

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

**Katedra telekomunikácií**

Ing. Peter Trúchly

**VÝKONNOSŤ ATM PROTOKOLU V PROSTREDÍ**  
**BEZDRÔTOVÝCH KOMUNIKAČNÝCH KANÁLOV**

Dizertačná práca

Vedný odbor: Aplikovaná informatika

Školiteľ: Prof. Ing. Pavol Podhradský, PhD.

Bratislava 2003



## **Anotácia**

Cieľom tejto dizertačnej práce je analýza a vyhodnotenie výkonnosti asynchrónneho prenosového módu (ATM) v prostredí bezdrôtového kanála (mobilného, satelitného), ak sa použije na úrovni fyzickej ATM vrstvy metóda blokového prekladania ATM buniek. V práci je navrhnutá nová metóda prekladania ATM buniek nazvaná metóda rozšíreného prekladania. Výkonnosť ATM v prostredí bezdrôtového kanála je analyzovaná a vyhodnotená pre každý typ HEC algoritmu (detekčný, korekčný a štandardný) z pohľadu rôznych parametrov (napr. CLR, CER, atď.). Kvôli zlepšeniu výkonnosti štandardného HEC algoritmu sú navrhnuté modifikácie metódy štandardného a rozšíreného prekladania. Modelovanie bezdrôtového kanála je realizované pomocou časovo diskrétného dvojstavového Markovovského modelu. Výkonnostné parametre sú vyhodnotené na základe analytického modelu a taktiež výsledkov simulácií.

## **Annotation**

The aim of this dissertation thesis is an analysis and evaluation of the asynchronous transfer mode (ATM) performance in wireless channel environment (mobile, satellite) if block interleaving methods of the ATM cells are used at a physical ATM layer. New ATM cells interleaving method called enhanced interleaving method is proposed. The ATM performance over wireless channel is analyzed and evaluated for each type of HEC algorithm (detection, correction and standard) from point of view of various parameters (e.g. CLR, CER, etc.). There are proposed modifications of the standard interleaving method and enhanced interleaving method in order to improve the performance of the standard HEC algorithm. A wireless channel model is represented by discrete-time two-state Markov chain. The performance parameters are evaluated using analytical model as well as simulations results.



Touto cestou chcem poďakovať svojmu školiteľovi prof. Ing. Pavlovi Podhradskému, PhD. za cenné pripomienky, rady a vedenie počas vypracovania dizertačnej práce.

Taktiež by som chcel poďakovať doc. Ing. Jaroslavovi Polecovi, PhD. a Ing. Ivanovi Kotuliakovi, PhD. za poskytnutú pomoc ako aj ďalším členom katedry telekomunikácií za morálnu podporu.



**Obsah**

<b>1. Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Analýza súčasného stavu protokolov a bezdrôtových systémov .....</b>	<b>3</b>
2.1 Bezdrôtový kanál .....	3
2.1.1 Charakteristika kanála z pohľadu polohy vysielača .....	4
2.1.2 Charakteristika kanála z pohľadu polohy prijímača .....	9
2.2 Metódy zabezpečenia prenosu údajov proti chybám .....	13
2.2.1 FEC metódy .....	13
2.2.2 ARQ metódy .....	14
2.2.3 Metódy prekladania .....	15
2.2.4 Výber vhodnej metódy zabezpečenia .....	17
2.3 Komunikačné protokoly v prostredí bezdrôtových systémoch .....	19
2.3.1 LAN siete .....	19
2.3.2 WAN siete (X.25, Frame Relay) .....	21
2.3.3 TCP/IP .....	24
2.3.4 ATM siete .....	27
2.3.4.1 Základná charakteristika .....	27
2.3.4.2 Úvod do bezdrôtových ATM sietí .....	33
2.3.4.3 Bezdrôtové/mobilné ATM siete .....	34
2.3.4.4 Satelitné ATM siete .....	37
2.3.4.5 Zabezpečenie údajov v rámci SATM protokolového modelu .....	42
2.4 Modelovanie bezdrôtového kanála .....	44
2.4.1 Prístupy k modelovaniu bezdrôtového kanála .....	45
2.4.1.1 Empirické modely .....	45
2.4.1.2 Štatistické modely .....	45
2.4.1.3 Analytické modely .....	47
2.4.2 Dvojstavový Markovovský model kanála .....	47
<b>3. Špecifikácia cieľov práce .....</b>	<b>51</b>
<b>4. Výkonnosť bezdrôtového ATM protokolu s aplikovanou metódou prekladania</b>	
<b>    bitov .....</b>	<b>53</b>
4.1 HEC algoritmus a parametre jeho výkonnosti .....	53
4.2 Výkonnosť HEC algoritmov v neprekladanom kanáli .....	55
4.2.1 Výkonnosť HEC algoritmov pre model kanála s nezávislými chybami .....	56

---

4.2.2	Výkonnosť HEC algoritmov pre model kanála so závislými chybami .....	61
4.3	Štandardná metóda prekladania bitov .....	72
4.4	Metóda vnútrobunkového prekladania bitov .....	83
4.5	Metóda rozšíreného prekladania bitov .....	90
4.6	Modifikované metódy prekladania so zmenenou postupnosťou buniek .....	98
4.7	Porovnanie a vyhodnotenie blokových metód prekladania .....	103
<b>5.</b>	<b>Záver .....</b>	<b>116</b>
	<b>Zoznam skratiek.....</b>	<b>120</b>
	<b>Literatúra.....</b>	<b>124</b>



## Zoznam symbolov

- $P_{ij}^n$  -  $n$ -kroková prechodová pravdepodobnosť (zo stavu  $i$  do stavu  $j$ )
- $\mathcal{O}_{ij}^{(k)}(s, n)$  - pravdepodobnosť  $\mathcal{O}_{ij}(s, n)$  využívajúca prechodové pravdepodobnosti  $P_{ij}^k$
- $\Theta_{ij}^{(n)}(k)$  - pravdepodobnosť  $k$  chýb v ostávajúcej časti subbunky (v ktorej sú podstatné niektoré informačné bity)
- ${}_H\Theta_{ij}^{(n)}(k)$  - pravdepodobnosť  $k$  chýb v ostávajúcej časti subbunky (v ktorej sú podstatné niektoré informačné bity a jeden hlavičkový bit)
- $\Psi_{ij}^{(r)}(l, k)$  - pravdepodobnosť, že v časovom okamihu 0 nastane práve  $l$  chýb a v časových okamihoch 1, 2, ...,  $n-1$  nastane práve  $k$  chýb za predpokladu, že bol kanál v časovom okamihu 0 v stave  $i$  a v časovom okamihu  $n$  v stave  $j$  ( $n$  je počet bitov subbunky s poradovým číslom  $r$  u vnútrobunkového prekladania)
- $^{(x)}\Psi_{ij}^{(r)}(l, k)$  - je pravdepodobnosť  $\Psi_{ij}^{(r)}(l, k)$  v prípade rozšíreného prekladania, týkajúca sa vybranej subbunky  $x$ -tej preloženej ATM bunky v rámci  $d$  preložených buniek
- $\beta$  - náhodná premenná určujúca, či hlavička ATM bunky je zasiahnutá neopraviteľným počtom chýb
- $\alpha$  - náhodná premenná, reprezentujúca počet chýb v informačnej časti ATM bunky
- $\varepsilon$  - priemerná dĺžka zhluky bitových chýb
- $\theta$  - uhol rotácie roviny polarizácie
- $\lambda_f$  - vlnová dĺžka
- $\mathcal{O}_{ij}(s, n)$  - pravdepodobnosť, že presne  $s$  chýb sa nachádza bloku  $n$  bitov prijatých v časových intervaloch (taktach)  $\{0, 1, 2, \dots, n-1\}$  za predpokladu, že kanál bude čase  $n$  v stave  $j$ , pričom v čase 0 bol v stave  $i$
- BER - pravdepodobnosť bitovej chyby v kanáli
- CBER - parameter, ktorý udáva početnosť bitových chýb v informačných poliach úspešne prijatých ATM buniek
- CER - pomer počtu všetkých ATM buniek, ktoré úspešne prešli HEC algoritmom, ale obsahujú jednu alebo viac chýb v informačnom poli, k počtu všetkých ATM buniek, ktoré prešli úspešne HEC algoritmom
- CLR - pomer počtu všetkých zahodených ATM buniek na danom spojení k počtu všetkých ATM buniek vyslaných na danom spojení
- $d$  - hĺbka prekladania (počet prekladaných ATM buniek)

---

$D$	- vzdialenosť medzi anténami (izotropnými) vysielачa a prijímača
$f$	- frekvencia
FSL	- straty spôsobené tlmením voľného priestoru
$\mathbf{H}$	- matica stavov
$h$	- pravdepodobnosť vygenerovania správneho bitu v zlom stave
$L$	- celočíselný podiel $(N_2/N_1 - 1)$ rovný hodnote 9 bitov
$N_1, N_2$	- počet bitov hlavičky (40) resp. informačného poľa ATM bunky (384)
$N_e$	- hustota elektrónov ionosféry
$\mathbf{P}$	- matica prechodových pravdepodobností
$P(B), \pi_1$	- pravdepodobnosť, že model je v stave zlom
$P(G), \pi_0$	- pravdepodobnosť, že model je v stave dobrom
$P_B$	- bloková chybovosť
$P_{BB}, P_{11}$	- pravdepodobnosť zotrvania v zlom stave
$P_{BG}, P_{10}$	- pravdepodobnosť prechodu zo zlého do dobrého stavu
$P_C$	- pravdepodobnosť, že HEC algoritmus je v stave korekčnom
$P_{C\_C}$	- prechodová pravdepodobnosť zotrvania HEC algoritmu v korekčnom stave
$P_{C\_D}$	- pravdepodobnosť prechodu HEC algoritmu z korekčného do detekčného stavu
$P_{CLR\_C}$	- pravdepodobnosť straty bunky v korekčnom
$P_{CLR\_D}$	- pravdepodobnosť straty bunky v detekčnom stave
$P_D$	- pravdepodobnosť, že HEC algoritmus je v stave detekčnom
$P_{D\_C}$	- pravdepodobnosť prechodu HEC algoritmu z detekčného do korekčného stavu
$P_{D\_D}$	- prechodová pravdepodobnosť zotrvania HEC algoritmu v detekčnom stave
$P_e$	- bitová chybovosť
$P_e(i)$	- pravdepodobnosť chyby v stave $i$
$P_{GB}, P_{01}$	- pravdepodobnosť prechodu z dobrého do zlého stavu
$P_{GG}, P_{00}$	- pravdepodobnosť zotrvania v dobrom stave
$P_H(n)$	- pravdepodobnosť, že bunka obsahuje v hlavičke $n$ bitových chýb
$P_{loss}$	- polarizačné straty
$\mathbf{P}^n$	- $n$ -kroková matica prechodových pravdepodobností $P_{ij}^n$
$P_P(n)$	- pravdepodobnosť, že informačná časť bunky obsahuje práve $n$ bitových chýb
$Pr(\beta, \alpha)$	- združená pravdepodobnosť náhodných premenných $\alpha$ a $\beta$
$S$	- dĺžka cesty cez ionosféru

## 1. Úvod

Pojem informácia v poslednom desaťročí nadobudol význam mohutných rozmerov. Nie je to spojené iba s aspektom byť čo najrýchlejšie informovaný, či mať čo najrýchlejšie najnovšie informácie, ale vôbec mať možnosť kedykoľvek a kdekoľvek získať (rýchlo) hľadanú informáciu, či už od inej osoby alebo z dostupného informačného zdroja. Od tohto základu sa odvíja základná spokojnosť zákazníkov. Za účelom splnenia tohto cieľa vzniklo mnoho typov komunikačných sietí s lepšími alebo horšími vlastnosťami.

Samotný vývoj komunikačných sietí najviac napredoval v dvoch oblastiach. Prvú oblasť tvoria telefónne siete, ktoré poskytli zákazníkovi k dispozícii základnú službu a to telefónny hovor. Vďaka jednoduchosti používania bolo získavanie informácií, či už súkromného alebo pracovného charakteru, dostupné každému používateľovi. Druhou oblasťou rozvíjajúcou sa najmä na pôde akademickej a firemnej bola oblasť dátových sietí, ktoré od začiatku (na rozdiel od telefónnych sietí) pracovali na princípe digitálneho prenosu informácií. Tieto siete boli v podstate určené na vzájomné prepojenie mnohých počítačov najskôr v rámci menších oblastí (lokálne dátové siete), neskôr v rámci väčších oblastí (metropolitné dátové siete) až po siete pokrývajúce veľké územia (rozľahlé dátové siete). Týmto spôsobom sa vyvinula aj najväčšia sieť v súčasnosti – Internet – ktorá spája stovky miliónov počítačov na celom svete a je v podstate dostupná pre každú domácnosť. Postupom času vďaka úspechom a pokrokom v oblasti elektroniky napr. pri zvyšovaní výkonov procesorov, miniaturizácii elektronických prvkov alebo zvyšovaní kapacít pamäťových médií bola kvalita poskytovaných služieb neustále zvyšovaná.

Za účelom poskytnúť požadované služby aj do neprístupných oblastí alebo pre podporu mobility používateľov, hľadali sa aj nové spôsoby prenosu údajov. Preto sa navrhlo mnoho sietí využívajúcich na prenos bezdrôtový kanál. Takto sa závažnou rýchlosťou rozšírili mobilné telefónne siete, bez ktorých si už mnohí ľudia v súčasnosti nedokážu predstaviť život. Taktiež sa rozpracovali návrhy a postupne začali budovať satelitné siete aj napriek tomu, že článok uverejnený pod názvom „Extra terrestrial relay“, ktorý napísal Arthur C. Clarke v roku 1945 pojednávajúci o využití satelitov na komunikáciu, vyzeral ako vedecká fantastika. Satelitné systémy nám prinášajú výhody aj nevýhody. Ak by sme skúmali vlastnosti prvých používaných – geostacionárnych – satelitov, zistili by sme, že oblasť pokrytia jedného takéhoto satelitu je takmer tretina zemského povrchu, preto aj medzi prvými ich aplikáciami bolo vysielanie rozhlasových a televíznych signálov. Vypustenie jedného satelitu trvá omnoho kratšie ako vybudovanie takej veľkej siete, akú dokáže pokryť.

Na druhej strane však ich veľká vzdialenosť nad zemským povrchom vnáša do prenosu veľké oneskorenia a prenosový kanál trpí veľkým množstvom chýb. Prvý problém je možné riešiť využitím nízkoletiacich satelitov. Druhý problém, ktorý je charakteristický pre väčšinu bezdrôtových kanálov, možno riešiť iba výkonnými zabezpečovacími metódami.

V posledných rokoch je venované značné úsilie vytvoreniu globálnej komunikačnej infraštruktúry, ktorá je spojená ešte s konvergenciou hlasových a dátových sietí. Vzájomné prepájanie rôznych typov sietí vnáša riziko vzniku problémov spolupráce použitých protokolov a použitých prenosových kanálov. Mnohé problémy týkajúce sa riadenia prevádzky a zabezpečenia vyplývajú práve z už spomenutej veľkej chybovosti bezdrôtového kanála. Týka sa to aj asynchrónneho prenosového módu (ATM), ktorý bol pôvodne stavaný na optické prenosové médium a jeho kvalitu. Aplikáciou ATM do bezdrôtového prostredia, ktoré je charakteristické úplne odlišnou povahou a úrovňou chybovosti kanála, nastáva značná degradácia jeho výkonnosti. Zvýšenie výkonnosti ATM v bezdrôtovom prostredí je možné realizovať rôznymi zabezpečovacími metódami. Táto práca analyzuje a vyhodnocuje vplyv metód blokového prekladania údajov na výkon ATM.

V súčasnosti existuje mnoho spoločností, ktoré sa zaoberajú návrhom, zavádzaním, testovaním ale aj prevádzkovaním rôznych bezdrôtových systémov. Na poli satelitných sietí je možné naraziť na spoločnosti ako Intelsat, Inmarsat, Comsat, Eutelsat, Arabsat, Panamsat atď. Na poli mobilných bunkových bezdrôtových sietí sa výskumu a testovaniu venujú veľké firmy/spoločnosti (CISCO) a výskumné laboratória, pričom zavádzanie a prevádzkovanie je už v réžii operátorov vo vnútri každého štátu. Na poli štandardizačnom je možné sa stretnúť s medzinárodnou organizáciou ITU a IETF a potom regionálnymi organizáciami ako ETSI, BellCore, atď.

Práca je rozdelená do piatich kapitol. Súčasťou prvej kapitoly je tento úvod do problematiky. Druhá kapitola, zaoberajúca sa súčasným stavom problematiky, sa venuje charakteristike bezdrôtového kanála a možnostiam jeho modelovania, popisu metód, ktoré je možné použiť z hľadiska zabezpečenia údajov pri prenose cez bezdrôtový kanál a tiež analýze výkonnosti súčasných protokolov pri ich integrácii do bezdrôtovej siete a s tým súvisiace architektúry bezdrôtových sietí. Tretia kapitola prináša formulované ciele dizertačnej práce. Jadro práce tvorí štvrtá kapitola, ktorá obsahuje porovnanie výkonnosti metód prekladania použitých na zlepšenie výkonnosti ATM protokolu v bezdrôtových systémoch. Posledná kapitola je venovaná záveru a prínosom tejto práce.

## 2. Analýza súčasného stavu protokolov a bezdrôtových systémov

Ak budeme považovať za bezdrôtové systémy tie systémy, ktoré využívajú akýkoľvek typ bezdrôtového kanála, potom je možné rozdeliť ich do dvoch skupín. Prvú skupinu tvoria siete, ktoré v prevážnej miere využívajú vysielače umiestnené na Zemi a druhú skupinu budú tvoriť siete založené na vysielačoch umiestnených na obežnej dráhe okolo Zeme. Do prvej skupiny môžeme zaradiť mobilné (bunkové) systémy prvej (NMT, TACS, AMPS), druhej generácie (GSM, IS-136, PDC) a tretej generácie (UMTS). Ďalej tu patria rôzne bezšnúrové systémy (DECT), bezdrôtové LAN prípadne WAN siete. Do druhej skupiny patria satelitné systémy využívajúce satelity na rôznych obežných dráhach buď vo funkcii opakovača alebo s implementovanými rozšírenými funkciami spracovania a prepájania. Vzájomným prepojením sietí dostaneme hybridnú bezdrôtovú sieť, ktorá využíva vysielače oboch typov a príkladom môže byť UMTS rozšírený o satelitné spoje alebo možno budúca štvrtá generácia mobilných systémov [Re02]. V literatúrach sa často systém využívajúci mobilné zariadenia umiestnené na zemi prepojené cez satelity (nízkoletiace) označuje ako LMSS (Land mobile satellite system).

Bezdrôtový systém využíva bezdrôtový kanál, preto je potrebné vedieť, aké má vlastnosti a ako ho modelovať, aby sme mohli skúmať a testovať správanie sa existujúcich a nových protokolov v prostredí takéhoto kanála. Nasledujúce časti tejto kapitoly postupne charakterizujú vlastnosti bezdrôtového kanála, kategorizujú a opisujú metódy na zlepšenie výkonnosti prenosu údajov cez bezdrôtový kanál, analyzujú výkonnosť vybraných súčasných protokolov v bezdrôtovom prostredí a nakoniec rozoberajú súčasné možnosti v oblasti modelovania bezdrôtového kanála.

### 2.1 Bezdrôtový kanál

Charakteristika bezdrôtového kanála, ktorým sa šíri vyslaný signál medzi vysielačom a prijímačom, je spojená s niekoľkými faktormi, ako napr.:

- frekvencia signálu
- polarizácia signálu
- modulácia (kódovanie) signálu
- vzájomná poloha prijímača a vysielača signálu a z toho vyplývajúca prenosová cesta medzi nimi, ktorá podľa podmienok obsahuje rôzne rušiacie prvky (prekážky, meteorologické vplyvy, atď.)

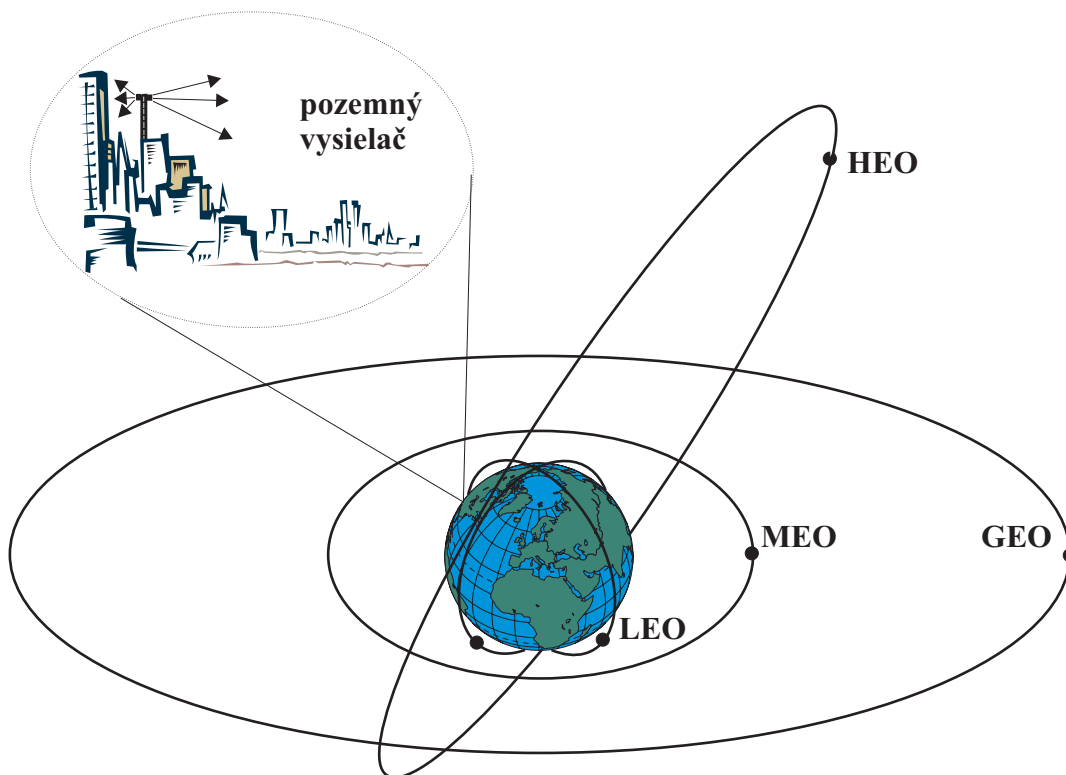
Nasledujúce podkapitoly budú špecifikovať vlastnosti bezdrôtového kanála práve z pohľadu polohy vysielača a prijímača.

