

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Vliv rušení na digitální účastnickou smyčku  
Noise Influence On Digital Subscriber Line**

**2014**

**Bc. Lukáš Hefka**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Lukáš Hefka**

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Vliv rušení na digitální účastnickou smyčku.  
Noise Influence On Digital Subscriber Line

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je zhodnotit a popsat rušení a jejich vliv na digitální účastnickou smyčku. Jedná se o posouzení vlivů vybraných šumů na kvalitu služby pro ADSL systémy. Součástí práce bude praktická realizace formou laboratorních měření. Výstup práce nabídne analytické zhodnocení vlivů jednotlivých rušení na sestavené komunikace.

Osnova:

1. Přehled a základní vlastnosti technologie ADSL.
2. Popis definovaných rušení a jejich vliv na kvalitu služby.
3. Realizace praktických měření na ADSL lince vkládáním jednotlivých rušení.
4. Zpracování podrobných analýz a protokolů.

Seznam doporučené odborné literatury:

GOLDEN, Philip, DEDIEU, Hervé, JACOBSEN, Krista S. *Fundamentals Of DSL Technology*. New York>Auerbach Publication, 2006. ISBN 0-8493-1913-7

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Přemysl Mer, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 30.4.2014



*Podpis*

## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Přemyslu Merovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

## Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby

„Souhlasím se zveřejněním této bakalářské/diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských/magisterských programech VŠB-TU Ostrava.“

Dne: *30.4.2014*



Podpis zástupce

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce pojednává o vlivu rušení na digitální účastnickou smyčku. V krátké teoretické části jsou popsány základní specifika technologie ADSL2+, objasněn vznik rušivých vlivů a klasifikovány jednotlivé druhy rušení ovlivňující parametry digitální účastnické smyčky. V hlavní části práce je za použití generátoru šumu Spirent DSL 5103 simulován vliv celkem jedenácti druhů rušení mezi které patří bílý šum, přeslechy na vedení a impulzní rušení. Při prováděných měřeních byl sledován vliv těchto vybraných druhů rušení na dosah a přenosovou rychlost digitální účastnické přípojky, přičemž tato měření doplňuje analýza vlivu jednotlivých druhů rušení na hodnotu SNR subkanálů DMT modulace.

## **Klíčová slova**

Vliv rušení, digitální účastnická smyčka, ADSL, bílý šum, přeslechy na vedení, impulzní rušení.

## **Abstract**

This thesis discusses the impact of interference on parameters of digital subscriber line. In a short theoretical part this thesis describes the basic specifics of ADSL2+ technology, the origin of interference and classifies the various kinds of interference affecting parameters of digital subscriber line. In the main part, noise generator Spirent DSL 5103 simulated eleven kinds of interference, including white noise, crosstalk and impulse noise. This practical measurements studied the influence of the chosen kind of influence on achievable bit rate and range of digital subscriber line. These measurements are further developed by analysing the changes in SNR value of DMT subchannels caused by the interference.

## **Key words**

Noise influence, digital subscriber line, ADSL, white noise, crosstalk, impulse noise.

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
f	Hz	Frekvence
SNR	dB	Odstup signál - šum

## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Anglický význam	Český význam
ISDN	Integrated Services Digital Network	Digitální síť integrovaných služeb
xDSL	Digital Subscriber Line	Digitální účastnická přípojka
HDSL	High bit rate Digital Subscriber Line	Vysokorychlostní digitální účastnická přípojka
SHDSL	Single pair HDSL	Jednopárová vysokorychlostní digitální účastnická přípojka
VoD	Video on Demand	Služba videa na přání
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line	Asymetrická digitální účastnická přípojka
VDSL	Very high speed Digital Subscriber Line	Digitální účastnická přípojka s velmi vysokými přenosovými rychlostmi
ATU-C	ADSL Termination Unit - Central	Zakončovací jednotka ADSL na straně poskytovatele
ATU-R	ADSL Termination Unit - Remote	Zakončovací jednotka ADSL na straně účastníka
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer	Koncentrátor digitálních účastnických přípojek
CRC	Cyclic Redundancy Check	Cyklický redundantní součet
FEC	Forward Error Correction	Dopředná korekce chyb
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Kvadrurní amplitudová modulace
DMT	Discrete multi-tone modulation	Diskrétní multitónová modulace
EC	Echocompensation	Echokompenzace
AWGN	Additive White Gaussian Noise	Adaptivní bílý Gaussův šum
NEXT	Near End CrossTalk	Přeslech na blízkém konci

---

FEXT	Far End CrossTalk	Přeslech na vzdáleném konci
POTS	Plain old telephone service	Analogová telefonní síť

---

# Obsah

Úvod.....	1
1 Technologie xDSL .....	2
1.1 Referenční model xDSL.....	2
1.2 Dělení technologií xDSL.....	3
1.3 Přehled technologií xDSL .....	4
1.3.1 Technologie HDSL.....	4
1.3.2 Technologie SHDSL.....	4
1.3.3 Technologie ADSL, ADSL2, ADSL2+.....	4
1.3.4 Technologie VDSL, VDSL2 .....	5
2 Technologie ADSL2+ .....	6
2.1 Struktura ADSL2+ .....	6
2.1.1 Splitter .....	7
2.1.2 ADSL Modem .....	8
2.1.3 DSLAM .....	9
2.2 Frekvenční spektrum a modulace signálu v ADSL2+.....	10
2.2.1 Rozdělení frekvenčního spektra ADSL2+.....	10
2.2.2 Diskrétní vícetónová modulace DMT .....	11
2.2.3 Modulace QAM.....	13
3 Druhy rušení působící na technologii ADSL2+.....	15
3.1 Druhy rušivých vlivů.....	15
3.2 Vnitřní rušivé vlivy .....	16
3.2.1 Aditivní bílý šum.....	16
3.2.2 Přeslech typu NEXT a FEXT .....	17
3.3 Vnější rušivé vlivy.....	18
3.3.1 Impulzní rušení.....	18
3.3.2 Vysokofrekvenční rušení RFI.....	18
4 Měření vlivu rušení na digitální účastnickou smyčku .....	20

4.1	Metodika prováděných měření .....	20
4.2	Schéma měření a použité měřicí přístroje .....	21
4.3	Nastavené parametry .....	21
4.4	Charakteristika aplikovaných rušení .....	22
4.4.1	Bílý šum.....	22
4.4.2	Přeslechy na vedení .....	22
4.4.3	Impulzní rušení.....	24
4.5	Průběh měření.....	25
4.6	Měření referenční účastnické smyčky .....	25
4.6.1	Vliv délky účastnického vedení na přenosovou rychlost.....	25
4.6.2	Vliv délky účastnického vedení na hodnotu SNR subkanálů DMT modulace.....	27
4.7	Měření vlivu bílého šumu na digitální účastnickou smyčku .....	30
4.7.1	Měření dosažitelné přenosové rychlosti při rušení na straně účastníka.....	30
4.7.2	Měření dosažitelné přenosové rychlosti při rušení na straně poskytovatele.....	32
4.7.3	Analýza hodnot SNR subkanálů DMT při rušení na straně účastníka .....	33
4.7.4	Analýza hodnot SNR subkanálů DMT při rušení na straně poskytovatele .....	36
4.8	Měření vlivu přeslechů na digitální účastnickou smyčku .....	39
4.8.1	Měření dosažitelné přenosové rychlosti při rušení na straně účastníka.....	39
4.8.2	Měření dosažitelné přenosové rychlosti při rušení na straně poskytovatele.....	42
4.8.3	Analýza hodnot SNR subkanálů DMT při rušení na straně účastníka .....	43
4.8.4	Analýza hodnot SNR subkanálů DMT při rušení na straně poskytovatele .....	45
4.9	Měření vlivu impulzního rušení na digitální účastnickou smyčku .....	47
4.9.1	Měření dosažitelné přenosové rychlosti při rušení na straně účastníka.....	48
4.9.2	Měření dosažitelné přenosové rychlosti při rušení na straně poskytovatele.....	49
4.9.3	Analýza hodnot SNR subkanálů DMT při rušení na straně účastníka .....	51
4.9.4	Analýza hodnot SNR subkanálů DMT při rušení na straně poskytovatele .....	54
	Závěr.....	58
	Použitá literatura .....	60

Přílohy .....	i
Seznam příloh.....	ii

---

# Úvod

Cílem této diplomové práce je stanovit vliv rušení na digitální účastnickou smyčku. Tato diplomová práce navazuje na diplomovou práci se shodným názvem zpracovanou v roce 2008 panem Ing. Lukášem Horvátém. Autor v této diplomové práci podrobně zpracovává teoretickou část řešené problematiky. Velmi obsáhle je zde popsána funkce technologie ADSL, vznik a případné projevy rušení ovlivňující parametry digitálních účastnických přípojek xDSL. Na závěr autor provedl sérii poměrně krátkých měření, které svým rozsahem pokrývají pouze zlomek projevů rušení na digitální účastnickou smyčku. Vzhledem k tomuto faktu je tato navazující diplomová práce důsledněji zaměřená na praktickou část měření. V teoretické části jsou uvedeny pouze základní informace bezprostředně se vztahující k prováděným měřením.

Úvodní kapitola této práce popisuje základní specifika technologií z rodiny xDSL. Je zde popsán referenční model technologií xDSL, jejich základní dělení a chronologický přehled vývoje technologií xDSL. Druhá kapitola je věnována technologii ADSL2+. Zde je uvedena struktura této přípojky spolu s objasněním funkce jednotlivých prvků a jejich vztahu k referenčnímu modelu xDSL. Dále je v této kapitole popsáno rozdělení frekvenčního spektra technologie ADSL2+ dle jednotlivých standardů a vysvětlen princip použitého modulačního schématu. Předmětem poslední teoretické kapitoly jsou rušivé vlivy působící na digitální účastnickou přípojku. V této kapitole je uveden soupis jednotlivých druhů rušení, vysvětlen princip jejich vzniku a charakteristika jejich projevu na parametrech digitální účastnické přípojky.

Poslední kapitola této diplomové práce je věnována samotným praktickým měřením vlivu rušení na digitální účastnickou smyčku. V této kapitole je popsána metodika prováděných měření, schéma měření a výchozí parametry digitální účastnické přípojky. Dále jsou zde charakterizovány vybrané druhy rušení, jejichž vliv byl následně při praktických měřeních sledován. Jmenovitě se jedná o bílý šum o pěti různých úrovních, tři modely přeslechu na vedení a čtyři modely impulzního rušení. Pro každý typ rušení je zde provedena série měření a následná analýza s cílem určit, jak daný typ rušení ovlivní dosažitelnou přenosovou rychlost a dosah digitální účastnické přípojky, a také jak se daný typ rušení projeví na zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace.

---

# 1 Technologie xDSL

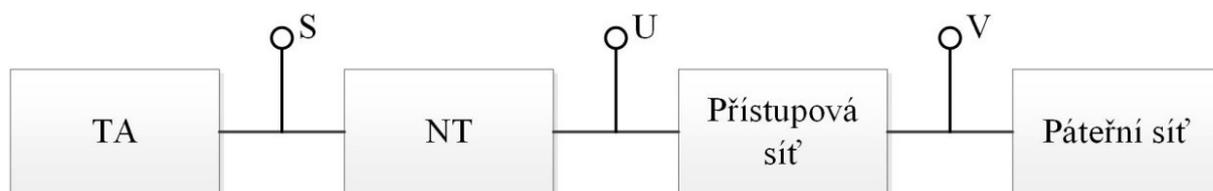
Technologie xDSL se řadí mezi technologie přístupových sítí. První technologie rodiny xDSL byly standardizovány zhruba v 80. letech minulého století v podobě technologie HDSL, což je moderněji koncipovaná náhrada technologie ISDN.[1] Hlavním impulzem k jejich vývoji byla potřeba dosažení vyšších přenosových rychlostí s ohledem na rozrůstající se poptávku po multimediálních službách (rozvoj internetu).

Technologie xDSL se nasazují na stávající účastnická vedení a mohou zde koexistovat spolu s technologií analogové pevné linky, případně technologií ISDN. Charakteristickým znakem technologií xDSL je efektivní využití frekvenčního pásma, což umožňuje dosáhnout přenosových rychlostí v řádech Mbit/s. Cílem této kapitoly je stručný úvod do problematiky xDSL a přehled technologií patřících do rodiny xDSL.

## 1.1 Referenční model xDSL

Základní struktura technologií xDSL je převzata z modelu technologie ISDN.[1] Zásadním rozdílem technologií ISDN a xDSL je samotný způsob přenosu dat od uživatele do páteřní sítě poskytovatele. Zatímco u technologie ISDN jsou data přenášena až k telefonní ústředně a následně prochází telefonní sítí, u technologií xDSL jsou data po telefonním kabelu přenášena pouze k nejbližšímu bodu, kde je možné a výhodné umístit koncentrační jednotku, která přijatá data z telekomunikační sítě extrahuje, a nadále jsou data přenášena datovou páteřní sítí.

Referenční model xDSL definuje doporučení ITU-T G.995.1 a je zobrazen na obr 1.1.[1] Skládá se ze čtyř základních bloků označených: TA - terminálový adaptér, NT - síťové zakončení, přístupové sítě a páteřní sítě. Dále jsou zde definována základní rozhraní S, U a V.



Obrázek 1.1: Referenční model xDSL

Terminálový adaptér představuje koncové zařízení uživatele. Běžně se jedná o počítač či jiné zařízení využívající datové konektivity. Síťové zakončení je ve struktuře technologií xDSL realizováno DSL modemem, který slouží k převodu dat z formátu koncového zařízení do rámce dané technologie xDSL. Přístupová síť je tvořena účastnickým vedením a slouží jako přenosové medium pro přenos dat do páteřní sítě. Rozhraní S mezi terminálovým adaptérem a síťovým zakončením

specifikuje technologii použitou k připojení koncového zařízení uživatele k DSL modemu. Rozhraní U specifikuje parametry účastnického vedení – například použitý počet párů, případně typ konektorů. Rozhraní V mezi přístupovou sítí a pátevní sítí definuje zařízení pro převod přenášených dat z formátu technologie xDSL do formátu dat použitý v pátevní síti.

## 1.2 Dělení technologií xDSL

K dělení technologií xDSL je možno přistupovat několika různými způsoby. Pro základní přehled a orientaci postačí pohled z hlediska vhodnosti nasazení a využitého kmitočtového pásma.

Pro rozdělení xDSL technologií z hlediska vhodnosti nasazení je klíčovým parametrem poměr přenosových rychlostí v sestupném (downlink) a vzestupném směru (uplink). Pokud se podíváme na potřeby datového připojení běžného domácího uživatele zjistíme, že je z velké části pouze konzumentem obsahu poskytovaného jiným subjektem na síti, například webovým serverem. V takovém případě je patrná potřeba velké přenosové rychlosti hlavně ve směru sestupném. Pro vzestupný směr, který slouží v tomto případě pouze pro zadávání příkazů, postačuje nižší přenosová rychlost. V případě firemních zákazníků je situace poněkud jiná. Často provozují vlastní služby, např. VoIP, mailové služby nebo VPN, což klade nároky také na vzestupný směr. Vzhledem k těmto požadavkům můžeme technologie xDSL dělit na:

- symetrické přípojky (HDSL, SHDSL, VDSL),
- asymetrické přípojky (ADSL, VDSL).

Symetrické přípojky poskytují stejné rychlosti jak v sestupném, tak ve vzestupném směru a jsou tak vhodné pro firemní uživatele. Asymetrické přípojky poskytují výrazně vyšší přenosové rychlosti v sestupném směru a jsou tak vhodné hlavně pro domácí uživatele. Výjimkou je technologie VDSL, která umožňuje uživatelsky definovat přenosové rychlosti uplinku a downlinku.

Dalším možným dělením je dělení z hlediska metody přenosu. Zde můžeme technologie xDSL dělit na pracující:

- v základním pásmu ( HDSL, SHDSL),
- v přeloženém kmitočtově pásmu (ADSL, VDSL).

Technologie pracující v základním pásmu využívají kmitočtové pásmo 300 - 3400 Hz, které běžně slouží pro provoz analogové telefonní přípojky. Po nasazení těchto technologií tedy není možné využívat služeb analogové telefonní přípojky.

V případě technologií pracujících v přeloženém kmitočtovém pásmu došlo k jejich posunu nad hovorové pásmo 300 - 3400 Hz, což umožňuje sdílení vedení s analogovou telefonní přípojkou či, v některých případech, se základní přípojkou ISDN.[1]

### 1.3 Přehled technologií xDSL

V této kapitole je uveden základní přehled technologií z rodiny xDSL. Jsou zde popsány základní vlastnosti dané technologie - doba vzniku, vhodnost nasazení technologie, umístění v kmitočtovém pásmu, dosažitelné přenosové rychlosti a současné využití.

#### 1.3.1 Technologie HDSL

HDSL (High bit rate Digital Subscriber Line) je nejstarší technologie z rodiny xDSL. Prvně byla popsána společností Bellcore již koncem 80. let minulého století. Přímo vychází z technologie ISDN, cílem bylo nahradit technologii ISDN-PRA, používající linkový kód HDB3, výkonnějším a pokročilejším způsobem přenosu. Vedle čtyřstavového linkového kódu 2B1Q bylo použito rozdělení celkového digitálního toku na oba páry přístupového kabelu. Mezi hlavní výhody patří menší šířka obsazeného kmitočtového pásma a možnost přenosu na vzdálenost až osmi kilometrů bez opakovaců. Technologie HDSL se řadí mezi symetrické přípojky, tudíž je vhodnější pro firemní zákazníky. Jedná se o technologie pracující v základním kmitočtovém pásmu. Maximální přenosová rychlosti činí 2048 kbit/s v obou směrech přenosu. V současné době je díky nízké přenosové rychlosti možné využití pouze jako záložní datový spoj pro řídicí účely.

#### 1.3.2 Technologie SHDSL

Technologie SHDSL (Single pair HDSL) je evolucí technologie HDSL. Jak již název napovídá, jedním ze základních rozdílů je použití pouze jednoho páru v přístupovém kabelu. I přes toto omezení dosahuje technologie SHDL obdobných přenosových rychlostí jako technologie HDSL, tudíž přibližně 2 Mbit/s symetricky v obou směrech. Umožňuje to použití výkonnější 16stavové pulsně-amplitudové modulace s mřížkovým kódováním (16-TC PAM). Díky své koncepci je technologie SHDSL vhodná spíše pro firemní použití.

#### 1.3.3 Technologie ADSL, ADSL2, ADSL2+

Technologie ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) a její pozdější modifikace (ADSL2, ADSL2+) je v současné době jednou z nejrozšířenějších technologií z rodiny xDSL. Tato přípojka se řadí mezi asymetrické technologie pracující v přeloženém frekvenčním pásmu a vyznačuje se možností dosáhnout velkých přenosových rychlostí v sestupném směru (až 26 Mbit/s u verze ADSL2+), naopak vzestupný směr dosahuje napříč všemi verzemi přenosové rychlosti okolo

1,5 Mbit/s. Technologie je tak primárně určena pro běžné domácí zákazníky. Této technologii je v mé diplomové práci věnována samostatná kapitola, ve které jsou uvedena ostatní specifika technologie ADSL2+.

#### 1.3.4 Technologie VDSL, VDSL2

Technologie VDSL (Very high speed Digital Subscriber Line) a její další vylepšení (VDSL2) jsou nejnovější technologie z rodiny xDSL. Tato technologie pracuje v přeloženém frekvenčním pásmu a dokáže poskytnout z rodiny xDSL nejvyšší přenosové rychlosti. Tato technologie rovněž dokáže pracovat se symetrickými i nesymetrickými přenosovými rychlostmi. V symetrickém režimu je maximální uváděná přenosová rychlost až 26 Mbit/s v obou směrech. V nesymetrickém režimu potom až 52 Mbit/s ve směru od poskytovatele k účastníkovi (downstream) a 6,4 Mbit/s ve směru od účastníka k poskytovateli (upstream). Možnost takovéto konfigurace umožňuje nasazení technologie VDSL jak pro firemní, tak i domácí zákazníky.

---

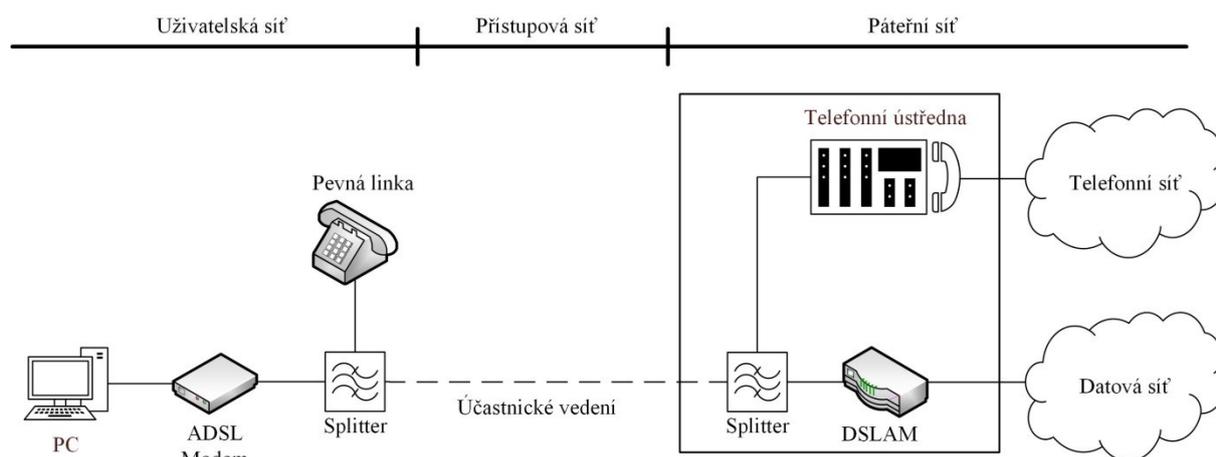
## 2 Technologie ADSL2+

Jak již bylo řečeno v úvodní části, technologie ADSL a její pozdější modifikace jsou nejrozšířenější technologie z rodiny xDSL. Původně měla tato technologie sloužit pro službu VoD (Video On Demand), což je služba určená pro přenos digitalizovaného videa s kompresí MPEG2.[1] Později se však ukázalo, že technologie ADSL je vhodná pro poskytování přístupu k internetu a tato funkce je dnes její hlavní doménou.

Technologie ADSL využívá, stejně jako ostatní technologie z rodiny xDSL, již existujících metalických symetrických párů instalovaných v přístupové síti. Přenášená data jsou pomocí modemu převáděna do přeloženého kmitočtového pásma, což umožňuje, kromě zachování služeb analogové telefonie a v některých případech také základní přípojky ISDN, využít velkou šířku pásma a dosáhnout tak vysokých přenosových rychlostí.

### 2.1 Struktura ADSL2+

Struktura přípojky ADSL2+ vychází z referenčního modelu xDSL. Funkce terminálového adaptéru a síťového zakončení jsou integrovány do ADSL modemu (označován také jako ATU-R). Přístupovou síť zde tvoří účastnické vedení. Rozhraní V mezi přístupovou a páteřní sítí je realizováno DSLAMem - koncentrátorem účastnických přípojek (označován také jako ATU-C). Typické uspořádání ADSL přípojky ukazuje obr. 2.1.[1][2]



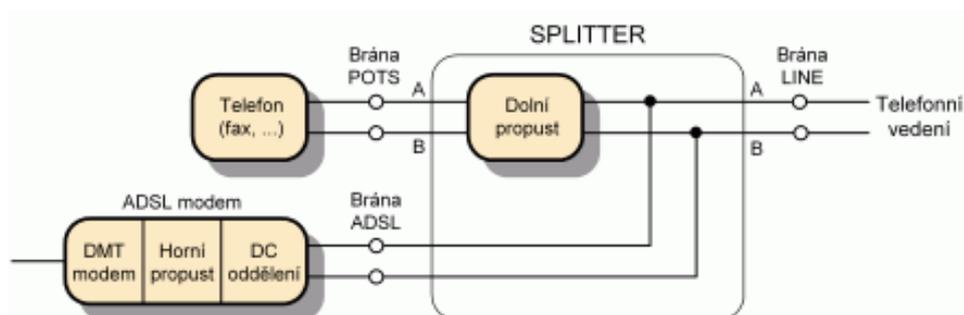
Obrázek 2.1: Struktura přípojky ADSL2+

Vzhledem ke koexistenci technologie ADSL a služeb analogové telefonie na účastnickém vedení bylo nutné přidat filtrační prvek - splitter. Splitter tyto jednotlivé technologie na hraničních místech přístupového vedení frekvenčně oddělí a zamezí tak ovlivňování koncových zařízení nežádoucím signálem. Jedná se o pásmovou propust o typicky třech portech, která na jeden port

propouští pouze nižší kmitočty (analogové telefonie, případně ISDN), na druhý port jsou propouštěny pouze vysokofrekvenční složky - ADSL.

### 2.1.1 Splitter

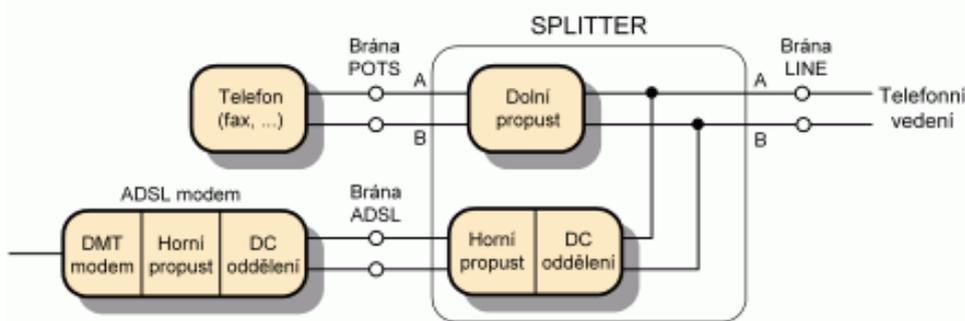
ADSL splitter je zařízení, kmitočtově rozdělující (v opačném směru opět slučující) ADSL a telefonní služby. Jeho úlohou je zabránit interferencím obou systémů při jejich vzájemné koexistenci na jedné účastnické přípojce. Zároveň zajišťuje impedanční přizpůsobení komponentů k nim připojených. Základem ADSL splitterů je pasivní kmitočtový filtr typu dolní propust, který propustí pouze telefonní signály a provoz ADSL silně utlumuje.[3] Konfigurace základního splitteru ukazuje obr. 2.2.



Obrázek 2.2: Jednoduchý splitter s dolní propustí

Většina ADSL modemů obsahuje na svém vstupu horní propust spolu s filtrem oddělujícím stejnosměrnou složku. Požadujeme-li důkladnější filtraci, existují pokročilejší návrhy splitterů.

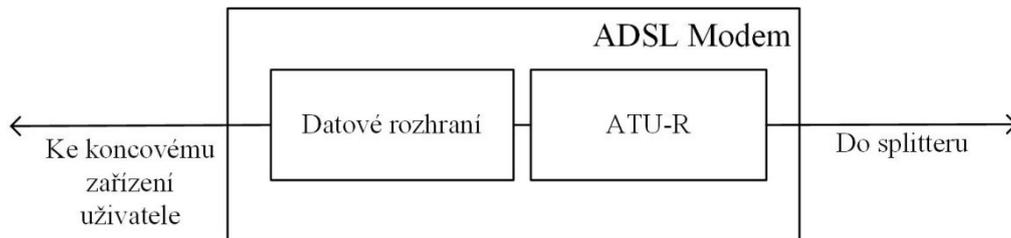
Do splitterů je možno přidat blok pro oddělení stejnosměrné složky realizovaný oddělujícími kondenzátory a také jednoduchou horní propust. Zajistíme tak, aby nízkofrekvenční telefonní signál ještě méně pronikal do ADSL modemu. Konfigurace takovéhoho splitteru je na obr. 2.3.



Obrázek 2.3: Splitter s DC oddělením a horní propustí

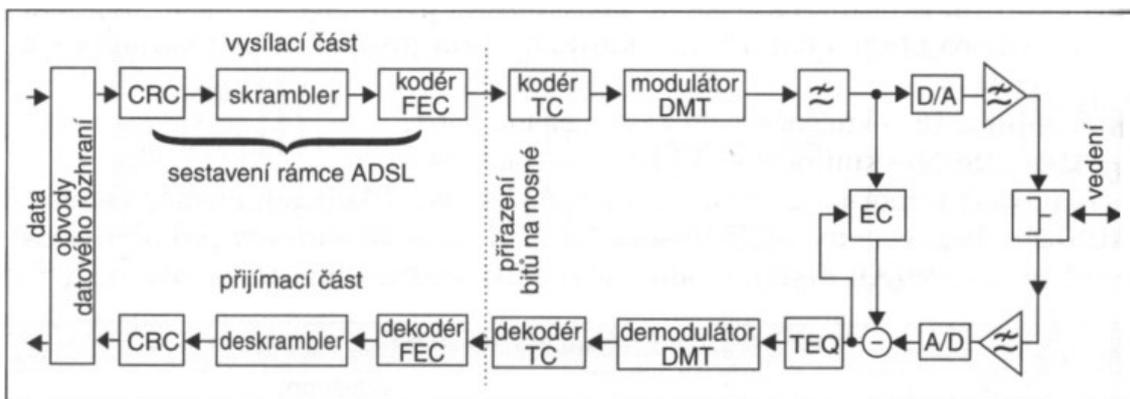
## 2.1.2 ADSL Modem

ADSL modem neboli modem pro digitální účastnickou přípojku je zařízení používané k připojení počítače či jiného zařízení k DSL lince. Umožňuje-li modem připojení více počítačů, označujeme ho jako DSL router.[4]



Obrázek 2.4: Blokové schéma ADSL modemu

Na obr. 2.4 je znázorněno blokové schéma ADSL modemu. ADSL modem se skládá ze dvou základních částí – jednotky ATU-R, která zajišťuje samotný příjem a vysílání dat přes účastnické vedení a datového rozhraní, které zajišťuje připojení a přenos dat ke koncovému zařízení uživatele.[1] Koncové zařízení se k ADSL modemu připojuje nejčastěji pomocí technologie USB, Ethernet nebo Wi-fi.

