



TECH
pedia



VYSOKORYCHLOSTNÍ
PŘÍSTUP K INTERNETU

IVAN PRAVDA

Název díla: Vysokorychlostní přístup k Internetu
Autor: Ivan Pravda
Vydalo: České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Kontaktní adresa: Technická 2, Praha 6
Tel.: +420 224352084
Tisk: (pouze elektronicky)
Počet stran: 42
Edice (vydání): 1. vydání, 2017
ISBN 978-80-01-06281-4

TechPedia

European Virtual Learning Platform for
Electrical and Information Engineering

<http://www.techpedia.eu>

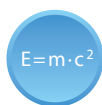


Tento projekt byl realizován za finanční podpory
Evropské unie.

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

Přípojky VDSL2 a G.fast jsou koncipovány pro poskytování nových služeb prostřednictvím metalických symetrických párů a optických vláken v přístupové telekomunikační síti. Přípojky VDSL2 navazují na starší typy přípojek ADSL a přinášejí koncovému účastníkovi vyšší přenosové rychlosti. Navíc dovolují optimalizovat i symetrii přenosových rychlostí pro sestupný a vzestupný směr. V dnešní době jsou přípojky VDSL2 a G.fast posledním vývojovým stupněm v technologii xDSL a s jejich implementací do přístupové telekomunikační sítě se počítá i v konceptech sítí FTTx.

CÍLE

Materiál seznamuje s principem přípojky VDSL2 a G.fast, možnými variantami, použitou modulací a kódováním. Ukázány jsou dosažitelné přenosové rychlosti a možnosti přípojek této druhé generace. Při studiu tohoto modulu se předpokládají základní znalosti vlastností telekomunikačních vedení a základních metod digitálního přenosu a zpracování signálu.

LITERATURA

- [1] Šimák, B. – Vodrážka, J. – Svoboda, J.: Digitální účastnické přípojky xDSL. Díl 1. – Metody přenosu, popis přípojek HDSL, SHDSL, ADSL a VDSL. Nakladatelství Sdělovací technika. Praha 2005. ISBN 80-86645-07-X
- [2] Vodrážka, J. – Šimák, B.: Digitální účastnické přípojky xDSL. Díl 2. – Přenosové prostředí, druhá generace ADSL a VDSL, měření na přípojkách. Nakladatelství Sdělovací technika. Praha 2007. ISBN 80-86645-07-X.
- [3] Vodrážka, J.: Spektrální profil přípojek VDSL2 vybraný pro síť v ČR. Access server. <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2011040001>
- [4] Vodrážka, J.: Varianty přípojek VDSL2. Access server <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006052401>
- [5] Vodrážka, J.: Teoreticky dosažitelné přenosové rychlosti u přípojky VDSL2 s potlačováním přeslechů. Access server. <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008080002>

Obsah

1	Telekomunikační síť a digitální účastnické přípojky	6
1.1	Sdělovací technika a telekomunikace.....	6
1.2	Telekomunikační síť.....	7
1.3	Metalická přístupová síť.....	8
1.4	Hybridní přístupová síť.....	9
1.5	Digitální účastnické přípojky	11
2	Digitální účastnická přípojka VDSL2	12
2.1	Základní vlastnosti přípojky VDSL2	12
2.2	Uspořádání přípojky VDSL2.....	13
2.3	Vrstvový model koncového zařízení přípojky VDSL2	15
2.4	Režimy přenosu dat koncového účastníka	16
2.5	Možnosti přenosu dat	17
2.6	Zabezpečení přenosu proti chybám.....	19
2.7	Variety přípojky VDSL2	20
2.8	Profily přípojky VDSL2	21
2.9	Dělení kmitočtového pásma	23
2.10	Kmitočtové plány pro symetrické datové přenosy	24
2.11	Kmitočtové plány pro asymetrické datové přenosy	26
2.12	Masky spektrální výkonové hustoty pro plány 997.....	28
2.13	Masky spektrální výkonové hustoty pro plány 998.....	30
2.14	Přenosový řetězec přípojky VDSL2.....	31
2.15	Protokolová struktura přípojky VDSL2	32
3	Vysokorychlostní přípojky dle standardu G.fast	33
3.1	Standard G.fast - základní vlastnosti	33
3.2	Využití fantomových okruhů.....	35
3.3	Napájení optického uzlu z uživatelského modemu	37
3.4	Vektorová modulace – VDMT	38
3.5	Výhody a nevýhody VDMT	40

1 Telekomunikační síť a digitální účastnické přípojky

1.1 Sdělovací technika a telekomunikace

Telekomunikace je vědní disciplína zabývající se dorozumíváním člověka (přenosem zpráv) v podmínkách, které není schopen překonat svými přirozenými smysly. Telekomunikace proto spadají do vědního oboru sdělovací technika nebo též komunikační technika a jejich moderní vývoj v podstatě započal v devatenáctém století vynálezem telegrafu a později i telefonu. V dnešní době tvoří neoddělitelnou součást oboru **ICT** (*Information and Communication Technology*).



Slovo telekomunikace vzniklo spojením dvou slov. Řeckého slova „tele“ (vzdálený) a slova komunikace (dorozumívání).

Zařízení pro dorozumívání na dálku označujeme jako telekomunikační zařízení. Telekomunikační síť je pak tvořena vzájemně propojenými telekomunikačními zařízeními neboli uzly sítě.

Je zřejmé, že není možné vzájemně propojit přímými spoji všechna telekomunikační zařízení, respektive všechny účastníky komunikace. Z tohoto důvodu musí být telekomunikační síť určitým způsobem logicky strukturovaná tak, aby byla schopna plnit požadavky velkého počtu koncových účastníků v geograficky rozdílných územích. Telekomunikační síť dělíme na dvě základní části. Na část páteřní a přístupovou.



Pokud bychom chtěli vytvářet telekomunikační síť tak, že bychom vzájemně propojili všechny účastníky mezi sebou, znamenalo by to v případě pouhých 10 účastníků realizovat celkem 45 vedení.

1.2 Telekomunikační síť

Bylo již zmíněno, že telekomunikační síť musí být určitým způsobem strukturovaná. Obvykle se dělí na dvě hlavní části. Na část páteřní a část přístupovou. Obě mají své úkoly a charakteristické vlastnosti.

Páteřní telekomunikační síť má za úkol vzájemně propojit jednotlivé síťové uzly telekomunikačního operátora. V těchto uzlech se koncentrují datové přenosy od koncových účastníků tak, aby se daly efektivně přenést společnými telekomunikačními cestami přes rozlehlá geografická území. Typické pro tuto síť je:

- přenosové medium je jednovláknové optické vlákno,
- přenosové rychlosti se pohybují v desítkách Gbit/s,
- překlenované vzdálenosti jsou od desítek až po tisíce kilometrů,
- obvykle se vyskytující topologií sítě je topologie kruhu.

Pojmem přístupová telekomunikační síť rozumíme část telekomunikační sítě, která je mezi posledním bodem poskytovatele připojení (telekomunikačního operátora) a koncovým účastníkem. Za poslední bod poskytovatele připojení se obvykle považuje místní ústředna **HOST** nebo vzdálená účastnická jednotka **RSU** (*Remote Subscriber Unit*). Kabelový svazek vycházející z hlavního rozvodu ústředny (respektive z **RSU**) se v síťových a uličních rozvaděčích postupně větví do jednotlivých směrů ke koncovým účastníkům. Typické pro tuto síť je:

- přenosové medium je symetrický metalický pár případně jednovláknové optické vlákno,
- přenosové rychlosti se pohybují v jednotkách až desítkách Mbit/s,
- překlenované vzdálenosti jsou stovky metrů až jednotky kilometrů,
- obvykle se vyskytující topologií sítě je topologie stromu.

1.3 Metalická přístupová síť

Ve většině evropských států je přístupová telekomunikační síť tvořena symetrickými metalickými páry. Koncepce návrhu této sítě počítala především s poskytováním telefonních služeb prostřednictvím analogové telefonní přípojky **POTS** (*Plain Old Telephone Service*) v kmitočtovém pásmu 300 Hz až 3400 Hz (tzv. telefonní kanál) nebo základní přípojky **ISDN-BRA** (*Integrated Services Digital Network - Basic Rate Access*) v pásmu do 80 kHz.

V České Republice je přístupová síť největšího telekomunikačního operátora tvořena metalickými kabelem, jejichž základním prvkem je křížová čtyřka a symetrický pár.

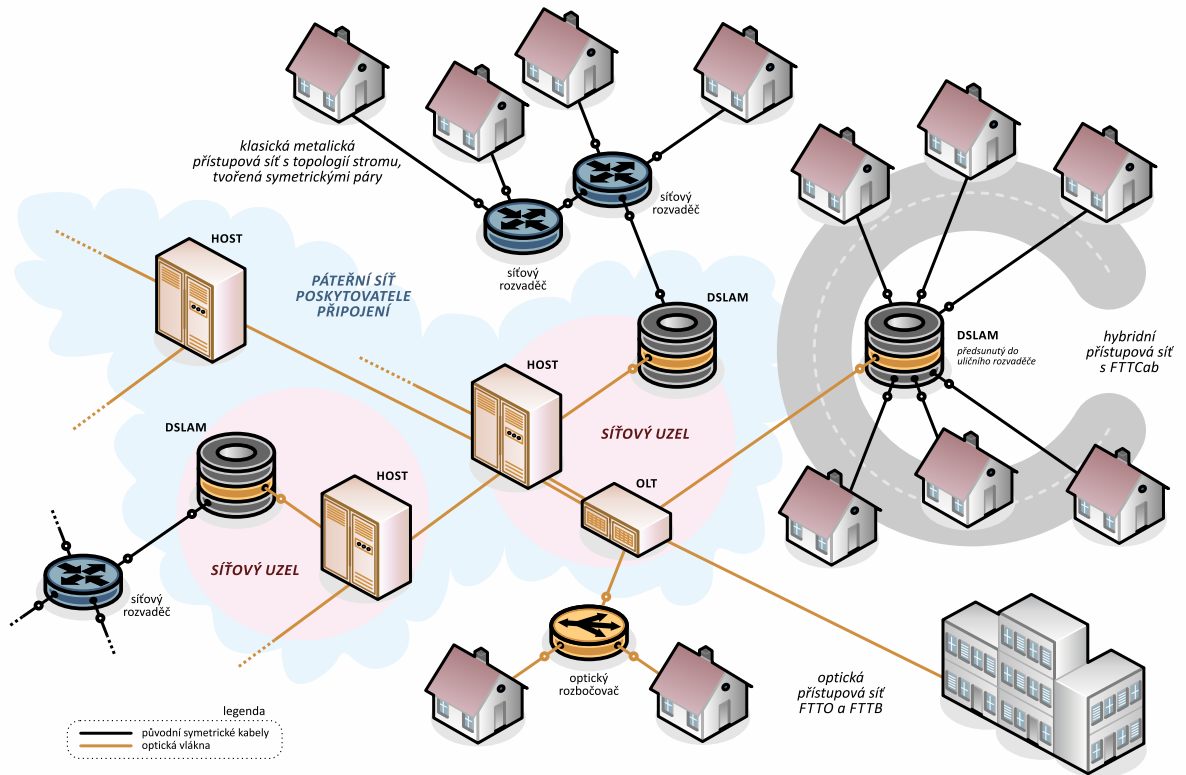
Kabelem používají vodiče s měděnými jádry o průměrech 0,4, 0,6 a 0,8 mm s průměrem izolace max. 1,7 mm a mají vnější plášť převážně z polyetylenu. Kabelem v úložném provedení jsou plněné vhodnou plnicí hmotou (gelem), která vytváří ochranu proti vodě. Vodiče mají polyetylenovou pěnovou izolaci. Kabelem v samonosném provedení (závěsné kabelem) nejsou plněné a používají plnou polyetylenovou izolaci. Část přístupové sítě v ČR však využívá i historické metalické kabelem s měděnými jádry o průměrech 0,4, 0,6 a 0,8 mm s izolací vzduch-papír.