### 2.1.1 Charakteristika kanála z pohľadu polohy vysielača

Umiestnenie vysielača signálu bezdrôtového systému môže byť riešené dvomi spôsobmi (obr. 2.1):

- na zemi (pozemný – na budovách, stožiaroch, kopcoch) používané napr. v mobilných systémoch alebo pri pozemnom vysielaní rádia a televízie
- vysoko nad zemským povrchom (orbity – eliptické dráhy satelitov pohybujúcich sa okolo Zeme [Mara94], [Gagl91]) používané v satelitných systémoch

Pozemné umiestnenie vysielačov je spojené s jednoduchšou a lacnejšou inštaláciou a údržbou v porovnaní s riešením vysielačov umiestnených na orbitách. Naopak oblasť pokrytia vyslaným signálom je značne väčšia v druhom prípade.



Obr. 2.1 Rôzne formy umiestnenia vysielačov pri bezdrôtových systémoch

Orbity sú charakterizované pomocou nasledujúcich parametrov: apogeum - najvzdialenejší bod od Zeme, perigeum - najbližší bod od Zeme, perióda - doba, za ktorú satelit prejde jeden krát po celej orbite a inklinácia - uhol, ktorý zvierá rovina orbity s rovníkovou rovinou. V súčasnosti rozlišujeme tieto orbity: LEO (Low Earth Orbit), MEO (Medium Earth Orbit), GEO (Geostationary Orbit) a HEO (Highly Elliptical Orbit).

### **Pozemný vysielateľ**

Výhodou pozemných vysielateľov je ich jednoduchšia a lacnejšia inštalácia a údržba. Podľa ich umiestnenia je zrejmé, že ale signálom pokrytá oblasť je malá a je potrebné veľké množstvo vysielateľov na zabezpečenie signálu pre rozsiahle územia (napr. Slovensko). V niektorých prípadoch (mobilné systémy) sa oblasť pokrytá vysielateľom úmyselne znižuje, aby sa znížil potrebný vysielací výkon a zvýšil počet aktívnych používateľov v rámci väčšej oblasti [Cizm99]. Systémy využívajúce tento typ vysielateľov poskytujú značnú mobilitu používateľov. Z hľadiska kanála má signál veľmi malé oneskorenie, čo je jednou zo základných požiadaviek interaktívnych služieb. Chybovosť kanála je závislá už len od polohy prijímača a prostredia, v ktorom sa pohybuje.

### **LEO**

Orbity typu LEO sú eliptické častejšie kruhové orbity s výškou maximálne 3 000 km nad povrchom Zeme [Imri97]. Perióda sa pohybuje v intervale od jednej až po tri hodiny. Maximálny čas, počas ktorého je satelit v lokálnom horizonte pozorovateľ na Zemi, je 20 minút. Kvôli pohybu satelitu po oblohe musí byť pozemná stanica vybavená anténou, ktorá je schopná presne sledovať daný satelit. Z uvedenej veľmi malej výšky tohto orbitu vyplýva niekoľko výhod [Comp99]:

- je potrebné menšie množstvo energie a raketového paliva na vypustenie satelitu na orbitu
- je potrebný menší vyžarovací výkon antény satelitu
- oneskorenie signálu je v porovnaní s ostatnými orbitami najnižšie a pohybuje sa v intervale od 6 do 30 ms
- je možné používať tzv. príručné zariadenia, ktoré sú napájané batériou, nepotrebujú nátáčacu anténu a majú malé rozmery

Na druhej strane je potrebné sa vysporiadať s takými javmi ako Dopplerov efekt, zmeny vo veľkosti vzdialenosti satelitu od pozemných staníc a premenlivou viditeľnosťou medzi nimi [Penn95].

Globálny telekomunikačný systém, ktorý využíva tento druh orbity pre komunikáciu na celej Zemi, musí využívať veľký počet satelitov na niekoľkých orbitách s rôznou inklináciou. Existujú dva typy prístupov používané pri LEO satelitoch. Prvý využíva niekoľko satelitov na globálne pokrytie, kde každý obsahuje pamäť a každý pracuje na princípe prijmi, uchovaj a vyšli. Druhý prístup využíva konšteláciu mnohých satelitov, ktoré sú previazané vzájomnou komunikáciou medzi sebou.

## **MEO**

MEO sú kruhové orbity vo výške 10 000 km. Ich perióda je približne 6 hodín. Maximálny čas, počas ktorého sú viditeľné pozorovateľovi na Zemi, je niekoľko hodín. Všeobecne by sa dalo povedať, že vlastnosti MEO satelitov ležia medzi vlastnosťami LEO a GEO satelitov. Vyplýva to z ich pozície v priestore [Imri97]. Čo sa týka oneskorenia signálu, jeho hodnota sa nachádza v intervale 70 až 120 ms.

Telekomunikačný systém, pokrývajúci celú Zem, vyžaduje menší počet satelitov ako LEO systémy, vyskytujúcich sa na 2 až 3 orbitách. Princíp je podobný ako u LEO systémov, ale menej sa využívajú príručné zariadenia, keďže je väčšie oneskorenie a útlm signálu [Penn95].

## **GEO**

Geostacionárna orbita je kruhová orbita nachádzajúca sa v rovine rovníka Zeme. Perióda je rovnaká ako perióda Zeme teda 24 hodín (23h 56m 4s). GEO satelity sa nachádzajú vo výške 35 786 km nad povrchom Zeme. Satelit na geostacionárnej orbite stojí nad rovnakým bodom rovníka (je určený hodnotou zemepisnej dĺžky) a preto sa pozorovateľovi na Zemi javí ako pevný nehybný bod [Comp99]. Toto je podstatný rozdiel v porovnaní s LEO a GEO satelitmi, pretože v tomto prípade pozemná stanica má pevne nastavenú anténu na satelit a preto nie sú potrebné ďalšie komplikované zariadenia na sledovanie satelitu.

Oblasť, ktorú dokáže satelit zakryť signálom, sa rovná takmer tretine zemského povrchu (od 75° južnej až po 75° severnej zemepisnej šírky). Z toho vyplýva, že ak chceme pokryť celý povrch Zeme (medzi uvedenými zemepisnými šírkami), potrebujeme tri satelity.



Nevýhodou týchto satelitov je, že nedokážu zasobiť signálom polárne krajiny, ktoré sú už mimo dohľad. Preto boli zavedené práve polárne orbity.

Anténa pozemnej stanice na rovníku má elevačný uhol najväčší ( $90^\circ$ ) a tlmenie signálu pozemskou atmosférou je najmenšie. S pribúdajúcou zemepisnou šírkou (ale aj dĺžkou) sa elevačný uhol zmenšuje a signál musí prekonávať väčšiu hrúbku atmosféry (a celkovo aj väčšiu vzdialenosť), čím je viac tlmený. Hranica nastáva pri elevačnom uhle okolo  $10^\circ$ , za ktorým sú oblasti neschopné prijímať signál zo satelitu [Penn95].

Pretože geostacionárny satelit stojí nehybne v priestore oproti Zemi, môže nepretržite zásobovať signálom jeho oblasť pokrytia. Tento signál však podlieha dvom neželaným vplyvom. Prvý je veľmi veľké oneskorenie. Aby signál prekonal cestu od satelitu až ku prijímacej pozemnej stanici, potrebuje na to čas približne 120 ms. V prípade, že sa tento signál šíri medzi dvoma pozemnými stanicami cez satelit, je toto oneskorenie dvojnásobné. Už dvojcestné oneskorenie (240 ms) napríklad prekračuje hodnotu danú odporúčaním ITU pre žiadosť o automatickú odpoveď v ARQ schémach pri paketových údajoch (100 ms) alebo vyžaduje nutné použitie zariadení na odstránenie ozvien pri telefónnych kanáloch (G.114) [Abri96]. Druhý negatívny vplyv (už spomínaný) je útlm signálu spôsobený prechodom cez prostredia medzi satelitom a pozemnou stanicou (atmosféra, vákuum) a jeho hodnota dosahuje až 200 dB. Preto používanie príručných terminálov pri geostacionárnych satelitoch je v oveľa menšej miere ako v prípade LEO a MEO systémov.

## HEO

Táto vysoko eliptická orbita má perigeum vo výške okolo 500 km nad povrchom Zeme a apogeum okolo 50 000 km. Orbita je oproti rovine rovníka (GEO) naklonená s inklináciou  $63,4^\circ$ , čo GEO systémom umožňuje poskytnúť komunikačné služby do oblastí vysokých zemepisných šírok. Perióda orbity kolíše v intervale od 8 do 24 hodín [Imri97].

Rýchlosť satelitu na tejto orbite nie je konštantná (veľká v perigeu a malá v apogeu). Kvôli vysokej excentricite orbity bude satelit zotrvať asi  $2/3$  periódy blízko apogea a počas tohto času sa bude javiť takmer stacionárny pre pozorovateľa na Zemi [Comp99]. Ak chceme vytvoriť permanentnú linku, je potrebné použiť niekoľko zosynchronizovaných satelitov na podobných orbitách. To znamená, že keď jeden satelit prejde mimo dohľad zo Zeme, musí sa pozemná stanica nastaviť na ďalší satelit, ktorý sa blíži k svojmu apogeu.

V dôsledku nekonštantnej výšky satelitu kolíše oneskorenie šírenia sa signálu, tlmenie signálu počas prenosu a mení sa aj oblasť na Zemi, z ktorej je satelit viditeľný (footprint).

Medzi ďalšie problémy vyskytujúce sa pri HEO satelitoch patrí aj Dopplerov efekt spôsobený pohybom satelitu [Penn95].

### Zhrnutie základných parametrov bezdrôtových kanálov

Zhrnutie základných parametrov všetkých popísaných typov kanálov z pohľadu druhu vysielateľa uvádza tab. 2.1. Ak chceme nájsť najvhodnejší typ kanála pre našu sieť zistíme, že každý kanál má svoje výhody a nevýhody. Musíme preto najskôr uviesť určité požiadavky, ktoré by mal spĺňať kanál (napr. oblasť pokrytia signálom, nároky na parametre signálu, na pozemné prijímacie zariadenia a pod.).

	<b>Poz. vysielač</b>	<b>LEO</b>	<b>MEO</b>	<b>GEO</b>	<b>HEO</b>
výška [km]	< 5	500 - 3 000	10 000 - 14 000	35 786	500 - 50 000
perióda [h]	24	1 - 3	6 - 8	23,93	3 - 24
oneskorenie [ms]	< 1	6 - 30	70 - 120	240 - 280	50 - 320
viditeľnosť	24 h	niekoľko minút	niekoľko hodín	24 h	2 - 12 h
kvalita signálu	*)	dobrá	stredne dobrá	slabá	slabá (kolíše)
príručné zariadenie	áno	áno	áno	nie	nie
pohyblivý anténny systém	nie	áno ***)	áno	nie	áno
riadenie vysielateľa	veľmi jednod.	zložitý	stredne zložitý	jedno- duché	zložitý
náklady na inštaláciu	veľmi malé	malé	veľké	veľké	veľké
oblasť pokrytia	veľmi malá	široká	stredne široká	malá	široká
Dopplerov efekt	nie **)	áno	áno	nie	nepatrný

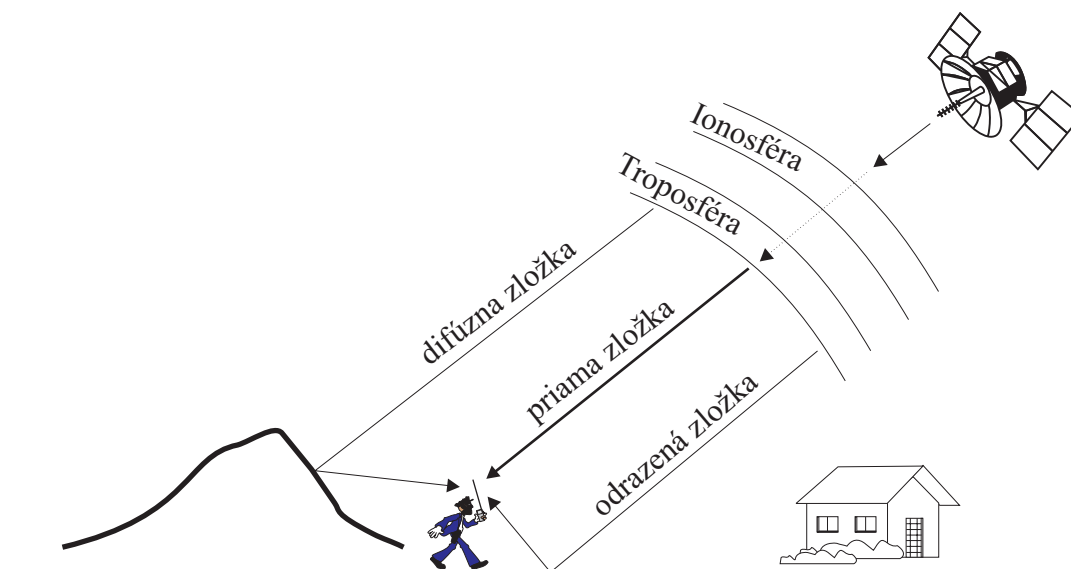
\*) závislá od typu prijímateľa (dobrá až slabá), \*\*) áno pri mobilných prijímateľoch

\*\*\*) nie pri príručných zariadeniach

Tab. 2.1 Zhrnutie základných parametrov typov kanálov

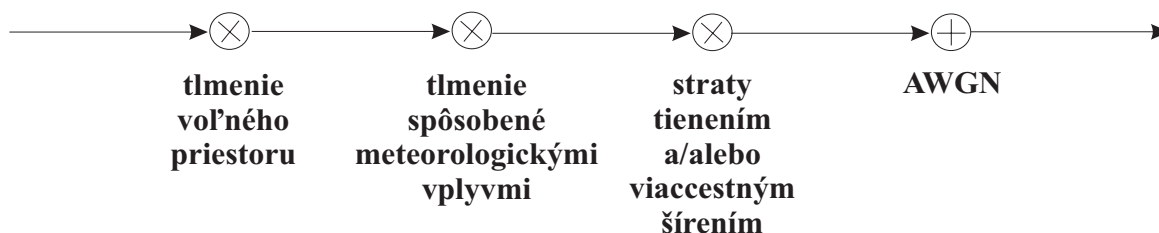
### 2.1.2 Charakteristika kanála z pohľadu polohy prijímača

Signál prenesený cez LMS kanál a prijatý v prijímači môže byť modelovaný ako súčet troch zložiek (obr. 2.2): dvoch koherentných (priama a od zeme odrazená vlna) a jednej nekoherentnej (rozptýlená vlna) [Kara99].



Obr. 2.2 Model šírenia signálu pri bezdrôtovom kanáli

Vyslaný signál šíriaci sa priestorom podlieha mnohým negatívnym vplyvom. Všeobecne je táto situácia zobrazená na obr. 2.3. Jednotlivé tlmenia budú ďalej podrobnejšie opísané. AWGN (Additive White Gaussian Noise) je šum, ktorý vzniká tepelným pohybom elektrónov v materiáloch. Volá sa aditívny, pretože sa k signálu pripočítava. Kvôli konštantnej hustote výkonového spektra (podobnej bielemu svetlu) sa volá biely a gausovský kvôli tvaru funkcie hustoty rozdelenia pravdepodobnosti amplitúdy šumu.



Obr. 2.3 Hlavné zdroje rušenia signálu na ceste medzi vysielateľom a prijímačom

### Priama vlna (priama zložka signálu)

Priama vlna - LOS (line of sight) vlna - je prijatá priamou cestou bez odrazov a prekážok. Preto je ovplyvnená iba tlmením voľného priestoru (free space), Faradayovou rotáciou a scintiláciou počas prenosu ionosférou, tlmením a depolarizáciou počas prenosu troposférou a tienením.

**Tlmenie voľného priestoru** je tlmenie, ktoré získame, ak odstránime všetky vplyvy typu: pohlcovania, ohybu, prekážok, lámania, rozptylu a odrazov elektromagnetickej vlny na ceste medzi anténou prijímača a vysielачa. Pri vyžarovaní (vysielaní) signálu sa priestor pokrytý týmto signálom s rastúcou vzdialenosťou zväčšuje, ale tým sa jeho úroveň v konkrétnom bode znižuje. Straty spôsobené tlmením voľného priestoru FSL (Free Space Loss) sú dané vzťahom [Rich95]

$$FSL = 20 \cdot \log \left( 4 \cdot \pi \cdot \frac{D}{\lambda_f} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.1)$$

kde  $D$  je vzdialenosť medzi izotropnými anténami vysielачa a prijímača a  $\lambda_f$  je vlnová dĺžka.

Ionosféra (80 km – 1000 km) je vrstva atmosféry charakteristická zvýšenou ionizáciou, čiže množstvom elektrónov, ktoré vznikajú interakciou slnečného žiarenia a molekúl plynu. **Faradayova rotácia** je rotácia osi polarizácie nekrhovo polarizovanej vlny. Lineárne polarizovaná vlna je vektorovým súčtom pravotočivej kruhovo polarizovanej (RHCP) a ľavotočivej kruhovo polarizovanej (LHCP) vlny. Ak smer šírenia vlny je rovnobežný so smerom magnetického poľa zeme  $H_0$ , index lomu RHCP vlny je odlišný od LHCP vlny. Potom lineárne polarizovaná vlna vstupujúca do ionosféry v smere rovnobežnom k smeru  $H_0$  podlieha rotácii roviny polarizácie. Uhol rotácie závisí od hustoty elektrónov ionosféry  $N_e$ , frekvencie vlny  $f$  a dĺžky cesty cez ionosféru  $S$  a je daný v radiánoch nasledovne:

$$\theta = \frac{2.36}{f^2} \int_s N_e(l) \cdot B_0(l) dl \quad (2.2)$$

kde  $f$  je v GHz,  $B_0$  je magnetické pole v gaussoch a integrovanie je pozdĺž priamej cesty  $S$  [Kara99]. Ak sa vezme do úvahy niekoľko predpokladov ohľadne hodnoty

elektromagnetického poľa zeme a hustoty elektrónov  $N_e$ , tak tento vzťah môžeme zjednodušiť do tvaru

$$\theta = \frac{50}{f^2} \quad [\text{stupne}] \quad (2.3)$$

pričom polarizačná strata v decibeloch je

$$P_{\text{loss}} = 20 \cdot \log(\cos \theta) \quad (2.4)$$

kde  $\theta$  je v stupňoch.

Polarizačné straty možno eliminovať použitím kruhovej polarizácie pre prenosové vlny – čo je predpisom pre satelitné systémy tretej generácie [Vuce92], [Evan99], [Kara99], [Rich95].

Nepravidelnosti hustoty elektrónov v ionosfére sú zodpovedné za **ionosférickú scintiláciu**. Rozlišujú sa tri vrstvy ionosféry D, E a F. V každej vrstve rastie hustota elektrónov s rastúcou výškou k maximálnej hodnote, potom sa znižuje alebo zotrúva rovnaká až po začiatok ďalšej vrstvy. Hustota elektrónov vo vrstvách kolíše v závislosti od solárnych cyklov (prejavuje sa najmä cez deň a počas vysokej aktivity slnka). Okrem týchto troch vrstiev ešte existuje jedna tzv. sporadická E vrstva. Predstavuje vrstvu so značne odlišnou hustotou elektrónov voči ostatným vrstvám. Nachádza sa vo výške okolo 100 km [Vuce92]. Nehomogénne ionizované vrstvy spôsobujú rozptýlené odrazy vln, čo má za následok kolísanie amplitúdy a fázy signálu. Ionosférická scintilácia je tiež závislá od frekvencie (rovnako ako Faradayova rotácia), ale na rozdiel od troposferickej scintilácie nie je závislá od elevačného uhla. Podľa CCIR ale vplyvy ionosféry v pásme L môžu byť zanedbateľné (keďže systémy tretej generácie využívajú práve toto pásmo). Ešte viac zanedbateľné sú vplyvy ionosféry počas šírenia vlny vo frekvenčnom pásme Ku a Ka, pretože tieto vplyvy sú opačne úmerné frekvencii rádiovej vlny.

**Absorpcia** signálu prechádzajúceho troposférou (do 50 km) je spôsobená vodnou parou a kyslíkom. Meraním sa zistilo, že vplyv vodnej pary má najväčší účinok okolo 22,2 GHz a najväčší útlm spôsobený kyslíkom je v okolí frekvencie 60 GHz [Evan99]. Tlmenie pri iných frekvenciách je závislé ďalej od teploty, tlaku, vlhkosti a elevačného uhla satelitu. S rastúcim elevačným uhlom sa tlmenie znižuje. V intervale 1 až 18 GHz sa hodnota tlmenia pohybuje v intervale 0,35 až 2,3 dB (elevačný uhol 5°). Ďalšie tlmenie je

spôsobované akoukoľvek podobou kondenzovanej vody – dažďové kvapky, krúpy, ľadové kryštály, oblaky, snehové vločky. Vplyv je v podobe dvoch odlišných mechanizmov:

- rozptyl, ktorý spôsobuje rotáciu roviny polarizácie signálu a
- indukcia prúdov v daždi a ľadových kryštáloch a transformácia elektromagnetickej energie na tepelnú.

