tím, že síťová adresa se identifikuje pouze na hranicích sítě MPLS a uvnitř této sítě se datové jednotky přepínají pouze na základě návěstí. Síť MPLS využívá celou řadu podpůrných protokolů a mechanismů pro směrování, zajištění QoS a realizaci virtuálních privátních sítí VPN.
- **MPLS/TP** (*Multiprotocol Label Switching/Transport Profile*). Není zcela novou technologií, ale spíše zjednodušením současné technologie MPLS/IP tak, aby bylo možné spolehlivě poskytovat transportní datové služby podobně jako u technologie SDH. MPLS/TP se vyznačuje rozšířenými možnostmi zálohování a centrální politikou směrování dat v síti. Další předností je integrovaný mechanismus monitorování kvality přenosu. Na rozdíl od MPLS/IP se cesta v síti a přepínání podle značek nekonfiguruje pomocí relativně komplexního systému vzájemně provázaných dynamických protokolů (např. BGP, LDP, OSPF), ale je zde centrální správa, pomocí níž se konfigurace provádí. Odstraní se tím provázanost protokolů, zmenší se složitost, a tím se potenciálně zvýší i spolehlivost takto realizované sítě.
- **WDM** (*Wavelength Division Multiplexing*) – vlnový multiplex představuje v optických sítích technologii, kterou se při přenosu sdružuje více optických signálů v jednom optickém vlákne s použitím rozdílných vlnových délek (barev) laserů. Je tak umožněno rozšířit kapacitu média nebo provést obousměrnou komunikaci na jednom optickém vlákne. Optické vydělovací muldexy OADM (*Optical Add-Drop Multiplexor*) umožňují realizovat síť s kruhovou topologií s velmi rychlým ochranným přepínáním (zálohováním) na úrovni vlnových délek (na fyzické vrstvě).

- **DWDM** (*Dense WDM*) – hustý vlnový multiplex, používá se hlavně na dálkových optických trasách. Pro použití v metropolitních sítích je vhodné omezit technologii DWDM pouze na využití C pásma (*C_band*) v oblasti 1530 až 1565 nm (optické kanály definované dle ITU-T G.692), kdy existují vhodné cenově dostupné komponenty (výměnné transceivery DWDM v provedení SFP (*Small Form Factor Pluggable*), XFP a Xenpak a EDFA zesilovače pro C pásmo). Zapouzdření Ethernetu 1G, 10G, 40G a dalších formátů pro přenos DWDM je standardizováno dle ITU-T G.709 – optická hierarchie **OTH** (*Optical Transport Hierarchy*).
- **CWDM** (*Coarse WDM*) – hrubý vlnový multiplex – 20 nm kanálové rozteče při použití vlnových délek mezi 1270 nm a 1610 nm (ITU-T G.694.2). Širší kanál 20 nm může využívat teplotně nestabilizovaný laser DFB (*Distributed Feedback Laser*) a z tohoto důvodu jsou tyto systémy levnější než multiplexy s hustým dělením (DWDM).

Obrázek 3 představuje vazby mezi důležitými technologickými celky a jejich pozice na vrstvách komunikačního modelu. Ukazuje, v jakých základních i kombinovaných formátech lze přenášet data po optických vláknech.



Obr. 3 – Přehled možných kombinací technologií pro přenos optickými vlákny.

4.1.1 Využití klasických telekomunikačních technologií

Výše zmíněná technologie SDH umožňuje kombinovaný okruhově orientovaný (TDM) a paketový (Ethernet/IP) provoz pomocí níže uvedených hierarchických stupňů, které jsou dány do vztahu z americkou verzí standardu SONET.

Typický dosah optických rozhraní přenosových systémů se dělí podle aplikace a použité vlnové délky typicky takto (ve všech aplikacích předpokládáme použití jednovidových optických vláken – SM):

- I – Intra-office do 2 km (1310 nm)
- S – Short-haul do 15 km (1310 nm), do 30 km (1550 nm)
- L – Long-haul do 40 km (1310 nm), 80 km (1550 nm)
- V – Very long-haul do 120 km (1550 nm)
- U – Ultra long-haul do 160 km (1550 nm)

Tab. 1: Hierarchické stupně SDH ve srovnání se stupni SONET

SONET		SDH	Mbit/s
STS-1	OC-1	STM-0	51.84
STS-3	OC-3	STM-1	155.52
STS-12	OC-12	STM-4	622.08
STS-48	OC-48	STM-16	2488.32
STS-192	OC-192	STM-64	9953.28
STS-768	OC-768	STM-256	39045.12

Protože se pro různé typy rozhraní (SDH, OTH, Ethernet) dané přenosové rychlosti používají univerzální SFP (XSFP) moduly, jsou obdobné dosahy možné i pro ostatní technologie dostupné na optických vláknech. Potřebný dosah (obecněji překlenutelný útlum) se dosahuje volbou a osazením výměnného SFP modulu. Pomocí volby vlnové délky SFP modulů lze zajistit i kompatibilitu libovolného rozhraní s DWDM nebo CWDM multiplexem.

Vzhledem k tomu, že technologie SDH je v páteřních sítích na ústupu, předpokládáme, že i v úrovni backhaul, pokud je využívána pro mobilní sítě 2 a 3G bude nahrazována při upgrade na LTE technologií Ethernet, nepovažujeme ji tedy do budoucna za perspektivní pro řešení mobilního backhaul.

Další technologií, která navázala na SDH je optická hierarchie OTH, která využívá techniky vlnového multiplexu DWDM a dokáže kombinovat jak okruhově orientovaný provoz z SDH sítí, tak paketově orientovaný provoz Ethernetu.

Tab. 2: Stupně optické hierarchie s vlnovým multiplexováním (n je počet vlnových délek)

Hierarchický stupeň	Přenosová rychlost	Může přenášet
OTM-n.1	n x 2,5 Gbit/s	n x STM-16
OTM-n.2	n x 10 Gbit/s	n x (STM-64 + 10GE)
OTM-n.3	n x 40 Gbit/s	n x STM-256
OTM-n.3	n x 100 Gbit/s	n x 100GE

Vzhledem k extrémním přenosovým rychlostem (celkově řádově desítky až jednotky či do budoucna desítky Tbit/s) je technologie OTH vhodná pro páteřní síť, nikoli pro backhaul.

4.1.2 Optický Ethernet

Přirozenou fyzickou a spojovou vrstvou v komunikačním modelu TCP/IP je Ethernet. Jeho použití a posléze dominantní postavení ve všech úrovních sítí včetně páteřní zajistila široká škála rozhraní na optických vláknech. Vybrané typy rozhraní uvádí tabulka 3.

Tab. 3: Vybrané standardy ze skupiny IEEE 802.3.

Standard (rok)	Médium	Označení varianty	Poznámka
802.3ae (2002)	Optické vlákno	10GBASE-SR	Limit 400 metrů, MM vlákno, 850 nm
		10GBASE-LR	Limit 10 km, SM vlákno, 1310 nm
		10GBASE-ER	Limit 40 km, SM vlákno, 1550 nm
802.3ah (2004)	Optické vlákno	100BASE-LX10	P2P varianta, 2 SM vlákna na 10 km
		100BASE-BX10	P2P varianta, 1 SM vlákno na 10 km
		1000BASE-LX10	P2P varianta, 2 SM vlákna na 10 km
		1000BASE-BX10	P2P varianta, 1 SM vlákno na 10 km
		1000BASE-PX10	P2MP varianta, EPON typ 1 na 10 km
		1000BASE-BX10	P2MP varianta, EPON typ 2 na 20 km
802.3aq (2006)	Optické vlákno	10GBASE-LRM	Limit 220 metrů, MM vlákno, 1310 nm
802.3av (2009)	Optické vlákno	10GEAPON-PRX10/PR10	P2MP varianta, nástupce EPON
		10GEAPON-PRX20/PR20	
		10GEAPON-PRX30/PR30	
802.3ba (2010)	Optické vlákno	40GBASE-SR4	Limit 100 metrů, svazek OM3 vláken, 850 nm
		100GBASE-SR10	Limit 125 metrů, svazek OM4 vláken, 850 nm
		40GBASE-LR4	Limit 10 km, SM vlákno, 4 vlnové délky v okolí 1310 nm
		100GBASE-LR4	
		100GBASE-ER4	Limit 40 km, SM vlákno, 4 vlnové délky v okolí 1310 nm

Vysvětlivky: SM (Single-Mode Fiber) – jednořivkové optické vlákno, MM (Multi-Mode Fiber) – mnohářivkové optické vlákno.