Přístupové sítě ostatních telekomunikačních operátorů jsou, ve srovnání se sítí největšího operátora, relativně malé a pokrývají malá geografická území. Z tohoto důvodu se v celém tomto modulu budeme zabývat parametry a podmínkami pro provoz síťových prvků pouze v přístupové sítí největšího operátora.

1.4 Hybridní přístupová síť

V dnešní době je nutné poskytovat koncovým účastníkům i nové služby, než pouze telefonní službu. Především se jedná o vysokorychlostní přenos dat a přístup do celosvětové sítě Internet, přenos televizního a video signálu. Možnosti využití metalické přístupové sítě se však v dnešní době blíží svým limitům. Fyzikální parametry symetrického páru (útlum, skupinová rychlost šíření, přeslechové vazby, apod.) výrazně omezují přenosové parametry jako je přenosová rychlost a brání jejímu dalšímu navyšování. Řešení této situace spočívá v nahrazení symetrických párů v přístupové síti za optická vlákna. S ohledem na obvyklou topologii přístupové sítě je však toto řešení příliš finančně náročné. Proto se výměna metalických párů za optická vlákna uskutečňuje postupně od síťového uzlu poskytovatele připojení směrem ke koncovému účastníkovi. Takovéto přístupové sítě se označují zkratkou **FTTx** (*Fiber to the x*), kde písmeno *x* je zástupným znakem, který označuje místo zakončení optického vlákna. Hlavní typy sítí **FTTx** jsou:

- **FTTH** – Home (vlákno až do domu),
- **FTTO** – Office (do kanceláře, firemní prostory),
- **FTTB** – Building (do budovy),
- **FTTC**, **FTTCab** – Curb, Cabinet (do místního rozvaděče – chodník, sloupek) s délkou metalického vedení do 300 m,
- **FTTN** – Node (do lokálního přípojného bodu – uliční rozvaděč, sloupek) s délkou metalického vedení nad 300 m,
- **FTTEx** – Exchange (do místní digitální ústředny),
- **FTTdb** – Distribution Point (do distribučního uzlu).



Příklad metalické přístupové sítě, hybridní přístupové sítě FTTCab a plně optické přístupové sítě.

1.5 Digitální účastnické přípojky

Koncová zařízení digitálních účastnických přípojek (**xDSL**, *Digital Subscriber Line*) jsou speciálně zkonstruována tak, aby umožnila lépe využít potenciál metalické infrastruktury v přístupové síti. Společným znakem těchto systémů je relativně vysoká přenosová rychlost v řádech jednotek až desítek Mbit/s. Digitální účastnické přípojky lze dělit podle různých hledisek. Jedním z hlavních je dělení podle způsobu přenosu na digitální přípojky s přenosem:

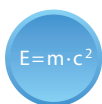
- v základním pásmu (**HDSL**, **SHDSL**),
- v kmitočtově přeloženém pásmu (**ADSL2+**, **VDSL2**), které je možné provozovat na účastnickém vedení s již instalovanou jinou službou v základním kmitočtovém pásmu, např. **POTS** či **ISDN-BRA**.

V případě čistě metalického řešení přístupové sítě, kde jsou přípojky na straně poskytovatele zakončeny v blízkosti hlavního rozvodu ústředny, lze využít přípojky **ADSL** (*Asymmetric DSL*), **SHDSL** (*Single pair High speed DSL*) a na omezenou vzdálenost též druhé vylepšené generace **ADSL2+** a **VDSL** (*Very High Speed DSL*). V případě hybridního opticko-metalického řešení přístupové sítě, kde jsou zařízení na straně poskytovatele vysunuta blíže k účastníkům, lze plně využít výhod přípojek **ADSL2+** a **VDSL2**.

2 Digitální účastnická přípojka VDSL2

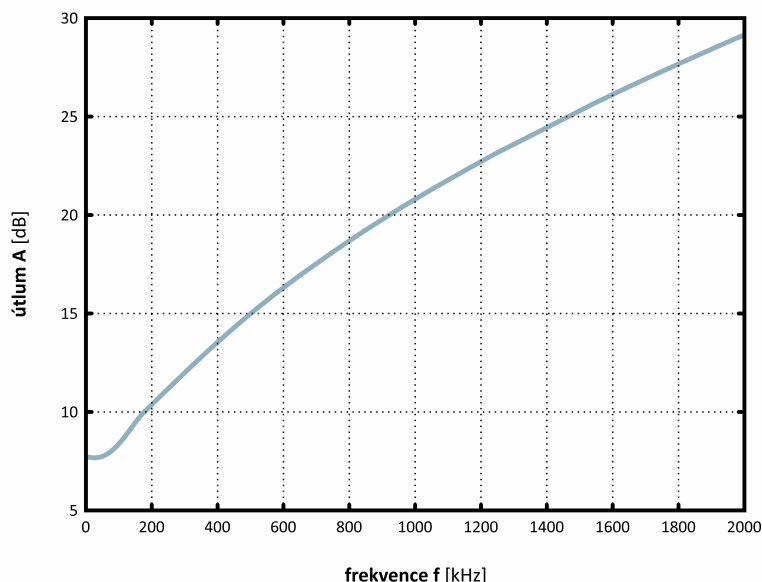
2.1 Základní vlastnosti přípojky VDSL2

Digitální účastnická přípojka **VDSL2** je druhou generací přípojky **VDSL**. Významné a osvědčené inovace oproti původní specifikaci **VDSL** přebírá druhá generace **VDSL2** z druhé generace přípojky **ADSL2**. Jde zejména o mřížkové kódování (tzv. *Trellis Code*) pro schopnost opravovat v přijímači jednotlivé bitové chyby a také o schopnost opravovat shluky chyb způsobených impulsním rušením pomocí Reed-Solomon kódu a prokládání dat. Podobně jako u **ADSL2** lze měnit přenosovou rychlost za provozu **SRA** (*Seamless Rate Adaptation*), řídit vysílací výkon pro redukci přeslechů do okolních párů a aktivovat režimy úspory elektrické energie (tzv. *Sleep Mode*).



Základním doporučením, které standardizuje přípojku **VDSL2**, je doporučení ITU-T G.993.2.

Navýšení přenosové rychlosti se docílilo rozšířením využívaného kmitočtového pásma až do 30 MHz. Pro srovnání, přípojka **ADSL2+** využívá kmitočtové pásmo pouze do 2,208 MHz. Maximální přenosové rychlosti se pohybují v řádech desítek až stovek Mbit/s. Ve směru downstream je maximální hodnota kolem 200 Mbit/s. Rozšíření využívaného kmitočtového pásma však přináší i nevýhodu. Zkracuje se maximální délka účastnického vedení, na kterém lze přípojku **VDSL2** provozovat. S rostoucí šířkou kmitočtového pásma roste totiž i útlum vedení v tomto pásmu.

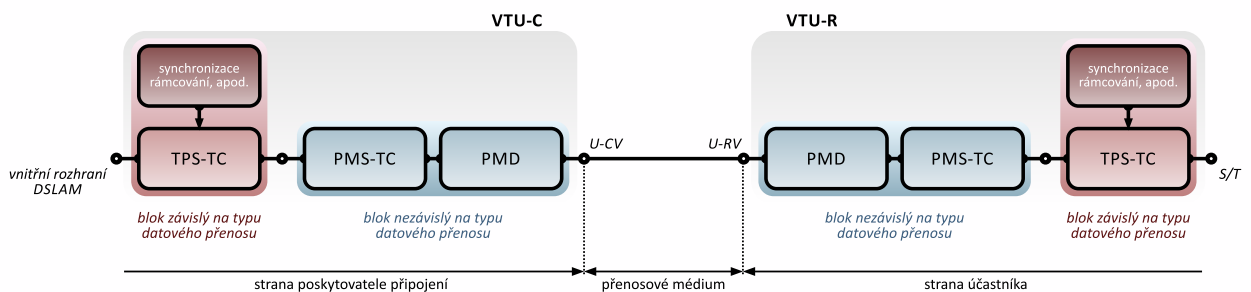


Obrázek ukazuje průběh útlumu symetrického páru v závislosti na kmitočtu. Délka vedení 1 km, průměr žil vodičů 0,4 mm, materiál měď. Symetrický pár je umístěn v klasickém místním kabelu čtyřkové konstrukce TCEPKPFLE.

- **VTU-R** – transceiver (modem) **VDSL2** na straně koncového účastníka,
- *U-RV* – fyzické rozhraní ukončující vedení na straně účastníka,
- *U-CV* – fyzické rozhraní ukončující vedení na straně ústředny,
- *U-RV2* – fyzické rozhraní mezi splitterem a modemem na straně účastníka,
- *U-CV2* – fyzické rozhraní mezi splitterem a modemem na straně ústředny,
- *T/S* – fyzické rozhraní mezi **VTU-R** a následnou síťovou infrastrukturou na straně účastníka (**LAN**),
- *Z/U0* – fyzické rozhraní symetrického páru se službou **POTS/ISDN-BRA** s kmitočtovým pásmem omezeným rozbočovačem.

2.3 Vrstvový model koncového zařízení přípojky VDSL2

Funkce a vlastnosti koncového zařízení přípojky **VDSL2** lze popsat, obdobně jako i u ostatních přípojek **xDSL**, prostřednictvím vrstevového modelu. Model zařízení obsahuje dvě základní části. První část je nezávislá na typu datových přenosů, protože obsahuje funkce a bloky, které jsou u všech koncových zařízení stejné a souvisejí s přizpůsobením dat fyzickému přenosovému mediu. Jedná se o bloky **PMD** (*Physical Media Dependent*) a **PMS-TC** (*Physical Media Specific – Transmission Convergence*). Druhá část, blok **TPS-TC** (*Transport Protocol Specific – Transmission Convergence*), pak respektuje typ datového přenosu a strukturu účastnických dat.