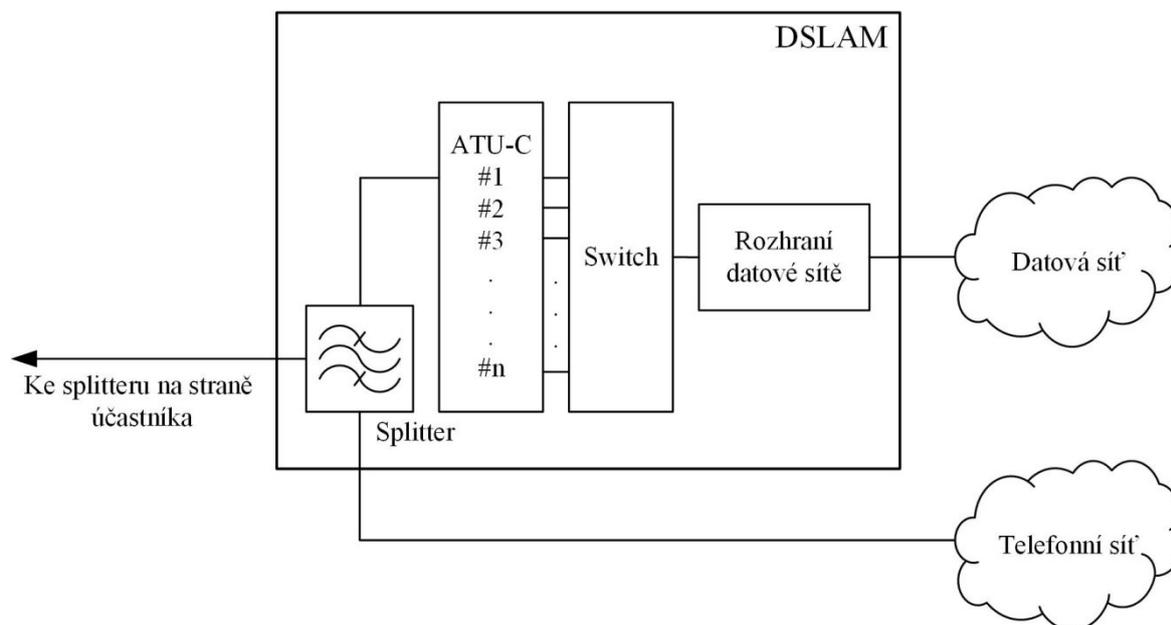


Obrázek 2.5: Blokové schéma části ATU-R

Na obr. 2.5 je uvedeno blokové schéma jednotky ATU-R ADSL modemu. ADSL modem provádí se signálem před jeho vysláním na vedení mnoho operací. Prvním úkolem ADSL modemu je sestavení ADSL rámce. Příchozí data jsou vybavena blokem CRC pro detekci chyb, skramblována a následně zabezpečena v bloku FEC, který slouží pro následnou korekci chyb v přijímači. Dalším úkolem ADSL modemu je samotné odeslání ADSL rámce, kterému předchází rozdělení bitů ADSL rámce do subbloků a jejich přiřazení na jednotlivé subnosné, kde jsou modulovány pomocí modulace QAM.[1]

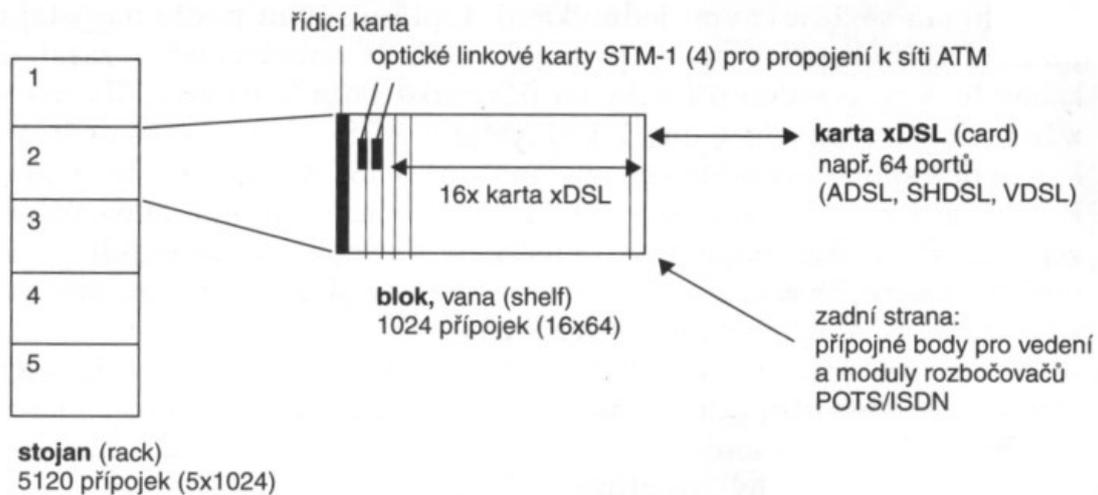
### 2.1.3 DSLAM

DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) je přístupový koncentrátor instalovaný na straně poskytovatele ADSL služeb. Podle počtu připojených účastníků DSLAM obsahuje až tisíce ADSL modemů, které zaručují převod přenášených dat do nebo z formátu rámce ADSL. Dále DSLAM slučuje DSL linky do ATM buněk (standard Asynchronous Transfer Mode) a využívá protokoly frame relay nebo Internet Protocol. Záleží čistě na architektuře daného zařízení a jeho konfiguraci. V praxi je nejčastěji použita technologie ATM.[5]



Obrázek 2.6: Blokové schéma DSLAMu

Na obr. 2.6 je uvedeno blokové schéma DSLAMu. DSLAM obsahuje množství splitterů, jejichž úkolem je vyfiltrovat pouze kmitočtové pásmo ADSL a signály analogové telefonie, případně ISDN směřovat do analogové telefonní sítě. DSLAM dále obsahuje množství jednotek ATU-C (záleží na počtu uživatelů připojených k DSLAMu), které plní stejnou funkci jako jednotky ATU-R u ADSL modemu, tudíž převod dat z rámce ADSL do formátu datové sítě. Za jednotkami ATU-C následuje prvek switch, což je spínací prvek pracující ve standardu dané páteřní sítě. Jeho úkolem je multiplexovat data přicházející z jednotlivých modulů ATU-C a předávat je rozhraní datové sítě, které zajišťuje jejich přenos do datové sítě. [5]



Obrázek 2.7: Realizace DSLAMu

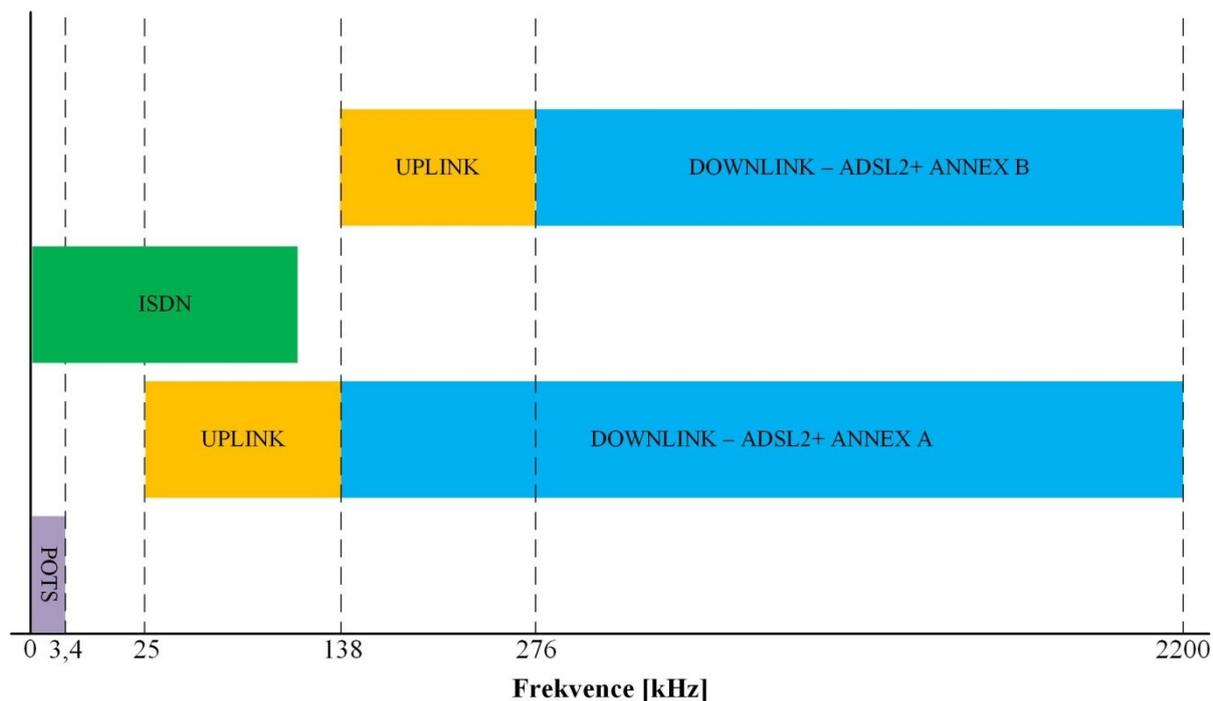
Na obr. 2.6 je možno vidět typickou realizaci DSLAMu. DSLAM je tvořen stojanovým rackem, který je rozdělen do určitého počtu bloků. Každý blok má několik slotů, do kterých je možno zasouvat xDSL karty. Na těchto kartách může být umístěno 16 až 72 xDSL modemů, tudíž umožňují připojení až 72 účastníků. Dalším druhem karet jsou karty poskytující konektivitu k páteřní síti. Zde záleží na použité technologii, může se jednat o ATM karty s optickým výstupem (tak jako na obr. 2.6), nebo například IP kartu určenou pro metalické vedení.[1]

## 2.2 Frekvenční spektrum a modulace signálu v ADSL2+

Jak již bylo řečeno v úvodní kapitole, technologie ADSL2+ koexistuje na vedení spolu s analogovou telefonní přípojkou, případně také s digitální přípojkou ISDN. Při návrhu frekvenčního spektra bylo tedy nutno počítat s frekvenčními pásmy, které tyto systémy využívají a umožnit tak jejich bezproblémovou funkci. Dalším limitujícím faktorem je samotné telefonní vedení. Toto vedení nikdy nebylo určeno k vysokorychlostnímu přenosu dat, které využívají velkou šířku pásma, tudíž je zde vzhledem k omezení maximálního přenositelného kmitočtu kritická volba výkonného a odolného modulačního systému.

### 2.2.1 Rozdělení frekvenčního spektra ADSL2+

Navržení frekvenčního spektra se odvíjí od vymezení hovorového a nadhovorového pásma. V současné době jsou nejrozšířenější dvě frekvenční schémata systému ADSL2+. Prvním z nich je ANNEX A. Toto frekvenční schéma umožňuje zachování funkce analogové telefonie pracující v pásmu 0,3 – 3,4 kHz. Druhé frekvenční schéma je označeno ANNEX B a umožňuje koexistenci technologie ADSL2+ s technologií ISDN pracující ve frekvenčním rozsahu 0 – 80 kHz. Na obr. 2.8 je znázorněno rozložení jednotlivých modelů frekvenčního spektra.[2]



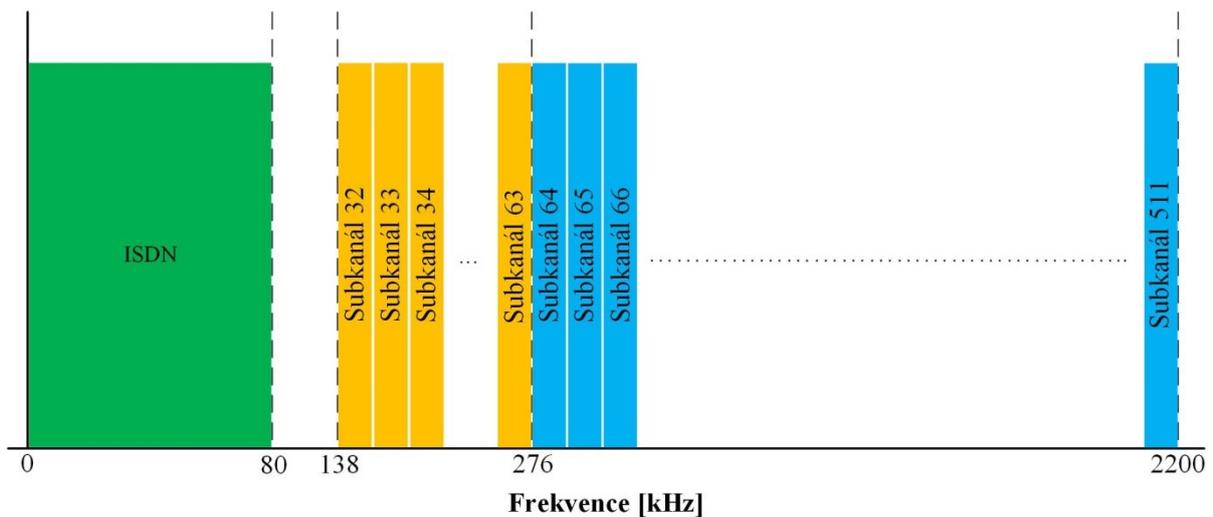
Obrázek 2.8: Rozdělení frekvenčního spektra

Frekvenční osa má v případě tohoto schématu pouze informační hodnotu. Fialovou barvou je znázorněno frekvenční pásmo využívané analogovou telefonní sítí. Zelenou barvou je znázorněno frekvenční pásmo využívané technologií ISDN. Vidíme, že v případě standardu ANNEX A frekvenčně začíná technologie ADSL na kmitočtu 25 kHz a končí na 2,2 MHz. Kmitočtové pásmo od 25 kHz do 138 kHz je vyhrazeno pro směr přenosu uplink, pásmo od 138 kHz do 2,2 MHz je vyhrazeno pro směr přenosu downlink. V případě standardu ANNEX B je zohledněna šířka pásma technologie ADSL a pásmo uplink je posunuto na kmitočty 138 až 276 kHz. Pro pásmo downlink je v případě standardu ANNEX B vyhrazeno pásmo od 276 kHz do 2,2 MHz.

Dva výše uvedené standardy rozdělení kmitočtového spektra pracují na principu FDD, tedy frekvenčního oddělení pásma uplink a downlink. U prvotní verze technologie ADSL byly ovšem definovány také standardy pracující na principu EC - echokompence. Ta umožňuje kmitočtové překrývání obou přenosových směrů, kde pásmo uplink sdílí své kmitočtové pásmo s pásmem downlink a to tak využívá celé kmitočtové pásmo vyhrazené pro technologie ADSL.

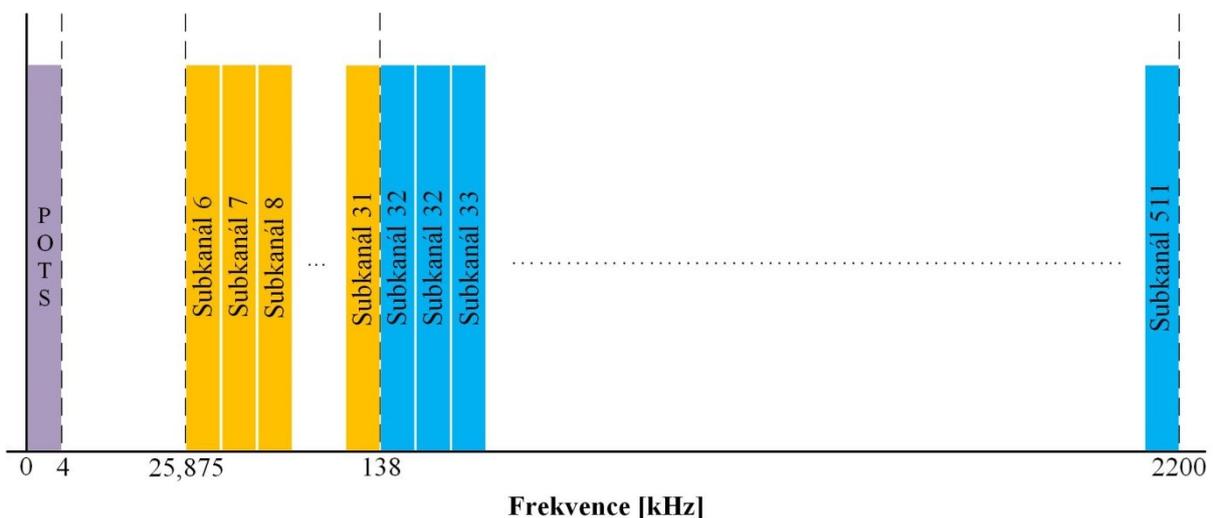
### 2.2.2 Diskrétní vícetónová modulace DMT

Modulace DMT principiálně rozděluje celé frekvenční pásmo na řadu subpásem s konstantní frekvenční šířkou. V těchto subpásmech, označovaných také jako subkanály, se u technologie ADSL následně provádí modulace uživatelských dat pomocí kvadraturně amplitudové modulace (QAM). Modulace DMT se realizuje pomocí inverzní Fourierovy transformace (v diskrétní formě - IDFT).[6]



Obrázek 2.9: Rozdělení subkanálů – ANNEX B

Na obr. 2.9 vidíme rozdělení kmitočtového pásma pomocí DMT modulace pro standard ANNEX B. Při následně prováděných měřeních byl využit právě tento standard, proto bude pozornost soustředěna hlavně na něj. Frekvenční pásmo je dle této notace rozděleno na 512 subkanálů s indexy 0 až 511, kde frekvenční rozsah 0 subkanálu je 0 až 4,3125 kHz a posledního subkanálu s indexem 511 2199,375 až 2203,6785 kHz. Prvních 32 subkanálů (0 - 31) je rezervováno pro technologii ISDN, tudíž technologie ADSL2+ využívá zbývajících 480 subkanálů s indexy 32 až 511. Pro pásmo uplink je vyčleněno 32 subkanálů s indexy 32 až 63, zbývajících 448 subkanálů je vyčleněno pro pásmo downlink.[2]



Obrázek 2.10: Rozdělení subkanálů – ANNEX A

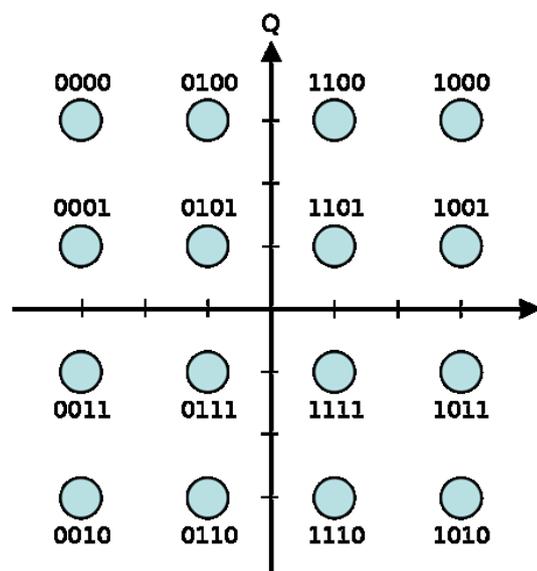
Na obr. 2.10 je uvedeno frekvenční rozdělení pro standard ANNEX A. V případě standardu ANNEX A došlo k posunu vyžívaných subkanálů směrem k nižším kmitočtům, jelikož analogová telefonní síť pracuje pouze v úzkém frekvenčním pásmu 0 až 4 kHz. Po přičtení dostatečné frekvenční

rezervy jsou pro pásmo uplink vyhrazeny subkanály s indexem 6 až 31 a pro pásmo downlink subkanály s indexy 32 až 511. V případě standardu ANNEX A má tak technologie ADSL2+ k dispozici celkově 506 subkanálů, což ji umožňuje, v porovnání se standardem ANNEX B, dosahovat mírně vyšších přenosových rychlostí, a to hlavně v pásmu downlink.[2]

Pomocí modulace DMT lze efektivněji řešit negativní vlivy nedokonalé přenosové cesty a také rušící vliv okolí na užitečný signál při přenosu symetrickým párem v metalické přístupové síti. Vzájemná nezávislost jednotlivých subkanálů dovoluje, podle aktuálního poměru signálu a šumu (SNR), používat pro každý subkanál rozdílně složitá modulační schéma a korigovat tak vliv rušení. V případě technologie ADSL2+ je pro modulaci dat v jednotlivých subkanálech použita modulace QAM.[2]

### 2.2.3 Modulace QAM

Kvadraturní amplitudová modulace (QAM z anglického Quadrature amplitude modulation) je digitální i analogové modulační schéma, které k vytváření symbolů využívá kombinaci amplitudového a fázového klíčování. Jedná se o vícestavovou modulaci, která je schopna přenášet  $n$  bitů pomocí  $m$  symbolů. To znamená, že v jediný okamžik přeneše více bitů najednou. Každý stav je reprezentován určitou hodnotou amplitudy a fáze, jak je zobrazeno v konstelačním diagramu na obr. 2.11.



Obrázek 2.11: Konstelační diagram 16QAM

Počet amplitudově-fázových stavů může být různý podle typu QAM modulace. Na přenos jednoho bitu je potřeba dvou stavů ( $\log_2 0$  a  $\log_2 1$ ). Pokud ale chceme přenášet v jednom symbolu např. 4 bity, je potřeba 16 stavů (16-QAM). Hlavním důvodem pro používání vícestavové modulace je, že umožňuje šetřit šířku pásma nebo naopak se stejnou šířkou pásma zvýšit přenosovou rychlost.

Modulace má i jednu velkou nevýhodu. Při použití více stavů se totiž signál stává náchylnější na rušení a složitější na identifikaci symbolu. Proto jsou také kladeny vyšší požadavky na kvalitu vysílaného i přijatého signálu a je požadován větší odstup signálu od šumu na vstupu demodulátoru ve srovnání s jednoduššími modulacemi (FSK, PSK apod.).[7]

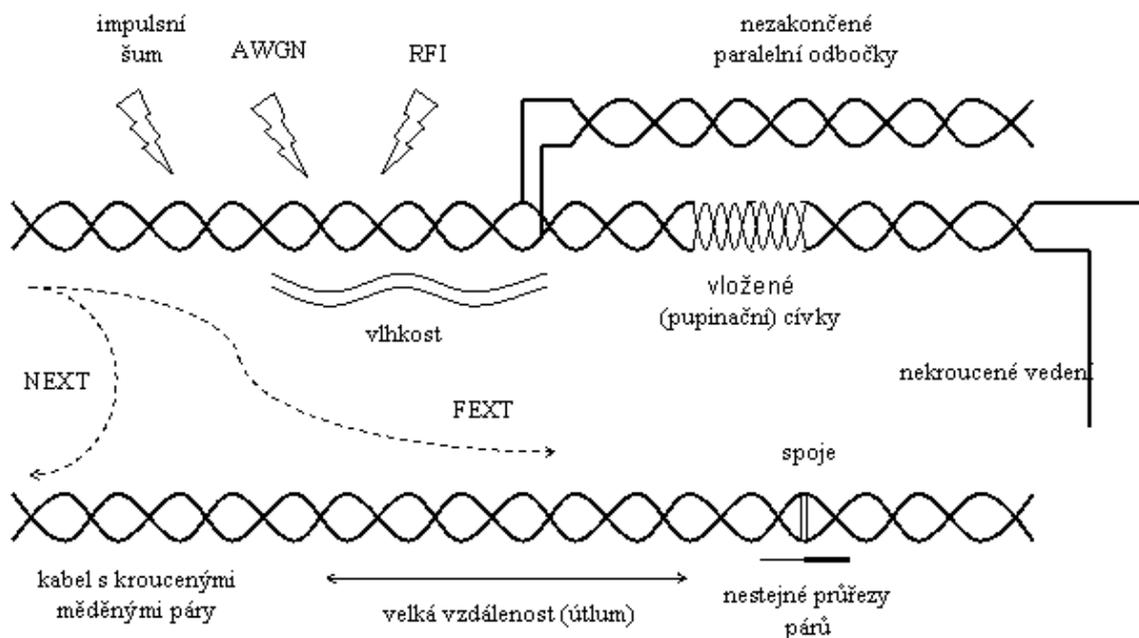
Technologie ADSL2+ využívá 32768 stavovou QAM modulaci. Na každou nosnou tak lze přiřadit 2 až 15 bitů, což při modulační rychlosti 4 kBd umožňuje dosáhnout přenosové rychlosti až 60 kbit/s na subkanál. Pro zlepšení detekce stavů při mnohastavové modulaci se užívá mřížkové kódování TC.[1]

### 3 Druhy rušení působící na technologii ADSL2+

Následující kapitola se zabývá rušivými vlivy, které negativně působí na přenosovou kapacitu xDSL systémů. Rušivý signál je generován nesprávnou nebo nežádoucí funkcí elektrických zařízení a obvodů. Může to být i signál původně žádoucí, vyskytující se na nesprávném místě. Rušení se může šířit galvanickou vazbou, kapacitní vazbou, induktivní vazbou nebo elektromagnetickým zářením.[2]

#### 3.1 Druhy rušivých vlivů

Na obrázku 3.1 jsou znázorněny fyzické a elektrické elementy rušení působící na přenosové médium technologie ADSL2+, kroucený měděný pár.



Obrázek 3.1: Jevy působící na přenosové médium

Prvním faktorem, ovlivňujícím velikost rušení, jsou defekty samotného účastnického vedení. Nezakončené paralelní odbočky a zastaralé vložené pupinační cívky mohou způsobovat odrazy signálu, který následně ruší signál přenášený v hlavní větvi. Dále pak nestejný průřez páru a nekroucené části vedení snižují celkovou schopnost vedení odolávat rušivým vlivům. Velká délka účastnického vedení spolu se spoji způsobují úroňové ztráty, které vedou ke snížení úroň signálu na výstupu vedení a tím stěžují následnou demodulaci signálu.

Kromě defektů na vedení rozeznáváme také několik dalších druhů rušivých vlivů. Rušivé vlivy na vedení se mohou rozdělit podle místa jejich vzniku na vnitřní a vnější. Mezi vnitřní rušivé vlivy patří například tepelný šum, odrazy, útlum a přeslech. Mezi vnější rušivé vlivy patří impulzní šum a vysokofrekvenční rušení.

## 3.2 Vnitřní rušivé vlivy

Vnitřní rušivé vlivy vznikají, jak již název napovídá, uvnitř komunikačního řetězce, případně kabelu. Jedná se převážně o jevy související s funkcí jednotlivých součástí zařízení podílejících se na přenosu signálu a o přeslechy, ke kterým dochází mezi jednotlivými kroucenými páry v telekomunikačním kabelu.

### 3.2.1 Aditivní bílý šum

Aditivní bílý Gaussův šum AWGN (Additive White Gaussian Noise) je speciálním druhem šumu. Má nulovou střední hodnotu, ploché spektrum a jeho amplitudy jsou rozloženy podle Gaussovy křivky pravděpodobnosti. Je charakterizován výkonovou spektrální hustotou v přenosovém pásmu (při výpočtech signálových spekter se počítá s úrovní AWGN -100 dBm/Hz až -140 dBm/Hz). AWGN se při přenosu přičítá k užitečnému signálu a tvoří ho několik složek.

#### 3.2.1.1 Tepelný a výstřelový šum

Zdrojem tepelného šumu je chaotický pohyb elektronů ve vodiči. Intenzita pohybu elektronů závisí na teplotě (měrném odporu) a je přímo úměrná velikosti tohoto šumu. Výstřelový šum vzniká pohybem elektrických nábojů v polovodiči, elektronů v polovodiči typu N a děr v polovodiči typu P.

#### 3.2.1.2 Kvantizační šum

Kvantizační šum je dán principem digitálních modulací a je tedy charakteristický pro A/D převodníky. Je způsoben nedokonalostí digitálních systémů. Analogový signál může nabývat nekonečného počtu hodnot, kdežto digitální signál je omezen počtem kvantizačních hladin. Rozdíl mezi vstupním analogovým signálem a zakódovanými vzorky výstupního signálu tvoří kvantizační šum. Úroveň kvantizačního šumu (zkreslení) je obvykle držena pod velikostí rozhodovacího kroku (rozdílu kvantizačních hladin) tak, aby zajišťovala odpovídající přesnost digitálního signálu vůči signálu analogovému. Složitost návrhu A/D převodníků je pak úměrná jejich přesnosti a požadované hodnotě kvantizačního zkreslení.

#### 3.2.1.3 Zbytkový odrazový šum

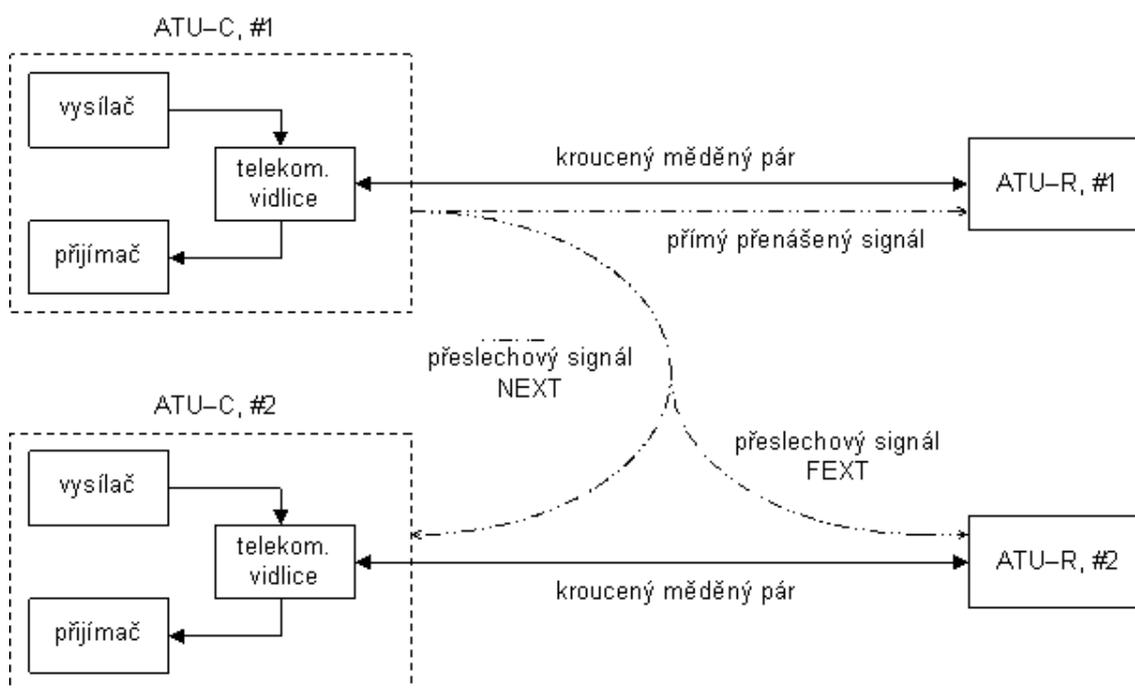
Zbytkový odrazový šum je částí odrazových interferencí a zůstává v signálu po echokompensaci. Echokompensace musí být provedena před kvantizací signálu, protože amplitudy odrazů mohou být několikrát vyšší než přijímaný signál a mohly by tak způsobit zkreslení. Zbytkový odrazový šum je závislý na útlumu kanálu.

Účinky aditivního šumu AWGN mohou být zanedbány v případě, že převažují účinky přeslechu typu NEXT a dalšího rušení. Na kmitočtech, kde se vlivem prostředí neprojeví přeslechové vazby a úroveň přijímaného (vysílaného) signálu je nižší, bude AWGN dominantní.

Z uvedených zdrojů šumu zahrnutých do AWGN vyplývá, že aditivní šum může být, co do jeho velikosti, ovlivněn samotným návrhem přijímače. Tepelný a výstřelový šum může být omezen speciálními strukturami přijímačů s použitím nízkošumových polovodičů. Kvantizační šum a zbytkový odrazový šum mohou být omezeny dostatečně přesnými A/D převodníky a použitím obvodů pro potlačení odrazů.[2]

### 3.2.2 Přeslech typu NEXT a FEXT

Přeslech je pro ADSL systémy vážným zdrojem rušení, který omezuje přenosovou kapacitu datového spoje. Přeslechy vznikají ve vícežilových kabelech, ve kterých je provozováno více služeb, které mohou vytvářet přeslechové spektrum a vzájemně se tak ovlivňovat (xDSL, ISDN, T1, aj.). Jsou způsobeny kapacitními a induktivními vazbami mezi kroucenými měděnými páry, které, ač jsou symetricky uspořádané a kroucené, vykazují drobné nerovnoměrnosti v uspořádání. Přehledné znázornění přeslechových cest je na obr. 3.2.



