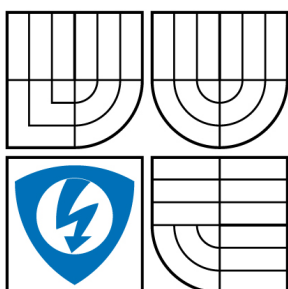




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SIMULACE PROTICHYBOVÉHO ZABEZPEČENÍ V ADSL MODEMECH

SIMULATION OF ADSL ERROR PROTECTION SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

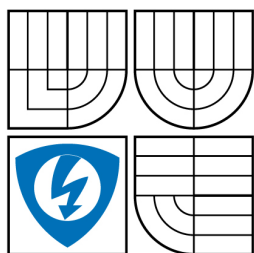
Bc. ZBYNĚK BERNAT

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL ŠILHAVÝ, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Zbyněk Bernat

ID: 88857

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Simulace protichybového zabezpečení v ADSL modemech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte model protichybového kódového systému použitého v ADSL modemech. Nastudujte metody testování DSL systémů dle doporučení ITU-T G.996.1. Zde popsané metody testování odolnosti proti impulsnímu rušení implementujte do vytvořeného modelu. Vypočtěte limity odolnosti DSL systému proti shlukovým chybám pro jednotlivá, v normě specifikovaná, nastavení protichybového zabezpečení. Uskutečňte a vyhodnoťte simulace jednotlivých nastavení hloubky prokládání a nastavení RS kódu ADSL systému.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Morelos-Zaragoza, R.. The Art of Error Correcting Coding. 2005. John Wiley & Sons Ltd., ISBN: 0-470-44782-4.
- [2] Lin, S., Costello, D. J.. Error Control Coding: Fundamentals and Applications, second edition, Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ, 2005 ISBN: 0-13-042672-5.
- [3] Skalar, B.. Digital Communications, Fundamentals and applications, Prentice-Hall, 2003, ISBN 0-13-084788-7.
- [4] Chan, W.Y. DSL simulation techniques and standards development for digital subscriber line systems. Macmillan Technology Publishing, Indianapolis, Indiana, 1998. ISBN: 0-57-870017-5.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 26.5.2009

Vedoucí práce: Ing. Pavel Šilhavý, Ph.D.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

ANOTACE

Hlavním cílem této diplomové práce bylo vytvořit model protichybového systému použitého v ADSL modemech, který bude schopen ověřit svá jednotlivá nastavení pomocí testovací metody specifikované v doporučení G.996.1. Práce je rozdělena na dvě základní části – teoretickou a praktickou.

První část popisuje základní funkční charakteristiky systému ADSL, přičemž pozornost je věnována především aspektům ovlivňujícím činnost a nastavení protichybového systému. Dále jsou probrány teoretické základy jednotlivých technik protichybového zabezpečení dat použitých v ADSL. Práce obsahuje také popis metody dle G.996.1 pro testování odolnosti DSL systému vůči impulsnímu rušení.

Praktická část diplomové práce obsahuje popis navrženého modelu protichybového systému. Model byl realizován v programovém prostředí Matlab Simulink. Navržený model zahrnuje simulaci zabezpečovacího procesu, DMT modulace a přenosového kanálu s impulsním rušením a šumem na pozadí. Aplikace ze zadané přenosové rychlosti a požadavku na prokládání vypočítá parametry pro nastavení protichybového systému. Dále umožňuje nastavit parametry přenosového vedení a zdrojů impulsního rušení a šumu na pozadí. Podle nastavených vstupních charakteristik přenosu je vypočítána bitová alokace a výsledné parametry jsou předány výpočetnímu jádru modelu. V aplikaci je možné provést dva typy testovacích úloh. První z nich vychází z doporučení G.996.1 a umožňuje určit pravděpodobnost vzniku chybné vteřiny. Druhá testovací úloha pak slouží k měření odolnosti přenosového systému vůči impulsnímu rušení. Výsledky provedených simulací jsou shrnuty v závěru práce.

Klíčová slova

ADSL, protichybový systém, Reedovy Solomonovy kódy, kódování, prokládání, DMT modulace, impulsní rušení, simulace

ABSTRACT

The main objective of this thesis was to create a model of forward error correction (FEC) system used in ADSL modem, which will be able to check its individual settings using the test methods specified in Recommendation G.996.1. The work is divided into two basic parts – theoretical and practical.

The first part describes the basic functional characteristics of ADSL system, with attention being paid to aspects affecting the activity and setting of the error protection system. There are also discussed the theoretical basics of FEC coding techniques used in ADSL. The work also contains a description of the method for testing DSL system resistance against impulsive interference, which is specified in Recommendation G.996.1.

The practical part of this thesis contains a description of the proposed model of the FEC system. The model was implemented in the programming environment Matlab Simulink. The proposed model includes the simulation of FEC coding process, DMT modulation and transmission channel with the impulse interference and the background noise. The proposed program is able to calculate parameters for setting FEC system from the specified data transfer rates and the requirement for interleaving. In addition, allows you to set the parameters of transmission line and sources of impulse interference and of the background noise. Under the set of input characteristics of the transmission is calculated bit allocation and the resulting parameters are given to a computational core of the model. In the application can be performed two types of test tasks. The first one is based on the Recommendation G.996.1 and makes it possible to determine probability of errored second. The second test task is for the measurement of resistance of the transmission system against impulsive interference. The results of the simulations are summarized in the conclusion of work.

Keywords

ADSL, FEC, Reed-Solomon code, coding process, interleaving, DMT modulation, impulse interference, simulation

BERNAT, Z. *Simulace protichybového zabezpečení v ADSL modemech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Šilhavý, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODU PRÁCE

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Simulace protichybového zabezpečení v ADSL modemech jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Šilhavému, Ph.D. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování práce.

V Brně dne

.....
podpis autora

OBSAH

Seznam obrázků	10
Seznam použitých zkratk a symbolů	11
Úvod	14
1 Úvod do ADSL	15
1.1 Použitá modulace a frekvenční pásmo.....	15
1.2 Referenční model.....	16
2 Přenosová kapacita a rámcová struktura ADSL	19
2.1 Přenosová kapacita	19
2.2 Rámcová struktura	19
2.2.1 Multirámece.....	20
2.2.2 Struktura datových bloků rámce v sestupném směru	21
2.2.3 Struktura datových bloků rámce ve vzestupném směru	22
3 Inicializační proces ADSL	24
3.1 Bitová alokace.....	25
4 Protichybový systém ADSL	26
4.1 Cyklický redundantní součet	27
4.2 Reedův-Solomonův kód	28
4.2.1 Galoisovo těleso.....	28
4.2.2 Charakteristika Reedových-Solomonových kódů	29
4.2.3 Zabezpečovací proces	30
4.3 Prokládání	35
4.4 Možné parametry protichybového systému ADSL	36
5 Měření vlivu impulsního rušení dle G.996.1	38
5.1 Měřicí zapojení	38
5.2 Testovací smyčky	39
5.3 Postup měření	40
6 Model protichybového systému ADSL	43
6.1 Výchozí předpoklady	43
6.2 Struktura modelu.....	44
6.2.1 Hlavní aplikace	44
6.2.2 Zobrazení výsledků alokace.....	47
6.2.3 Výpočetní jádro modelu.....	47
6.2.4 Zobrazení simulovaných dat.....	51

6.3	Popis programového řešení.....	51
7	Dosažené výsledky simulace.....	54
7.1	Měření pravděpodobnosti vzniku chybné sekundy	54
7.2	Měření odolnosti proti impulsnímu rušení.....	55
8	Závěr	58
	Literatura a použité zdroje	59
	Seznam příloh.....	60

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Referenční model ADSL systému	16
Obr. 1.2: Referenční model vysílací části modemu ATU-C.....	17
Obr. 1.3: Referenční model vysílací části modemu ATU-R.....	18
Obr. 2.1: Struktura multirámce ADSL.....	20
Obr. 2.2: Struktura datového bloku neprokládané větve pro sestupný směr přenosu	21
Obr. 2.3: Struktura datového bloku prokládané větve pro sestupný směr přenosu	22
Obr. 2.4: Struktura datového bloku neprokládané větve pro vzestupný směr přenosu	22
Obr. 2.5: Struktura datového bloku prokládané větve pro vzestupný směr přenosu	23
Obr. 4.1: Blokové schéma modemu ADSL	27
Obr. 4.2: Schéma zapojení LFSR	31
Obr. 4.3: Fáze dekódovacího procesu.....	32
Obr. 4.4: Princip konvolučního prokládání	36
Obr. 5.1: Zapojení pro měření odolnosti proti impulsnímu rušení pro sestupný směr dle G.996.1.....	38
Obr. 5.2: Časový průběh rušícího impulsu č. 1	41
Obr. 5.3: Časový průběh rušícího impulsu č. 2	42
Obr. 6.1: Základní bloková struktura navrženého modelu	44
Obr. 6.2: Uživatelské rozhraní modelu.....	45
Obr. 6.3: Informační okno o průběhu simulace	46
Obr. 6.4: Základní blokové schéma modelu prokládané větve protichybového systému	48
Obr. 6.5: Blokové schéma přenosového kanálu	48
Obr. 6.6: Základní blokové schéma modelu rychlé větve protichybového systému	49
Obr. 7.1: Závislost chybovosti na úrovni amplitudy rušícího impulsu a na hloubce prokládání pro přenosovou rychlost 6144 kb/s při působení a) impulsu 1 b) impulsu 2.....	56
Obr. 7.2: Amplitudové spektrum rušících impulsů.....	57

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	Výsledná zpětná kaskádní matice vedení
A_x	Zpětná kaskádní matice dílčího úseku vedení
ADSL	Služba asymetrického digitálního přenosu dat využívající účastnického vedení (Asymmetric digital subscriber line)
<i>ac</i>	Koeficient sedmi-parametrového modelu vedení
AEX	Rozšiřující bajt vkládaný do rámcové struktury ADSL sloužící pro zajištění synchronizace pro jednotlivé AS _x datové kanály
AOC	ADSL řídicí kanál (ADSL overhead control channel)
AS_x	Jakýkoliv simplexní datový kanál AS ₀ až AS ₃
AS₀₋₃	Simplexní datové kanály ve směru k účastníkovi
ATU	ADSL transceiver
ATU-C	ADSL transceiver na straně poskytovatele (ATU at the central office end)
ATU-R	ADSL transceiver na straně účastníka (ATU at the remote terminal end)
<i>b</i>	Koeficient sedmi-parametrového modelu vedení
B_F	Počet bajtů dat alokovaných do neprokládaného datového bloku ADSL rámce
B_I	Počet bajtů dat alokovaných do prokládaného datového bloku ADSL rámce
BER	Chybovost (Bit error rate)
BCH	Bose-Chaudhuri-Hocquenghem
BM	Berlekamp-Massey
CRC	Kontrolní součet (Cyclic redundancy check)
crc₀₋₇	Bity kontrolního součtu
<i>c(x)</i>	Polynom kódového slova RS kódu
<i>crc(Z)</i>	Polynom CRC
D	Hloubka prokládání
<i>d_{min}</i>	Hammingova vzdálenost
DMT	Digitální vícetónová modulace (Discrete multitone)
DSL	Služba digitálního přenosu dat využívající účastnického vedení (Digital subscriber line)
E	Pravděpodobnost vzniku chybné sekundy
<i>e(x)</i>	Polynom chyby
EC	Metoda potlačení ozvěn využívaná pro rozlišení přenosu ve vzestupném a sestupném směru (Echo cancelling)
EOC	Vložený řídicí kanál mezi ATU-C a ATU-R (Embedded operations channel)

ES	Chybná vteřina (Errored second)
f_m	Koeficient sedmi-parametrového modelu vedení
FDM	Metoda frekvenčního dělení využívaná pro rozlišení přenosu ve vzestupném a sestupném směru (Frequency division multiplexing)
FEC	Dopředná chybová korekce (Forward error correction)
FEXT	Přeslechové rušení na vzdáleném konci (Far end crosstalk)
$G(Z)$	Generující polynom CRC
$g(x)$	Vytvářecí mnohočlen RS kódu
$GF(p)$	Galoisovo pole s počtem q prvků
$GF(p^m)$	Galoisovo pole s počtem p^m prvků, kde p je prvočíslo a m nenulové přirozené číslo
$H(f)$	Přenosová funkce vedení
Hi-Z	Vysoko-impedanční obvod
$i(x)$	Mnohočlen zabezpečované zprávy
ib0-23	Indikační bity
$IL(f)$	Vložný útlum vedení
IDFT	Inverzní Fourierova transformace (Inverse discrete Fourier transform)
ISDN	Integrované digitální síťové služby (Integrated services digital network)
k	Počet symbolů zabezpečované zprávy
K	Počet zabezpečovaných bajtů v RS kódovém slově
K_F	Počet bajtů dat rámce na výstupu multiplexoru v neprokládané větvi
K_I	Počet bajtů dat rámce na výstupu multiplexoru v prokládané větvi
l_0	Koeficient sedmi-parametrového modelu vedení
l_∞	Koeficient sedmi-parametrového modelu vedení
LEX	Rozšiřující bajt vkládaný do rámcové struktury ADSL sloužící pro zajištění synchronizace pro jednotlivé datové kanály ASx a LSx
LFSR	Zpětnovazební posuvný registr (Linear feedback shift register)
LSx	Jakýkoliv duplexní datový kanál LS0 až LS2
LS0-2	Duplexní datové kanály
M	Délka paměťové buňky prokladače
$M(Z)$	Polynom zprávy v CRC kódovacím procesu
NEXT	Přeslechové rušení na blízkém konci (Near end crosstalk)
n	Počet symbolů RS kódového slova
N	Délka RS kódového slova v bajtech
N_F	Počet bajtů na výstupu FEC systému v neprokládaném datovém bloku rámce
N_I	Počet bajtů na výstupu FEC systému v prokládaném datovém bloku rámce
OAM	Řízení, operace a dohled (Operations, administration and maintenance)

$p(x)$	Mnohočlen paritních symbolů RS kódu
POTS	Klasická telefonní služba využívající hlasové pásmo (Plain old telephone service)
PSD	Výkonová spektrální hustota (Power spectral density)
PSTN	Veřejná telefonní síť se spojováním okruhů (Public switched telephone network)
QAM	Kvadrurní amplitudová modulace (Quadrature amplitude modulation)
R	V souvislosti s teorií kódování - kódový poměr RS kódu V souvislosti s protichybovým systémem - počet paritních bajtů v RS kódovém slově
R_F	Počet zabezpečovacích bajtů vytvořených FEC systémem v neprokládaném datovém bloku ADSL rámce
R_I	Počet zabezpečovacích bajtů vytvořených FEC systémem v prokládaném datovém bloku ADSL rámce
roc	Koeficient sedmi-parametrového modelu vedení
$r(x)$	Polynom přijaté zprávy
RS	Reed-Solomon
S	V souvislosti s teorií kódování – syndrom V souvislosti s protichybovým systémem – počet DMT symbolů v RS kódovém slově
$S(x)$	Mnohočlen syndromu
SNR	Odstup signál-šum (Signal-to-noise ratio)
t	Počet opravitelných chyb
u_{e1}, u_{e2}	Amplituda rušícího impulsu 1, 2
X_l	Poloha l -té chyby
Y_l	Velikost l -té chyby
Z	V souvislosti s CRC kódovacím procesem - operátor zpoždění V souvislosti s prokládáním – celková hodnota zpoždění způsobená prokládáním
Z_0	Charakteristická impedance vedení
α	Primitivní prvek Galoisova pole
γ	Měrná míra přenosu vedení
$A(x)$	Lokalizační mnohočlen
$\Omega(x)$	Evaluační mnohočlen

ÚVOD

Technologie ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) je jednou z variant DSL systémů, které umožňují provozovat vysokorychlostní přenos dat prostřednictvím stávajících metalických vedení instalovaných v přístupové síti, která byla původně určena pouze pro telefonní služby POTS (Plain Old Telephone Service). Aby bylo možné úspěšné nasazení této technologie do provozu na účastnických vedeních, bylo nutné implementovat protichybový systém, který zajistí patřičnou odolnost vůči rušení. K ochraně přenášených dat je v ADSL modemech využita technika kanálového kódování, která na straně vysílače uměle zvýší nadbytečnost přenášené zprávy tak, aby i přes působení chyb bylo na straně příjemce možné chyby opravit nebo alespoň detekovat. Pro zvýšení zabezpečovacích schopností kódu je v systému použita také technika prokládání.

Hlavním cílem této diplomové práce bylo nastudovat problematiku protichybového zabezpečení použitého v ADSL modemech a na základě teoretických poznatků vytvořit model takového protichybového systému. Předložená práce může být rozdělena na dvě základní části - teoretickou a praktickou.

V první části, přesněji v kapitolách 1 až 3, jsou popsány základní funkční charakteristiky systému ADSL, přičemž pozornost je věnována především aspektům ovlivňujícím činnost a nastavení protichybového systému. V kapitole 4 jsou probrány teoretické základy jednotlivých technik protichybového zabezpečení dat použitých v ADSL. Dalším bodem zadání bylo nastudovat metodiku testování odolnosti DSL systémů vůči impulsnímu rušení a následně ji implementovat do navrhovaného modelu. Tato metodika je popsána v kapitole 5.

Praktická část diplomové práce je popsána v kapitole 6 a 7. Model protichybového systému byl realizován v programovém prostředí Matlab. V souladu s posledními dvěma body zadání byly v navrženém modelu provedeny simulace různých nastavení protichybového systému, ze kterých byly vypočítány příslušné limity odolnosti systému vůči impulsnímu rušení (ve smyslu pravděpodobnosti vzniku chybné sekundy) a také prozkoumán vliv různého nastavení hloubky prokládání na výslednou chybovost v přenesených datech. Dosažené výsledky simulací jsou uvedeny a diskutovány v kapitole 7.

1 ÚVOD DO ADSL

Jak již z názvu vyplývá, jedná se o službu využívající datových kanálů s nesymetrickými přenosovými rychlostmi. Ve směru k účastníkovi (downstream) se dosahuje rychlosti až 8 Mbit/s. V opačném směru (upstream) je pak dosahováno rychlosti až 1 Mbit/s. ADSL služba byla navržena tak, aby umožnila současný provoz původní telefonní linky či základní přípojky ISDN. Pro oddělení těchto druhů provozu se (kromě varianty ADSL Lite) na obou stranách účastnického metalického vedení využívá rozbočovače, tzv. splitteru.

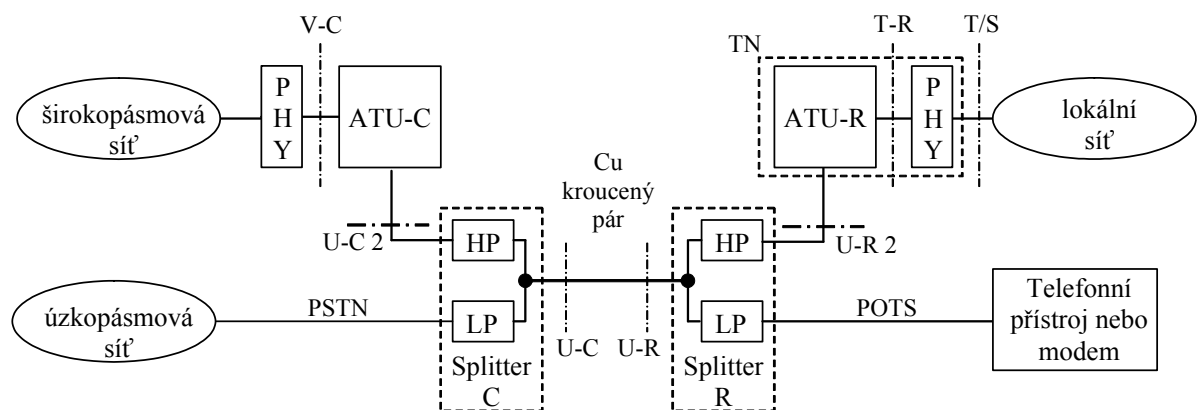
1.1 Použitá modulace a frekvenční pásmo

Systémy ADSL využívají modulační techniku DMT (Discrete MultiTone). Přenosový kanál je ve frekvenční oblasti rozdělen na řadu dílčích subkanálů. V jednotlivých subkanálech je použita kvadrurní amplitudová modulace QAM. K přenášení informace prostřednictvím těchto subkanálů je na straně vysílače a přijímače využíváno diskrétní Fourierovy transformace. ADSL využívá pásmo od 0 do 1,104 MHz, které je rozděleno na 256 subkanálů s roztečí 4,3125 kHz. Subkanály v dolní části spektra se překrývají s frekvenčním pásmem analogové telefonní služby nebo základní služby ISDN, a tudíž zůstávají nevyužity. V závislosti na současně provozované službě pak existuje několik variant ADSL (více v [4]). Každý subkanál (nosná) může nést různý počet bitů, který je stanoven během procesu inicializace podle vlastností daného dvoudrátového spoje a požadované přenosové rychlosti. Je tak možné přenášet 2 až 15 bitů, přičemž v praxi se používá maximálně 12 bitů na nosnou [4]. Soustava QAM konstalací jednotlivých nosných je pomocí inverzní Fourierovy transformace převedena z frekvenční oblasti do časové a vzniklé tónové shluky jsou pak dále posílány na vedení jako DMT symboly.

Oddělení obou směrů přenosu je možné provést dvěma způsoby. Prvním z nich je metoda frekvenčního dělení FDM (Frequency Division Multiplex). Tato technika každému směru přenosu přidělí vlastní frekvenční pásmo. Při použití ADSL společně s POTS je pro upstream vyhrazeno pásmo 25,875 až 138 kHz a pro downstream 138 až 1104 kHz. Druhou technikou pro oddělení směrů přenosu je metoda potlačení ozvěn EC (Echo Cancellation), která umožňuje aby se daná pásma překrývala. Použitím této techniky se zvětší šířka přenosového pásma downstream a zároveň je možné využít výhody menšího útlumu vedení na nižších kmitočtech. Jistou daní za tyto pozitiva je větší náročnost implementace oproti FDM.

1.2 Referenční model

Jednotlivé funkční bloky a rozhraní služby ADSL jsou znázorněny v referenčním modelu na Obr. 1.1. Vysokorychlostní přenos zajišťují ADSL modemy ATU-R (ADSL Transceiver Unit – Remote terminal) na straně účastníka a ATU-C (ADSL Transceiver Unit-Central office end) na straně poskytovatele. Jednotlivé referenční body (S, T, U, V) jsou definovány v doporučení ITU T G.905.1. Rozhraní V-C a T-R nemají reprezentaci ve fyzickém rozhraní a jsou definovány pouze logickými funkcemi.