Pro využití pro mobilní backhaul vyhovují rychlosti rozhraní 1 Gbit/s, do budoucna až 10 Gbit/s na vzdálenost typicky desítky km. Větší význam mají spoje bod-bod, ve městech lze však využít s výhodou i mnohobodovou síť PON.

Vícenásobné využití optických vláken pro mobilní backhaul je možné pomocí hrubého vlnového multiplexu (CWDM) s pasivními filtry.

Připojení základnových stanic v sítích 2 a 3G využívá k synchronizaci TDM toku E1. S přechodem na plně paketový provoz je nutné zavést možnost synchronizace z toků Ethernet. Za tímto účelem byl standardizován tzv. synchronní Ethernet (SyncE).

Synchronní Ethernet má vedle přísnější tolerance taktu na fyzickém rozhraní - 4,6 ppm - stanoveny také limity fázového chvění jitteru a wanderu podobně jako je tomu u rozhraní E1 nebo rozhraní sítě SDH. U synchronního Ethernetu se takt vyděluje z bitového toku na rozhraní a přivádí se do synchronizačních obvodů prvku - EEC (Ethernet Equipment Clock). Synchronizační zprávy pro podporu rozvodu taktu se zasílají v OAM (Operation and Maintenance) rámcích. Generátory taktu EEC specifikuje doporučení ITU-T G.8262 a synchronizační zprávy specifikuje doporučení ITU-T G.8264.

Pro výstavbu sítí synchronního Ethernetu je nutno použít speciální síťové prvky, případně lze určité části sítě řešit alternativně pomocí distribuce časové synchronizace pomocí protokolu PTP (Precision Time Protocol), který ovšem nedosahuje takové kvality synchronizace.

4.1.3 Nenasvícené vlákno

Ve specifických případech jsou pro mobilní backhaul využitelná v posledním úseku i tzv. nenasvícená vlákna.

Nenasvícené vlákno (taky označované Dark Fibre) je typ služby, kdy poskytovatel nabízí spojení optickým vláknem neosazeným přenosovou technologií. Osazení přenosovou technologií je pak věcí

zákazníka. Tento trh se ve světě rozvinul přibližně před 15 lety, kdy bylo vystavěno velké množství optických sítí, jejichž kapacitu nebylo možno plně komerčně využít.

Až do poloviny minulého desetiletí náklady spojené s výstavbou optických sítí, činily službu nenasvíceného vlákna tuto službu prakticky komerčně nedostupnou. Změna byla ovlivněna několika faktory:

- rozšiřování nenasvíceného vlákna vedlo provozovatele ke snížení ceny – bylo pro ně lepší vlákna pronajmout, než je držet nevyužita;
- v důsledku vývoje na trhu dochází ke zkracování IRU (Indefeasible Rights of Use – nezadatelné právo na užívání) z dřívějších 10 – 15 let se nyní na přijatelnou dobu okolo tří let;
- klesající cena technologie nasvícení vláken, které se začíná přibližovat cenám koncových zařízení pro standardní službu pronájmu okruhů.

Hlavní výhodou služby nenasvíceného vlákna je její flexibilita a škálovatelnost. Je možno poměrně snadno skokově zvyšovat přenosové rychlosti od 1 Gbit/s do $n \times 10$ Gbit/s – náklady na související zařízení nejsou zásadní. Další výhodou je, že pokud se objeví potřeby radikálního navýšení kapacity, lze jednoduše nasvítit nové vlnové délky. Služba nenasvíceného vlákna přináší velkou technologickou nezávislost, kteří mohou kdykoli změnit své služby prakticky bez omezení.

Ekonomická efektivita – obecně se má za to, že nenasvícené vlákno začíná být ekonomicky zajímavé od přenosových rychlostí vyšších než 100 Mbit /s, velmi zajímavé pro přenosové rychlosti v jednotkách Gbit/s a vynikající pro přenosové rychlosti vyšší než 10 Gbit/s

Geografická omezení – služba nenasvíceného vlákna pro mobilní backhaul je použitelná (zpravidla) ve velkých aglomeracích, kde jsou k dispozici sítě nenasvícených vláken a to zejména v případech, kdy jsou základnové stanice umístěny na budovách, do kterých jsou nenasvícené vlákna zavedena (datová centra apod.).

Služba nenasvíceného vlákna je obtížně dostupná (prakticky nerealizovatelná) všude tam, kde je třeba provést jednoúčelovou liniovou stavbu jenom pro připojení základnové stanice a to z jednak důvodu vysoké ceny (položít účelové vlákno a to z důvodů vysokých nákladů (jednotková cena položení HDPE chráničky je v rozmezí 400 – 800 Kč / 1 m) a především pak z důvodů administrativní náročnosti spojené s povolením liniové trasy. Tatáž úvaha platí i pro připojení jednoúčelovým „nasvíceným“ vláknem (viz předchozí odstavce).

4.2 Metalické vedení

V omezené míře jsou pro mobilní backhaul využitelné v posledním úseku i metalická vedení. Jde typicky o využití existujících přístupových sítí pro připojení základnových stanic ve městech. Vybíráme ty technologie, které jsou výší přenosové rychlosti potenciálně použitelné pro vyšší generace mobilních sítí (LTE):

- xDSL (*Digital Subscriber Line*) – hlavním úkolem přípojek xDSL je efektivnější využití potenciálu již nainstalovaných metalických symetrických vedení. Tyto symetrické páry jsou v dnešní době obvykle instalovány v metalických přístupových sítích telekomunikačních operátorů nebo například i v rozlehlých podnikových areálech.
 - **VDSL2** (*Very high Speed Digital Subscriber Line*) – dovoluje dosažení ještě vyšších přenosových rychlostí v řádech desítek až stovek Mbit/s. VDSL2 (doporučení ITU-T G.993.2) pracuje s kmitočtovým pásmem do 12, 18 nebo 30 MHz na vzdálenost typicky stovky m až 1,6 km. Při použití potlačování přeslechů (tzv. Vectoring) se očekává dosažení přenosové rychlosti 100 Mbit/s na vzdálenost cca 800 m.
 - **G.fast** – přípojka s rychlostí až řádově Gbit/s dle doporučení ITU-T G.9701 využívá pásmo až do cca 100, 200 nebo 300 MHz a může být použita na vzdálenosti desítek

až několik stovek metrů (rozvody uvnitř budov a menších areálů) v architektuře FTTP (Fiber To The distribution point).

- **CATV** – sítě kabelové televize realizované koaxiálním kabelem nebo jeho kombinací s optickými vlákny využívané k přístupu domácností k Internetu. K tomu slouží tzv. kabelové modemy pracující v topologii bod-mnoho bodů. Dosahované přenosové rychlosti jsou řádu desítek až stovek Mbit/s. Standard DOCSIS 3 umožní dosáhnout sdílenou kapacitu kolem 400 Mbit/s downstream. Potenciálně jsou tyto sítě využitelné k připojení základnových stanic na střeších panelových domů, podobně jako přípojky VDSL2.