Obrázek 3.2: Znázornění přeslechových cest

#### 3.2.2.1 Přeslech typu NEXT

Přeslech na blízkém konci NEXT (Near End crossTalk), jak již název napovídá, vzniká na blízkém konci vedení, tj. na jedné společné straně přenosových ADSL zařízení. Jak je patrné z obr. 3.2, modem na straně ústředny (ATU-C, #1) je zdrojem signálu pro modem na účastnickém konci (ATU-R, #1). Tento signál zároveň prostupuje páry společného kabelu a jako přeslechový signál NEXT vstupuje do jiného modemu na téže straně ústředny (ATU-C, #2). Vzhledem k relativně velkému výkonu signálu je přeslech typu NEXT výrazným zdrojem rušení.[2]

### 3.2.2.2 Přeslech typu FEXT

Přeslech na vzdáleném konci FEXT ovlivňuje zařízení na opačném konci než je zdroj tohoto přeslechu. Z obr. 3.2 je vidět, že signál z modemu na straně ústředny (ATU-C, #1) prochází cestou společnou pro oba kroucené měděné páry a jako přeslechový signál FEXT působí na vstupu jiného účastnického modemu (ATU-R, #2).

Účinky přeslechu na vzdáleném konci FEXT nejsou tak nepříznivé jako účinky přeslechu na blízkém konci NEXT, protože úroveň rušení typu FEXT je pro vzdálený konec vedení snížena jeho útlumem. Přeslech na blízkém konci NEXT postihuje hlavně systémy pracující v obou směrech přenosu ve stejném pásmu, tzn. systémy s echokompenzací EC. Vazby, které způsobují přeslechy, se s rostoucím kmitočtem zesilují.[2]

## 3.3 Vnější rušivé vlivy

Vnější rušivé vlivy působící na přenosové médium mají svůj původ v oblastech přímo nesouvisejících s komunikačním řetězcem technologie ADSL, případně telekomunikačním kabelem. Tyto rušivé vlivy jsou do přenosového kanálu zavlečeny určitým typem vazby.

### 3.3.1 Impulzní rušení

Impulzní rušení (impulsive noise) má nepravidelný charakter a nelze ho předpovídat. Je charakterizováno intenzitou impulzů (jejich úrovní), spektrálním rozložením, dobou trvání a četností.

Rušení je způsobeno různými zdroji, které vytvářejí krátké přechodové jevy. Jde například o trakční systémy rozvodu energie (osvětlení, domácnosti), kde vlivem elektrických přepínaných jednotek a spotřebičů v síti vznikají krátké přechodové děje. Dalším silným zdrojem impulzního rušení je telefonní síť, ve které se stále vyskytují klasické analogové telefonní přístroje a relé ve spojovacích (obslužných) zařízeních (byť digitálních). Relé produkují krátká přerušení a analogové telefonní přístroje produkují napěťové špičky, které jsou způsobeny přerušováním účastnické smyčky při pulsní volbě, při zvednutí a položení mikrotelefonu (sluchátka) a při vyzvánění.

Tyto rušivé jevy jsou elektromagnetickou vazbou zavlečeny v přístupové síti do párů, ve kterých je provozován digitální přenos dat (ADSL, ISDN, aj.). Způsobují tak v datových přenosech shluky chyb. Výsledný efekt rušení je možno snížit použitím samoopravných zabezpečovacích kódů FEC (dopředná korekce chyb) a prokládáním dat.[2]

### 3.3.2 Vysokofrekvenční rušení RFI

Zdrojem vysokofrekvenčního rušení RFI (Radio Frequency Interference) jsou rádiové vysílače, které vysílají na dlouhých (LW) a středních vlnách (MW) jako rozhlasové stanice, radioamatérské stanice apod. Tento zdroj rušení ovlivňuje prakticky všechny páry v kabelech, zvláště

pak ve starších nadzemních (vzdušných) kabelových rozvodech, které nejsou stíněny a páry jsou chráněny pouze svojí symetrií a kroucením. Rušení se projevuje v širokém spektru kmitočtů a má nestálý časový průběh. Jeho intenzita působení na jednotlivé páry může být různá a je úměrná blízkosti zdroje (zářiče) vysokofrekvenčního vysílání. Rušení ve spektru, které je využíváno pro přenos dat, se označuje jako rušení in - band (vně pásma) a nelze ho odfiltrovat.

RFI hraje významnou roli především u digitálních přenosových systémů s vyšší přenosovou rychlostí, které využívají široké kmitočtové spektrum, jako například VDSL systémy, pracující v pásmu do 30 MHz. Při návrhu nasazení těchto přenosových systémů na konkrétní trasy lze již dopředu počítat s možným RFI, které se na trase projevuje, a uzpůsobit tomu alokační schéma pro jednotlivé subkanály.[2]

---

## 4 Měření vlivu rušení na digitální účastnickou smyčku

Nepříznivý vliv rušení na signál při jeho průchodu po účastnickém vedení je, jak vyplývá z teoretické části této diplomové práce, hlavním faktorem omezujícím potenciál technologií rodiny xDSL. Po zvážení možností, vyplývajících z dostupné měřicí aparatury, jsem se rozhodl zaměřit svou pozornost na tři hlavní druhy rušení ovlivňující technologii ADSL – bílý šum, přeslechy na vedení a impulzní rušení. Cílem prováděných měření je stanovit, které parametry digitální účastnické smyčky tyto druhy rušení ovlivňují a určit způsob jejich projevu.

### 4.1 Metodika prováděných měření

Metodika měření je založena na principu porovnávání naměřených hodnot s referenční hodnotou reprezentovanou digitální účastnickou smyčkou ADSL2+ o známých (předem změřených) parametrech. Postupně byly na tuto referenční smyčku aplikovány všechny vybrané druhy rušení a sledován jejich vliv na dosah účastnické smyčky a s ním úzce spjatou dosažitelnou přenosovou rychlost. Následně, při důkladnější analýze, bylo analyzováno zarušení jednotlivých subkanálů frekvenčního pásma způsobené daným druhem rušení.

Z důvodu dostupnosti pouze jednoho generátoru šumu probíhala prováděná měření ve dvou fázích. Vybraná rušení byla aplikována separátně na stranu účastníka a následně na stranu poskytovatele (DSLAMu). Vznikly tak dvě sady měření pro každý vybraný druh rušení v závislosti na umístění generátoru šumu, které budou vyhodnocovány odděleně.

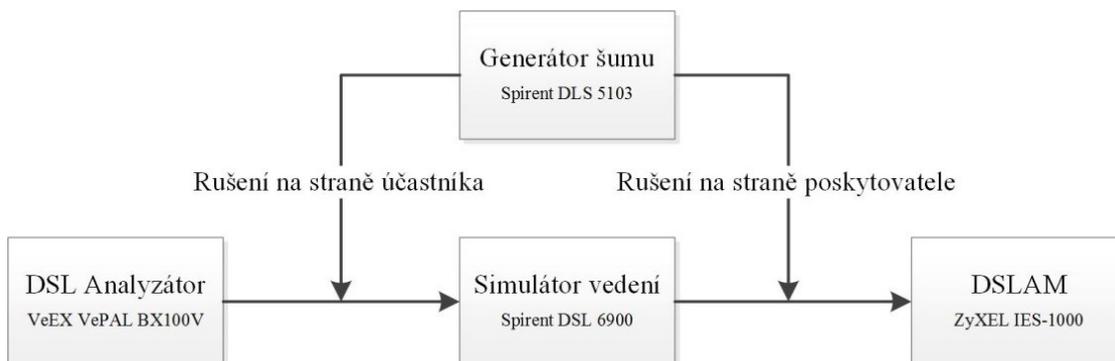
Cílem prvního měření je stanovit vliv vybraných druhů rušení na dosažitelnou přenosovou rychlost při měnící se délce účastnického vedení. Při tomto měření byla postupně měněna délka účastnického vedení na maximální možnou hodnotu, kde bylo ještě možné sestavit spojení. Délka vedení je do hodnoty 2,2 km měněna s krokem 200 m pro detailnější výsledky, následně od délky účastnického vedení 2,5 km se postupuje s krokem 500 m. Výsledkem je závislost dosažitelné přenosové rychlosti na délce účastnického vedení.

Cílem druhého prováděného měření je stanovit vliv vybraných druhů rušení na hodnotu SNR jednotlivých subkanálů DMT modulace. Při tomto měření byla stanovena pevná délka účastnického vedení 1,4 km. Tato hodnota vychází z měření vlivu délky účastnického vedení na dosažitelnou přenosovou rychlost a současné nabídky poskytovatelů služeb ADSL. Dnešní poskytovatelé služeb ADSL nabízejí přípojky s přenosovou rychlostí okolo 16 až 17 Mbit/s. Dle provedeného měření dosahuje technologie ADSL2+ při délce účastnického vedení 1,4 km maximální přenosové rychlosti přibližně 17,5 Mbit/s. Jedná se ovšem o laboratorní měření, tudíž o nejlepší možnou dosažitelnou hodnotu, která by byla v případě reálného vedení nižší. Je možné tak usoudit, že v reálných

podmínkách bude maximální možná délka reálné účastnické přípojky pro dosažení takovéto přenosové rychlosti právě v okolí 1,4 km.

## 4.2 Schéma měření a použité měřicí přístroje

Pro účely měření byla sestavena digitální účastnická smyčka pracující s technologií ADSL2+. Schéma zapojení je zobrazeno na obr. 4.1.



Obrázek 4.1: Schéma měření

Smyčka je tvořena DSL analyzátozem VeEX VePAL BX100V, simulátorem vedení Spirent DSL 6900 a DSLAMem ZyXEL IES-1000. Navíc je k účastnické smyčce připojen generátor šumu Spirent DLS 5103. Generátor rušení byl dle potřeby přepojován mezi stranou DSL analyzátoru a stranou DSLAMu. Pokud byl generátor připojen na stranu DSL analyzátoru, simuloval rušení na straně účastníka, pokud byl připojen na stranu DSLAMu, simuloval rušení na straně poskytovatele.

## 4.3 Nastavené parametry

Pro účely prováděných měření jsem se rozhodl využít nejvyšších možných přenosových rychlostí, kterých je technologie ADSL2+ schopna dosáhnout. Usnadní se tak vyhodnocování výsledku a zároveň se maximalizuje vliv rušení.

Samotné nastavování parametrů linky nebylo součástí měření. Použitý DSLAM pracoval ve standardu ANNEX B, poskytované přenosové rychlosti byly neomezené. Teoretická maxima technologie ADSL2+ jsou pro downlink přibližně 26 Mbit/s a pro uplink 1,6 Mbit/s.

DSL analyzátor byl nastaven jako protikus k použitému DSLAMu. Pracoval v režimu CPE a představoval tedy modem na straně účastníka. Použitá technologie byla nastavena na ADSL2+ standard ANNEX B. Nebylo třeba provádět žádná jiná nastavení.

## 4.4 Charakteristika aplikovaných rušení

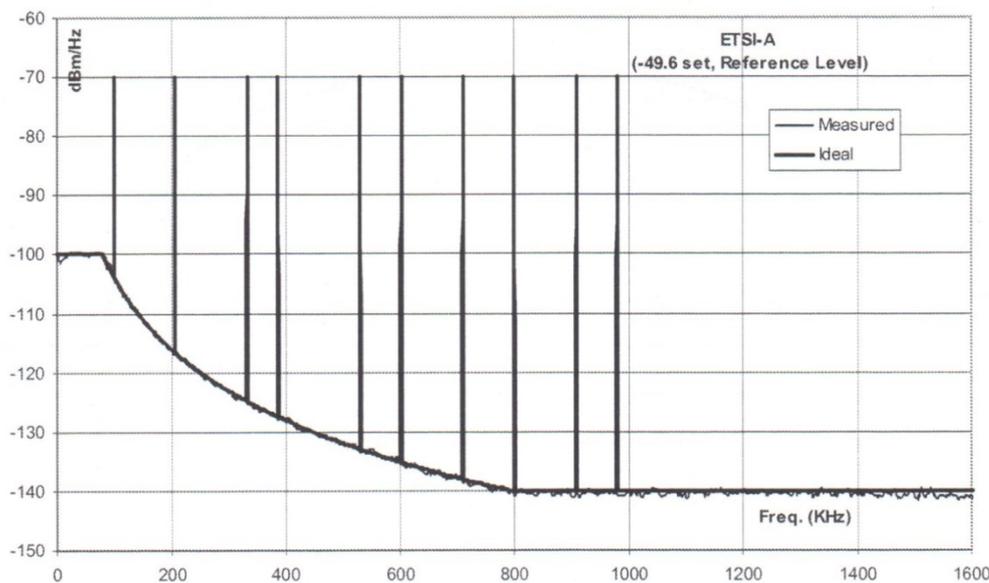
V této kapitole jsou popsány jednotlivé druhy rušení aplikovaných na referenční digitální účastnickou smyčku. Celkově bylo na referenční účastnickou smyčku aplikováno jedenáct druhů rušení, z toho bílý šum o pěti různých úrovních, tři modely přeslechu a čtyři modely impulzního rušení.

### 4.4.1 Bílý šum

Generátor šumu byl schopen generovat bílý šum o úrovni od -140 dB/Hz až -100 dB/Hz. Byl zvolen krok 10 dB/Hz, to znamená, že byl měřen vliv bílého šumu o úrovni -140, -130, -120, -110 a -100 dB/Hz. Dle specifikací generátoru šumu byl bílý šum generován s přenosností 0,5 dB a v kmitočtovém pásmu 50 Hz až 2,2 MHz.

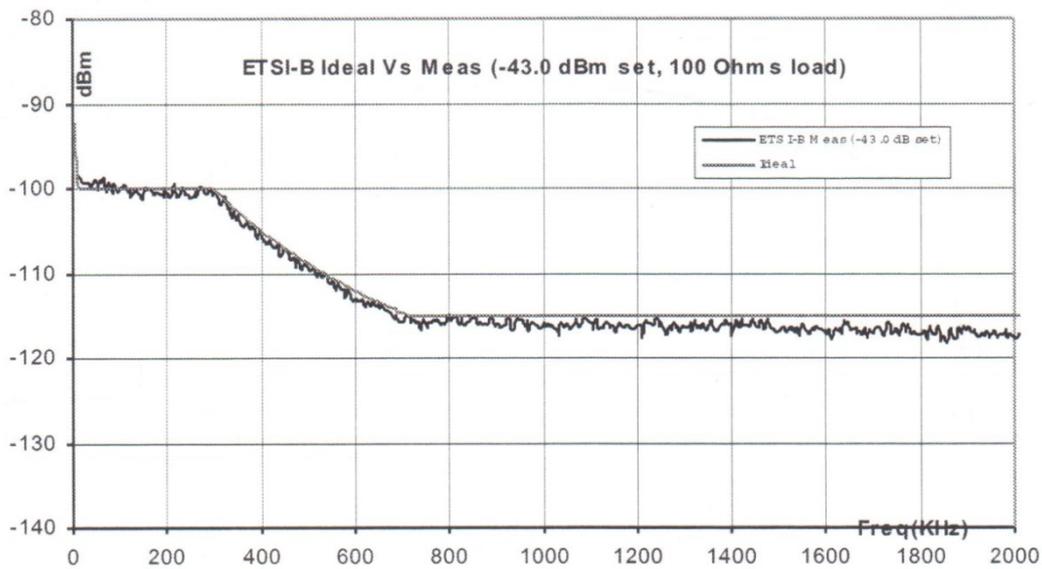
### 4.4.2 Přeslechy na vedení

Generátor šumu umožňoval generovat pouze omezený počet modelů přeslechů. Byly vybrány 3 modely, které svým spektrálním složením odpovídaly kmitočtovému pásmu využívaném technologií ADSL2+.



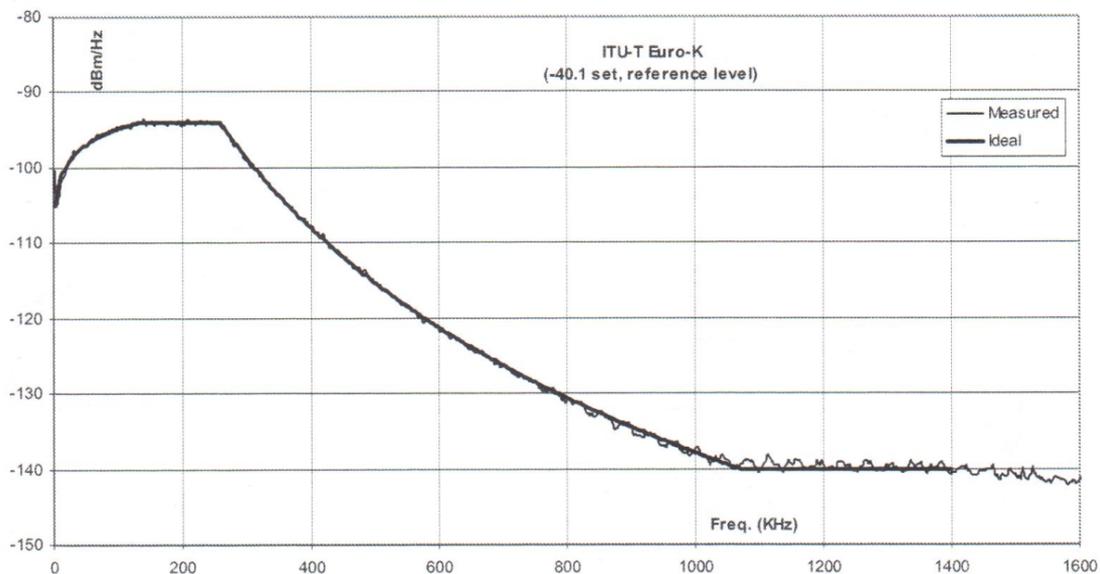
Obrázek 4.2: Spektrální složení modelu přeslechu ETSI-A

Prvním vybraným modelem byl model ETSI-A. Jeho spektrální složení je uvedeno na obr. 4.2. Pro kmitočty v pásmu 0 až 100 kHz dosahuje úroveň rušení -100 dB/Hz. Následně dochází k pozvolnému poklesu úrovně rušení a od kmitočtu 800 kHz dosahuje rušení úrovně -140 dB/Hz. Model také obsahuje deset úrovnových špiček, jejichž úroveň činí -70 dB/Hz.



Obrázek 4.3: Spektrální složení modelu přeslechu ETSI-B

Na obr. 4.3 je uvedeno spektrální složení modelu přeslechu ETSI-B. Pro kmitočty v pásmu 0 až 300 kHz představuje tento model rušení o úrovni -100 dBm, kde následně dochází k poklesu a od kmitočtu 700 kHz dosahuje rušení úrovně -115 dBm.

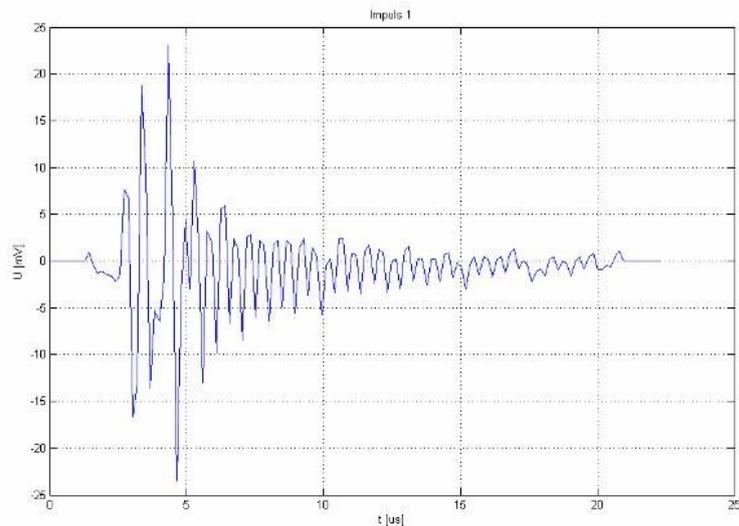


Obrázek 4.4: Spektrální složení modelu přeslechu ITU-K

Posledním vybraným modelem přeslechu byl model ITU-K. Jeho spektrální složení je uvedeno na obr. 4.4. Pro kmitočty v rozmezí 0 až přibližně 150 kHz dosahuje úroveň rušení hodnot od -105 až -95 dB/Hz. Následuje strmý pokles úrovně rušení a od kmitočtu 1,1 MHz dosahuje úroveň rušení -140 dB/Hz.

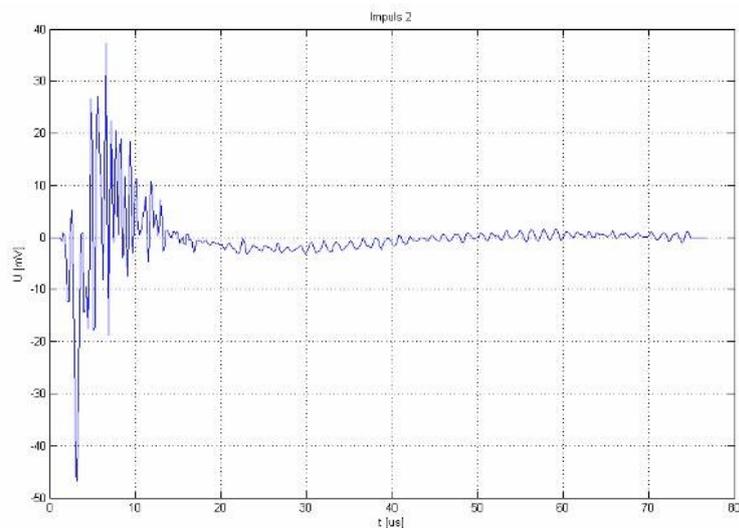
### 4.4.3 Impulzní rušení

Stejně jako v případě přeslechů umožňoval generátor šumu generovat pouze omezený počet modelů impulzního rušení. Z dostupných modelů impulzního rušení byly vybrány čtyři, kde každý z těchto modelů byl tvořen přeslechovou a impulzní složkou. Přeslechová složka byla představována modelem přeslechu ETSI-A nebo modelem přeslechu ETSI-B. Impulzní složka byla tvořena jedním ze dvou modelů pulzů označovaných jako impuls ADSL1 a impuls ADSL2. Průběh těchto pulzů se nachází na obr. 4.5, respektive obr. 4.6.



Obrázek 4.5: Pulz ADSL1

Kombinací dvou přeslechových a dvou impulzních složek tudíž vznikly čtyři modely impulzního rušení. Jednotlivé modely impulzního rušení budou nadále označovány jako *přeslechová složka + Imp. číslo pulzu*, např. ETSI-A + Imp 1.



Obrázek 4.6: Pulz ADSL2

## 4.5 Průběh měření

Průběh měření sestával ze sestavení měřícího pracoviště dle schématu zapojení na obr. 4.1. Jednalo se o vybudování trasy mezi DSL analyzátořem, simulátorem vedení a DSLAMem. Na vedení bylo rovněž nutno v bodech pro připojení generátoru šumu vytvořit paralelní odbočky, aby bylo následně možno dle potřeby přepojovat generátor šumu. Generátor šumu vyžaduje 30 minut chodu pro zahřátí a stabilizaci.

Po sestavení měřícího pracoviště byla provedena měření parametrů referenční účastnické smyčky pro následné porovnávání. Generátor šumu byl připojen, ovšem jeho výstup byl vypnut. Na simulátoru vedení byla měněna délka účastnické smyčky dle určeného kroku a pro jednotlivá měření proveden export naměřených hodnot z DSL analyzátořu. Je vhodné uložené soubory systematicky pojmenovávat, aby bylo možné rozlišit jednotlivá měření.

Dalším krokem bylo měření vlivu jednotlivých druhů rušení na straně účastníka. Generátor šumu připojíme na stranu DSL analyzátořu a nastavíme požadovaný druh rušení. Na simulátoru vedení měníme délku účastnické smyčky dle určeného kroku a pro jednotlivá měření provedeme export hodnot z DSL analyzátořu. Postupně takto změříme vliv všech vybraných rušení. Měření vlivu jednotlivých druhů rušení při rušení na straně poskytovatele provedeme obdobně s tím rozdílem, že generátor šumu připojíme na stranu DSLAMu.

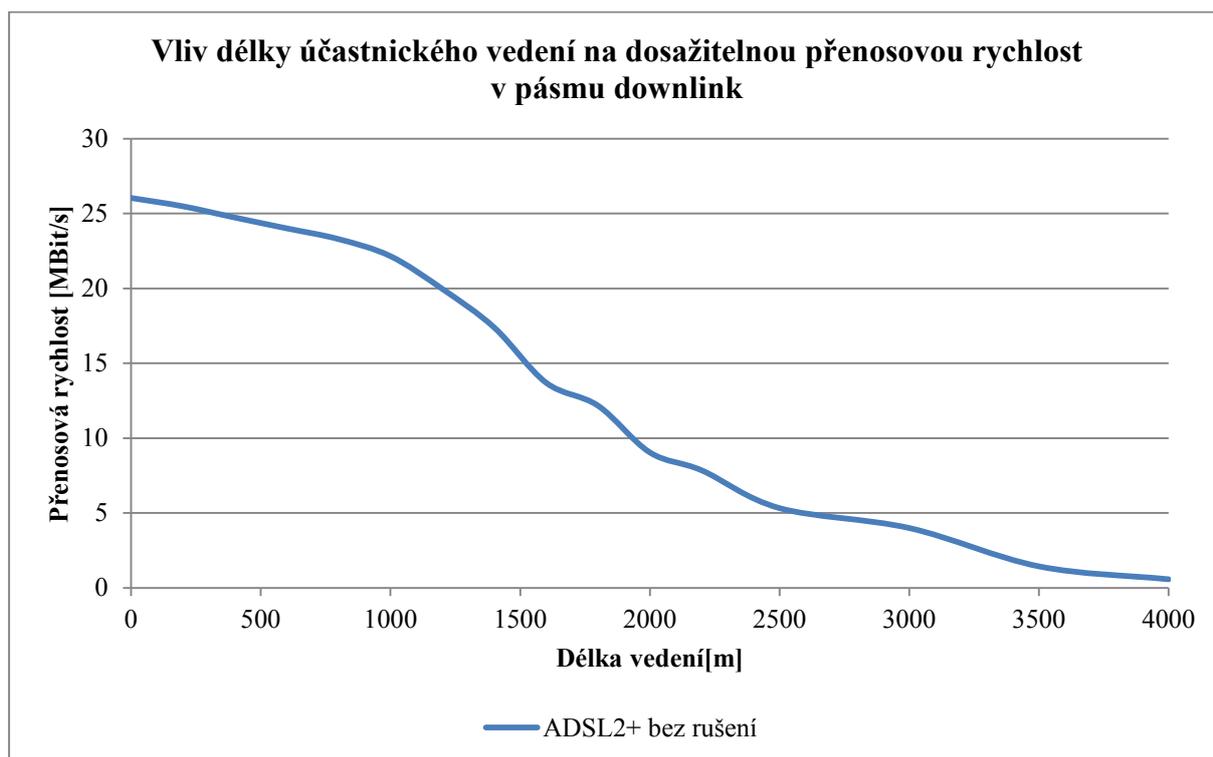
Po provedení výše zmíněných měření byla provedena analýza naměřených hodnot dle metodiky měření.

## 4.6 Měření referenční účastnické smyčky

Prvním prováděným měřením bylo měření parametrů digitální účastnické smyčky ADSL2+ bez aplikovaného rušení. Cílem tohoto měření bylo stanovit referenční hodnoty, které budou následně sloužit pro porovnání vlivu jednotlivých druhů rušení.

### 4.6.1 Vliv délky účastnického vedení na přenosovou rychlost

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze A. Výstupem tohoto měření jsou dva grafy. První graf na obr. 4.7 popisuje vliv délky účastnického vedení na rychlost downlinku. Druhý graf na obr. 4.8 popisuje vliv délky účastnického vedení na přenosovou rychlost v pásmu uplink.

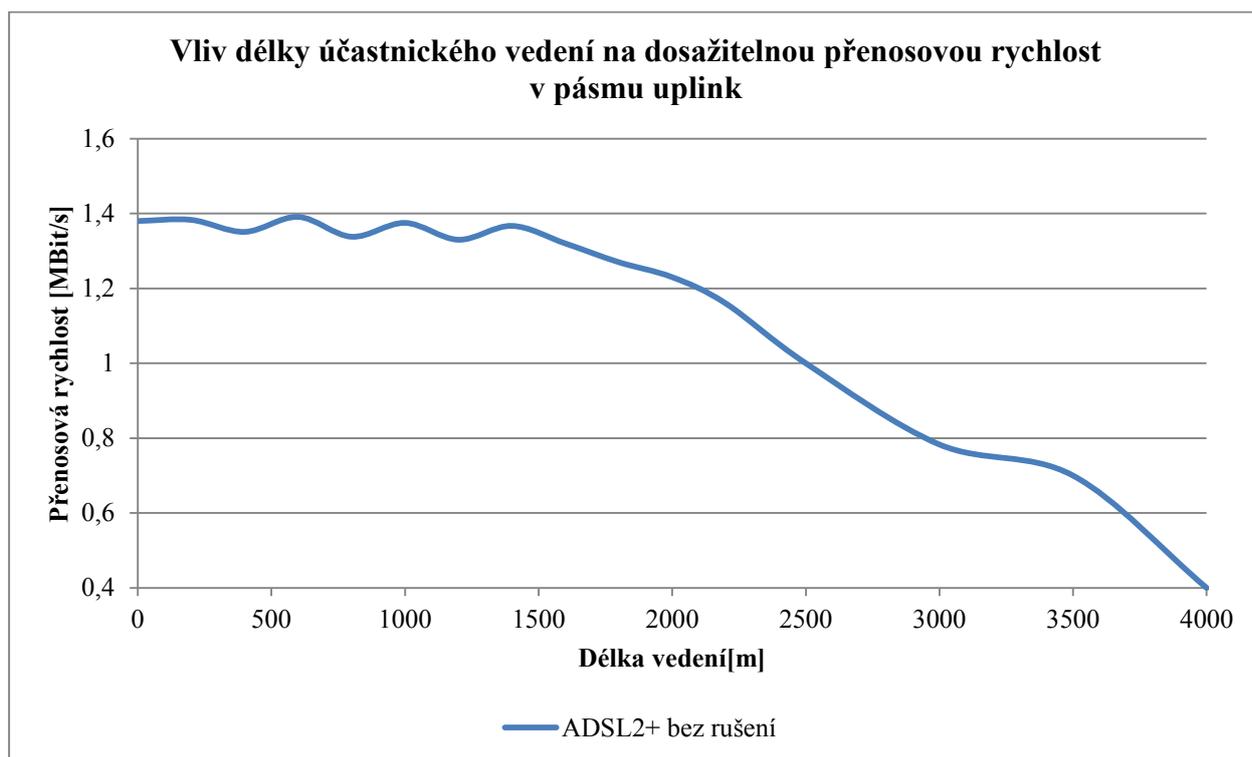


Obrázek 4.7: Vliv délky účastnického vedení na dosažitelnou přenosovou rychlost v pásmu downlink

Z naměřeného průběhu přenosové rychlosti downlinku vidíme, že při nulové délce účastnického vedení dosahuje přenosová rychlost hodnoty přibližně 26 Mbit/s. S narůstající délkou účastnického vedení dosažitelná přenosová rychlost klesá. Při délce účastnického vedení 1 km již přenosová rychlost dosahuje 22,15 Mbit/s. Na prvním kilometru vedení tedy došlo ke snížení přenosové rychlosti o přibližně 3 Mbit/s.