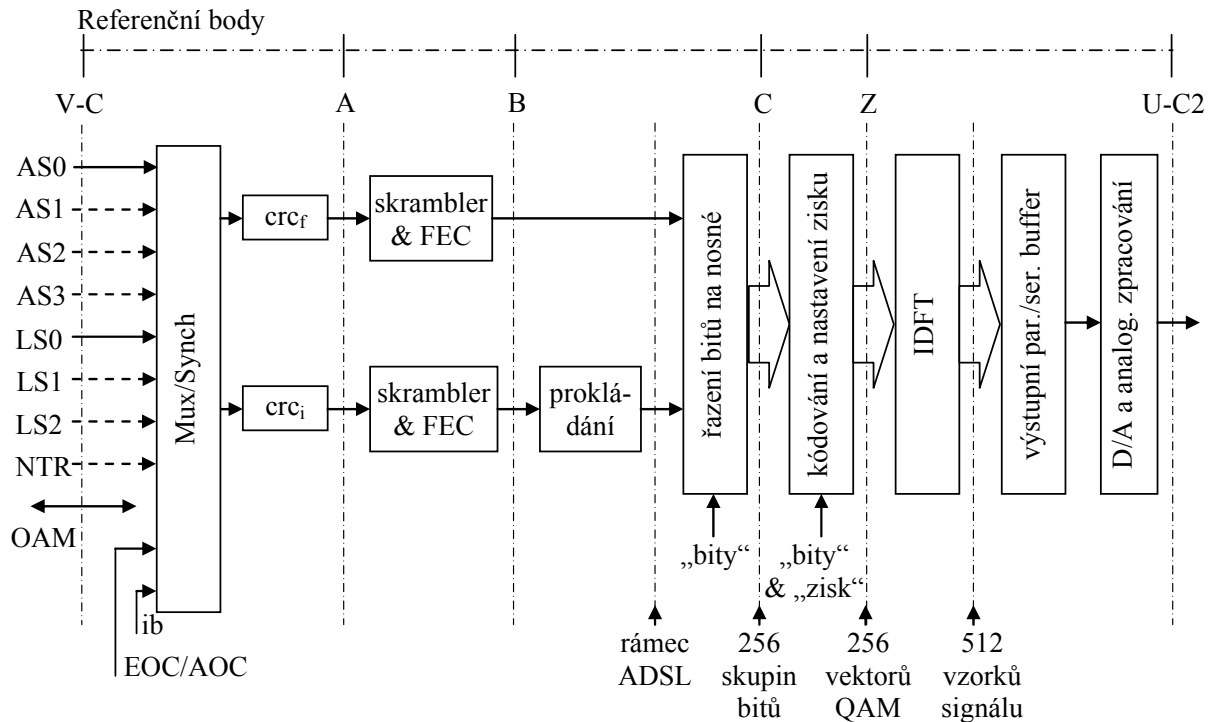


PHY ... fyzické rozhraní
 ATU-C ... vysílač/přijímač na straně poskytovatele
 ATU-R ... vysílač/přijímač na straně účastníka
 HP ... horní propust
 LP ... dolní propust
 PSTN ... telefonní síť
 POTS ... služby využívající hovorové pásmo
 NT ... síťové zakončení

Obr. 1.1: Referenční model ADSL systému

V doporučení ITU T G.992.1 je referenční model dále rozpracován pro jednotlivé modemy. Obr. 1.2 zachycuje blokové schéma vysílací části modemu ATU-C. Na Obr. 1.3 je pak znázorněno blokové schéma vysílací části pro ATU-R. Na vstup multiplexoru jsou přivedeny datové kanály AS_x a LS_x. Kanály AS_x, kde $x = 1, 2, 3$ a 4, jsou simplexní a jsou používány pouze v sestupném směru. Kanály LS_x, pro $x = 1, 2$ a 3, se používají pro oba směry přenosu. Plnou čarou jsou vyznačeny kanály, které podle doporučení musí modem obsahovat, přerušovaná čára pak značí volitelnou možnost. ATU-C a ATU-R mohou být konfigurovány na synchronní přenos STM nebo na asynchronní přenos ATM buněk, přičemž je možné provozovat oba typy přenosu zároveň. Společně s uživatelskými daty vstupují do multiplexoru také vložený provozní kanál EOC (Embedded Operation Channel), řídicí kanál záhlaví AOC (ADSL Overhead Control), synchronizace a indikační bity ib určené pro funkci dohledu OAM (Operation, Administration and Maintenance). Sdružená data jsou

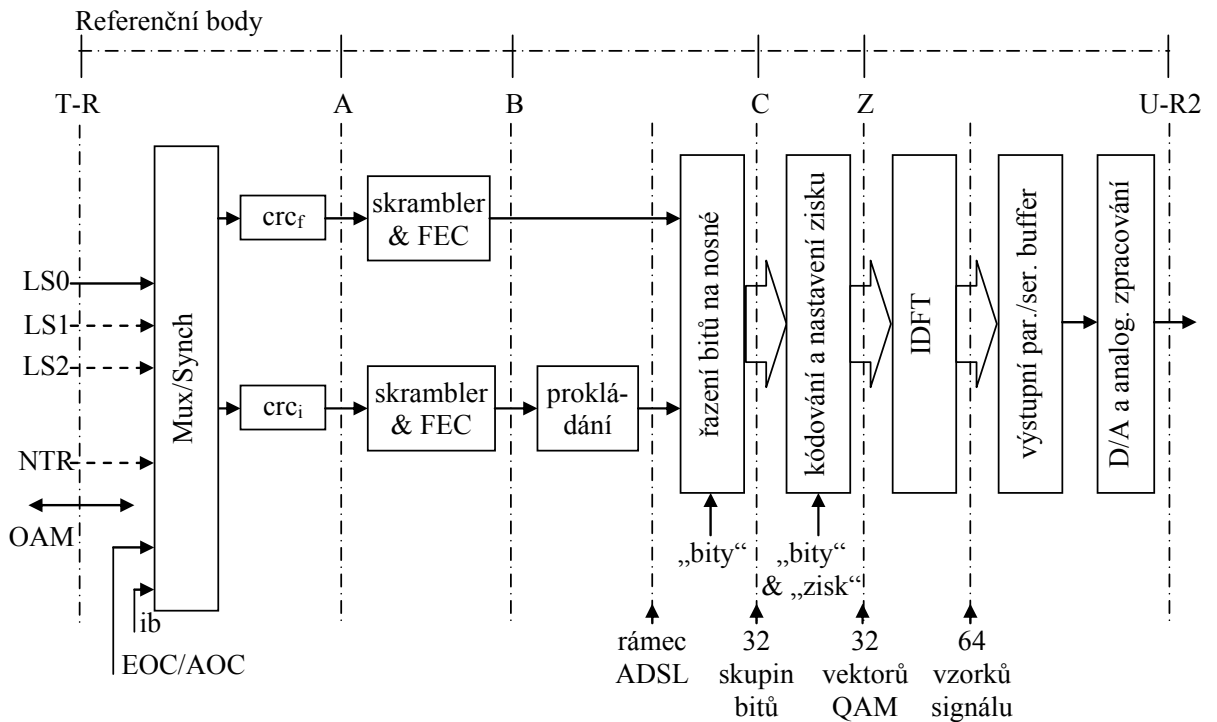
multiplexována do dvou cest, a to buď s prokládáním či bez prokládání. Větev bez prokládání, označovaná jako fast buffer, nabízí nízké přenosové zpoždění za cenu menší odolnosti vůči rušení. Cesta využívající prokládání, tzv. interleaved buffer, poskytuje velmi nízkou chybovost, ale zároveň vnáší do přenosu větší zpoždění.



Obr. 1.2: Referenční model vysílací části modemu ATU-C

ADSL modem (ať už v STM či ATM módu) je schopen přenášet data pouze v prokládaném či neprokládaném bufferu (tzv. single latency režim) a nebo v obou cestách zároveň (tzv. dual latency režim). Průchozí data obou větví jsou na úrovni multirámců (viz další text) doplněna o kontrolní součet CRC, následně je provedeno skramblování a dopředná chybová korekce FEC. V závislosti na typu větve je provedeno konvoluční prokládání a je vytvořen ADSL rámec. Podle zjištěného odstupů signál/šum (SNR) v jednotlivých subkanálech a požadované přenosové rychlosti je provedena alokace bitů na použité nosné. Vznikne tak maximálně 256 resp. 32 skupin bitů, které jsou po provedení mřížkového kódování a nastavení zisku vyjádřeny pro každý subkanál komplexním číslem jako vektor odpovídající stavu QAM podle konstelačního diagramu. Modulované nosné vstupují do bloku IDFT, ve kterém je provedena inverzní diskrétní Fourierova transformace, čímž se získá 512 resp. 64 vzorků signálu v časové oblasti, které jsou označovány jako DMT symbol. K DMT symbolu uloženému ve výstupním registru je pak dále přidána cyklická předpona, která tvoří oddělovač mezi

jednotlivými symboly, jehož účelem je snížit jejich vzájemnou interferenci. Z výstupního registru jsou data sériově vyčítána, aby mohla být následně převzorkována, digitálně filtrována a převedena z digitálního do analogového tvaru.



Obr. 1.3: Referenční model vysílací části modemu ATU-R

2 PŘENOSOVÁ KAPACITA A RÁMCOVÁ STRUKTURA ADSL

2.1 Přenosová kapacita

Datový tok systému ADSL může být tvořen až sedmi datovými kanály, a to čtyřmi simplexními ASx v sestupném směru a třemi duplexními kanály LSx. Standard stanovuje přítomnost alespoň kanálu AS0 a LS0, přičemž je pro přenos využito buď prokládané nebo přímé větve. Datové toky jednotlivých kanálů mají proměnlivou rychlost, která je dána celočíselnými násobky 32 kbit/s. Tab. 2.1 obsahuje maximální násobky n a související přenosové rychlosti v daných kanálech [1].

Tab. 2.1: Přehled maximálních násobků rychlosti 32 kbit/s transportních kanálů ADSL

Datový kanál	Maximální násobek $n \cdot 32 \text{ kbit/s}$	Maximální přenosová rychlost [kbit/s]
AS0	192	6144
AS1	144	4608
AS2	96	3072
AS3	48	1536
LS0	20	640
LS1	20	640
LS2	20	640

Hodnoty uvedené v tab.2.1 se vztahují k datovému toku vstupujícímu do ADSL modemu a nezahrnují přenosovou kapacitu potřebnou pro přenos režijních informací. V případě, že systém ADSL pracuje v režimu redukovaného režijního záhlaví, obsahuje celkový datový tok (na úrovni rozhraní B referenčního modelu) přenášené transportní kanály, informace služebního kanálu EOC, informace řídicího kanálu AOC, indikační bity rozhraní řízení a dohledu OAM, bajty kontrolního součtu CRC a zabezpečovací bajty FEC. V režimu plného režijního záhlaví jsou pak vysílaná data navíc doplněna synchronizačními řídicími bajty. Konkrétní hodnoty přenosové kapacity vyhrazené těmto režijním informacím jsou pro oba směry přenosu uvedeny v [1].

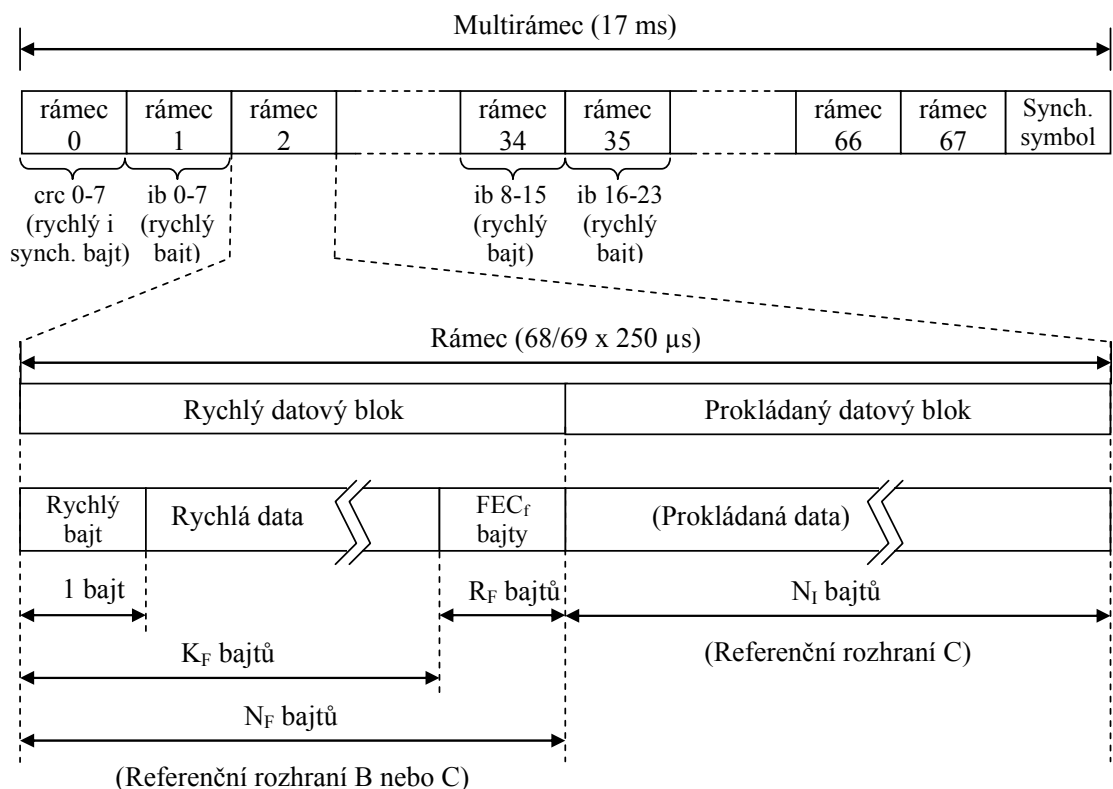
2.2 Rámcová struktura

Přenášená data transportních kanálů jsou v systému ADSL organizována do rámců složených ze dvou základních částí, neprokládaného tzv. rychlého datového bloku a prokládaného datového bloku. Do těchto datových bloků jsou mapovány, v závislosti na parametrech zjištěných během inicializace, přítomné kanály doplněné příslušným záhlavím. Doporučení G.992.1 definuje celkem čtyři rámcové režimy označené číslem 0 až 3. Režim 0 označuje rámcovou strukturu s plným záhlavím, která umožňuje řídit synchronizaci vstupních

dat s časovou základnou ADSL modemu. V případě, že jsou vstupní data vůči časové základně synchronní, může být použit režim 1, který obsahuje plné záhlaví bez možnosti řízení synchronizace. Režimy 2 a 3 jsou rámcové struktury s redukovaným záhlavím. V režimu 2 jsou bajty rychlého (rychlý bajt) a prokládaného datového bloku (synchronizační bajt) přenášeny odděleně. Naopak v režimu 3 jsou tyto bajty přenášeny společně, a to buď v rychlém nebo prokládaném datovém bloku (dle přítomnosti datových kanálů v dané větvi). Rámcová struktura s redukovaným záhlavím se využívá v případech, ve kterých je pro přenos využito pouze rychlé nebo prokládané cesty.

2.2.1 Multirámeček

Rámce jsou sdružovány do multirámečků. Každý z nich je složen z 68 rámečků číslovány 0 až 67, které jsou společně se synchronizačním rámečkem modulovány do DMT symbolů. Synchronizační rámeček je vytvářen v modulátoru DMT a slouží k vymezení hranic multirámečků. Základní struktura rámečku a multirámečků je znázorněna na Obr. 2.1 .



Obr. 2.1: Struktura multirámečků ADSL

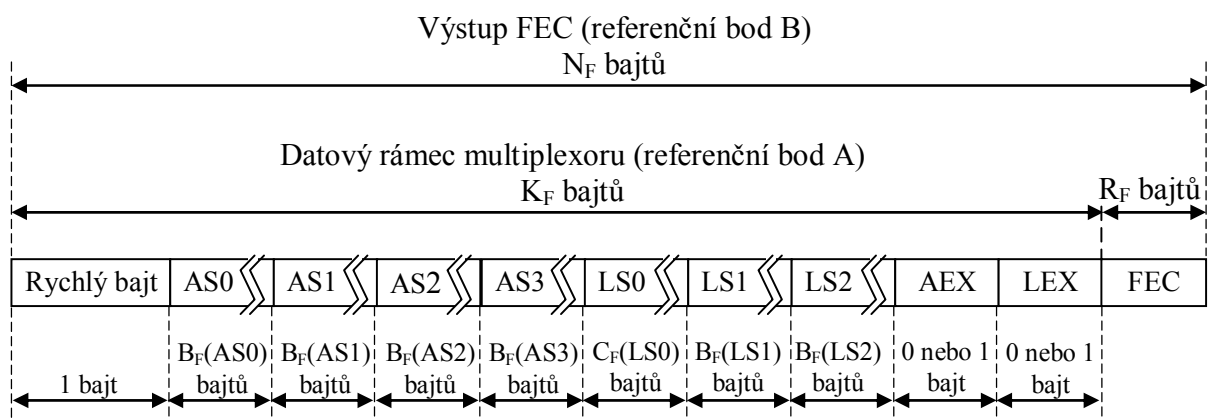
Rámce jsou generovány frekvencí 4 kHz, multirámeček má tedy $68/4000 = 17$ ms. Přidání synchronizačního rámečku během modulačního procesu způsobí, že jsou rámce na linkové úrovni generovány rychlostí $69/68 \cdot 4000$ za vteřinu. První bajt každého rámečku (kromě synchronizačního rámečku, který nese žádná uživatelská data nebo bity záhlaví), je obsazen

rychlým bajtem, který slouží pro přenos bitů kontrolního součtu CRC (crc0 - crc7), indikačních bitů rozhraní řízení a dohledu OAM (ib0 - ib23), bitů služebního kanálu EOC, nebo pro přenos bitů řídicích synchronizaci dat rychlého datového bloku. Kontrolní bity CRC jsou přenášeny v rychlém bajtu každého rámece 0. V rámcích 1, 34 a 35 slouží tento bajt pro funkci OAM. V ostatních rámcích uspořádaných do párů sudého a následujícího lichého čísla jsou v rychlém bajtu přenášeny bity kanálu EOC nebo synchronizace.

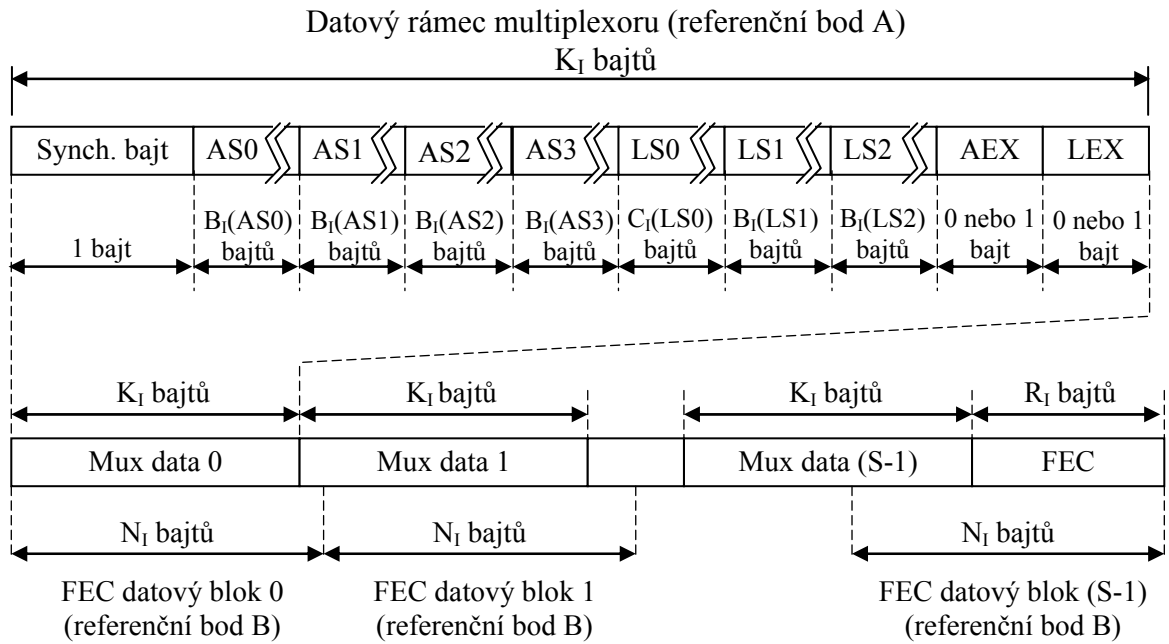
2.2.2 Struktura datových bloků rámce v sestupném směru

Základní strukturu rychlého datového bloku rámce v sestupném směru přenosu ukazuje Obr. 2.2. První část rychlého datového bloku je tvořena rychlým bajtem, jehož úloha byla popsána výše. Za ním následují bajty vyhrazené simplexním datovým kanálům AS0 až AS3 a duplexním datovým kanálům LS0 až LS2. Výraz B_F (datový kanál) vyjadřuje počet bajtů datového kanálu, jenž má být nesen v rychlém datovém bloku rámce. Konkrétní hodnoty B_F pro každý kanál jsou určeny během inicializačního procesu. Podrobnější informace o pravidlech alokace datových kanálů do datových bloků rámce jsou uvedeny v [1]. Dalšími bajty v pořadí jsou AEX a LEX. Ty slouží v rychlém i prokládaném datovém bloku rámce k regulaci propustnosti jednotlivých kanálů v případě, že se mírně liší od propustnosti páteřní sítě. Poslední část neprokládaného datového bloku je tvořena R_F zabezpečovacími bajty FEC.

Struktura prokládaného datového bloku rámce pro sestupný směr přenosu je znázorněna na Obr. 2.3. Datový rámeček na výstupu multiplexoru v prokládané větvi je uvozen synchronizačním bajtem. Podobně jako v případě rychlého bajtu neprokládaného datového bloku, je v nultém rámcí synchronizační bajt použit pro přenos osmi bitů kontrolního součtu. V ostatních rámcích je využit pro řízení synchronizace nebo pro kanál AOC. Alokační datových kanálů probíhá stejně jako u neprokládaného datového bloku s tím rozdílem, že počet bajtů přiřazený danému kanálu v prokládané cestě je označován jako B_I .



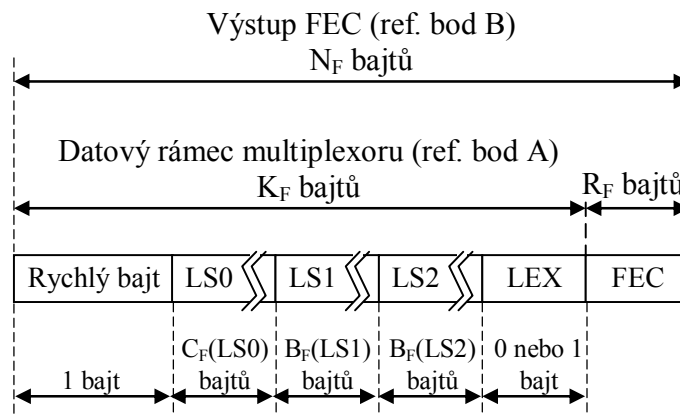
Obr. 2.2: Struktura datového bloku neprokládané větve pro sestupný směr přenosu



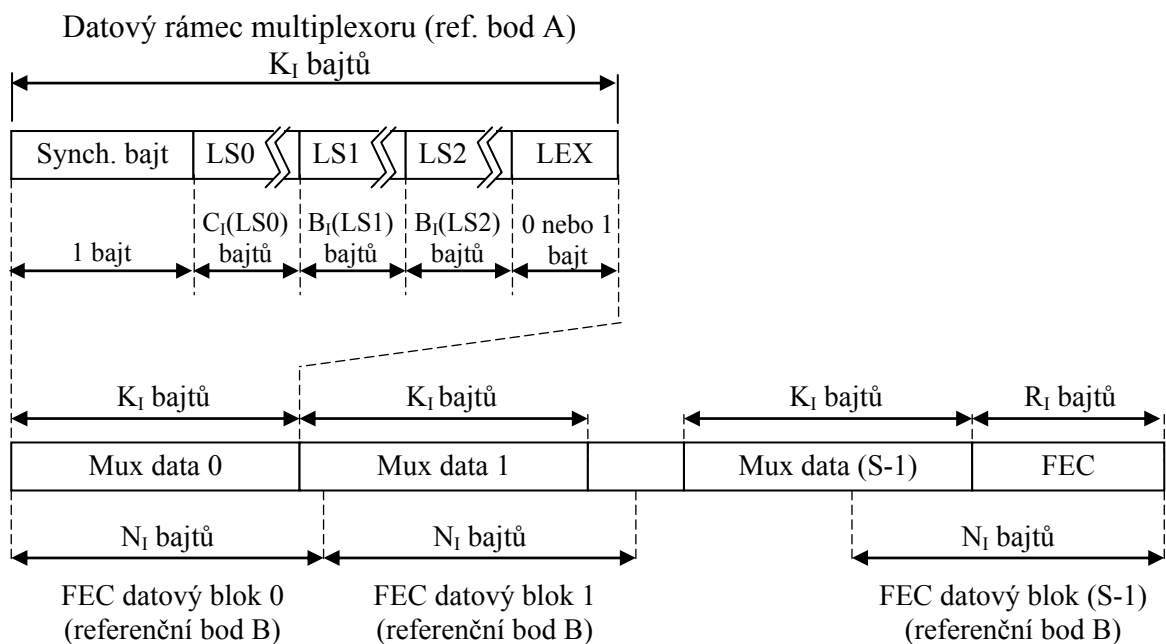
Kódová slova protichybového systému FEC mohou být v prokládaném datovém bloku složena z S datových rámečků multiplexoru délky K_I . Těchto $S \cdot K_I$ bajtů tvoří nezabezpečenou zprávu, ze které jsou vypočítány zabezpečovací bajty délky R_I . V případě, že je $S > 1$, není dodržena logická struktura datového bloku a na úrovni referenčního bodu B dochází k částečnému přesahu dvou datových rámečků multiplexoru. Datový blok $(S-1)$, který přenáší zabezpečovací bajty FEC, je pak opět zarovnan s hranicemi prokládaného datového bloku.