Vrstvový model koncového zařízení přípojky VDSL2.

Základní funkce bloku **PMD** jsou spojeny s vlastním přenosem signálu přenosovým prostředím. Jedná se především o generování a obnovu taktu, modulaci a demodulaci, funkci potlačení ozvěn, kompenzaci negativních parametrů vedení a inicializaci spojení.

Blok **PMS-TC** je specifický podle konkrétního přenosového prostředí a plní funkce spojené s vytvářením rámců, rámcovou synchronizací, zabezpečením dat dopřednou chybovou korekcí **FEC** (*Forward Error Correction*), prokládáním, skramblováním a deskramblováním. V tomto bloku se také k datovému toku koncového účastníka přidává služební informace (záhlaví datových rámců) a realizuje se služební komunikace mezi zařízeními.

Parametry bloku **TPS-TC** závisí na požadované funkcionalitě koncového zařízení, respektive typu datových přenosů (typu požadovaných služeb). **TPS-TC** slouží jako adaptační blok mezi transportním protokolem (formátem uživatelských dat) a dalšími nižšími bloky **VDSL2** přípojky. Má za úkol multiplexování, demultiplexování a synchronizaci dat jednotlivých účastnických datových toků podle požadovaných parametrů kvality služby (prioritizace toků určitých služeb).

Referenční body označené jako **S/T** jsou rozhraní k uživatelským terminálům. V popisu parametrů přípojky **VDSL2** budeme postupovat právě od bloku **TPS-TC** směrem k bloku **PMD** a rozhraní **U**.

2.4 Režimy přenosu dat koncového účastníka

Parametry bloku **TPS-TC** ve vrstevném modelu koncového zařízení jsou nejbližší k účastníkovi a odpovídají svou funkcionalitou požadavkům dle typu datových přenosů koncového účastníka. V současných přípojkách **VDSL2** podporuje blok **TPS-TC** tři režimy přenosu dat.

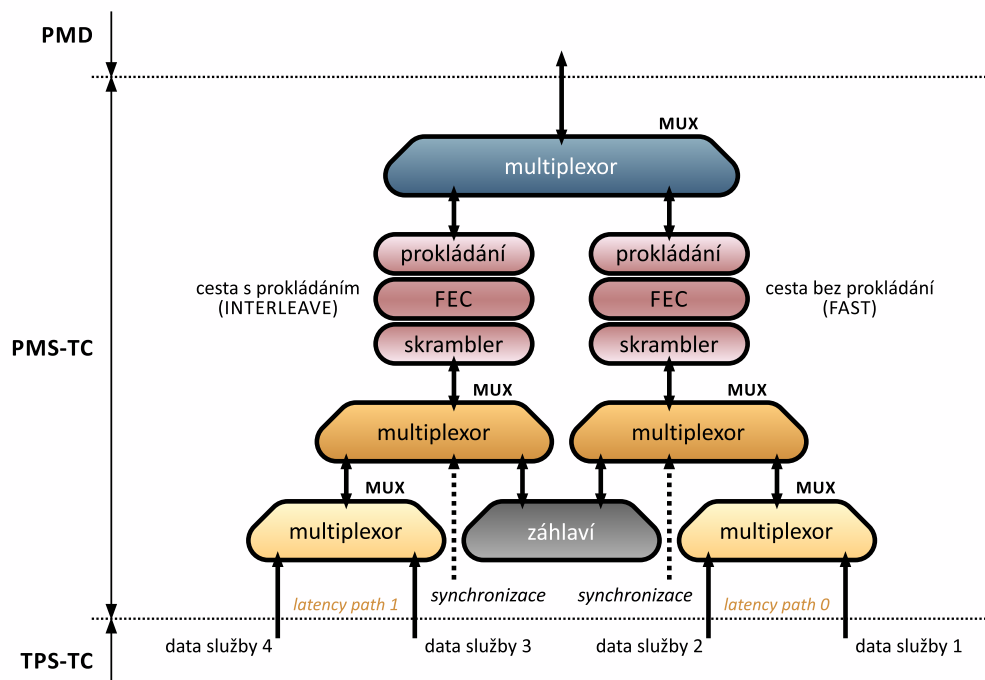
- Synchronní režim **STM** (*Synchronous Transfer Mode*). V tomto režimu pracují všechna koncová zařízení v části přístupové sítě synchronně v závislosti na **DSLAM**. Synchronnost znamená, že datové přenosy ve směru upstream a downstream se uskutečňují u všech koncových zařízení ve stejný časový okamžik. Výhodou tohoto způsobu přenosu je výrazné omezení rušení přeslechem na blízkém konci.
- Asynchronní režim **ATM** (*Asynchronous Transfer Mode*). Tento způsob přenosu zajišťuje zpětnou kompatibilitu se stávajícími přípojkami **ADSL** (tzv. duální **VTU-R** může pracovat proti **ADSL DSLAM**). Pro přenos dat se využívají buňky o konstantní délce 53 byte, které se podle druhu přenášeného obsahu vkládají do virtuální cesty a kanálu s příslušnými identifikátory **VPI** (*Virtual Path Identifier*) a **VCI** (*Virtual Channel Identifier*).
- Paketový režim **PTM** (*Packet Transfer Mode*) je určen pro efektivnější přenos toků, ve kterých jsou data účastníka zapouzdřována do paketů či rámců. Typicky se jedná o Ethernet rámce, rámce protokolu Point-to-Point či pakety **MPLS** (*MultiProtocol Label Switching*). Režim **PTM** je založen na standardech známých jako Ethernet in the First-Mile podle IEEE 802.3ah, konkrétně na řešení pro metalické přístupové sítě vycházející z **10-PASS-TS**.

Přípojka **VDSL2** může nad fyzickou vrstvou podporovat více nezávislých datových kanálů více služeb, které mají odlišné nároky na kvalitu služby. Typicky se může jednat o video přenosy, které je nutné prioritizovat před přenosy s běžnými daty. Data těchto služeb jsou přenášena dvěma nezávislými cestami (*Latency Path*) s nezávisle nastavitelnými parametry jako je hloubka prokládání a tím i velikostí zpoždění (*Dual Latency*), apod.

Kvalita služby je měřítko, jak hodnotit spokojenost účastníka se službou, za kterou platí, a kterou mu operátor poskytuje. Hodnocení služby je poměrně komplikovaný proces. Pro hodnocení se využívají různá kritéria. Počínaje například zcela objektivními technickými kritérii, jako je dosažená přenosová rychlost nebo zpoždění dat při přenosu, konče zcela subjektivními kritérii, jako je přehlednost vyúčtování nebo spokojenost se zákaznickou podporou.

2.5 Možnosti přenosu dat

Blok **PMS-TC** má za úkol zabezpečit a přizpůsobit data koncového účastníka do formátu vhodného pro přenos prostřednictvím symetrického páru. Od bloku **TPS-TC** přejímá jednotlivé datové toky účastníka. K těmto datovým tokům blok **PMS-TC** přidává záhlaví, formátuje je do **VDSL2** rámců, zajišťuje znáhodnění periodických posloupností metodou skramblování, přidání bitů zabezpečení a prokládání. Uvedené postupy jsou aplikovány na každý datový tok v cestě odděleně.



Základní postup zpracování dat v bloku PMS-TC.

Přenosové cesty u přípojky **VDSL2** mohou být obecně:

- bez prokládání dat – tedy s nízkým zpožděním při přenosu, což je nutné pro přenosy v reálném čase, ale také s nízkou odolností proti impulsnímu rušení.
- s prokládáním dat – tedy s vyšším zpožděním při přenosu, které není na závadu například při přenosu dat do sítě Internet (typicky přenos souborů protokolem **FTP** (*File Transfer Protocol*)), ale také s vyšší odolností proti impulsnímu rušení.



Prokládání je postup, který zvyšuje možnost detekce a korekce chyb vzniklých impulsním rušením při přenosu. Poškozená data je tedy možné v koncovém zařízení opravit a není nutné je znovu ze zdroje dat přenášet, což zvyšuje efektivitu přenosu.



Nevýhodou prokládání je však nárůst zpoždění při přenosu.

Prokládání postupně vytvořený datový rámec s daty koncového účastníka rozdělí na určitý počet částí. Pořadí jednotlivých částí se definovaným způsobem zamění (prokládá). Takto upravený rámec se vyšle do přenosové cesty. Impulsní rušení při přenosu může způsobit shluk chyb v přenášeném datovém rámci. Na přijímací straně se části poškozeného rámce znovu přeuspořádají do původního pořadí. Je hodně pravděpodobné, že shluk chyb se při opětovném přeuspořádání rozdělí do různých částí rámce. Takto rozprostřené chyby je možné lépe detekovat a opravovat pomocí Reed-Solomon kódování (viz. dále). Nevýhoda spočívá v nárůstu zpoždění (desítky až stovky milisekund), protože datový rámec se na vysílací straně ihned po sestavení nevysílá do vedení, ale je nutné ho pozdržet pro přeuspořádání. Obdobně dojde ke zdržení i na přijímací straně. Výhodou prokládání je získání vyšší odolnosti proti impulsnímu rušení, které vadí především při video přenosech kódovaných standardy **MPEG** (*Moving Picture Experts Group*). U video přenosů s **MPEG** kódováním se vliv impulsního rušení projevuje jako tzv. „kostičkování obrazu“. Pro obnovení obrazové informace je nutné čekat na přenos klíčového snímku.

2.6 Zabezpečení přenosu proti chybám

V bloku **PMS-TC** se přenášená posloupnost dat skrambluje. Skramblování na vysílací straně (a deskramblování na přijímací) má za úkol odstranit periodické posloupnosti z přenášeného datového toku. Obvykle se skramblování/deskramblování realizuje jako posuvný registr se zavedenými zpětnými vazbami. Operace skramblování a deskramblování musejí být pochopitelně naprosto inverzní tak, aby vždy došlo k obnovení původní posloupnosti dat.



Znáhodnění vysílané posloupnosti dat přináší nižší nároky na potřebnou šířku kmitočtového pásma přenosové cesty.

U přípojky **VDSL2** se provádí, obdobně jako i u jiných přípojek **xDSL**, zabezpečení datové posloupnosti dat proti chybám při přenosu. Pro detekci chyb se používá zabezpečení pomocí 8bit slova, které vznikne klasickým výpočtem cyklického kódu **CRC** (*Cyclic Redundancy Check*).