Po překročení 1 km délky účastnického vedení dochází ke zrychlení poklesu přenosové rychlosti s narůstající délkou účastnického vedení. Při délce účastnického vedení 1,5 km již přenosová rychlost dosahuje 15 Mbit/s, v případě délky 2 km již pouze 7,85 Mbit/s. Oproti přenosové rychlosti 22,15 Mbit/s při délce účastnického vedení 1 km došlo na druhém kilometru ke ztrátě přibližně 14,3 Mbit/s přenosové rychlosti.

Za hranicí 2 km délky účastnického vedení dochází opět ke zpomalení poklesu přenosové rychlosti s narůstající délkou účastnického vedení. Přenosové rychlosti ovšem dosahují pouze zlomku výchozích hodnot. Při délce účastnického vedení 2,5 km přenosová rychlost dosahuje 5,3 Mbit/s, při délce 3,5 km již pouze 1,44 Mbit/s. Hraniční délkou účastnického vedení jsou 4 km, kde se přenosová rychlost pohybuje v desítkách kbit/s a spojení je velmi nestabilní.

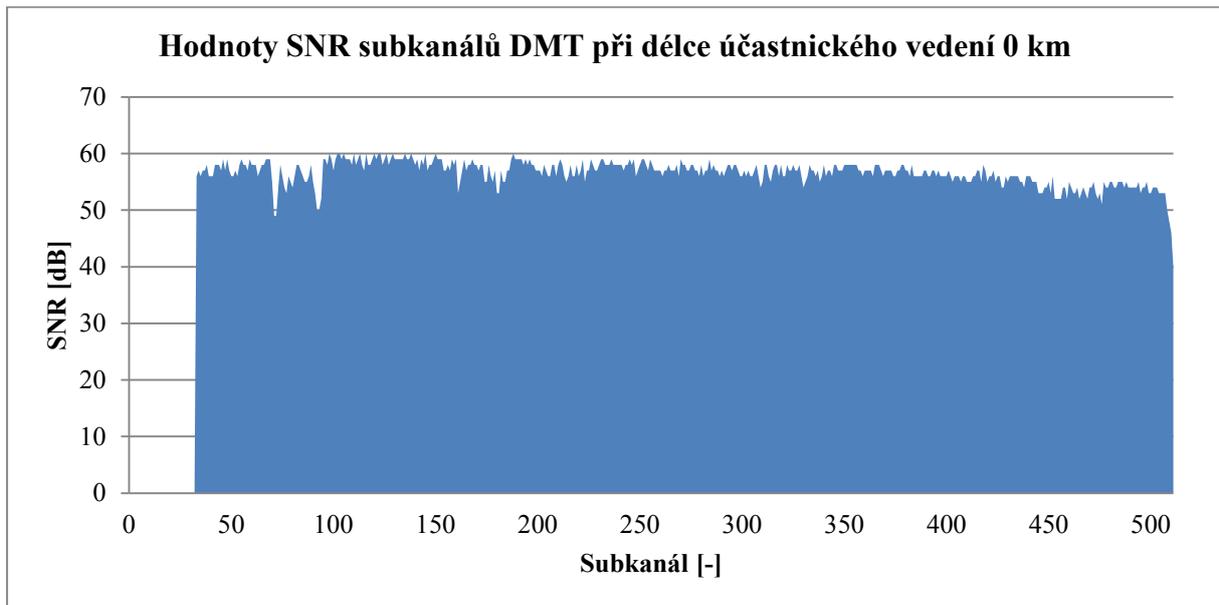


Obrázek 4.8: Vliv délky účastnického vedení na dosažitelnou přenosovou rychlost v pásmu uplink

V případě uplinku můžeme pozorovat vyšší odolnost oproti narůstající délce účastnického vedení, než v případě downlinku. Až do délky účastnického vedení 1,4 km dochází k zanedbatelnému snížení přenosové rychlosti z výchozích 1,38 Mbit/s při nulové délce účastnického vedení na 1,36 Mbit/s. Následný pokles přenosové rychlosti je úměrný narůstající délce účastnického vedení. Pod hranici 1 Mbit/s klesne přenosová rychlost až při délce účastnického vedení 2,5 km. Na prvních 2,5 km účastnického vedení tedy ztratíme 0,4 Mbit/s. Na 3,5 km délky účastnického vedení dosahuje přenosová rychlost 0,7 Mbit/s, což je přibližně 50 % výchozí hodnoty. Na hraniční délce 4 km pro pásmo downlink dosahuje uplink přenosové rychlosti 0,4 Mbit/s.

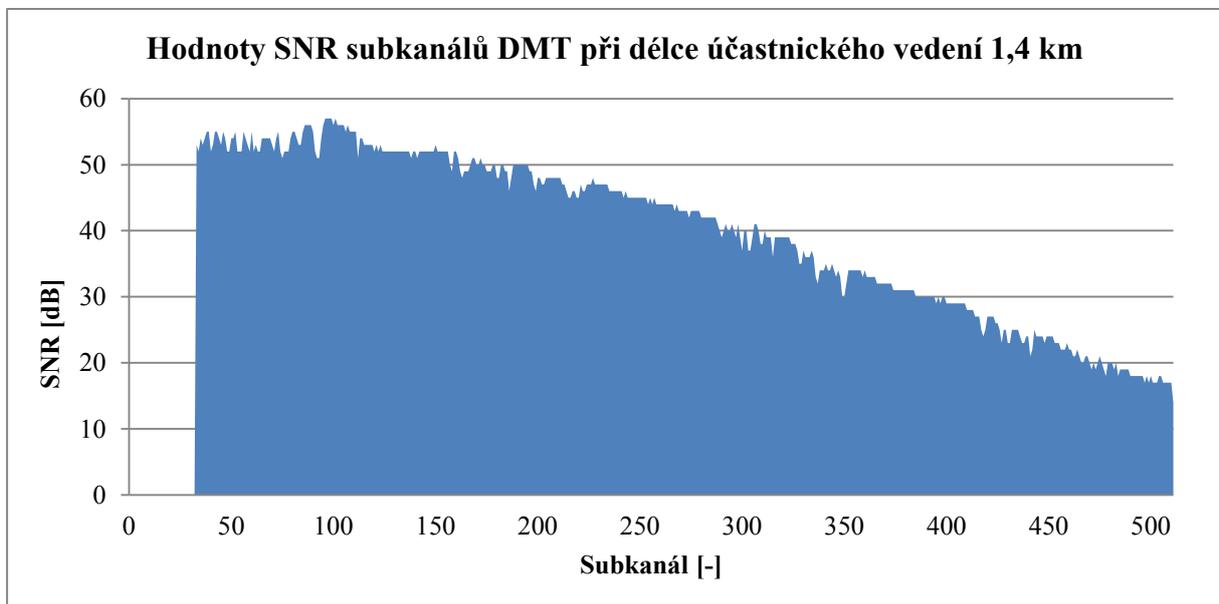
#### 4.6.2 Vliv délky účastnického vedení na hodnotu SNR subkanálů DMT modulace

Pro přesné určení vlivu jednotlivých druhů rušení je důležité podrobné zmapování poklesu hodnot SNR jednotlivých subkanálů DMT modulace vlivem pouhého zvyšování délky účastnického vedení. Z toho důvodu je zde proveden rozbor zarušení subkanálů DMT na 4 délkách účastnického vedení – 0 m, 1,4 km, 2 km a 3 km. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze H.



Obrázek 4.9: Hodnoty SNR subkanálů DMT při délce účastnického vedení 0 km

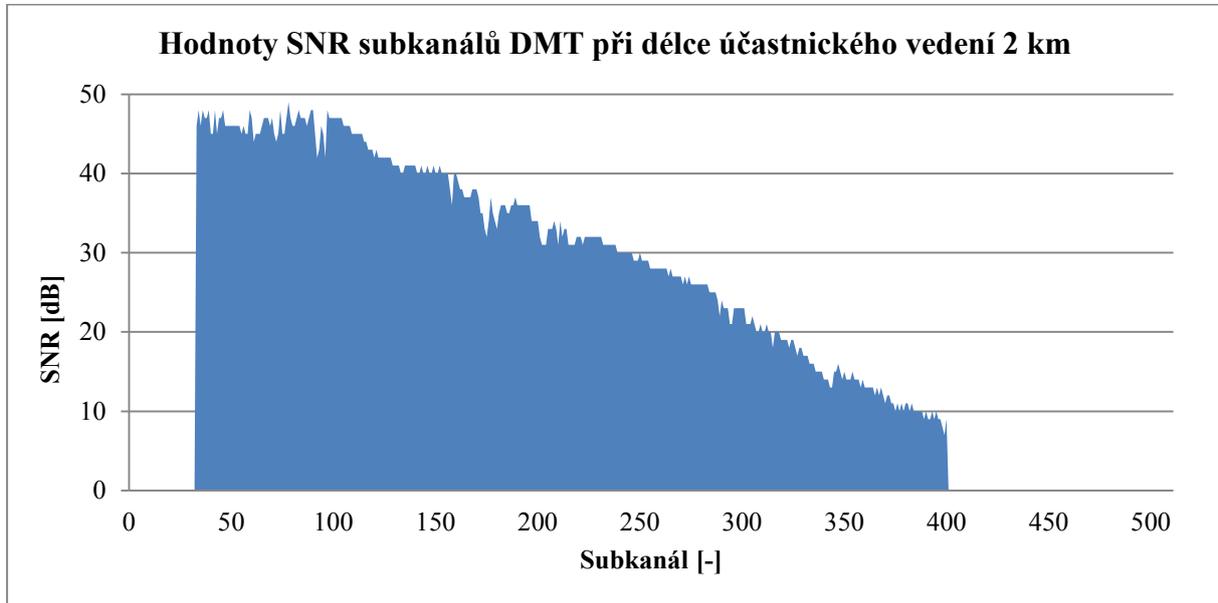
Na obr. 4.9 vidíme graf SNR jednotlivých subkanálů DMT pro nulovou délku účastnického vedení. Z grafu je patrné, že všechny subkanály dosahují srovnatelné úrovně SNR v okolí hodnoty 50 až 60 dB. Jelikož má účastnické vedení nulovou délku, neprojevuje se útlum vedení. Toto považujeme za výchozí stav pro analýzu dalších charakteristik SNR pro narůstající délku účastnického vedení.



Obrázek 4.10: Hodnoty SNR subkanálů DMT při délce účastnického vedení 1,4 km

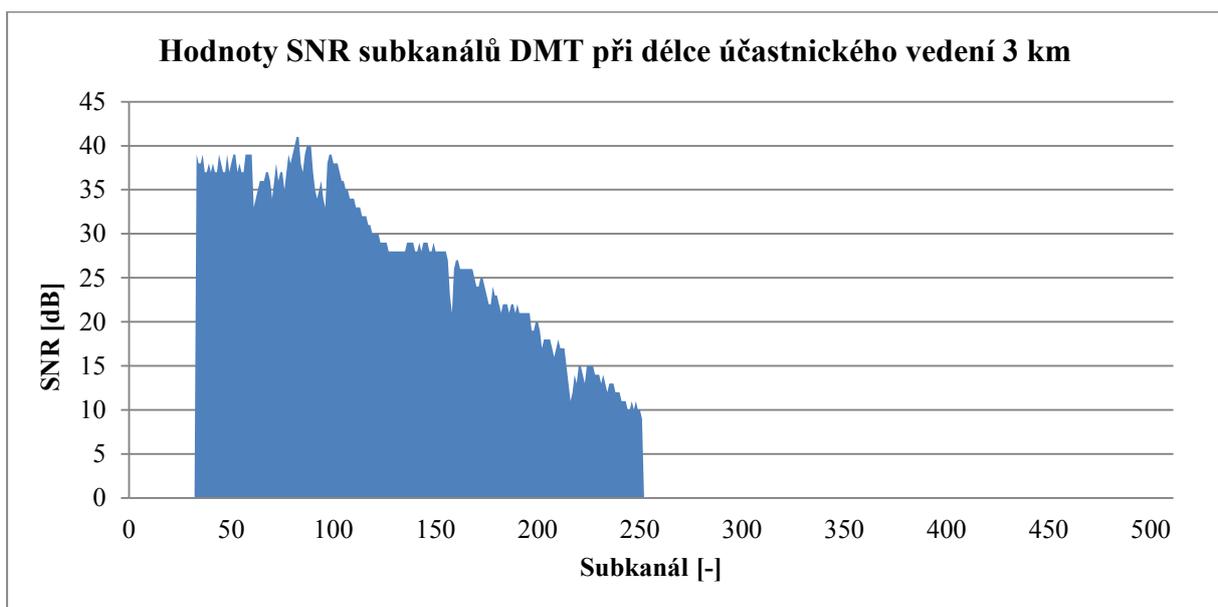
Na obr. 4.10 vidíme graf SNR jednotlivých subkanálů DMT pro délku účastnického vedení 1,4 km. Subkanály pásma uplinku 32 - 63 jsou zatím utlumovány minimálně – jejich SNR se pohybuje v rozmezí 52 - 55 dB. Pro pásmo downlink je patrný výrazný pokles SNR s narůstajícím kmitočtem jednotlivých subkanálů. Zatímco subkanály 64 - 300 mají hodnotu SNR v okolí 40 - 55 dB, subkanály

300 - 449 jsou již výrazně utlumovány a SNR subkanálů 450 - 511 se pohybuje v okolí 20 dB. Tento fakt koresponduje s výsledkem prvního měření, kde na této délce účastnického vedení došlo ke snížení přenosové rychlosti na 17,38 Mbit/s.



Obrázek 4.11: Hodnoty SNR subkanálů DMT při délce účastnického vedení 2 km

Na obr. 4.11 vidíme graf SNR jednotlivých subkanálů DMT pro délku účastnického vedení 2 km. Útlum vedení se již výrazně projevuje na subkanálech pásma uplinku i downlinku. U subkanálů pásma uplink 32 - 63 došlo ke snížení hodnoty SNR na rozmezí 45 - 48 dB. Subkanály pásma downlink jsou již velmi výrazně utlumovány, subkanály 64 - 400 dosahují SNR v rozmezí 10 - 45 dB, vyšší subkanály 401 - 511 jsou již naprosto utlumeny a pro přenos nepoužitelné.



Obrázek 4.12: Hodnoty SNR subkanálů DMT při délce účastnického vedení 3 km

Na obr. 4.12 je uveden graf SNR jednotlivých subkanálů DMT pro délku účastnického vedení 3 km. Subkanály uplinku 32 - 63 jsou stále výrazněji utlumovány, jejich SNR se pohybuje v okolí hodnoty 38 dB. Polovina subkanálů downlinku (250 - 500) je již naprosto utlumena a nepoužitelná. Zbývající subkanály downlinku v rozmezí 64 - 250 dosahují hodnot SNR v rozmezí 10 - 35 dB.

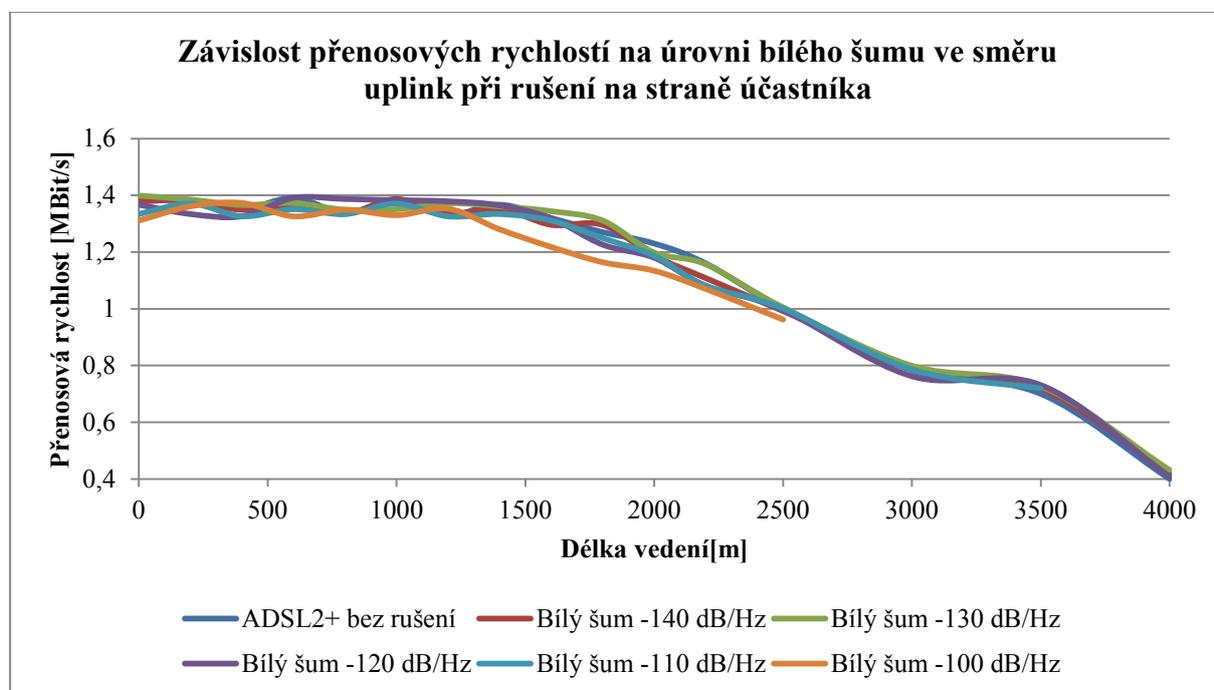
Z výsledků měření je patrná velká náchylnost ke snižování přenosových rychlostí downlinku s narůstající délkou účastnického vedení. To odpovídá teoretickým předpokladům, pásmo downlinků využívá vyšší kmitočty, které jsou s narůstající délkou vedení výrazně utlumovány. To způsobuje postupné snižování počtu využitelných subkanálů, což se projeví ve snížení přenosové rychlosti.

## 4.7 Měření vlivu bílého šumu na digitální účastnickou smyčku

Při tomto měření bylo na referenční účastnickou smyčku aplikováno rušení v podobě bílého šumu s různou úrovní (od -140 dB/Hz do -100 dB/Hz). Metodika měření je v případě toho měření rozšířena o další hledisko, a to jak se úroveň bílého šumu promítne do sledovaných parametrů.

### 4.7.1 Měření dosažitelné přenosové rychlosti při rušení na straně účastníka

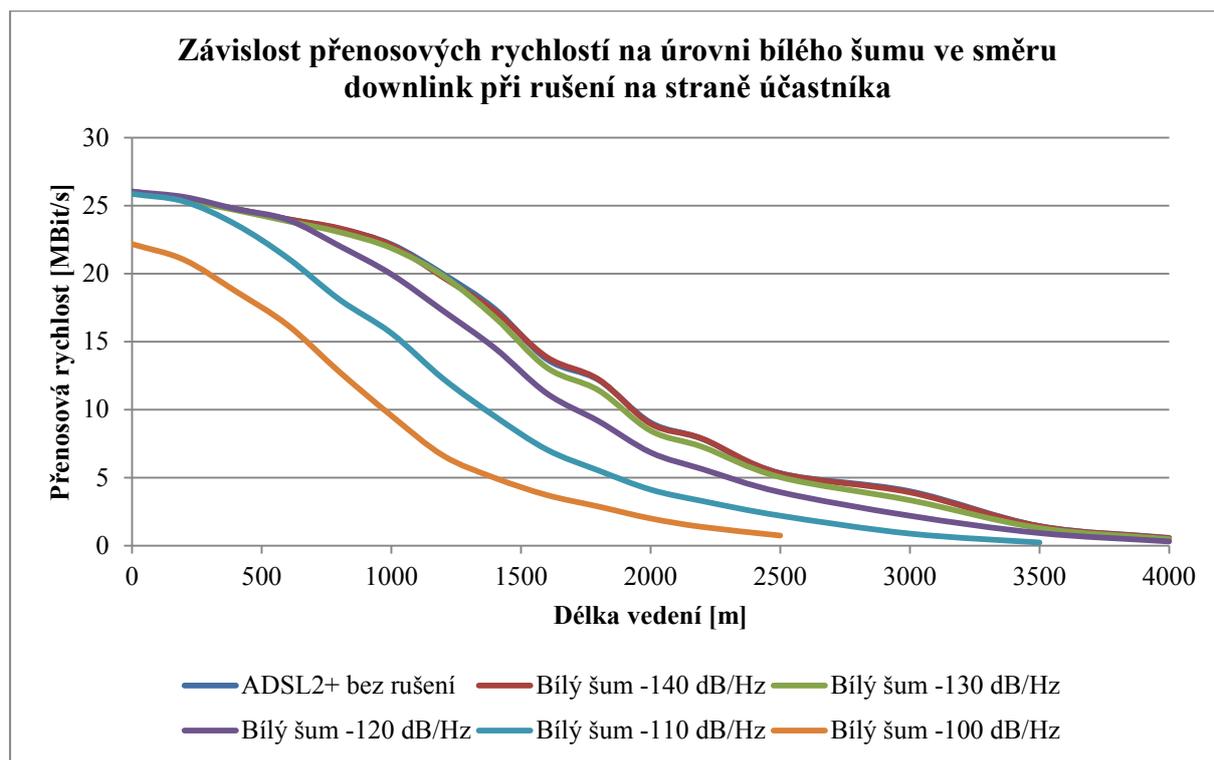
Při tomto měření byl generátor šumu připojen na stranu účastníka. Tabulka naměřených hodnot je uvedena v příloze B. Na obr. 4.13 je zobrazena závislost přenosových rychlostí na úrovni bílého šumu ve směru uplink.



Obrázek 4.13: Závislost přenosových rychlostí na úrovni bílého šumu ve směru uplink při rušení na straně účastníka

V případě tohoto měření je vliv bílého šumu při všech jeho úrovních na pásmo uplinku zanedbatelný. Při úrovni bílého šumu -100 dB/Hz sice došlo ke snížení dosažitelné přenosové rychlosti o přibližně 100 kbit/s při délce účastnického vedení mezi 1,2 - 2,5 km, ovšem v porovnání s pásmem downlinku se jedná o zanedbatelnou změnu.

Na obr. 4.14 je uvedena závislost dosažitelné přenosové rychlosti pro jednotlivé úrovně bílého šumu ve směru downlink.



Obrázek 4.14: Závislost přenosových rychlostí na úrovni bílého šumu ve směru downlink při rušení na straně účastníka

Z naměřených průběhů je patrné, že s rostoucí úrovní bílého šumu se stupňuje také jeho vliv na parametry referenční účastnické přípojky.

V případě úrovně bílého šumu -140 dB/Hz nedošlo k žádnému snížení dosahu ani dosažitelné přenosové rychlosti oproti referenčním hodnotám. Naměřený průběh přesně kopíruje křivku referenční účastnické smyčky.

Zvýšení úrovně bílého šumu na -130 dB/Hz se projevilo mírným poklesem dosažitelných přenosových rychlostí. Pro délky účastnického vedení do 1,4 km se jedná o zanedbatelná snížení, ovšem po překročení této vzdálenosti se jedná o snížení v průměru 400 kbit/s.

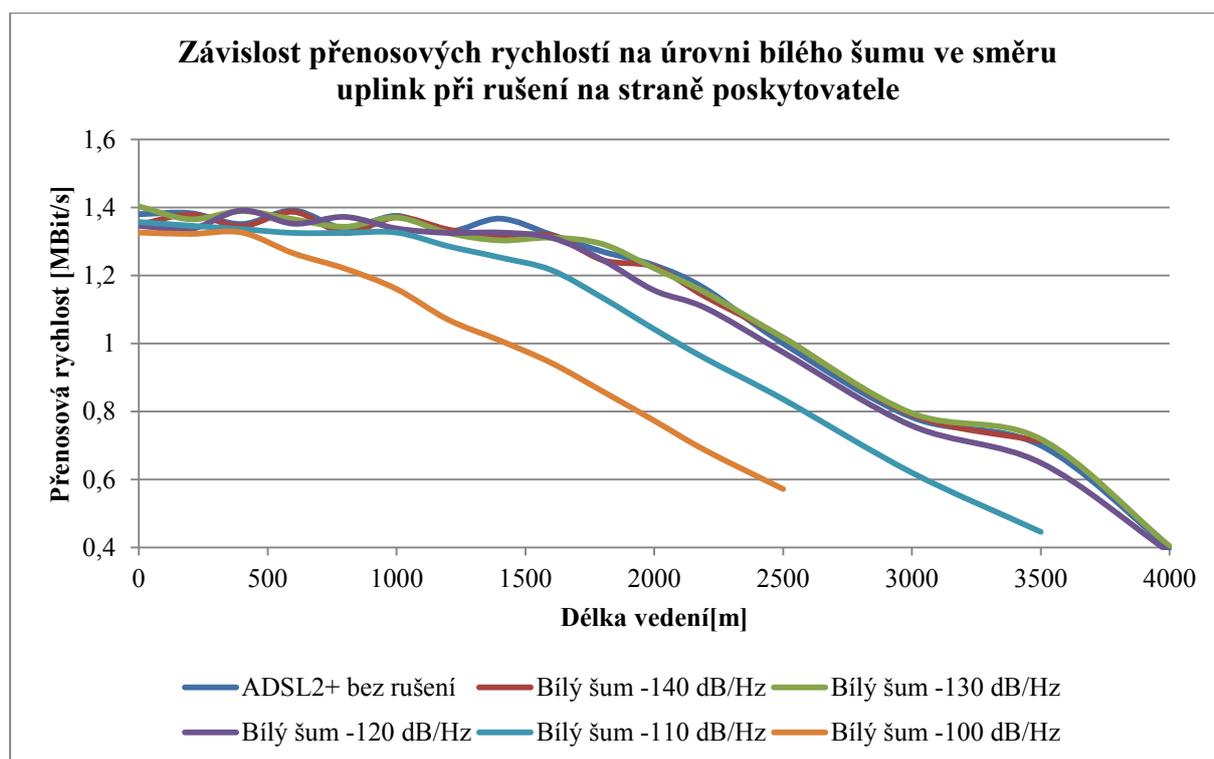
Při úrovni bílého šumu rovné -120 dB/Hz se vliv rušení do délky účastnického vedení 500 m téměř neprojevuje. Po překročení této vzdálenosti již dochází k rovnoměrnému snížení dosažitelné přenosové rychlosti o přibližně 700 kbit/s. Dosah účastnické přípojky zatím ovlivněn není.

Rušení v podobě bílého šumu o úrovni -110 dB/Hz již výrazně ovlivňuje dosah i maximální dosažitelné přenosové rychlosti. Vliv rušení je patrný již od délky účastnického vedení 200 m a v pásmu využitelných přenosových rychlostí se projevuje průměrným snížením přenosové rychlosti o přibližně 4 Mbit/s. Byl ovlivněn i dosah přípojky – došlo k jeho zkrácení na 3500 m.

Z průběhu křivky pro úroveň bílého šumu rovné -100 dB/Hz je patrný zásadní vliv na parametry referenční účastnické přípojky. V první řadě došlo ke snížení dosahu přípojky o 1,5 km na 2,5 km, což je téměř 50 % původního dosahu. Pokles přenosové rychlosti dosahuje až 9 Mbit/s při délce účastnického vedení mezi 0 - 1,4 km oproti referenční účastnické přípojce.

#### 4.7.2 Měření dosažitelné přenosové rychlosti při rušení na straně poskytovatele

Při tomto měření byl generátor šumu připojen na stranu poskytovatele. Tabulka naměřených hodnot je uvedena v příloze C. Na obr. 4.15 je znázorněna závislost dosažitelné přenosové rychlosti pro jednotlivé úrovně bílého šumu ve směru uplink.



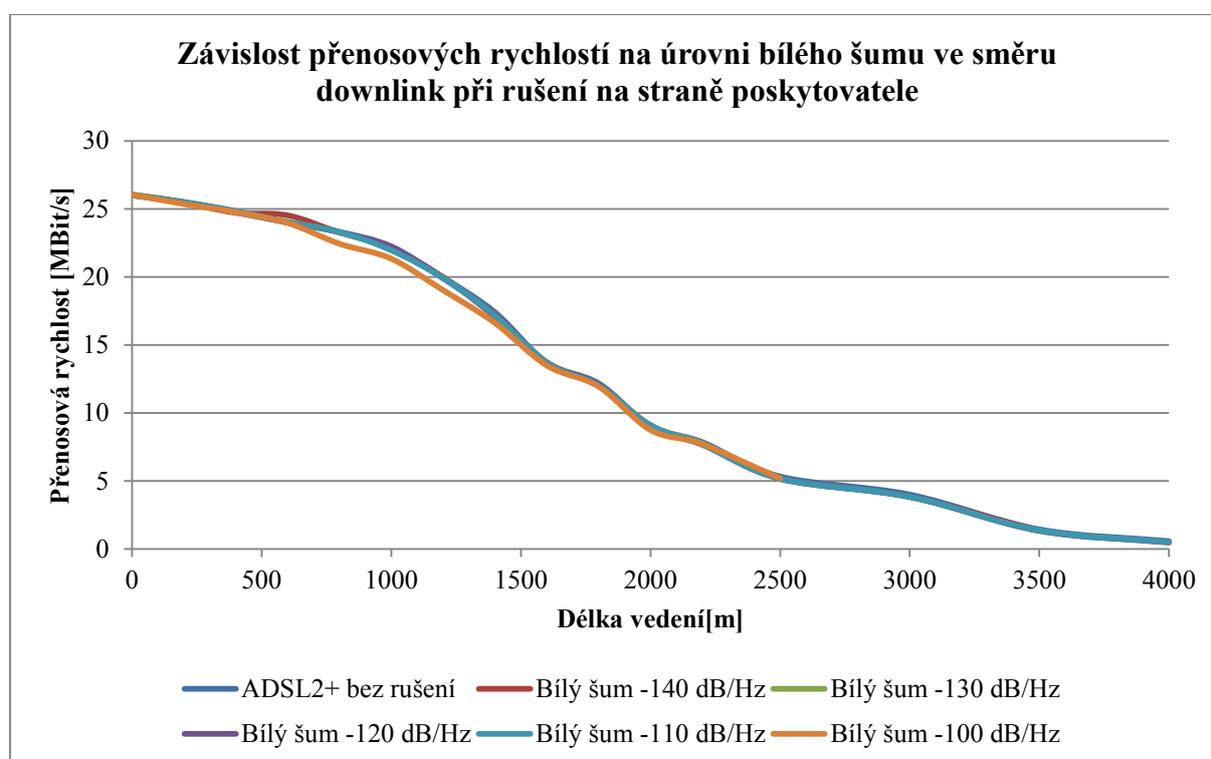
Obrázek 4.15: Závislost přenosových rychlostí na úrovni bílého šumu ve směru uplink při rušení na straně poskytovatele

Na naměřených průbězích lze pozorovat podobný trend jako v případě měření vlivu bílého šumu při umístění generátoru šumu na straně účastníka. Pro úrovně bílého šumu -140, -130 a -120 dB/Hz nejsou parametry referenční přípojky téměř vůbec ovlivňovány. Dochází pouze k malému snížení přenosových rychlostí, dosah přípojky není ovlivněn vůbec.