2.2.3 Struktura datových bloků rámce ve vzestupném směru

Ve vzestupném směru nejsou přenášeny simplexní kanály a tedy ani bajt AEX.



Rychlý datový blok (Obr. 2.4) a prokládaný datový blok (Obr. 2.5) mohou v daném směru přenosu obsahovat nejvýše tři datové kanály, a to LS0 až LS2. Přenosové rychlosti alokovaných kanálů jsou opět dány hodnotami B_F a B_I získaných během inicializace. Další popis vytváření datových bloků obou větví pro vzestupný směr je stejný jako v případě datových bloků směru sestupného.



Obr. 2.5: Struktura datového bloku prokládané větve pro vzestupný směr přenosu

3 INICIALIZAČNÍ PROCES ADSL

Před vlastním přenosem dat je třeba provést sekvenci procedur nutných pro navázání spojení mezi modemy ATU-R a ATU-C. Tyto procedury jsou souhrnně nazývány jako inicializační proces. Hlavním účelem inicializačního procesu je, kromě vlastního navázání spojení modemů, zajistit maximální propustnost a spolehlivost přenosového spoje.

Inicializační proces má celkem čtyři fáze:

- Aktivace a počátek synchronizace pro další procedury
- Nastavení vysílacího výkonu a zisku, nastavení potlačovače ozvěn a kanálového ekvalizéru
- Analýza kanálu
- Proces výměny služebních dat

Nyní budou stručně popsány jednotlivé fáze, přičemž pozornost bude věnována spíše procesům přímo ovlivňujícím nastavení přenosové rychlosti a parametry protichybového systému. Podrobné informace o inicializačním procesu uvádí [1].

Na počátku sestavování spojení je mezi modemy ATU-R a ATU-C proveden tzv. handshake. Tato procedura definovaná v doporučení G.994.1 spočívá ve vzájemné detekci přítomnosti obou modemů a výměně základních informací o jejich schopnostech.

V další fázi je z ATU-R vyslán pseudonáhodný signál, který je na straně ATU-C využit pro správné nastavení vysílacího výkonu a zisku přijímače. Totéž je provedeno i v opačném směru. Po nastavení linkového ekvalizéru a potlačovače ozvěn přichází na řadu třetí fáze, která slouží k analýze kanálu.

V této fázi si komunikující strany sdělí údaje o čtyřech možnostech nastavení přenosových rychlostí a formátu přenášených dat, a to jak pro vzestupný tak pro sestupný směr přenosu. Každá ze čtveřice konfigurací obsahuje:

- pole B_F – údaje o počtu bytů pro každý datový kanál (downstream - AS0, AS1, AS2, AS3, LS0, LS1, LS2; upstream - LS0, LS1, LS2), který je možné přenášet v rychlém datovém bloku rámce
- pole B_I – viz B_F , přenos v prokládaném datovém bloku rámce
- pole RS_F – počet kontrolních bytů FEC na jeden symbol v rychlém datovém bloku rámce v sestupném směru (odpovídá hodnotě R_F)
- pole RS_I – počet kontrolních bytů FEC na jeden symbol v prokládaném datovém bloku rámce v sestupném směru (odpovídá hodnotě R_I/S)
- pole S – počet symbolů na kódové slovo FEC v sestupném směru

- pole I – hloubka prokládání udávaná v kódových slovech pro sestupný směr
- další skupinu polí RS_F , RS_I , S, I – stejný význam jako u výše uvedených parametrů s tím, že se jedná o hodnoty pro vzestupný směr

Dále si předávají informace o aktuálním nastavení jednotlivých funkčních bloků modemu a podporovaných možnostech přenosu. Obě strany vyšlou širokopásmový pseudonáhodný signál, ze kterého je na přijímací straně zjištěn odstup signálu od šumu (SNR).

Na základě změřených charakteristik účastnické smyčky je v poslední fázi inicializace pro oba směry přenosu vygenerována nová čtveřice možných přenosových konfigurací, které přesněji odpovídají optimální bitové rychlosti na stávajícím kanálu. Kromě přenosových konfigurací si komunikující strany v závěru inicializace vymění informace o výsledném počtu bitů a relativním zisku v daném subkanálu (alokační tabulka a tabulka zisku).

Výměna přenosových konfigurací ve třetí a čtvrté inicializační fázi je zabezpečena kontrolním součtem CRC. V případě, že během inicializace dojde k chybě CRC nebo ztrátě synchronizace modemů, dojde k resetu celého procesu.

3.1 Bitová alokace

Jak již bylo řečeno v úvodu, jednotlivé nosné DMT systému mohou prostřednictvím QAM konstelací přenášet 2 až 15 bitů. Konkrétní počet bitů na subkanál je určen při procesu bitové alokace, přičemž se vychází ze SNR a útlumu účastnické smyčky v jednotlivých subkanálech zjištěném při inicializaci systému. Bitová alokace má také za úkol vypočítat zesílení jednotlivých nosných a tím přidělit minimální nezbytný přenosový výkon. Pro zajištění spektrální kompatibility jsou pak do výpočtů zahrnuty spektrální masky obou směrů přenosu, které určují maximální možný přenášený výkon. Podle [1] by pro sestupný směr přenosu (na výstupu ATU-C) ve frekvenčním pásmu 25,875 kHz až 1104 kHz neměla být spektrální výkonová hustota větší než -36.5dBm/Hz. Pro vzestupný směr přenosu (na výstupu ATU-R) v pásmu 25,875 kHz až 138 kHz je pak maximální spektrální výkonová hustota podmíněna hodnotou -34,5 dBm/Hz.

Bitová alokace má zajistit přidělení optimálního počtu bitů a optimální množství výkonu každému subkanálu. Abychom mohli alokaci označit jako optimální, je třeba ji podrobit příslušnému optimalizačnímu algoritmu. Podstata algoritmu může zohledňovat několik podmínek. Je to např. chybovost BER, maximální přenosová rychlost nebo malý přenášený výkon. V praxi je pro systém ADSL využívána optimalizace, která se při udržování stále přenosové rychlosti s pevně danou BER snaží minimalizovat přenášený výkon, čímž je omezováno přeslechové spektrum rušící služby, která běží na stejném vedení [8].

4 PROTICHYBOVÝ SYSTÉM ADSL

Na signál přenášený prostřednictvím účastnické telefonní přípojky působí celá řada rušících faktorů. Mezi tři základní rušení snižující výkonnost ADSL systému patří:

- Přeslechy

Toto rušení vzniká v důsledku elektrických vazeb mezi souběžně vedenými páry ve vícepárovém kabelu. Výsledná podoba přeslechového rušení na sledovaném páru je dána kombinací účinků ze všech okolních zdrojů rušení tzn. ostatních přenosových systémů nasazených na zbylých párech kabelu. Podle místa působení rušení na přenosové cestě, rozlišujeme přeslechy na blízkém konci NEXT (Near End CrossTalk) a přeslechy na vzdáleném konci FEXT (Far End CrossTalk). Podrobněji např. [3].

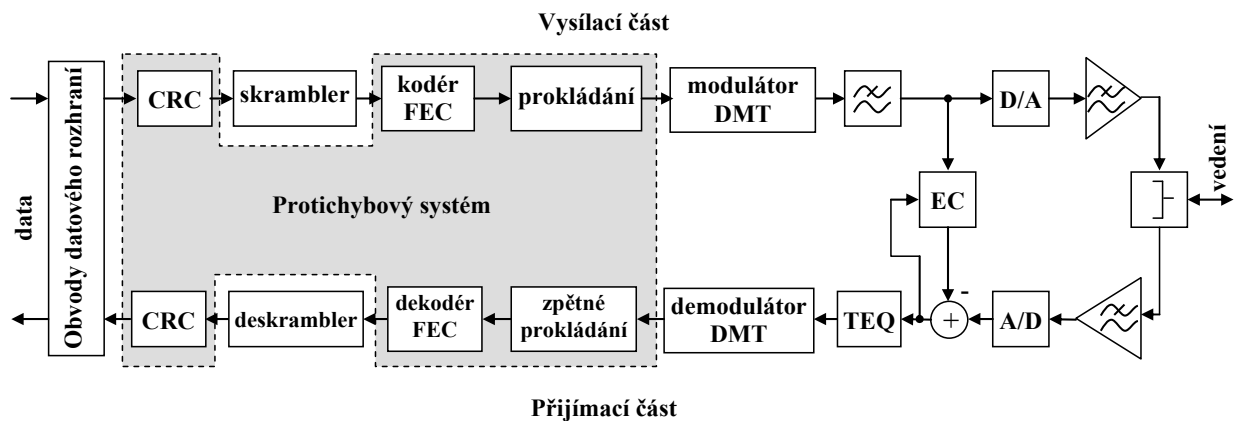
- Impulsní rušení

Impulsní rušení je představováno náhodně se vyskytujícími elektrickými pulsy s náhodnou amplitudou a spektrálním složením. Zdrojem tohoto rušení jsou různé krátké přechodové jevy způsobené např. domácími či průmyslovými elektrospotřebiči, nebo atmosférickými elektrickými výboji. Charakteristickým znakem těchto impulsů je kromě jejich náhodného výskytu, také amplituda výrazně vyšší než celková úroveň šumu na pozadí s Gaussovským rozložením. Podle [3] bylo zjištěno, že amplituda se běžně pohybuje mezi 5 a 20 mV, přičemž frekvence výskytu činí 1 až 5 impulsů za minutu. Dále bylo vyzorováno, že doba trvání bývá v rozmezí 30 až 150 μ s. Především díky velkému útlumu účastnické smyčky je impulsní rušení jednou z hlavních příčin zhoršení přenosových schopností ADSL systému a jsou stále vyvíjeny snahy o lepší pochopení jeho charakteristik a následných projevů.

- Šum pozadí

Jedná se o vysokofrekvenční šum v přenosové soustavě, který je svou úrovní o něco výše než tepelný a polovodičový šum. Zahrnuje rušení způsobené rádiovým vysíláním a rušení vznikající v elektronických součástkách. V návaznosti na výsledky průzkumu společnosti Bellcore byla pro tento typ rušení na účastnických telefonních linkách stanovena úroveň -140 dBm/Hz.

Pro potlačení vlivu těchto rušení, zvláště pak impulsního, je v systému ADSL implementován protichybový systém, který má v přenosu dat prostřednictvím telefonních linek zabezpečit potřebnou míru spolehlivosti. Jeho umístění v modemech ADSL je znázorněno na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Blokové schéma modemu ADSL

Protichybový systém v ADSL zajišťuje ochranu pomocí třech technik. První je založena na detekci chyby pomocí cyklického kódu CRC. Druhým prostředkem je dopředná protichybová korekce FEC pomocí RS kódu, který poskytuje ochranu proti shlukům chyb. Jeho korekční schopnosti pak mohou být dále podpořeny třetí formou ochrany – prokládáním. Tato možnost je volitelná a používá se pouze pro aplikace, které nejsou citlivé na zpoždění. Zbytek kapitoly blíže popisuje jednotlivé funkční bloky protichybového systému, přičemž v závěru je uveden přehled minimálních zabezpečovacích schopností pro ATU-C a ATU-R.

4.1 Cyklický redundantní součet

Blok CRC (Cyclic Redundancy Check) na vysílací straně přidává ke každému multirámcí osmi-bitový kontrolní součet, pomocí něhož je v přijímači možné detekovat chybu v datech na výstupu FEC dekodéru. Kontrolní bity jsou počítány zvlášť pro prokládaný a zvlášť pro rychlý datový blok rámce. Výpočet je dán vztahem:

$$crc(Z) = M(Z)Z^8 \text{ modulo } G(Z), \quad (4.1)$$

kde $M(Z)$ označuje polynom zprávy ve tvaru

$$M(Z) = m_0Z^{k-1} + m_1Z^{k-2} + \dots + m_{k-2}Z + m_{k-1}, \quad (4.2)$$

$G(Z)$ generující polynom

$$M(Z) = Z^8 + Z^4 + Z^3 + Z^2 + 1, \quad (4.3)$$

$crc(Z)$ výsledný polynom kontrolního součtu

$$crc(Z) = c_0Z^7 + c_1Z^6 + \dots + c_6Z + c_7 \quad (4.4)$$

a Z označuje operátor zpoždění.

4.2 Reedův-Solomonův kód

Blok dopředné chybové korekce FEC je realizován ve formě Reedova-Solomonova (RS) kódu. V následujícím textu jsou popsány teoretické základy a základní charakteristika těchto kódů. Dále je popsán jejich kódovací a dekódovací proces [5].

4.2.1 Galoisovo těleso

Reedovy-Solomonovy kódy jsou konstruovány na základě teorie konečných těles. Konečná tělesa byla popsána francouzským matematikem Evariste Galois a podle něj jsou také někdy nazývána jako Galoisova tělesa. Tato tělesa obsahují konečný počet prvků q a jsou označována jako $GF(q)$. Počet prvků tělesa musí být ve tvaru p^m , kde p je prvočíslo a m je nenulové přirozené číslo. Každé těleso musí obsahovat prvek 1 a 0, z čehož vyplývá, že nejmenší těleso je $GF(2)$, na kterém jsou prováděny operace sčítání a násobení v modulo 2. Obecně pak můžeme říci, že pro $GF(p)$ využíváme operací s modulo p .

Pro prvky tělesa platí, že jejich sčítání a násobení vede opět na prvky tohoto tělesa. V tělese existuje nulový prvek takový, že platí $a + 0 = a$, a takový sčítací inverzní prvek, kdy platí že $a + (-a) = 0$. Operace odčítání je definována jako $a - b = a + (-b)$. Pro operace násobení zde dále existuje inverzní prvek, pro který platí vztah $a \cdot (a^{-1}) = 1$. Dělení je pak definováno jako $a/b = a \cdot (b^{-1})$. Pro všechny tyto operace platí asociativní a komutativní zákon.

Pro každé těleso existuje tzv. primitivní prvek α , jehož mocninami můžeme popsat všechny prvky tělesa (kromě 0). V našem případě, kdy $p = 2$ je $\alpha = x$ a dále platí $\alpha^{2^m-1} = \alpha^0 = 1$. Galoisovo těleso je zcela a jedinečně popsáno tímto primitivním prvkem a vytvářecím mnohočlenem $p(x)$. Tento polynom musí být ireducibilní tedy nerozložitelný mnohočlen m -tého stupně s koeficienty z $GF(p)$, který nelze beze zbytku dělit žádným mnohočlenem s koeficienty uvedeného tělesa stupně nižšího než m a vyššího než 0.

Konstrukce Galoisových těles

Jak bylo výše zmíněno, každé těleso obsahuje nulový prvek. Každý další prvek je vyjádřen mocninami α , přičemž vzniklé prvky vyjádřené ve formě mnohočlenů jsou řádu menšího než m . Prvky tělesa α stupně stejného nebo většího než $2^m - 1$ mohou být převedeny na stupeň menší než $2^m - 1$ podle vztahu:

$$\alpha^{(2^m+n)} = \alpha^{(2^m-1)} \cdot \alpha^{n+1} = \alpha^{n+1}. \quad (4.5)$$

Těleso $GF(q = 2^m)$ můžeme potom zapsat jako $\{0, 1, \alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^{q-2}\}$. Vyjádření ve formě mnohočlenů získáme pomocí vztahu:

$$\alpha^n = \text{zbytek} \left\{ \frac{x^n}{p(x)} \right\}. \quad (4.6)$$

4.2.2 Charakteristika Reedových-Solomonových kódů

Reedovy-Solomonovy kódy představují symbolově orientované blokové cyklické kódy, které jsou schopny opravovat shluky chyb. Svou podstatou vycházejí z kódů BCH, které tvoří třídu cyklických kódů opravujících náhodné chyby. Rozdíl mezi BCH a RS pak spočívá v tom, že koeficienty BCH jsou prvky tělesa $GF(2)$, zatímco RS kódy pracují s m -bitovými symboly, které jsou prvky tělesa $GF(2^m)$. RS kód vytváří z k informačních symbolů přidáním $2t$ kontrolních (paritních) symbolů kódové slovo délky n , které patří do $GF(2^m)$. Platí tedy, že

$$n = k + 2t. \quad (4.7)$$

Koeficient t pak vyjadřuje počet chyb, který je kód schopen opravit. Pro maximální délku kódu n a počet informačních symbolů k dále platí

$$(n, k) = (2^m - 1, 2^m - 1 - 2t). \quad (4.8)$$

Tento kód je proto často zapisován jako RS (n, k). RS kódy jsou jedny z mála kódů, které dosahují maximální možnou minimální vzdálenost

$$d_{min} = (n - k) + 1. \quad (4.9)$$

Tato vzdálenost je definována jako počet pozic, v nichž se dvě libovolná kódová slova liší. Z rovnic (4.7) a (4.9) pak můžeme pro počet opravitelných chyb t odvodit vztah:

$$t = \left(\frac{d_{min} - 1}{2} \right) = \left(\frac{n - k}{2} \right). \quad (4.10)$$

Z uvedeného vyplývá, že na ošetření každé chyby jsou potřeba dva kontrolní symboly – jeden je potom využit pro vyhledání pozice chyby a druhý slouží pro nalezení její hodnoty.

RS kód je schopen, kromě chybně přijatého symbolu, opravit také ztrátu symbolu, přičemž platí vztah:

$$\rho = d_{min} - 1 = n - k, \quad (4.11)$$

kde ρ vyjadřuje počet ztracených symbolů, které je možno opravit. Pro korekční schopnosti kódu při současném působení chyb a ztrát symbolů platí

$$2\alpha + \gamma < d_{min} < n - k, \quad (4.12)$$

přičemž α značí počet chybných symbolů a γ je počet ztracených symbolů.

Jako pro ostatní blokové kódy, je i pro Reed-Solomonovy (n, k) kódy možné určit kódový poměr R , kdy

$$R = \frac{k}{n}. \quad (4.13)$$

4.2.3 Zabezpečovací proces

Podle [7] je možné zabezpečovací proces RS kódů provádět v časové a frekvenční oblasti. Hlavní nevýhoda při kódování a dekódování ve frekvenční oblasti spočívá v nutnosti výpočtu diskrétní Fourierovy transformace (ať už zpětné či dopředné), která zavádí do systému značné zpoždění. Další nevýhoda pak spočívá v tom, že v přenášeném kódovém slově není možné bez úspěšného dekódovacího procesu identifikovat blok původní zprávy. V následujícím textu bude věnována pozornost zabezpečení prováděnému v časové oblasti, které lze v praxi velice efektivně realizovat, zejména pak ve formě obvodů vysokého stupně integrace.

4.2.3.1 Kódování

V literatuře je, v souvislosti s kódováním v časové oblasti, nejčastěji popisován proces kódování pomocí vytvářecího mnohočlenu $g(x)$. Tento mnohočlen je stupně $2t$ a je tvořen mocninami základního prvku α z tělesa $GF(2^m)$, přičemž platí

$$g(x) = (x - \alpha) \cdot (x - \alpha^2) \cdot \dots \cdot (x - \alpha^{2^t}) = \prod_{j=1}^{2t} (x - \alpha^j) = \sum_{j=0}^{2t} g_j x^j. \quad (4.14)$$

V případě systematického kódování v časové oblasti je daná zpráva délky k ponechána v původním tvaru a je doplněna o $2t$ zabezpečovacích prvků, čímž vznikne kódové slovo délky n .

Na počátku kódovacího procesu si označíme vstupní datové slovo jako polynom $i(x)$, sekvenci paritních symbolů $p(x)$ a výstupní kódové slovo $c(x)$, přičemž platí:

$$i(x) = i_0 x + i_1 x^1 + \dots + i_{k-1} x^{k-1} \quad (4.15)$$

$$p(x) = p_0 x + p_1 x^1 + \dots + p_{2t-1} x^{2t-1} \quad (4.16)$$

$$c(x) = c_0 x + c_1 x^1 + \dots + c_{n-1} x^{n-1}. \quad (4.17)$$

Mnohočlen zabezpečované zprávy $i(x)$ vynásobíme členem $x^{(n-k)}$, čímž jej rozšíříme o $2t$ nulových míst a získáme tak prostor pro přičtení paritních symbolů $p(x)$. Vznikne tak kódové slovo $c(x)$, pro které můžeme psát:

$$c(x) = x^{(n-k)} \cdot i(x) + p(x). \quad (4.18)$$

Paritní polynom $p(x)$ je řádu $2t$ nebo nižšího a označuje zbytek získaný dělením rozšířené zprávy vytvářecím polynomem $g(x)$. Platí tedy:

$$p(x) = \text{zbytek} \left\{ \frac{i(x) \cdot x^{(n-k)}}{g(x)} \right\}. \quad (4.19)$$

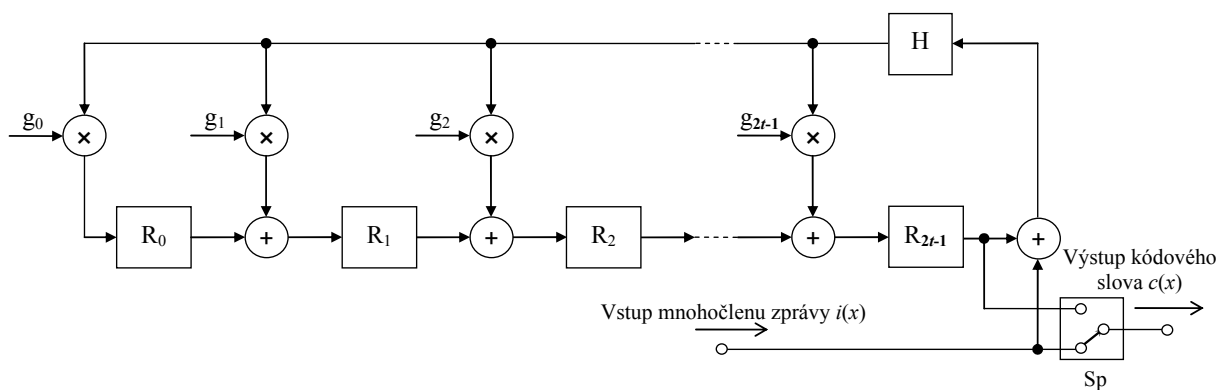
Po dosazení do rovnice (4.18) pak získáme kódové slovo

$$c(x) = x^{(n-k)} \cdot i(x) + \text{zbytek} \left\{ \frac{i(x) \cdot x^{(n-k)}}{g(x)} \right\}, \quad (4.20)$$

které je bezezbytku dělitelné vytvářecím mnohočlenem $g(x)$.

Výhoda tohoto způsobu kódování pak spočívá ve snadné rozlišitelnosti původní kódované zprávy od sekvence zabezpečovacích prvků. V případě, že dojde k překročení zabezpečovací schopnosti kódu, je (v některých případech) možné akceptovat fakt, že zpráva je do určité míry chybná, odstranit zabezpečovací část a zprávu dále zpracovat. Pokud by se totéž stalo u zprávy zakódované nesystematicky (tj. nemohli bychom rozeznat informační část od zabezpečovací) a dekódovací proces by pouze detekoval nekorigovatelnou chybu, byla by přenesená zpráva bezcenná.

Kodér systematického RS kódu je realizován pomocí posuvných registrů s lineární zpětnou vazbou, v anglické literatuře označovaném jako LFSR (Linear Feedback Shift Register). Schéma obecného LFSR je znázorněno na obr. 4.2. Protože kodér pracuje s m -bitovými symboly, jsou všechny datové spoje šířky m . Během k hodinových cyklů jsou symboly nezabezpečené zprávy $i(x)$ přiváděny na vstup kodéru a zároveň jsou kopírovány přímo na výstup kodéru prostřednictvím přepínače Sp. Každý datový symbol je nejprve sečten podle pravidel sčítání v Galoisově tělese s obsahem registru R_{2t-1} . Tento součet je pak přes otevřené hradlo H přiveden na násobičky, které jej vynásobí s příslušným neměnným koeficientem vytvářecího mnohočlenu kódu $g(x)$. Výsledky násobení jsou pak přes sčítačky zapsány do registrů R_0 až R_{2t-1} . Po vstupu k -tého symbolu zprávy do kodéru se hradlo uzavře a přepínač se přepne do horní polohy. Nyní už $2t$ buněk posuvného registru obsahuje paritní symboly (mnohočlen $p(x)$), které jsou v následujících $n-k$ taktech postupně přesouvány na výstup, kde společně se symboly zprávy vytvoří kódové slovo $c(x)$ délky n .