Dopředná chybová korekce **FEC** je založená na *Reed-Solomon* (**RS**) kódu. Chybová korekce, ve spojení s prokládáním, poskytuje ochranu proti jednotlivým chybám a krátkým shlukům chyb.

Při kódování pomocí Reed-Solomon kódu vznikají bloky vytvořené z pevného množství datových bajtů a pevného množství zabezpečovacích bajtů. Počet zabezpečovacích bajtů může být celé číslo v intervalu 0 až 16. Celková posloupnost dat (včetně zabezpečení) může mít 32 až 255 bajtů. Zjednodušeně lze říci, že počet bajtů, které lze pomocí Reedova-Solomon kódu opravit je poloviční, než je počet použitých zabezpečovacích bajtů. Tento způsob opravy chyb je velice účinný pro svou nízkou nadbytečnost (typicky sedmiprocentní).



Při konkrétním stanovení parametrů pro korekci **FEC** a prokládání je nutný kompromis mezi stupněm protichybové ochrany a výsledným přenosovým zpožděním.

2.7 Varianty přípojky VDSL2

Následující kapitoly pojednávají o parametrech bloku **PMD**, prostřednictvím kterého je koncové zařízení připojeno k fyzickému přenosovému mediu – symetrickému páru.

VDSL2 přípojka se vyskytuje v několika různých variantách tak, aby byla schopna plnit úkoly při různých přenosových podmínkách. V přílohách základního doporučení ITU-T G.993.2 jsou mezinárodní standardizační organizací určeny tři základní typy přípojek **VDSL2**. V doporučení je specifikováno:

- Příloha A – **VDSL2** přípojka pro přístupovou síť pro oblast Severní Ameriky,
- Příloha B – **VDSL2** přípojka pro přístupovou síť pro oblast Evropy,
- Příloha C – **VDSL2** přípojka pro přístupovou síť pro oblast Japonska.

Společné pro všechny tři typy přípojek je blokové uspořádání vnitřních obvodů a principy těchto obvodů. Tedy například způsob zabezpečení datového toku koncového účastníka před jeho přenosem v přístupové síti (obvody pro synchronizaci, scrambler, konvoluční kodér, modulátor, apod.).

U všech tří typů přípojek se také pro realizaci datových přenosů výhradně používá modulace s více nosnými **DMT** (*Discrete Multi-tone*).

Principem této modulace je rozdělení celého využívaného kmitočtového pásma do řady vzájemně nezávislých subkanálů (někdy označováno též jako tónů či nosných). Šířka subkanálu může být buď stejná jako u starší přípojky **ADSL**, tedy 4,3125 kHz, nebo dvojnásobná 8,625 kHz, avšak pouze pro pásmo 30 MHz. V každém dílčím subkanálu jsou data účastníka modulována kvadraturní amplitudovou modulací **QAM**. Počet stavů modulace se u přípojek **VDSL2** pohybuje mezi 4 až 32768, což odpovídá přenosu 2 nebo až 15 bitů jedním stavem modulace. Modulační rychlost je pro šířku subkanálu 4,3125 kHz stanovena na 4 kBd a pro šířku subkanálu 8,625 kHz je stanovena na 8 kBd. Pro vytvoření obousměrného přenosu se může používat pouze metoda frekvenčního dělení **FDD** (*Frequency Division Duplex*).

Pro přípojku **VDSL2** jsou v jednotlivých přílohách doporučení ITU-T G993.2, podle typických parametrů přístupových telekomunikačních sítí daného regionu, stanoveny odlišné profily, kmitočtové plány a vysílací masky spektrální výkonové hustoty **PSD** (*Power Spectral Density*).

2.8 Profily přípojky VDSL2

Bylo zmíněno, že navýšení přenosových rychlostí se docílilo rozšířením využívaného kmitočtového pásma. Rozšíření pásma však snižuje maximální délku účastnického vedení, protože dochází k nárůstu útlumu metalické přenosové cesty na vyšších kmitočtech. Proto se s ohledem na rozdílnosti v přístupových sítích jednotlivých regionů (Severní Amerika, Evropa, Japonsko), na nutnost realizovat datové přenosy různých služeb a na další podmínky u přípojky **VDSL2** stanovila různá šířka využívaného kmitočtové pásma tzv. profily VDSL2. Jednotlivé profily se tak odlišují horním mezním kmitočtem, šířkou subkanálu a maximálním celkovým výkonem vysílaného signálu.

Společné parametry profilů přípojky VDSL2 pro Evropu.

Profil	Max. výkon ve směru downstream [dBm]	Max. výkon ve směru upstream [dBm]	Šířka subkanálu [kHz]	MBDC [Mbit/s]
8a	+17,5	+14,5	4,3125	50
8b	+20,5	+14,5	4,3125	50
8c	+11,5	+14,5	4,3125	50
8d	+14,5	+14,5	4,3125	50
12a	+14,5	+14,5	4,3125	68
12b	+14,5	+14,5	4,3125	68
17a	+14,5	+14,5	4,3125	100
30a	+14,5	+14,5	8,625	200

Kmitočtové pásmo však nelze využívat jako jeden celek. Koncový účastník chce prostřednictvím svého jediného metalického vedení data odesílat i přijímat. Proto je nutné kmitočtové pásmo rozdělit na alespoň na dvě subpásma pro dva směry přenosu. Pro oddělení směrů přenosů se využívají dvě základní metody. První metodou je potlačení ozvěn **EC** (*Echo Cancellation*), druhou pak frekvenční dělení **FDD**.

i

Přípojka **VDSL2** může využívat pouze metodu frekvenčního dělení **FDD** (*Frequency Division Duplex*) s vyhrazenými pásmy pro oba směry přenosu a s dělicím kmitočtem mezi pásmy. Díky frekvenčnímu dělení je redukován vliv přeslechu na blízkém konci **NEXT** (*Near End Cross Talk*). Pro tuto vlastnost je proto u přípojky **FDD** preferováno.

i

Parametr **MBDC** (*Minimum Bidirectional Net Data Rate*) představuje minimální hodnotu přenosové rychlosti, která je definována jako součet přenosových rychlostí v obou směrech. Tuto hodnotu **MBDC** musí koncové zařízení dosáhnout, aby mohlo být klasifikováno pro použití v daném kmitočtovém profilu. Rychlost **NDR**

(*Net Data Rate*) je nabízena koncovému účastníkovi, nezahrnuje tak nároky na přenos služebních informací a bitů záhlaví mezi modemy **VDSL2**. Užitečná rychlost při přenosu uživatelských dat však bude ještě nižší, než je hodnota **NDR**. Část **NDR** musí být využita například na přenos záhlaví rámců Ethernet nebo paketů **IP**.

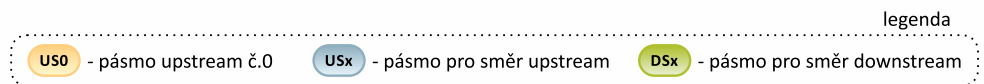
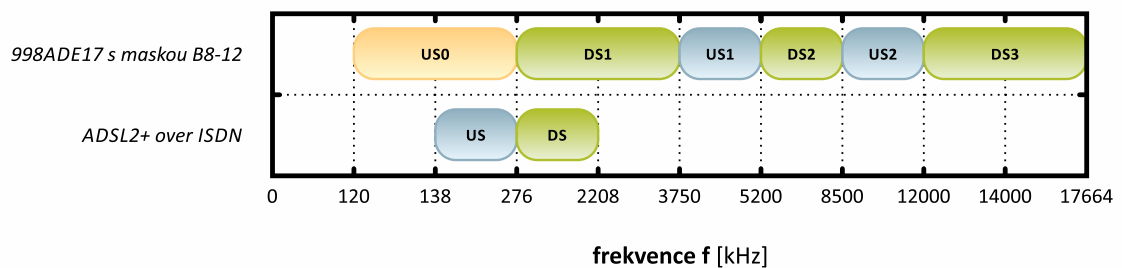
2.9 Dělení kmitočtového pásma

U **VDSL2** je však situace ještě o trochu složitější. Přípojka **VDSL2** musí umožnit poskytovat služby, které vyžadují nejen asymetrické ale i symetrické datové přenosy. Z tohoto důvodu je nutné kmitočtová subpásma ještě dále rozdělit na menší části a tyto části vzájemně postupně střídat tak, aby bylo docíleno požadovaných rychlostí datových přenosů v obou směrech při zohlednění rostoucího útlumu přenosové cesty. Způsob střídání a šířku jednotlivých kmitočtových subpásem určuje tak zvaný kmitočtový plán. Subpásma pro sestupný směr přenosu (downstream) se označují a číslují jako: D1, D2, D3, D4. Subpásma pro vzestupný směr přenosu (upstream) se označují a číslují jako: US0, US1, US2, US3, US4.



Pro přípojku **VDSL2** existují dva hlavní kmitočtové plány, které vycházejí z plánů pro přípojku **VDSL**. Plán označovaný jako 998 je vhodný pro asymetrické datové přenosy. Plán označovaný jako 997, je vhodný pro služby, které vyžadují symetrické datové přenosy.

kmitočtový plán



Obrázek ilustruje způsob využívání kmitočtového pásma přípojky ADSL2+ over ISDN a přípojky VDSL2 pracující v pásmu do 17 MHz s kmitočtovým plánem 998ADE17.

2.10 Kmitočtové plány pro symetrické datové přenosy

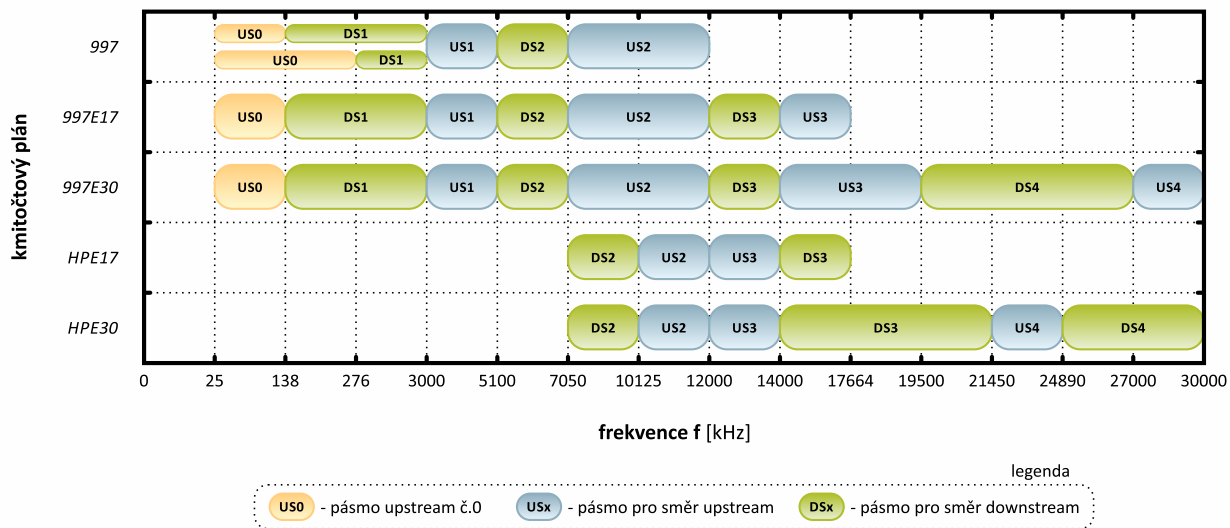
S využitím symetrických datových přenosů se počítá především u malých a středních firem, jejichž zaměstnanci potřebují data ze sítě Internet nejen stahovat, ale i rychle odesílat. Příkladem služby se symetrickými přenosovými rychlostmi může být stále populárnější videokonference, která se pořádá namísto klasických pracovních schůzek.