V případě úrovně bílého šumu -110 dB/Hz již dochází ke snížení dosahu přípojky na 3,5 km. Také přenosová rychlost byla ovlivněna a pro délku účastnického vedení nad 1 km poklesla v průměru o 300 kbit/s.

V případě úrovně bílého šumu -100 dB/Hz je vliv rušení na parametry přípojky ještě výraznější, než v případě úrovně bílého šumu -110 dB/Hz. Dosah přípojky poklesl na pouhé 2,5 km a od délky účastnického vedení nad 400 m dochází ke snížení přenosové rychlosti v průměru o 500 kbit/s.

Na obr. 4.16 je uvedena závislost dosažitelné přenosové rychlosti pro jednotlivé úrovně bílého šumu ve směru downlink.

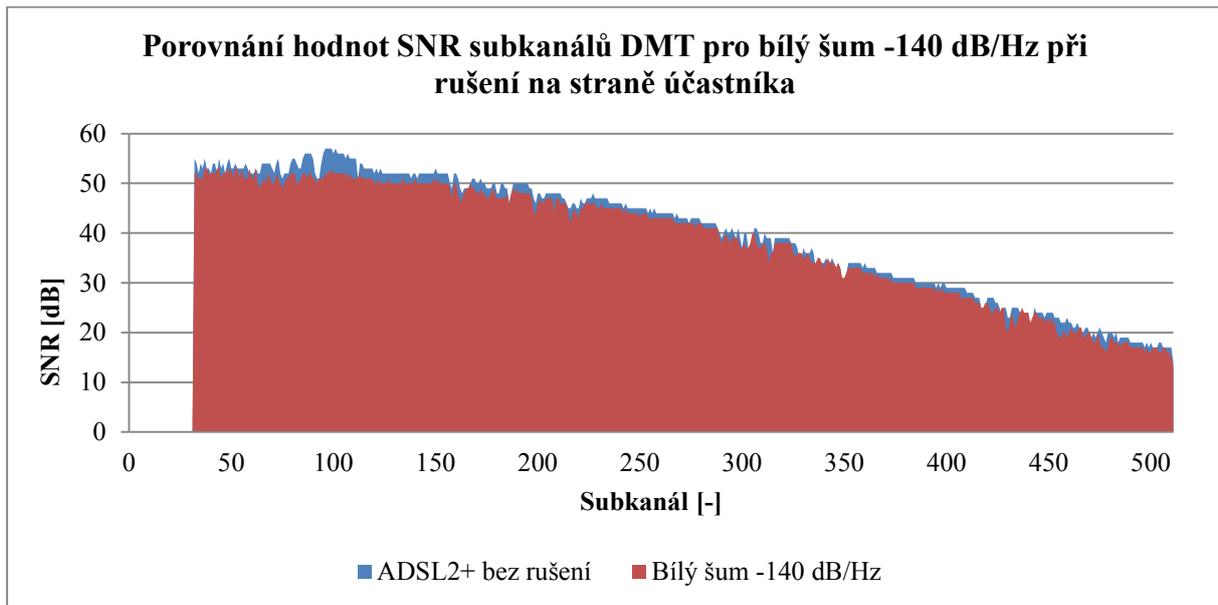


Obrázek 4.16: Závislost přenosových rychlostí na úrovni bílého šumu ve směru downlink při rušení na straně poskytovatele

Při umístění generátoru šumu na straně poskytovatele není pásmo downlink generovaným rušením znatelně ovlivňováno. Jedná se o obdobný jev jako v případě měření s generátorem na straně účastníka, kde nebylo rušením téměř vůbec ovlivňováno pásmo uplinku.

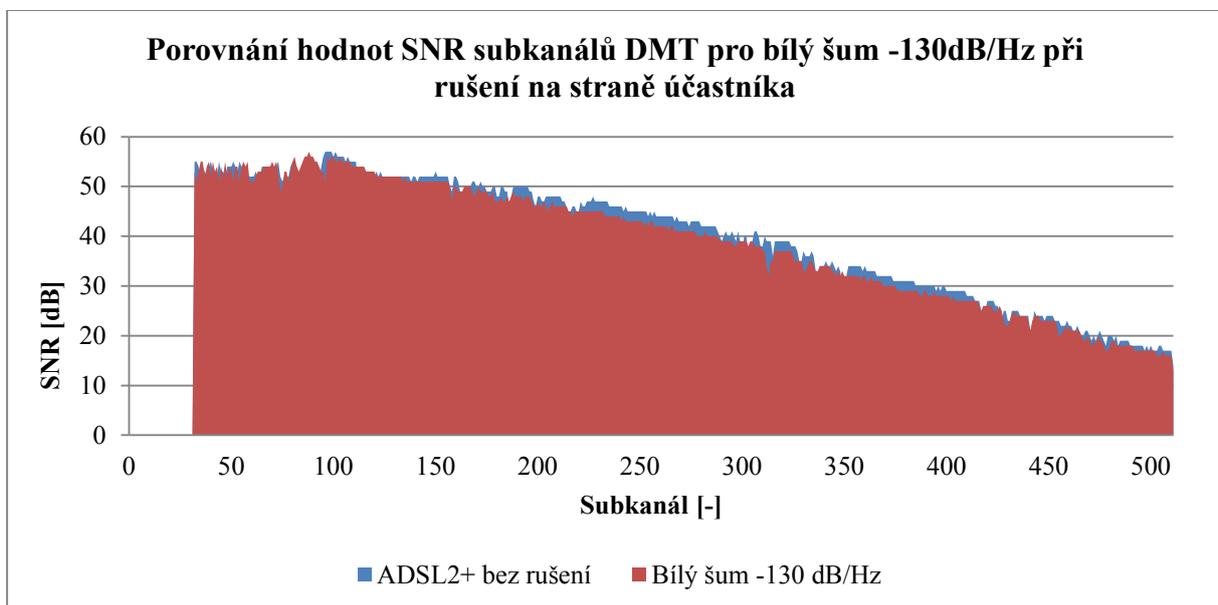
#### 4.7.3 Analýza hodnot SNR subkanálů DMT při rušení na straně účastníka

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze CH. Na obr. 4.17 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro úroveň bílého šumu -140 dB/Hz a délku účastnického vedení 1,4 km při umístění generátoru šumu na straně účastníka.



Obrázek 4.17: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro bílý šum -140 dB/Hz při rušení na straně účastníka

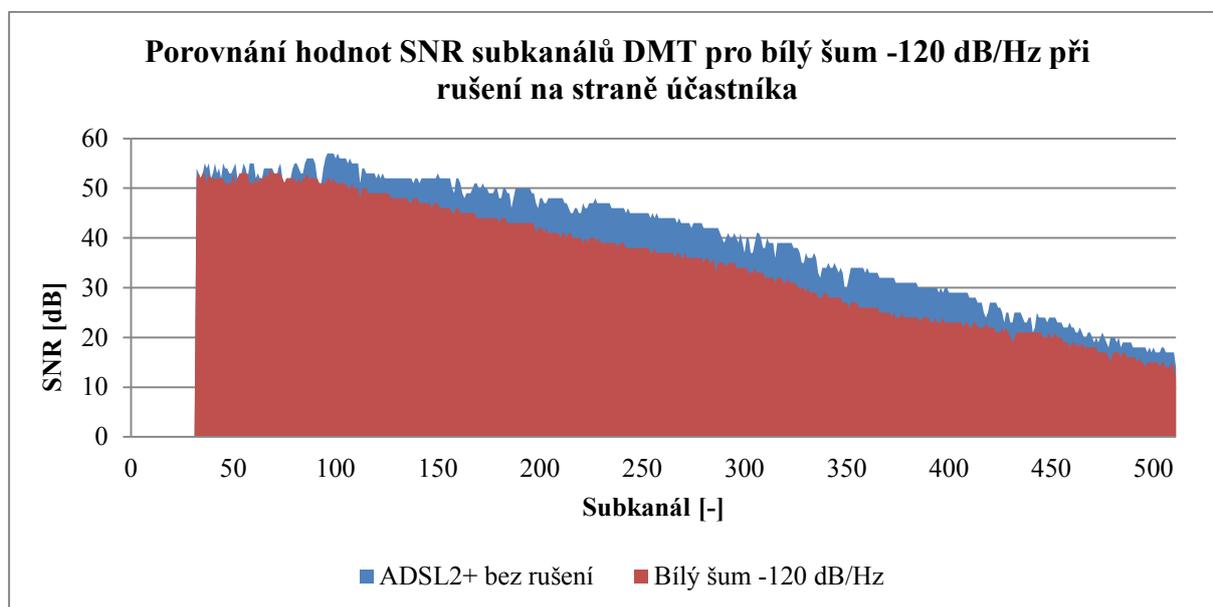
Z naměřeného průběhu je patrný minimální rozdíl mezi hodnotami SNR v případě referenční účastnické smyčky a po aplikování daného typu rušení. To odpovídá poklesu přenosové rychlosti, který byl v případě tohoto rušení oproti referenční účastnické smyčce minimální.



Obrázek 4.18: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro bílý šum -130 dB/Hz při rušení na straně účastníka

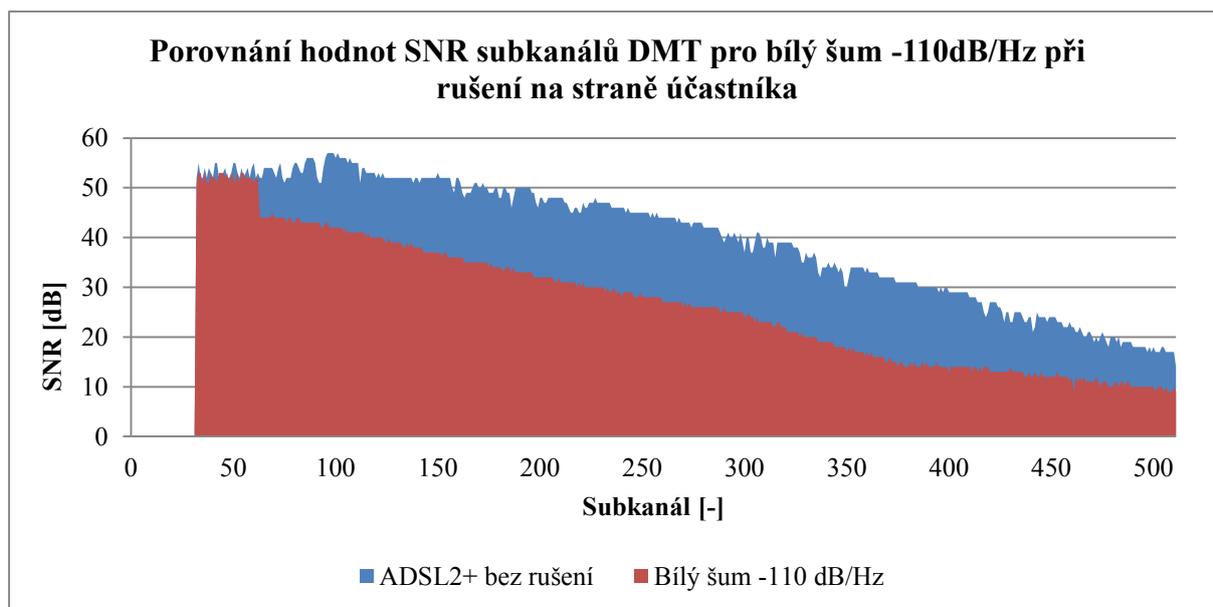
Na obr. 4.18 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro úroveň bílého šumu -130 dB/Hz. Stejně jako v případě bílého šumu o úrovni -140 dB/Hz je zde patrný minimální rozdíl mezi hodnotami SNR v případě referenční účastnické smyčky a po aplikování daného typu

rušení. To opět odpovídá poklesu přenosové rychlosti, který byl v případě tohoto rušení oproti referenční účastnické smyčce rovněž minimální.



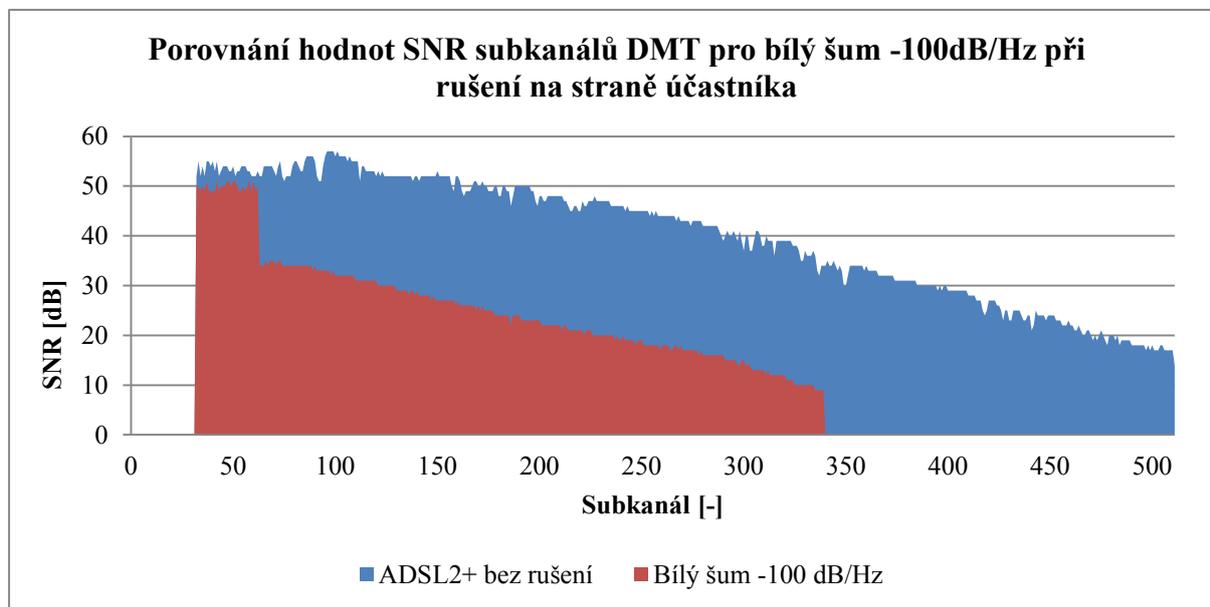
Obrázek 4.19: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro bílý šum -120 dB/Hz při rušení na straně účastníka

Na obr. 4.19 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro úroveň bílého šumu -120 dB/Hz. Při úrovni bílého šumu -120 dB/Hz je již patrný pokles SNR v subkanálech 70 až 511 o hodnotu v rozmezí 6 - 8 dB. Tomuto poklesu SNR odpovídá pokles přenosové rychlosti o přibližně 2,5 Mbit/s.



Obrázek 4.20: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro bílý šum -110 dB/Hz při rušení na straně účastníka

Na obr. 4.20 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro úroveň bílého šumu -110 dB/Hz. Zvýšení úrovně bílého šumu na tuto hodnotu se již projevilo výrazným snížením SNR ve všech subkanálech pásma downlink. Pro subkanály downlinku v rozmezí 64 - 511 došlo ke snížení SNR přibližně o 20 dB.

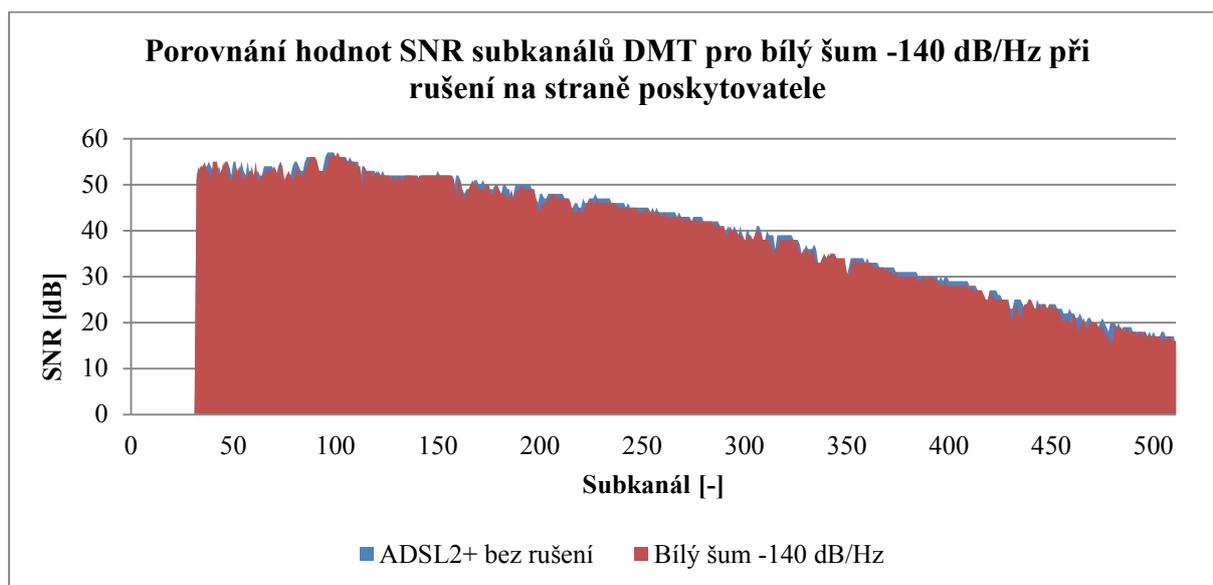


Obrázek 4.21: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro bílý šum -100 dB/Hz při rušení na straně účastníka

Na obr. 4.21 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro úroveň bílého šumu -100 dB/Hz. Při úrovni bílého šumu -100 dB/Hz je již vliv rušení velmi výrazný. Pro subkanály v rozmezí 64 - 336 došlo k zásadnímu snížení SNR až o 30 dB. Kanály 337 - 511 jsou již naprosto zarušené a pro přenos nepoužitelné. Nevyužitelnost tak velkého počtu subkanálů spolu se snížením SNR ve všech ostatních kanálech vedla k dramatickému snížení přenosové rychlosti v pásmu downlink na hodnotu 4,9 Mbit/s.

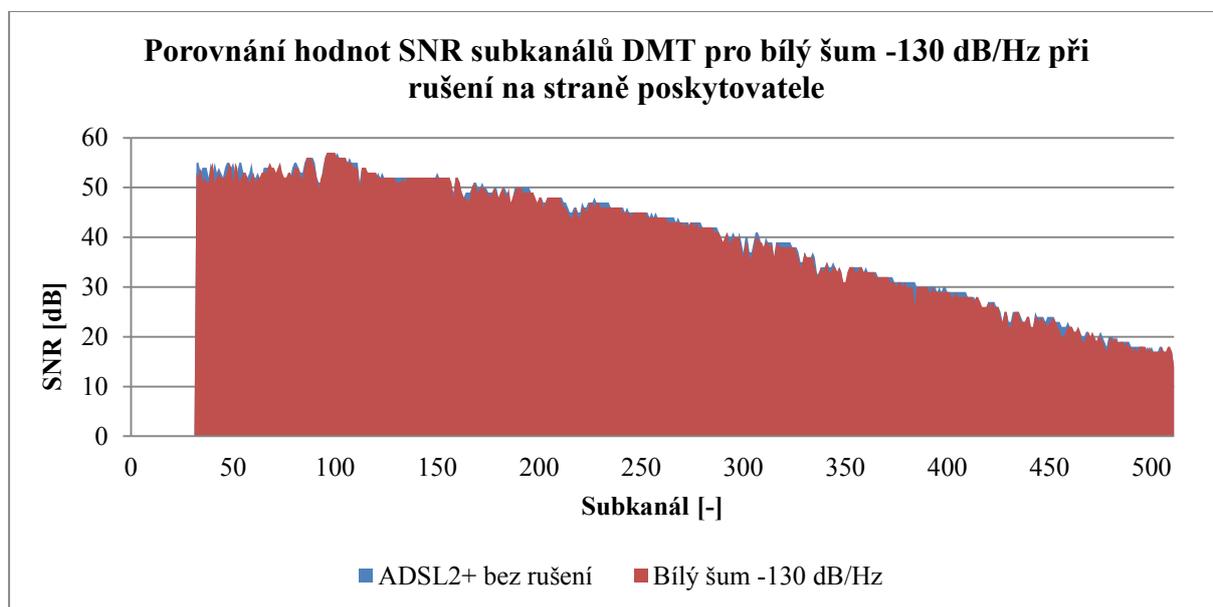
#### 4.7.4 Analýza hodnot SNR subkanálů DMT při rušení na straně poskytovatele

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze I. Na obr. 4.22 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro úroveň bílého šumu -140 dB/Hz a délku účastnického vedení 1,4 km při umístění generátoru šumu na straně poskytovatele.



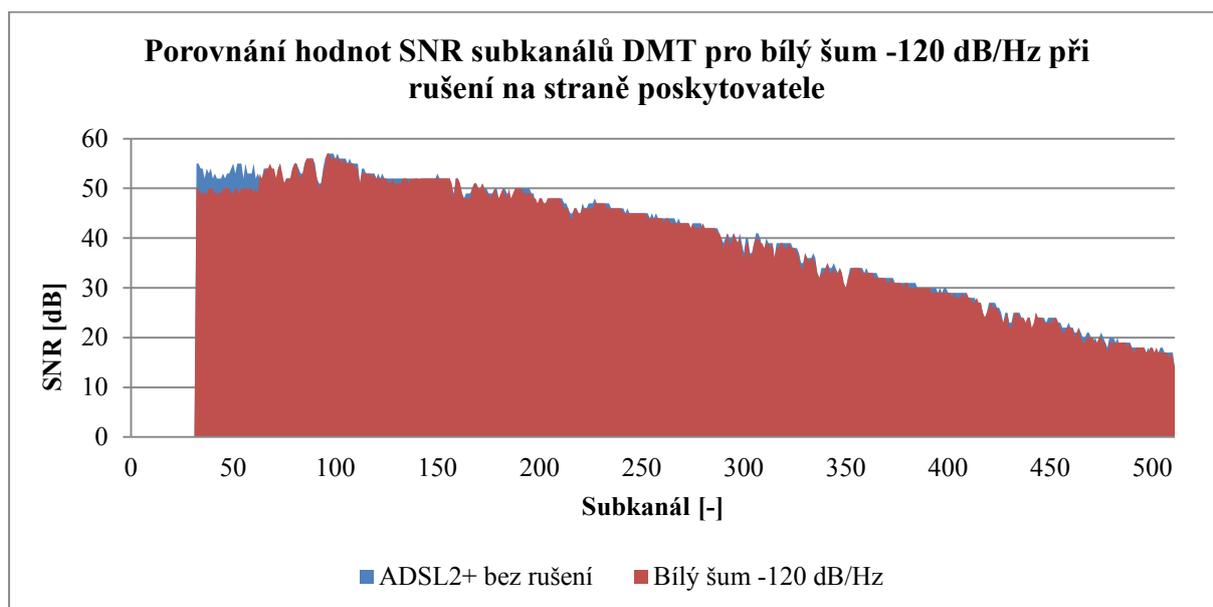
Obrázek 4.22: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro bílý šum -140 dB/Hz při rušení na straně poskytovatele

Z naměřených hodnot SNR je patrný téměř nulový rozdíl oproti referenčním hodnotám. To odpovídá poklesu přenosové rychlosti, který byl v případě tohoto rušení oproti referenční účastnické smyčce minimální.



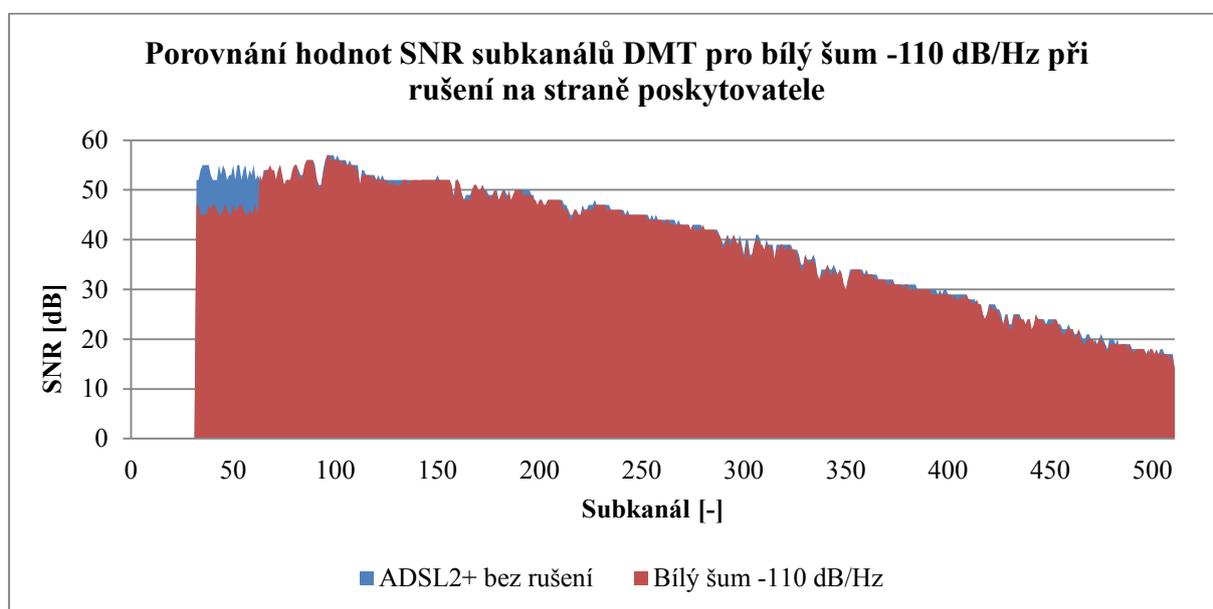
Obrázek 4.23: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro bílý šum -130 dB/Hz při rušení na straně poskytovatele

Na obr. 4.23 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro úroveň bílého šumu -130 dB/Hz. Rovněž v tomto případě je zarušení jednotlivých subkanálů minimální. Naměřené hodnoty SNR jsou totožné s hodnotami referenční účastnické smyčky. I v tomto případě nedošlo ke znatelnému poklesu přenosové rychlosti oproti referenční účastnické smyčce.



Obrázek 4.24: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro bílý šum -120 dB/Hz při rušení na straně poskytovatele

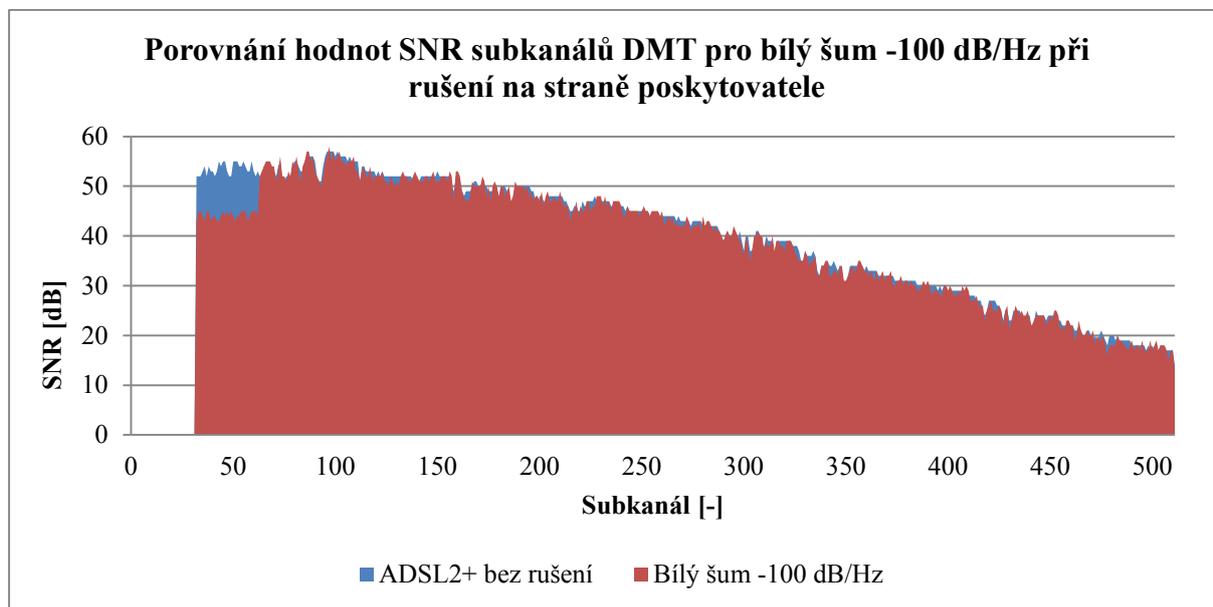
Při úrovni bílého šumu rovné -120 dB/Hz je z naměřených hodnot uvedených na obr. 4.24 již patrný pokles SNR v subkanálech pásma uplink s indexem 32 - 63 o přibližně 3 až 5 dB. Toto snížení se projevilo na hodnotě naměřené přenosové rychlosti pouze minimálně. SNR subkanálů pásma downlink ovlivněna nebyla, stále jsou téměř totožné s hodnotami referenční účastnické smyčky.



Obrázek 4.25: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro bílý šum -110 dB/Hz při rušení na straně poskytovatele

Na obr. 4.25 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro úroveň bílého šumu -110 dB/Hz. Při této úrovni bílého šumu došlo ke snížení SNR subkanálů pásma uplink

o přibližně 8 dB oproti referenčním hodnotám. Toto snížení SNR se již projevilo poklesem naměřené přenosové rychlosti na 1,253 Mbit/s (oproti 1,367 Mbit/s u referenční účastnické smyčky).



Obrázek 4.26: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro bílý šum -100 dB/Hz při rušení na straně poskytovatele

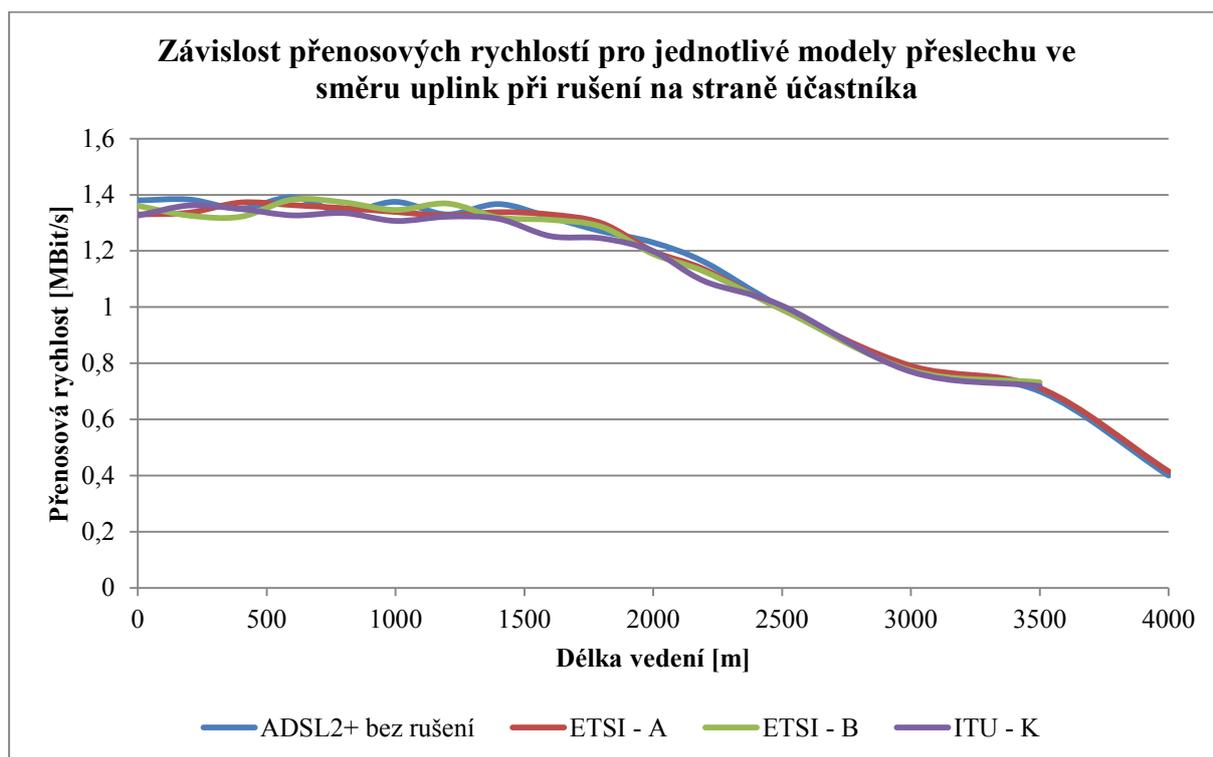
Na obr. 4.26 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro úroveň bílého šumu -100 dB/Hz. Při této úrovni bílého šumu došlo k dalšímu snížení hodnoty SNR pro všechny subkanály pásma uplink. Hodnota SNR poklesla přibližně o 10 dB oproti referenčním hodnotám. Tento pokles hodnot SNR zapříčinil snížení dosahované přenosové rychlosti na 1,009 Mbit/s

## 4.8 Měření vlivu přeslechů na digitální účastnickou smyčku

Při měření vlivu přeslechů byly na digitální účastnickou smyčku aplikovány 3 vybrané modely přeslechů – ETSI-A, ETSI-B a ITU-K. Stejně jako v případě měření bílého šumu byl pozorován jejich vliv na dosah a dosažitelné přenosové rychlosti a následně provedena analýza zarušení jednotlivých subkanálů DMT.