4.3 Bezdrátové sítě

Přirozeným způsobem, jak připojovat základnové stanice k páteřní síti, je využít také radiového přenosu, obdobně jako v přístupové části mobilní sítě. To není problém u sítí nižších generací, kde jsou relativně nízké požadavky na přenosovou kapacitu. S narůstajícími požadavky vyšších generací mobilních sítí budou postupně přestávat radiové prostředky pro backhaul postačovat.

4.3.1 Dělení bezdrátových sítí

Základní typy bezdrátových technologií, potenciálně využitelných pro připojení základnových stanic jsou následující:

- Radioreléové (RR) nebo též směrové spoje umožňují bezdrátový přenos mezi dvěma body. Slouží jako ekonomicky výhodná alternativa k metalickému nebo optickému kabelovému vedení. Používají se jako propojení mezi základnovými stanicemi mobilních sítí nebo pro infrastrukturu privátních podnikových sítí. Topologie je bod–bod. Kmitočtová pásma jednotky až desítky GHz, překlenutelné vzdálenosti jednotky až desítky km a přenosové rychlosti jednotky až stovky Mbit/s.
- WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) – IEEE 802.16d (pevná služba WiMAX) a IEEE 802.16e (pohyblivá služba). Technologie WiMAX je určena pro bezdrátový, širokopásmový datový přístup domácností i firem k síti. Klade důraz zejména na podporu kvality služeb QoS (Quality of Service) a možnost řízení a správy sítě. Technologie WiMAX umožňuje přenos dat při přímé viditelnosti v oblastech s nízkým rušením až na vzdálenost přibližně 50 km. Maximální dosažitelná přenosová rychlost na fyzické vrstvě pro komunikaci na přímou viditelnost je 268 Mbit/s. Komunikace bez přímé viditelnosti mezi vysílající a přijímající stanicí je možná až na vzdálenost přibližně 5 km a maximální přenosovou rychlostí 75 Mbit/s. Technologie je potenciálně využitelná k připojení mikrobuněk mobilní sítě v hustěji zastavěných oblastech.
- FWA (Fixed Wireless Access) – též nazývaná jako „Wireless Local Loop“, je obecné označení bezdrátové sítě poskytující širokopásmové propojení typu bod-mnoho bodů, nebo i bod–bod. FWA je typem (druhem) sítě, nikoli konkrétní technologií, která tento typ sítě realizuje.

Obecné hledisko dělení bezdrátových sítí je rozlišení podle typu pásma na:

- Nelicencovaná pásma (přesněji pásma s všeobecnou licencí) – nevyžadují poplatek za využití spektra, existuje však nebezpečí rušení interferencemi od jiných systémů provozovaných v tomtéž pásmu
- Licencovaná pásma

Klíčový význam pro realizaci mobilního backhaul mají radioreleové spoje. Podle šířky pásma (kanálu) a dosažitelné přenosové rychlosti je můžeme rozdělit do těchto skupin:

- Úzkopásmové – rychlosti $n \times 2$ Mbit/s (pro n od 1 do typicky 16) – typické pro realizaci backhaul sítí 2G a 2,5G
- Středněpásmové – rychlosti typicky kolem 50 až 100 Mbit/s (Ethernet), příp. 155 Mbit/s (STM-1)
- Širokopásmové – rychlosti nad cca 155 Mbit/s až do 1 Gbit/s – potenciálně vhodné pro mobilní backhaul sítě LTE

Radioreleové spoje používají směrovou parabolickou anténu s vysokým ziskem. Vedle kmitočtového oddělení sousedních kanálů se používá také oddělení polarizací vlny - horizontální (H) / vertikální (V), což vede k možnosti až dvojnásobné kapacity spoje. Pro větší míru oddělení je ovšem nutné použít obvody potlačující interference vyvolané křížovou polarizací XPIC (Cross Polarization Interference Canceller).

4.3.2 Bilance radioreleového spoje

Pro realizaci radioreleových spojů je důležité znát a definovat **útlumové poměry**. Útlum vzniká na napájecí antény a zejména při šíření elektromagnetické vlny prostorem. Útlum můžeme částečně eliminovat směrovými anténami s vysokým ziskem. Výkonová bilance radioreleového spoje je popsána následující rovnicí:

$$L_{mT} - L_{mRO} = A_T - G_R + A_o + A_R - G_R + A_{rez} \quad [\text{dBm, dBm; dB, dB, dB, dB, dB, dB}]$$

L_{mT} – výkonová úroveň na výstupu vysílače

L_{mRO} – citlivost přijímače pro určitou hraniční chybovost (mezní hodnota SNR)

Pozn.: Absolutní úrovně výkonu se zde často udávají vtažené k výkonu 1 W jednotkou dBW, kdy platí přepočít 0 dBW = 30 dBm.

A_T – útlum napájecí vysílače (typicky 3 až 9 dB/100 m)

G_T – zisk vysílací antény (typicky 24 až 44 dB)

A_o – útlum šíření elektromagnetické vlny ve volném prostoru za dobrých atmosférických podmínek

A_R – útlum napájecí přijímače (typicky 3 až 9 dB/100 m)

G_R – zisk přijímací antény (typicky 24 až 44 dB)

A_{rez} – rezerva spoje zahrnující rezervu na úniky (FD - Fade Margin)

Pravá strana rovnice představuje celkový útlum radiové cesty, který je nutno překlenout při určité úrovni radiového signálu a s určitou citlivostí přijímače, která odpovídá určité požadované maximální bitové chybovosti BER (obvykle se požadují hodnoty 10^{-10} až 10^{-6}) při požadovaném typu modulace (počet stavů M-QAM).

Zisk parabolických antén se vyjadřuje vzhledem k bodovému zářiči pomocí vztahu

$$G = 10 \log \frac{4\pi}{\lambda^2} S = 10 \log \frac{4\pi f^2}{c_0^2} S \quad [\text{dB}]$$

c_0 je rychlost šíření elektromagnetické vlny cca $3 \cdot 10^8$ m/s a S je efektivní plocha antény.

$$S = \eta \frac{\pi D^2}{4} \quad [\text{m}^2]$$

kde η je účinnost antény (0,6 až 0,8) a D je průměr antény.

Útlum šíření elektromagnetické vlny v prostoru vychází z vyčíslení poměrného výkonu, který získáme na parabolické anténě o průměru S vzhledem k ploše kulové plochy $4\pi d^2$ o poloměru odpovídajícímu vzdálenosti d antény od bodového zářiče:

$$A_0 = 10 \log \left(\frac{4\pi \cdot d}{\lambda} \right)^2 = 20 \log \frac{4\pi \cdot d \cdot f}{c_0} \quad [\text{dB}; \text{m}, \text{m}; \text{m}, \text{Hz}, \text{m/s}]$$

d – délka spoje – vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem

Po vyčíslení vychází přibližně

$$A_0 = 32,4 + 20 \cdot \log(f \cdot d) \quad [\text{dB}; \text{MHz}, \text{km}]$$

Zásadní význam pro spolehlivý přenos má eliminace úniků, pro které vytváříme rezervu. Jejich velikost (tzv. hloubka úniku), doba trvání a četnost jsou statistické veličiny a závisí na použitých frekv. pásmech, klimatických faktorech, geografických poměrech, terénním profilu, srážkové činnosti.

4.3.3 Vývoj v oblasti radioreleových spojů

V oblasti radioreleových spojů lze zaznamenat tyto trendy:

- rozšiřování frekvenčního kanálu směrem k šířkám 56 MHz, 112 MHz;
- optimalizace kanálového kódování směrem k většímu kódovému zisku;
- zvyšování počtu stavů modulace až na 1024-QAM.