V předchozí kapitole bylo zkonstatováno, že právě pro symetrické datové přenosy je určen základní kmitočtový plán 997. Tento plán je dále podrobněji dělen:

- 997 – základní kmitočtový plán s obvyklým střídáním pásem pro sestupný a vzestupný směr převzatý od přípojky **VDSL**,
- 997E – kmitočtový plán s obvyklým střídáním pásem pro sestupný a vzestupný směr prodloužený do 17 MHz respektive do 30 MHz,
- HPE – speciální kmitočtový plán pro přípojky pracující mezi 7,05 MHz a 30 MHz (profily 17a, 30a).

Příklad parametrů kmitočtového plánu 997E pro jednotlivé profily přípojky VDSL2 v Evropě.

Profily VDSL2	Nejvýše využívaný subkanál	Horní mezní kmitočet pro downstream [MHz]	Horní mezní kmitočet pro upstream [MHz]
8a	2047	7,05	8,832
8b	2047	7,05	8,832
8c	1182	7,05	5,1
8d	2047	7,05	8,832
12a	2782	7,06	12
12b	2782	7,05	12
17a	4095	14	17,664
30a	3478	27	30



Střídání jednotlivých pásem kmitočtových plánů pro symetrické datové přenosy.

2.11 Kmitočtové plány pro asymetrické datové přenosy

Asymetrické datové přenosy se předpokládají spíše u domácích účastníků, kdy je přenosová rychlost ve směru downstream podstatně vyšší než přenosová rychlost v opačném směru.



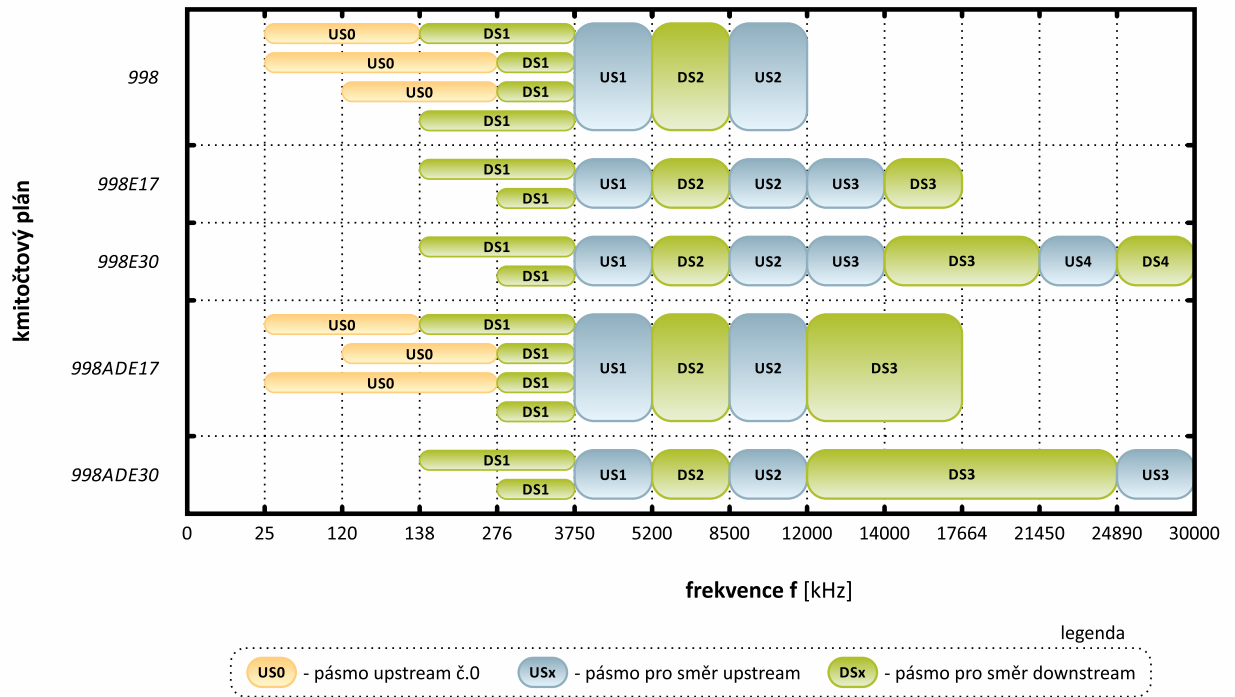
S ohledem na počet subpásem pro směr upstream by však měla přípojka **VDSL2** i v asymetrickém režimu dosahovat vyšších přenosových rychlostí, než je tomu u starší přípojky **ADSL**.

Základní kmitočtový plán 998 se dále dělí:

- 998 – základní kmitočtový plán s obvyklým střídáním pásem pro sestupný a vzestupný směr převzatý od první generace přípojky **VDSL**,
- 998E – kmitočtový plán s obvyklým střídáním pásem pro sestupný a vzestupný směr prodloužený do 17 MHz respektive do 30 MHz,
- 998ADE – kmitočtový plán určený pro datové přenosy s výrazně asymetrickými rychlostmi.

Příklad parametrů kmitočtového plánu 998ADE pro jednotlivé profily přípojky VDSL2 v Evropě.

Profil VDSL2	Nejvýše využívaný subkanál	Horní mezní kmitočet pro downstream [MHz]	Horní mezní kmitočet pro upstream [MHz]
8a	1971	8,5	5,2
8b	1971	8,5	5,2
8c	1971	8,5	5,2
8d	1971	8,5	5,2
12a	1971	8,5	12
12b	1971	8,5	12
17a	4095	17,664	12
30a	2479	24890	30



Střídání jednotlivých pásem kmitočtových plánů pro asymetrické datové přenosy.

2.12 Masky spektrální výkonové hustoty pro plány 997

Dosud jsme se seznámili s nadefinovanými profily přípojky **VDSL2** a s nadefinovanými kmitočtovými plány. Kmitočtové plány určují, jaké frekvence se mohou využívat pro downstream nebo upstream. Ke kompletní definici vysílacích parametrů je však ještě nutné určit maximální úroveň výkonu vysílaného signálu. Definice výkonové úrovně se děje prostřednictvím masek spektrální výkonové hustoty **PSD**. Maska představuje nejvyšší hodnoty výkonu vysílaného signálu na konkrétní frekvenci.

Masky PSD korespondují s konkrétním kmitočtovým plánem. V tabulce jsou uvedeny jejich základní parametry. Mimo úrovní vysílaného signálu se jednotlivé masky odlišují i například využíváním nebo nevyužíváním upstream pásma US0. Na obrázku je uveden průběh masky *997E17-M2x-A*. Parametry ostatních masek pro Evropu jsou uvedeny v příslušné příloze doporučení ITU-T G.993.2.

Základní parametry masek PSD pro kmitočtové plány 997.

Krátké jméno	Dlouhé jméno	Využití pásma US0	Horní mezní kmitočet pro upstream nebo downstream [kHz]
B7-1	997-M1c-A-7	A	7050
B7-3	997-M1x-M	M	12000
B7-7	HPE17-M1-NUS0	N/A	17664
B7-8	HPE30-M1-MUS0	N/A	30000
B7-9	997E17-M2x-A	A	17664
B7-10	997E30-M2x-MUS0	N/A	30000

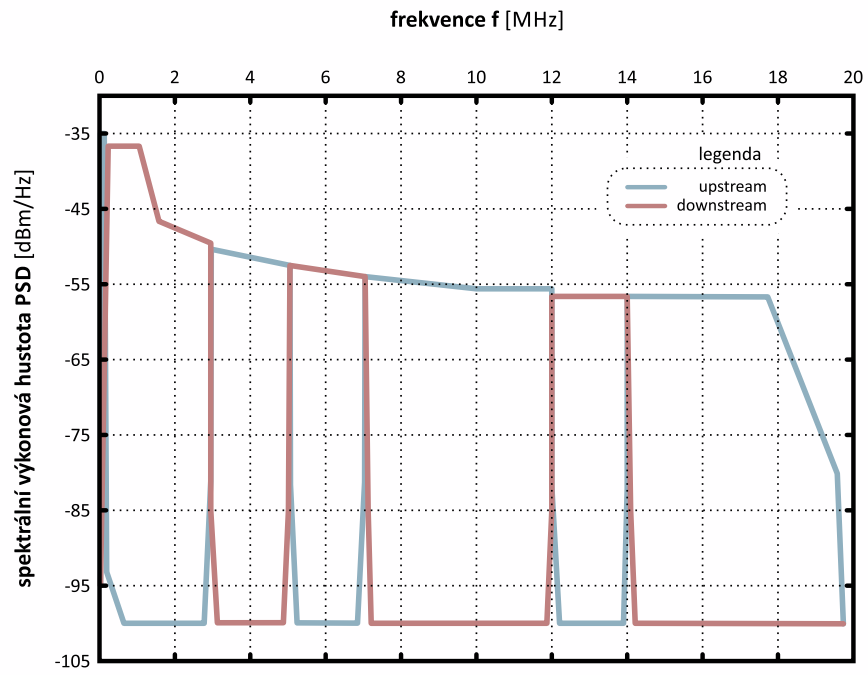


Pro upstream pásmo US0 platí u jednotlivých masek následující podmínky:

A – koresponduje s přílohou A v doporučení ITU-T G.992.5,

M – koresponduje s přílohou M v doporučení ITU-T G.993.2 nebo G.992.5,

N/A – pásmo US0 není využíváno pro přenos dat.



Maska PSD 997E17-M2x-A s vyznačenými směry přenosu.

2.13 Masky spektrální výkonové hustoty pro plány 998

Pro plán 998 je v doporučení pro přípojku **VDSL2** definováno celkem 17 masek. Proto si uvedeme pouze parametry pro dvě masky **PSD**, které jsou používány v přístupové síti největšího telekomunikačního operátora v ČR.