Obr. 4.2: Schéma zapojení LFSR

4.2.3.2 Dekódování

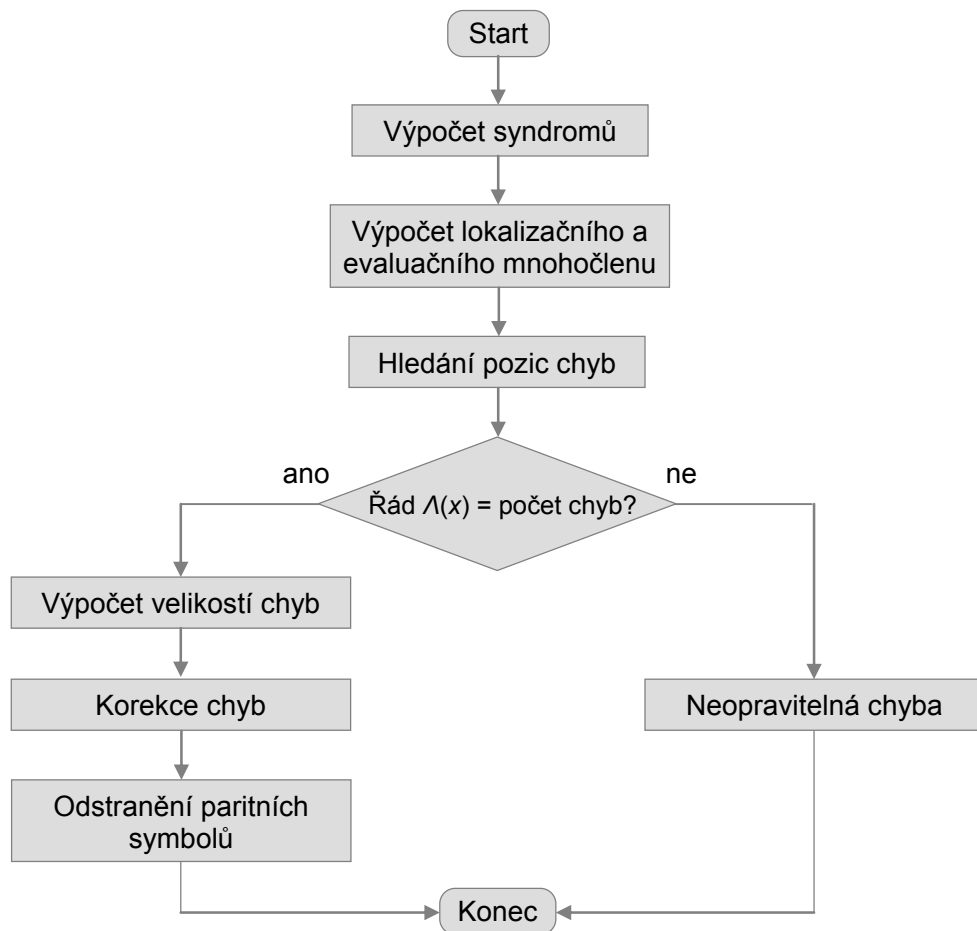
Při přenosu po telekomunikačním kanále může být zabezpečená zpráva napadena chybou. Polynom chyby $e(x)$ je ve tvaru

$$e(x) = e_0 + e_1x + \dots + e_{n-1}x^{n-1}. \quad (4.20)$$

Mnohočlen přijaté zprávy na straně dekodéru $r(x)$ má pak tvar

$$r(x) = c(x) + e(x) = r_0 + r_1x + \dots + r_{n-1}x^{n-1}. \quad (4.21)$$

Úkolem dekodéru je, na základě přijaté zprávy, najít místa a velikost působení chyb a určit tak tvar původní zprávy.



Obr. 4.3: Fáze dekódovacího procesu

Dekódovací proces se skládá z několika fází (viz Obr. 4.3). Nejprve jsou vypočítány syndromy. V případě, že jsou nenulové, je zahájen výpočet lokalizačního a evaluačního mnohočlenu. K jejich výpočtu existuje několik přístupů, většinou je řešen pomocí Berlekamp-Masseyho algoritmu [5]. Dále jsou hledány kořeny lokalizačního mnohočlenu (Chienovo vyhledávání), které určí polohu chyb. Získané kořeny a evaluační a lokalizační mnohočlen jsou zpracovány Forneyho algoritmem, který zjistí hodnoty chyb na daných pozicích. Nyní je možné sestavit chybový mnohočlen, který je využit pro korekci přijaté zprávy. Nakonec jsou

ze zprávy odstraněny paritní symboly, čímž získáme původní nezakódovanou zprávu. Při dekódovacím procesu může nastat stav, kdy stupeň lokalizačního mnohočlenu je odlišný od počtu nalezených chybných míst. Tento stav potom indikuje, že byla překročena zabezpečovací schopnost kódu.

Výpočet syndromů

V případě, že by přijatá zpráva byla správná, tedy patřila by do množiny kódových slov vytvářených kodérem, hodnota syndromu S by byla rovna nule. Jakákoliv nenulová hodnota syndromu pak značí, že při přenosu po telekomunikačním kanále došlo k chybě. Syndrom je tvořen $n-k$ symboly. Protože platí, že kódové slovo $c(x)$ je dělitelné vytvářecím polynomem $g(x)$, jsou kořeny $g(x)$, tj. $\alpha^0, \alpha^1, \dots, \alpha^{2t-1}$, také kořeny $c(x)$. Můžeme tedy psát

$$r(x) = c(\alpha^j) + e(\alpha^j) = e(\alpha^j) = \sum_{i=0}^{n-1} e_i \alpha^{i \cdot j}, \text{ kde } j = 1, 2, \dots, 2t. \quad (4.22)$$

Pro výpočet syndromů S_j platí

$$S_j = r(\alpha^j) = \sum_{i=0}^{n-1} r_i \alpha^{i \cdot j}, \text{ kde } j = 1, 2, \dots, 2t. \quad (4.23)$$

Pro počet chyb v , kdy $0 \leq v \leq t$, můžeme jednotlivé syndromy rozepsat do následujícího tvaru [5]:

$$\begin{aligned} S_1 &= Y_1 X_1^1 + Y_2 X_2^1 + \dots + Y_v X_v^1 \\ S_2 &= Y_1 X_1^2 + Y_2 X_2^2 + \dots + Y_v X_v^2 \\ &\vdots \\ S_{2t} &= Y_1 X_1^{2t} + Y_2 X_2^{2t} + \dots + Y_v X_v^{2t} \end{aligned}, \quad (4.24)$$

kde velikost chyb $Y_l = e_{i_l}$ a číslo pozice chyb $X_l = \alpha_{i_l}$, přičemž $l = 1, 2, \dots, 2t$. Symbol i_l označuje polohu l -té chyby a X_l je prvek Galoisova tělesa spojeného s danou pozicí. Máme tedy $2t$ nelineárních rovnic, pomocí nichž je možné určit polohu a velikosti chyb. Přímé řešení těchto rovnic je s rostoucím t značně výpočetně složité. Proto byl k popisu poloh chyb zaveden lokalizační mnohočlen $A(x)$ a pro jejich hodnoty evaluační mnohočlen $\Omega(x)$.

Lokalizační mnohočlen $A(x)$ ve tvaru

$$A(x) = 1 + A_1 x + \dots + A_v x^v, \quad (4.25)$$

má kořeny odpovídající inverzním číslům pozic chyb X_l^{-1} pro $l = 1, 2, \dots, v$. Platí tedy

$$A(x) = \prod_{l=1}^v (1 - x X_l^{-1}), \text{ kde } X_l = \alpha^{i_l}. \quad (4.26)$$

Evaluační mnohočlen je definován jako

$$\Omega(x) = [1 + S(x)] \cdot A(x) \bmod x^{2t+1}, \quad (4.27)$$

kde výraz $S(x)$ označuje mnohočlen syndromu popsany vztahem

$$S(x) = \sum_{i=1}^{2t} S_i x^i . \quad (4.28)$$

Vztah mezi evaluačním mnohočlenem, polohami chyb a jejich hodnotami je vyjádřena jako

$$\Omega(X_l^{-1}) = Y_l \prod_{i \neq l} (1 - X_i X_l^{-1}) . \quad (4.29)$$

Výpočet lokalizačního a evaluačního mnohočlenu

Podle [6] je možné k výpočtu lokalizačního a evaluačního mnohočlenu využít Berlekampův-Masseyho (BM) algoritmus. Jsou známy i jiné algoritmy (např. Euklidovský [1], Peterson-Gorenstein-Zierlerův [6] atd.). Z uvedených metod pak právě BM algoritmus vykazuje menší výpočetní náročnost. Tato iterativní metoda využívá k výpočtu vhodně zapojený posuvný registr s lineární zpětnou vazbou, který generuje polynomy syndromů. Podrobný popis algoritmu je pak uveden v [5], [6].

Výpočet koeficientů lokalizačního mnohočlenu $A(x)$ je popsán sadou následujících rekurzivních rovnic:

$$\Delta_i = \sum_{j=0}^{i-1} A_j^{i-1} \cdot S_{i-j} , \quad (4.30)$$

$$L_i = \delta(i - L_{i-1}) + (1 - \delta) \cdot L_{i-1} , \quad (4.31)$$

$$\begin{bmatrix} A^{(i)}(x) \\ B^{(i)}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta_i x \\ \Delta_i^{-1} \delta & (1 - \delta)x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^{(i-1)}(x) \\ B^{(i-1)}(x) \end{bmatrix} , \quad (4.32)$$

pro $i = 1, 2, \dots, 2t$. Počáteční podmínky jsou: $A_j^{(0)}(x) = 1$, $B^{(0)}(x) = 1$, $L_0 = 0$, $\delta = 1$ pro

$\Delta_i \neq 0$ a zároveň $2L_{i-1} \leq i - 1$, jinak $\delta = 0$.

Pro nalezení evaluačního mnohočlenu $\Omega(x)$ se pak vychází z rovnice

$$\begin{bmatrix} \Omega^{(i)}(x) \\ A^{(i)}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta_i x \\ \Delta_i^{-1} \delta & (1 - \delta)x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega^{(i-1)}(x) \\ A^{(i-1)}(x) \end{bmatrix} . \quad (4.33)$$

Na počátku iteračního procesu je pomocný polynom $A(x) = 0$ a $\Omega^{(0)}(x) = 1$. Po provedení $2t$ iterací pak získáme $A(x) = A^{(2t)}(x)$ a $\Omega(x) = \Omega^{(2t)}(x)$.

Hledání pozic chyb

Výpočet pozic chyb je proveden pomocí Chienova vyhledávání a spočívá v nalezení kořenů lokalizačního mnohočlenu $A(x)$. Do mnohočlenu jsou postupně dosazovány všechny prvky daného Galoisova tělesa a jsou hledány kořeny, pro které je $A(x) = 0$. Nalezené kořeny, X_1, X_2, \dots, X_v pak určují pozici chyb v přijatém polynomu.

Výpočet velikosti chyb

Pro zjištění velikosti chyb je využíván Forneyho algoritmus. K provedení výpočtu je využito evaluačního mnohočlenu $\Omega(x)$, lokalizačního mnohočlenu $A(x)$ a pozic chyb X_1, X_2, \dots, X_v .

Forneyho algoritmus je definován vztahem

$$Y_l = -X_l \cdot \frac{\Omega(X_l^{-1})}{A'(X_l^{-1})}, \text{ kde } l = 1, 2, \dots, v. \quad (4.22)$$

Výraz obsahuje derivaci lokalizačního mnohočlenu $A(x)$ provedenou v $GF(2^m)$, jejíž výpočet je podrobně popsán v [2].

Korekce chyb

V této fázi už z vypočítaných poloh chyb X_v a jejich hodnot Y_v můžeme dosazením do (4.24) a (4.22) odvodit chybový mnohočlen $e(x)$, který je nutné přičíst k mnohočlenu přijaté zprávy $r(x)$. V případě, že nedošlo k překročení zabezpečovací schopnosti kódu, získáme původní kódové slovo $c(x)$, pro které bude platit:

$$c(x) = r(x) + e(x) \quad (4.23)$$

V posledním kroku je odstraněna zabezpečovací část kódového slova, čímž získáme původní zprávu $i(x)$.

4.3 Prokládání

Použití samotného RS kódu nemusí vždy zaručit dostatečnou míru ochrany proti shlukům chyb, které mohou při přenosu dat vzniknout. Především se pak jedná o případy, kdy vzniknou delší shluky chyb, které již překročí jeho korekční schopnosti. Aby k takovýmto případům docházelo co nejméně, byla do komunikačního řetězce zahrnuta technika prokládání. Tato technika na straně vysílače spočívá v časové změně polohy signálových prvků vysílaných na kanál a jejich zpětnému poskládání do původního sledu v přijímači. Pokud pak při přenosu dojde ke vzniku shluku chyb, je jeho účinek vlivem prokládání rozložen na shluky kratší (popř. přímo na chyby nezávislé), které je korekční kód již schopen opravit. Jistou daní za vyšší odolnost vůči shlukům chyb je zpoždění, které vzniká při plnění paměťových prvků prokladače. Jsou známy dva základní principy prokládání, a to blokové a konvoluční.

V ADSL systému je využito konvoluční prokládání, které oproti blokovému dosahuje polovičního zpoždění. Jeho základní princip je znázorněn na obrázku 4.4. Prokladač s hloubkou prokládání D je složen z D větví, které jsou cyklicky připojovány ke vstupnímu toku bajtů přenášených dat. Každá větev obsahuje posuvný registr složený z buněk délky M .

Index větve pak udává z kolika buněk je příslušný posuvný registr složen. Pokud N představuje délku vstupního datového slova v bajtech pak pro délku buňky platí

$$M = \frac{N}{D}. \quad (4.24)$$

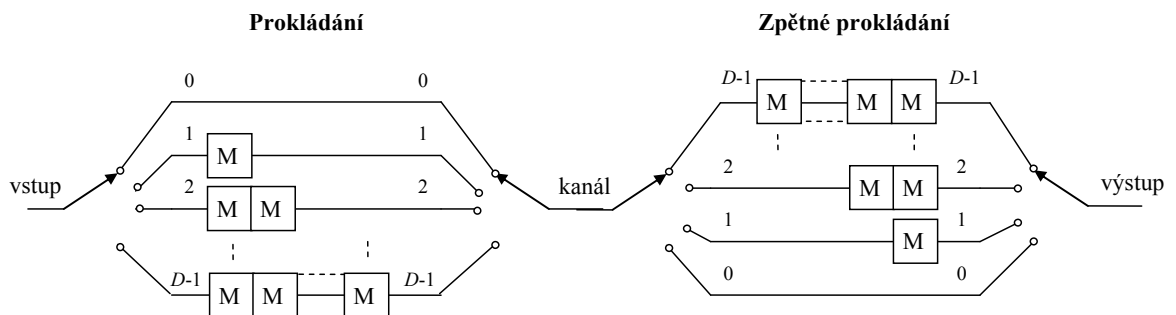
Po přenosu proložených dat přes kanál je třeba provést zpětné prokládání a obnovit tak původní sled signálových prvků. Princip zpětného prokládání v přijímači je téměř shodný s procesem prokládání ve vysílači. Rozdíl pak spočívá pouze v opačné indexaci větví tzn. poloze 0 na přepínači odpovídá větev s indexem $D-1$ (tedy s největším zpožděním). Z uvedeného vyplývá, že pro celkovou hodnotu zpoždění Z vyjádřenou v počtu bajtů platí

$$Z = (D - 1) \cdot N. \quad (4.25)$$

V případě prokládání v ADSL pro výslednou dobu zpoždění t_d platí vztah:

$$t_d = S \cdot D \cdot 0,25 \text{ [ms]}, \quad (4.26)$$

kde S je počet DMT symbolů na RS kódové slovo.



Obr. 4.4: Princip konvolučního prokládání

4.4 Možné parametry protichybového systému ADSL

V doporučení G.992.1 jsou definovány minimální zabezpečovací schopnosti, které by měly ADSL modemy splňovat. Jejich výčet pro ATU-C i ATU-R je uveden v tabulce 4.1 a 4.2.

Tab. 4.1: Minimální zabezpečovací schopnosti pro ATU-C

Parametr	Rychlý subrámeček	Prokládaný subrámeček
Počet kontrolních bytů na RS kódové slovo	$R_F = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16$	$R_I = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16$
Počet DMT symbolů na RS kódové slovo	$S = 1$	$S = 1, 2, 4, 8, 16$
Hloubka prokládání	Nelze použít	$D = 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64$

Tab. 4.2: Minimální zabezpečovací schopnosti pro ATU-R

Parametr	Rychlý subrámeček	Prokládaný subrámeček
Počet kontrolních bytů na RS kódové slovo	$R_F = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16$	$R_I = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16$
Počet DMT symbolů na RS kódové slovo	$S = 1$	$S = 1, 2, 4, 8, 16$
Hloubka prokládání	Nelze použít	$D = 1, 2, 4, 8$

Pro ATU-C a ATU-R pak shodně platí následující podmínky:

- R_F může být >0 pouze tehdy když $K_F > 0$,
- R_I může být >0 pouze tehdy když $K_I > 0$ a také, že
- R_I musí být celočíselným násobkem S .

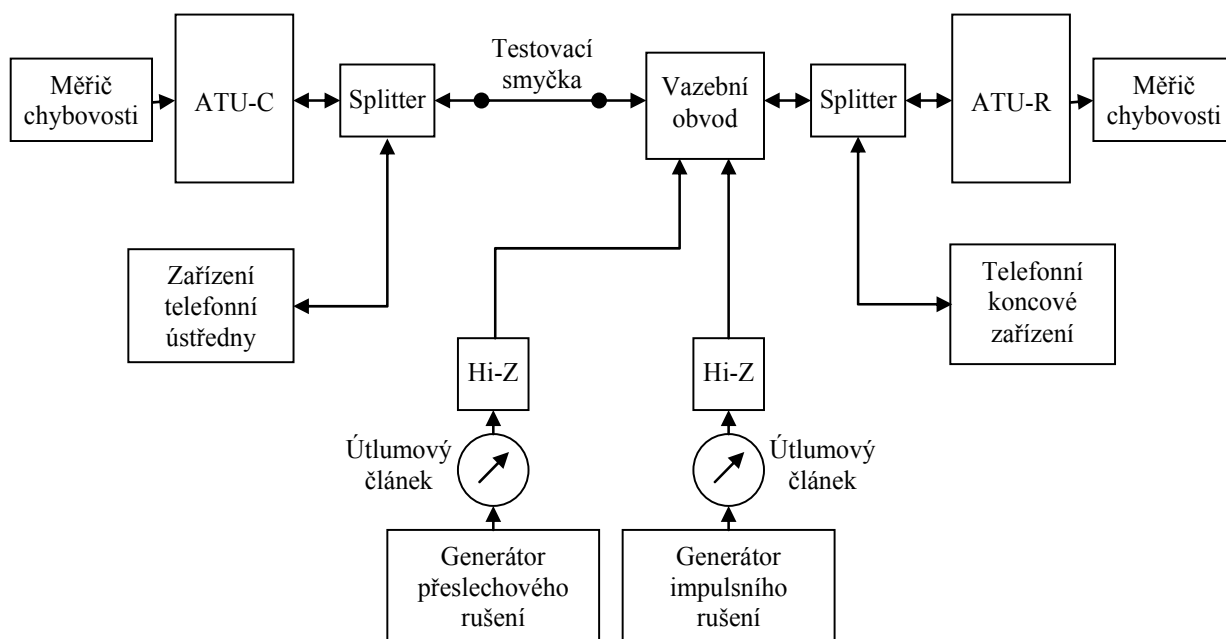
5 MĚŘENÍ VLIVU IMPULSNÍHO RUŠENÍ DLE G.996.1

Způsob, jakým jsou ADSL modemy testovány, vychází z doporučení ITU-T G.996.1 [2]. Toto doporučení popisuje řadu testovacích procedur, které umožňují proměření přenosových výkonnostních požadavků stanovených v jednotlivých standardech systémů DSL. V těchto laboratorních testovacích metodách je vyhodnocována schopnost systému minimalizovat vznik přenosových chyb způsobených různými typy rušení. Jedná se pak o rušení způsobené:

- přeslechy z jiných systémů
- vniknutím rádiových vln
- šumem pozadí
- impulsním rušením
- signalizací v POTS

Tyto potenciální zdroje rušení jsou simulovány v laboratorních podmínkách, které zahrnují testovací smyčky, měřící přístroje a obvody, a vlastní testovaný systém. Následující text se věnuje popisu testovací metodiky pro vyhodnocení odolnosti systému ADSL vůči impulsnímu rušení.

5.1 Měřící zapojení



Obr. 5.1: Zapojení pro měření odolnosti proti impulsnímu rušení pro sestupný směr dle G.996.1

Měřicí zapojení testování odolnosti ADSL systému vůči impulsnímu rušení pro sestupný směr je znázorněno na obrázku 5.1. Vlastní testovaný systém se skládá z transceiveru na straně ústředny ATU-C, koncového účastnického transceiveru ATU-R a příslušných splitterů. ATU-C a ATU-R jsou propojeny testovací smyčkou následovanou vazebním obvodem, který slouží k injektování rušení a galvanickému oddělení obvodu. Impulsní a přeslechové rušení z generátorů je přiváděno přes útlumový článek s vysokou impedancí (Hi-Z). Samotné měření pak probíhá tak, že v měřiči chybovosti na straně ATU-C je generována pseudonáhodná binární posloupnost, která je zpracována modemem a vyslána na rušený přenosový kanál. Na přijímací straně je modemem ATU-R přijatý signál zpracován a získaná data předána měřiči chybovosti, který stanovuje výsledný poměr BER. Kromě chybovosti BER může být pak sledován také počet chybných sekund ES (Errored Seconds). K ES dojde v modemu ADSL v momentě, kdy v daném vteřinovém intervalu blok CRC detekuje chybu.

5.2 Testovací smyčky

Aby bylo možné prováděné laboratorní testy přiblížit reálným podmínkám, definuje [2] několik testovacích smyček. Tato vedení jsou složena z úseků různých typů kabelů s proměnnou délkou, které jsou popř. doplněny nezakončenou odbočkou. Přenosové vlastnosti kroucené dvoulinky jsou modelovány na základě jejich primárních parametrů R , L , C a G . V průběhu let byly řadou měření určeny frekvenční závislosti těchto parametrů u různých typů vedení a stanoveny jejich aproximace. V [2] je pro výpočet primárních parametrů použit sedmi parametrový model vedení, který definuje frekvenční závislost jednotlivých veličin takto:

$$R(f) = \sqrt[4]{(roc^4 + ac \cdot f^2)} \quad [\Omega/m], \quad (5.1)$$

$$L(f) = \frac{l_0 + l_\infty \cdot \left[\frac{f}{f_m}\right]^{-b}}{1 + \left[\frac{f}{f_m}\right]^b} \quad [H/m], \quad (5.2)$$

$$C(f) = k \quad [F/m],$$

$$G(f) = 0 \quad [S/m].$$

Konkrétní hodnoty uvedených konstant pro různé typy vedení jsou pak uvedeny v [2].