### 4.8.1 Měření dosažitelné přenosové rychlosti při rušení na straně účastníka

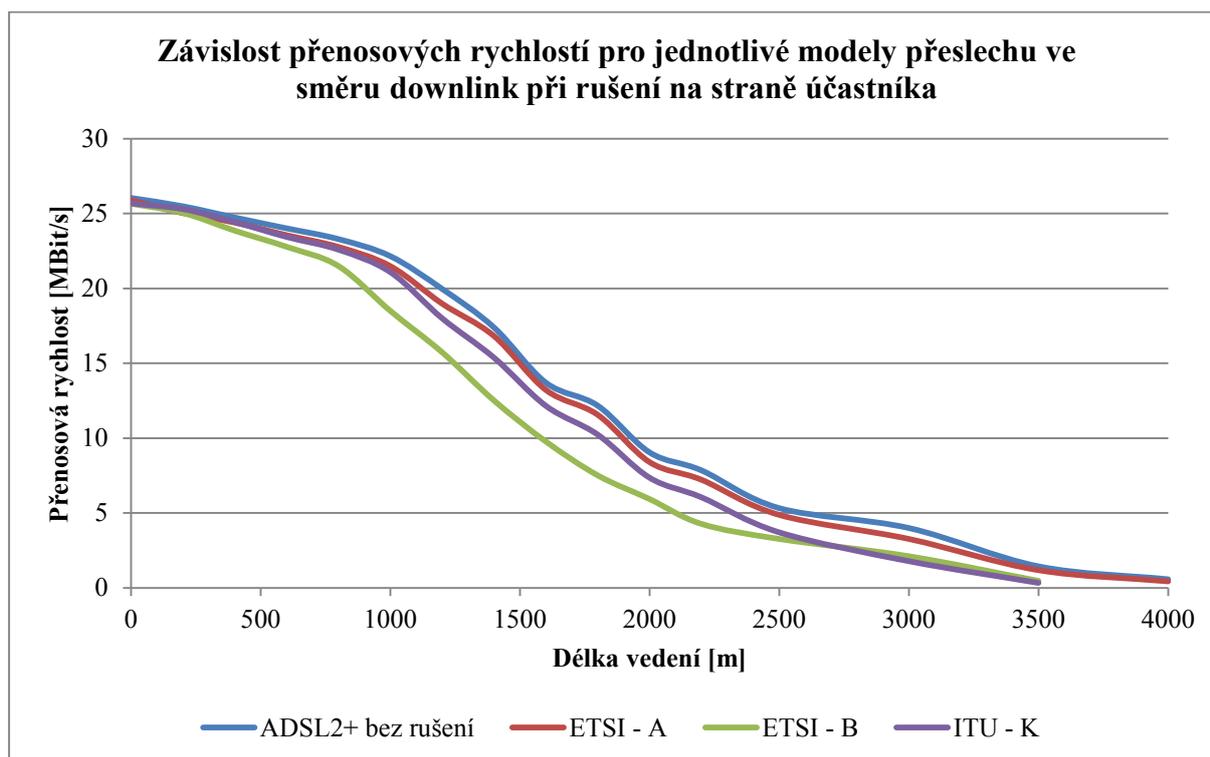
Při tomto měření byl generátor šumu připojen na stranu účastníka. Tabulka naměřených hodnot je obsažena v příloze D. Na obr. 4.27 je uvedena závislost dosažitelné přenosové rychlosti pro jednotlivé modely přeslechů ve směru uplink.



Obrázek 4.27: Závislost přenosových rychlostí pro jednotlivé modely přeslechu ve směru uplink při rušení na straně účastníka

Z naměřených hodnot pro pásmo uplink je jasně patrné, že při umístění generátoru šumu na straně účastníka není pásmo uplinku generovaným rušením nijak ovlivněno. Naměřené křivky jednotlivých modelů šumu přesně kopírují hodnoty referenční účastnické smyčky.

Na obr. 4.28 je uvedena závislost dosažitelné přenosové rychlosti pro jednotlivé modely přeslechu ve směru downlink.



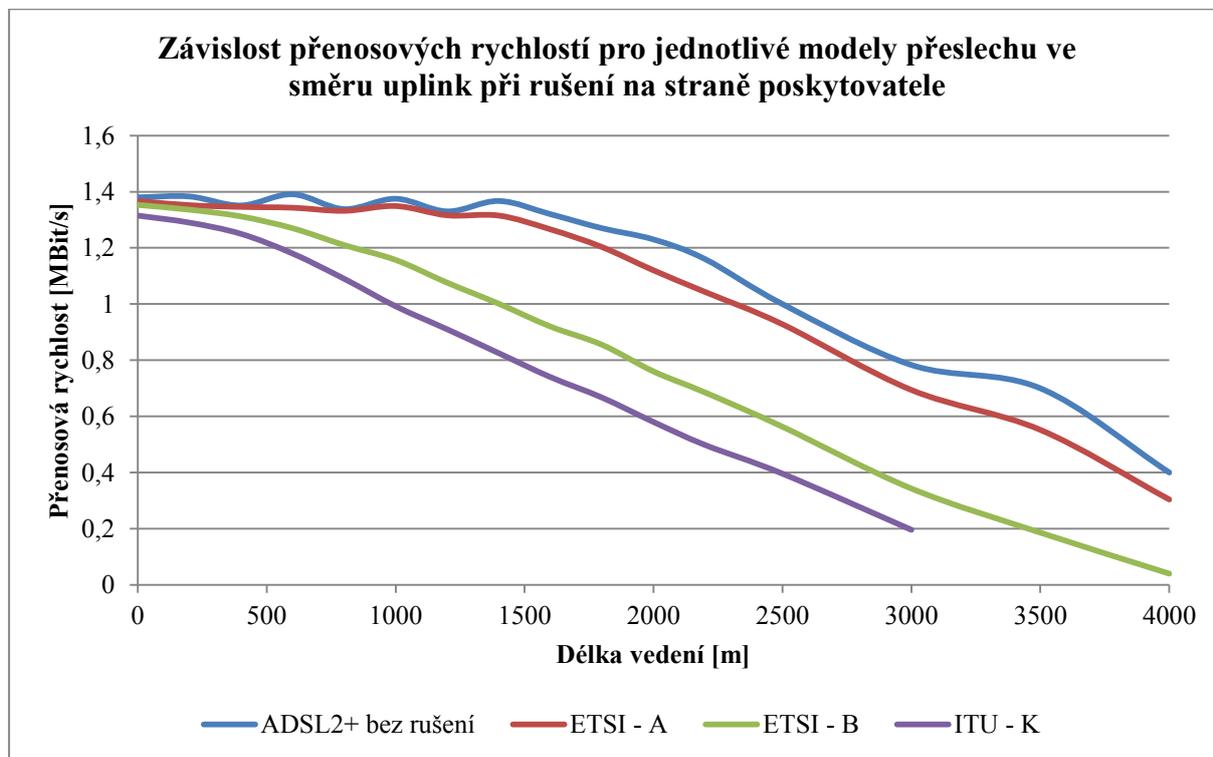
Obrázek 4.28: Závislost přenosových rychlostí pro jednotlivé modely přeslechu ve směru downlink při rušení na straně účastníka

Z naměřených hodnot je patrný poměrně malý vliv přeslechu ETSI-A na parametry referenční účastnické smyčky. Nedošlo ke snížení dosahu a přenosová rychlost poklesla přibližně o 600 kbit/s pro všechny délky účastnického vedení. Poněkud výraznější vliv na parametry referenční účastnické smyčky měl model přeslechu ITU-K. Došlo ke snížení dosahu na 3,5 km, dále pro délky účastnického vedení nepřesahující 1 km došlo k poklesu dosažitelné přenosové rychlosti o 600 kbit/s, stejně jako v případě modelu ETSI-A. Ovšem pro délky účastnického vedení přesahující 1 km je vliv toho modelu přeslechu výraznější a již dochází k poklesu přenosové rychlosti přibližně o 1,3 Mbit/s.

Přeslech v podobě modelu ETSI-B se na parametrech referenční účastnické smyčky promítl nejvýrazněji ze všech 3 měřených modelů. Již od délky účastnického vedení v řádu stovek metrů poklesla dosažitelná přenosová rychlost o přibližně 1,5 Mbit/s a s rostoucí délkou účastnického vedení se vliv toho modelu přeslechu stupňuje. Pro délky účastnického vedení v rozmezí 800 – 2500 m je již pokles přenosové rychlosti velmi výrazný a dosahuje v průměru 4 Mbit/s oproti referenční hodnotě. Pro délky účastnického vedení nad 2,5 km vliv toho modelu klesá a velmi se přibližuje hodnotám modelu ITU-K. Stejně jako v případě modelu ITU-K došlo ke snížení dosahu na 3,5 km.

#### 4.8.2 Měření dosažitelné přenosové rychlosti při rušení na straně poskytovatele

Při tomto měření byl generátor šumu připojen na stranu poskytovatele. Tabulka naměřených hodnot je obsažena v příloze E. Na obr. 4.29 je uvedena závislost dosažitelné přenosové rychlosti pro jednotlivé modely přeslechů ve směru uplink.

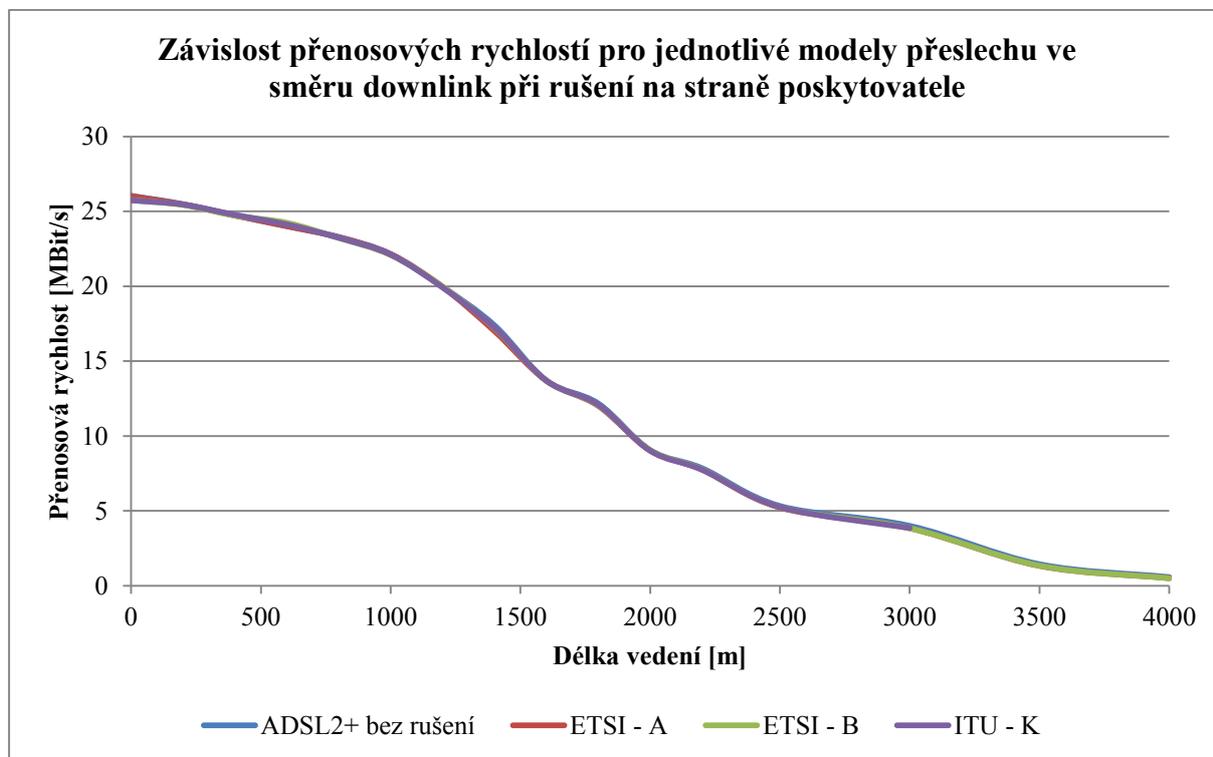


Obrázek 4.29: Závislost přenosových rychlostí pro jednotlivé modely přeslechu ve směru uplink při rušení na straně poskytovatele

Z naměřených hodnot je patrný poměrně výrazný vliv všech vybraných druhů přeslechů na přenosové rychlosti ve směru uplink. Model ETSI-A způsobil znatelný pokles přenosové rychlosti až od délky účastnického vedení překračující hodnotu 1,4 km. Pro vyšší délky účastnického vedení došlo k poklesu přenosové rychlosti přibližně o 100 kbit/s. Model ETSI-B se projevil ještě vyšším poklesem, a to hned od délky účastnického vedení v řádu stovek metrů. Rozdíl v přenosové rychlosti v porovnání s hodnotami referenční účastnické smyčky dosahuje až 350 kbit/s. V případě modelů ETSI-A a ETSI-B nebyl ovlivněn dosah účastnické přípojky.

Nejvyšší vliv na parametry referenční účastnické přípojky v pásmu uplink vykazoval model přeslechu ITU-K. Již při nulové délce účastnického vedení došlo ke snížení dosažené přenosové rychlosti přibližně o 60 kbit/s. Při délce účastnického vedení 600 m už pokles přenosové rychlosti dosahoval 200 kbit/s. Pro délky účastnického vedení nad 600 m došlo k poklesu přenosové rychlosti o 500 kbit/s, což je nejvyšší zaznamenaný pokles ze všech měřených typů rušení. Vlivem tohoto typu přeslechu klesl dosah účastnické přípojky na 3 km.

Na obr. 4.30 je uvedena závislost dosažitelné přenosové rychlosti pro jednotlivé modely přeslechu ve směru downlink.

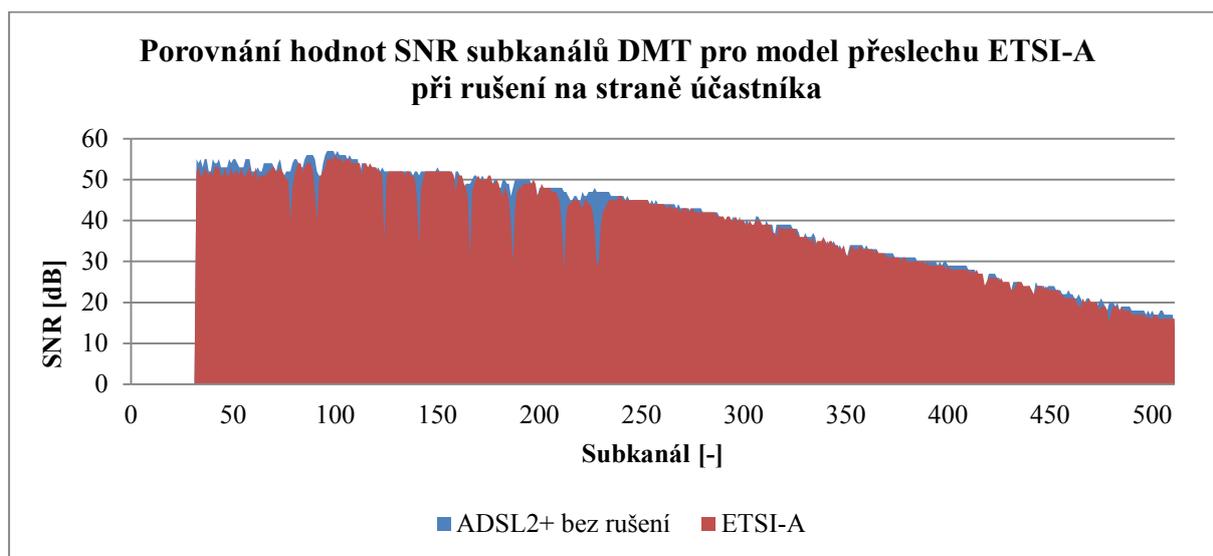


*Obrázek 4.30: Závislost přenosových rychlostí pro jednotlivé modely přeslechu ve směru downlink při rušení na straně poskytovatele*

Stejně jako v případě měření vlivu bílého šumu je možno pozorovat minimální snížení přenosových rychlostí v pásmu downlink při umístění generátoru šumu na straně poskytovatele. Naměřené křivky pro jednotlivé modely šumu přesně kopírují tvar křivky referenční účastnické přípojky. U modelu přeslechu ITU-K došlo ke snížení dosahu vlivem velkého zarušení pásma uplinku.

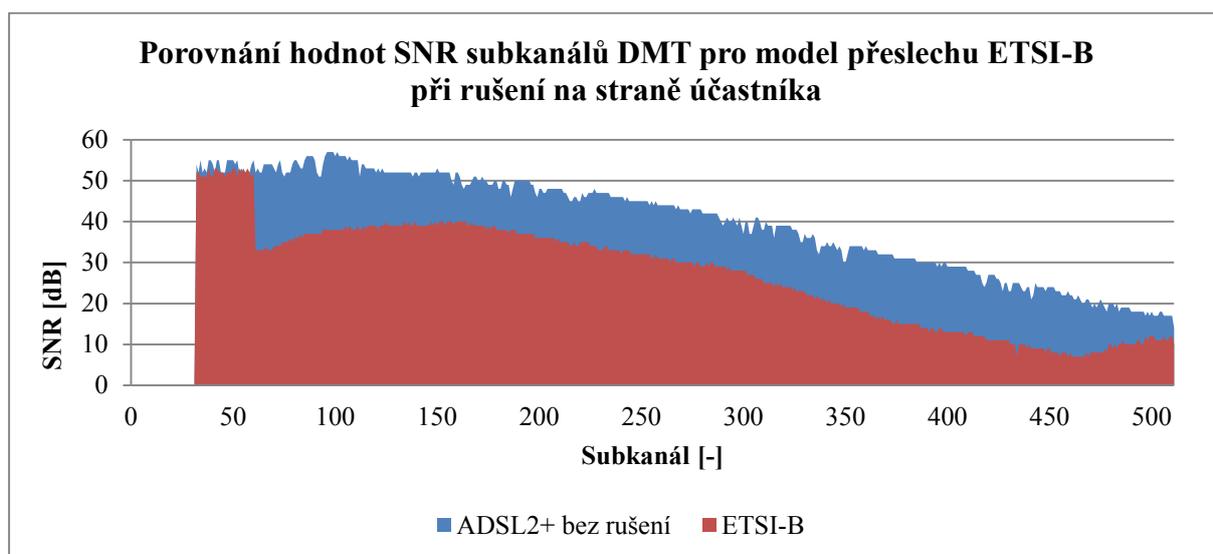
#### 4.8.3 Analýza hodnot SNR subkanálů DMT při rušení na straně účastníka

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze CH. Na obr. 4.31 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro model šumu ETSI-A a délku účastnického vedení 1,4 km při umístění generátoru šumu na straně účastníka.



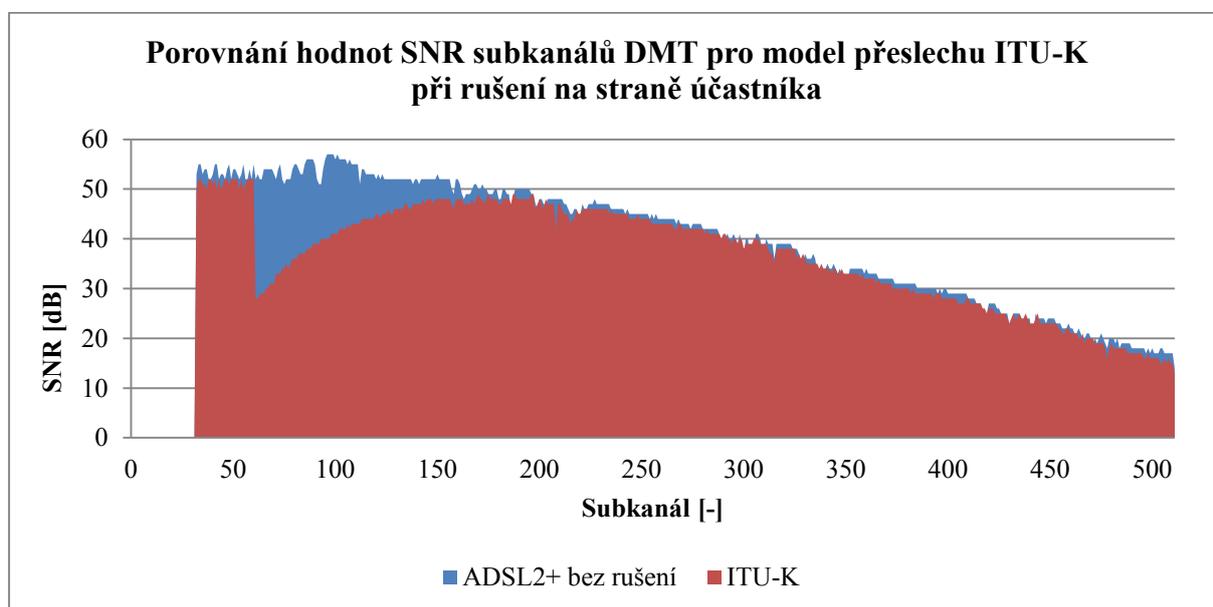
Obrázek 4.31: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro model přeslechu ETSI-A při rušení na straně účastníka

Z hodnot SNR jednotlivých subkanálů je možno vidět, že nedošlo k celkovému poklesu SNR ve všech subkanálech, tak jako tomu bylo u měření vlivu bílého šumu. Místo toho došlo pouze k lokálním snížením hodnoty SNR na subkanálech, které svou frekvencí odpovídají úroňovým špičkám v spektrálním složení modelu přeslechu ETSI-A. Jmenovitě se jedná o subkanály 78, 91, 124, 141, 166, 187, 212 a 228. Pokles SNR v těchto subkanálech dosahuje až 15 dB oproti subkanálům, které nebyly zasaženy úroňovými špičkami. Tyto subkanály dosahují, až na minimální rozdíly, porovnatelných hodnot SNR jako v případě referenční účastnické smyčky. Snížení hodnoty SNR v takto málem počtu subkanálů mělo za následek pokles přenosové rychlosti o 600 kbit/s oproti referenční účastnické smyčce.



Obrázek 4.32: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro model přeslechu ETSI-B při rušení na straně účastníka

Jak je možno vidět z obr. 4.32, došlo vlivem modelu přeslechu ETSI-B k nerovnoměrnému zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace. Pro subkanály v rozmezí 64 - 75 došlo ke snížení hodnoty SNR přibližně o 20 dB oproti referenční účastnické smyčce. Ovšem od subkanálu 76 dochází k nárůstu hodnoty SNR a ve svém maximu okolo subkanálu 155 již dosahuje 36 dB, což znamená pokles o 12 dB oproti referenční účastnické smyčce. Podobného poklesu SNR rovněž dosahují subkanály v rozmezí 155 - 310, ovšem pro subkanály za hranicí indexu 310 dochází opět k poklesu hodnoty SNR na přibližně 12 dB, což znamená pokles o 15 dB oproti referenčním hodnotám. Změna opět přichází v pásmu subkanálů 460 - 511, kde hodnota SNR opět stoupá a rozdíl oproti referenční hodnotě dosahuje pouze 7 dB. Celkově tento model šumu zapříčinil pokles přenosové rychlosti o 4,5 Mbit/s.

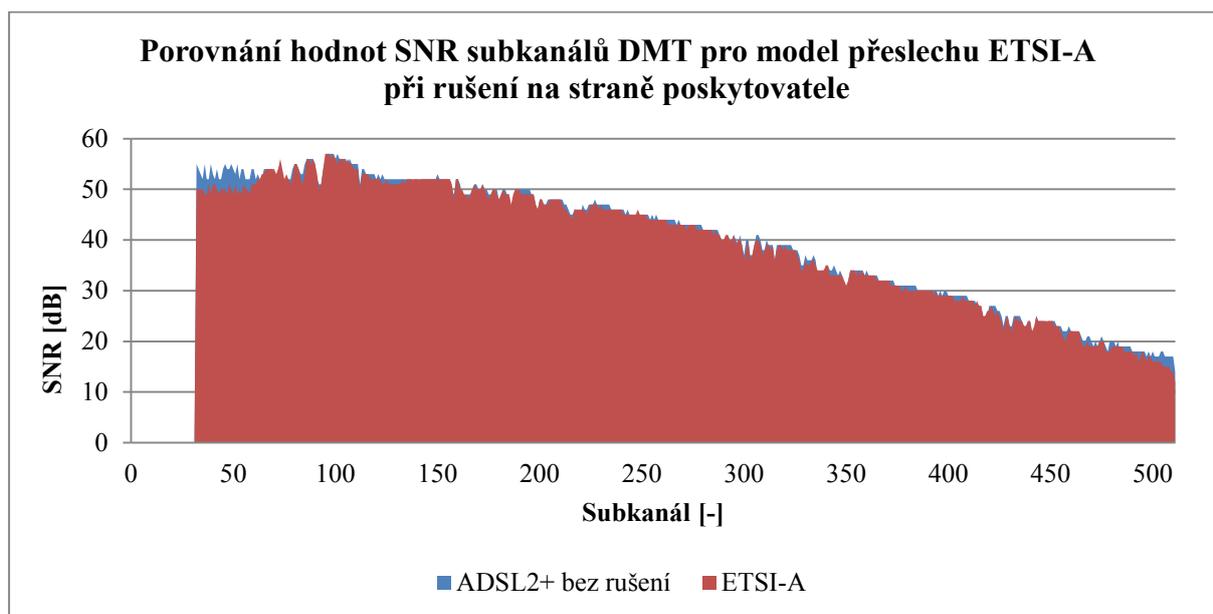


Obrázek 4.33: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro model přeslechu ITU-K při rušení na straně účastníka

Na obr. 4.33 je uvedeno porovnání hodnot SNR pro model přeslechu ITU-K. Z výsledků je patrné výrazné snížení hodnot SNR pro subkanály s indexem 64 - 175 o přibližně 7 - 22 dB. Subkanály pásma uplink ani ostatní subkanály pásma downlink zasaženy nebyly. Opět se tedy jedná o lokální snížení, které svým rozsahem přesně odpovídá frekvenčnímu složení modelu přeslechu ITU-K. Celkově tento model způsobil pokles přenosové rychlosti o přibližně 2 Mbit/s.

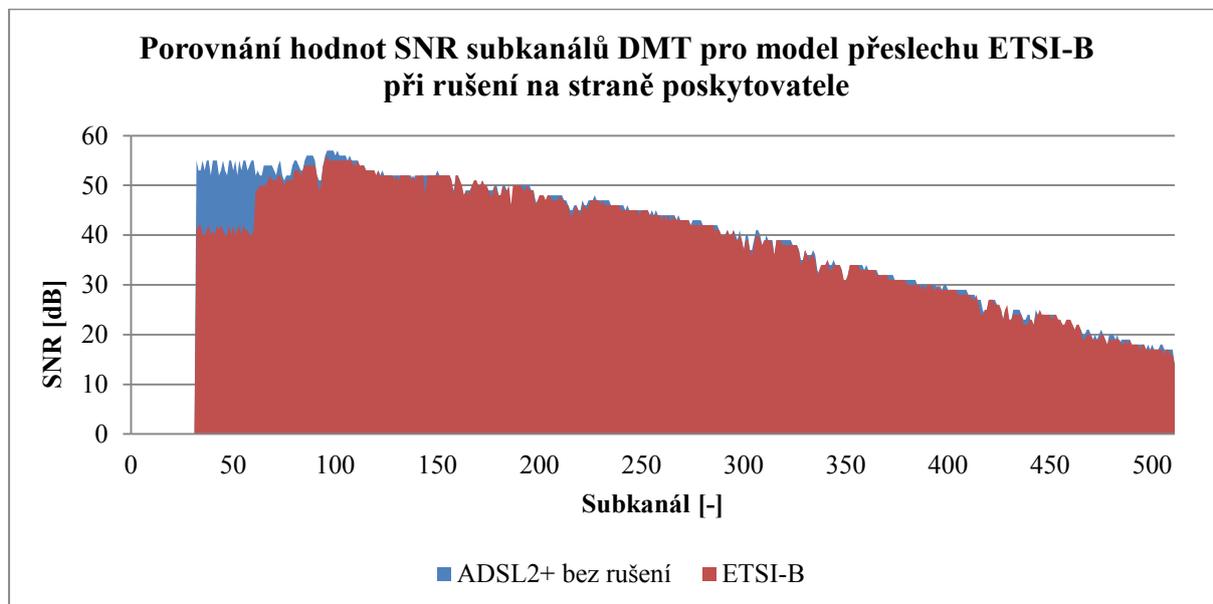
#### 4.8.4 Analýza hodnot SNR subkanálů DMT při rušení na straně poskytovatele

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze I. Na obr. 4.34 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro model šumu ETSI-A a délku účastnického vedení 1,4 km při umístění generátoru šumu na straně poskytovatele.