Tento vplyv rastie s rastúcou frekvenciou, vo frekvenčných pásmach L a S sú zanedbateľné, ale vplyvy troposféry v pásme K (Ku a Ka) sú oveľa podstatnejšie. Metódy určenia veľkosti tlmenia pre jednotlivé vplyvy je možné nájsť v [Evan99] a [Rich95].

Tlmenie priamej vlny **tienením** je spôsobené akoukoľvek prekážkou (stromy, budovy, stĺpy, mosty, kopce, pohoria). Bolo preukázané meraním, že tienenie signálu predstavuje jeden z hlavných zdrojov skreslenia prijatého signálu. Intenzita tienenia závisí od elevačného uhla, frekvencie, typu prekážky, dĺžky cesty cez prekážku, smeru pohybu voči vysielaču a nosnej frekvencie. Tlmenie je väčšie pre nízke elevačné uhly, pretože prekážky majú väčšie tiene. Pre frekvencie nižšie ako 1 GHz sú stromy takmer transparentné pre signál. Pre vyššie frekvencie sa začína uplatňovať princíp pohlcovania a odrážania [Vuce92], [Kara99], [Rich95].

### **Vlna odrazená od zeme (zrkadlová zložka)**

Ako udáva názov, je to vlna odrazená od zeme a prijatá prijímačom. Jej výkon závisí od nerovnosti terénu. Táto vlna prichádza do prijímača so záporným elevačným uhlom a preto jej účinok môže byť ignorovaný, ak sa použije smerová anténa. Vplyv tejto vlny klesá s rastúcim uhlom v rovine azimutu [Kara99].

### **Rozptýlené vlny (difúzna zložka)**

Difúzna zložka prijatého signálu je tvorená vlnami vzniknutými viaccestným šírením v dôsledku odrazov, ohybov pri prechode cez materiál a na rohoch a rozptylu v priestore okolo prijímača (presnejšie mimo prvej Fresnelovej zóny). Táto zložka je zodpovedná za malé zmeny amplitúdy a fázy signálu. Jej výkon závisí od rozostavenia jednotlivých rozptylových objektov okolo prijímača a od špecifického prostredia okolo prijímača.

Na záver môžeme zhrnúť, že ak sa použije smerová anténa a frekvenčné pásma týkajúce sa mobilných systémov tretej generácie, tak tienenie a viaccestné šírenie sú procesy, ktoré najviac prevládajú v takomto kanáli.

## 2.2 Metódy zabezpečenia prenosu údajov proti chybám

V predchádzajúcej podkapitole boli stručne charakterizované rôzne rušiace faktory ovplyvňujúce signál šíriaci sa medzi prijímacou a vysielačou stanicou. Ak chceme zabezpečiť spoľahlivý prenos informácií, musíme daný informačný signál zabezpečiť proti chybám, ktoré vznikajú na prenosovej ceste pôsobením týchto rušiacich vplyvov. Mnohé bezdrôtové kanály sa nevyznačujú iba častejším výskytom chýb, ale ešte aj zhlukovým charakterom týchto chýb (napr. pri pohybe prijímača v prostredí, ktoré obsahuje rôzne fyzické prekážky v priamej ceste signálu). Rozlišujeme dve metódy zabezpečenia digitálneho signálu proti chybám:

- dopredné metódy - FEC (Forward error correction)
- spätnoväzobné metódy - ARQ (Automatic repeat request)

### 2.2.1 FEC metódy

Malé prijímacie stanice ako VSAT (Very small aperture terminal) alebo mobilné terminály sú výkonovo obmedzené, preto požadovanú kvalitu signálu je možné doceliť iba použitím kódovania [Rich95]. FEC metódy (schémy) vnášajú do prenášaných údajov redundanciu. Tieto metódy sú založené na tom, že nepotrebujú pri prenose spätný kanál. Vysielač vysiela nepretržite kódované dátové bloky (slová). Prijímač na druhej strane vďaka pridanej redundancie (nadbytočnosti) sa snaží odhaliť a následne odstrániť chyby, ktoré vznikli počas šírenia sa prenosovou cestou. Ako jednoduchý príklad zakomponovanej redundancie do signálu je, ak sa namiesto každého bitu vyšle trikrát ten istý bit. Tým umožníme prijímaču odhaliť až dve chyby v každom bloku (dĺžky tri bity) a dokonca opraviť jednu chybu v každom bloku. Avšak, ak sa vyskytnú až tri chyby v bloku, prijímač ich neodhalí. Z toho vyplýva, že:

- dodaná redundancia údajom umožní prijímaču odhaliť a odstrániť len určitý počet chýb
- zníženie pravdepodobnosti chyby v údajoch docielime iba zväčšením redundancie, čím sa zvýši počet prenášaných bitov

Všeobecný koncept kódovania je nasledovný: ku  $k$  informačným bitom sa pridá  $r$  redundantných bitov, čím sa vytvorí kódové slovo dĺžky  $n = k + r$ . Spôsob pridávania redundantných bitov určuje typ kódu [Rich95]. FEC metódy využívajú najčastejšie nasledovné kódy:

- Konvolučné kódy
- Blokové kódy – BCH, Hammingové, Cyklické, Reed-Solomonové (RS) kódy

Výhodou FEC metód je ich jednoduchosť, keďže nevyžadujú spätný kanál a tým sa nerealizuje opätovné vysielanie údajov. Preto priepustnosť FEC metód je konštantná a nezávislá od prenosového prostredia [Kosu01].

### 2.2.2 ARQ metódy

ARQ metódy (schémy) využívajú iba detekciu (odhaľovanie) chýb a spätný kanál, preto sa volajú spätnoväzobné metódy. To znamená, že ich úlohou je iba zistiť, či chyba nastala a následne oznámiť výsledok tohto zistenia vysielacej stanici prostredníctvom spätného kanála. Detekcia chýb sa môže vykonávať prostredníctvom cyklického kódu, kontrolnej sumy alebo rôznych druhov parít. Medzi najúčinnější patrí cyklický kód, ktorý sa dá ľahko implementovať. Výhodou ARQ metód je, že nie je potrebné pridávať k pôvodným dátam, ktoré sú formované do celkov – rámcov alebo paketov, toľko redundantnej informácie ako v prípade FEC metód. Spätný kanál slúži na prenos dát, ktoré reprezentujú pozitívne alebo negatívne potvrdenie toho, či chyba nastala. V súčasnosti rozoznávame dve základné skupiny ARQ metód [Kosu01]:

- rýdže ARQ metódy
- hybridné ARQ metódy

Rýdže ARQ metódy uvádzané v literatúrach ([Kosu01], [CCIR88], [Rich95], [Cizm99]) sa podľa stratégie opakovania prenosu chybných paketov delia na tri skupiny:

- *Stop-and-wait (SW)* - vysielanie ďalšieho paketu je možné až po prijatí kladného potvrdenia predchádzajúceho paketu
- *Go-back-N (GBN)* - vysielateľ nepretržite vysielá pakety, ak je niektorý paket chybné prenesený, vysielateľ pokračuje v nepretržitom vysielaní od tohto paketu
- *Selective-repeat (SR)* - opäť vysielateľ nepretržite vysielá pakety, ale opakuje iba chybné prenesený paket a potom pokračuje vo vysielaní tam, kde prestal



Hybridné ARQ metódy využívajú schopnosť samoopravných kódov (namiesto detekčných) a taktiež majú komplexnejšiu stratégiu opakovania prenosu chybných paketov. Rozdeľujú sa na hybridné ARQ metódy typu I a typu II [Kosu01]. Hybridné ARQ metódy typu I sa najskôr pokúšajú chyby odstrániť silou použitého kódu a až po zlyhaní týchto pokusov sa pristúpi k opakovaniu chybných paketov. Hybridné ARQ metódy typu II pracujú podobne ako rýdza ARQ metóda, kým nepríde potreba opakovaného prenosu paketu. Opakovane vyslaný paket nie je rovnaký ako pôvodný, ale obsahuje dodatočnú informáciu, pomocou ktorej sa výrazne zlepši schopnosť opravy chýb v pokazenom pakete.

ARQ metóda je charakteristická dynamickou hodnotou oneskorenia, ktorá je závislá od miery chybovosti prenosového kanála a vzdialenosti, ktorú musí signál prekonať medzi stanicami, preto nie je vhodná na prenos údajov niektorých typov služieb ako napríklad telefónnej služby. Môže však, byť použitá pri prenose údajov dátových služieb (napr. e-mail).

Vkladanie dodatočných (redundantných) bitov ku dátam sa pri ARQ a FEC metódach uskutočňuje pred moduláciou dátového signálu. Detailnejšia kategorizácia ARQ metód je spracovaná v [Mali98].

### 2.2.3 Metódy prekladania

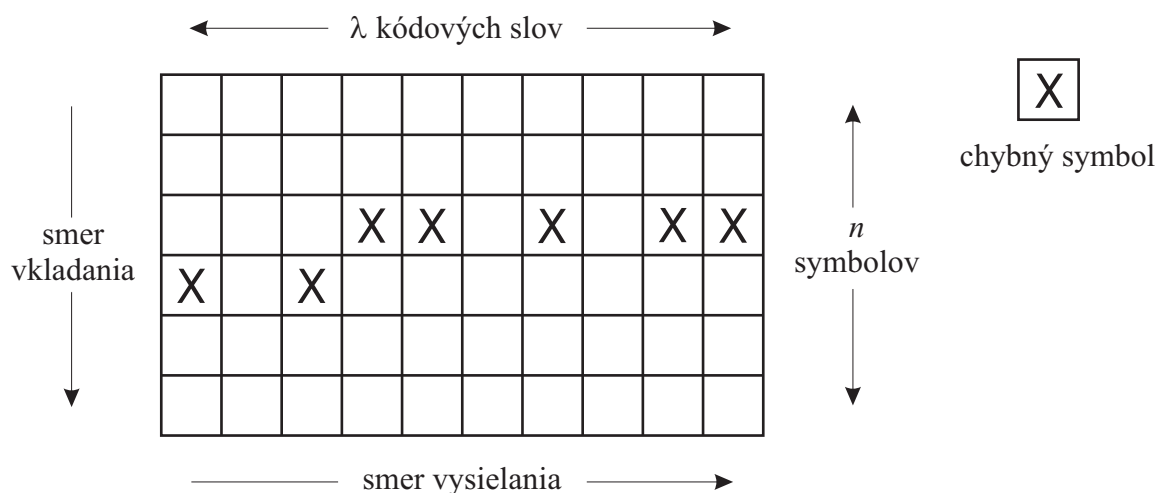
V posledných rokoch sa modelovanie bezdrôtového (najmä mobilného) kanála sústreďuje aj na jeho zhlukovú podstatu chýb spôsobenú napríklad v dôsledku pohybu prijímača v rôznych typoch prostredia. Jednou metódou, ako sa vysporiadať s chybami v zhlukoch, je použiť metódu prekladania [Rich95]. Táto metóda je založená na preusporiadaní údajov pred vyslaním a po prijatí ich opätovnom zostavení (pôvodného poradia). Tým zabezpečíme, že zhuk chýb sa rozptýli pozdĺž vyslaných údajov a ich zhukový výskyt sa zmení na náhodný. A s takýmto výskytom chýb si už dokáže poradiť aj napríklad konvolučný kód.

Poznáme dva základné typy metód prekladania [Swee02]:

- blokové prekladanie
- konvolučné prekladanie

Princíp **blokového prekladania** je znázornený na obr. 2.4. Do stĺpcov matice sa zapisujú pôvodné kódové slová, ktoré sú zložené z  $n$  symbolov. Vysielanie sa však realizuje po riadkoch, v ktorých sa týmto vytvorili nové kódové slová obsahujúce po jednom symbole z každého pôvodného kódového slova. Prijímač realizuje opačný postup, aby získal pôvodné kódové slová. Počet stĺpcov matice sa volá hĺbka prekladania a v našom prípade má hodnotu

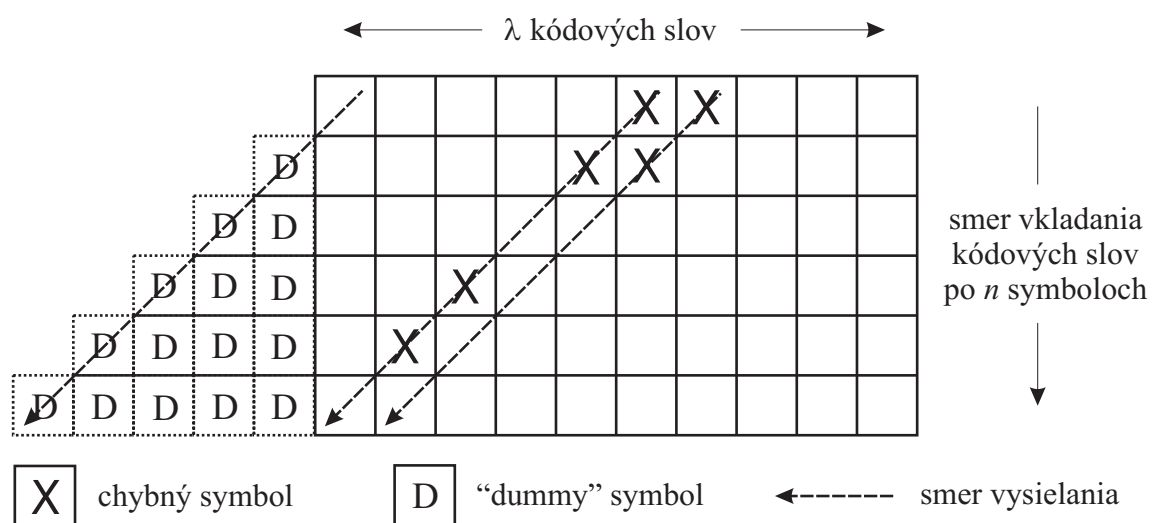
$\lambda$ . Ak sa počas prenosu vyskytne zhuk chýb, ako je znázornené aj na obr. 2.4, zasiahne nám síce výrazne dve nové prenášané kódové slová, ale po opätovnom preusporiadaní v prijímači sa nám zhuk pretransformuje do maximálne po jednej chybe v pôvodnom kódovom slove. Toto samozrejme platí, len ak dĺžka zhuku chýb nie je väčšia ako hĺbka prekladania  $\lambda$ . Ak použitý kód v každom kódovom slove dokáže odstrániť  $t$  chýb, potom počas vysielania kódových slov z matice môže nastať jeden zhuk chýb dĺžky až  $\lambda \cdot t$  alebo  $t$  zhukov dĺžky  $\lambda$ . Pozorný čitateľ určite zistil, že takýto spôsob prenosu nám vnáša do prenosu nové oneskorenie, ktoré má hodnotu  $\lambda \cdot n$  symbolov. Teoreticky však môžeme začať s vysielaním o trochu skôr. V okamihu, keď sa zapíše do matice prvý symbol posledného kódového slova, môže sa dokončiť vysielanie prvého riadku. Potom by teoreticky oneskorenie, vnášané do prenosu, bolo  $(\lambda - 1)n + 1 - \lambda = (\lambda - 1) \cdot (n - 1)$  symbolov. To isté oneskorenie spôsobí ešte aj prijímač, potom celkové oneskorenie spôsobené blokovým prekladaním je  $2 \cdot (\lambda - 1) \cdot (n - 1)$  symbolov. Symbol môže reprezentovať jeden bit alebo až niekoľko bajtov (bajt = 8 bitov).



Obr. 2.4 Princíp blokového prekladania

**Konvolučné prekladanie** vychádza taktiež z matice, do ktorej sa zapisujú po stĺpcoch vstupné kódové slová. Princíp je zobrazený na obr. 2.5. Rozdiel oproti blokovému prekladaniu je v spôsobe vysielania symbolov z matice. Neuskutočňuje sa po riadkoch, ale diagonálne tak, ako ukazujú prerušované čiary na obr. 2.5. Z toho vyplýva, že na začiatku je potrebné doplniť niekoľko dodatočných (D, dummy, nulové hodnoty) symbolov, ktoré majú iba význam výplne. Pri vysielaní je tak každý symbol kódových slov oneskorený o inú hodnotu. Potom dva susedné symboly rovnakého kódového slova sú navzájom posunuté o  $(n + 1)$  symbolov. Aby vznikli dve chyby symbolov v rámci jedného kódového slova, dĺžka

zhľuku chýb počas prenosu kódových slov danej matice musí byť väčšia ako  $(n + 1)$  symbolov. Hodnota  $(n + 1)$  sa volá stupeň prekladania [Swee02].



Obr. 2.5 Princíp konvolučného prekladania

Pri porovnaní oboch metód prekladania je zrejmé, že konvolučné prekladanie nemusí čakať na vyplnenie matice, ale vysielanie môže nastať v okamihu príjmu prvého symbolu prvého kódového slova. Doba, o ktorú budú postupne oneskorené ďalšie symboly, je daná počtom vložených dodatočných symbolov, ktorých je  $(n - 1) + (n - 2) + \dots + 2 + 1 = n \cdot (n - 1) / 2$ . Prijímač pri zostavovaní pôvodných kódových slov spôsobí rovnaké oneskorenie ako vysielateľ pri prekladaní. Celkové oneskorenie je potom  $n \cdot (n - 1)$ . Ak chceme porovnať oneskorenie oboch metód, musíme zabezpečiť, aby mali rovnakú odolnosť voči dĺžkam zhľukov chýb, t.j.  $\lambda = (n + 1)$ . Potom oneskorenie konvolučného prekladania bude  $(\lambda - 1) \cdot (n - 1)$ . Porovnaním s oneskorením blokového prekladania zistíme, že konvolučné prekladanie spôsobuje o polovicu menšie oneskorenie prenosu kódových slov.

#### 2.2.4 Výber vhodnej metódy zabezpečenia

Výber vhodnej metódy zabezpečenia prenosu údajov služby proti chybám, ktoré vznikajú na prenosovej ceste, závisí od typu a charakteristiky prenosového média, ale tiež aj od typu služby, ktorej údaje sú daným prenosovým médium prenášané. FEC metódy, ako už bolo spomenuté skôr, majú konštantnú priepustnosť a nízke oneskorenie, čo vyžadujú interaktívne multimedialne služby (telefón, videotelefón, videokonferencia). Ich nevýhodou je, že ak sa zväčší pravdepodobnosť chyby v prenosovom kanáli, nedokážu poskytnúť očakávanú kvalitu

prenosu údajov služieb, čo je pre niektoré typy služieb neprijateľné ( dátové služby). V tomto prípade je potrebné využiť schopnosť ARQ metód.

Väčšina prenosov cez bezdrôtové kanály je zabezpečená FEC metódami na úrovni fyzickej vrstvy, pretože sú jednoduchšie a spoľahlivejšie. Ako najčastejšie používaný kód je v súčasnosti konvolučný kód s Viterbiho algoritmom dekódovania, ktorý poskytuje dostatočné schopnosti na bezdrôtových kanáloch, ktoré sú charakteristické bielym gausovským šumom (t.j. výskyt chýb je náhodný a nezávislý – AWGN kanály). Mnohé bezdrôtové kanály v dôsledku tienenia, rozptylu a viaccestného šírenia signálu vykazujú výskyt chýb v zhlukoch. V tomto prípade je nutné zaviesť komplexnejšie kódy, aby sa podarilo potlačiť chybovosť kanála na únosnú mieru. V tomto smere sa ukázal ako vhodný kandidát Reed-Solomonový kód, ktorý na rozdiel od konvolučného kódu dokáže opravovať chyby vyskytujúce sa v zhlukoch [Cain97]. Ďalšou možnosťou je použiť vhodnú ARQ metódu. Zo základných sa núkajú GBN a SR metódy. SR metóda dáva lepšie výsledky, ale na úkor potreby veľkých vyrovnávacích pamätí v prijímači. Tento problém nemá GBN metóda a je dokonca jednoduchšia z pohľadu implementácie, ale na druhej strane s rastúcou chybovosťou rýchlo klesá jej priepustnosť. Riešenie tohto problému ponúkajú adaptívne GBN metódy. V súčasnosti najlepšie schopnosti ponúkajú už spomínané hybridné ARQ metódy typu II. Treťou možnosťou, ako sa vysporiadať so zhlukovou chybovosťou kanála, je použitie metódy prekladania symbolov. Nevýhodou tejto metódy je vnášanie ďalšieho oneskorenia do prenosu. Metóda prekladania však ako samotná neodstraňuje chyby, mení iba charakter chýb (zhluky na náhodný výskyt), preto musí byť navrhnutá s návaznosťou na niektorý typ kódu [Bene03]. Výber vhodnej metódy prekladania závisí od zložitosti jej implementácie alebo dovoleného oneskorenia prenosu údajov. Blokové prekladanie je jednoduchšie na implementáciu, ale pri rovnakej schopnosti voči dĺžke zhlukom chýb dáva dva krát väčšie oneskorenie ako konvolučné prekladanie. Konvolučné prekladanie nám ale navyše pridáva ďalšie znaky do prenosu údajov cez kanál.

V súčasnosti ide do popredia výskum viacstupňového kódovania. Prvým príkladom je vytváranie tzv. zreťazených kódov (serial concatenation). Údaje určené na prenos sú zakódované najskôr vonkajším (outer) kódom a potom sa zakódovaná postupnosť zakóduje ešte vnútorným (inner) kódom. Základnou možnosťou je použiť RS kód ako vonkajší kód a konvolučný kód ako vnútorný kód. Ďalším príkladom je vytvorenie tzv. produkt kódu, pri ktorom sa údaje zapisujú do matice a riadky sa zakódujú jedným kódom a stĺpce druhým kódom. Najnovšie štúdie sa zaoberajú iteratívnymi dekódovacími technikami, ktoré reprezentujú napr. turbo kódy [Yeo03].