V návaznosti na primární parametry vedení mohou být vypočítány také parametry sekundární, jimiž jsou charakteristická impedance

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad [\Omega] \quad (5.3)$$

a měrná míra přenosu

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)} \quad [-]. \quad (5.4)$$

Při odvozování výsledné přenosové funkce přenosové linky složené z úseků různých typů vedení se vychází z konceptu náhledu na vedení jako na dvojbran s parametry ABCD [3], pro které platí následující vztahy:

$$A(f) = D(f) = \cosh \gamma(f) \cdot l, \quad (5.5)$$

$$B(f) = Z_0(f) \cdot \sinh \gamma(f) \cdot l, \quad (5.6)$$

$$C(f) = \frac{1}{Z_0(f)} \cdot \sinh \gamma(f) \cdot l. \quad (5.7)$$

Pro přímý úsek vedení je pak možné sestavit zpětnou kaskádní matici

$$\mathbf{A}_X = \begin{bmatrix} A(f) & B(f) \\ C(f) & D(f) \end{bmatrix}. \quad (5.8)$$

Matice úseku s nezakončenou odbočkou má tvar

$$\mathbf{A}_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_0 \cdot \coth(\gamma \cdot l)} & 1 \end{bmatrix}. \quad (5.9)$$

Výsledná matice je dána součinem kaskádních matic dílčích úseků, přičemž platí:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{A}_3 \cdot \dots \cdot \mathbf{A}_X = \begin{bmatrix} a(f) & b(f) \\ c(f) & d(f) \end{bmatrix}. \quad (5.10)$$

Pro výslednou přenosovou funkci $H(f)$ účastnické smyčky následně platí

$$H(f) = \frac{Z_L + Z_G}{a(f) \cdot Z_L + b(f) + Z_G \cdot (c(f) \cdot Z_L + d(f))}, \quad (5.11)$$

kde Z_L a Z_G značí zakončovací impedanci a impedanci generátoru.

Vložný útlum $IL(f)$ celé smyčky je definován vztahem

$$IL(f) = 20 \log \left(\left| \frac{a(f) \cdot Z_L + b(f) + Z_G \cdot (c(f) \cdot Z_L + d(f))}{Z_L + Z_G} \right| \right). \quad (5.12)$$

5.3 Postup měření

Před vlastním testováním je potřeba nalézt maximální úroveň přeslechového rušení, při které jsou ADSL jednotky ještě schopné bezproblémově projít inicializační fází. Tím je zajištěno, že výsledky měření budou reflektovat pouze schopnosti samotného modemu, nikoliv chybu ve formě jisté přidané hodnoty odstupů SNR. Následné měření pak spočívá

v injektování příslušného rušícího impulsu s náhodnou fází a postupně se zvyšující amplitudou. Každý impuls dané napěťové úrovně je aplikován celkem 15krát, přičemž je dodržován odstup minimálně jedné vteřiny. Zároveň s injekcí impulsů je sledována chybovost přenosu. Podstatou měření je nalézt takovou amplitudu u_e [mV] impulsního rušení, při které polovina aplikovaných rušících impulsů způsobí chybu v přenosu. Uvedený postup je proveden pro oba doporučením definované průběhy rušících impulsů. Jejich časové průběhy jsou znázorněny na obrázku 5.2 a 5.3.

Zjištěné hodnoty amplitud obou impulsů jsou následně dosazeny do rovnice (5.13) pro určení pravděpodobnosti toho, že v intervalu jedné vteřiny dojde k chybě. Tato rovnice má tvar:

$$E = 0,0037 \cdot P(u > u_{e1}) + 0,0208 \cdot P(u > u_{e2}), \quad (5.13)$$

kde

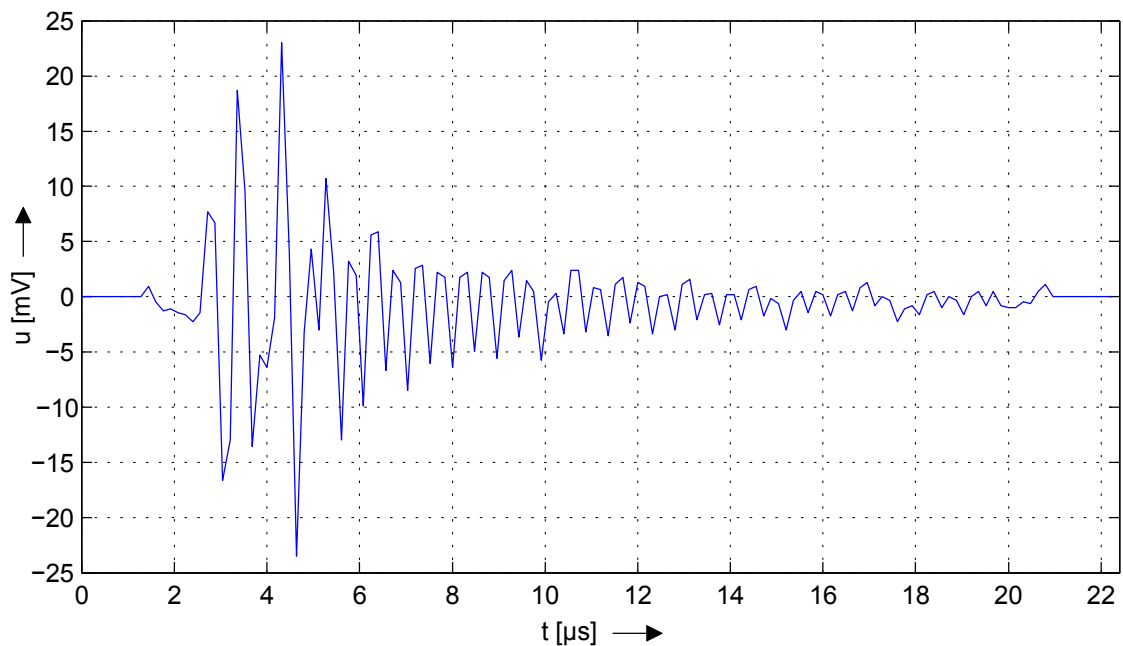
$$P(u > u_e) = \frac{25}{u_e^2}, \quad (5.14)$$

pro u_e v intervalu 5 mV až 40 mV,

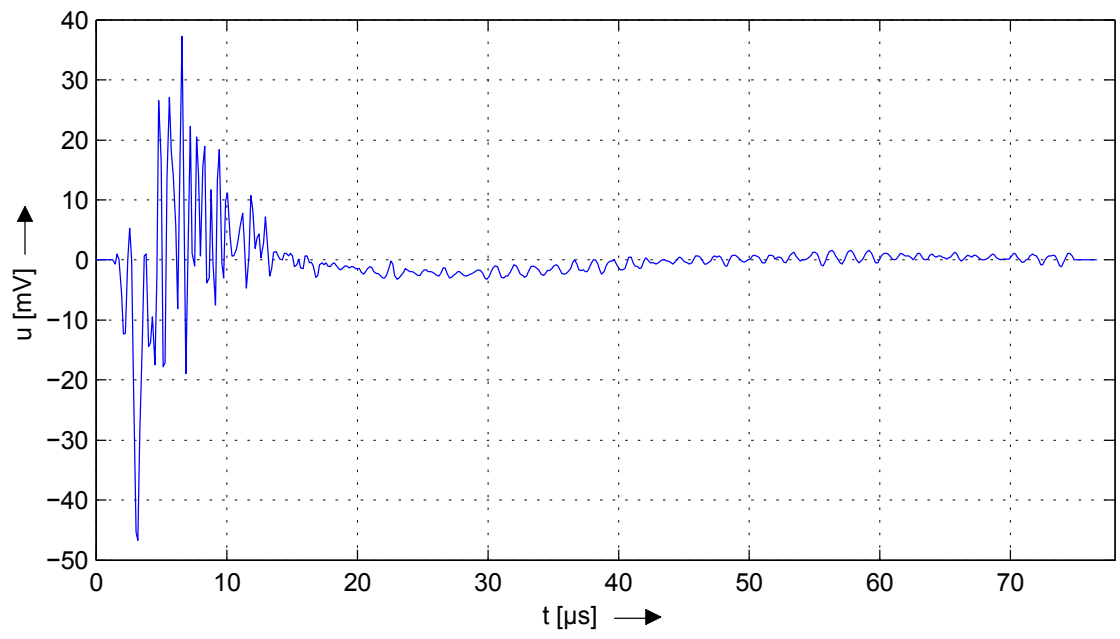
$$P(u > u_e) = \frac{0,625}{u_e}, \quad (5.15)$$

pro $u_e > 40$ mV a u_{e1} resp. u_{e2} odpovídá hledané amplitudě impulsu č. 1 resp. 2.

Výsledná hodnota pravděpodobnosti by pak měla být menší než 0,14%.



Obr. 5.2: Časový průběh rušícího impulsu č. 1



Obr. 5.3: Časový průběh rušícího impulsu č. 2

6 MODEL PROTICHYBOVÉHO SYSTÉMU ADSL

Model protichybového systému ADSL byl vytvořen pomocí programu Matlab Simulink ve verzi R2008a (7.6.0.324). Důvod pro volbu tohoto programu spočívá především v tom, že obsahuje celou řadu funkcí a bloků, jež je možné přímo implementovat v sestavovaném modelu. Dalším důvodem je pak existence řady nástrojů, které mohou být využity pro analýzu a grafické zobrazení výsledných dat.

Navržený model zahrnuje simulaci zabezpečovacího procesu (viz kapitola 4), DMT modulace a přenosového kanálu s rušivými vlivy. Aplikace ze zadané přenosové rychlosti a požadavku na prokládání vypočítá parametry pro nastavení protichybového systému. Dále umožňuje nastavit parametry přenosového vedení a zdrojů impulsního rušení a šumu na pozadí. Podle nastavených vstupních charakteristik přenosu je vypočítána bitová alokace a výsledné parametry jsou předány výpočetnímu jádru modelu. V aplikaci je možné provést dva typy testovacích úloh. První z nich vychází z doporučení G.996.1 a umožňuje určit pravděpodobnost vzniku chybné vteřiny. Druhá testovací úloha pak slouží k měření odolnosti přenosového systému vůči impulsnímu rušení.

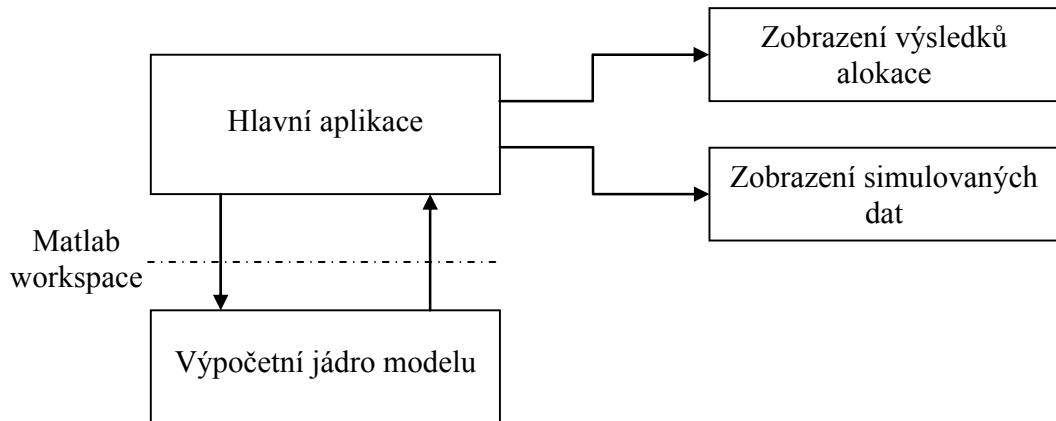
6.1 Výchozí předpoklady

Navržený model protichybového systému ADSL vychází z následujících předpokladů.

- Uvažované přenosové frekvenční pásmo pro vzestupný a sestupný směr je odděleno (tzn. je využito FDM).
- V průběhu simulace jsou přenášena data pouze v jednom směru a to pouze v sestupném.
- Při přenosu je využit rámcový režim 3, tj. rámcový režim s redukováným záhlavím (synchronizační a rychlý bajt jsou přenášeny ve společném datovém bloku rámce).
- Maximální uvažovaná přenosová rychlost uživatelských dat bez režijních informací je stanovena na 6,144 Mb/s.
- Přeslechové rušení je pro zjednodušení modelu nahrazeno šumem s Gaussovským rozložením a s plochým spektrálním složením.

6.2 Struktura modelu

Základní bloková struktura simulačního modelu je znázorněna na obrázku 6.1. Jak je z uvedeného obrázku patrné, program je možné rozdělit na čtyři základní části. V následujícím textu je uveden jejich bližší popis.



Obr. 6.1: Základní bloková struktura navrženého modelu

6.2.1 Hlavní aplikace

Hlavní aplikace slouží především k řízení simulace, interakci s uživatelem a sběru simulačních dat. Uživatelské rozhraní aplikace je znázorněno na obrázku 6.2. Množství přenesených uživatelských dat je zadáváno prostřednictvím násobků 32 kbit/s. Následuje volba přenosové cesty v protichybovém systému, tj. prokládané cesty či neprokládané. V případě volby prokládané cesty, je dále zpřístupněna nabídka parametru hloubky prokládání. Pro výpočet zbylých parametrů FEC systému je potřeba stisk tlačítka *Potvrdit*. V pravé části okna se zobrazí sada vypočítaných parametrů, které budou použity pro nastavení protichybového systému. Stiskem právě zpřístupněného tlačítka *Použít* je dané konfiguraci přiděleno jméno a je zařazena do níže zobrazeného okna testovaných konfigurací. Vypočítané konfigurace lze libovolně přidávat či mazat. Po dokončení výběru patřičných testovaných nastavení protichybového systému, je možné přikročit k volbě testovací úlohy. Na výběr jsou dvě možnosti.

Určení pravděpodobnosti chybné sekundy

První testovací úloha slouží k určení pravděpodobnosti vzniku chybné vteřiny dle doporučení G.996.1. Jak bylo výše uvedeno, toto měření spočívá v injektování dvou testovacích rušících impulsů s postupně rostoucí amplitudou a sledování počtu způsobených chyb. Oproti výše zmíněným 15-ti, je impuls s danou amplitudou aplikován celkem 16krát. Důvodem je lepší rozlišitelnost právě poloviny impulsů, jež způsobí chybu. Rozsah

napětových úrovní příslušných impulsů s požadovaným krokem je zadáván na panelu *Nastavení přenosového kanálu* v sekci *Impulsní rušení*. Hodnoty amplitud určují velikost napětí špička-špička.

Minimální časový odstup po sobě jdoucích impulsů je definován údajem *Minimální vzdálenost*, který je zadáván v celistvých násobcích 17 ms. Tato hodnota vychází z doby trvání jednoho multirámce a jeho zabezpečení CRC kódem. Detekce chyby CRC je pak využívána při vyhodnocování zda daný impuls způsobil chybu.

Model FEC ADSL

Model protichybového systému ADSL

Zadané parametry přenosu

Zadejte násobek n: x 32 kbit/s

Volba přenosové cesty:

Hloubka prokládání D:

Vypočítané FEC parametry

Prokládaný datový blok		Rychlý datový blok	
Délka zprávy Ki:	193 bajtů	Délka zprávy Kf:	0 bajtů
Délka zabezpečení Ri:	16 bajtů	Délka zabezpečení Rf:	0 bajtů
Délka kod. slova Ni:	209 bajtů	Délka kod. slova Nf:	0 bajtů
Zkrácení:	46 bajtů	Zkrácení:	0 bajtů
Počet DMT symbolů:	1		

Testované konfigurace

název	datový blok	n	rychlost [kb/s]	K	R	N	D	DMT symbolů
Konfigurace 1:	prokládaný	192	6144	193	16	209	1	1
Konfigurace 2:	prokládaný	192	6144	193	16	209	2	1
Konfigurace 3:	prokládaný	192	6144	193	16	209	4	1
Konfigurace 4:	prokládaný	192	6144	193	16	209	8	1
Konfigurace 5:	prokládaný	192	6144	193	16	209	16	1
Konfigurace 6:	prokládaný	192	6144	193	16	209	32	1

Nastavení přenosového kanálu

Impulsní rušení

Napětová úroveň impulsu 1: od: do: mV krok: mV

Napětová úroveň impulsu 2: od: do: mV krok: mV

Minimální vzdálenost: x 17 ms

Testovací smyčka: délka: km

Šumová rezerva při alokaci: dB

Šum na pozadí: dBm/Hz Zadat

Testovací úloha

Určení pravděpodobnosti chybné sekundy

Měření odolnosti proti impulsnímu rušení

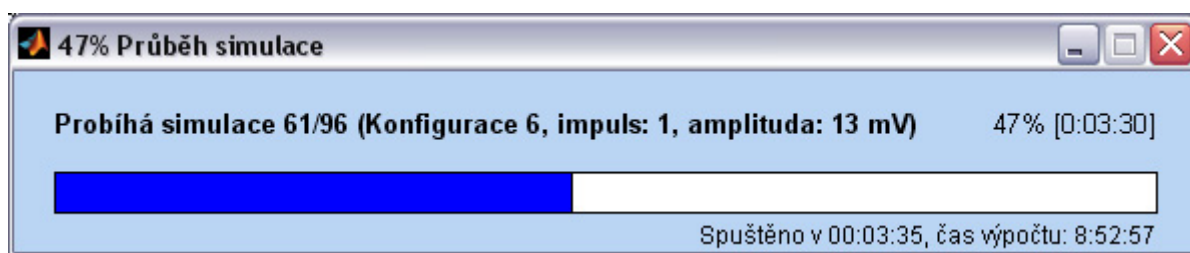
Nastavení doby simulace

Doba simulace: s

Obr. 6.2: Uživatelské rozhraní modelu

Následující rozbalovací nabídka umožňuje výběr testovací smyčky. Z [2] byla v modelu implementována smyčka #0, označovaná také jako null loop, a smyčka #2, která je složena z přímého úseku vedení o tloušťce žíly 0,5 mm. V případě volby smyčky #2, je nabídnuto pole pro zadání požadované délky.

Při výpočtu bitové alokace je do algoritmu zahrnuta tzv. šumová rezerva. Její hodnotu (obvykle 6 dB) je možné zadat do příslušného textového pole. Poslední položkou na panelu *Nastavení přenosového kanálu* je spektrální výkonová hustota šumu na pozadí. V souladu s postupem měření uvedeném v předchozí kapitole, je nyní potřeba nalézt takovou úroveň šumu, při níž jsou modemy ještě schopné projít inicializační fází. K tomuto účelu pak slouží tlačítko *Dopočítat*. Jeho stiskem je všem konfiguracím v listu přiřazena patřičná úroveň šumu, která bude použita při vlastní simulaci. Po zaškrtnutí položky *Zadat*, je možné tento parametr nastavit ručně.



Obr. 6.3: Informační okno o průběhu simulace

Před spuštěním simulace je možné prostřednictvím tlačítka *Výsledek alokace* zobrazit výsledky procesu bitové alokace (viz další text). Po spuštění simulace příslušným tlačítkem dojde k načtení výpočetního jádra modelu a jeho inicializaci. Současně se objeví okno s informacemi o průběhu simulace (viz Obr. 6.3). Mezi zobrazenými informacemi jsou údaje o právě probíhající dílčí simulaci (tj. číslo simulace, název konfigurace, injektovaný impuls a amplituda impulsu), době spuštění a uplynulém času. Běh simulace je možné přerušit opětovným stisknutím spouštěcího tlačítka, které nyní nese název *Přerušit simulaci*. V tomto případě je však nutné upozornit na to, že přerušením simulačního procesu dojde ke ztrátě případných dílčích výsledků simulace. Po úspěšném dokončení simulace se zobrazí okno s dosaženými výsledky. Obsah výsledkových oken obou testovacích úloh je popsán v bodu 6.4.

Měření odolnosti proti impulsnímu rušení

Druhá testovací úloha je zaměřena na měření odolnosti přenosového systému vůči impulsnímu rušení. Podstata této úlohy spočívá, podobně jako v předchozím případě, ve vkládání impulsního rušení do přenosového kanálu za přítomnosti šumu na pozadí.

Sledovaným parametrem je pak výsledná bitová chybovost BER na výstupu komunikačního řetězce, která je zaznamenána na konci každého testovacího časového intervalu.

Při označení dané testovací úlohy se v oblasti nastavení impulsního rušení objeví rozbalovací nabídka pro výběr typu rušícího impulsu. Pod ní je opět možné nastavit patřičný rozsah amplitud injektovaných impulsů a krok jejich postupného zvyšování. Zbytek parametrů na panelu *Nastavení přenosového kanálu* je shodný jako v případě první testovací úlohy.

S výběrem této úlohy se zpřístupní také možnost nastavení doby simulace, která určuje simulační čas věnovaný konkrétní testované konfiguraci při působení rušícího impulsu s danou amplitudou.

6.2.2 Zobrazení výsledků alokace

Okno zobrazující výsledky alokace je ukázáno v příloze C. Pro každou konfiguraci v listu je možné zobrazit celkem čtyři parametry vypočítané během alokačního procesu. Tyto parametry jsou následující:

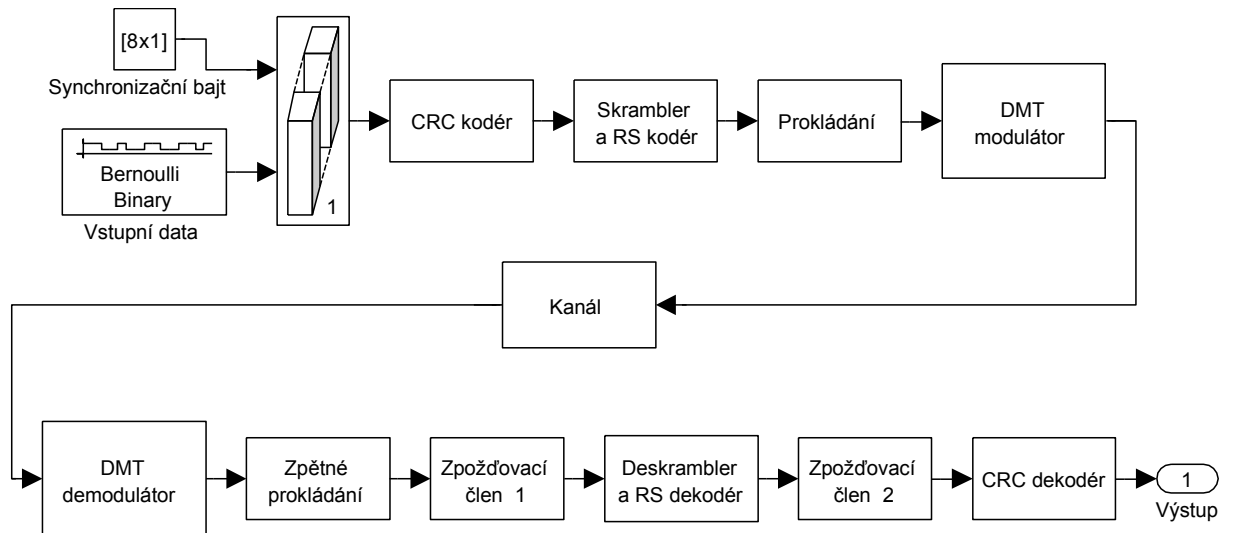
- bitová alokace - zobrazuje počet alokovaných bitů v jednotlivých kanálech
- spektrální výkonová hustota - zobrazuje rozložení výkonu v celém frekvenčním pásmu vysílaného signálu a celkový vysílací výkon
- skutečná šumová rezerva - zobrazuje skutečný odstup SNR v jednotlivých kanálech po procesu alokace
- SNR - ukazuje změřený odstup SNR v jednotlivých kanálech, který je použit při výpočtu alokace.

6.2.3 Výpočetní jádro modelu

Výpočetní jádro modelu je představováno dvěma simulačními schémata vytvořenými v programu Matlab Simulink. Byly vytvořeny modely prokládané a rychlé větve protichybového systému (soubory `adsl_sim_int.mdl` a `adsl_sim_fast.mdl`). Kompletní složení obou simulačních schémat je znázorněno v příloze A resp. B. Především z důvodu problémů s českou diakritikou v Simulinku, byly modely popsány v anglickém jazyce.

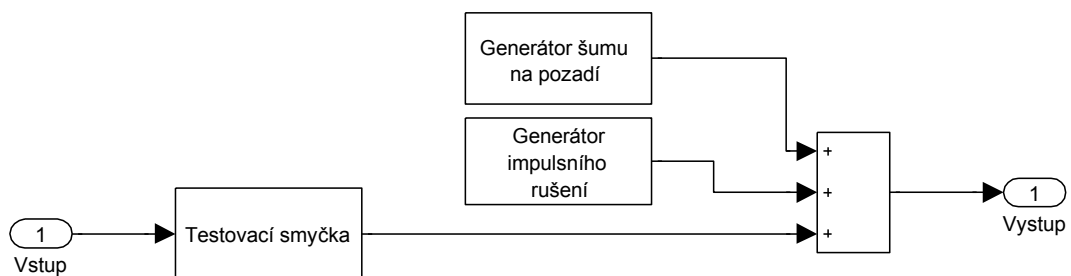
Model prokládané větve protichybového systému

Základní bloková struktura modelu prokládané větve je znázorněna na obrázku 6.4.