Lze tak dosáhnout přenosových rychlostí 224 Mbit/s až téměř 900 Mbit/s a vzdáleností 12 až 20 km podle kmitočtového pásma a rozměru antény (typicky 0,6 až 1,2 m; uvažovaná vysílací úroveň 20 dBm). Dosažení těchto parametrů je na jedné straně podmíněno možností využít dostatečně širokého kanálu, na druhé straně je podmíněno obměnou radioreleových stanic, případně i výměnou antén pro dosažení většího zisku a splnění vyšších nároků na SNR pro mnohastavové modulace.

Tab. 4: Typická ukázka bilance radioreleových spojů

rezerva	12 dB								
pásmo	GHz	7	11	13	15	18	26	38	42
šířka pásma	MHz	40	80	28	28	110	56	56	112
rychlost	Mbit/s	320	640	224	224	880	448	448	896
průměr antény	m	1,2	1,2	0,9	0,9	0,9	0,65	0,65	0,65
zisk antény	dB	37,3	41,3	40,2	41,5	43,0	43,4	46,7	47,6
SNR	dB	34	34	34	34	34	34	34	34
data	bit	10	10	10	10	10	10	10	10
výkon	dBm	20	20	20	20	20	20	20	20
šum	dBm	-84	-81	-86	-86	-80	-83	-83	-80
útlum spoje	dB	133	137	140	142	140	143	150	149
vzdálenost	km	14,7	16,3	18,3	21,2	12,8	13,5	19,8	15,5

Pro kalkulaci byly využity maximální současně přípustné šířky pásma (kanálů) v jednotlivých oblastech kmitočtů, maximálně dnes nabízený počet stavů modulace (1024-QAM a z ní vyplývající požadovaný odstup SNR – odpovídá 10 bitům dat na jeden symbol) a dále typické hodnoty – průměry antén postupně klesající s využitým kmitočtovým pásmem (s kmitočtem roste zisk antény daného průměru). Rezervu spoje uvažujeme 12 dB. Při potřebě větší rezervy na úniky je třeba snížit vzdálenost, zvětšit průměr antény, nebo snížit počet stavů modulace (ovšem na úkor přenosové rychlosti).

Dalším očekávaným trendem u spojů bod-bod je aplikace techniky MIMO (Multiple-input Multiple-output). Pomocí víceprvkového anténního systému, více paralelních tranciverů a adaptivního potlačování interferencí lze dosáhnout typicky dvojnásobné (MIMO 2x2) či čtyřnásobné (MIMO 4x4) přenosové rychlosti oproti klasickým spojům (SISO - Single-input Single-output).

4.3.4 Možnosti rozšíření kanálů

Podmínky využití rádiových kmitočtů jsou stanoveny v příslušné části plánu využití rádiového spektra (<http://www.ctu.cz/predpisy-a-opatreni/plan-vyuziti-radioveho-spektra.html>).

Změny v tomto plánu (pokud nejsou vynuceny např. harmonizačním záměrem EU apod.) mohou být implementovány pouze na základě řádně odůvodněného požadavku, jehož odůvodněnost posuzuje ČTÚ. K jakýmkoliv změnám je nejprve nutné provést veřejnou konzultaci podle § 130 zákona č. 127/2005 Sb., o elektronických komunikacích. Po ukončení veřejné konzultace je ČTÚ povinen obdržené příspěvky vypořádat. Podoba návrhu do veřejné konzultace tak může po vypořádání připomínek doznat změn, a to i takových, že se v krajním případě ustoupí od původního záměru.

Technické parametry pevné radiokomunikační služby odpovídá evropským harmonizovaným kanálovým uspořádáním, v tomto případě podle doporučení CEPT/ERC, jak uvádí tabulka 5.

Dle sdělení odboru správy spektra ČTÚ: Rozšíření šířky kanálu na 112 MHz v případě nižších kmitočtových pásem (pod 15 GHz), se jeví jako problematické, neboť v těchto pásmech dochází oproti pásmům nad hranicí 20 GHz k malé velikosti center gapu (označovaného rovněž jako duplex gap), tj. v reálném využití by docházelo k malé kmitočtové blízkosti přijímače prvního kanálu horního duplexního pásma a vysílače posledního kanálu spodního duplexního pásma, nebo naopak, tj. vysílače prvního kanálu horního duplexního pásma a přijímače posledního kanálu spodního duplexního pásma, na sdíleném stanovišti. Dalším důvodem je např. množství kmitočtového spektra, které je k dispozici. Např., v případě pásma 13 GHz je k dispozici 2 x (2 x 112 MHz), tj. v případě zavedení omezení využití krajních kanálů by implementace postrádala smysl.

V minulosti proběhlo několik neformálních konzultací, jejichž cílem bylo zjistit, jaká je preferovaná šířka kanálu a požadavky na využití šířky kanálu > 56 MHz byly marginální.

Co se týče kmitočtových pásem nad hranicí 20 GHz, případný požadavek na změnu šířky kanálu je nutné řádně zdůvodnit. Požadavek na změnu může přijít kdykoliv, samotná legislativní změna zpravidla trvá minimálně 3-4 měsíce (od zpracování požadavku až po zveřejnění konečné podoby).

Tab. 5: Přehled licencovaných pásem a šířek kanálu pro pevné spoje bod-bod

pásmo	rozsah	šířka kanálu	Doporučení CEPT/ERC/REC
GHz		max. MHz	
6	5925–6425 MHz	29,65	ERC/REC 14-01
7	6425–7125 MHz	40	ERC/REC 14-02
11	10,7–11,7 GHz	80	ERC/REC 12-06
13	12,75–13,25 GHz	28	ERC/REC 12-02
15	14,5–15,35 GHz	28	ERC/REC 12-07E
18	17,7–18,53875 / 18,76–19,5625 GHz	110	ERC/REC 12-03
23	22,0–22,6/23,0–23,6 GHz	28	ERC/REC T/R 13–02
26	24,773–25,445/25,781–26,453 GHz	56	ERC/REC T/R 13–02
32	31,8–33,4 GHz	56	ERC/REC/(01)02
38	37,093–38,178 / 38,353– 39,438 GHz	56	ERC/REC T/R 12–01
42	40,5–43,5 GHz	112	ECC/REC/(01)04

Rozšiřování kanálu a přidávání dalších kmitočtových obecně deklaruje strategie využití radiového spektra, jak demonstruje tabulka 6.

Tab. 6: Hlavní záměry k podpoře pevných bezdrátových spojů dle strategie využití radiového spektra

Pásmo	Záměr	Časový rámec, sekvence (předpoklad)
napříč pásmy	Umožnění zavádění širokých kanálů využívaných vysokorychlostními mikrovlnnými spoji. Úprava podmínek využívání podle aktuálních zkušeností (v první fázi zejm. v pásmu 42 GHz).	Průběžně. Podle provozních zkušeností.
7 GHz	Uvolnění dalších duplexních kmitočtů v pásmu 7 GHz pro pevné mikrovlnné spoje.	Podle zájmu uživatelů – konzultace 2015.
nad 57 GHz	Zpřístupnění pásem pro bezlicenční využití mikrovlnnými spoji, event. systémovými prvky budoucích sítí 5G.	

4.3.5 Navýšení kapacity spojů z pohledu nákladů na realizaci a provoz

Při upgrade sítě na LTE infrastrukturu předpokládáme současné posílení přípojné sítě, tj. zejména radioreleových spojů. Tím, že bude přestavba provedena současně s přestavbou základnové stanice (eNode B) nepředpokládáme s tím spojené významné náklady na instalaci samotného backhaul zařízení. Uvažujeme však zvýšené náklady v těchto směrech:

- Vyšší cena koncových zařízení (transceiverů) z důvodu vyšší přenosové kapacity, která se docílí jedním nebo pomocí více z těchto způsobů:
 - Vyšší šířka kanálu
 - Více stavů modulace
 - Přenos dvojí polarizací se systémem XPIC
 - Přenos více paralelními cestami MIMO
- Vyšší cena antén z důvodů nutnosti navýšit jejich rozměr pro získání vyššího zisku pro modulace s vyšším počtem stavů
- Vyšší poplatky za větší šířky kanálu, případně za příplatek při přenosu s dvojí polarizací

Navýšení ceny je patrné z tabulek 7 a 8 pro typické spoje.