Ako už bolo spomenuté, konvolučný kód sa značne používa v satelitných komunikáciách pre prenos napríklad digitálnej reči cez AWGN kanál s prijateľnou výslednou chybovosťou okolo  $10^{-5}$  ( $10^{-3} - 10^{-6}$ ). Najčastejšie sa používa konvolučný kód s rýchlosťou 1/2 pre  $K = 7$ . V mobilných komunikáciách ho využíva napríklad GSM štandard. GSM taktiež využíva schopnosti cyklických kódov. Ochrana proti chybám v zhlukoch sa v GSM robí konvolučným prekladaním. Konvolučný kód (s rýchlosťami 1/2 a 1/3) používa aj UMTS, IS-95 a CDMA2000. RS kód využívajú rôzne VSAT siete (napr. Spacenet, Comsat). Comsat VSAT siete používajú taktiež blokové prekladanie. Zreťazenie konvolučného a RS kódu spolu s metódou prekladania používa DVB (digital video broadcasting) systém [Evan99]. Konvolučný turbo kód je navrhnutý pre DVB-RCS (DVB – return channel via satellite).

Táto práca sa ďalej podrobnejšie zaoberá výkonnostným vplyvom metód prekladania na protokol ATM, preto sa otázke komplexnejšieho kódovania detailnejšie venovať nebude. Tieto informácie môže čitateľ nájsť napr. v [Swee02].

## 2.3 Komunikačné protokoly v prostredí bezdrôtových systémoch

Rastúci záujem o dostupnú komunikáciu kdekoľvek a kedykoľvek spôsobil aj široký rozmach bezdrôtových sietí každého druhu (bunkové/mobilné, rádioreléové, satelitné). Postupné vytváranie jednotnej globálnej komunikačnej siete zahŕňa v sebe aj prepájanie (integráciu) rôznych typov sietí (založených na rôznych typoch protokolov). Začleňovanie bezdrôtových sietí do globálnej siete však v sebe prináša problémy pre protokoly, ktoré pôvodne neboli navrhnuté na použitie bezdrôtového kanála s jeho špecifickými vlastnosťami ako prenosové médium. Nasledujúce časti sa zaoberajú stručnou charakteristikou najznámejších typov bezdrôtových sietí a taktiež problémami najpoužívanějších protokolov spôsobené ich integráciou s bezdrôtovými sieťami.

### 2.3.1 LAN siete

Bez lokálnych počítačových sietí (LAN – Local area network) sa v súčasnosti ťažko zaobíde akákoľvek významnejšia firma, inštitúcia, či škola. V poslednom desaťročí sa vyvinulo mnoho úsilia o návrh a implementáciu lokálnych sietí, ktoré však nepoužívajú na prenos pevné médium (drôt, kábel), ale prenos informácií sa uskutočňuje pomocou elektromagnetických vĺn. Tieto tzv. bezdrôtové LAN siete prinášajú niekoľko výhod:

- poskytujú pružné zavedenie novej LAN siete a jej rozširovanie – nie je potreba inštalácie káblov, čím čas vytvorenia novej siete je značne nižší
- podpora mobility celej siete ako aj používateľov
- priama podpora broadcast a multicast služieb
- dlhodobé šetrenie nákladov

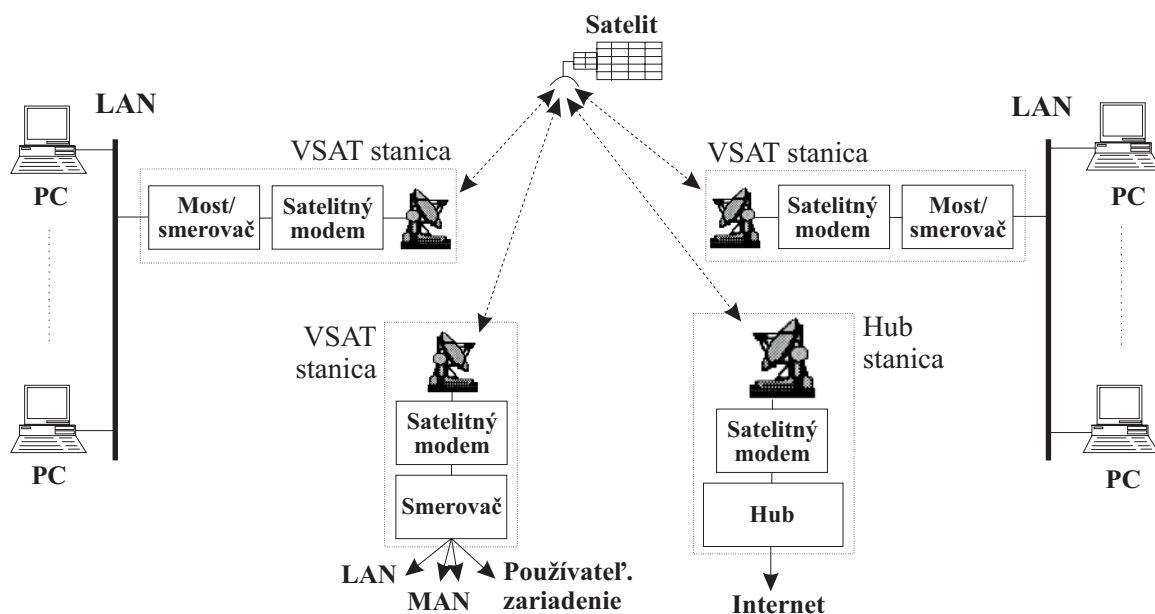
Na druhej strane rýchlosť prenosu údajov je v súčasnosti maximálne 54 Mb/s v porovnaní s 1 Gb/s prenosom v káblových LAN sieťach [Heck03]. Bezdrôtové siete používajú na prenos rádiové alebo infračervené vlny. Výhody použitia infračervených vln na prenos sú vo veľkosti dostupného pásma, imúnosti voči rádiovým interferenciám, nízkej spotrebe a malej veľkosti potrebných zariadení. Tieto vlny sa však šíria priamym smerom a odrážajú od objektov, ale nedokážu prejsť cez nepriehľadné objekty a prekážky, dokonca veľké tlmenie predstavuje aj sklo. Preto takéto LAN siete sú obmedzené na malé oblasti s priamou viditeľnosťou. Použitie rádiových vln rozširuje oblasť použitia, pretože dokážu preklenúť aj fyzické prekážky. Tlmenie rôznych prekážok plus viaccestné šírenie signálu spôsobuje, že tlmenie signálu (chybovosť kanála) je omnoho väčšie ako pri káblových LAN sieťach. Nevýhodou bezdrôtových LAN sietí je aj to, že kvalita linky sa mení nielen so zmenou v priestore, ale aj v čase. Ďalšou nevýhodou je väčšie oneskorenie prenosu.

Základnými predstaviteľmi bezdrôtových LAN sietí je rodina štandardov IEEE 802.11 a štandard HIPERLAN [Bing00]. Pretože tieto protokoly boli vytvorené priamo na tento účel, niektoré kritéria ako napr. už spomínaná zvýšená chybovosť kanála, boli zohľadnené pri ich návrhu. Napriek tomu sú problémy spojené s bezdrôtovými LAN sieťami, ktoré je potrebné ešte ďalej analyzovať a riešiť (napr. problém skrytého uzla, zachyteného výkonu signálu, zdroje interferencií).

Táto práca sa venuje analýze protokolov použitých v bezdrôtových sieťach, ktoré pôvodne neboli priamo stavané na prenos ich údajov cez bezdrôtový kanál, preto výkonnosť protokolov bezdrôtových LAN sietí nebude ďalej v práci analyzovaná. Podrobnejšie informácie môže čitateľ nájsť v [Bing00].

### 2.3.2 WAN siete (X.25, Frame Relay)

Široký rozmach lokálnych (metropolitných) sietí si vyžiadal ich vzájomné prepojenie. Toto prepojenie je realizované rozľahlými sieťami (WAN – Wide area network), ktoré môžu byť reprezentované buď prenajatými linkami (analogovými alebo digitálnymi) alebo štruktúrovanou verejnou sieťou. Fyzické linky charakterizované konečnou BER neposkytujú bezchybné doručenie dát do cieľa, preto táto zodpovednosť je prenechaná na sieťové prepájacie uzly alebo vyššie vrstvy protokolov koncových staníc. Štruktúrovaná verejná dátová sieť je založená na niekoľkých smerovačoch a prenosových linkách a prepájanie uskutočňuje na základe virtuálnych spojení [Yang92].

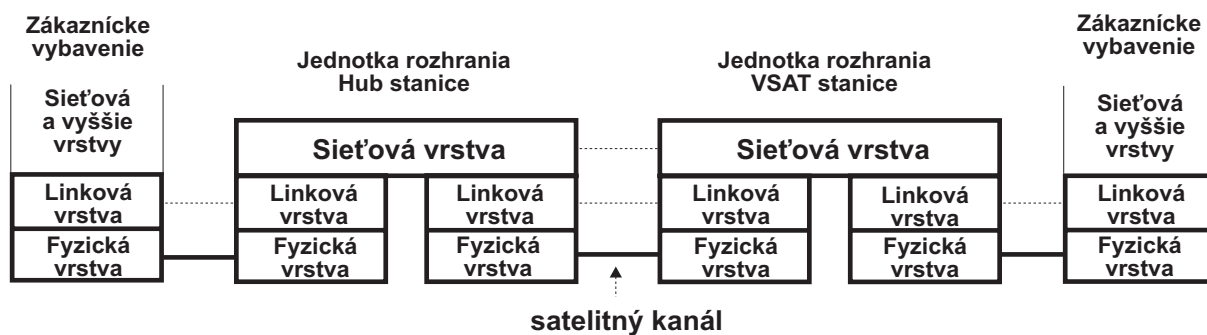


Obr. 2.6 Pripojenie dátových sietí do Internetu pomocou VSAT systému

Najrozšírenejšou verejnou paketovou sieťou do polovice 90-tych rokov bola sieť založená na protokole X.25. Neskôr však táto sieť už nedokázala spĺňať nároky používateľov, či sa to týka rýchlosti alebo prenosu izochrónnych dát (audio, video). Preto bola vyvinutá na začiatku 90. rokov nová WAN technológia nazvaná Frame Relay (FR). Ďalšia možnosť prepojenia viacerých LAN/MAN sietí sa naskytla využitím satelitných liniek. Satelitná sieť môže priamo prenášať rámce medzi vzdialenými LAN sieťami a môže byť považovaná za sieť s dvomi uzlami. Medzi výhody využitia satelitných liniek pre vzájomné prepojenie LAN sietí patrí jednoduché prístupové rozhranie, schopnosť štatistického multiplexovania a relatívne vysoká prístupová rýchlosť. Pritom však výkonnosť satelitných sietí môže byť

postupne zlepšovaná za pomoci výkonných linkových protokolov [Evan99]. Súčasný satelitný modem umožňuje používateľom využívať prenosové rýchlosti od 19,2 kbit/s do 2 Mbit/s (pri spojení s možnosťou pridelovania pásma na požiadanie). Prepojenie LAN siete pomocou satelitov bolo umožnené zavedením špeciálnych VSAT terminálov [Ever92]. Príklad možného prepojenia LAN sietí a ich pripojenia do Internetu je uvedený na obr. 2.6.

Satelitný modem uskutočňuje konkrétne modulácie (FDM, PSK - BPSK, QPSK) signálov, teda ich prispôsobenie k satelitnej linke. Okrem toho tu môžeme zahrnúť RF elektroniku (HPA, konvertory), ktorá je priamo napojená na anténu. Protokolová reprezentácia VSAT siete je znázornená na obr. 2.7 [Ever92], [Fahm95]. VSAT stanica a Hub stanica obsahujú tri vrstvy. Hlavnou úlohou sieťovej vrstvy je zabezpečenie spoľahlivého doručenia dát medzi stanicami. Smerovanie je minimálne, pretože VSAT sieť má hviezdicovú štruktúru. VSAT a Hub stanica obsahuje dva druhy linkových protokolov. Jeden slúži na spoluprácu s pozemnou LAN sieťou a druhý na prenos dát cez satelitnú sieť. Často využívaným satelitným linkovým protokolom je viacnásobná prístupová metóda SREJ-ALOHA, ktorá poskytuje efektívne zdieľanie kanála pre koncové aplikácie a pružnosť pre premenlivé veľkosti správ a rýchlosti prevádzky [Ever92]. Úlohou sieťovej vrstvy je predávať dátové pakety od satelitného linkového protokolu do LAN linkového protokolu a naopak.



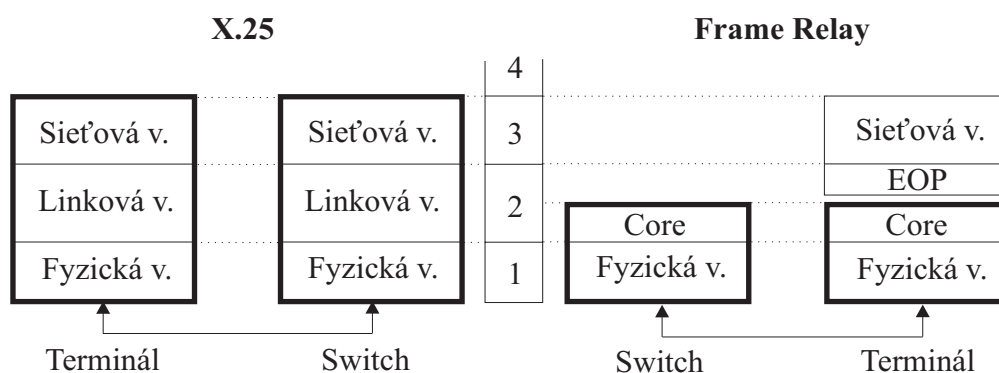
Obr. 2.7 Protokolová reprezentácia VSAT siete

Ak chceme využiť satelitné linky pre prepojenie dátových sietí, je potrebné optimalizovať parametre ako veľkosť okien, prenosové oneskorenie, veľkosť rámcov, linkové protokoly, riadenie vyrovnávacích pamätí, prevádzku (počet staníc, ich aktivita) a prenosové rýchlosti.

Sieť X.25 je založená na trojvrstvovom modeli, zatiaľ čo FR iba na dvojvrstvovom [Truc97], [Bois92]. Obidve siete vychádzajú z HDLC protokolu, ktorý má veľa verzii (SDLC, LAP-B, LAP-D). FR používa dlhšie rámce ako X.25 vďaka vyšším prenosovým rýchlostiam,



pri ktorých môže pracovať a kvalitnejším prenosovým médiám. Obe siete sú založené na poskytovaní spojovo orientovaných služieb. X.25 buduje spojenia na úrovni tretej vrstvy, FR na úrovni druhej vrstvy. Sieť X.25 je charakterizovaná komplikovaným protokolovým modelom, pretože veľa funkcií je uskutočňovaných aj v tretej a aj v druhej vrstve. Tak napríklad potvrdzovanie je lokálne a koncové. Lokálne znamená, že potvrdzovanie je uskutočňované medzi každými dvomi uzlami v sieti, cez ktoré paket prechádza (store & forward). Tento systém poskytuje na jednej strane spoľahlivé doručenie údajov do cieľa, ale na druhej strane je linka zahlcovaná nadmernou réziou, čo vedie k nízkej priepustnosti linky. V prípade satelitnej linky (alebo všeobecne bezdrôtovej linky s vyššou BER) je to kritické, pretože dostupná šírka pásma je obmedzená. Sieť X.25 používa oknový mechanizmus [Tane96]. S tým súvisí správna voľba jeho veľkosti, aby v prípade malého okna sa zbytočne nečakalo na potvrdenie a tak linka ostala nevyužitá a naopak, aby okno nebolo príliš veľké, pretože by mohlo nastať zahltenie siete a tým zbytočné zahadzovanie paketov.



Obr. 2.8 Protokolový model sietí X.25 a Frame Relay

Frame Relay na rozdiel od siete X.25 poskytuje iba koncové potvrdzovanie, čo znižuje množstvo rézie pri prenose údajov. Okrem toho umožňuje prenos izochrónnych dát, čo sieť X.25 neumožňuje a to bolo jedným z dôvodov, prečo FR vznikol a začal nahrádzať X.25 [Tane96]. Jeho väčší rozmach pozastavil príchod protokolu ATM. Spojenie medzi koncovými uzlami je zložené z jednotlivých virtuálnych liniek medzi dvomi susednými uzlami prípadne môžu zahŕňať virtuálnu linku medzi VSAT stanicou a Hub stanicou. Pri výstavbe spojenia je dohodnutá informačná rýchlosť CIR, ktorou môže používateľ vysielat' nepretržite bez toho, aby dáta boli zavrhnuté v prípade zahltenia siete. Okrem toho je definovaná ďalšia hranica - maximálna rýchlosť daná množstvom rámcov  $B_e$  (Excess burst size) poslaných v danom časovom intervale. Ak používateľ vysielá rámce nad CIR po túto hranicu, sú rámce označené špeciálnym bitom DE v hlavičke na rámce s nižšou prioritou a sú v prípade zahltenia uzla

zavrhované [Bois92]. Teda FR nevyužíva oknový mechanizmus na riadenie toku a preto s tým súvisiace problémy sa pri prenose cez satelitnú linku nevyskytujú. Konkrétny satelitný systém prepájajúci FR uzly možno nájsť v [Act97].

### 2.3.3 TCP/IP

Protokolová sada TCP/IP (Transmission control protocol/Internet protocol) je základnou protokolovou sadou Internetu a umožňuje tak vzájomnú komunikáciu medzi koncovými uzlami. Vrstvový protokolový model je znázornený na obr. 2.9, z ktorého vidieť, že IP pracuje na úrovni sieťovej vrstvy, kým TCP je protokol transportnej vrstvy. IP je nespoľahlivý protokol, čiže nie je záruka, že údaje budú doručené do cieľa, pretože ak je práve spracovávaný paket chybný alebo uzol je zahltený, paket je zahodený. IP je protokol bez spojovej orientácie. Pre IP je každý paket nezávislý a tak aj s ním zaobchádza (poradie vyslaných a prijatých paketov nemusí byť rovnaké). Z hľadiska liniek s väčšou BER zlepšovanie výkonnosti IP protokolu sa neuvažuje, pretože by musela nastať úprava tohto protokolu vo všetkých koncových a sieťových uzloch, čo je nerealizovateľné. Napriek tomu, že protokolová sada siete Internet obsahuje na úrovni transportnej vrstvy dva protokoly: TCP a UDP, protokol TCP je využívaný väčšinou bežných používateľských aplikácií. Je to spôsobené tým, že TCP poskytuje spoľahlivé, transparentné a duplexné doručenie údajov medzi koncovými používateľmi [Stev96].

Aplikačná v.	Telnet, FTP, e-mail (SMTP), www, SNMP, ...
Transportná v.	TCP, UDP
Sieťová v.	ICMP <b>IP</b> IGMP
Linková a fyzická v.	Ethernet, Frame Relay ATM, IEEE 802.x

Obr. 2.9 Referenčný model TCP/IP

Protokol TCP bol oficiálne zadefinovaný štandardom RFC 793 v septembri 1981 [Rfc81]. Od tohto roku prešiel niekoľkými zmenami, aby sa prispôbil novým komunikačným systémom. TCP je spojovo orientovaný, preto údaje pre užívateľa sú odovzdávané v správnom poradí. Prenos TCP segmentov je realizovaný pomocou pohyblivého okna (sliding window) a každý správne prijatý segment prijímačom musí byť

potvrdený. Vysielač po vyslaní segmentu spúšťa časovač nastavený na hodnotu RTO (Retransmission time out). Ak nie je prijaté potvrdenie tohto segmentu, kým uplynie RTO, segment je opätovne vyslaný. TCP je orientovaný tokovo, čo znamená, že veľkosť okna a sekvenčné čísla segmentov sú udávané v bajtoch [Stev96].

Komplikácie pri prenosoch údajov začali vznikať, keď sa LAN siete prepájali pomocou rozľahlých WAN sietí, ktoré umožnili prepojiť LAN siete vzdialené až stovky kilometrov, ale ich kapacita bola rádovo menšia. TCP vysielač začína prenos údajov po vytvorení spojení tým, že vyšle toľko segmentov koľko mu umožnilo okno. Takýto spôsob začatia vysielania však viedol k vzniku mnohých zahŕtení v sieti a častokrát to skončilo úplným kolapsom, kedy rýchlosť prenosu klesla na niekoľko desiatok bitov za sekundu. Na odstránenie takýchto stavov v sieti boli navrhnuté nasledovné modifikácie protokolu TCP [Rfc97], [Fall96].

### **I. Pomalý štart (Slow start).**

Množstvo segmentov, ktoré môže vysielač vyslať na začiatku je výrazne znížený. Zaviedlo sa ďalšie okno – *cwnd* (congestion window). Počet segmentov, ktoré môže vysielač vyslať, je dané minimálnou hodnotou z veľkosti *cwnd* a okna dohodnutého s prijímačom. Na začiatku je hodnota *cwnd* nastavená na jeden segment, čiže vysielač môže vyslať iba jeden segment a potom musí čakať na jeho potvrdenie. Po prijatí každého potvrdenia sa hodnota *cwnd* zvýši o jeden segment, čím jeho hodnota rastie exponenciálne.

### **II. Vyhýbanie sa zahŕteniu (Congestion avoidance)**

Algoritmus vychádza z predpokladu, že strata segmentu v sieti je spôsobená s najväčšou pravdepodobnosťou v dôsledku zahŕtenia. Vyžaduje, aby druhá premenná *ssthresh* bola udržiavaná. Na začiatku spojenia sú nastavené *cwnd* na 1 a *ssthresh* na 65535 oktetov. Tento algoritmus sa často implementuje spolu s pomalým štartom. V prípade zahŕtenia je polovica z aktuálnej veľkosti okna uložená do *ssthresh*. Keď je zahŕtenie v sieti indikované vypršaním RTO, nastáva pomalý štart. Ak pri pomalom štarte dosiahne stav *cwnd*=*ssthresh*, prejde sa na vyhýbanie sa zahŕteniu, ktoré zvyšuje veľkosť *cwnd* lineárne teda o jeden segment na jeden RTT (Round trip time).