Obr. 6.4: Základní blokové schéma modelu prokládané větve protichybového systému

Vstupní data jsou generována Bernoulliho bitovým generátorem rychlostí 4000 rámců za vteřinu. Délka rámce je určena výše zmíněným násobkem n . Data jsou doplněna synchronizačním bajtem a následně přivedena na vstup CRC kodéru. Ten pro každých 68 rámců, tedy jeden multirámeček, dat vytvoří osmici paritních bitů, které vloží do synchronizačního bajtu. V následujícím bloku jsou data skramblována a zabezpečena RS kódem. Po bajtovém prokládání hloubky D je provedena DMT modulace. DMT modulátor obsahuje 256 QAMmodulátorů, blok pro výpočet inverzní diskretní Fourierovy transformace (IDFT) a několik pomocných bloků pro ošetření neobsazených nosných kanálů. Zde také došlo k odchylce ve frekvenčním odstupu jednotlivých nosných. Místo šířky pásma 4,3125 kHz na kanál, je v modelu použito dělení po 4 kHz. Příčinou je to, že QAM modulátor obsažený v Simulinku odvozuje nosnou frekvenci z frekvence vstupních dat (v tomto případě z frekvence datových rámců). Po DMT modulaci jsou vzniklé DMT symboly délky 512 vzorků vysílány na přenosový kanál. Jeho vnitřní struktura je zachycena na obrázku 6.5.

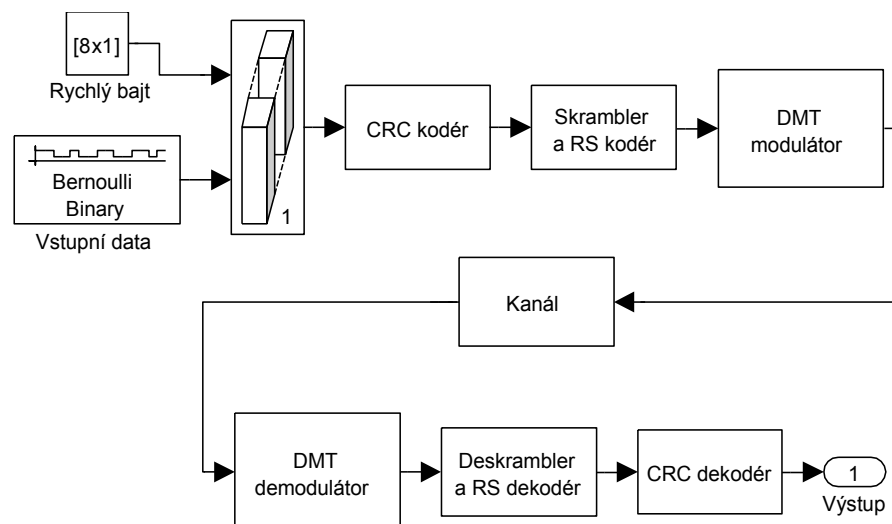


Obr. 6.5: Blokové schéma přenosového kanálu

Je třeba podotknout, že blok testovací smyčky simulujícího útlum vedení je ve vlastním modelu fyzicky realizován již v DMT modulátoru a to v místě, kde je signál vyjádřen ve frekvenční oblasti (tj. před blokem IDFT). Pro vyjádření odezvy přenosového vedení byla použita pouze jeho amplitudová přenosová charakteristika. Tímto zjednodušením odpadla nutnost tvorby dalších bloků, které by prováděly korekci fázového zkreslení a dále tak zvyšovaly výpočetní náročnost celého modelu. Při průchodu kanálem je k užitečnému signálu přičteno impulsní rušení a šum. Generátor impulsního rušení je zdrojem rušících impulsů definovaných v [2]. Jejich časové průběhy jsou znázorněny na obrázcích 5.2 a 5.3. Aby bylo možné tyto impulsy přímo injektovat do přenosového kanálu, bylo nutné je frekvenčně omezit a převzorkovat. Impulsy jsou spouštěny s náhodnou fází a zadanou minimální vzdáleností. Generátor šumu na pozadí vytváří bílý aditivní šum s Gaussovským rozložením a požadovanou úrovní. Na přijímací straně komunikačního řetězce jsou přijaté DMT symboly demodulovány a seskupeny zpět do datových rámců. Po operaci zpětného prokládání jsou data přivedena do bloku Zpoždovací člen 1. Ten se stará o zarovnání RS kódového slova, které může být vlivem proměnlivého počtu DMT symbolů na RS kódové slovo a proměnlivé hloubky prokládání mimo hranice svých celočíselných násobků. Po dekódovacím procesu RS kódu a deskramblování jsou data přivedena do bloku Zpoždovací člen 2, který zarovnává blok dat na celočíselné násobky multirámce a umožní tak správné dekódování CRC kódu. V CRC dekodéru je také odstraněn synchronizační bajt a na jeho výstupu jsou již jen přenesená data z Bernoulliho generátoru.

Model rychlé větve protichybového systému

Celé simulační zapojení modelu rychlé větve protichybového systému je znázorněno v příloze B. Na obrázku 6.6 je pak zachyceno pouze jeho zjednodušené principiální schéma.



Obr. 6.6: Základní blokové schéma modelu rychlé větve protichybového systému

Zapojení je velmi podobné jako v předchozím případě. Rozdíl oproti prokládané větvi pak spočívá v absenci prokládání a možnosti přenášet v RS kódovém slově pouze jeden DMT symbol. V komunikačním řetězci tak nedochází k posunu hranic datových bloků a není proto potřeba využívat zpožďovací členy pro jejich zarovnání. Význam a popis ostatních bloků je stejný jako v předchozím odstavci.

Vstupní a výstupní parametry obou modelů

Před spuštěním jádra modelu je hlavní aplikací vygenerována sada konfiguračních parametrů, které jsou zapsány do souboru a prostřednictvím pracovního prostoru Matlabu předány příslušnému modelu. Pro model prokládané větve je vygenerován konfigurační soubor `params_int.mat`. Pro model rychlé větve pak soubor `params_fast.mat`. Výpis jednotlivých předávaných parametrů společně s jejich významem je uveden v tabulce 6.1.

Tab. 6.1: Výpis vstupních parametrů výpočetního jádra modelu generovaných hlavní aplikací

Parametr*	Význam
B_i^1, B_f^2	Počet bajtů vstupních dat v rámci
R_i^1, R_f^2	Počet paritních bajtů RS kódu
S^1	Počet DMT symbolů na RS kódové slovo
Int_depth^1	Hloubka prokládání
Del_S^1	Hodnota zpoždění pro zarovnání RS kódového slova
Del_CRC^1	Hodnota zpoždění pro zarovnání multirámce
Del_Err	Hodnota zpoždění pro spuštění počítání BER přenesených dat
$EspNo$	Parametr pro nastavení úrovně šumu na pozadí
Imp_space	Minimální vzdálenost rušících impulsů
b	Vektor počtu alokovaných bitů v jednotlivých kanálech
$b1$	Upravená kopie b pro ošetření neobsazených kanálů
$channel_setup$	Maticе s rozsahy bitů rámce směrovaných do jednotlivých QAM modulátorů při DMT modulaci
$select$	Vektor pro výběr bitů pouze z obsazených QAM kanálů v DMT demodulátoru
QAM_power	Vektor maximálních vysílacích výkonů v jednotlivých QAM
h	Vektor amplitudové přenosové funkce testovací smyčky
$task1_enable$	Indikace provádění testovací úlohy 1; umožní přerušení simulace po 16ti injektovaných rušících impulsích
sim_t	Čas simulace

* horní index 1 ... parametr pouze pro model prokládané větve
 2 ... parametr pouze pro model rychlé větve

V průběhu simulace jsou na základě požadavku hlavní aplikace do pracovního prostoru Matlabu vypisovány základní informace o stavu modelu. V případě testovací úlohy určování pravděpodobnosti vzniku chybné vteřiny se jedná o údaje o počtu injektovaných impulsů (`imp_cnt`) a počtu způsobených chyb (`imp_err_cnt`). Při měření odolnosti vůči impulsnímu rušení je sledován uplynulý simulační čas (`tout`) a BER (`BER`).

6.2.4 Zobrazení simulovaných dat

Po úspěšném dokončení testovací úlohy se objeví příslušné okno s dosaženými výsledky. Výsledkové okno pro testovací úlohu určení pravděpodobnosti vzniku chybné sekundy je zobrazeno v příloze D. V horní části okna je seznam testovaných konfigurací. Označením řádku v seznamu dojde k výpisu naměřených výsledků do dvojice níže zobrazených tabulek. Každá tabulka obsahuje údaj o typu rušícího impulsu, amplitudě a počtu způsobených chyb. Cílem měření je nalézt amplitudu, která ze 16 injektovaných impulsů způsobí v 8 případech chybu. K její správné lokalizaci je většinou potřeba měření opakovat a postupně zužovat měřicí rozsah napětí vkládaných impulsů. Hledané hodnoty napětí obou impulsů je pak třeba dosadit do vztahu (5.13) a vypočítat výslednou pravděpodobnost vzniku chybné sekundy u dané konfigurace.

Měření odolnosti proti impulsnímu rušení je zakončeno zobrazením výsledkového okna uvedeného v příloze E. V horní části je opět uveden seznam testovaných konfigurací, který slouží pro výběr zobrazovaných výsledků. Pomocí kombinace tlačítka myši a kláves Ctrl nebo Shift je možné označit více položek seznamu a kliknutím na tlačítko *Zobrazit* vykreslit graf s výsledky. Na výběr jsou dva typy grafů – 2D graf se zobrazením závislosti chybovosti BER na amplitudě rušícího impulsu U_e nebo 3D graf závislosti chybovosti BER na amplitudě rušícího impulsu U_e a na hloubce prokládání D . Všechny výsledky konfigurací v seznamu lze uložit do souboru typu `.mat`. Obsahem souboru je pak struktura dat `SAVED_RESULTS`, která obsahuje základní údaje o konfiguracích a příslušné naměřené výsledky.

6.3 Popis programového řešení

Hlavní aplikace modelu protichybového systému je spouštěna v prostředí programu Matlab prostřednictvím souboru `adsl_ec.m`. Tento soubor vznikl současně s uživatelským prostředím (GUI) vytvořeném v editoru Matlab GUIDE a obsahuje obslužný kód volání prvků umístěných v GUI. Vizualní návrh GUI je uložen v souboru `adsl_ec.fig`. Nyní budou stručně popsány obslužné procedury hlavních funkčních tlačítek uživatelského rozhraní.

- Tlačítko *Potvrdit*

V úvodu je vytvořena datová struktura `CONFIG_DATA` do níž mají být uloženy údaje o nastavení vytvořené testované konfigurace. Po načtení dat z formuláře je, na základě zvolené datové cesty a požadované přenosové rychlosti, volána externí funkce `calc_red`, která slouží pro výpočet základních parametrů FEC. Následuje výpočet zpoždění pro jednotlivé bloky modelu a výpis vypočítaných parametrů FEC do formuláře. Všechny důležité údaje jsou postupně uloženy do struktury `CONFIG_DATA`.

- Tlačítko *Použít*

Jeho hlavním úkolem je postupně ukládat nastavení jednotlivých testovaných konfigurací v `CONFIG_DATA` do vícerozměrného pole `CONFIGDATA_store`. Každé nové konfiguraci je přiřazeno jméno a je přidána do seznamu testovaných konfigurací.

- Tlačítko *Dopočítat*

Nejprve je provedena kontrola zda existuje neprázdné pole s konfiguracemi `CONFIGDATA_store`. Pokud ano, je z formuláře načtena hodnota šumové rezervy a podle zvoleného typu testovací smyčky také délka vedení. Tyto údaje jsou uloženy do globální pracovní datové struktury `SIMDATA` a je zavolána funkce `noiselevel_calc`, která pro každou konfiguraci v `CONFIGDATA_store` hledá takovou úroveň šumu na pozadí, při níž je možné provést alokaci a zároveň dodržet požadovanou přenosovou rychlost. Tato funkce ve svém průběhu využívá tři externí funkce. První je funkce `loop`, která ze zadané délky vedení vypočítá vektor vložného útlumu pro jednotlivé nosné. Argumentem druhé funkce `PSD_calc` je hodnota úrovně šumu na pozadí. Její návratovou hodnotou je vektor s hodnotami šumu v jednotlivých nosných. Hodnoty z předchozích dvou funkcí tvoří dva z devíti vstupních parametrů třetí funkce `a_btlo_p1`, která představuje algoritmus bitové alokace s optimalizací pro ploché vysílací spektrum. Procedura tlačítka je ukončena nastavením příznaku, který informuje o úspěšném výpočtu hledané úrovně šumu.

- Tlačítko *Výsledky alokace*

Na začátku procedury je provedena kontrola existence neprázdného pole konfigurací `CONFIGDATA_store`. Následuje ověření příznaku o proběhlém výpočtu úrovně šumu na pozadí. Pokud jsou uvedené podmínky splněny je do pracovního pole `SIMDATA` uložena hodnota šumové rezervy a v případě volby testovací smyčky #2 také délka vedení. Nyní je provedena kontrola stavu zaškrťovacího pole *Zadat*. Pokud je pole

¹ Tato funkce byla poskytnuta vedoucím diplomové práce.

zaškrtnuto, dojde k načtení hodnoty úrovně šumu z formuláře, která je následně přiřazena všem testovaným konfiguracím v poli `CONFIGDATA_store`. Na závěr je voláním funkce `allocation_calc` pro každou testovanou konfiguraci vypočtena sada alokačních parametrů a je zobrazeno okno s výsledky alokace. Při vykonávání funkce `allocation_calc` jsou opět využity výše popsané externí funkce `loop`, `PSD_calc` a `a_btlo_p`.

- Tlačítko *Spustit simulaci*

Z důvodu větší komplexnosti procedury pro obsluhu volání tlačítka *Spustit simulaci*, byl její popis zaznamenán ve formě vývojového diagramu v příloze F.

7 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY SIMULACE

Pomocí navrženého modelu byl simulován přenos pro tři zvolené přenosové rychlosti (6144, 4096 a 2048 kb/s). Konkrétní testovaná nastavení protichybového systému jsou uvedeny v tabulce 7.1.

Tab. 7.1: Nastavení parametrů protichybového systému použitých pro simulaci

Rychlost [kb/s]	n [-]	K [bajtů]	N [bajtů]	S [-]	D [-]
6144	192	193	209	1	1, 2, 4, 8, 16, 32
4096	128	129	145	1	1, 2, 4, 8, 16, 32
2048	64	130	144	2	1, 2, 4, 8, 16, 32

7.1 Měření pravděpodobnosti vzniku chybné sekundy

Výsledky měření pravděpodobnosti vzniku chybné sekundy pro jednotlivá nastavení protichybového systému (viz Tab. 7.1) jsou uvedeny v tabulce 7.2.

Tab. 7.2: Naměřené a vypočítané hodnoty při určení pravděpodobnosti chybné sekundy pro tři různé přenosové rychlosti

Rychlost 6144 kb/s ($n = 192, S = 1$)					
D	u_{e1} [mV]	u_{e2} [mV]	$P(u > u_{e1})$	$P(u > u_{e2})$	E [%]
1	8,0	2,2	0,390625	-	-
2	14,1	2,5	0,125748	-	-
4	20,0	3,1	0,062500	-	-
8	28,5	4,0	0,030778	-	-
16	48,3	6,0	0,012939	0,694444	1,449
32	>400	132	<1,562e-3	4,73e-03	<0,0104
Rychlost 4096 kb/s ($n = 128, S = 1$)					
D	u_{e1} [mV]	u_{e2} [mV]	$P(u > u_{e1})$	$P(u > u_{e2})$	E [%]
1	44,5	4,8	0,014044	-	-
2	51,0	5,9	0,012255	0,718184	1,498
4	62,0	7,4	0,010080	0,456537	0,953
8	84,4	10,3	7,405e-3	0,235648	0,493
16	130,0	16,4	4,807e-3	0,092950	0,195
32	>400	>400	<1,562e-3	<1,562e-3	<3,827e-3
Rychlost 2048 kb/s ($n = 64, S = 2$)					
D	u_{e1} [mV]	u_{e2} [mV]	$P(u > u_{e1})$	$P(u > u_{e2})$	E [%]
1	187,1	17,0	3,340e-3	0,086505	0,181
2	188,9	17,1	3,308e-3	0,085496	0,179
4	231,6	19,8	2,698e-3	0,063769	0,134
8	306,0	29,0	2,042e-3	0,029726	0,063
16	395,0	40,3	1,582e-3	0,015393	0,033
32	>400	>400	<1,562e-3	<1,562e-3	<3,827e-3

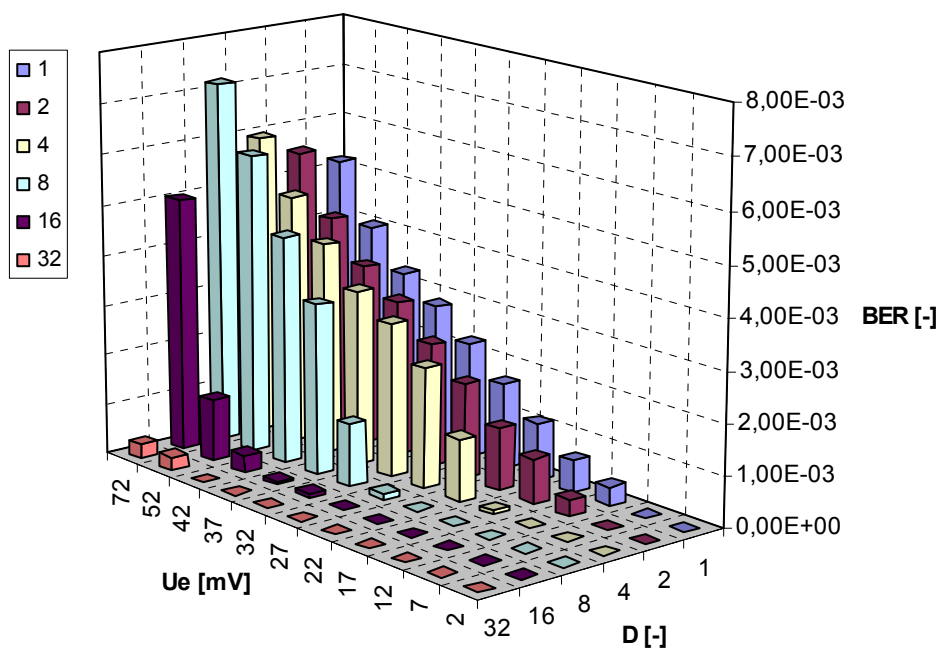
Při tomto měření byla hledána amplituda rušícího impulsu 1 (u_{e1}) a impulsu 2 (u_{e2}), která v přenosu způsobí v polovině případů chybu. Pro každou konfiguraci bylo nejprve provedeno hrubé měření, při němž byla zjištěna přibližná hodnota hledané amplitudy. Dalším zužováním měřeného intervalu byla nalezena její hodnota s přesností na desetinu mV. Ze zjištěných amplitud pak byla dosazením do vztahů (5.14), (5.15) a (5.13) vypočítána výsledná pravděpodobnost vzniku chybné sekundy E . Pomlčka v některých buňkách tabulky značí, že hodnota nalezené amplitudy je mimo definiční obor vztahu (5.14) a tedy i vztahu (5.13). Pokud poloha hledané amplitudy leží za hranicí 400 mV je označena patřičným znaménkem a dané dílčí měření je ukončeno. Minimální časový interval jedné vteřiny mezi vkládanými impulsy byl, především z důvodu časové náročnosti výpočtu, zkrácen na 17 ms. Měření bylo prováděno pro testovací smyčku #2 s délkou 3,4 km a šumovou rezervu 6 dB.

Z naměřených výsledků v tabulce 7.2 je patrné, že s rostoucí hloubkou prokládání D se odolnost systému proti impulsnímu rušení zvyšuje. Prokládáním je shluk chyb rozkládán do více kódových slov RS kódu a je tak zvyšována pravděpodobnost jeho úspěšné korekce. Pokud porovnáme hodnoty pravděpodobnosti E při daných hloubkách prokládání napříč nastavenými přenosovými rychlostmi, můžeme konstatovat, že se snižující se rychlostí klesá také pravděpodobnost vzniku chyby. Je to dáno především tím, že nižší přenosové rychlosti využívají užší přenosové frekvenční pásmo, které je tvořeno níže položenými nosnými kanály. U těchto kanálů pak vlivem přenosové charakteristiky vedení dochází k menšímu útlumu a přenášený signál je odolnější vůči působení rušení. Zúžením přenosového pásma je také zúženo frekvenční pásmo vlivu rušení. Mezní hodnota $E = 0,14 \%$ definovaná v [2] byla pro přenosové rychlosti 6144 kb/s a 4096 kb/s splněna až při hloubce prokládání $D = 32$. V případě rychlosti 2048 kb/s je tato podmínka splněna již při hloubce prokládání $D = 4$.

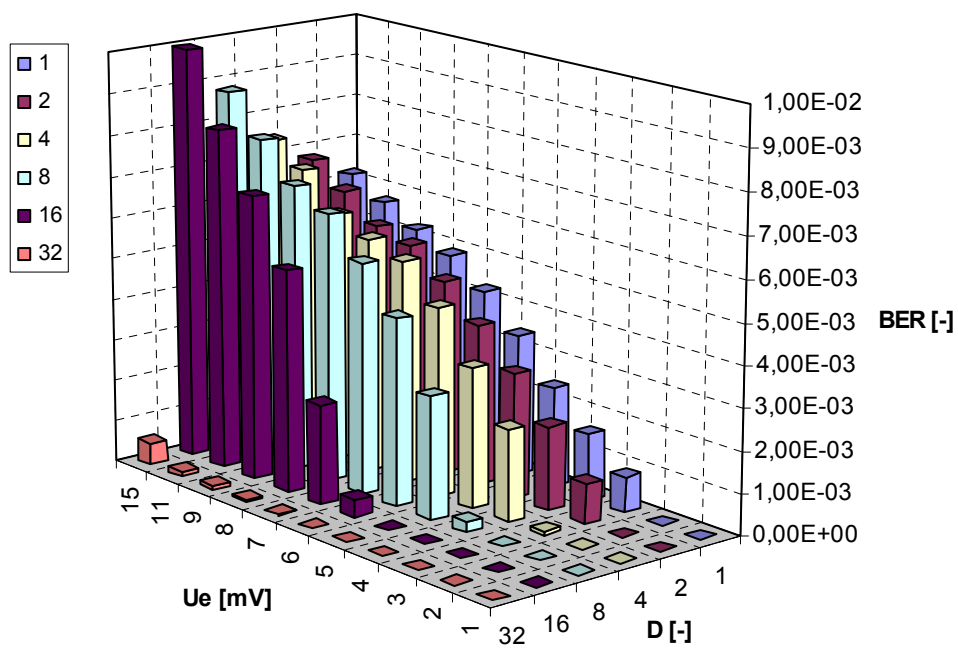
7.2 Měření odolnosti proti impulsnímu rušení

Účelem tohoto měření bylo nalézt pro jednotlivé konfigurace v tabulce 7.1 závislost chybovosti na amplitudě rušícího impulsu a na hloubce prokládání. Každá konfigurace byla testována oběma typy impulsů po dobu třech simulačních sekund. Minimální doba mezi výskyty impulsů byla nastavena na 17 ms. Přenosové vedení bylo realizováno testovací smyčkou #2 o délce 3,4 km. Proces bitové alokace počítal s šumovou rezervou 6 dB.

Kompletní výsledky testování odolnosti systému proti působení impulsního rušení jsou uvedeny ve formě grafů a příslušných tabulek s hodnotami v přílohách G.1 až G.6. Na obrázku 7.1 jsou pak pro ilustraci znázorněny grafy s výsledky testování protichybového systému při rychlosti 6144 kb/s.