Základní parametry masek PSD, které jsou používány v přístupové síti v ČR.

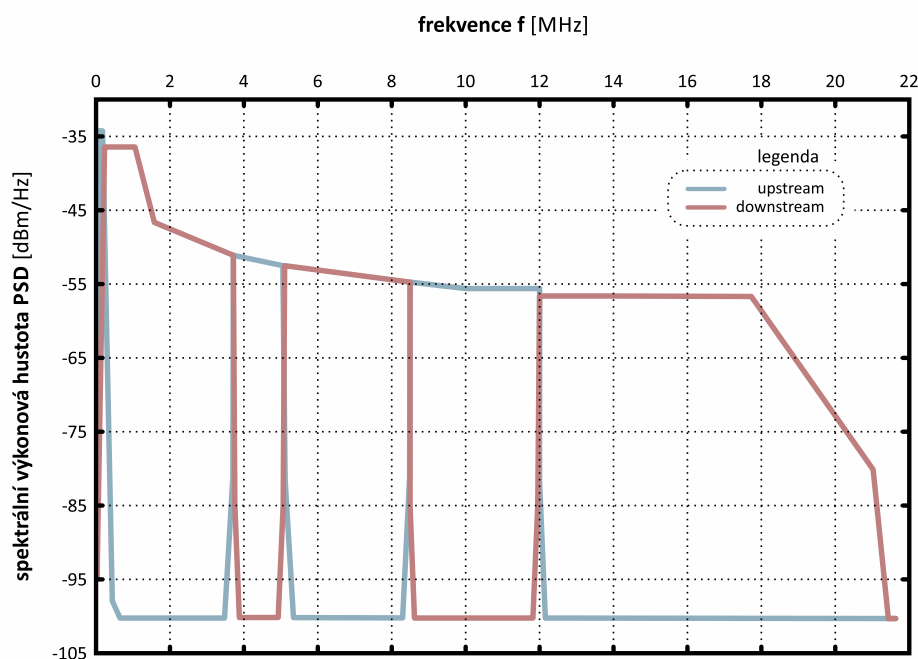
Krátké jméno	Dlouhé jméno	Využití pásma US0	Horní mezní kmitočet pro upstream nebo downstream [kHz]
B8-6	997-M2x-B	B	12000
B8-12	998ADE17-M2x-B	B	17664



Pro upstream pásmo US0 platí u jednotlivých masek následující podmínky:

B – koresponduje s přílohou B v doporučení ITU-T G.992.5,

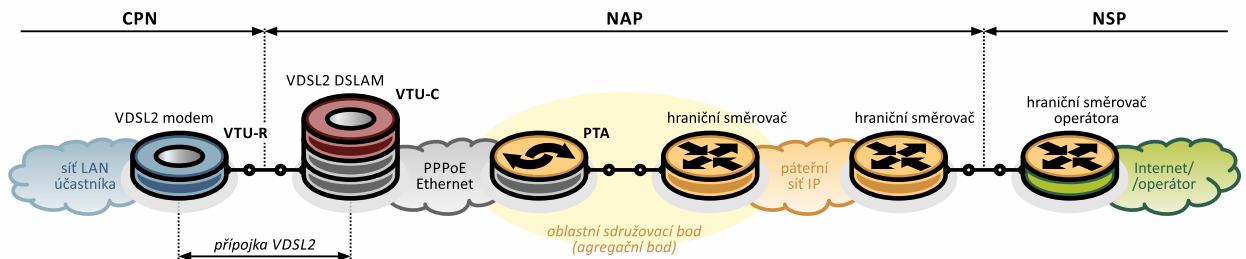
Obě masky **PSD** využívají pro přenos uživatelských dat i upstream pásmo označené jako US0. Volba těchto masek zajišťuje vhodné vlastnosti v oblasti spektrální kompatibility s již instalovanými přípojkami **ADSL/ADSL2+**. Přípojky totiž využívají stejná kmitočtová pásma pro stejné směry přenosu, čímž dochází k eliminaci přeslechů typu **NEXT**.



Maska PSD 998ADE17-M2x-B s vyznačenými směry přenosu.

2.14 Přenosový řetězec přípojky VDSL2

Kompletní architektura sítě pro vysokorychlostní datové přenosy a přístup k síti Internet prostřednictvím přípojek **xDSL** je zobrazena na obrázku.



Přenosový řetězec přípojky VDSL2.

Architekturu sítě je možné obecně rozdělit do tří částí:

- účastnická síť **CPN** (*Customer Premises Network*),
- poskytovatel připojení **NAP** (*Network Access Provider*),
- poskytovatel služeb **NSP** (*Network Service Provider*).

Výrazným rysem uvedené koncepce je rozdělení na poskytovatele připojení a poskytovatele služeb. Obě role může plnit jediný subjekt, ale v souvislosti s různorodostí služeb a konkurenčním prostředím v telekomunikacích je účelné role oddělovat.

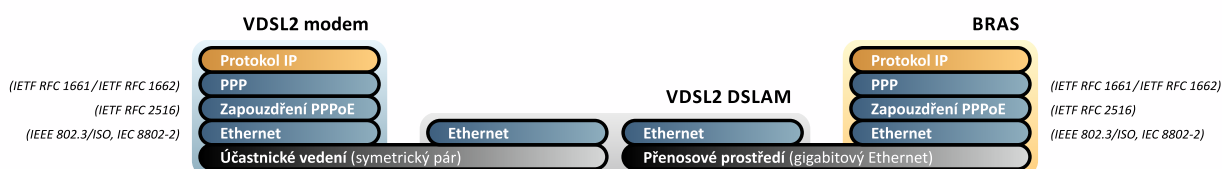
Do pojmu účastnická síť je možné zahrnout vše, co navazuje na ukončující bod sítě poskytovatele připojení (obvykle telekomunikační zásuvku), tj. koncové zařízení, terminály, místní datové rozvody a lokální síť **LAN**.

Poskytovatel připojení **NAP** provozuje technologii pro fyzický přenos signálů od účastníků k telekomunikačním uzlům. V případě přípojek **VDSL2** je **NAP** tvořena metalickými symetrickými páry (kovovým vedením), které vedou od **CPN** a jsou zakončeny v přístupových multiplexorech **DSLAM**. Multiplexory připojuje poskytovatel připojení na svou vlastní páteřní síť, ze které existuje návaznost na poskytovatele služeb.

Zdroje dat, které se přenášejí přes **NAP**, se nacházejí v síti poskytovatele služeb **NSP**. Může se například jednat jen o jednu společnost, typicky společnost provozující archiv TV pořadů, nebo může být **NSP** tvořeno de facto celosvětovou sítí Internet.

2.15 Protokolová struktura přípojky VDSL2

Vzájemné spojení mezi účastníkem a poskytovatelem připojení a poskytovatelem služeb může být obecně postaveno na různých protokolových architekturách. V dnešní době se využívají především standard Ethernet, protokol **PPP** (*Point-to-Point Protocol*) a rodina protokolů **TCP/IP**.



Protokolová struktura přípojky VDSL2 pro přenos dat v režimu PTM.

U přípojky **VDSL2** v režimu **PTM** je přenos paketů protokolu **IP** řešen pomocí protokolu **PPP**, který je vkládán do Ethernet rámců (*PPP over Ethernet*). V místě ukončení spojení **PPP** se provádí autentifikace, autorizace, účtování, přidělování IP adres v rámci **PPP** spojení, agregování datových toků a další služby. Uvedené služby plní širokopásmový přístupový server **BRAS** (*Broadband Access Server*) poskytovatele připojení v agregačním bodu. Od serveru **BRAS** jsou data koncového účastníka dále transportována do sítě Internet nebo k jednotlivým poskytovatelům služeb prostřednictvím **VPN** (*Virtual Private Network*). Celé toto řešení se označuje jako varianta **PTA** (*PPP Terminated Aggregation*).

3 Vysokorychlostní přípojky dle standardu G.fast

3.1 Standard G.fast - základní vlastnosti

O standardu G.fast se v literatuře hovoří jakožto o 4. generaci systémů **xDSL**. Počátky vývoje tohoto standardu se datují na počátek února 2012. Standardizace pak proběhla v roce 2014. Cílů nového standardu přípojek **xDSL** je hned několik:

- dosáhnout vyšších přenosových rychlostí než u stávajících přípojek typu **xDSL** – až 500 Mbit/s na cca 100 m, resp. 150 Mbit/s na cca 250 m (uvažuje se i o rychlostech do 1 Gbit/s)
- využití krátkých délek účastnických vedení, tzv. **FTTdb** (*Fiber To The distribution point*) – umístění distribučních uzlů velmi blízko koncovým účastníkům (do 250 m) – obdoba konceptu **FTTB** (*Fiber To The Building*)
- inverzní napájení
- možnost samoinstalace služby s parametry optické přípojky a jednoduchostí přípojky **xDSL**

Všechny výše uvedené cíle souvisí velmi úzce se dvěma klíčovými oblastmi. První oblastí je problematika způsobu navyšování propustnosti, druhou oblastí je oblast zvyšování spolehlivosti. Propustnost přípojky je možné navýšit dvěma způsoby:

- rozšířením kmitočtového pásma – tuto možnost využívaly i předchozí generace systémů **xDSL** s požadavkem na spektrální kompatibilitu se systémy **VDSL2** Respektování dalších kmitočtových pásem, jako je vysílání **VKV** (obvykle tzv. „západní norma“ v Evropě), vysílání **DAB** (*Digital Audio Broadcast*) – tzv. III. TV pásma 174 až 240 MHz. Maska **PSD** (*Power Spectral Density*):
 - počátek na 138 kHz; 2,5 MHz; 18 MHz a 30 MHz
 - konec na 106 MHz; 212 MHz a 300 MHz
- potlačením přeslechů – proces eliminace přeslechu typu **FEXT** (*Far End Cross Talk*) pomocí vhodné modulace typu **VDMT** (*Vectored Discrete Multi Tone*)

Zvýšení spolehlivosti celého systému umožňují následující dva mechanismy:

- inverzní multiplexing
- fantomové okruhy



Na rozdíl od přípojek **ADSL** a **VDSL**, které užívají frekvenční duplex **FDD**, se u přípojek s extrémní šířkou pásma používá časový duplex **TDD**. To umožňuje daleko efektivnější a flexibilnější přidělování přenosové kapacity a eliminuje

dilema s přidělováním pásem pro jednotlivé směry přenosu. Časová synchronizace není problém, protože musí být řešena již s ohledem na modulaci **VDMT**.