Tab. 7: Nárůst ceny spoje s nárůstem přenosové rychlosti

rychlost	cena za pár (spoj)	
Mbit/s	tis. Kč	pozn.
25	65	
100	90	
400	120	
800	250	XPIC

Tab. 8: Nárůst ceny spoje při zvětšování rozměru antén

průměr antény	cena	
m	tis. Kč	pozn.
0,3	8	základní cena za pár
0,65	4	navýšení na pár
0,9	12	navýšení na pár
1,2	24	navýšení na pár

Potenciální navýšení poplatků za licence spojené s provozováním spojů (dle nařízení vlády č. 175/2012) je patrné ze vztahu:

$$C = S3 \times K7 \times K8 \times K9 \times K10 \times K15 \quad [\text{Cena v Kč za rok provozování}]$$

Legenda:

S3 Sazba za jeden rádiový kmitočet podle druhu radioreléového spoje

a) Radioreléový spoj bod-bod 10 000 Kč

K7 Koeficient zabrané šířky kmitočtového pásma:

K7 = 0,5 při zabrané šířce pásma do 5 MHz

K7 = 1 při zabrané šířce pásma od 5 do 10 MHz

K7 = 2 při zabrané šířce pásma od 10 do 20 MHz

K7 = 3 při zabrané šířce pásma od 20 do 30 MHz

K7 = 5 při zabrané šířce pásma od 30 do 60 MHz

K7 = 8 při zabrané šířce pásma nad 60 MHz

K8 Koeficient kmitočtového pásma:

K8 = 0,10 pro $f \leq 1$ GHz

K8 = 1,00 pro $1 \text{ GHz} < f \leq 3 \text{ GHz}$

K8 = 0,80 pro $3 \text{ GHz} < f \leq 16 \text{ GHz}$

K8 = 0,60 pro $16 \text{ GHz} < f \leq 24 \text{ GHz}$

K8 = 0,50 pro $24 \text{ GHz} < f \leq 35 \text{ GHz}$

K8 = 0,40 pro $35 \text{ GHz} < f \leq 47 \text{ GHz}$

K8 = 0,25 pro $f > 47 \text{ GHz}$

K9 Koeficient výstupního výkonu Q použitého zařízení:

K9 = 0,25 $Q \leq 0 \text{ dBm}$

K9 = 0,40 $0 \text{ dBm} < Q \leq 10 \text{ dBm}$

K9 = 0,60 $10 \text{ dBm} < Q \leq 20 \text{ dBm}$

K9 = 0,80 $20 \text{ dBm} < Q \leq 30 \text{ dBm}$

K9 = 1,00 $30 \text{ dBm} < Q \leq 40 \text{ dBm}$

K9 = 1,50 $Q > 40 \text{ dBm}$

K10 Koeficient řízení výstupního výkonu použitého rádiového zařízení:

K10 = 0,80 systém řízení výstupního výkonu použit

K10 = 1,00 systém řízení výstupního výkonu nepoužit

K15 Koeficient křížové polarizace

K15 = 1,25

Z výpočtu je patrné, že při rozšíření kanálu (pro jinak stejné pásmo a vysílací výkon) typicky ze 14 na 56 MHz dojde k navýšení poplatku $\times 5/2$, z 28 na 56 MHz $\times 5/3$, z 28 na 112 MHz $\times 8/3$ apod. O 25% naroste cena při využití dvojí polarizace vlny (H+V). Cena naroste i v případě navýšení vysílacího výkonu, např. z důvodů dosažení vyššího SNR pro vícecestavovou modulaci.

Posílení mobilního backhaul v souvislosti s budováním LTE a nárůstem datového provozu je nutným investičním krokem. Až na výjimky spojené s možností využití pevných technologií, typicky v synergii s budováním NGA, je však stále cena za radioreléové spoje podstatně nižší než budování optických tras k základnovým stanicím. **Vzhledem k možnostem aktuálních technologií a šířkám kanálů licencovaných pásem mohou dle našeho názoru radioreléové spoje pokrýt v horizontu 6 let nárůst přenosové kapacity mobilního backhaul.** Předpokládáme přitom existenci páteřní optické sítě minimálně na úrovni lokalit BSC/RCN mobilní sítě 2/3G, typicky na úrovni okresních měst, spíše však na úrovni RSU - Remote Subscriber Unit klasické pevné digitální telefonní/ISDN sítě.

5 Výběr technologií s ohledem na rozvoj mobilních služeb

5.1 Struktura přípojné sítě

Pro infrastrukturu základnových stanic můžeme provést základní rozdělení podle typu oblasti:

- A. Centra velkých měst (aglomerace)
- B. Města a jejich okolí (města)
- C. Vesnice a rozptýlená zástavba (venkov)

Speciální kategorii pak tvoří pokrytí dálnic, rychlostních silnic a železničních koridorů. V závislosti na typu oblasti pak bude různá velikost buněk – potažmo vzdálenost základnových stanic (určující pro typickou velikost skoku při jejich zasíťování – připojení k páteřní síti), potřebná kapacita (počet sektorů, vytížení datovým provozem) i použité kmitočtové pásmo.

5.1.1 Topologie sítě

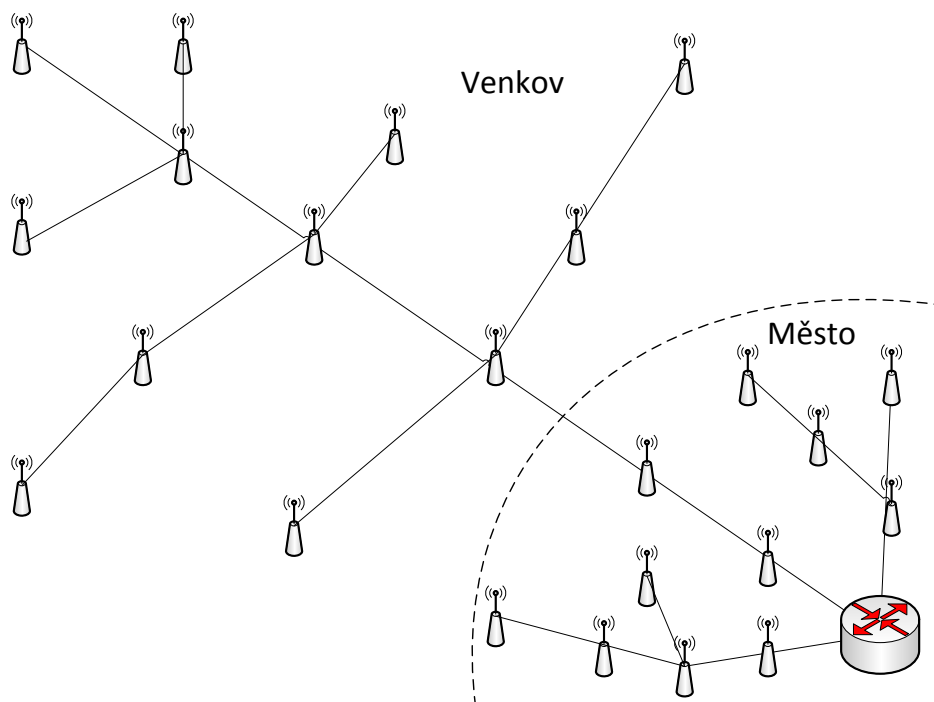
Pro popis topologie (uspořádání uzlů a spojů) a její optimalizaci se využívá teorie grafů. Používá se grafického zobrazení sítě, její popisu pomocí matic a algoritmů k hledání cest po grafech. Základními prvky pro popis topologie sítě jsou vrchol a hrana. Uzel sítě (síťový prvek) představuje vrchol V , kde vstupují a vystupují přenášené toky (vydělávání a začleňování), provádí se sdružování - multiplexování, propojování, ukončování cest sítě. Úsek (přenosový trakt) představuje hranu H , což je elementární spojnice dvou uzlů. Popis sítě je možný pomocí množiny vrcholů a hran

$$S(V, H, D, P)$$

kde navíc často vystupuje ohodnocení hran, např. D - délka úseku, P - propustnost. V praxi se vyskytují i jiná ohodnocení, např. délku je možné přepočítat na náklady na budování spoje apod.