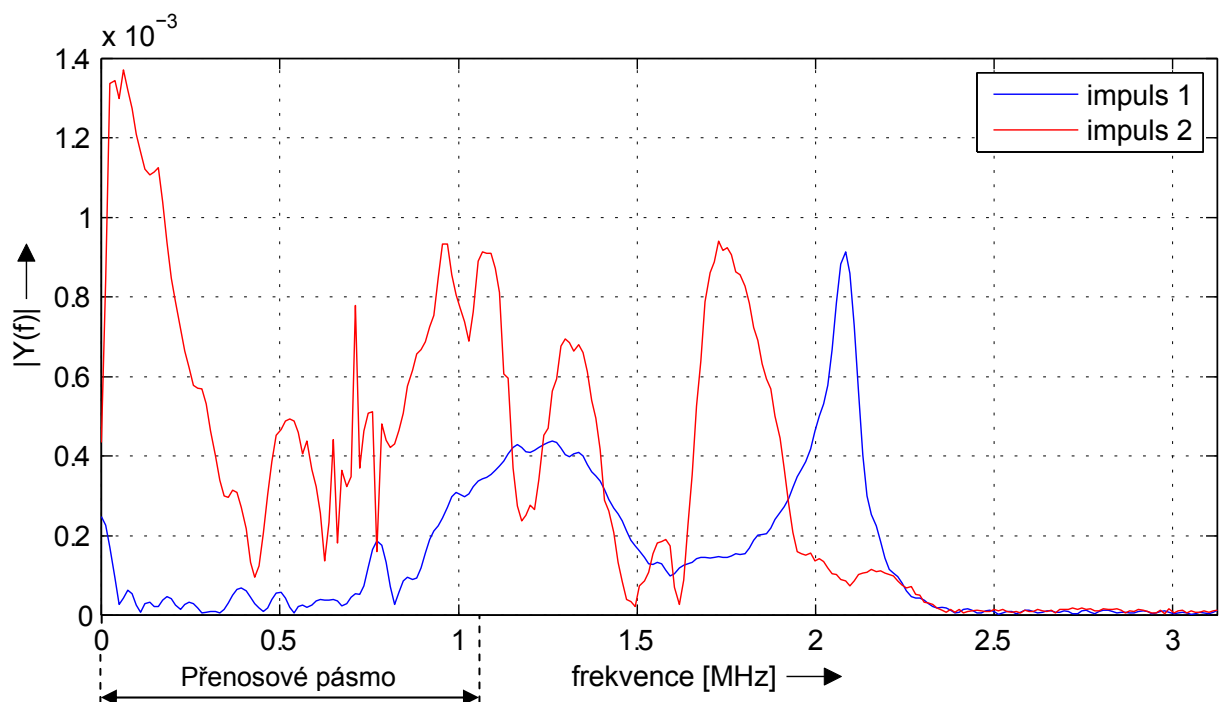
a)



b)

Obr. 7.1: Závislost chybovosti na úrovni amplitudy rušícího impulsu a na hloubce prokládání pro přenosovou rychlost 6144 kb/s při působení a) impulsu 1 b) impulsu 2

Z grafů je patrné, že s rostoucí hloubkou prokládání se snižuje rozsah měřených amplitud, při kterých dojde k chybám v přenosu. U každé hloubky prokládání lze nalézt mezní hodnotu amplitudy, při jejímž překročení začne chybovost nabývat nenulových hodnot. Vlivem rostoucí amplitudy impulsu dochází k prodlužování délky shluku chyb, který má být opraven. Předpokladem pro jeho úplnou korekci je pak dostatečně velký parametr hloubky prokládání, který shluk rozloží do patřičného počtu RS kódových slov. Při dalším zvyšování amplitudy je pak patrný strmý nárůst chybovosti. Z grafů je také vidět, že impuls 1 při stejném nastavení parametrů systému způsobuje chyby v přenosu až při výrazně vyšších amplitudách, než je tomu u impulsu 2. Příčinou je odlišné spektrální složení obou impulsů (viz Obr. 7.2). Spektrální složky impulsu 2 dosahují v přenosovém pásmu vyšších hodnot než v případě impulsu 1. Podobně jako v předchozí testovací úloze, můžeme i zde konstatovat, že s klesající přenosovou rychlostí se, v souvislosti s úrovní impulsního rušení, zmenšuje náchylnost systému ke vzniku přenosových chyb. Důvodem je výše zmíněný fakt, že při nižších rychlostech jsou data alokována do nižších poloh přenosového spektra, kde dochází k menšímu útlumu přenosového vedení.



Obr. 7.2: Amplitudové spektrum rušících impulsů

8 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo vytvořit model protichybového systému použitého v ADSL modemech, který bude schopen ověřit svá jednotlivá nastavení pomocí testovací metody specifikované v doporučení G.996.1.

V kapitolách 1 až 3 byly nejprve popsány základní funkční charakteristiky systému ADSL. Pozornost byla věnována především aspektům ovlivňujícím činnost a nastavení protichybového systému. Dále byly podrobně popsány teoretické základy jednotlivých technik protichybového zabezpečení dat použitých v ADSL (viz kapitola 4). Kapitola 5 pak byla věnována popisu metodiky testování odolnosti DSL systémů vůči účinkům impulsního rušení.

Praktická část diplomové práce je popsána v kapitole 6 a 7. Model protichybového systému byl realizován v programovém prostředí Matlab. Program se skládá ze dvou základních částí – hlavní aplikace a výpočetního jádra modelu. Hlavní aplikace zajišťuje řízení simulace, interakci s uživatelem a sběr simulačních dat. Vlastní výpočetní jádro modelu je představováno dvěma simulačními schémata, která byla vytvořena v Matlab Simulink. Vznikl tak model prokládané a rychlé větve protichybového systému ADSL. V modelu je simulován zabezpečovací proces, DMT modulace a přenosový kanál s impulsním rušením a šumem na pozadí. V souladu se zadáním diplomové práce byla do modelu dále implementována testovací metoda vycházející z doporučení G.996.1, která umožňuje klasifikovat ADSL přenosový systém z hlediska odolnosti vůči působení impulsního rušení.

Pomocí navrženého modelu bylo pro vybraná nastavení protichybového systému provedeno měření pravděpodobnosti vzniku chybné sekundy a také měření zaměřené na vyhodnocení vlivu různých nastavení hloubky prokládání na výslednou chybovost přenosu. Naměřené výsledky jsou uvedeny a diskutovány v kapitole 7. Lze říci, že naměřené hodnoty odpovídají teoretickým předpokladům. Bylo dokázáno, že s rostoucí hloubkou prokládání se zvyšuje také odolnost přenosového systému proti vlivům impulsního rušení. Negativním projevem rostoucí hloubky prokládání pak je zvyšující se přenosové zpoždění, které může být pro některé aplikace neakceptovatelné.

Jistou nevýhodou vytvořeného modelu je jeho výpočetní náročnost. Jen pro představu, simulace třech vteřin přenosu trvala (při CPU Intel Pentium E5200@2,5GHz) přibližně 7,5 minuty. Při testování konkrétní přenosové rychlosti, 11-ti hodnot amplitud daného testovacího impulsu a šesti hloubek prokládání pak doba výpočtu činila více než 8 hodin.

LITERATURA A POUŽITÉ ZDROJE

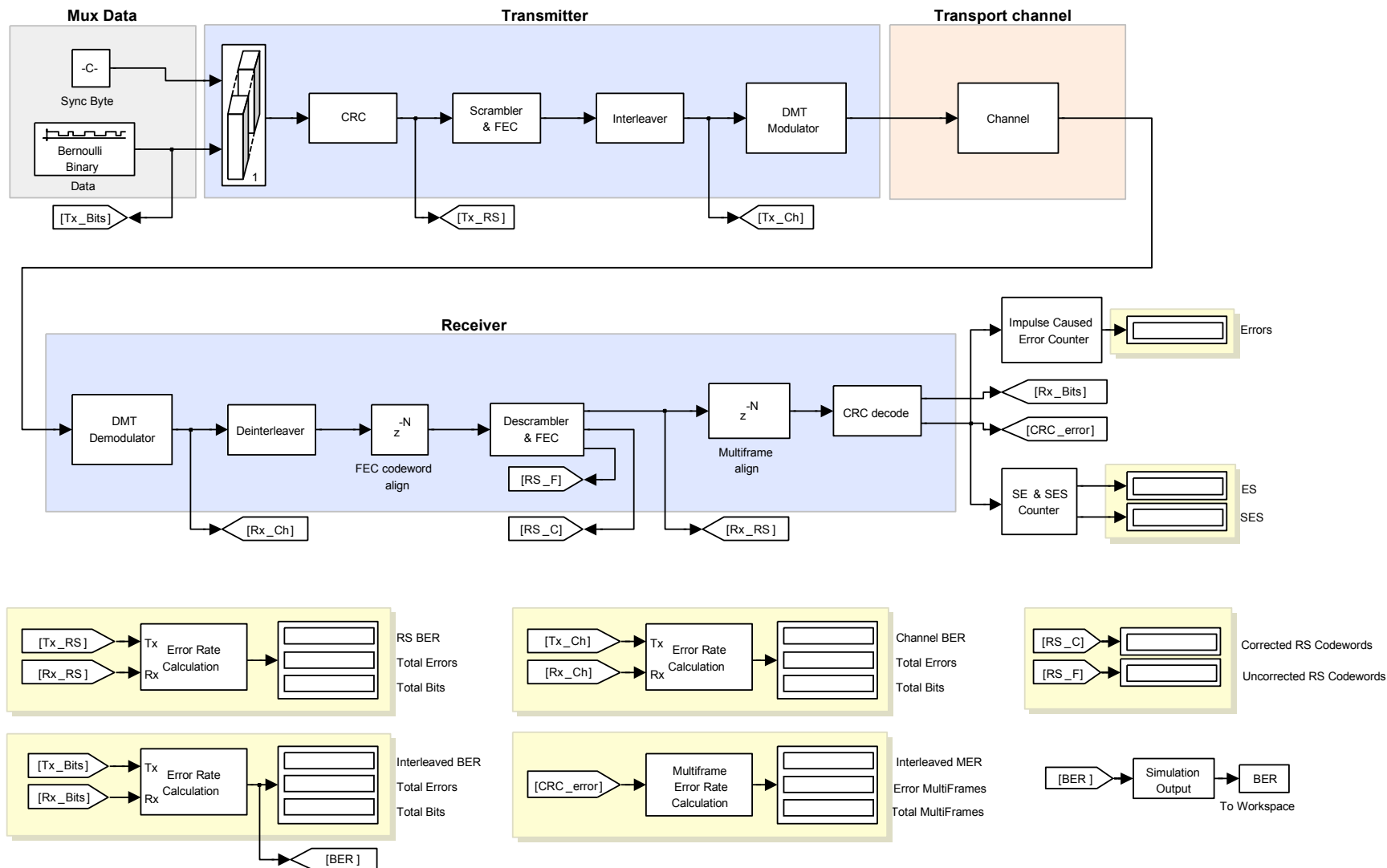
- [1] *Asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers* : ITU-T Recommendation G.992.1., 1999. 255 s.
- [2] *Test procedures for digital subscriber line (DSL) transceivers* : ITU-T Recommendation G.996.1., 02/2001. 78 s.
- [3] CHEN, W. Y. *DSL Simulation Techniques Development and Standards for Digital Subscriber Line Systems*. Macmillan Technical Publishing, Indianapolis, Indiana, 1998. 400s. ISBN 1-57870-017-5.
- [4] ŠIMÁK, B., VODRÁŽKA, J., SVOBODA, J. *Digitální účastnické přípoje xDSL : Díl 1. - Metody přenosu, popis přípojek HDSL, SHDSL, ADSL, VDSL*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 2005. 142 s. ISBN 80-86645-07-X.
- [5] WICKER, S.B., BHARGAVA, V.K. *Reed-Solomon Codes and Their Applications*. IEEE Press, 1994. 322s. ISBN 0-7803-5391-9.
- [6] HANZO, L., LIEW, T. H., YEAP, B. L. *The Coding, Turbo Equalisation and Space-Time Coding for transmission over fading channels*. John Wiley & Sons Ltd., 2004. 748s. ISBN: 0-470-84726-3
- [7] HOUGHTON, A. *Error Coding For Engineers*. Kluwer Academic Publishers, 2001. 246 s. ISBN 0-7923-7522-X.
- [8] ŠILHAVÝ, P. *Modulace DMT* [online]. 2001.
Dostupný z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01006/index.html>>.
- [9] ŠILHAVÝ, P. *Model telekomunikační přístupové sítě v programu Matlab-Simulink pro xDSL aplikace* [online]. 2002.
Dostupný z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02007/index.html>>.

SEZNAM PŘÍLOH

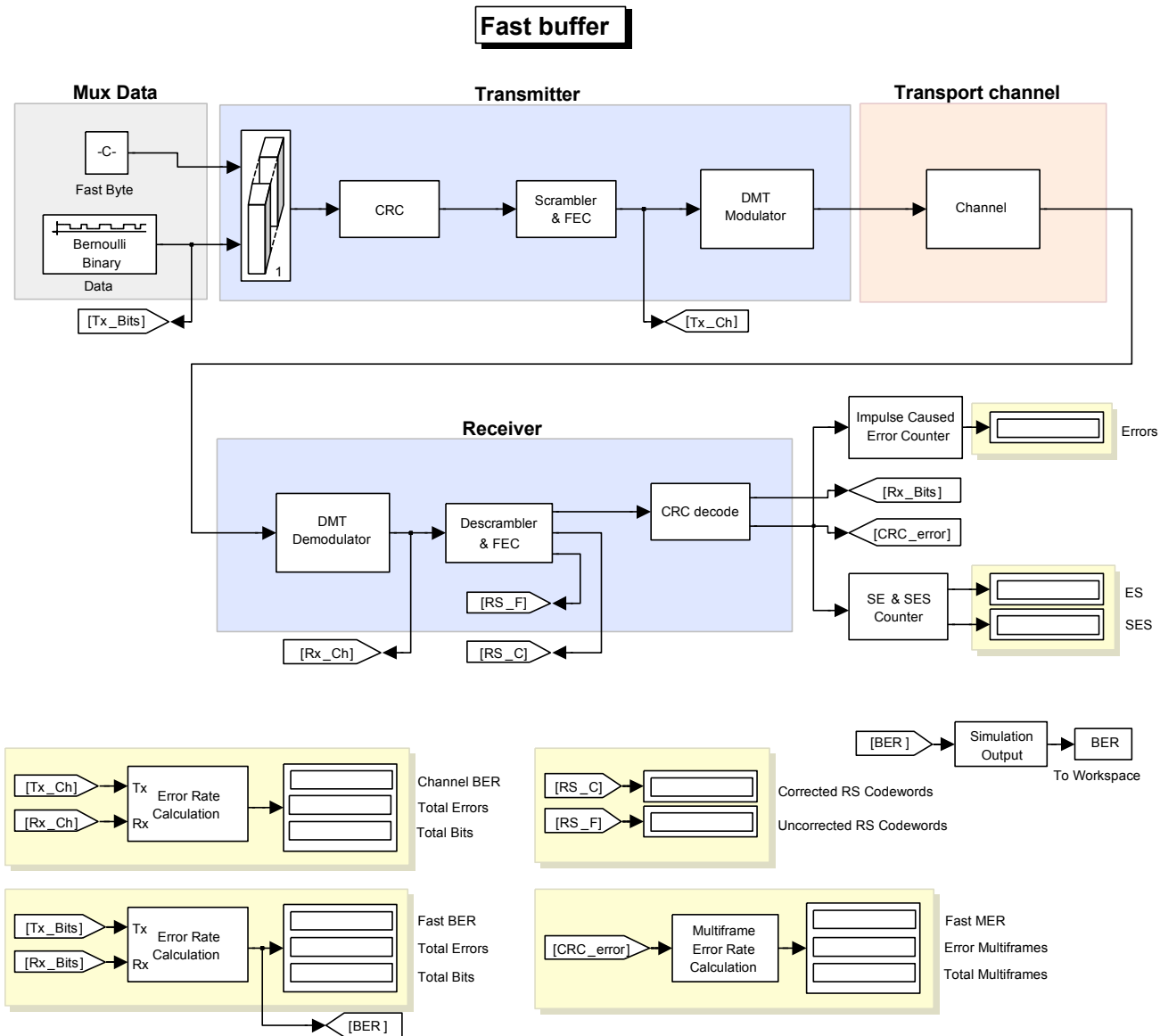
Příloha A: Kompletní simulační schéma modelu prokládané větve protichybového systému.	61
Příloha B: Kompletní simulační schéma modelu rychlé větve protichybového systému.	62
Příloha C: Okno se zobrazením výsledků alokace.	63
Příloha D: Okno se zobrazením výsledků testovací úlohy 1	64
Příloha E: Okno se zobrazením výsledků testovací úlohy 2.	65
Příloha F: Vývojový diagram procedury obsluhy tlačítka <i>Spustit simulaci</i>	66
Příloha G: Výsledky měření odolnosti systému vůči impulsnímu rušení	
G.1: Grafy s výsledky pro přenosovou rychlost 6144 kb/s	67
G.2: Grafy s výsledky pro přenosovou rychlost 4096 kb/s.	68
G.3: Grafy s výsledky pro přenosovou rychlost 2048 kb/s.	69
G.4: Tabulka hodnot pro přenosovou rychlost 6144 kb/s.	70
G.5: Tabulka hodnot pro přenosovou rychlost 4096 kb/s.	71
G.6: Tabulka hodnot pro přenosovou rychlost 2048 kb/s.	72

Příloha A: Kompletní simulační schéma modelu prokládané větve protichybového systému

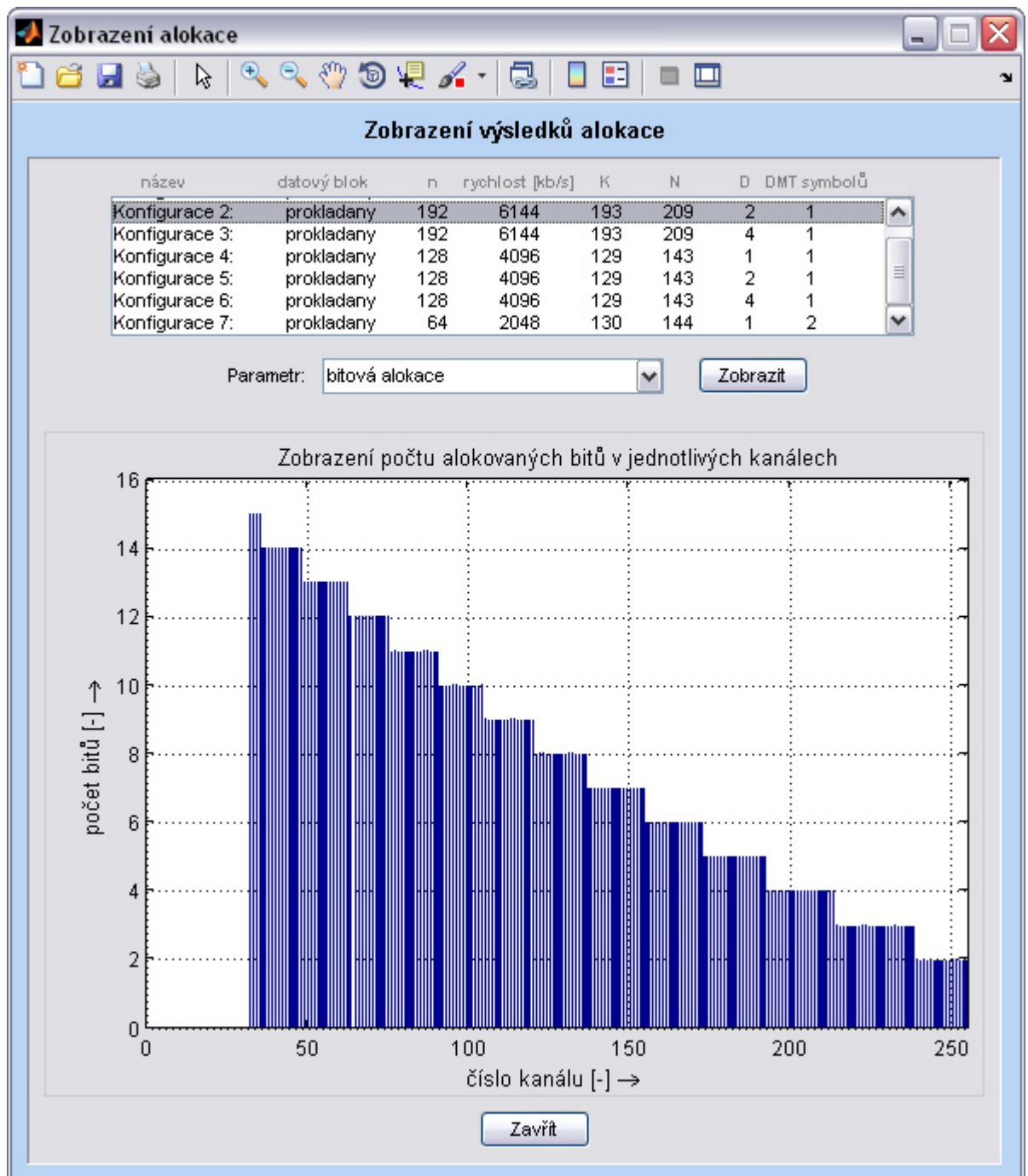
Interleaved buffer



Příloha B: Kompletní simulační schéma modelu rychlé větve protichybového systému



Příloha C: Okno se zobrazením výsledků alokace



Příloha D: Okno se zobrazením výsledků testovací úlohy 1

Zobrazení výsledků

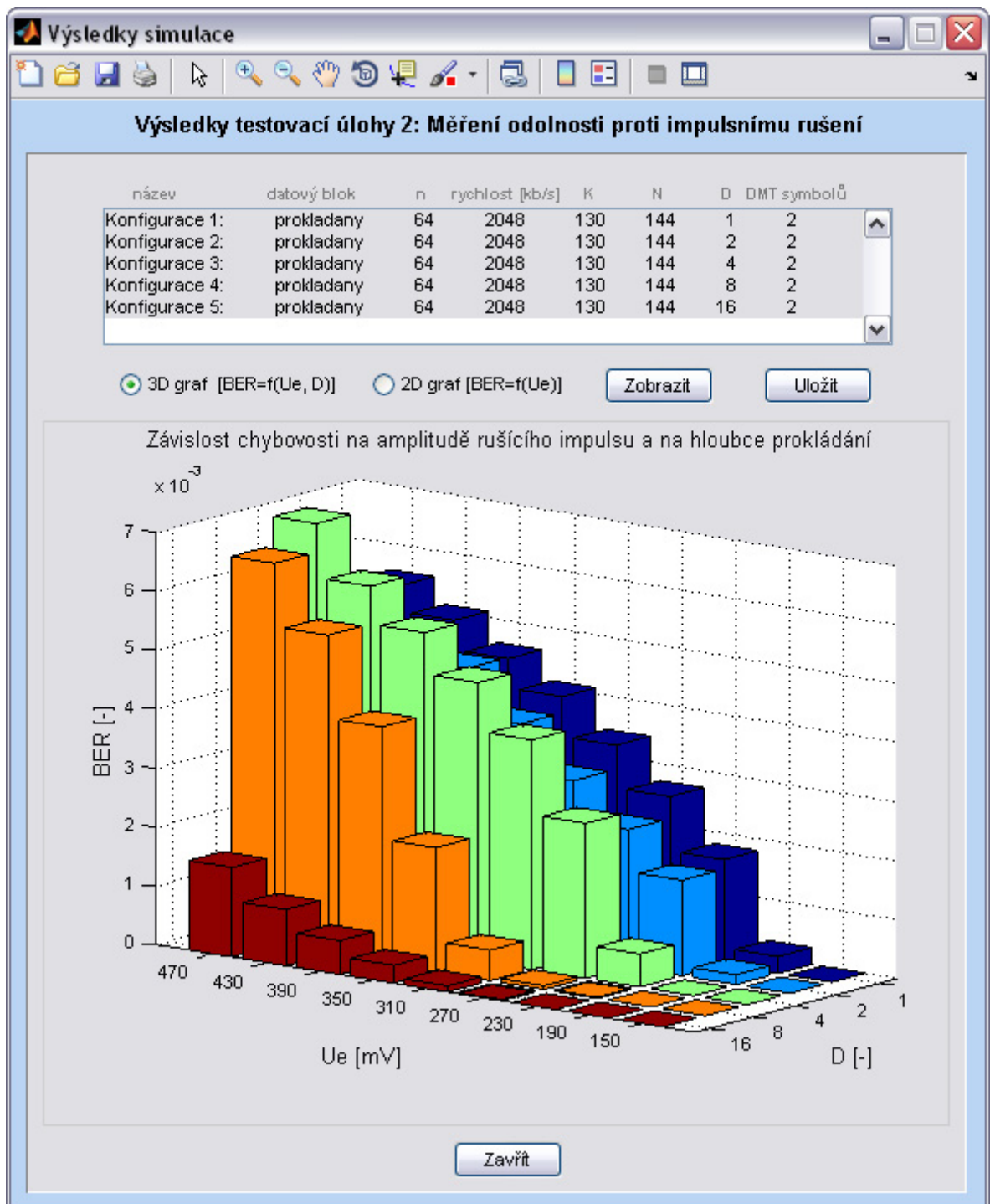
Výsledky testovací úlohy 1: Určení pravděpodobnosti chybné sekundy

název	buffer	n	rychlost [kb/s]	K	N	D	DMT symbolů
Konfigurace 1:	prokladany	192	6144	193	209	2	1
Konfigurace 2:	prokladany	192	6144	193	209	4	1
Konfigurace 3:	prokladany	192	6144	193	209	8	1
Konfigurace 4:	prokladany	192	6144	193	209	16	1
Konfigurace 5:	prokladany	128	4096	129	143	2	1
Konfigurace 6:	prokladany	128	4096	129	143	4	1