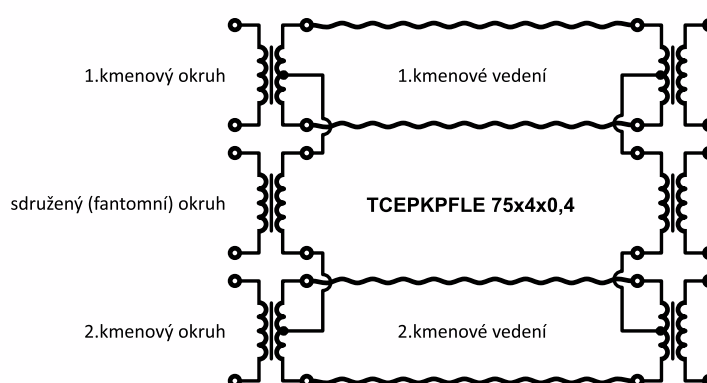
Zavedení časového duplexu **TDD** umožňuje také jednoduchou podporu úsporných režimů. V kontextu s režimem časového duplexu **TDD** jsou zavedeny povinné dělicí poměry 90/10 a 50/50, nepovinné dělicí poměry jsou pak od 50/50 do 10/90.

Mezi poslední zmíněné, avšak klíčové vlastnosti standardu G.fast patří implementace adaptivní modulace **DMT** s povinnou podporou **VDMT**.

3.2 Využití fantomových okruhů



Fantomové okruhy se v minulosti používaly u dálkových telefonních vedení k zvýšení přenosové kapacity. Principem je navázání signálu do středů transformátoru dvou vedení a tím vytvoření dalšího okruhu. Využití tohoto principu je omezeno směrem k narůstajícímu kmitočtu nemožností precizního vyvážení symetrizačních transformátorů a dále narůstajícími přeslechů mezi základními okruhy a fantomovým okruhem. Uvedené jevy lze eliminovat potlačováním přeslechů pomocí modulace **VDMT** a tím dosáhnout např. sumární rychlosti až téměř 500 Mbit/s v každém ze směrů na délce kabelu 400 m.



Princip fantomového okruhu

Přenosové rychlosti pro vysokorychlostní systémy xDSL modelované na kabelu s délkou 400 m

Modelování pro délku kabelu 400 m	Frekvenční plán VDSL2 do 17 MHz		Frekvenční plán VDSL2 do 30 MHz	
	downstream [Mbit/s]	upstream [Mbit/s]	downstream [Mbit/s]	upstream [Mbit/s]
2 vedení plus fantom	150	67	176	80
2 vedení	166	92	226	118
2 vedení plus fantom s potlačováním přeslechů	382	243	493	449



Mimo fantomových okruhů lze realizovat ještě tzv. superfantom pomocí 4 vedení. Tak lze získat celkem 7 okruhů: 4 základní, 2 fantomové a mezi nimi jeden superfantom.



Vedle fantomových okruhů se činily pokusy s přenosem v tzv. souhlasném módu, kdy jsou jednotlivé vodiče párů brány jako samostatné přenosové cesty. Vznikající silné přeslechy je možné kompenzovat také použitím **VDMT** modulace. Tímto řešením se ovšem připravíme o výhodu symetrických vedení, tj. značné odolnosti proti okolnímu rušení. Z důvodů značného vzájemného rušení mezi vedeními a okolím se proto tento způsob prakticky neujal.

3.3 Napájení optického uzlu z uživatelského modemu

U klasických analogových a základních přípojek **ISDN** se provádí napájení koncového zařízení z ústředny (typicky napětí zdroje 60 V a napájecí proud v desítkách mA). U přípojek s extrémní rychlostí podle specifikace s pracovním označením G.fast se počítá s opačným tokem napájení.

Z účastnického modemu bude napájen uzel (mini **DSLAM**) v tzv. distribučním bodě. Důvodem přístupu k tomuto řešení jsou již řadu let řešené problémy s napájením zařízení umístěných v přístupové síti mezi ústřednou telekomunikačního operátora a účastníkem.



Zařízení v distribučním bodě je připojeno k síti operátora optickým vláknem, takže není možné vzdálené napájení po signálovém vedení.



Vyřešit místní napájení z rozvodné sítě je většinou problematické. Logickým vyústěním je tedy napájení z účastnické strany, kde je však nutná sumarizace napájecího výkonu od několika účastníků najednou.

3.4 Vektorová modulace – VDMT

Modulace **DMT** je využívána u přípojek **xDSL** pro maximálně efektivní využití potenciálu metalických symetrických párů a umožňuje vhodně reagovat na existenci úzkopásmového rušení ve využívaném kmitočtovém kanálu. U přípojek **xDSL** s modulací **DMT** se díky charakteru přenosového prostředí sdíleného metalického kabelu mohou dále navýšit dosažitelné přenosové rychlosti za použití tzv. vektorové modulace **DMT (VDMT, Vectored DMT)**.

Dominantní složkou rušení, která limituje přenosové rychlosti přípojek **xDSL**, je rušení přeslechů.

Přeslech je přenos signálu kapacitními a induktivními vazbami mezi jednotlivými páry. Takto přenesený signál, například z prvního páru do druhého páru, působí v druhém páru jako negativní rušení a snižuje **SNR** a tím i výslednou přenosovou rychlost. Vzhledem k tomu, že zabránit přeslechům není možné z důvodu konstrukce metalického kabelu a vlastností elektromagnetického vlnění, je nutné eliminovat účinky přeslechu na přenášený užitečný signál. Eliminace přeslechů zajistí zlepšení **SNR** a tedy vyšší dosažitelnou přenosovou rychlost. Podle místa měření přeslechu rozlišujeme přeslech na blízkém konci **NEXT (Near End Cross Talk)** a vzdáleném konci **FEXT (Far End Cross Talk)**. Přeslech **NEXT** je možné eliminovat pomocí frekvenčního dělení směru přenosu. Velikost přeslechu **FEXT** je proto pro přípojky **xDSL** stěžejní.

Modulační princip **VDMT** využívá propracovanosti matematického aparátu popisujícího parametry symetrických párů a vzájemné přeslechové vazby mezi páry. Při eliminaci je nutné rozlišovat směr přenosu.

Ve směru downstream **VDMT** využívá skutečnost, že zařízení **DSLAM** je společným prvkem pro všechny přípojky **xDSL** provozované ve svazku metalického kabelu. V **DSLAM** tedy máme k dispozici na jediném místě informaci o **DMT** symbolech, které budou v následujícím okamžiku vyslány do úseku metalického vedení (máme tedy vektor hodnot **DMT** symbolů – proto vektorová modulace **DMT**). Vzhledem k tomu, že v **DSLAM** známe také parametry jednotlivých symetrických párů a přeslechové vazby mezi nimi (známe je z procesu navazování spojení), je možné upravit vysílané **DMT** symboly s ohledem na přenosové prostředí, kterým budou přenášeny. Na přijímací straně v modemu koncového účastníka pak budou mít symboly teoreticky ideální průběh a parametry vhodné pro bezchybnou detekci. Problematika synchronizace vysílání je také snadněji řešitelná vzhledem k tomu, že **DSLAM** je centrálním prvkem. Synchronizace vysílání všech **DMT** symbolů je nutná. Vysílané symboly na sebe musejí prostřednictvím přeslechových vazeb definovaně působit tak, jak bylo vypočteno při jejich úpravě.

Ve směru upstream není možné upravovat vysílaný symbol v koncovém zařízení účastníka. To by kladlo zvýšené nároky na vybavení a výpočetní výkonnost koncového zařízení. Navíc koncové zařízení nikdy nemůže mít informace o symbolech, které jsou vysílány ostatními přípojkami v metalickém kabelu. Proto je nutné upravovat pouze přijímaný signál opět v **DSLAM** (centrálním prvku) za pomoci speciálního bloku potlačovače přeslechů. Důležitou otázkou je také nutná

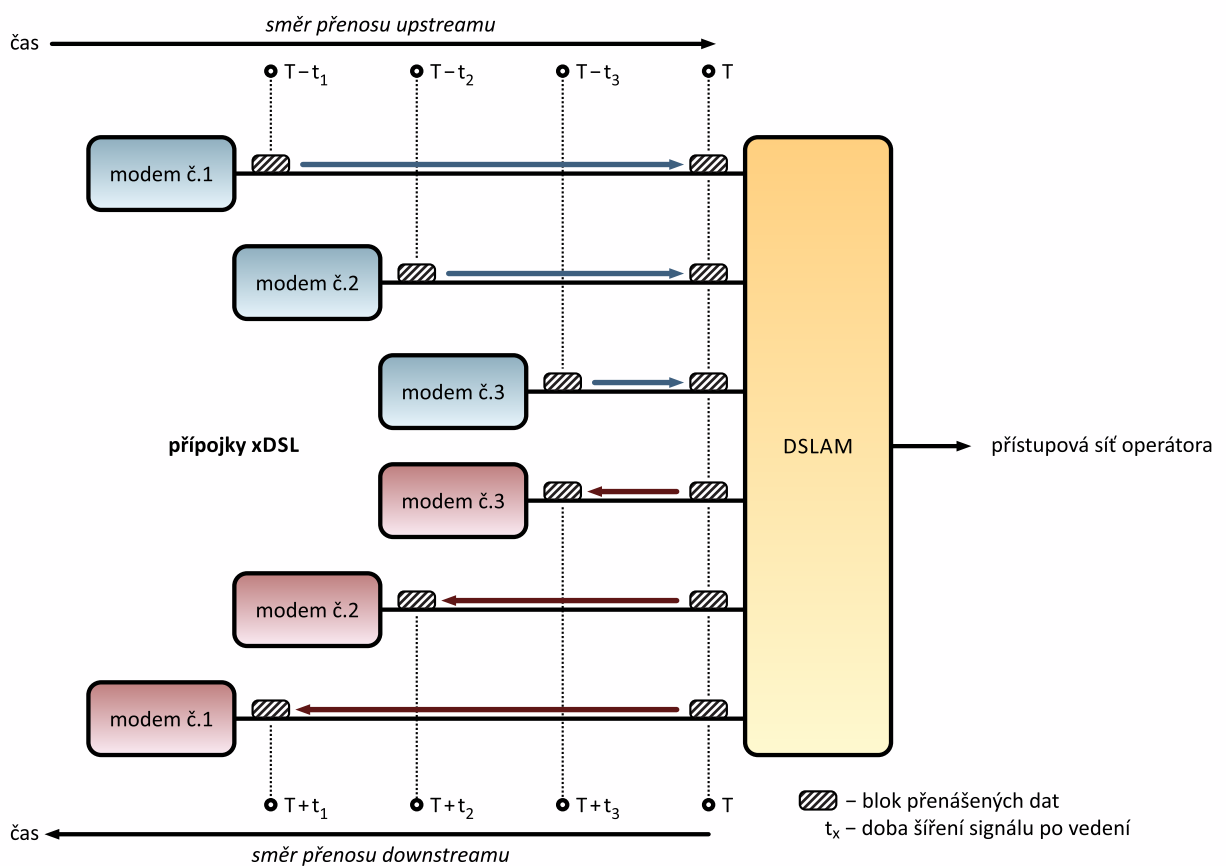
synchronizace vysílání od koncových účastníků směrem k **DSLAM** s ohledem na různé délky účastnických vedení.