Na rozdíl od páteřních sítí, které se budují na redundantní kruhové a mřížové topologii a přístupové sítě, která má vesměs charakter hvězdicové topologie, mobilní backhaul má stromovou strukturu. Jednotlivé základnové stanice tvoří koncové větve i společné body stromu a datové toky se postupně sdružují až ke kmenovému spoji, pomocí kterého je strom připojen k uzlu (směrovači) páteřní

(regionální) síť. Na obrázku 4 je naznačen jeden „kvadrant“ se stromy v oblastech typu město a venkov.



Obr. 4 – Typická topologie mobilního backhaul

Podle typu oblasti očekáváme typické vzdálenosti a další parametry základnových stanic - viz dále tabulka 11.

5.1.2 Komunikační požadavky

Zhodnocení komunikačních technologií je založeno na analýze jejich technických parametrů a porovnání s komunikačními požadavky v mobilním backhaul.

Základní obecná východiska pro stanovení komunikačních požadavků na síť jsou následující:

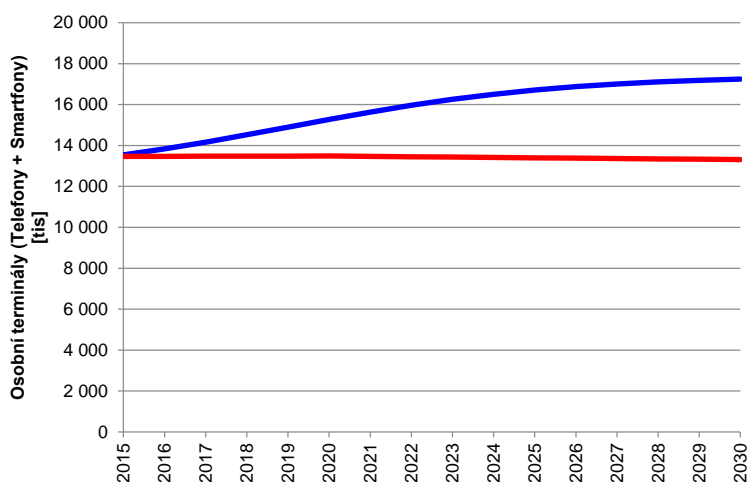
- Poptávka po službě a její charakteristika odběru v čase.
- Přenosová rychlost – konstantní či proměnná s parametry max.- min. rychlost, garantovaná, střední apod.
- Symetrie služby – posuzujeme souměrnost digitálního toku od a k zákazníkovi (odběrateli).
- Možný stupeň komprese (agregace) digitálního toku.
- Maximální přípustná chybovost digitálního signálu.
- Maximální akceptovatelné zpoždění signálu při přenosu.
- Míra využití přenosového kanálu.
- Průměrná délka relace.
- Požadavky na spolehlivost a bezpečnost přenosu.

Souhrnně se schopnost poskytovat služby na určité úrovni pomocí komunikační sítě posuzuje pomocí parametrů kvality služby QoS (Quality of Service). Kvalita služby je tedy soubor opatření, které zajistí určitý stupeň uspokojení uživatele danou službou. Pro kombinace různých typů služeb poskytovaných přes paketově orientované síť, ošetřuje problematiku kvality doporučení ITU-T G.1010.

5.2 Odhad potřebné přenosové kapacity

5.2.1 Odhad datového provozu

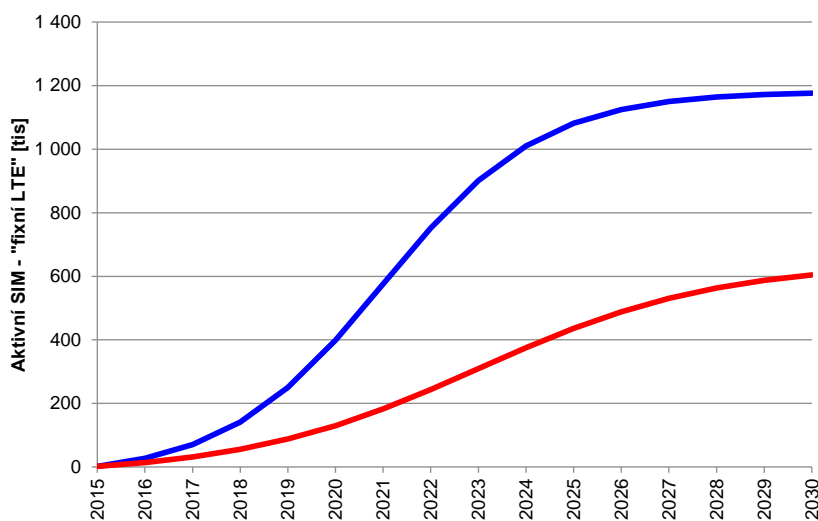
LTE technologie je primárně určená pro vysokorychlostní připojení k síti internet v mobilních sítích, ale má potenciál využití i pro pevné připojení k síti internet a stát se substitutem připojení k pevným sítím pomocí jiných technologií. Proto uvádíme odhad vývoje jak pro mobilní terminály, tak pro tzv. fixní LTE.



Obr. 5 – Predikce vývoje počtu osobních terminálů (telefony a smartphony - červeně: minimální odhadovaný nárůst, modře: maximální odhadovaný nárůst)

Minimální odhadovaný nárůst je založen na zachování stávající penetrace (1,28 osobního terminálu na obyvatele). Při maximálním odhadovaném nárůstu se předpokládá dosažení v roce 2020 penetrace 1,45 osobního terminálu na obyvatele (Obr. 5 a 6).

„Fixní LTE“ je substituční technologií širokopásmového přístupu k Internetu. Prognóza je založena na celkovém vývoji segmentu přístupu k síti Internet v pevném místě a na očekávaném vývoji zastoupení jednotlivých typů přístupových technologií.



Obr. 6 – Predikce vývoje počtu aktivních SIM - "fixní LTE" (červeně: minimální odhadovaný nárůst, modře: maximální odhadovaný nárůst)

Dalším segmentem s očekávaným rozvojem je oblast komunikace M2M (Machine to Machine). Ten je však charakteristický relativně velkým počtem bodů (senzorů, vzdálených zařízení), ale nízkým objemem dat. Do následující kalkulace proto nebude zahrnuta, a to i z toho důvodu, že podstatnější nárůst se očekává až po roce 2020.

Dnešní datové limity pro telefony a mobilní terminály (Smartphone) se pohybují od 50 do 10.000 MB dat měsíčně. Pro tyto typy zařízení se dá očekávat do 6 let posun k vyšším datovým limitům (5 až 10 GB dat). Vzhledem k odhadované skladbě terminálů v horizontu 6 let (nárůst terminálů typu Smartphone, ale stále ještě dostatečně velký podíl klasických terminálů) očekáváme průměrný měsíční objem přenesených dat 1 GB měsíčně.

Dnešní datové limity pro přenosná zařízení (notebooky, tablety) se pohybují od 0,5 do 10 GB dat měsíčně. Pro uvedené typy zařízení a zejména pro tzv. fixní LTE lze očekávat do 6 let vývoj k rozšíření datového limitu minimálně na 100 GB měsíčně. Pro tzv. fixní LTE očekáváme průměrný měsíční objem přenesených dat 30 GB dat měsíčně.