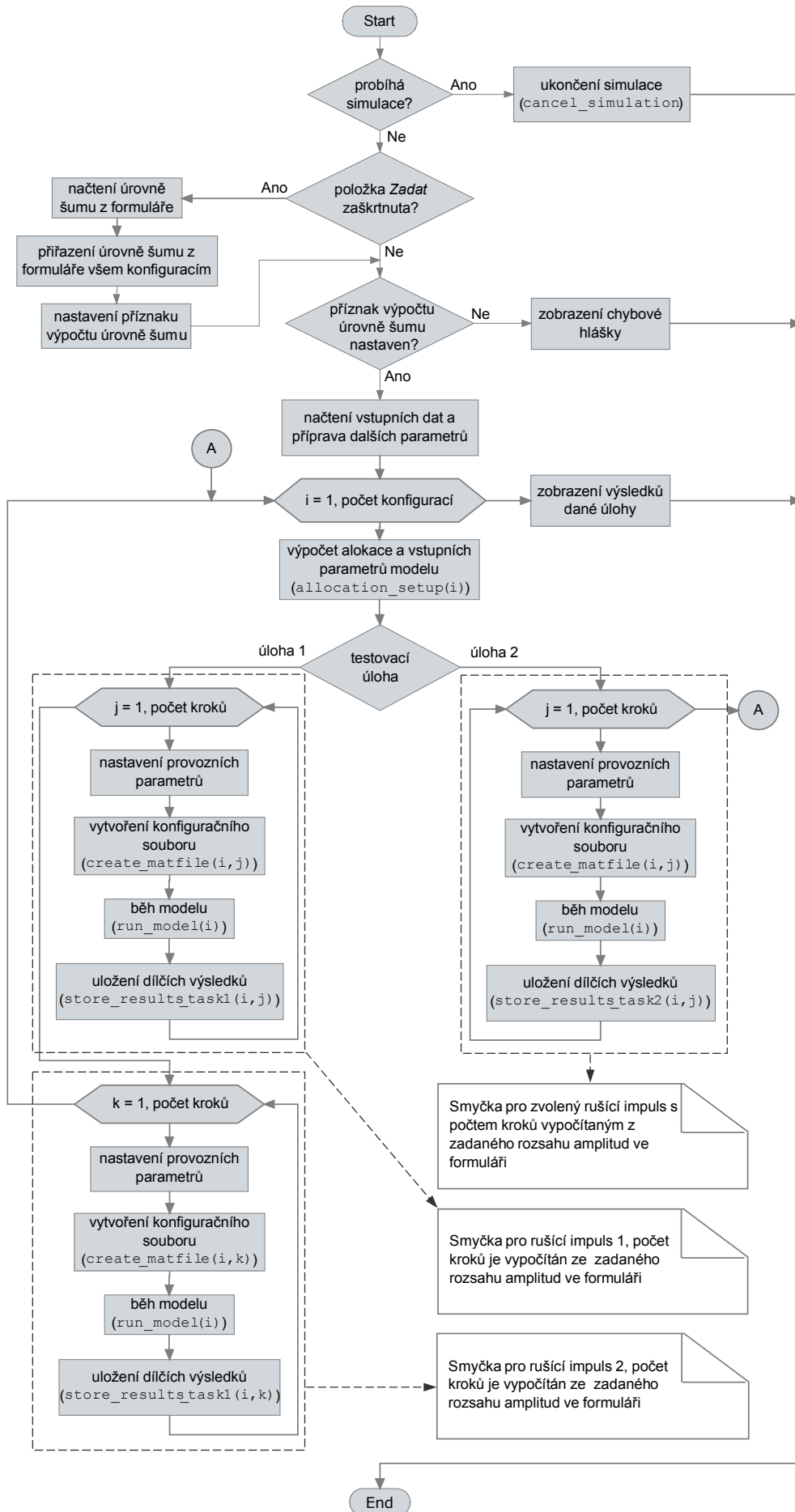
Impuls 1	1	2	3	4	5
Ue [mV]	13	16	19	22	25
Počet chyb	5	9	15	16	16

Impuls 2	1	2	3	4	5
Ue [mV]	2	3	4	5	6
Počet chyb	0	16	16	16	16

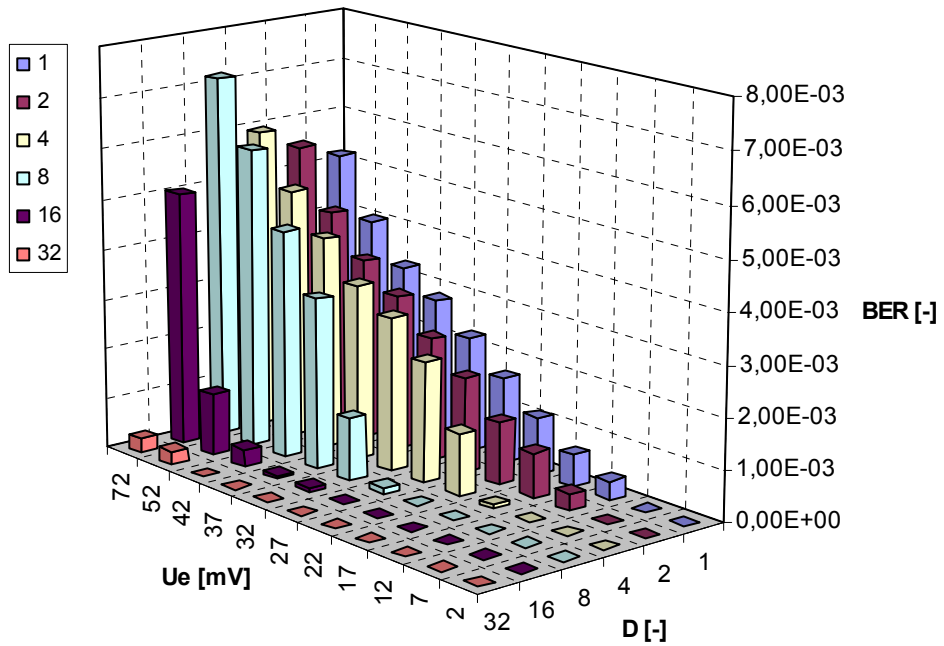
Příloha E: Okno se zobrazením výsledků testovací úlohy 2



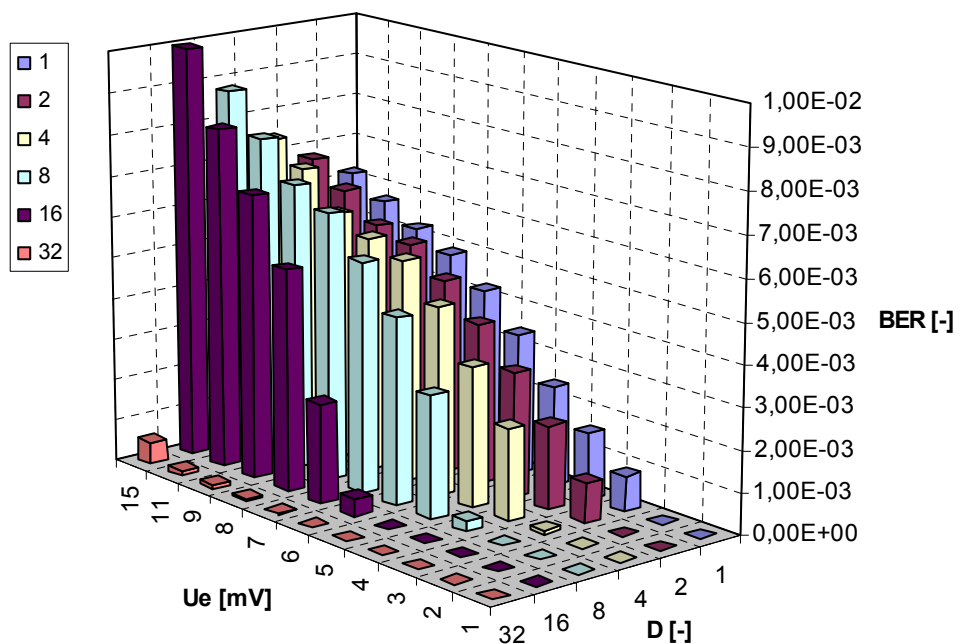
Příloha F: Vývojový diagram procedury obsluhy tlačítka *Spustit simulaci*



Příloha G.1: Grafy s výsledky pro přenosovou rychlost 6144 kb/s



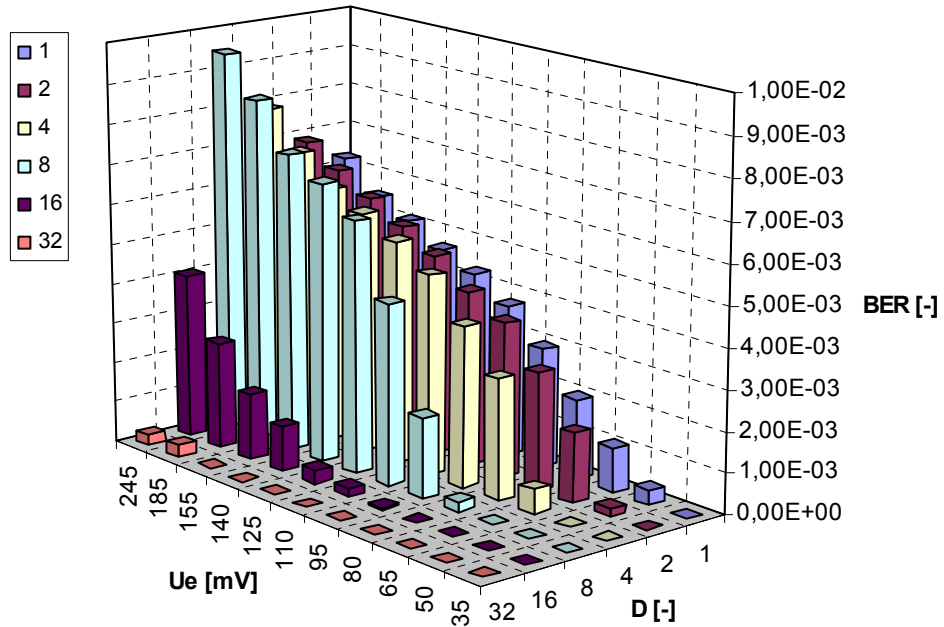
a)



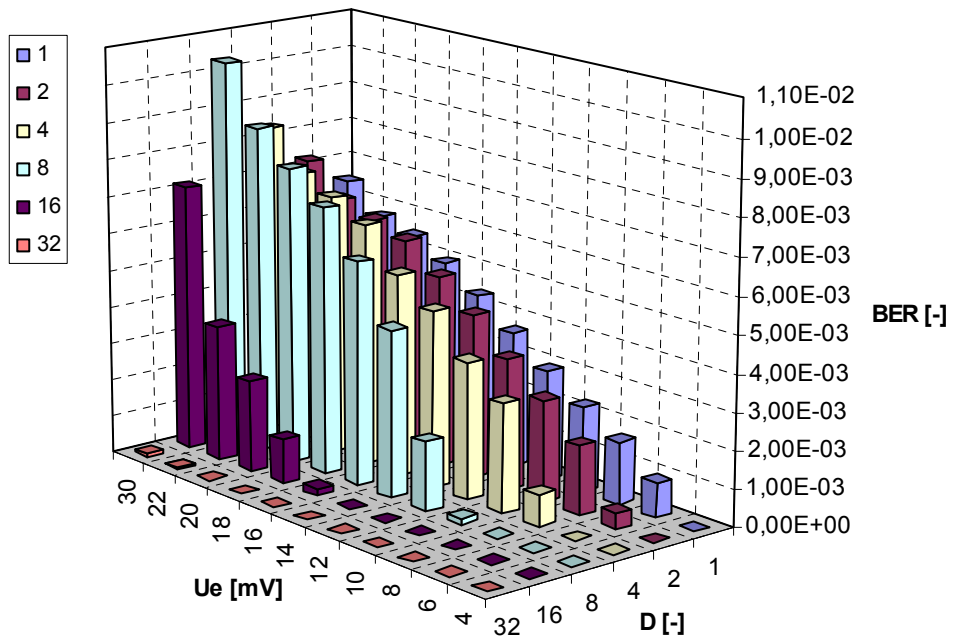
b)

Obr. G.1: Závislost chybovosti BER na úrovni amplitudy U_e a na hloubce prokládání D pro přenosovou rychlost 6144 kb/s při působení a) impulsu 1 b) impulsu 2

Příloha G.2: Grafy s výsledky pro přenosovou rychlost 4096 kb/s



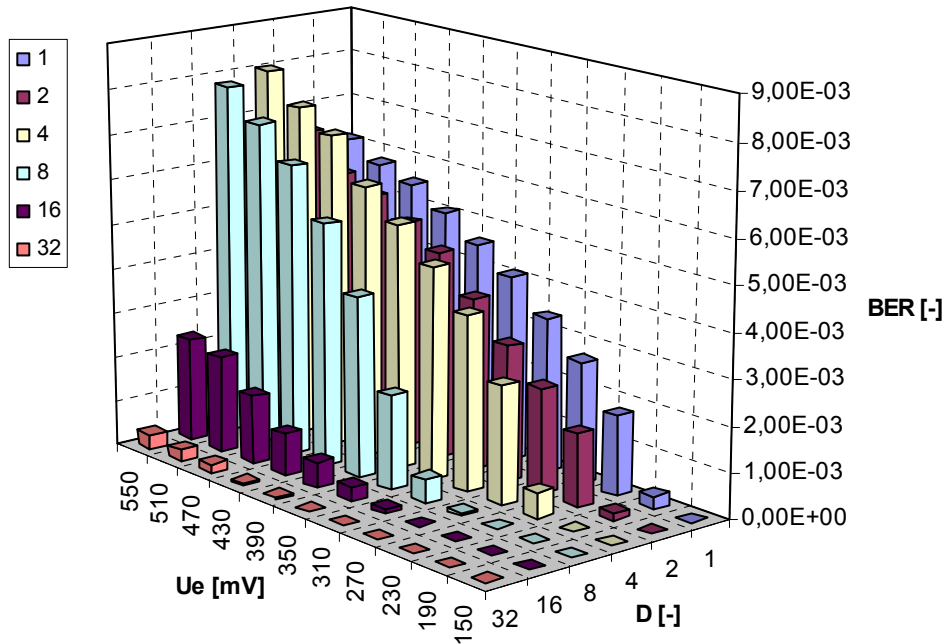
a)



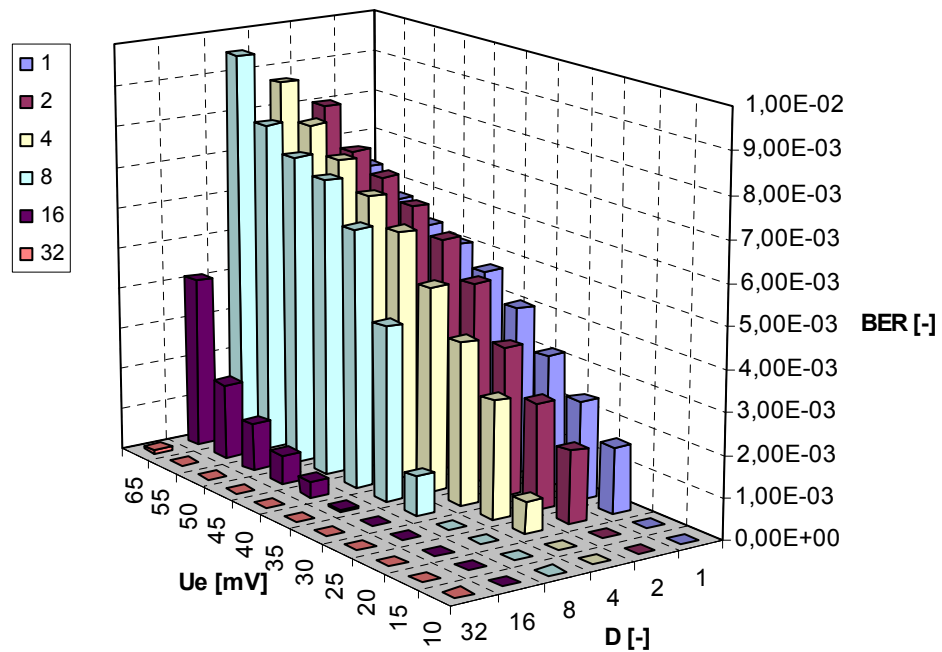
b)

Obr. G.2: Závislost chybovosti BER na úrovni amplitudy U_e a na hloubce prokládání D pro přenosovou rychlost 4096 kb/s při působení a) impulsu 1 b) impulsu 2

Příloha G.3: Grafy s výsledky pro přenosovou rychlost 2048 kb/s



a)



b)

Obr. G.3: Závislost chybovosti BER na úrovni amplitudy U_e a na hloubce prokládání D pro přenosovou rychlost 2048 kb/s při působení a) impulsu 1 b) impulsu 2

Příloha G.4: Tabulka hodnot pro přenosovou rychlost 6144 kb/s

Tab. G.4: Naměřené hodnoty závislosti chybovosti BER na úrovni amplitudy U_e a na hloubce prokládání D pro přenosovou rychlost 6144 kb/s

Rušící impuls 1						
U_e [mV]	BER [-]					
	D [-]					
	1	2	4	8	16	32
2	0	0	0	0	0	0
7	2,79E-06	0	0	0	0	0
12	0,000363	0,000328	0	0	0	0
17	0,000634	0,000876	7,02E-05	0	0	0
22	0,001132	0,00124	0,001224	2,26E-05	0	0
27	0,001687	0,001879	0,002388	0,000111	3,26E-06	0
32	0,002272	0,002444	0,003048	0,001243	7,27E-05	0
37	0,002819	0,003076	0,003472	0,00338	6,50E-05	0
42	0,003294	0,003599	0,004205	0,004513	0,000338	0
52	0,004027	0,004365	0,004963	0,005923	0,001208	0,000252
72	0,005193	0,005516	0,005953	0,007169	0,005018	0,000275
Rušící impuls 2						
U_e [mV]	BER [-]					
	D [-]					
	1	2	4	8	16	32
1	0	0	0	0	0	0
2	1,87E-05	0	0	0	0	0
3	0,000864	0,000953	8,98E-05	0	0	0
4	0,001595	0,00202	0,002207	0,000261	0	0
5	0,002414	0,003023	0,003397	0,002951	2,59E-06	0
6	0,003432	0,00392	0,004541	0,004518	0,00042	0
7	0,004254	0,004705	0,005424	0,00559	0,002395	2,08E-05
8	0,004894	0,005349	0,005705	0,006506	0,005362	6,74E-05
9	0,005289	0,005573	0,006077	0,006958	0,006899	9,66E-05
11	0,00574	0,006224	0,006937	0,007842	0,008252	0,000137
15	0,006216	0,00678	0,00743	0,008798	0,010028	0,000525

Příloha G.5: Tabulka hodnot pro přenosovou rychlost 4096 kb/s

Tab. G.5: Naměřené hodnoty závislosti chybovosti BER na úrovni amplitudy U_e a na hloubce prokládání D pro přenosovou rychlost 4096 kb/s

Rušící impuls 1						
U_e [mV]	BER [-]					
	D [-]					
	1	2	4	8	16	32
35	0	0	0	0	0	0
50	0,000366	0,000187	0	0	0	0
65	0,001093	0,00171	0,000599	1,03E-05	0	0
80	0,001982	0,002885	0,002994	0,000244	0	0
95	0,002953	0,003834	0,003988	0,001988	5,06E-05	0
110	0,003767	0,004338	0,004963	0,004497	0,000208	0
125	0,004293	0,004988	0,005519	0,006243	0,000345	0
140	0,004676	0,005455	0,005987	0,006919	0,001114	0
155	0,005153	0,005932	0,00638	0,007397	0,001643	1,77E-05
185	0,005545	0,006405	0,007039	0,008519	0,002639	0,000294
245	0,006312	0,006906	0,007928	0,009476	0,004091	0,000244
Rušící impuls 2						
U_e [mV]	BER [-]					
	D [-]					
	1	2	4	8	16	32
4	0	0	0	0	0	0
6	0,00092	0,000407	2,90E-06	0	0	0
8	0,001665	0,001842	8,51E-04	0	0	0
10	0,002274	0,002723	0,002895	0,000157	0	0
12	0,002936	0,003512	0,003682	0,001858	0	0
14	0,003649	0,004394	0,004757	0,004486	0	0
16	0,004376	0,00514	0,005407	0,006002	0,000185	0
18	0,00499	0,005833	0,006481	0,007164	0,001196	0
20	0,005463	0,00612	0,00697	0,007948	0,002446	2,51E-05
22	0,005737	0,00645	0,007366	0,00879	0,003638	3,30E-05
30	0,006486	0,007256	0,00835	0,010321	0,007157	7,77E-05

Příloha G.6: Tabulka hodnot pro přenosovou rychlost 2048 kb/s

Tab. G.6: Naměřené hodnoty závislosti chybovosti BER na úrovni amplitudy U_e a na hloubce prokládání D pro přenosovou rychlost 2048 kb/s

Rušící impuls 1						
U_e [mV]	BER [-]					
	D [-]					
	1	2	4	8	16	32
150	0	0	0	0	0	0
190	0,000285	0,000167	0	0	0	0
230	0,001779	0,001617	0,000561	1,86E-05	0	0
270	0,002697	0,002327	0,002624	6,25E-05	1,97E-05	0
310	0,003419	0,003012	0,003888	0,000516	0,000101	0
350	0,004092	0,00382	0,00471	0,002102	0,000302	0
390	0,004588	0,004609	0,005406	0,004003	0,000572	2,24E-05
430	0,005091	0,005046	0,006045	0,005406	0,000949	5,17E-05
470	0,00553	0,005461	0,006959	0,006473	0,001515	0,000202
510	0,005786	0,005733	0,007399	0,007188	0,002139	0,000264
550	0,006168	0,006499	0,008043	0,007834	0,002287	0,000323
Rušící impuls 2						
U_e [mV]	BER [-]					
	D [-]					
	1	2	4	8	16	32
10	0	0	0	0	0	0
15	1,40E-05	0	0	0	0	0
20	0,001604	0,001753	0,00077	0	0	0
25	0,00239	0,002567	0,002847	1,55E-05	0	0
30	0,003188	0,003614	0,003921	0,000938	0	0
35	0,004061	0,004854	0,004948	0,004221	4,88E-05	0
40	0,004685	0,005662	0,006019	0,006254	0,00039	0
45	0,005096	0,006207	0,006617	0,007175	0,000693	0
50	0,005319	0,006674	0,00726	0,007495	0,001155	1,09E-05
55	0,005719	0,007085	0,007897	0,008048	0,001817	2,29E-05
65	0,006323	0,007986	0,008712	0,009512	0,004136	7,83E-05