### III. Rýchle opätovné vyslanie (Fast retransmit)

Tento algoritmus bol vytvorený na vylepšenie algoritmu vyhýbania sa zahlteniu. Je založený na tom, že ak prijímač prijme segment mimo poradia, vyšle opakovane posledné potvrdenie ACK (táto činnosť nebola jednoznačne definovaná v RFC 793). Vysielač po prijímaní takýchto potvrdení vie, že daný segment bol stratený, ale tok segmentov v sieti stále existuje. Preto po prijímaní tretieho rovnakého ACK opätovne vyšle daný segment bez ohľadu na stav RTO.

### IV. Rýchle zotavenie (Fast recovery)

Tento algoritmus znamená, že po opätovnom vyslaní segmentu v predošlom algoritme, sa nespustí pomalý štart, ale vyhýbanie sa zahlteniu. Hneď po vyslaní segmentu je *ssthresh* zväčšený o 3 segmenty. Po každom duplicitnom ACK je *cwnd* zväčšený o 1 segment. Ak dovoľuje aktuálne okno, vyšle sa nový segment. Keď príde potvrdenie nových údajov, hodnota *ssthresh* sa uloží do *cwnd*.

Implementácia bezdrôtových (mobilných, satelitných) systémov prináša nové možnosti pre prepájanie koncových používateľských zariadení, ale prináša aj nové problémy, ktoré treba riešiť. Veľa nových komunikačných systémov (bezdrôtové, optické) je charakteristických veľkou hodnotou súčinu “*šírka pásma*\**RTT*” [Laks97], ktorá vlastne udáva koľko dát treba na vyplnenie celej cesty v takomto systéme. Satelitné systémy sú okrem značnej chybovosti a oneskorenia charakteristické aj obmedzenou šírkou pásma, preto ak by sme chceli skúmať správanie sa pôvodne definovaného protokolu TCP pomocou RFC 793 na satelitnej linke, dospeli by sme opäť k záveru, že problém vzniku zahltenia je tu veľmi pravdepodobný [Hass00].

Využitie pomalého štartu a vyhýbania sa zahlteniu odstraňuje tento problém, ale na druhej strane spôsobuje zníženie využitia satelitného kanála. Je to spôsobené tým, že tieto algoritmy vychádzajú z predpokladu, že zahodenie paketu v sieti v dôsledku chyby je veľmi málo pravdepodobné. Lenže na satelitnej linke je táto pravdepodobnosť značne väčšia. Výkonnosť algoritmov III a IV je opäť znížená kvôli veľkej chybovosti. V tomto prípade, ak sa stratí viacej segmentov vyslaných v rámci jedného okna (*cwnd*), je veľkosť tohto okna postupne znižovaná a tým aj využitie satelitného kanála. Metóda, ktorá zlepšuje využitie kanála sa nazýva selektívne potvrdzovanie **SACK**. Ako už z názvu vyplýva, tento algoritmus umožňuje prijímaču potvrdzovať priamo prijaté segmenty, teda aj tie, ktoré prišli mimo poradia. To umožňuje vysielaču jasne ukázať, ktoré segmenty ešte prijímač neprijal a pravdepodobne boli zahodené v sieti v dôsledku chyby. Prispôbenie algoritmov I až IV pre

využitie SACK voľby zvyšuje výkon TCP protokolu tým, že nie je spúšťaný zbytočne pomalý štart a preto veľkosť okna *cwnd* nie je drasticky znižovaná na hodnotu jedného segmentu [Rfc99]. Niektorí autori navrhujú zvýšiť počiatočnú veľkosť *cwnd* pri pomalom štarte.

Ďalší problém je spojený s rýchlym nájdením maximálnej možnej veľkosti segmentu prenesiteľného cez kanál bez fragmentácie. Pre pomalý štart sú výhodnejšie čo najväčšie segmenty, aby sa zväčšilo využitie kanála. Iný problém je spôsobený veľkosťou okien. Súčasná veľkosť okien umožňuje prenášať cez satelitný kanál rýchlosťou iba 117 027 bajtov/s. Aby sa vyriešil tento nedostatok, zaviedla sa v hlavičke segmentu nová voľba “window scale option” na zväčšenie veľkosti okna (TCP-LW) [Rfc99]. Zväčšenie veľkosti okien sa dá obísť aj metódou, ktorá vytvára niekoľko súčasných spojení miesto jedného, aby sa využil kanál čo najefektívnejšie. Tento prístup je však spojený s vytvorením manažéra spojení na oboch koncových uzloch.

V súčasnosti existuje mnoho ďalších metód ako napríklad rozdelenie TCP spojenia do niekoľkých samostatných segmentov (fyzických) alebo smerovače v sieti ovplyvňujú prevádzku (napríklad generujú ACK), aby “oklamali” TCP [Rfc00].

### 2.3.4 ATM siete

Ako základný prenosový mód pre širokopásmovú ISDN sieť bol zvolený ATM (Asynchronous transfer mode). ATM je najslubnejšia technológia na vytvorenie tzv. informačnej superdiaľnice. ATM zahŕňa prepájacie a multiplexné techniky a je stále nádejným kandidátom sieťovej technológie budúcnosti. Ponúka používateľom integráciu hlasu, videa a dátových služieb spolu s možnosťou pridelovania pásma na požiadanie.

#### 2.3.4.1 Základná charakteristika

Asynchrónny prenosový mód je založený na rýchlom paketovom prepájaní a asynchrónnom časovom delení, ale dokáže zabezpečiť časovú transparentnosť. Medzi jeho základné vlastnosti patrí [Kuku97]:

- paket konštantnej dĺžky
- spojovo orientovaný prenos
- sieťové uzly nevykonávajú kontrolu chýb
- sieťové uzly nevykonávajú kontrolu toku dát a prevádzky
- transparentné prepájanie buniek v smerovacích uzloch

Paket v ATM sieti sa nazýva **bunka**. Každá bunka má dĺžku 53 bajtov, ktoré sa delia na dve polia. Prvé pole tvorí hlavička, ktorá má 5 bajtov a zvyšnú časť tvorí informačné pole, ktoré má 48 bajtov. Hlavička bunky obsahuje informácie ako identifikátory virtuálneho spojenia, typ informačného poľa, prioritu bunky v prípade straty a zabezpečenie hlavičky proti chybám. Konštantná dĺžka hlavičky zjednodušuje vo významnej miere smerovanie v spojovacích uzloch. Asynchrónne časové delenie buniek do multiplexu je realizované na základe štatistických multiplexorov [Kyas95].

**Spojovo orientovaný prenos** je spojený s výstavbou spojenia (virtuálneho okruhu) pre prenos dát a na konci s jeho uvoľnením. Vďaka tomu sú všetky bunky prepravované po tej istej ceste. Zostavenie spojenia je realizované signalizáciou a meta-signalizáciou.

Sieťové uzly **kontrolujú iba hlavičku** kvôli jej smerovacom obsahu. Informačné pole sa nekontroluje, lebo ATM sa spolieha na optické linky a tiež, aby sa zabezpečila časová transparentnosť.

Pri preťažení sú **zavrhované bunky** bez ďalších opatrení. Kontrola je uskutočňovaná ešte na UNI (User network interface) rozhraní. Bunky sú v smerovacích uzloch prepájané hardvérovo na základe smerovacích tabuliek a informácii v hlavičke bunky.

Protokolový referenčný model B-ISDN sa skladá z troch rovín a niekoľkých vrstiev [Stal98]. Roviny rozdeľujeme na riadiacu, ktorá má na starosti réžiu okolo spojení, používateľskú, ktorá riadi tok informácií medzi používateľmi a manažment roviny, ktorá zabezpečuje monitorovanie a dohľad nad sieťou. Vrstvy rozlišujeme na fyzickú, ATM a AAL (ATM adaptation layer) vrstvu a vyššie vrstvy. Fyzická vrstva slúži na zabezpečenie prenosu buniek cez prenosové médium. Na prenos sa môže využiť buď priamo multiplex ATM alebo SDH prípadne PDH. ATM vrstva, ktorá je spoločná pre všetky informačné toky, vykonáva všetky úlohy spojené s hlavičkou ATM bunky. AAL vrstva má za úlohu vytvoriť rozhranie medzi vyššími vrstvami a ATM vrstvou. Vkladá dátové jednotky z vyšších vrstiev do ATM buniek. AAL vrstva podporuje niekoľko typov protokolov a je závislá od poskytovaných služieb. AAL vrstva sa delí na dve podvrstvy: SAR (Segmentation and reassembly sublayer) a CS (Convergence sublayer). SAR podvrstva vykonáva segmentáciu údajov CS podvrstvy alebo vyšších vrstiev a naopak. CS podvrstva vykonáva funkcie závislé od služieb. Vyššie vrstvy sú už závislé od používateľa a prepojenie k AAL vrstve je uskutočňované prostredníctvom prístupových bodov SAP [Gagl91], [Siu94].

ATM vrstva poskytuje unicast (point-to-point), broadcast (point-to-multipoint) a multicast (multipoint-to-multipoint) spojenia. V súčasnosti sú využívané prevážne point-to-point spojenia a zriedkavo point-to-multipoint spojenie.

B-ISDN sieť, založená na prenosovom móde ATM, predpokladá poskytovanie všetkých širokopásmových služieb. Keď sa budujú spojenia v ATM sieti, používatelia môžu špecifikovať parametre spojené so žiadanou kvalitou služby QoS (Quality of Service) [Kota97], [Fahm95]. Medzi tieto parametre patrí:

- Špičková prenosová rýchlosť - Peak Cell Rate (PCR) - maximálna rýchlosť, ktorou používateľ môže vysielat'
- Udržiavaná prenosová rýchlosť - Sustained Cell Rate (SCR) - priemerná rýchlosť udržiavaná zdrojom
- Minimálna prenosová rýchlosť - Minimal Cell Rate (MCR) - minimálna prenosová rýchlosť žiadaná používateľom
- Veľkosť zhluku - Burst Tolerance (BT) - udáva maximálnu veľkosť zhluku dát, ktorá môže byť vysielaná maximálnou rýchlosťou PCR
- Početnosť stratených buniek - Cell Loss Ratio (CLR) - udáva pomer chybné prenesených buniek po spojení k všetkým bunkám prenesených po danom spojení
- Prenosové oneskorenie buniek - Cell Transfer Delay (CTD) - oneskorenie, ktoré získa bunka medzi vstupným a výstupným bodom (zahŕňa oneskorenie šírením, oneskorenie v prepínačoch a služobné časy v daných bodoch)
- Zmeny oneskorenia buniek - Cell Delay Variation (CDV) - miera kolísania CTD

Typ informácií	Používateľské požiadavky	Bitová rýchlosť [Mbit/s]	Maximálne CTD [ms]	Max. CDV [ms]	Maximálne BER	Maximálne CLR
zvuk obojsmerne	ako u telefónu	0,064	25 alebo 250	1	$10^{-5}$	$10^{-3}$
videotelefón (MPEG-1, H.261)	30 min bez chyby	$\leq 2$	250	1	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$10^{-7}$
audio (Hi-Fi)	ako CD kvalita	0,192 - 1,411	1000	1	$10^{-5}$	$10^{-7}$
video (MPEG-2)	30 min bez chýb	$\leq 10$	500	0,5	$5,4 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-8}$
video (štúdio. kvalita)	2 hod. bez chýb	20 - 50	500	0,5	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$10^{-9}$
dáta (prenos súborov)	bez chýb	0,256 - 8	1000	*)	$10^{-7}$	$10^{-6}$
riadiace dáta (RPC)	bez chýb	0,016	100	*)	$10^{-7}$	$10^{-6}$

\*) nie je to kritická hodnota

Tab. 2.2 Používateľské požiadavky pre rôzne služby

Na udržanie žiadanej kvality služby počas celého trvania spojenia na dohodnutej úrovni pôsobia negatívne niektoré faktory. Medzi tieto faktory patrí BER a posledné tri parametre z predchádzajúcich vymenovaných (CLR, CTD, CDV). Tab. 2.2 udáva najdôležitejšie požiadavky pre rôzne typy služieb [Mali97].

Každá služba realizovaná vyššími ATM vrstvami používa špeciálny druh AAL protokolu [Kuku97]. CCITT definovala štyri základné služby a im zodpovedajúce protokoly:

- Trieda A - AAL protokol typ 1 - spojovo orientované služby s konštantnou prenosovou rýchlosťou - CBR (Constant bit rate)
- Trieda B - AAL protokol typ 2 - spojovo orientované služby s premenlivou prenosovou rýchlosťou - VBR (Variable bit rate)
- Trieda C - AAL protokol typ 3/4 a typ 5 - spojovo orientované služby, VBR
- Trieda D - AAL protokol typ 3/4 a typ 5 - služby bez spojovej orientácie, VBR

Protokol AAL typ 1 je určený na prenos telefónnych hovorov a nekomprimovaného videa. Protokol priradí každému 47 bajtovému segmentu údajov hlavičku dlhú 1 bajt, ktorá obsahuje pole s poradovým číslom a jeho ochranu. Informačné pole nie je zabezpečené.

Protokol AAL typ 2 je určený pre efektívny prenos údajov v paketoch s malou a premenlivou veľkosťou, pričom údaje sú citlivé na oneskorenie (napr. komprimovaný video signál). Protokol bol štandardizovaný v roku 2000 a AAL vrstvu (na rozdiel od ostatných protokolov) delí na podvrstvy: CPS (Common part sublayer) a SSCS (Service specific CS) [Itu00]. SSCS podvrstva môže byť vynechaná. CPS podvrstva pracuje s CPS paketmi, ktoré potom vkladá alebo segmentuje do CPS-PDU. CPS paket sa skladá z hlavičky (3 bajty) a informačnej časti. Hlavička obsahuje identifikáciu používateľa (CID), počet užitočných bajtov v informačnej časti (LI), špecifickú informáciu CPS používateľov alebo manažmentu (UII) a kód pre zabezpečenie hlavičky (HEC). CPS-PDU obsahuje výplň, informačnú časť a jednobajtovú hlavičku (štartovacie pole) s ofsetovým poľom, poradovým číslom a paritou.

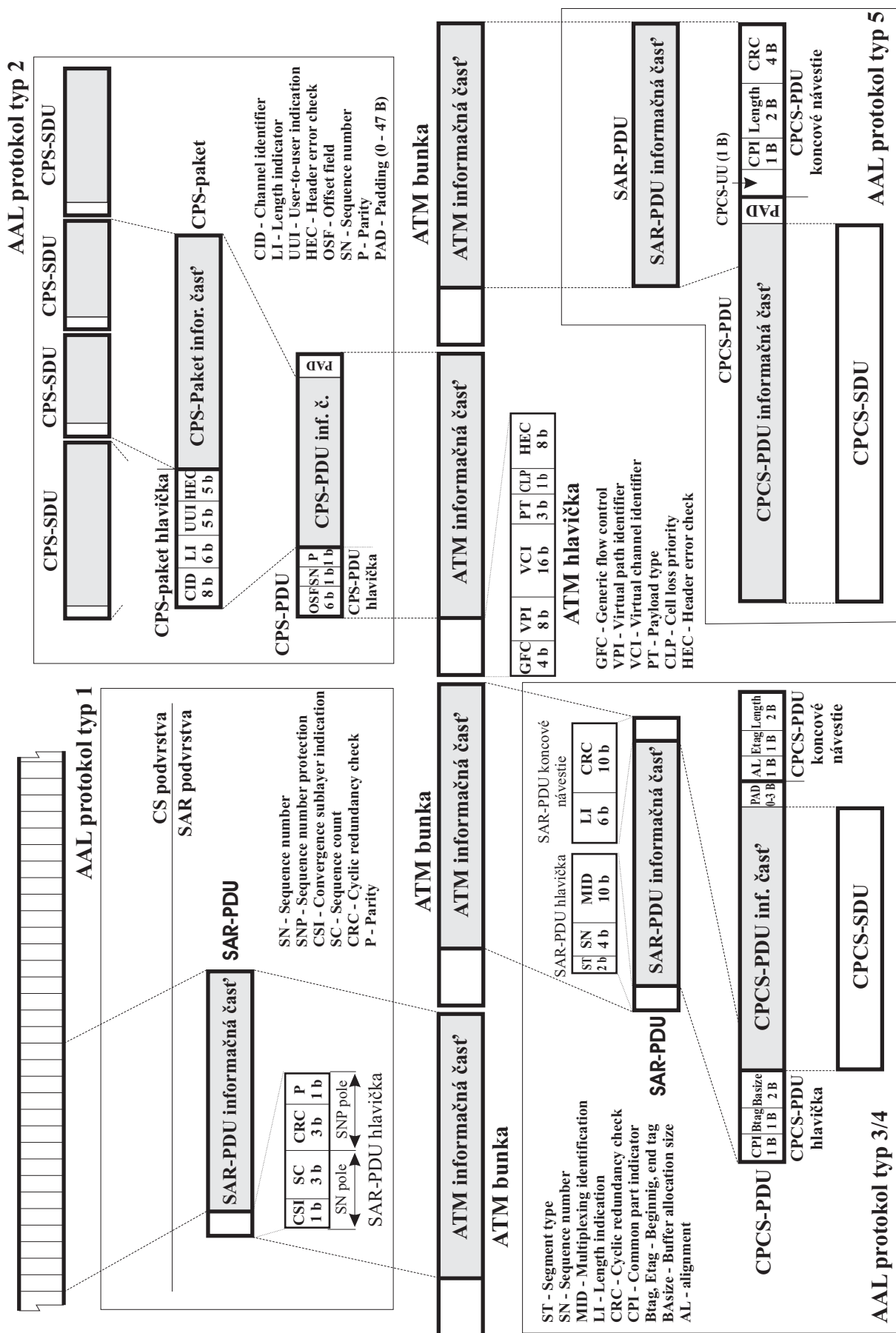
Protokol AAL typ 3/4 rozdeľuje CS podvrstvu na dve časti. Činnosť vrchnej (SSCS) závisí od módu operácie (message, stream). Spodná časť (CPCS – Common part CS) prijíma hotové SSCS-PDU a pridáva hlavičku (4 bajty), výplň (< 4 bajty) a koncové návestie (4 bajty). Informácie v hlavičke a koncovom návestí slúžia pre identifikáciu práve prenášanej CPCS-SDU, detekciu a správu chýb (Btag, Etag, Length), rezervovanie potrebnej pamäte v prijímači (Bsize, CPI) a zahadzovanie nekompletne prijatej CPCS-PDU. Hotová CPCS-PDU sa pošle SAR podvrstve, ktorá ju rozdelí na segmenty dlhé 44 bajtov. Každému



segmentu pridá vlastnú hlavičku a koncové návestie, ktoré obsahujú typ segmentu (ST), poradové číslo (SN), multiplexnú informáciu (MID), dĺžku informačného poľa (LI) a zabezpečovací (CRC – Cyclic redundancy code) kód. Hotová SAR-PDU je poslaná ATM vrstve. Celý proces prebieha samozrejme aj naopak.

Protokol AAL typ 5 reprezentuje značne zjednodušenú verziu protokolu AAL typ 3/4 a je určený pre prenos spojovo orientovaný aj bez spojovej orientácie a pre prenosy údajov, kde nie je časová závislosť medzi prijímačom a vysielačom. SAR-PDU v tomto prípade neobsahuje ani hlavičku ani koncové záhlavie. Vytvorí sa delením CPCS-PDU na segmenty veľkosti 48 bajtov. CPCS-PDU sa vytvorí pridaním výplne a koncového záhlavia k SSCS-PDU. Koncové záhlavie nesie informáciu medzi používateľmi (CPCS-UU), výplňový bajt pre budúce indikácie (CPI), dĺžku informačného poľa (Length) a zabezpečovací kód (CRC).

Graficky sú jednotlivé AAL protokoly znázornené na obr. 2.10. Detailnejšie informácie o jednotlivých poliach PDU môže nájsť čitateľ v [Kuku97], [Kyas95], [Stal98].