VDMT je rozšířením modulace **DMT** na víceuživatelské prostředí, řeší problém systému typu **MIMO** a eliminuje přeslech typu **FEXT**. Přeslech typu **NEXT** je eliminován díky frekvenčnímu dělení směrů přenosu.

S ohledem na společné umístění modemů v **DSLAM** je možné zajistit synchronní vysílání **DMT** symbolů ve směru downstream. Zajistit synchronní přenos symbolů od uživatelů k přístupovému multiplexoru **DSLAM** je vzhledem k různým délkám jednotlivých přípojek složitější, ale lze například využít metodu Zipper FDD.

Synchronizace ve směru upstream má paralelu v postupech pro řízení přístupu k médiu ve sdíleném prostředí bod – mnoho bodů, jako jsou pasivní optické sítě a radiové sítě **LDMS** (*Local Multipoint Distribution System*). Vysílání v účastnických modemech musí být časováno s respektováním různých dob šíření signálů po vedení od různě vzdálených účastníků.

Metoda Zipper FDD využívá cyklickou příponu (**CS**). Ta je na rozdíl od cyklické předpony (**CP**) vkládána za **DMT** symbol. Délka **CS** musí být rovna nebo větší než je maximální rozdíl zpoždění v šíření signálu kanály. Metoda Zipper FDD eliminuje i zbytkový přeslech **NEXT**. Nevýhodou však je opětové snížení přenosové rychlosti.



Princip synchronizace symbolů přípojek xDSL ve směru upstream.

3.5 Výhody a nevýhody VDMT

Hlavní výhoda modulačního principu **VDMT** byla již zmíněna.

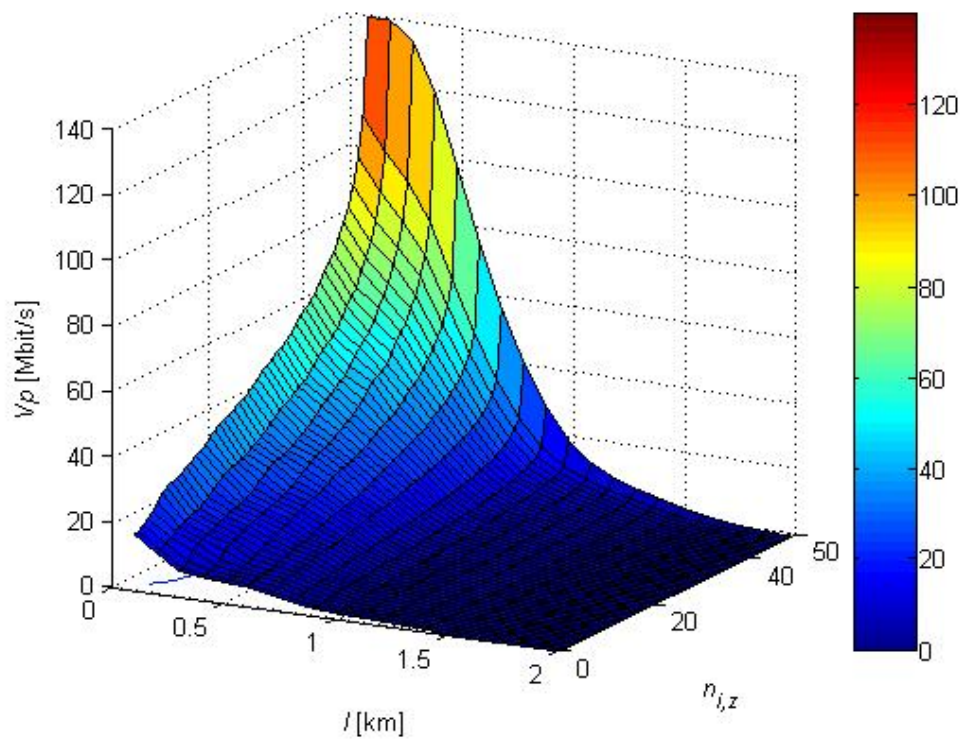


Smyslem modulačního principu **VDMT** je eliminovat rušení přeslechy a tím docílit vyšší dosažitelné přenosové rychlosti přípojek **xDSL**.

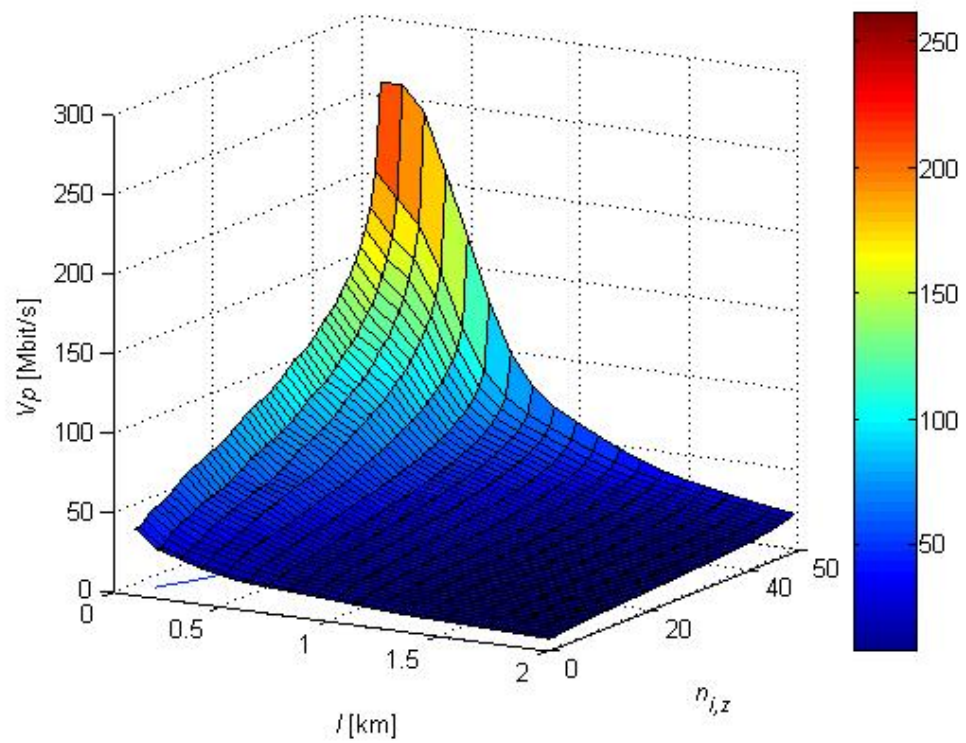
Proces potlačování přeslechů se nazývá termínem koordinace. U modulace **VDMT** tak hovoříme o koordinaci vysílání jednotlivých přípojek ve svazku metalického kabelu.

Vzhledem k tomu, že je možné principy a parametry přípojek popsat analytickými modely, lze relativně jednoduše i spočítat přínosy modulace **VDMT**. V závislosti na počtu koordinovaných přípojek se zvyšuje dosažitelná přenosová rychlost sledované přípojky. Následující simulace byla provedena pro přípojku **VDSL2** s kmitočtovým plánem B8-13, který má šířku pásma až do 30 MHz. Tento kmitočtový plán dovoluje běžně docílit přenosové rychlosti nad 100 Mbit/s. Grafická interpretace navyšování přenosové rychlosti pro směr upstream a downstream je zobrazena na následujících obrázcích.

Pro potřeby simulace byl uvažován svazek metalického kabelu o 50 symetrických párech s průměrem žil 0,4 mm (kabel TCEPKPFLE 50×4×0,4 mm). Přínosy koordinace byly modelovány i v závislosti na délce účastnické přípojky. Ta se pohybovala od 0,1 km do 2 km s krokem po 0,1 km. Počet koordinovaných přípojek se postupně zvyšoval od 0 do 49. Přičemž u padesáté přípojky sledujeme výkonnost přenosu (dosažitelnou přenosovou rychlost). Svazek metalického kabelu je tedy přípojkami **VDSL2** plně obsazen.



Přínosy koordinace pro směr upstream a přípojku VDSL2 B8-13.



Přínosy koordinace pro směr downstream a přípojku VDSL2 B8-13.

Při analýze přínosů **VDMT** lze pro tento modelový případ vyčíst, že pro délku účastnického vedení 0,5 km je možné bez jakékoliv koordinace (plné obsazení všech párů přípojkami **xDSL**) dosáhnout ve směru downstream přenosové rychlosti 16,676 Mbit/s. Pokud budeme koordinovat vysílání naší přípojky a jedné další přípojky, která způsobuje největší přeslech do naší sledované, budeme schopni dosáhnout přenosové rychlosti ve směru downstream 19,84 Mbit/s. Pokud budeme koordinovat vysílání od pěti okolních přípojek, dosáhneme 27,960 Mbit/s. Při koordinaci dvaceti sedmi dosáhneme rychlosti 50,868 Mbit/s. Pokud budeme provádět tzv. plnou koordinaci přípojek, dosáhne naše sledovaná přípojka ve směru downstream rychlosti 170,720 Mbit/s. Přínosy **VDMT** jsou tak zcela zřejmé.

Modulace **VDMT** má však i podstatné nevýhody.



Nevýhodou modulace **VDMT** je vysoká výpočetní náročnost při koordinaci vysílání.

Principem **VDMT** je upravit každý aktuálně vysílaný **DMT** symbol na každém symetrickém páru s ohledem na aktuální parametry přenosového prostředí. Je tedy zřejmé, že pro plnou koordinaci všech přípojek s **DMT** modulací je nutné znát funkce popisující přeslechové vazby mezi všemi páry vedení, přenosové funkce jednotlivých vedení a aktuálně vysílané **DMT** symboly všech koordinovaných přípojek. Pro metalické kabely s mnoha set symetrickými páry bude provádění plné koordinace provozu velmi náročné na výpočty související s úpravou **DMT** symbolů a na výpočty související se získáváním parametrů přenosového prostředí. Lze spočítat, že například pouze pro 50 přípojek **VDSL2** s počtem subkanálů 4096 a modulační rychlostí 4 kBd se bude muset každou sekundu provést v příslušném **DSLAM**, a to jen při úpravách vysílaných **DMT** symbolů, 40,960E9 matematických operací. Další výpočetní výkon pak je potřeba při navazování spojení, kontrolou a řízením aktuálních spojení, atd.



Modulace **VDMT** má přínosy pouze v situaci, kdy v přenosovém prostředí využívají všechny systémy **DMT** modulaci. Tato podmínka vyplývá ze samotného principu **VDMT**.