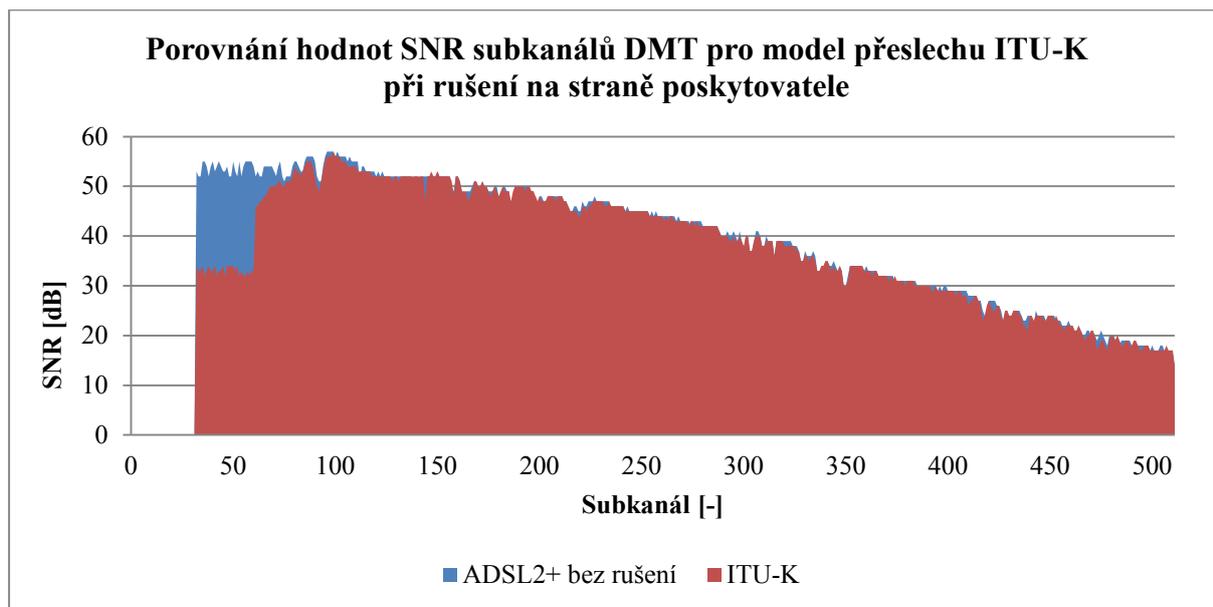
Obrázek 4.34: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro model přeslechu ETSI-A při rušení na straně poskytovatele

Z naměřených hodnot je patrný velmi malý pokles SNR v subkanálech pásma uplink 32 - 63 dosahující hodnoty okolo 3 dB. Hodnota SNR subkanálů pásma downlink v rozmezí 64 - 510 se naprosto shoduje s hodnotami referenční účastnické smyčky. To odpovídá naměřeným hodnotám přenosové rychlosti, kde v pásmu uplink poklesla o pouhých 40 kbit/s a v pásmu downlink nedošlo k žádnému poklesu.



Obrázek 4.35: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro model přeslechu ETSI-B při rušení na straně poskytovatele

Na obr. 4.35 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro model šumu ETSI-B a délku účastnického vedení 1,4 km při umístění generátoru šumu na straně poskytovatele. Je zde možno vidět výrazný pokles hodnot SNR pro subkanály pásma uplink v rozmezí 32 - 63 dosahující přibližně 15 dB. Jedná se o výrazný rozdíl, který způsobil pokles přenosové rychlosti o přibližně 360 kbit/s. Stejně jako v případě modelu ETSI-A nebyly vůbec ovlivněny subkanály pásma downlink a dosažená přenosová rychlost se nijak neliší od referenčních hodnot.



Obrázek 4.36: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro model přeslechu ITU-K při rušení na straně poskytovatele

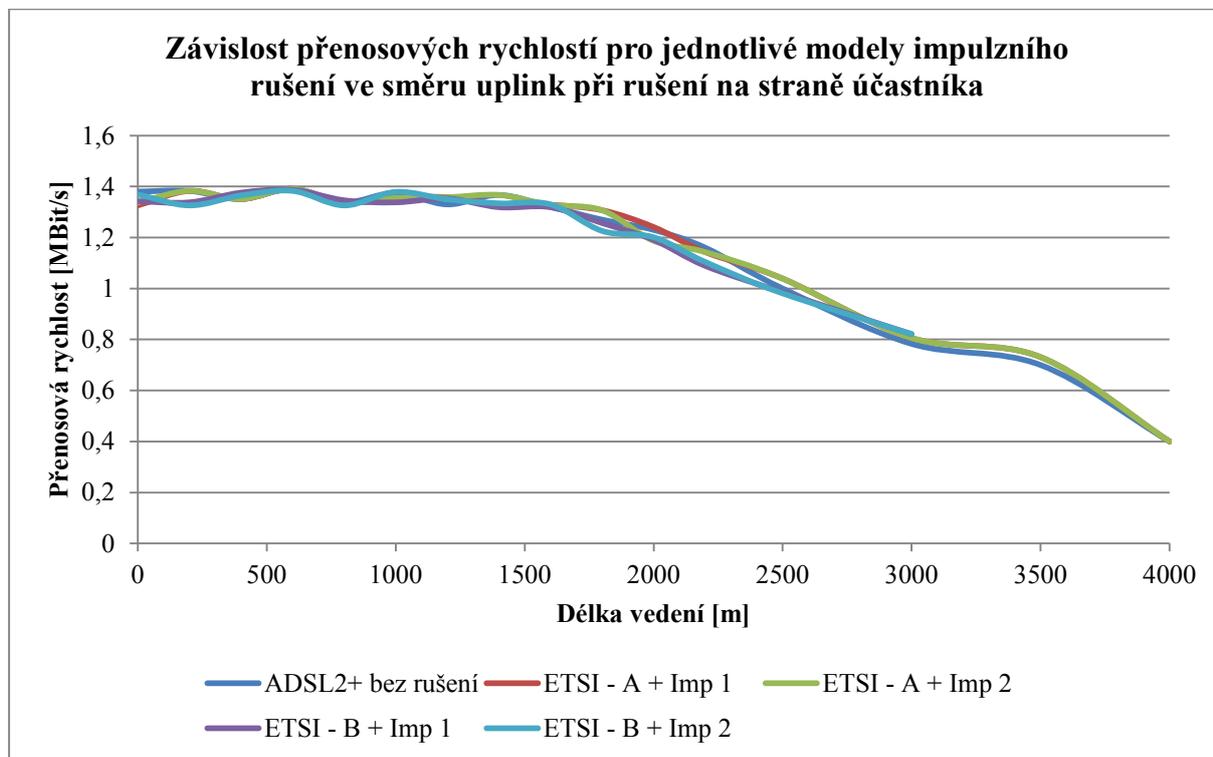
Na obr. 4.36 se nachází naměřený graf SNR pro model přeslechu ITU-K. Tento model přeslechu dosahoval zdaleka nejvyššího vlivu na přenosové rychlosti v pásmu uplink. Vidíme, že pokles hodnot SNR subkanálů pásma uplink 32 - 63 dosahuje hodnoty až 20 dB. Tomuto poklesu hodnot SNR odpovídá pokles přenosové rychlosti v pásmu uplink o 600 kbit/s. Hodnota SNR subkanálů pásma downlink ovlivněna nebyla a v tomto směru přípojka dosahuje shodných hodnot přenosových rychlostí jako v případě referenční účastnické přípojky.

## 4.9 Měření vlivu impulzního rušení na digitální účastnickou smyčku

Při tomto měření byl pozorován vliv jednotlivých modelů impulzního rušení tak, jak jsou popsány v kapitole 4.4.3. Měření vlivu impulzního rušení se ukázalo jako poměrně komplikované, a to z důvodu charakteru impulzního rušení. Hlavním projevem impulzního rušení je vznik náhodných shluků chyb, což způsobovalo časté rozpady spojení a nutnost opakování měření. Primárně byl opět pozorován vliv vybraných druhů impulzního rušení na dosah a přenosovou rychlost v obou směrech přenosu a následně byla provedena analýza zarušení subkanálů DMT.

#### 4.9.1 Měření dosažitelné přenosové rychlosti při rušení na straně účastníka

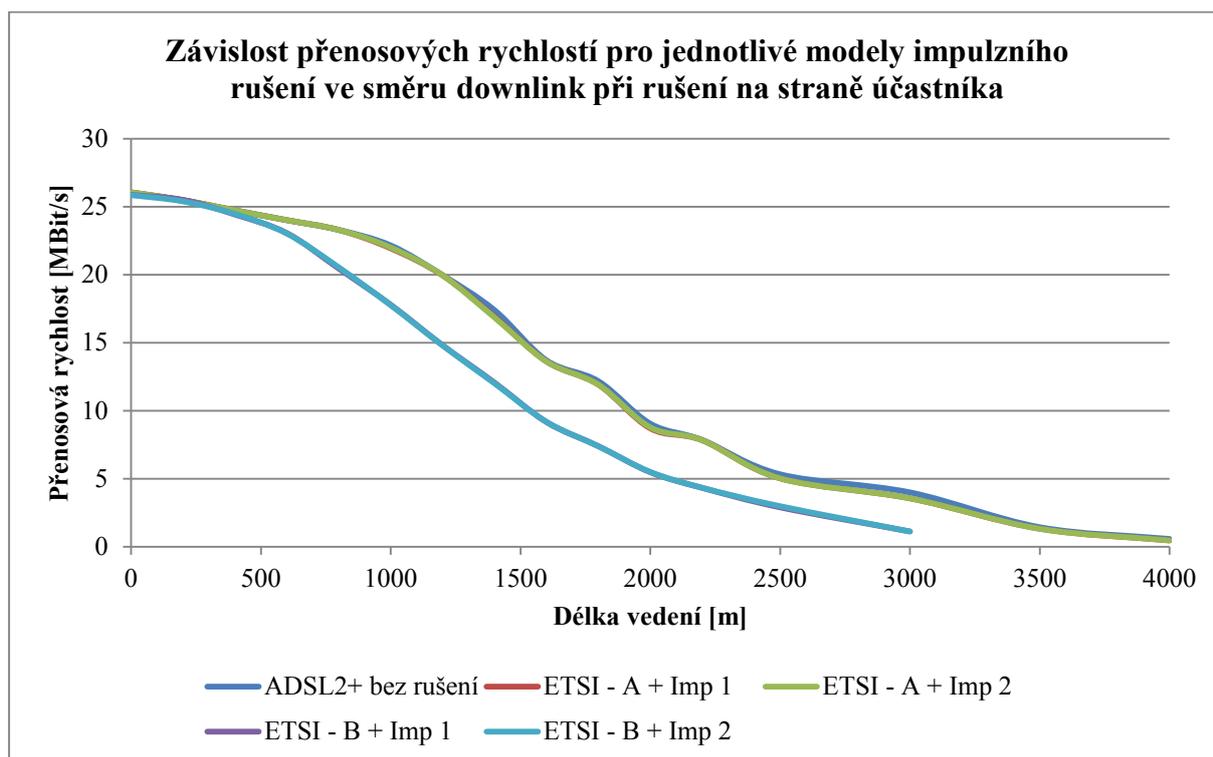
Při tomto měření byl generátor šumu připojen na stranu účastníka. Tabulka naměřených hodnot je uvedena v příloze F. Na obr. 4.37 je uvedena závislost dosažitelné přenosové rychlosti pro jednotlivé modely impulzního rušení ve směru uplink.



Obrázek 4.37: Závislost přenosových rychlostí pro jednotlivé modely impulzního rušení ve směru uplink při rušení na straně účastníka

Při umístění generátoru šumu na straně účastníka je z naměřeným hodnot patrný minimální vliv impulzního rušení na pásmo uplink. Křivky prezentující jednotlivé modely přeslechů věrně kopírují křivku referenční účastnické přípojky.

Na obr. 4.38 je uvedena závislost dosažitelné přenosové rychlosti pro jednotlivé modely impulzního rušení ve směru downlink.

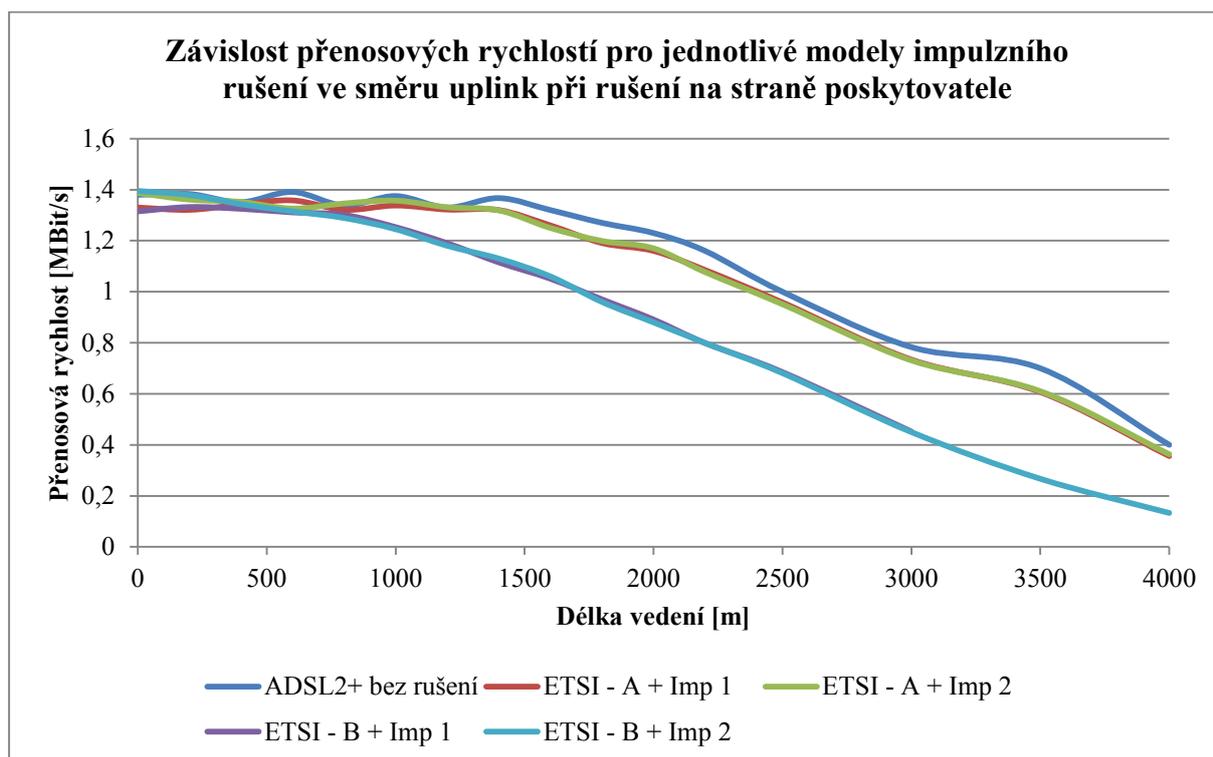


Obrázek 4.38: Závislost přenosových rychlostí pro jednotlivé modely impulzního rušení ve směru downlink při rušení na straně účastníka

V případě pásma downlink je možno pozorovat znatelné ovlivnění dosahu a přenosové rychlosti v případě aplikace modelů ETSI-B + Imp 1 a ETSI-B + Imp 2. Díky vlivu těchto modelů poklesl dosah účastnické přípojky na 3 km a od délky účastnického vedení přesahující 800 m došlo k poklesu dosažitelné přenosové rychlosti o 6 Mbit/s oproti referenční účastnické přípojce. Modely impulzního rušení ETSI-A + Imp 1 a ETSI-A + Imp 2 neměly na parametry účastnické přípojky žádný vliv a jejich křivky přesně kopírují křivku referenční účastnické přípojky.

#### 4.9.2 Měření dosažitelné přenosové rychlosti při rušení na straně poskytovatele

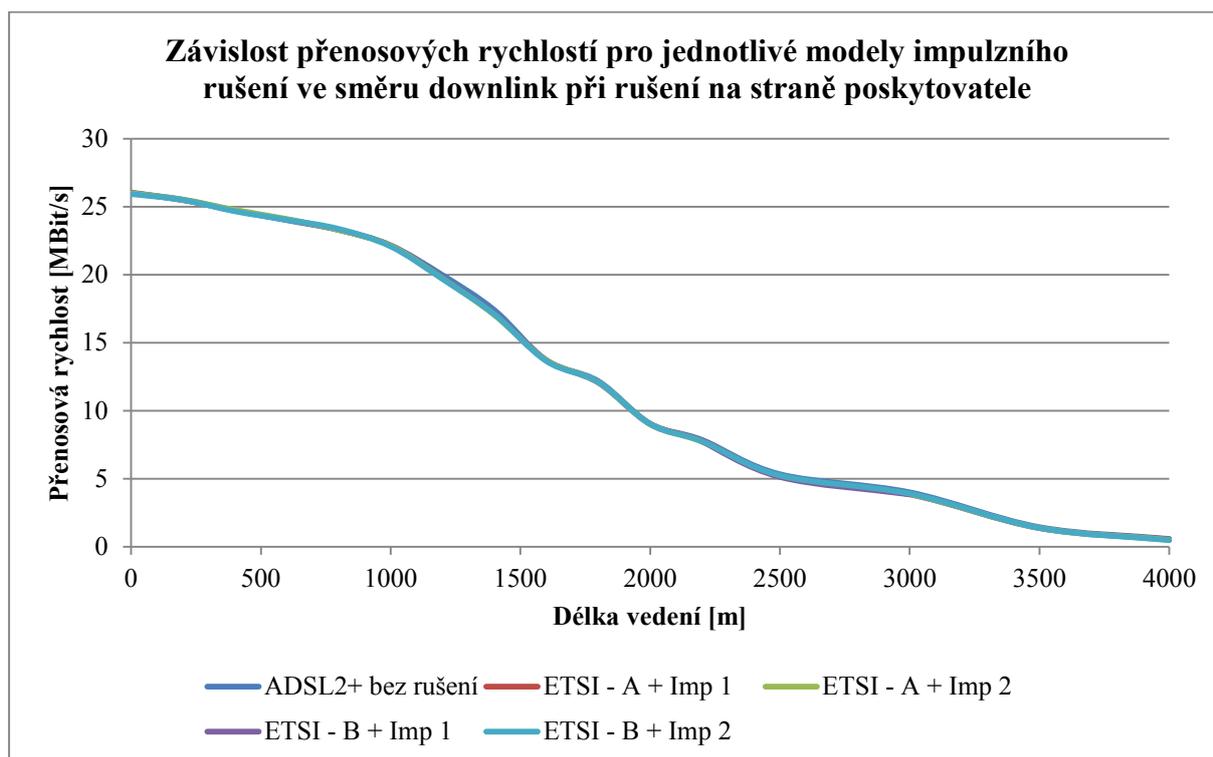
Při tomto měření byl generátor šumu připojen na stranu poskytovatele. Tabulka naměřených hodnot je obsažena v příloze G. Na obr. 4.39 je uvedena závislost dosažitelné přenosové rychlosti pro jednotlivé modely impulzního rušení ve směru uplink.



Obrázek 4.39: Závislost přenosových rychlostí pro jednotlivé modely impulzního rušení ve směru uplink při rušení na straně poskytovatele

Dle naměřených hodnot modely impulzního rušení ETSI-A + Imp 1 a Imp 2 dosahují shodných hodnot a způsobily ve směru uplink pouze malé snížení přenosové rychlosti, a to v okolí 100 kbit/s. Daleko vyšší vliv vykazovaly modely impulzního rušení ETSI-B Imp 1 a Imp 2, kde oba modely shodně způsobily pokles přenosové rychlosti o 400 kbit/s. Ani v jednom případě nebyl ovlivněn dosah účastnické přípojky.

Na obr. 4.40 je uvedena závislost dosažitelné přenosové rychlosti pro jednotlivé modely impulzního rušení ve směru downlink.

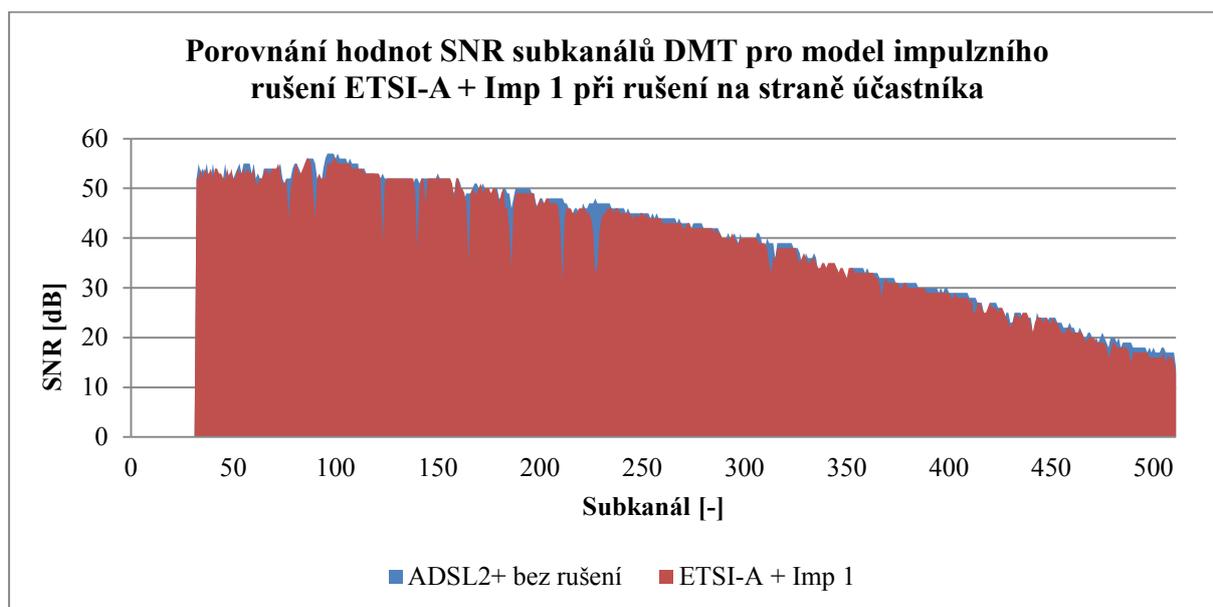


Obrázek 4.40: Závislost přenosových rychlostí pro jednotlivé modely impulzního rušení ve směru downlink při rušení na straně poskytovatele

Při umístění generátoru šumu na straně účastníka je z naměřeným hodnot patrný minimální vliv impulzního rušení na pásmo downlink. Křivky prezentující jednotlivé modely přeslechů věrně kopírují křivku referenční účastnické přípojky.

#### 4.9.3 Analýza hodnot SNR subkanálů DMT při rušení na straně účastníka

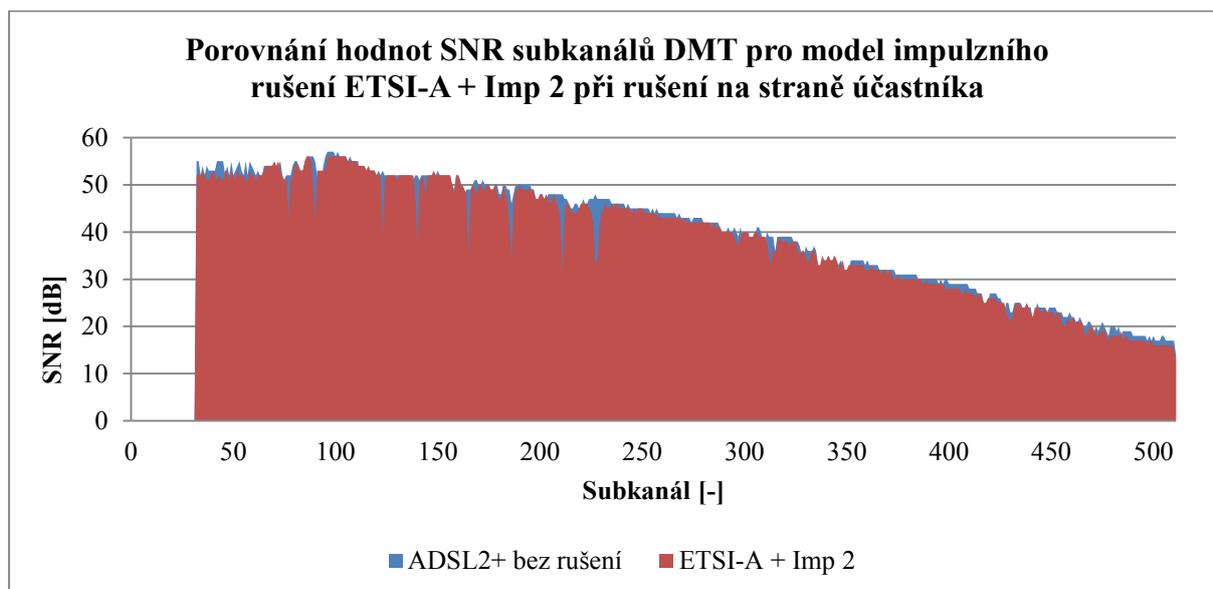
Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze CH. Na obr. 4.41 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro model impulzního rušení ETSI-A + Imp 1 a délku účastnického vedení 1,4 km při umístění generátoru šumu na straně uživatele.



Obrázek 4.41: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro model impulzního rušení ETSI-A + Imp 1 při rušení na straně účastníka

Z naměřeného průběhu je patrný obdobný jev jako při měření modelu přeslechu ETSI-A. Jsou zde patrná lokální snížení hodnoty SNR na subkanálech, které svou frekvencí odpovídají úrovnovým špičkám v modelu přeslechu ETSI-A. Snížení SNR v těchto kanálech je ovšem nižší a pohybuje se okolo 10 dB. I tak dle měření přenosové rychlosti toto snížení nezpůsobilo téměř žádný pokles přenosové rychlosti.

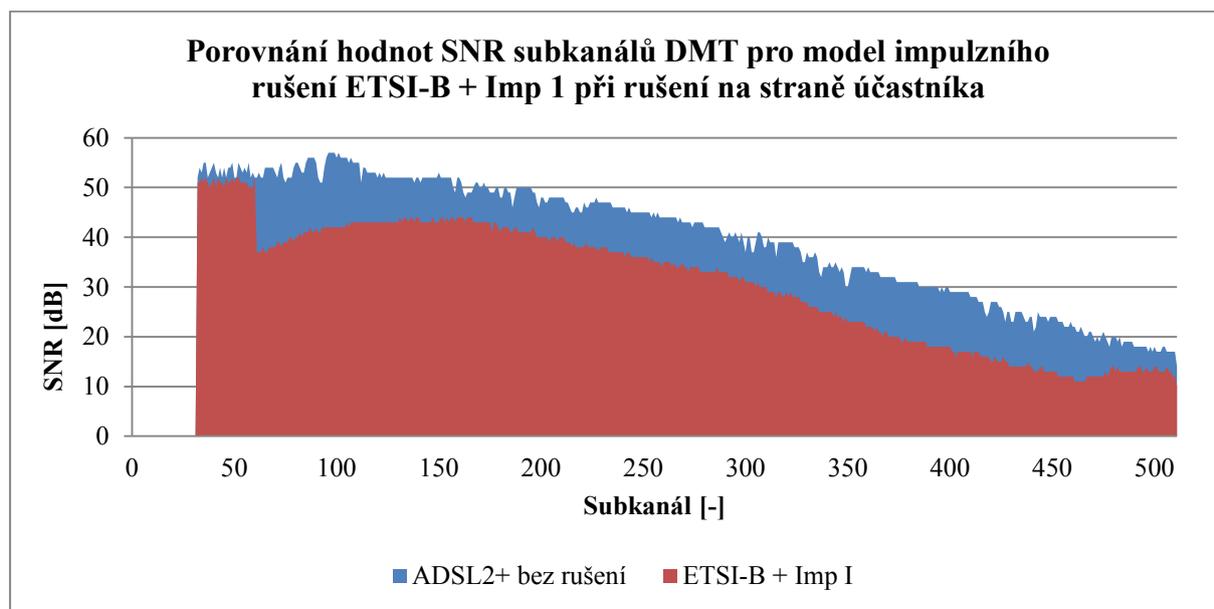
Na obr. 4.42 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro model impulzního rušení ETSI-A + Imp 2.



Obrázek 4.42: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro model impulzního rušení ETSI-A + Imp 2 při rušení na straně účastníka

Vlivem modelu impulzního rušení ETSI-A + Imp 2 došlo k naprosto stejnému zarušení subkanálů DMT jako v případě modelu ETSI-A + Imp1. Rovněž i v tomto případě nedošlo k téměř žádnému poklesu přenosové rychlosti.

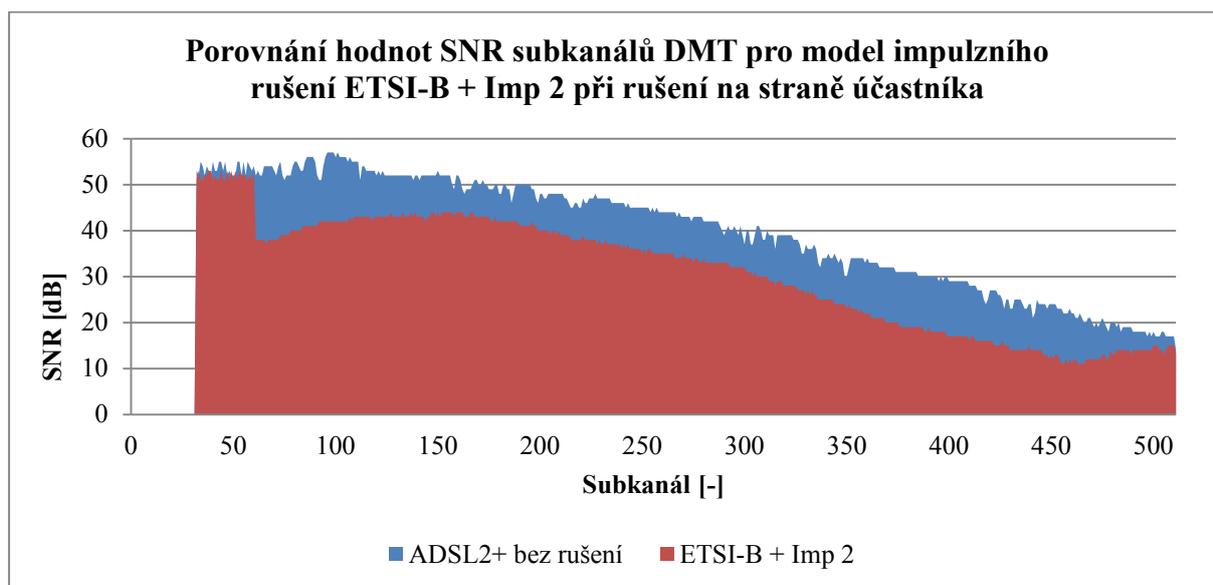
Na obr. 4.43 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro model impulzního rušení ETSI-B + Imp 1.



Obrázek 4.43: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro model impulzního rušení ETSI-B + Imp 1 při rušení na straně účastníka

V případě modelu ETSI-B + Imp 1 můžeme pozorovat obdobné zarušení subkanálů DMT jako v případě modelu přeslechu ETSI-B. Oproti tomuto měření je pokles hodnot SNR o přibližně 3 dB nižší. Pokles přenosové rychlosti je ovšem srovnatelný, v případě tohoto měření činil 4 Mbit/s oproti referenční účastnické smyčce.

Na obr. 4.44 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro model impulzního rušení ETSI-B + Imp 2.