Obr. 2.10 Formát a štruktúra PDU pre vrstvy ATM a AAL (všetky typy protokolov)

### 2.3.4.2 Úvod do bezdrôtových ATM sietí

V súčasnosti je rozpracovaných niekoľko typov architektúr, ktoré spájajú siete založené na protokole ATM so sieťami využívajúce bezdrôtové kanály na prenos informácií medzi používateľmi. Niektoré už je možné použiť, mnohé sú v štádiu návrhov a testovania. Jednotlivé architektúry môžu využívať pozemné vysielacie (bunkové) alebo satelity. Výhody, ktoré nám prináša spojenie napríklad satelitných systémov a ATM sietí, sú nasledovné:

- použitím satelitov môžu byť ATM služby poskytované do širokých geografických oblastí (vzdialené vidiecke, mestské, neprístupné oblasti)
- satelity ponúkajú flexibilitu čo sa týka konfigurácie siete a pridelovania kapacít odlišným miestam nachádzajúcich sa v rôznych geografických oblastiach a využívajúcich ATM siete
- satelity poskytujú broadcast a multipoint-to-multipoint možnosti spolu s rýchlym nastavením siete (môžu byť využité pre multipoint-to-multipoint v ATM sieťach)
- satelitné systémy poskytujú veľmi pružné pridelovanie pásma na základe požiadaviek (zhoduje sa to so základnou vlastnosťou ATM siete, ktorá poskytuje tiež pridelenie pásma na žiadosť)
- je veľmi jednoduché zavedenie nového používateľa do systému jednoduchým inštalovaním ATM stanice
- satelitný systém môže fungovať ako rezerva pre optické prenosové prostredie v prípade jeho výpadku

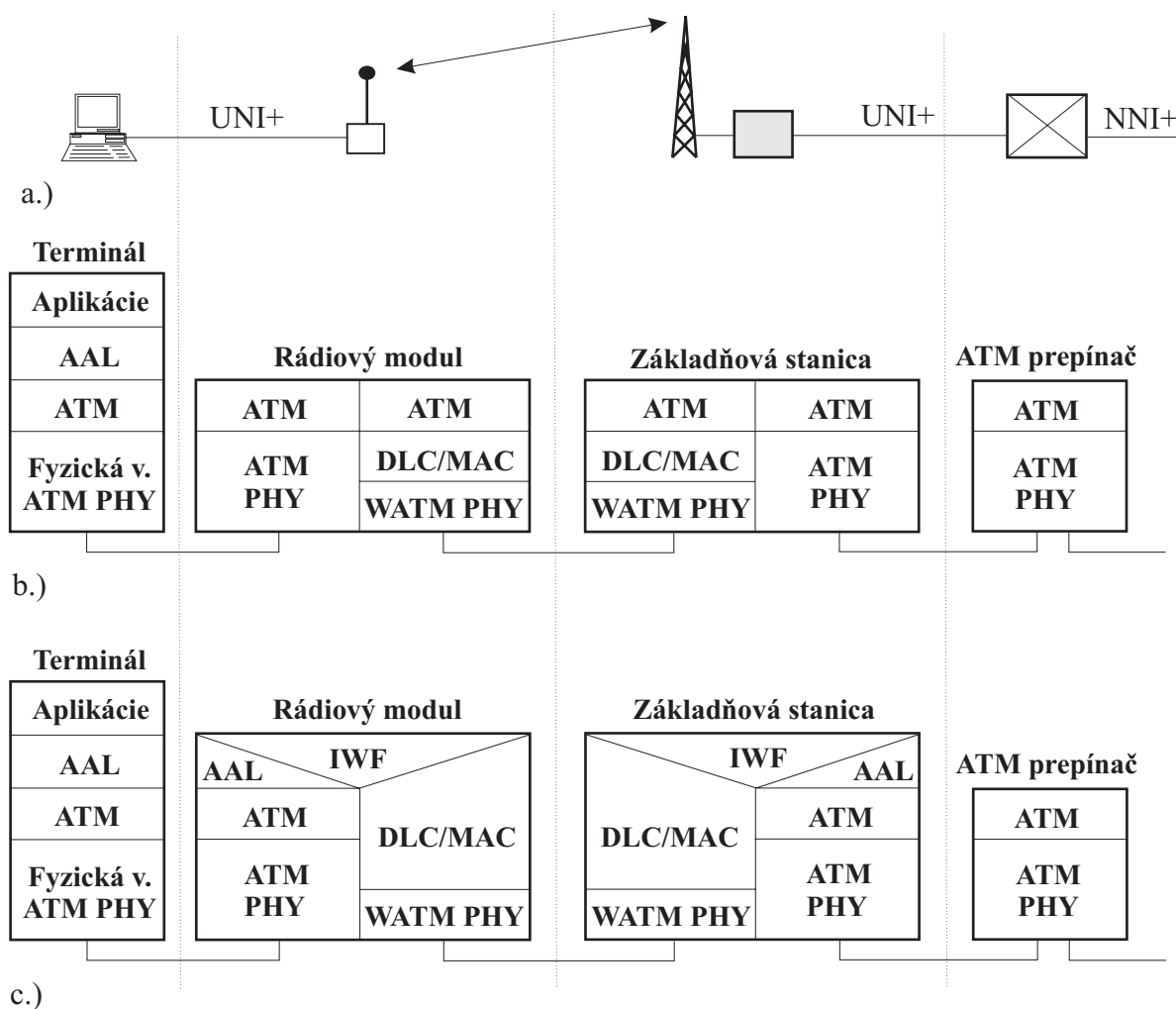
V nasledujúcich častiach budú stručne opísané možné protokolové modely bunkovej bezdrôtovej ATM siete spolu s krátkou charakteristikou tzv. „ad-hoc“ bezdrôtových ATM sietí. Z pohľadu satelitných ATM sietí bude uvedená v krátkosti najjednoduchšia architektúra, detailnejšie rozšírená architektúra a taktiež architektúra využívajúca satelity so zakomponovanou logikou. Čitateľ zaoberajúci sa ešte detailnejším delením satelitných ATM sietí môže využiť napríklad [Toh98].

### 2.3.4.3 Bezdrôtové/mobilné ATM siete

#### I. Bunkové bezdrôtové ATM siete (WATM – Wireless ATM)

Na obr. 2.11a je zobrazený príklad bunkovej bezdrôtovej ATM architektúry [Cizm99]. Ako z názvu vyplýva, sieť je rozdelená na bunky, z ktorých každá obsahuje základňovú stanicu obsluhujúcu všetky mobilné terminály nachádzajúce sa vo vnútri danej bunky. Každý mobilný terminál sa skladá z koncového zariadenia poskytujúceho používateľské aplikácie a rádiového modulu pre bezdrôtový prístup k základňovej stanici, cez ktorú sa uskutočňuje prepojenie do zvyšnej časti celej komunikačnej siete. Základňová stanica tvorí rozhranie medzi bezdrôtovou a pevnou časťou siete. Niektoré základňové stanice sú pripojené k ATM smerovačom, ktoré sú doplnené logikou pre podporu mobility. Tieto „mobilné“ ATM smerovače dokážu obslúžiť mobilných ale aj pevných používateľov v sieti. Všetky protokoly súvisiace s rádiovým prenosom sú ukončené základňovou stanicou [Bing00].

Bolo navrhnutých niekoľko typov architektúr pre WATM sieť. Mnohé sú si veľmi podobné, preto sú tu uvedené dva základné typy, ktoré sú podporené aj návrhmi ATM Fóra. Prvým typom je prirodzená architektúra (obr. 2.11b), ktorá je veľmi podobná klasickej ATM architektúre. Pretože údaje od používateľa sú prenášané cez rádiovú linku, ktorá sa vyznačuje zvýšenou chybovosťou, je WATM architektúra doplnená ešte DLC protokolom, čím sa zlepši priepustnosť rádiovkej linky. Za účelom zabezpečenia riadenia prístupu viacerých používateľov na rádiové médium sa doplnil ešte MAC protokol. MAC a DLC sú umiestnené pod ATM vrstvou a nemajú súvislosť s jej transportnými funkciami. To znamená, že s každou ATM bunkou pracujú ako s dátovou jednotkou bez ohľadu na to, aká je jej štruktúra. Každá vrstva prípadne rozšíri tieto dátové jednotky o hlavičku či koncové návestie a pošle ju nižšej vrstve/podvrstve. Prirodzená WATM architektúra takto zabezpečí transparentný prenos ATM buniek cez rádiovú linku a funkcie AAL vrstiev sú vykonávané iba koncovo. Transparentný prenos nám prináša výhody v menšej zložitosti technického vybavenia rádiového modulu a základňovej stanice a v znížení času potrebného na spracovanie ATM buniek v týchto bodoch [Cizm99].

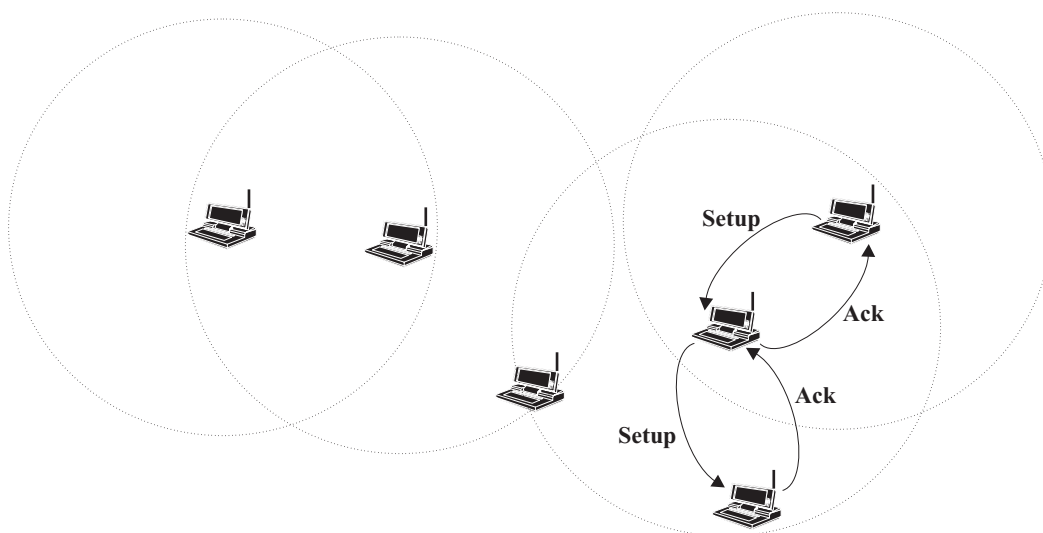


Obr. 2.11 (a.) Architektúra WATM siete a protokolová reprezentácia prirodzenej (b.) a spolupracujúcej (c.) architektúry WATM siete

Vzájomne spolupracujúca WATM architektúra (obr. 2.11c) je okrem DLC a MAC podvrstiev (protokolov) doplnená ešte o ďalšie dve vrstvy: AAL a IWF (Interworking function). Prítomnosť AAL vrstvy znamená, že sa jednotlivé uzly dostávajú až k používateľským údajom prenášaných v ATM bunkách. A úlohou IWF vrstvy je potom tieto používateľské údaje zabaľovať do špecifického bezdrôtového protokolu. Z toho vyplýva, že cez rádiovú linku už nie sú transparentne prenášané ATM bunky, ale iba používateľské údaje. To nám na jednej strane prináša výhodu v tom, že všetka nadbytočná ATM réžia nie je prenášaná cez rádiový kanál, čím zvýšime priepustnosť a využitie dostupnej šírky pásma. Na druhej strane je technické vybavenie rádiového modulu a základňovej stanice zložitejšie. Nehovoriac o zkomponovaní podpory QoS pre jednotlivé triedy služieb. Môžeme teda zhrnúť, že táto architektúra je výhodnejšia iba v prípade, ak sa používa na prenos údajov iba jednej triedy služieb.

## II. Ad-hoc ATM siete

Bezdrôtové ad-hoc siete vychádzajú z princípu mobilnosti všetkých zariadení v komunikačnej sieti na rozdiel od WATM sietí, kde je chrbticová sieť v podstate fixná. Pritom všetky uzly siete sú si rovnocenné, ak nie je vymedzený niektorý uzol, ktorý bude vykonávať špecifické funkcie navyše. Problém týchto sietí vychádza z toho, že topológia celej bezdrôtovej ad-hoc siete sa s časom neustále mení, keďže všetky zariadenia (uzly) sú mobilné a nie každé koncové zariadenie má priamy dosah na všetky ostatné koncové zariadenia. Ďalšie problémy sú spojené taktiež s vyššou chybovosťou bezdrôtového kanála, ktorou trpí prenášaný signál.



Obr. 2.12 Príklad bezdrôtovej ad-hoc siete

Príklad bezdrôtovej ad-hoc siete je uvedený na obr. 2.12. Problémy, ktoré je potrebné vyriešiť sú nasledovné [Toh99]:

- správa spojení – vytvorenie spojenia, znázornené aj na obr. 2.12, vychádza z princípu, že každý uzol, cez ktorý je spojenie budované, musí zaručiť požiadavky na QoS počas celej dĺžky trvania spojenia. Použitím prístupu distribuovaného spojenia, každý uzol musí udržiavať informáciu o stave spojenia a každý uzol vykonáva funkciu CAC (Connection admission control). Použitím centralizovaného prístupu jeden alebo viac uzlov bude plniť funkciu servera spojení. Tento prístup však v tomto prípade nie je efektívny, pretože môže spôsobiť zahltenie, keďže tento uzol musí byť neustále dostupný ostatným uzlom, aby koordinoval riadenie výstavby spojení.
- správa polôh – jednotlivé uzly siete plnia rôzne funkcie podľa potreby. Môžu byť koncovým uzlom spájajúcim sa s iným koncovým uzlom alebo môžu plniť funkciu

prepájajú ako medziľahlý uzol. Koncový uzol vytvárajúci spojenie musí nájsť dostupný prepájací uzol. Správa polôh sa týka najmä dvoch aspektov: kde sa mobilný používateľ (uzol) práve nachádza a v akom prostredí. Za týmto účelom sa využíva metóda pýtania sa dostupných uzlov o aktuálnom stave. Zisťovanie polôh má problém v tom, že tu nie je pevne umiestnený bod. Preto sa uvažuje aj použitie GPS (Global positioning system) v ad-hoc sieťach.

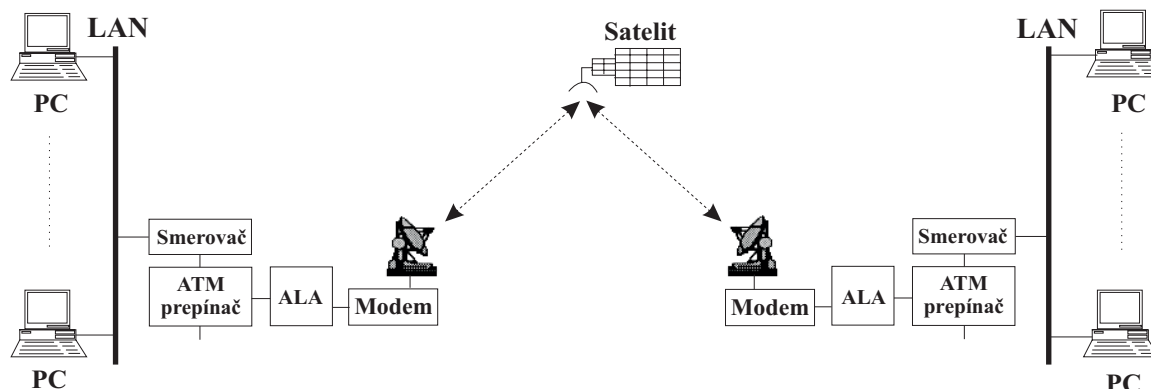
- prístup na kanál – použitie synchrónnych MAC protokolov v ad-hoc sieťach naráža na problém centrálného servera vysielajúceho jednotný čas, ktorý by mal byť dostupný všetkým uzlom. Pri použití asynchrónnych MAC protokolov je potrebné vyriešiť problém súperenia. Taktiež tu vzniká problém skrytého uzla.
- správa odovzdávania a preberania spojenia (handoff, handover) – využitie prístupu používaného v bunkových bezdrôtových sieťach nie je možné v dôsledku mobility uzlov. Riešením je napríklad čiastočné presmerovanie v rámci spojenia alebo prebudovanie spojenia odznovu, čo je spojené so značnou signalizačnou réžiou. Súhrnný prehľad prístupov k tomuto problému je uvedený v [Akyo98].
- smerovanie – pri vytváraní spojenia je potrebné vedieť, či daný uzol v sieti existuje. Pri zaskomponovaní nového uzla do siete je potrebné nastaviť jeho adresu a oznámiť to ostatným uzlom.

#### 2.3.4.4 Satelitné ATM siete

##### I. Satelitná ATM architektúra typu „relay“

Najjednoduchšou satelitnou ATM architektúrou je architektúra, ktorá používa vo väčšine prípadov jeden GEO satelit, pričom tento satelit funguje ako komunikačná „rúra“ (pipe). Úlohou satelitu je prijať ATM prevádzku od pozemnej ATM stanice a následne ju vyslať k ďalšej pozemnej ATM stanici. Satelit neprepája jednotlivé ATM bunky a teda ani virtuálne spojenia. Keďže satelitná linka je **statická**, tak aj vrstva, ktorá má na starosti riadenie prístupu na médium (MAC), sa nemusí zaoberať viacnásobným prístupom na médium alebo dohadovaním šírky pásma. Ako vidieť na obr. 2.13, architektúra používa medzi satelitným modemom a ATM prepínačom zariadenie ALA (ATM link accelerator), ktorého úlohou je prispôbiť prenos ATM buniek cez satelitný kanál a zabezpečiť údaje silným dopredným kódom (FEC) s prekladaním voči vysokej chybovosti satelitného kanála a znížiť tak hodnotu parametra CLR na čo najnižšiu úroveň. Komunikácia medzi používateľským terminálom

a satelitom nevyužíva ATM signalizáciu. ATM signalizácia je použitá iba medzi ATM prepínačmi [Toh98].



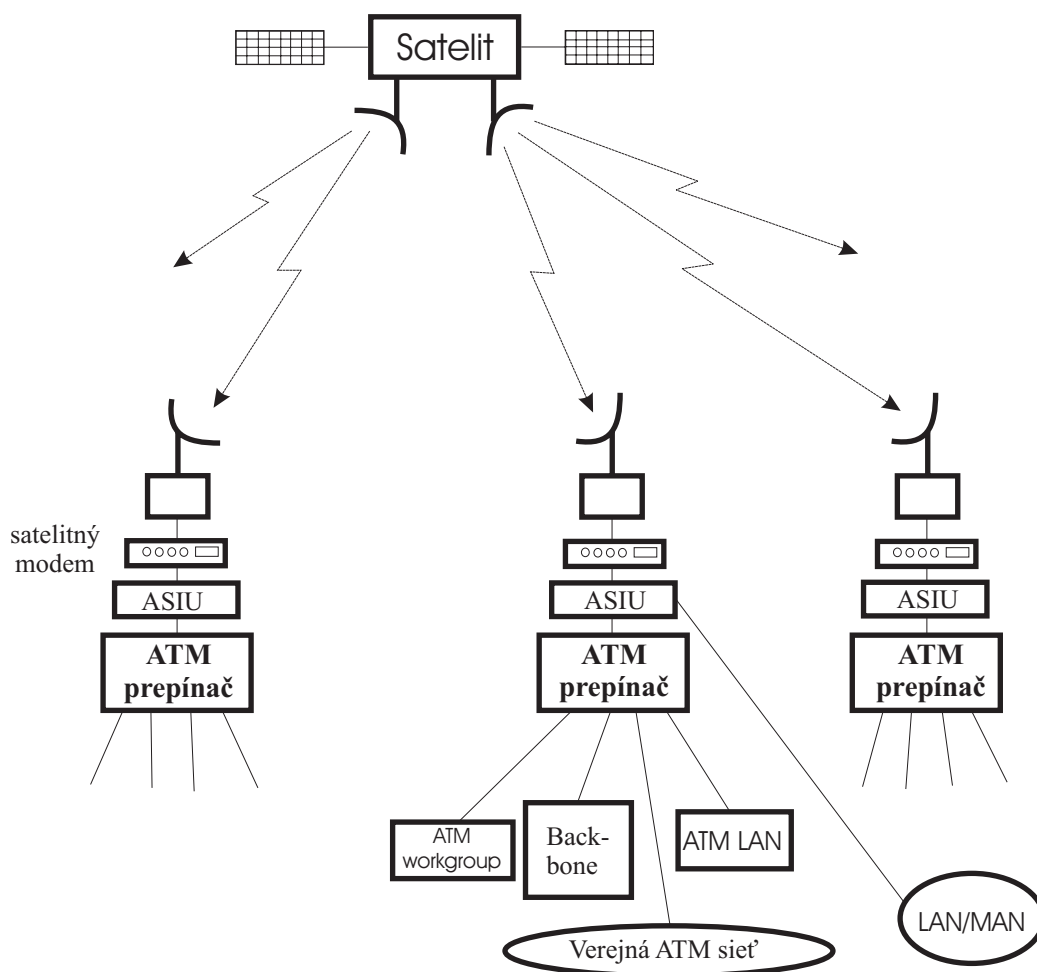
Obr. 2.13 Architektúra najjednoduchšej satelitnej ATM siete

## II. Satelitná ATM architektúra s riadením prístupov

Táto satelitná ATM architektúra taktiež používa na prepojenie satelity fungujúce ako komunikačná rúra, ale je rozšírená o rozširujúce funkcie ako napríklad pridelovanie pásma satelitu, riadenie prístupu viacerých pozemných staníc a pod. Na obr. 2.14 je znázornená všeobecná architektúra takejto satelitnej ATM siete. Základnou jednotkou, ktorá prepája ATM sieť so satelitným systémom, je jednotka ASIU (ATM satellite interworking unit). Úlohou tejto jednotky je správa a riadenie systémových zdrojov a tiež zahŕňa systémové administratívne funkcie. Jej kľúčové funkcie sú:

- pridelovanie pásma v reálnom čase
- riadenie prístupu do siete
- synchronizácia
- monitorovanie
- práca s chybami (error control)
- riadenie prevádzky

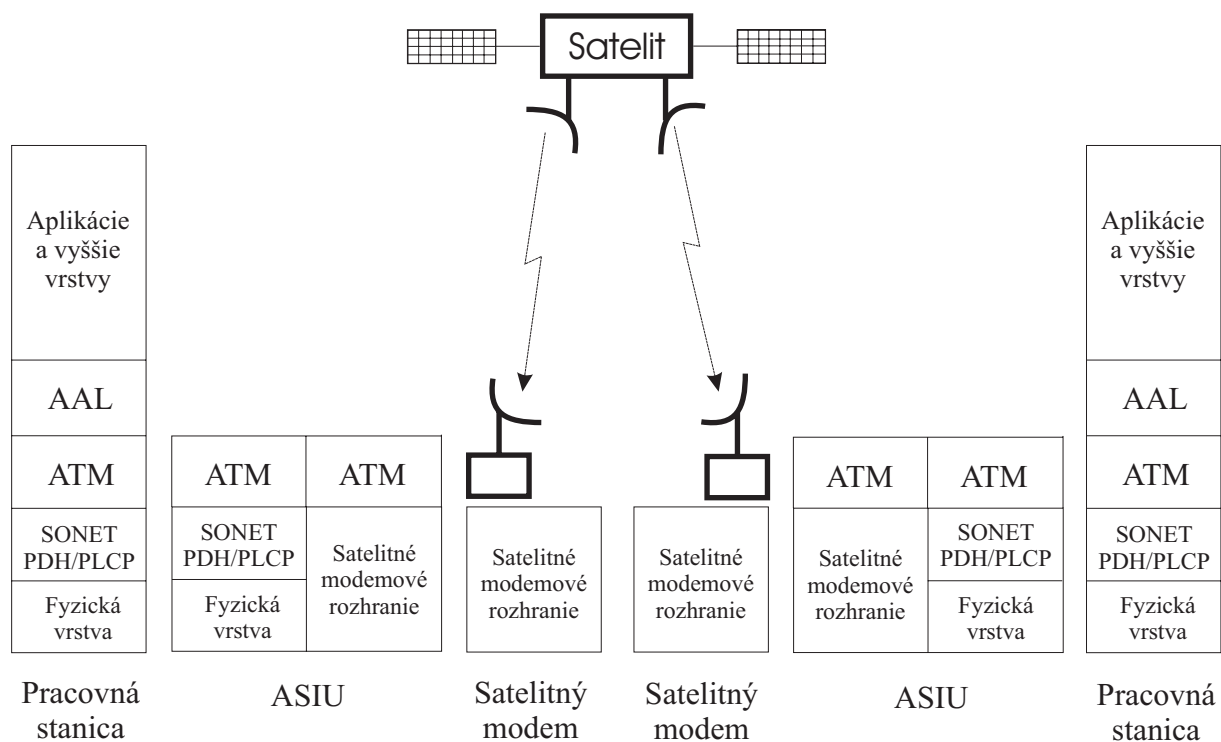




Obr. 2.14 Všeobecná architektúra satelitnej ATM siete

Obr. 2.15 ukazuje protokolovú reprezentáciu satelitnej ATM siete [Akyi97]. Jednotka ASIU musí obsahovať dve rozhrania. Jedno rozhranie smerom k pozemnej ATM sieti, ktoré musí viesť podporovať prenosové metódy ako SDH (Európa) alebo SONET (Amerika) alebo PLCP (Physical Layer Convergence Protocol). Keď rámec takejto prenosovej metódy je prijatý, ATM bunky sú vybrané z neho. Potom sú jednotlivé bunky roztriedené do vyrovnávacích pamätí podľa priority. Keďže satelitné siete sú charakteristické viacnásobnými bitovými chybami, je potrebné použiť výkonné korekčné kódy, aby chybovosť satelitnej linky bola porovnateľná s chybovosťou optického média použitého pre prenos ATM buniek v ATM sieti. ASIU vyžaduje flexibilné a výkonné techniky na pridelovanie pásma satelitu, pretože šírka pásma satelitu je obmedzená a musí byť zdieľaná medzi pozemnými stanicami spravodlivo. Za týmto účelom je preferovaná technika multiplexného prístupu s pridelovaním pásma na požiadanie (DAMA – Demand Assignment multiple access). Celkovú výkonnosť satelitnej ATM siete ovplyvňuje veľmi podstatný parameter - kvalita satelitnej linky. Kvôli spokojnosti zákazníka musíme zabezpečiť hlavne vysoko kvalitné a cenovo prístupné

satelitné linky. Celkovo možno povedať, že výkon siete je ovplyvňovaný oneskorením satelitného vybavenia, rýchlosťou dát, typom modemu, kódovaním a moduláciou, priepustnosťou, rozhraním, typom satelitu atď..