Objem dat je obvykle počítán jako součet přes oba směry přenosu. Uvažujeme převažující směr downstream, tedy odhadované objemy datových přenosů se dominantně odehrávají právě v tomto směru přenosu. Pokud vyjdeme z maximálních odhadovaných počtů terminálů v roce 2020, dojdeme k následujícím průměrným přenosovým rychlostem na terminál, potažmo základnovou stanicí – Tab 9.

Propočtení je provedeno pro dva počty základnových stanic v mobilní síti (5 a 10 tisíc). Jsou uvažovány průměrné rychlosti na terminál, základnovou stanicí a celková přenosová rychlost do Internetu. Vedle průměrných hodnot přenosové rychlosti je kalkulována rezerva na špičkový provoz (tzv. hlavní provozní hodina). Jedná se o sumarizaci napříč všemi operátory.

Tab. 9: Odhad průměrné přenosové rychlosti v roce 2020 (pro celkový počet 5 a 10 tis. BTS)

Pro rok	2020		Počet BTS: 5000				Poměr špiček: 5			
	Terminály	Měsíční objem	Průměrně na terminál		Celkem	Průměr na BTS		Vč. rezervy na pokrytí špiček		
typ	počet	GB	Mbit	Mbit/s	Gbit	Gbit/s	Mbit	Mbit/s	Mbit	Mbit/s
smartphone	15500000	1	8000	0,0030864	1,24E+08	47,84	24800000	9,57	124000000	47,84
fixní LTE	400000	30	240000	0,0925926	96000000	37,04	19200000	7,41	96000000	37,04
					suma	84,88	suma	16,98	suma	84,88
					špičky	424,38				

Pro rok	2020		Počet BTS: 10000				Poměr špiček: 5			
	Terminály	Měsíční objem	Průměrně na terminál		Celkem	Průměr na BTS		Vč. rezervy na pokrytí špiček		
typ	počet	GB	Mbit	Mbit/s	Gbit	Gbit/s	Mbit	Mbit/s	Mbit	Mbit/s
smartphone	15500000	1	8000	0,0030864	1,24E+08	47,84	12400000	4,78	62000000	23,92
fixní LTE	400000	30	240000	0,0925926	96000000	37,04	9600000	3,70	48000000	18,52
					suma	84,88	suma	8,49	suma	42,44
					špičky	424,38				

Provedená kalkulace byla porovnána s prognózou mobilních operátorů, přičemž bylo konstatováno přiblížení odhadu k sumě jejich prognóz (tab. 10 není dále uvažována pro výpočty).

Tab. 10: Odhad průměrného nárůstu rychlosti dle podkladů mobilních operátorů (aktualizace na základě dat z roku 2014 – přenosová rychlost dat v hlavní provozní hodině)

OBCHODNÍ TAJEMSTVÍ

Z uvedeného rozboru vyplývá nutnost počítat na každou základnovou stanici v mobilní síti typicky 40 až 85 Mbit/s. Rozdílné požadavky budou v centrech měst a na venkově, i když tuto situaci pravděpodobně částečně vyváží tzv. fixní LTE, které nebude tak atraktivní ve městech, kde jsou skutečně fixní alternativy připojení k Internetu, ale na venkově, kde se efektivně využije substituce za neexistující pevné přípojky.

Po tomto kontrolním výpočtu byl proveden rozpočet podle typu území. Zde byl vedle datového provozu připočítán i objem provozu pro hovorovou komunikaci. Podklady byly převzaty od zadavatele pro fiktivního operátora. Mobilní data jsou přepočítáno poměrem podle hovorové zátěže. První varianta (Tab. 12) zahrnuje započtení fixního LTE. Fixní LTE je rozpočítáno rovnoměrně pro všechny typy území, což podle našeho názoru reflektuje situaci, kdy bude využíváno více ve venkovských oblastech (ovšem při nižší hustotě populace). U venkovských oblastí je při sdružování toků z více BTS uvažován agregační poměr 4:1. Druhá varianta (Tab. 13) nezahrnuje fixní LTE.

Tab. 11: Podklady pro rozpočet podle typu území

	BTS	poměr	provoz	poměr	sektorů	skoky BTS	BTS-BSC	BTS-BTS	typ připojení		populace		Plocha	
typ lokality	počet	%	HPH Erl	%	průměr	prům.počet	prům.km	km	radiové	kabel	tis.	%	km2	%
A Aglomerace	2198	28	315	65	2,4	1,9	1	0,54	76%	24%	3354	32	2372	3
B Města	2475	31	115	24	2,5	2,7	2	0,73	89%	11%	4376	42	19029	24
C Venkov	3319	42	58	12	1,9	4,6	12,5	2,72	100%	0%	2776	26	57462	73
	7992		488								10506		78863	

Tab. 12: Rozpočet přenosové kapacity podle typu území na BTS a jednoho fiktivního operátora včetně fixního LTE

	poměr špiček	10	servisní	10%	3	operátoři	agregace	4
typ lokality	hovor	data	fixní	režie	suma	na operát.	strom	kmen
	Mb/s	Mb/s	Mb/s	Mb/s	Mb/s	Mb/s	BTS	Mb/s
A Aglomerace	21,6	140,7	46	20,9	229,5	76,5	3	229,5
B Města	8,4	45,5	46	10,0	110,3	36,8	4	147,0
C Venkov	4,6	17,1	46	6,8	74,8	24,9	11	87,0

Tab. 13: Rozpočet přenosové kapacity podle typu území na BTS a jednoho fiktivního operátora bez fixního LTE

		poměr špiček 10		servisní 10%		3 operátoři		agregace	4
		hovor	data	fixní	režie	suma	na operát.	strom	kmen
	typ lokality	Mb/s	Mb/s	Mb/s	Mb/s	Mb/s	Mb/s	BTS	Mb/s
A	Agglomerace	21,6	140,7	0	16,2	178,5	59,5	3	178,5
B	Města	8,4	45,5	0	5,4	59,3	19,8	4	79,1
C	Venkov	4,6	17,1	0	2,2	23,9	8,0	11	31,7

Propoččet reflektuje fakt, že každý z operátorů obsluhuje určitou část populace. Fiktivní operátor je vytvořen na základě zprůměrovaných dat, a proto je výsledná přenosová rychlost dělena rovnoměrně třemi.

Kalkulované rychlosti musí být vzaty v úvahu při dimenzování přípojné sítě (backhaul). Na druhou stranu je třeba počítat s maximální přenosovou rychlostí, kterou disponuje mobilní segment sítě LTE, jak ukazuje následující kapitola.

5.2.2 Nároky plynoucí z přístupové radiové části mobilní sítě

Radiové rozhraní LTE je založeno na přístupových metodách OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) pro sestupný směr a SC-FDMA (Single-carrier FDMA) pro vzestupný směr. Hlavními znaky je využití kombinace systému MIMO s vícecestavovou modulací až 64-QAM.

Přenosové rychlosti při použití kanálu o šířce pásma 20 MHz při použití modulace 64-QAM a kódovém poměru 5/4 uvádí tabulka 14 pro různé varianty diverzifikačního příjmu (SISO/MIMO).