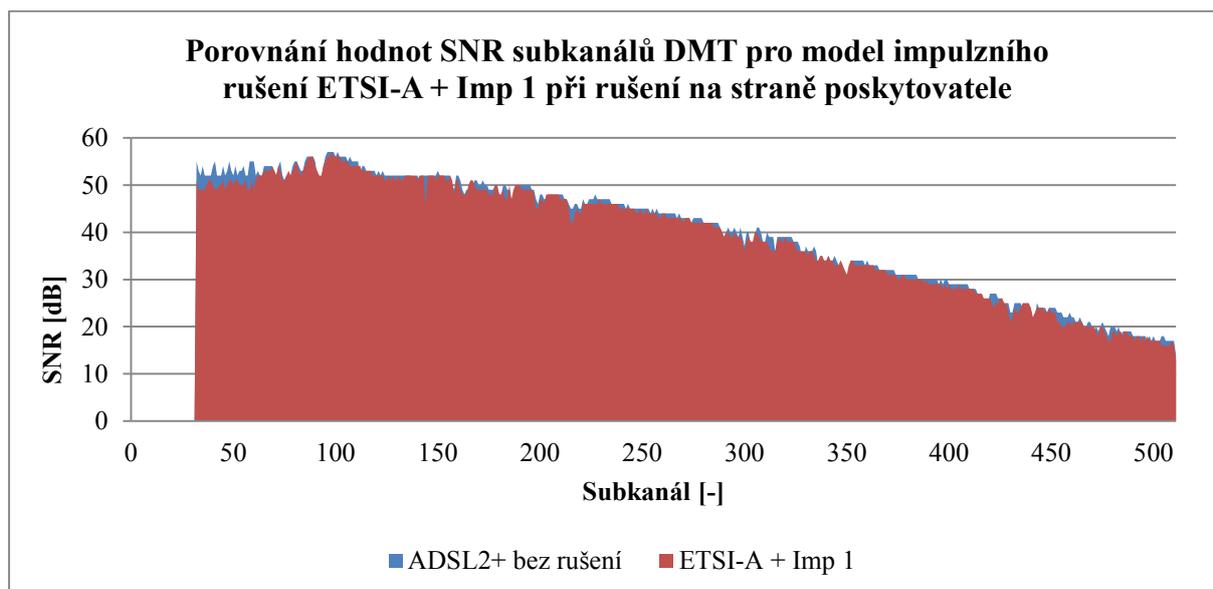


Obrázek 4.44: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro model impulzního rušení ETSI-B + Imp 2 při rušení na straně účastníka

Na obr. 4.44 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro model impulzního rušení ETSI-B + Imp 2. Tento model dosahuje naprosto stejných výsledků jako model ETSI-B + Imp 1.

#### 4.9.4 Analýza hodnot SNR subkanálů DMT při rušení na straně poskytovatele

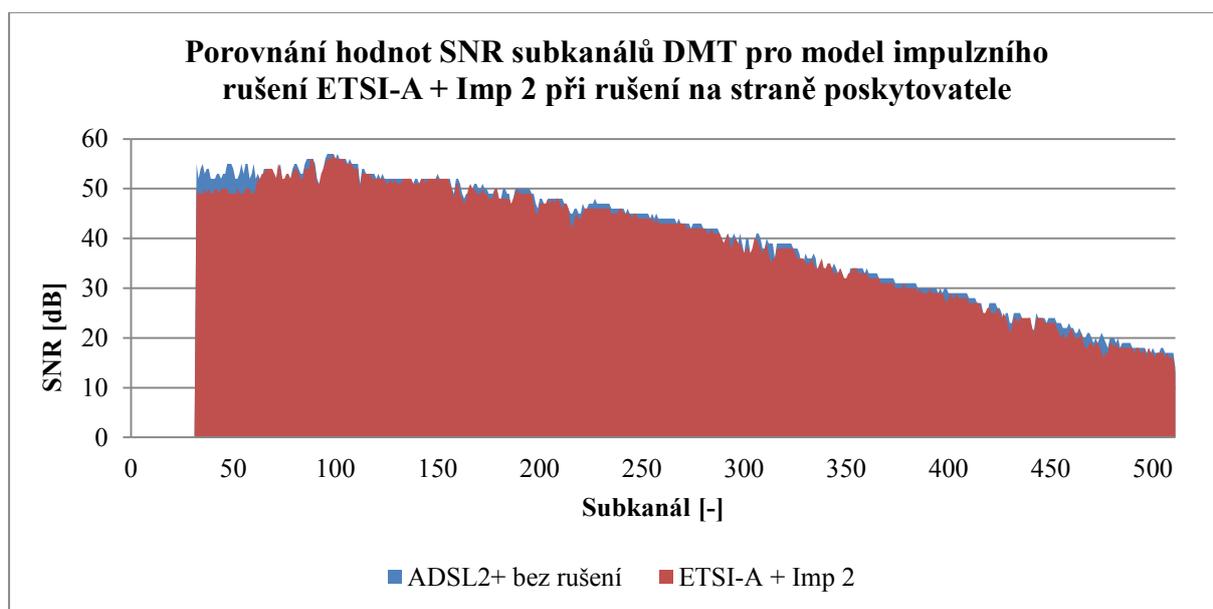
Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze I. Na obr. 4.45 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro model impulzního rušení ETSI-A + Imp 1 a délku účastnického vedení 1,4 km při umístění generátoru šumu na straně poskytovatele.



Obrázek 4.45: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro model impulzního rušení ETSI-A + Imp 1 při rušení na straně poskytovatele

Z naměřených hodnot je patrné snížení SNR v subkanálech pásma uplink 32 - 63 o přibližně 4 dB. Jedná se o poměrně malý pokles, čemuž odpovídá i zanedbatelné snížení přenosové rychlosti. Subkanály pásma downlink ovlivněny nebyly a jejich hodnota SNR je shodná s hodnotami referenční přípojky.

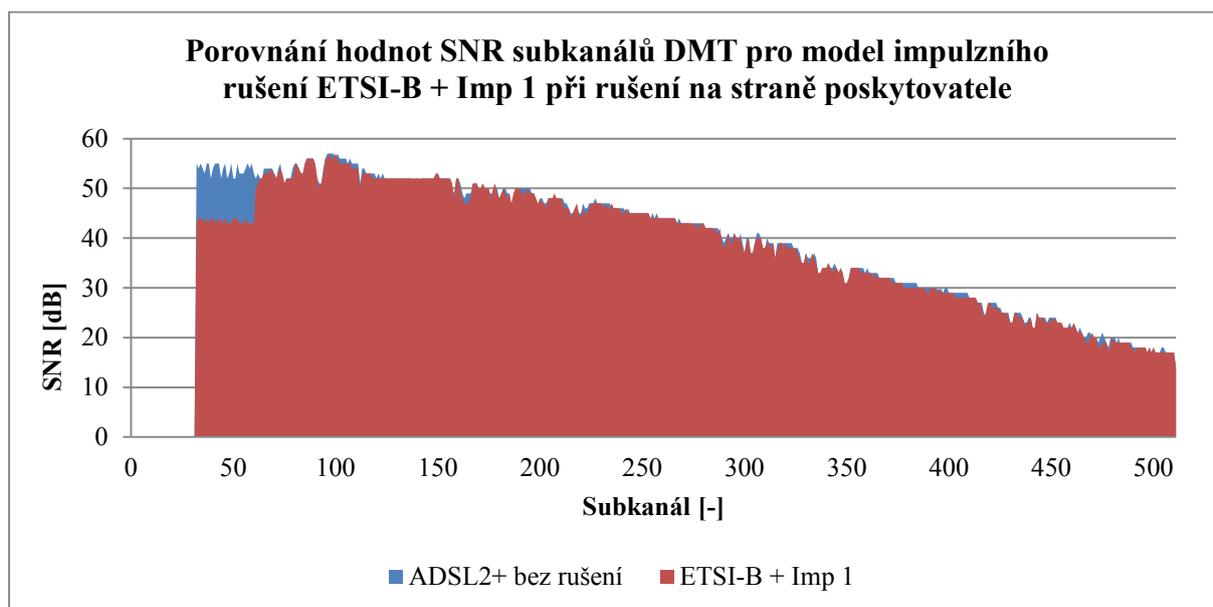
Na obr. 4.46 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro model impulzního rušení ETSI-A + Imp 2



Obrázek 4.46: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro model impulzního rušení ETSI-A + Imp 2 při rušení na straně poskytovatele

Vlivem tohoto modelu impulzního rušení došlo ke shodnému snížení hodnot SNR jako v případě modelu ETSI-A + Imp 1. Pokles se opět pohybuje okolo 4 dB a snížení přenosové rychlosti je opět zanedbatelné.

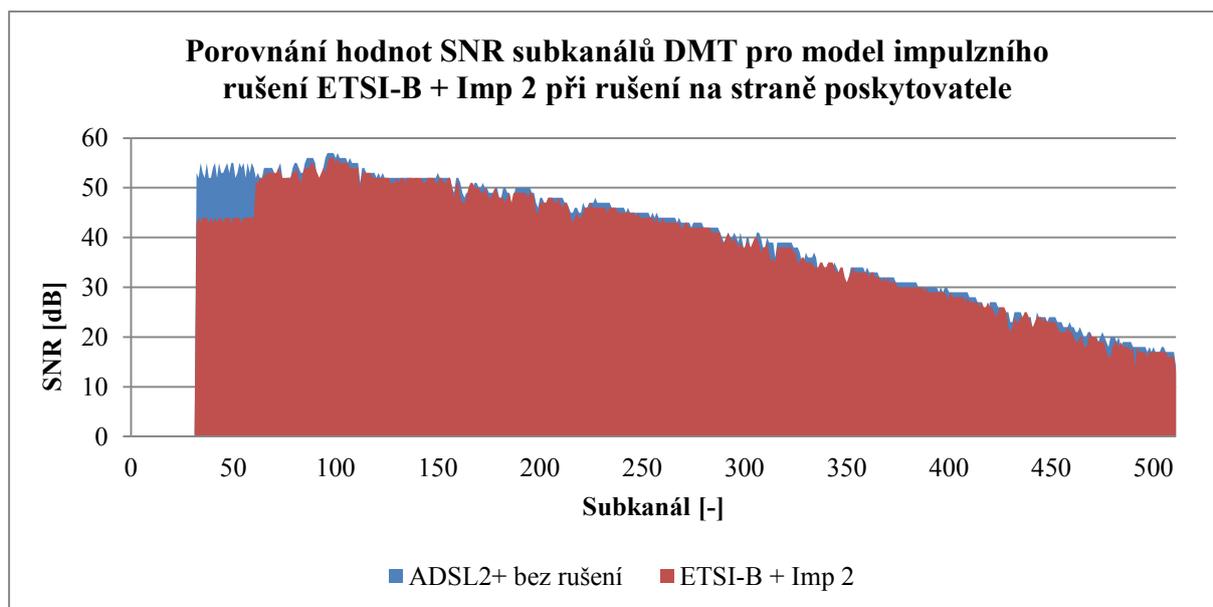
Na obr. 4.47 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro model impulzního rušení ETSI-B + Imp 1.



Obrázek 4.47: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro model impulzního rušení ETSI-B + Imp 1 při rušení na straně poskytovatele

Tento model impulzního rušení zapříčinil pokles hodnot SNR subkanálů pásma uplink o přibližně 10 dB. Jedná se o poměrně výrazný pokles, čemuž odpovídá i snížení přenosové rychlosti o přibližně 150 kbit/s. Opět nedošlo k ovlivnění subkanálů pásma downlink, jejich hodnota SNR je srovnatelná s hodnotami referenční účastnické přípojky.

Na obr. 4.48 je znázorněno zarušení jednotlivých subkanálů DMT modulace pro model impulzního rušení ETSI-B + Imp 2.



Obrázek 4.48: Porovnání hodnot SNR subkanálů DMT pro model impulzního rušení ETSI-B + Imp 2 při rušení na straně poskytovatele

Model impulzního rušení ETSI-B Imp 2 způsobil srovnatelné snížení hodnot SNR subkanálů uplinku jako model ETSI-B + Imp 1. Hodnota SNR pro subkanály uplinku poklesla o 10 dB oproti referenčním hodnotám, čemuž odpovídal pokles přenosové rychlosti v okolí 150 kbit/s. Stejně jako v případě modelu ETSI-B + Imp 1 nebylo u tohoto modelu vůbec ovlivněno pásmo downlink.

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo pomoci laboratorních měření stanovit vliv vybraných druhů rušení na digitální účastnickou smyčku ADSL2+. Prvním prováděným měřením bylo měření referenční účastnické přípojky. Při tomto měření se prokázal vliv délky účastnického vedení na dosažitelné parametry účastnické přípojky ADSL2+. Z výsledků měření je patrné, že subkanály pásma downlink jsou při průchodu účastnickým vedením výrazně utlumovány, což je činí daleko náchylnější k případným rušivým vlivům. Naopak v případě pásma uplink se projevila poměrně vysoká odolnost oproti útlumu vedení, což je způsobeno umístěním tohoto pásma v oblasti nižších kmitočtů. Tento jev se následně potvrdil i při měření vlivu vybraných druhů rušení.

Dalším faktorem, majícím vliv na účinek daného druhu rušení, je umístění jeho zdroje. Pokud je zdroj rušení umístěn na straně účastníka, je rušením majoritně zasaženo pásmo downlink. Po průchodu účastnickým vedením jsou subkanály pásma downlink výrazně utlumeny, a tak značně klesá jejich hodnota SNR, což v některých případech při aplikaci dostatečně velkého rušení vede až k jejich naprosté nepoužitelnosti. Pokud je zdroj rušení umístěn na straně poskytovatele, je zasaženo pouze pásmo uplink. Opakuje se zde obdobný jev jako v případě pásma downlink, ovšem s výrazně nižší intenzitou.

V případě rušení v podobě bílého šumu se prokázal jeho velký vliv na parametry digitální účastnické přípojky. Charakter tohoto rušení je nejvíce patrný na grafech SNR při umístění zdroje rušení na straně účastníka. Dochází zde k plošnému poklesu hodnot SNR napříč celých spektrem jednotlivých subkanálů, což způsobuje výrazný pokles jak přenosové rychlosti, tak dosahu. Míra, s jakou jsou parametry digitální účastnické přípojky ovlivněny, je však velmi závislá na úrovni bílého šumu. Bílý šum o úrovni -140 dB/Hz a -130 dB/Hz způsobil pouze zanedbatelné změny v dosažitelných přenosových rychlostech. Bílý šum o úrovni -120 dB/Hz je možno označit jako hraniční hodnotu. Při této úrovni bílého šumu již dochází ke znatelnému poklesu dosažitelných přenosových rychlostí, ovšem dosah účastnické přípojky stále není ovlivněn. Při úrovni bílého šumu rovné -110 dB/Hz došlo k velmi výraznému snížení přenosových rychlostí a byl rovněž ovlivněn dosah účastnické přípojky. Nejvyššího vlivu dosahuje dle očekávání bílý šum o úrovni -100 dB/Hz, kde došlo ke snížení dosahu účastnické přípojky na 2,5 km a k poklesu přenosových rychlostí o zhruba 50 % v obou směrech přenosu.

Vliv rušení v podobě přeslechu na vedení se ukázal být velmi závislý na frekvenčním složení daného přeslechu. Tento jev je patrný u všech měření jednotlivých modelů přeslechu. Jako vhodný příklad může posloužit měření hodnot SNR jednotlivých subkanálů pro model přeslechu ETSI-A při umístění generátoru šumu na straně účastníka. I když celkově tento model přeslechu neměl na parametry referenční účastnické smyčky výrazný vliv, na výsledném grafu je možno pozorovat

lokální snížení hodnoty SNR pro subkanály pásma downlink, které svou frekvencí přesně odpovídají úrovnovým špičkám v daném modelu přeslechu. Obdobný jev je možno pozorovat také u modelu ETSI-B, kde hodnota SNR pro subkanály pásma downlink kolísá dle frekvenčního průběhu daného modelu přeslechu. Pro pásmo uplink se ukázal jako nejvýraznější zdroj rušení modelu přeslechu ITU-K, kde došlo ke snížení dosahu na 3 km a k poklesu dosažitelné přenosové rychlosti na zhruba 50 %. Pásmo downlink bylo nejvýrazněji ovlivněno modelem přeslechu ETSI-B, kde došlo ke snížení dosahu na 3,5 km a k přibližně 25 % poklesu dosažitelných přenosových rychlostí.

Výsledky měření vlivu impulzního rušení ukázaly poměrně zajímavý fakt. Z výsledků měření přenosových rychlostí vyplývá, že došlo ke snížení dosahovaných rychlostí v obou směrech přenosu. Ovšem z analýzy zarušení subkanálů DMT modulace je patrné, že hlavním důvodem tohoto snížení je přeslechová složka obsažená ve vybraných modelech impulzního rušení. Naměřené SNR charakteristiky modelů impulzního rušení ETSI-A + Imp 1 a ETSI-A + Imp 2 přesně korespondují s SNR charakteristikou modelu přeslechu ETSI-A. Obdobně je tomu také v případě modelů impulzního rušení ETSI-B + Imp 1 a ETSI-B + Imp 2 a modelu přeslechu ETSI-B. Z těchto výsledků je zřejmé, že samotné impulzní rušení nijak neovlivňuje hodnoty SNR subkanálů DMT modulace a tak přímo neovlivňuje dosažitelnou přenosovou rychlost a dosah technologie ADSL. Pro zjištění vlivu tohoto druhu rušení je tak potřeba zvolit jinou měřicí metodu, založenou například na měření chybovosti.

Při celkovém pohledu na výsledky měření se jako nejvýznamnější druh rušení jeví bílý šum. Tento druh rušení způsoboval nejvýraznější pokles přenosových rychlostí a dosahu digitální účastnické přípojky. Ovšem, zvážíme-li praktickou možnost výrazného potlačení vzniku bílého šumu vhodnou konstrukcí koncových zařízení, potom je nutno za nejvýznamnější zdroj rušení jednoznačně označit přeslechy na vedení. Z principiálního hlediska jim v reálných podmínkách není možno zamezit a navíc mohou přeslechy s vhodným spektrálním složením, vzniklé například kombinací několika zdrojů přeslechů, dosahovat srovnatelného, ne-li vyššího vlivu, jako právě bílý šum. Nabízí se tak možnost dalších experimentálních měření v této oblasti, a to právě s cílem stanovit potenciál rušení v podobě kombinace několika různých zdrojů přeslechů.

Závěrem bych ještě jednou rád poděkoval p. Ing. Petru Merovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení při vypracovávání této diplomové práce.

---

## Použitá literatura

1. ŠÍMÁK, Boris a Jaroslav SVOBODA. Digitální účastnické přípojky xDSL. Díl 1, Metody přenosu, popis přípojek HDSL, SHDSL, ADSL, VDSL. Praha: Sdělovací technika, 2005. ISBN 80-86645-07-X.
2. VODRÁŽKA, Jiří a Boris ŠÍMÁK. Digitální účastnické přípojky xDSL. Díl 2, Přenosové prostředí, druhá generace ADSL a VDSL, měření na přípojkách. Prah: Sdělovací technika, 2008. ISBN 80-86645-16-9.
3. ČEPČIANSKY, Gustáv. Technológia ADSL. Žilina: Žilinská univerzita, 2005. ISBN 80-8070-387-6.
4. STARR, Thomas, John M. CIOFFI a Peter SILVERMAN. Understanding digital subscriber line technology. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. ISBN 0-13-780545-4.
5. GOLDEN, Philip, Hervé DEDIEU a Krista JACOBSEN. Fundamentals of DSL technology. Boca Raton: Auerbach Publications, 2006. ISBN 0-8493-1913-7.
6. DMT. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/DMT>
7. Kvadrurní amplitudová modulace. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Kvadrurn%C3%AD\\_amplitudov%C3%A1\\_modulace](http://cs.wikipedia.org/wiki/Kvadrurn%C3%AD_amplitudov%C3%A1_modulace)

---

## **Přílohy**

---

## Seznam příloh

Příloha A: Tabulka naměřených hodnot – Referenční účastnická přípojka .....	iii
Příloha B: Tabulka naměřených hodnot – Bílý šum při rušení na straně účastníka .....	iii
Příloha C: Tabulka naměřených hodnot – Bílý šum při rušení na straně poskytovatele .....	iii
Příloha D: Tabulka naměřených hodnot – Přeslechy na vedení při rušení na straně účastníka .....	iv
Příloha E: Tabulka naměřených hodnot – Přeslechy na vedení při rušení na straně poskytovatele .....	iv
Příloha F: Tabulka naměřených hodnot – Impulzní rušení při rušení na straně účastníka .....	iv
Příloha G: Tabulka naměřených hodnot – Impulzní rušení při rušení na straně poskytovatele .....	v
Příloha H: Tabulka naměřených hodnot – Hodnoty SNR subkanálů DMT pro jednotlivé délky účastnického vedení .....	v
Příloha CH: Tabulka naměřených hodnot – Hodnoty SNR subkanálů DMT pro jednotlivá rušení při rušení na straně účastníka .....	v
Příloha I: Tabulka naměřených hodnot – Hodnoty SNR subkanálů DMT pro jednotlivá rušení při rušení na straně poskytovatele .....	v

*Příloha A: Tabulka naměřených hodnot – Referenční účastnická přípojka*

Délka vedení [m]	ADSL2+ bez rušení	
	UPLINK	DOWNLINK
0	1,38	26,04
200	1,38	25,48
400	1,35	24,73
600	1,39	24,01
800	1,34	23,29
1000	1,38	22,15
1200	1,33	19,96
1400	1,37	17,39
1600	1,32	13,70
1800	1,27	12,17
2000	1,23	9,05
2200	1,16	7,85
2500	1,00	5,33
3000	0,78	4,00
3500	0,70	1,44
4000	0,40	0,58

*Příloha B: Tabulka naměřených hodnot – Bílý šum při rušení na straně účastníka*

Délka vedení [m]	Bílý šum -140 dB/Hz		Bílý šum -130 dB/Hz		Bílý šum -120 dB/Hz		Bílý šum -110 dB/Hz		Bílý šum -100 dB/Hz	
	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK
0	1,38	26,01	1,40	26,03	1,37	26,02	1,33	25,86	1,31	22,17
200	1,38	25,45	1,39	25,39	1,33	25,64	1,37	25,30	1,36	21,02
400	1,35	24,76	1,37	24,67	1,33	24,75	1,33	23,61	1,37	18,70
600	1,36	24,00	1,37	23,86	1,39	23,96	1,35	21,15	1,33	16,22
800	1,34	23,33	1,35	23,05	1,39	22,03	1,33	18,09	1,35	12,77
1000	1,39	22,10	1,35	21,87	1,38	19,95	1,37	15,62	1,33	9,56
1200	1,33	19,72	1,37	19,83	1,38	17,26	1,33	12,27	1,35	6,62
1400	1,35	17,23	1,36	16,77	1,36	14,51	1,33	9,50	1,28	4,98
1600	1,30	13,86	1,34	13,09	1,32	11,19	1,31	7,06	1,22	3,72
1800	1,30	12,22	1,31	11,41	1,23	9,15	1,25	5,52	1,16	2,87
2000	1,19	8,97	1,20	8,46	1,18	6,86	1,19	4,13	1,13	2,00
2200	1,11	7,86	1,16	7,26	1,08	5,63	1,08	3,28	1,07	1,38
2500	0,99	5,32	1,01	5,04	1,00	3,93	1,00	2,21	0,96	0,75
3000	0,80	3,93	0,80	3,35	0,76	2,20	0,79	0,89		
3500	0,72	1,43	0,73	1,30	0,73	0,93	0,72	0,24		
4000	0,42	0,55	0,43	0,48	0,41	0,32				

*Příloha C: Tabulka naměřených hodnot – Bílý šum při rušení na straně poskytovatele*

Délka vedení [m]	Bílý šum -140 dB/Hz		Bílý šum -130 dB/Hz		Bílý šum -120 dB/Hz		Bílý šum -110 dB/Hz		Bílý šum -100 dB/Hz	
	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK
0	1,35	26,02	1,40	26,06	1,35	25,99	1,36	26,00	1,33	26,03
200	1,38	25,46	1,37	25,50	1,34	25,50	1,35	25,48	1,32	25,36
400	1,35	24,72	1,39	24,75	1,39	24,82	1,36	24,84	1,33	24,76
600	1,39	24,52	1,37	24,06	1,35	23,99	1,37	24,02	1,27	23,97
800	1,33	23,27	1,34	23,28	1,37	23,30	1,33	23,30	1,22	22,44
1000	1,37	22,13	1,37	22,06	1,34	22,24	1,33	21,95	1,16	21,33
1200	1,34	19,96	1,33	19,93	1,33	19,89	1,29	19,90	1,07	19,02
1400	1,31	17,07	1,30	17,23	1,33	17,25	1,25	17,15	1,01	16,61
1600	1,32	13,72	1,31	13,69	1,31	13,66	1,22	13,67	0,94	13,49
1800	1,25	12,00	1,29	12,00	1,25	12,01	1,13	11,99	0,86	11,94
2000	1,23	9,05	1,22	9,09	1,16	9,00	1,04	9,11	0,77	8,75
2200	1,14	7,72	1,15	7,75	1,10	7,66	0,96	7,69	0,69	7,71
2500	1,02	5,16	1,02	5,21	0,97	5,19	0,84	5,16	0,57	5,19
3000	0,79	3,84	0,80	3,83	0,76	3,84	0,62	3,84	0,35	3,86
3500	0,71	1,33	0,72	1,34	0,65	1,34	0,45	1,37	0,19	1,34
4000	0,41	0,46	0,40	0,49	0,39	0,48	0,23	0,51	0,05	0,46

Příloha D: Tabulka naměřených hodnot – Přeslechy na vedení při rušení na straně účastníka

Délka vedení [m]	ETSI - A		ETSI - B		ITU - K	
	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK
0	1,33	25,89	1,36	25,66	1,33	25,68
200	1,34	25,03	1,33	25,04	1,36	25,30
400	1,37	24,40	1,32	23,85	1,35	24,43
600	1,36	23,55	1,38	22,78	1,33	23,44
800	1,35	22,77	1,37	21,49	1,34	22,59
1000	1,34	21,49	1,35	18,50	1,31	21,08
1200	1,33	18,98	1,37	15,73	1,32	18,00
1400	1,34	16,82	1,32	12,51	1,31	15,37
1600	1,33	13,22	1,31	9,77	1,25	12,16
1800	1,30	11,56	1,29	7,51	1,25	10,23
2000	1,20	8,40	1,19	5,93	1,20	7,36
2200	1,13	7,22	1,13	4,27	1,09	6,05
2500	0,99	4,88	0,99	3,27	1,01	3,71
3000	0,79	3,27	0,78	2,12	0,77	1,79
3500	0,71	1,19	0,73	0,47	0,72	0,34
4000	0,42	0,44				

Příloha E: Tabulka naměřených hodnot – Přeslechy na vedení při rušení na straně poskytovatele

Délka vedení [m]	ETSI - A		ETSI - B		ITU - K	
	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK
0	1,37	26,02	1,35	25,76	1,32	25,74
200	1,35	25,47	1,34	25,43	1,29	25,46
400	1,35	24,73	1,31	24,72	1,25	24,77
600	1,34	24,02	1,27	24,24	1,18	24,13
800	1,33	23,27	1,21	23,23	1,09	23,24
1000	1,35	22,14	1,16	22,09	0,99	22,11
1200	1,32	19,95	1,08	19,99	0,91	19,92
1400	1,32	17,01	1,00	17,21	0,83	17,24
1600	1,27	13,69	0,92	13,71	0,74	13,70
1800	1,20	12,01	0,86	12,04	0,67	12,08
2000	1,12	9,03	0,76	9,07	0,58	9,02
2200	1,04	7,75	0,69	7,77	0,50	7,75
2500	0,93	5,22	0,56	5,25	0,40	5,26
3000	0,69	3,84	0,34	3,84	0,20	3,86
3500	0,55	1,33	0,19	1,34		
4000	0,30	0,51	0,04	0,50		

Příloha F: Tabulka naměřených hodnot – Impulzní rušení při rušení na straně účastníka

Délka vedení [m]	ETSI - A + Imp 1		ETSI - A + Imp 2		ETSI - B + Imp 1		ETSI - B + Imp 2	
	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK
0	1,33	26,06	1,34	26,06	1,34	25,87	1,37	25,85
200	1,38	25,48	1,38	25,48	1,34	25,50	1,33	25,39
400	1,35	24,73	1,35	24,73	1,38	24,42	1,37	24,47
600	1,39	24,01	1,39	24,01	1,39	23,06	1,38	23,02
800	1,34	23,29	1,34	23,29	1,35	20,45	1,33	20,54
1000	1,36	21,94	1,36	22,00	1,34	17,79	1,38	17,76
1200	1,36	19,95	1,36	19,95	1,35	14,81	1,35	14,80
1400	1,33	16,91	1,37	16,85	1,32	12,06	1,33	12,01
1600	1,33	13,62	1,33	13,62	1,32	9,17	1,33	9,19
1800	1,31	11,92	1,31	11,92	1,26	7,40	1,23	7,39
2000	1,24	8,71	1,19	8,78	1,19	5,48	1,20	5,50
2200	1,14	7,83	1,14	7,83	1,09	4,33	1,10	4,34
2500	1,04	5,03	1,04	5,03	0,99	2,90	0,98	2,99
3000	0,81	3,56	0,81	3,56	0,82	1,13	0,82	1,12
3500	0,73	1,33	0,73	1,33				
4000	0,40	0,47	0,40	0,47				

---

*Příloha G: Tabulka naměřených hodnot – Impulzní rušení při rušení na straně poskytovatele*

Délka vedení [m]	ETSI - A + Imp 1		ETSI - A + Imp 2		ETSI - B + Imp 1		ETSI - B + Imp 2	
	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK	UPLINK	DOWNLINK
0	1,33	26,00	1,39	26,00	1,32	25,84	1,40	25,93
200	1,32	25,51	1,36	25,52	1,33	25,52	1,38	25,50
400	1,34	24,71	1,35	24,76	1,33	24,63	1,34	24,66
600	1,36	24,05	1,33	24,09	1,31	24,10	1,32	24,04
800	1,32	23,30	1,35	23,30	1,30	23,00	1,29	23,36
1000	1,34	22,15	1,36	22,13	1,25	22,02	1,25	22,08
1200	1,32	19,73	1,33	19,71	1,19	19,66	1,18	19,69
1400	1,32	17,10	1,32	17,04	1,12	17,28	1,13	17,09
1600	1,26	13,72	1,25	13,70	1,05	13,60	1,06	13,65
1800	1,19	12,07	1,20	12,10	0,97	12,00	0,96	12,10
2000	1,16	9,02	1,17	9,01	0,89	9,01	0,88	9,02
2200	1,09	7,79	1,08	7,73	0,80	7,75	0,80	7,75
2500	0,96	5,19	0,95	5,20	0,69	5,14	0,68	5,25
3000	0,73	3,85	0,73	3,87	0,45	3,85	0,45	3,90
3500	0,61	1,38	0,61	1,38	0,27	1,37	0,27	1,38
4000	0,36	0,55	0,36	0,51	0,13	0,51	0,13	0,49

*Příloha H: Tabulka naměřených hodnot – Hodnoty SNR subkanálů DMT pro jednotlivé délky účastnického vedení*

Uvedena na CD v souboru: Priloha\_H.pdf

*Příloha CH: Tabulka naměřených hodnot – Hodnoty SNR subkanálů DMT pro jednotlivá rušení při rušení na straně účastníka*

Uvedena na CD v souboru: Priloha\_CH.pdf

*Příloha I: Tabulka naměřených hodnot – Hodnoty SNR subkanálů DMT pro jednotlivá rušení při rušení na straně poskytovatele*

Uvedena na CD v souboru: Priloha\_I.pdf