Obr. 2.15 Protokolová reprezentácia satelitnej ATM architektúry

### Linková vrstva

Oneskorenie satelitov, pohybujúce sa v intervale od 20 do 300 ms, zamedzuje použitie prístupových metód používaných v LAN a WAN sieťach. Teoreticky je možné použiť niektorú zo základných prístupových techník ako FDMA, TDMA alebo CDMA. V krátkosti možno povedať, že FDMA neobsahuje interferenciu medzi pozemnými stanicami, vyžaduje menšie antény a je menej pružná. TDMA je veľmi flexibilná pre prenos paketov, vyžaduje väčšie antény a zložitejšiu synchronizáciu, čím sa zväčšuje zložitosť antény. CDMA sa vyznačuje značnými schopnosťami pre viacnásobný prístup a je vhodná na potlačovanie rušenia. Samozrejme, že v praxi sa využívajú ich čiastočné vylepšenia prípadne kombinácie. Tu možno uviesť techniky ako SCPC, MF-TDMA (Multifrequency TDMA) alebo špeciálna technika DAMA. MF-TDMA je založená na tom, že pozemná stanica nevysiela/prijíma iba na jednej frekvencii, ale ich má k dispozícii viac. Týmto sa zmenší veľkosť požadovaných antén a vyžarovaného výkonu. DAMA je založená na dynamickom pridelovaní pásma satelitu

používateľom. DAMA môže byť spojená s MF-TDMA alebo SCPC kvôli zvýšeniu výkonnosti. MF-TDMA rámec obsahuje špeciálne pole, ktoré slúži na prenos signalizačných ATM buniek. Vo fáze výstavby spojenia musí prebehnúť dohodnutie medzi pozemnou stanicou, satelitom a hlavnou riadiacou stanicou (MCS – Master control station, NCC – Network control center). Po vybudovaní spojenia má každé spojenie pridelenú určitú šírku pásma. Pri využití SCPC sú špeciálne kanály, ktoré slúžia pre prenos ATM signalizačných buniek. Po výstavbe spojenia sú ďalšie bunky prenášané cez dostupné SCPC kanály [Akyi97], [Fahm95], [Chit94].

### III. Satelitná ATM architektúra s OBP (On-board processing) satelitmi

Tretím typom satelitnej ATM siete je satelitná sieť využívajúca ktorékoľvek z LEO, MEO alebo GEO satelitov. Hlavným rozdielom v porovnaní s už popísanými satelitnými ATM architektúrami je to, že dané satelity majú zakomponovanú dodatočnú logiku, ktorá rozširuje funkcie poskytované použitými satelitmi. Tak môžu byť mnohé z funkcií vykonávaných pozemnými stanicami vykonávané aj vo vnútri satelitov, čím sa zvýši efektívnosť využitia dostupných prostriedkov satelitnej siete. Satelity, ktoré vykonávajú dodatočné spracovanie prenášaných údajov označujeme OBP satelity. Satelitná ATM sieť využívajúca OBP satelity ponúka široké možnosti prepájania, menšie a lacnejšie používateľské terminály, nižšie oneskorenia prenosu [Toh98]. Funkcie OBP satelitu zahŕňajú prepájanie v základnom pásme (OBS – On-board switching) a obnovu (regeneráciu). OBS funkcia zabezpečí, že satelit sa zmení na ATM prepínač. Regeneračné funkcie nám ponúkajú možnosť využitia FEC (ARQ) metód priamo v satelite a tak zefektívniť zabezpečenie údajov počas prenosu. Tieto architektúry sú síce ešte len v štádiu návrhu, no poskytujú značné množstvo výhod, čo ich predurčuje pre využitie v budúcich výkonných satelitných ATM sieťach. Samozrejme, na druhej strane sú s OBP satelitmi spojené aj problémy týkajúce sa väčšej zložitosti satelitov, potreby výkonnejších zdrojov napájania alebo dodatočného oneskorenia spôsobeného spracovaním údajov [Gild97], [Fars02].

Vo všeobecnosti môže byť architektúra rovnaká ako zobrazuje obr. 2.14 a protokolový model podobný modelu na obr. 2.15. Rozdiel je v type použitého satelitu a v protokolovej reprezentácii daného satelitu. Protokolová reprezentácia OBP satelitu obsahuje okrem fyzickej aj ATM vrstvu. Tým dokáže satelit priamo prepájať virtuálne spojenia (virtuálne okruhy a cesty). ATM bunky vyslané pozemnou stanicou sú spracované OBP satelitom a presmerované na zodpovedajúci výstupný modulátor. Satelit taktiež obsahuje MAC

podvrstvu, aby dokázal priamo podporovať viacnásobné prístupy používateľských terminálov alebo iných pozemných staníc na satelit. OBP satelit môže mať implementovanú taktiež RM (Resource management) funkciu. Potom tento satelit dokáže spracovávať UNI/NNI signalizačné správy a prideliť priamo zdroje/prostriedky satelitu (kapacitu, kanály). Okrem toho má satelit ešte aj prístup do MCS centra, kvôli podpore MAC funkcií a zabezpečeniu koncovej QoS [Toh98].

Z pohľadu vysokej chybovosti satelitnej linky nabera aj zakomponovanie regeneračnej funkcie do satelitu veľký význam, pretože mnohé chyby vzniknuté počas prenosu môžu byť odstránené už priamo v satelite. Prípadne ATM bunky, ktoré sa nedajú opraviť sú zavrhnuté priamo satelitom a linka už nie je zbytočne zahltená nepotrebnými údajmi [Fars02], [Toh98].

#### 2.3.4.5 Zabezpečenie údajov v rámci SATM protokolového modelu

Satelitná linka je charakteristická zhlukovým prejavom chýb. Aby sme zaopatrili signál proti takýmto chybám, môžeme využiť niektoré z nasledujúcich techník:

- algoritmy na zotavenie sa z chýb (ARQ)
- výkonné kódovacie techniky (FEC)
- mechanizmus prekladania

Prvou možnosťou je použiť na úrovni linkovej vrstvy ARQ metódy. Toto však môžeme využiť iba pri službách, ktoré nie sú citlivé veľmi na oneskorenie, ale sú veľmi závislé od straty údajov. ARQ metódy boli podrobne opísané v časti 2.2.2. Spojovo orientované služby využívajú GBN metódu, služby bez spojovej orientácie SW metódu. SW metóda je najjednoduchšia, ale poskytuje aj najväčšie oneskorenia. GBN metóda je výkonnejšia, ale pre satelitné prostredie tiež nie je vhodná kvôli ešte značným oneskoreniam. Najlepšou ARQ metódou sa javí SR metóda, ktorá poskytuje najmenšie oneskorenia a zdá sa byť použiteľnou technikou pre satelitné prostredie, ak sa doriešia ešte niektoré problémy s ňou súvisiace. Nevýhodou SR metódy je príchod buniek v nesprávnom poradí, zvýšená zložitosť vysielača a prijímača [Akyi97], [Fahm95]. Pre satelitné systémy sú v súčasnosti navrhované dynamické ARQ metódy, ktoré sa prepínajú medzi rôznymi módmí činnosti v závislosti od aktuálnej chybovosti satelitného kanála [Kosu01].

Druhou možnosťou, ako sa ubrániť zhlukovým chybám, je použitie kódovacích techník. Ich účelom je zvýšiť spoľahlivosť satelitnej linky a kompenzovať nedostatky ARQ techník. V súčasnosti veľa satelitných modemov využíva hlavne konvolučný kód s Viterbiho dekódovaním. Týmto spôsobom môžeme dosiahnuť BER od  $10^{-3}$  po  $10^{-5}$ . Pre prenos ATM

cez satelit však potrebujeme menšiu BER. Preto je potrebné zaviesť ešte ďalšie kódovanie, aby sa zmenšila BER. Mnohé súčasné satelitné zariadenia už ponúkajú kódovanie zreťazeným kódom, pričom ako vonkajší sa používa RS kód so zakomponovaným prekladaním [Cain97]. Použitím oboch kóderov by sa mali zabezpečiť dlhé intervaly medzi chybami. Aby sa vybral správny vonkajší kód malo by platiť:

- rýchlosť kódu by mala byť čo najväčšia
- kombinácia s vnútorným kódom by mala dosahovať najlepšie výsledky
- oneskorenie pri kódovaní by malo byť čo najmenšie

Poslednou navrhovanou možnosťou, ako zlepšiť odolnosť ATM protokolu voči chybám, je použiť metódu prekladania priamo na ATM bunky. Ak sa pozrieme na zloženie ATM bunky, zistíme, že obsahuje zabezpečovacie pole HEC v hlavičke, ktoré však ochraňuje iba informácie v hlavičke. Tento CRC kód dokáže opraviť iba jednu chybu v hlavičke. Informačné pole nie je zabezpečené. Preto zhlukové chyby ovplyvňujú výkonnosť aj protokolov v AAL vrstve. Na popis chybovosti môžeme použiť parameter CLR, ktorý udáva pravdepodobnosť zahodenia danej bunky. Protokoly AAL vrstvy využívajú rôzne dlhé zabezpečovacie CRC kódy (obr. 2.10). AAL protokol typ 1 má iba trojbitový kód, typ 2 používa päťbitový kód a typ 3/4 desaťbitový kód CRC. To znamená, že môžu odhaliť zhľuky chýb o dĺžke 3 (typ 1), 5 (typ 2) alebo 10 bitov (typ 3/4). V prípade dlhších zhľukov chýb sú tieto kódy nepoužiteľné. Najlepšie vlastnosti poskytuje protokol typ 5, ktorý obsahuje zabezpečovacie pole o dĺžke 32 bitov a teda zhľuky chýb do dĺžky 32 bitov sú detekované. Nevýhodou však ostáva, že zahadzovanie buniek sa uskutočňuje už na úrovni fyzickej.

Mechanizmus prekladania môže prekladať bity alebo bajty. Potom pre ATM bunku je vhodné použiť mechanizmus prekladania bitov iba pre jej hlavičku alebo prípadne aj pre informačnú časť. Pomocou tohto mechanizmu sa zhľuky chýb rozdistibuuujú medzi niekoľko ATM buniek. Je potrebné tu však zdôrazniť, že ATM protokol používa tzv. HEC algoritmus, ktorého úlohou je kontrola bezchybnosti hlavičky každej ATM bunky s následným zahodením ATM bunky (ak obsahuje neopraviteľné chyby) alebo poslaním ďalej po vytvorenom spojení. HEC algoritmus môže pracovať iba v detekčnom móde, iba v korekčnom móde alebo v oboch, pričom dynamicky prechádza z jedného módu (stavu) do druhého. Z toho vyplýva, že je potrebné analyzovať a vyhodnotiť vzájomnú súčinnosť metódy prekladania a HEC algoritmu.

Prekladanie pri AAL protokoloch je závislé od typu. Protokol typ 1 obsahuje hlavičku dlhú jeden bajt. Pretože najdôležitejšia informácia je nesená práve v tomto prvom bajte SAR-

PDU (podobné ako je to s dôležitosťou hlavičky pri ATM bunke), je potrebné použiť prekladanie po bitoch. Protokol typ 2 používa v rámci CPS-PDU iba paritu a CRC kód obsahuje až hlavička CPS-paketu, preto by sa muselo použiť prekladanie po bitoch a až hlavičiek CPS-paketov. AAL protokol typ 3/4 obsahuje aj hlavičku aj koncové návestie na konci SAR-PDU. V tomto prípade máme 10 bitové zabezpečovacie pole a údaje potrebné pre správnu činnosť protokolu sa nachádzajú práve v týchto častiach, preto je vhodné použiť prekladanie po bajtoch. Prekladanie sa uskutočňuje iba pre najdôležitejšie polia, to znamená, že pri ATM bunke sa realizuje prekladanie iba hlavičiek, pri AAL protokole typ 1 sa vykonáva prekladanie iba prvého bajtu SAR-PDU, pri protokole typ 2 sa prekladá buď iba hlavička CPS-paketu alebo prvé štyri bajty CPS-PDU (ak je jeden CPS-paket vložený do jednej CPS-PDU) a pri AAL protokole typ 3/4 sa vykonáva prekladanie pre celú SAR-PDU [Akyi97], [Chit94].

## 2.4 Modelovanie bezdrôtového kanála

V posledných desaťročiach význam modelovania bezdrôtového kanála narastá. Súvisí to s čoraz väčším využívaním bezdrôtového prenosového média. Kvôli tomu je potrebné otestovať (odsimulovať) výkonnosť existujúcich protokolov, prípadne navrhnúť nové vhodné a efektívne protokoly pre prenos údajov cez tieto bezdrôtové kanály.

Podľa závislosti chýb v kanáli rozlišujeme kanály so závislými a nezávislými chybami. **Kanály s nezávislými chybami** sú charakteristické tým, že udalosti vzniku chýb sú pri nich vzájomne nezávislé, každý binárny symbol je chybné prijatý s rovnakou pravdepodobnosťou  $P_e$  nezávisle od toho, ako boli prijaté predchádzajúce binárne symboly. Bloková chybovosť predstavujúca pravdepodobnosť, že v bloku  $n$  bitov nastala aspoň jedna chyba, je daná nasledovne:

$$P_B = 1 - (1 - P_e)^n \quad (2.5)$$

pričom  $n$  je dĺžka dátového bloku. Pravdepodobnosť, že dátový blok dĺžky  $n$  obsahuje práve  $m$  chýb je:

$$P(m, n) = \binom{n}{m} \cdot P_e^m \cdot (1 - P_e)^{n-m} \quad (2.6)$$

V prípade **kanálov so závislými chybami** sú udalosti vzniku chýb v kanáli počas prenosu navzájom závislé. Pravdepodobnosť správneho alebo nesprávneho prijatia binárneho symbolu závisí od stavu prijatia predchádzajúcich binárnych symbolov.

### 2.4.1 Prístupy k modelovaniu bezdrôtového kanála

Navrhnuté modely pre úzkopásmový (LMS) bezdrôtový kanál možno rozdeliť do troch skupín na empirické, štatistické a analytické modely [Kara99]. Jednotlivým skupinám sa venujeme v nasledujúcich častiach. Najnovšie trendy a smery v oblasti modelovania LMS kanála charakterizovali autori v [Fieb03], ktorí vymedzili tri skupiny moderných modelov: modely využívajúce Markovovské reťazce, modely založené na spektrálnej analýze a modely odvodené z meteorologických údajov.

#### 2.4.1.1 Empirické modely

V súčasnosti sa o tieto modely zaujíma už málo ľudí. Najväčší záujem bol v rokoch 1985-1992. Empirické modelovanie sa zakladá na prispôbení určitej krivky (funkcie) k nameraným údajom. Jeho hlavnou výhodou je jednoduchosť konečných matematických vyjadrení a tým aj použitia. Nevýhodou je, že sú presnou reprezentáciou práve nameraných údajov a nehovoria aké procesy prebiehajú počas prenosu na danom kanáli. Tieto modely vychádzajú buď zo stredného tlmenia signálu počas šírenia cez vegetáciu (stromy, kry) alebo z výpočtu rezervy (link margin) linky potrebnej na kompenzovanie strát a útlmov počas šírenia. Najčastejšími parametrami týchto modelov sú elevačný uhol, frekvencia, dĺžka cesty šírenia signálu a parametre úzko späté s prostredím, v ktorom sú prevádzkané merania. Príklady týchto modelov je možné nájsť v [Kana96], [Gold93].

#### 2.4.1.2 Štatistické modely

Tieto modely sú hlavným záujmom v posledných desiatich rokoch. Štatistické modely na rozdiel od empirických ponúkajú pohľad na fyzikálne procesy, ktoré nastávajú počas šírenia a prijatia signálu. Žiaľ, ich nevýhodou je, že vo väčšine prípadov vyžadujú numerické metódy na prekonanie zložitosti výpočtov. Základom je definovanie funkcie hustoty rozdelenia pravdepodobnosti a distribučnej funkcie obálky prijatého signálu. Odvodenie týchto štatistík je základom pre výpočet primeranej úrovne tlmenia (fade margin) – úniku signálu. Niektoré štúdie vychádzali pri modelovaní zo štatistík signálu druhého radu. Ale väčšina ľudí ráta tieto

štatistiky až po štatistickom spracovaní nameraných údajov, pretože sú základom pre výber požadovaných modulačných a kódovacích techník.

Existujú dva rôzne prístupy modelovania používajúce štatistiky prvého rádu: všeobecné (globálne) a stavovo-orientované štatistické prístupy. Globálny štatistický prístup vychádzal z opisu kanála jednoduchým rozdelením (tínenie aj viaccestné šírenie je zahrnuté v jednom rozdelení). V stavovo-orientovanom prístupe každý z niekoľkých možných diskretných stavov kanála je reprezentovaný jedným rozdelením. Predpokladá sa, že tento prístup je výhodnejší pri zakomponovaní problémov tínenia a viaccestného šírenia.

V bezdrôtových systémoch (mobilné aj satelitné) sa tlmiace vplyvy rozdeľujú na dve skupiny: krátkodobé (small-scale, short-term) a dlhodobé (large-scale, long-term). Pri dlhodobých vplyvoch, ako názov hovorí, tlmenie amplitúdy signálu spôsobené akýmkoľvek typom prekážky trvá dlhší čas. Na ich popis sa využíva takmer všade log-normálne rozdelenie. Krátkodobé vplyvy sú najčastejšie spájané s tlmením signálu v dôsledku viaccestného šírenia. Sú zviazané s typom prostredia spôsobujúci rozptyl signálu a úvahami, ktoré zložky signálu zakomponovať pri návrhu modelu. Preto je niekedy výhodné si jednotlivé prostredia rozdeliť do niekoľkých typov. Časté delenie prostredí je na: mestské prostredie (urban area), predmestské a vidiecke prostredie (suburban and rural area) a otvorené prostredie (open area).

**Všeobecné štatistické modely** vychádzajú zo základných rozdelení ako sú Rayleigha, log-normálne, Ricianove, gausovské, rovnomerné alebo výsledný model je kombináciou týchto základných rozdelení. Prvý takýto model navrhol Suzuki pre mestské prostredie vychádzajúci z Rayleigha a lognormálneho rozdelenia [Suzu77]. Loo [Loo85] navrhol model, v ktorom len priama zložka signálu je ovplyvňovaná tínením a difúzna zložka má konštantný výkon. K presne rovnakému rozdeleniu sa dopracoval aj Pätzold s kol. [Patz98]. Ďalšie modely sú uvedené v [Cora94], [Hwan97], [Vata95], [Baba98].