Tab. 14: Teoretická přenosová rychlost pro sestupný směr v závislosti na anténní konfiguraci

Anténní konfigurace	Přenosová rychlost [Mbit/s]
SISO	100
2x2 MIMO	172

Tab. 15: Teoretická přenosová rychlost pro sestupný směr (SISO) v závislosti na použité modulaci

Modulace	Přenosová rychlost [Mbit/s]
QPSK	33
16-QAM	67
64-QAM	100

Pro vzestupný směr je rychlost typicky poloviční. Pokud je nižší odstup signálu od interferencí, použije se vedle nižšího počtu stavů i vyšší kódový poměr, čímž ovšem klesá spektrální efektivita. Již v roce 2009 byla koncipovaná rozšířená specifikace LTE-Advanced. Řeší zejména přidání následovných funkcí do LTE:

- Agregace nosných – umožňuje zvětšení šířky pásma (podporuje agregaci až pěti bloků po 20 MHz)
- Rozšíření přenosu ve vzestupném směru pomocí MIMO 8x8 a doplnění Multi-site MIMO, což je prostorový multiplex složený z různých základnových stanic (spolupráce několika základnových stanic při přenosu datového toku jednomu terminálu)

Dále je třeba počítat se skutečností, že jedna základnová stanice obsluhuje více sektorů. Typicky uvažujeme 2 až 3 sektory na základnovou stanici. Aby mohl být přenesen objem požadavků ze všech sektorů do páteřní sítě bez omezení, muselo by backhaul připojení disponovat kapacitou 200 až 300 Mbit/s na každou základnovou stanici (pro SISO, 64-QAM, šířku kanálu 20 MHz).

5.2.3 Agregace přenosu z více základnových stanic

Pokud uvažujeme typickou stromovou strukturu přípojné sítě k síti páteřní, popsanou výše a přenosovou rychlost na sektor až 100 Mbit/s (šířka kanálu 20 MHz), dospějeme k modelovému případu (maximální varianta pro venkovské lokality, kde je největší počet BTS připojený přes jeden společný kmenový spoj):

- Počet základnových stanic v jednom segmentu backhaul pro venkovskou oblast: 11
- Průměrný počet sektorů pro venkovskou oblast: 2
- Celková maximální přenosová kapacita spoje připojovacího segment k páteřní síti (kmenový spoj): 2,2 Gbit/s
- Agregáčnı poměr: 10:1
- Agregovaná přenosová kapacita spoje připojovacího segment k páteřní síti (kmenový spoj): 220 Mbit/s

V současnosti je však přiděleno pouze pásmo šířky 10 MHz v oblasti LTE 800 MHz.

Na základě této úvahy byl uveden propočer na základě parametrů mobilní sítě fiktivního operátora pro všechny uvažované typy lokalit (viz. Tab. 11, odkud byly čerpány počty sektorů, Tab. 12 odkud byly převzaty počty stanic v segmentu – sloupec „strom“). V oblastech aglomerace a města byl vzhledem k menšímu počtu agregovaných toků použit agregáčnı poměr 4:1 na rozdíl od venkovských lokalit, kde je použit poměr 10:1. Výsledná kalkulace je uvedena v Tab. 16.

Tab. 16: Rozpočet přenosové kapacity podle typu územı na BTS a jednoho fiktivního operátora na základě kapacity radiového rozhraní přístupové části sítě

		max pro 10 MHz kanál							
		strom	sektorů	sektor	BTS	kmen	poměr	agregované	
	typ lokality	QAM	BTS	průměr	Mb/s	Mb/s	Mb/s	agr.	Mb/s
A	Aglomerace	64	3	2,4	50	120	361	4	90,1
B	Města	16	4	2,5	33	81	325	4	81,3
C	Venkov	4	11	1,9	16	31	338	10	33,8

V kalkulaci uvažujeme šířku kanálu 10 MHz (aktuálně dostupná jednotlivým operátorům v pásmu 800 MHz) a postupně klesající typickou modulaci QAM pro daný typ územı (se vzrůstajícím rozměrem buňky nižší stupeň modulace, plynoucí z nižšího poměru SNR, a tím i nižší dosažitelná rychlost). Podle specifikace LTE-A mohou být pásma sdružována do větších celků, toto však nepředpokládáme ve větší míře v horizontu do roku 2020.

5.2.4 Zhodnocení klíčových technologií z hlediska dosažitelné přenosové kapacity

Z výše uvedeného rozboru je patrné, že kmenový spoj backhaul ve venkovské oblasti, který soustřeďuje tok z nejvíce BTS by měl být dimenzován na maximální rychlost cca 34 Mbit/s (pro šířku kanálu 10 MHz) až cca 90 Mbit/s pro aglomeraci (viz Tab. 16). Tomu vyhovuje s velkou rezervou optické připojení s rychlostı 1 Gbit/s, nebo pokročilé radioreléové spoje s dostatečnou šířkou kanálu.

Hodnoty kalkulované z odhadovaného provozu v síti uvádí tabulka 12 pro variantu s fixním LTE (rychlosti 87 až 230 Mbit/s) a tabulka 13 pro variantu bez fixního LTE (rychlosti 32 až 180 Mbit/s).

V každém případě, ať již k výpočtu kapacity dojdeme jedním či druhým způsobem, rychlosti pro připojení základnových stanic v potřebných hodnotách jsou zvládnutelné radioreleovými spoji s dnes dostupnou šířkou pásma 28 a 56 MHz (při dostatečném odstupu signál-šum).

5.3 Souhrn

Následující přehled uvádí technologie, které považujeme za perspektivní pro využití jako mobilní backhaul a které podle našeho názoru a na základě provedené kalkulace jsou schopny vyhovět požadavkům nárůstu provozu minimálně do roku 2020:

- Optická jednovlákenná vlákna s technologií Ethernet s rychlostí 1 Gbit/s či vyšší (případně STM-1 až STM-16 s rychlostí 2,5 Gbit/s s funkcionalitou Ethernet over SDH) provozovaná v režimu
 - Dvouvláknový nebo jednovláknový spoj bod-bod na vlastním či pronajatém vlákně
 - Vícenásobné využití - vlnový multiplex CWDM (příp. DWDM) – pronájem vlnové délky v multiplexu
 - Pronajatý okruh realizovaný multiplexním systémem vyššího řádu
 - SDH
 - OTH
 - MPLS VPN
 - Ethernet VLAN
- Širokopásmové radioreleové spoje (šířka kanálu 28, 56, perspektivně 112 MHz) s mnohastavovými modulacemi (64-QAM, 256-QAM, perspektivně až 1024-QAM) a pokročilým kanálovým kódováním (perspektivně s přenosem s dvojí polarizací a MIMO)
- V aglomeracích a městech je pak možno alternativně využít alternativní prostředky širokopásmových fixních přístupových sítí, jako jsou
 - Pasivní optické sítě GPON, EPON a vyšší
 - Službu nenasvíceného vlákna (Dark Fibre)
 - Metalické přípojky VDSL2 s potlačováním přeslechů (Vectoring)
 - Síť kabelové televize od standardu DOCSIS 3.0

Nejperspektivnější je bezesporu realizace backhaul pomocí optických vláken. Rozvoj optického připojení bude podle našeho názoru usnadněn v synergii s budováním sítí NGA. Tam, kde není ekonomické budování optické infrastruktury (kopce, odlehlá místa, koncové BTS topologie stromu) budou nadále používány radioreleové spoje, které mohou zajistit komunikaci až rychlostí 1 Gbit/s, a to i v delším časovém horizontu po roce 2020. Dosažení takové rychlosti je ovšem spojen s provedením upgrade současných technologií, dovolujících větší šířku pásma, případně použitím antén větších rozměrů pro dosažení dostatečného zisku a SNR).

6 Odkazy

- [1] Jareš, P.: Technologie pro vysokorychlostní širokopásmové datové přenosy v ČR pro potřeby věcného vymezení relevantního trhu č.5. Katedra telekomunikační techniky, FEL, ČVUT v Praze, 2010.
- [2] Vodrážka, J., Havlan, M.: Přenosové systémy. Sítě a zařízení SDH, OTH, jejich návrh a měření. Vydavatelství ČVUT. Praha 2008.
- [3] Vodrážka, J.: Přenosové systémy v přístupových sítích - 2. přepracované vydání, Vydavatelství ČVUT, Praha 2006.