**Stavovo-orientované modelovanie** kanála je založené na Markovovskom procese [Kara99]. Markovovský proces spolu s prechodmi medzi jednotlivými stavmi je použitý na modelovanie dlhodobých zmien charakteristík kanála, pričom krátkodobé zmeny kanála sú realizované niektorou zo spomínaných hustôt rozdelenia pravdepodobností obálky s vhodne nastavenými parametrami na úrovni príslušného stavu kanála. Diskretný Markovovský proces je stochastický proces, v ktorom sa systém môže nachádzať v niektorom z diskretných stavov a pravdepodobnosť zotrvania v niektorom stave alebo prechodu o iného stavu závisí len od predošlého stavu. Ak chceme modelovať LMS kanál pomocou generatívneho Markovovského modelu, je potrebné určiť počet jeho stavov. Tieto stavy sa rozdeľujú na tzv. dobré a zlé



stavy. Dobrý stav reprezentuje stav kanála s nulovou alebo veľmi malou chybovosťou a zlý stav predstavuje chybný prenos. Najjednoduchšia verzia je verzia s dvomi stavmi, ktorá reprezentuje Gilbertov model kanála [Tao00], [Lutz91]. Tento model sa však javí nedostačujúci pre modelovanie LEO kanála. Autori v [Tao00] skúmali aj trojstavový model – tzv. zjednodušený Fritchmanov model kanála. Až štvorstavový model s dvomi dobrými a dvomi zlými stavmi sa javil ako dostatočný na popis LEO kanála. Model s tromi dobrými a jedným zlým stavom navrhli Chu a Sweeney, ktorý taktiež hľadali vhodnú reprezentáciu modelu LEO kanála [Chu99]. Modelovanie kanála pomocou štyroch stavov navrhli aj Vucetic a Du [Vuce92]. Na štatistický popis stavov opäť využili Loove rozdelenie s rôznymi parametrami. Prvé dva stavy sú charakterizované Ricianovým útlmom a druhé dva stavy lineárnou kombináciou Rayleigha a log-normálneho útlmu. Ďalšie markovovské modely sú taktiež uvedené v [Slac96], [Waka97].

Niektoré štatistické modely sú založené na štatistikách druhého rádu, ktoré využívajú dva systémové parametre kanála [Fars02]: LCR (level crossing rate – rýchlosť, akou prekročí obálka signálu určitú špecifickú úroveň) a AFD (average fade duration – stredná doba intervalov, počas ktorých je obálka signálu pod určitou špecifickou hodnotou úrovne signálu). Význam týchto štatistických parametrov na popis kanála je veľký. Napríklad AFD sa používa pri určení optimálneho spôsobu prekladania dát a vhodných dopredných zabezpečovacích kódov v prijímačoch za účelom potlačenia tlmiacich vplyvov.

#### **2.4.1.3 Analytické modely**

Analytické modely sú hlavne spojené s pozemným mobilným kanálom. Niektorí autori vytvorili modely, kde sa výsledná vlna v prijímači získa ako suma priamej a niekoľkých odrazených vln. Neskôr sa zakomponoval do danej sumy vplyv rozptýlených vln. Amplitúdy pritom môžu mať rôzne rozdelenie. Príklady analytických modelov je možné nájsť v [Ossa64], [Gilb65], [Auli79].

#### **2.4.2 Dvojstavový Markovovský model kanála**

Dvojstavový Markovovský model kanála bude použitý v rámci tejto práce ako model bezdrôtového kanála v simulačnom prostredí ako aj pri analytickom odvádzaní hodnôt výkonnostných parametrov protokolu ATM, preto sa venujeme jeho popisu detailnejšie. Príkladom jednoduchého dvojstavového Markovovského modelu je Gilbertov model [Pole99]. Tento model je založený na jednom „dobrom“ (stav G) a jednom „zlom“ stave (stav

B). V stave G je prenos bezchybný, sú generované samé nuly. V stave B sú generované nuly aj jednotky (chyby). Pravdepodobnosť generovania chýb v stave B je  $(1 - h)$ . Model samozrejme umožňuje prechody medzi týmito stavmi. Pravdepodobnosť prechodu zo stavu G do stavu B je  $P_{GB}$ . Pravdepodobnosť prechodu zo stavu B do stavu G je  $P_{BG}$ . Pravdepodobnosť zotrvania v rovnakom stave ( $P_{BB}$ ,  $P_{GG}$ ) je možné určiť z nasledujúcich vzťahov

$$P_{BG} + P_{BB} = 1, P_{GB} + P_{GG} = 1 \quad (2.7)$$

Markovovské modely sú vhodné na generovanie zhlukov chýb a teda aj zhlukov núl (bezchybných bitov) [Pole99]. Generovanie zhliku núl ovplyvňuje najmä pravdepodobnosť zotrvania v stave G (prechodu zo stavu G do stavu G). Podobne aj generovanie zhliku chýb ovplyvňuje pravdepodobnosť zotrvania v stave B ( $P_{BB}$ ). Gilbertov model je charakterizovaný dvomi maticami: maticou prechodov  $\mathbf{P}$  a maticou stavov  $\mathbf{H}$ . Všeobecne možno povedať, že model má tri nezávislé parametre:  $P_{BG}$ ,  $P_{GB}$  a  $h$ .

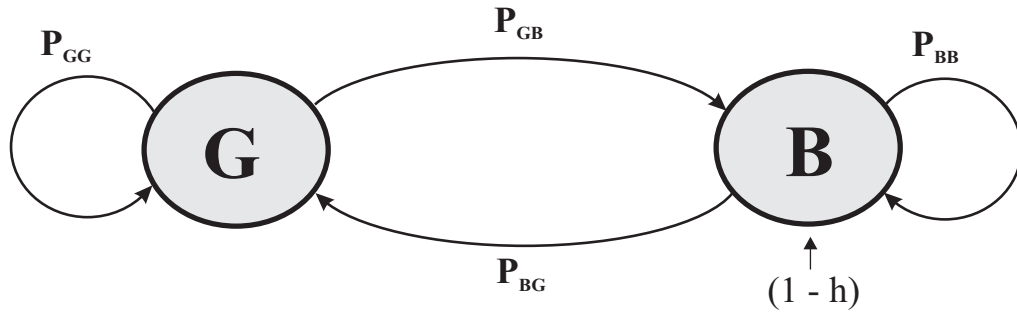
$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{GG} & P_{GB} \\ P_{BG} & P_{BB} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & h \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Pre Gilbertov model môžeme pomocou vety o úplnej pravdepodobnosti vypočítať tzv. finálne pravdepodobnosti – pravdepodobnosti, že model je v stave G ( $P(G)$ ), resp. stave B ( $P(B)$ )

$$P(G) = \frac{P_{BG}}{P_{GB} + P_{BG}}, \text{ resp. } P(B) = \frac{P_{GB}}{P_{GB} + P_{BG}} \quad (2.9)$$

Na základe uvedených vzťahov je možné určiť pravdepodobnosť, že bude vygenerovaná chyba (jednotka) –  $P(1)$ . Pretože chyba môže nastať iba v stave B, stačí nám vynásobiť pravdepodobnosť, že sme v stave B s pravdepodobnosťou, akou sa vygeneruje jednotka v stave B [Pole99].

$$P(1) = \frac{P_{GB}}{P_{GB} + P_{BG}} \cdot (1 - h), \quad P(1) + P(0) = 1 \quad (2.10)$$



Obr. 2.16 Gilbertov model

Pre ďalšie skúmanie v tejto práci je potrebné uviesť vzťah pre priemernú dĺžku zhluku chýb pre Gilbertov model kanála. Keďže pracujeme s diskretným modelom, nuly a jednotky sú generované v určitých pravidelných intervaloch, dalo by sa povedať, že model pracuje v taktoch. Označme postupnosť  $n$  po sebe idúcich intervalov, v ktorých je model vždy v stave B (t.j. výskyt  $i$  stavov B za sebou), ako  $\{B^n\}$  [Kana78]. Pravdepodobnosť výskytu  $(n - 1)$  stavov B ukončených stavom G za predpokladu, že predtým bol stav G nasledovaný stavom B, môžeme zapísať potom takto

$$P(B^{n-1}G / GB) = P_{BB}^{n-1} \cdot P_{BG} \quad (2.11)$$

pričom platí

$$\sum_{i=1}^{\infty} P(B^{i-1}G / GB) = 1 \quad (2.12)$$

Ak chceme zistiť priemerný počet výskytov stavov B ohraničený stavmi G, použijeme strednú hodnotu

$$E(P(B^{n-1}G / GB)) = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot P(B^{i-1}G / GB) = \frac{1}{P_{BG}} \quad (2.13)$$

Zo vzťahov (2.11) a (2.13) vyplýva, že pravdepodobnosť výskytu po sebe idúcich  $n$  stavov B, resp. stavov G je daná geometrickým rozdelením, pričom priemerná dĺžka je  $1/P_{BG}$ , resp.  $1/P_{GB}$  [Lemm02]. Teraz budeme aplikovať tento spôsob na zistenie priemernej dĺžky zhluku chýb. Pravdepodobnosť zhluku chýb dĺžky  $n - 1$  za predpokladu, že predtým bola vygenerovaná 0 a 1, označíme  $P(1^{n-1}0 / 01)$ . Potom platí

$$P(1^{n-1}0 / 01) = P_{BB}^{n-1} \cdot (1 - h)^{n-1} \cdot (P_{BG} + P_{BB} \cdot h), \quad \sum_{i=1}^{\infty} P(1^{i-1}0 / 01) = 1 \quad (2.14)$$

potom

$$E\left(P\left(1^{n-1}0/01\right)\right)=\sum_{i=1}^{\infty}i\cdot P\left(1^{n-1}0/01\right)=\frac{1}{P_{BG}+P_{BB}\cdot h}=\frac{1}{1-P_{BB}\cdot(1-h)} \quad (2.15)$$

Rozšírenie Gilbertovho modelu urobil Elliot, ktorý zmenil bezchybovosť dobrého stavu a pridal pravdepodobnosť chyby aj pre dobrý stav. Predpokladá sa, že táto pravdepodobnosť je značne menšia ako pravdepodobnosť chyby v zlom stave [Pole99].

### 3. Špecifikácia cieľov práce

Na základe analýzy bezdrôtového kanála uvedenej v predchádzajúcej kapitole vyplýva, že použitie bezdrôtového kanála na prenos údajov ktoréhokoľvek súčasného protokolu, je spojené s dôkladnou analýzou výsledného správania sa a s tým spojenou výkonnosťou daného protokolu. Najdôležitejším negatívnym parametrom bezdrôtového kanála, ktorý spôsobuje značné ťažkosti existujúcim protokolom a ktorého vplyv je základom skúmania tejto práce, je jeho podstatne vyššia chybovosť v porovnaní s „drôtovými“ prenosovými médiami. Dokonca v mnohých prípadoch je táto vyššia chybovosť spojená ešte aj so zhlukovým prejavom chýb na kanáli. Vtedy hovoríme, že kanál je charakteristický závislým zdrojom chýb (memory channel), kedy pravdepodobnosť pokazenia aktuálneho bitu závisí od toho, či bol predošlý bit pokazený alebo nie.

Posledné desaťročie je charakterizované veľkým záujmom o nový protokol – mód – ATM, ktorého výhody a schopnosti ho predurčovali stať sa hlavným protokolom celosvetovej širokopásmovej komunikačnej siete. Jeho schopnosti vychádzali z toho, že ako prenosové médium sa použije optické vlákno, ktoré je charakteristické veľmi nízkou chybovosťou (BER). V dôsledku jeho zakomponovania aj do bezdrôtových systémov však je potrebné vyriešiť okrem iného aj problém vplyvu kvality bezdrôtového kanála na jeho výkonnosť. Za týmto účelom bolo navrhnutých niekoľko možných metód od ARQ cez výkonné FEC až po hybridné metódy. Niektorí autori navrhli zakomponovať niektorú z metód prekladania údajov do protokolového modelu na zlepšenie jeho výkonnosti. Metóda prekladania môže byť aplikovaná v rámci FEC metód alebo v spojitosti s korekčnou schopnosťou HEC kódu v hlavičke ATM bunky.

Táto dizertačná práca sa orientuje na analýzu a vyhodnotenie vplyvu blokových metód prekladania ATM buniek (využívajúcich schopnosti HEC kódu) na výkonnosť ATM protokolu, na základe čoho možno formulovať nasledovné ciele práce:

- 1. Analýza a vyhodnotenie vplyvu existujúcich metód blokového prekladania (štandardnej, vnútrobunkovej) na výkonnosť ATM protokolu aplikovaného v bezdrôtovom prostredí.**
- 2. Návrh nových metód blokového prekladania ATM buniek prenášaných cez bezdrôtový kanál.**
- 3. Analýza a vyhodnotenie vplyvu navrhnutých metód prekladania na výkonnosť ATM protokolu aplikovaného v bezdrôtovom prostredí.**

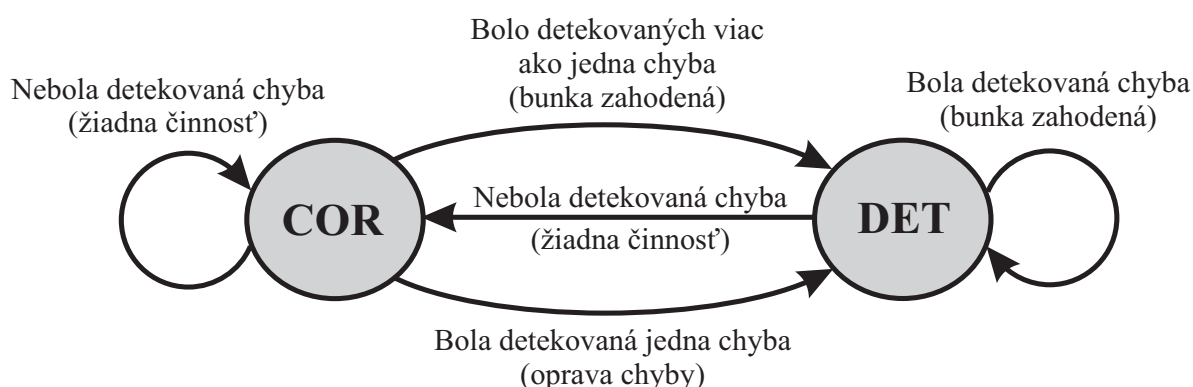
- 4. Analýza a vyhodnotenie výkonnosti troch typov (módov) HEC algoritmu ATM protokolu aplikovaného v bezdrôtovom prostredí s implementovanými metódami blokového prekladania vrátane novo navrhnutých.**
- 5. Simulácia a vyhodnotenie výkonnosti ATM protokolu s použitými metódami prekladania (existujúcimi a novo navrhnutými).**

## 4. Výkonnosť bezdrôtového ATM protokolu s aplikovanou metódou prekladania bitov

Cieľom tejto kapitoly je analyzovať a vyhodnotiť výkon HEC algoritmu ATM prijímača v prostredí kanálov s nezávislými a závislými chybami. Ďalej bude v detailnejšej miere preskúmaný vplyv už navrhnutých metód blokového prekladania na výkon HEC algoritmu, pretože autori neskúmali ich vplyv na správanie sa všetkých módov HEC algoritmu. Taktiež budú v tejto časti analyzované dve nami navrhnuté metódy blokového prekladania a porovnané s existujúcimi metódami prekladania.

### 4.1 HEC algoritmus a parametre jeho výkonnosti

Každá ATM bunka prenášaná po vytvorenom spojení a spracovávaná medziľahlými ATM uzlami obsahuje dôležité pole v hlavičke označené ako HEC (časť 2.3.4.1, obr. 2.10). Toto pole reprezentujúce zabezpečovací cyklický kód je používané pre rôzne funkcie. Tieto



Obr. 4.1 Stavový diagram HEC algoritmu

funkcie sú vykonávané na úrovni fyzickej vrstvy a pokrývajú zisťovanie hraníc ATM buniek (cell delineation) a verifikáciu hlavičiek ATM buniek. Obe funkcie ovplyvňujú výslednú výkonnosť ATM protokolu, ale hlavne druhá funkcia je v rámci tejto práce analyzovaná a vyhodnocovaná. Pod verifikáciou hlavičky ATM bunky rozumieme zistenie správnosti prenosu bunky cez sieť. Cyklický kód, ktorý je použitý má schopnosť detekovať všetky zhľuky chýb do dĺžky 8 bitov a značné množstvo zhľukov o dĺžke väčšej ako 8 bitov. Tento kód dokáže tiež opraviť jednu samostatnú chybu v hlavičke [Stal98]. Táto schopnosť nám

otvára možnosti použitia práve metód prekladania, pretože musia byť v návaznosti s kódom, ktorý má korekčné (opravovacie) schopnosti. Korekčná schopnosť použitého cyklického kódu je daná tým, že tento kód zabezpečuje iba polia hlavičky. Informačné pole ostáva nezabezpečené na úrovni ATM vrstvy a jeho zabezpečenie je prenechané na vyššie vrstvy. Dôvodom, prečo je zabezpečená iba hlavička je práve funkcia ATM vrstvy, ktorá vykonáva operácie súvisiace iba s hodnotami polí hlavičky, preto sú pre ňu najdôležitejšie.

Algoritmus, ktorý rozhoduje o úspešnom prijatí či zahodení ATM bunky využívajúci verifikáciu hlavičky ATM bunky, budeme nazývať HEC algoritmus. HEC algoritmus bol štandardizovaný organizáciou ITU v odporúčaní I.432 a je zobrazený na obr. 4.1. Ktorýkoľvek ATM uzol (koncový, medziľahlý), ktorý dostane kanálom ATM bunku, spustí HEC algoritmus. Podľa obr. 4.1 vidíme, že tento algoritmus používa dva stavy: korekčný a detekčný. V každom stave sú reakcie algoritmu odlišné. Prijímač je na začiatku v korekčnom stave. Po príchode ATM bunky a zistení počtu chýb v hlavičke môžu nastať nasledovné reakcie: I. ak daná ATM bunka neobsahuje žiadnu chybu v hlavičke, bunka sa pošle ďalej po príslušnom spojení a prijímač ostáva v stave korekčnom, II. ak bunka obsahuje jednu chybu v hlavičke, táto chyba je opravená a bunka je poslaná ďalej po spojení, ale prijímač sa presúva do stavu detekčného alebo III. ak bunka obsahuje v hlavičke viac ako jednu chybu, bunka je zahodená a prijímač sa presúva do stavu detekčného. Ak je prijímač v detekčnom stave a príde ATM bunka, opäť sa zistí stav chýb v jej hlavičke a môžu nastať nasledovné procesy: I. ak bunka neobsahuje chybu v hlavičke, je poslaná ďalej po spojení a prijímač sa presúva do stavu korekčného, II. ak bunka obsahuje jednu alebo viac chýb v hlavičke, táto bunka sa zahodí a prijímač zotrvá v detekčnom stave. Z toho vyplýva, že opravovanie sa realizuje len vtedy, ak je prijímač v stave korekčnom [Stal98].

Prvé implementácie ATM prepínačov a uzlov nevyužívali celý HEC algoritmus, tak ako bol štandardizovaný, ale HEC algoritmus pracoval iba v detekčnom stave a ATM bunky s akoukoľvek chybou v hlavičke boli zahadzované. Výhodou takéhoto algoritmu bola jeho rýchlosť a jednoduchosť. Neskôr sa implementoval aj korekčný stav. Z hľadiska použitia ATM v bezdrôtových systémoch je použitie korekčného stavu potrebné. HEC algoritmus môže pracovať v troch módoch: buď len v detekčnom stave, buď len v korekčnom stave alebo tak, ako bol štandardizovaný (súčinnosť oboch stavov). Preto aj nasledovné analýzy a vyhodnocovania budú realizované pre každý typ (mód) HEC algoritmu.

S HEC algoritmom je spojených niekoľko parametrov, ktoré ovplyvňujú samotnú výkonnosť ATM protokolu. Na začiatku tejto časti boli uvedené schopnosti použitého cyklického kódu. Je jasné, že tento kód nedokáže odhaliť úplne všetky typy zhlukov chýb, ktoré



sa môžu vyskytnúť v hlavičke. Preto niektoré prijaté ATM bunky sa budú javiť v poriadku, ale napriek tomu budú obsahovať chyby v hlavičke. To môže mať za následok napríklad zlé smerovanie danej bunky. Tento prípad popisuje parameter CMR (Cell misinsertion rate), definovaný ako počet zle smerovaných buniek za určitý čas (niekde rátaný nie za určitý čas ale k počtu všetkých buniek spojenia). Pre ďalšie simulácie a analýzy budeme pokladať schopnosti HEC kódu za ideálne, to znamená, že HEC kód dokáže detekovať akúkoľvek kombináciu bitových chýb v hlavičke ATM bunky. Preto sa ďalej týmto parametrom zaoberať nebudeme. Parametre, ktorými sa bude táto práca zaoberať sú

- **CLR** (Cell loss rate) – parameter, ktorý je daný pomerom počtu všetkých zahodených ATM buniek (kvôli neopraviteľnej chybe v hlavičke) na danom spojení k počtu všetkých ATM buniek vyslaných na danom spojení ( $N_t$ ). Tento parameter je priamo spojený s výkonnosťou HEC algoritmu. Ak  $N_r$  bude počet (úspešne) prijatých ATM buniek, tak

$$CLR = \frac{N_t - N_r}{N_t} \quad (4.1)$$

- **CER** (Cell error rate) – parameter, ktorý je daný pomerom počtu všetkých ATM buniek, ktoré úspešne prešli HEC algoritmom, ale obsahujú jednu alebo viac chýb v informačnom poli, k počtu všetkých ATM buniek, ktoré prešli úspešne HEC algoritmom.
- **CBER** (Cell bit error rate) – parameter, ktorý udáva početnosť bitových chýb v informačných poliach úspešne prijatých ATM buniek. To znamená, že je to vlastne BER „kanála“, ktorú uvidia AAL protokoly.

Cieľom je získať hodnotu každého z týchto parametrov čo na najnižšiu úroveň.

## 4.2 Výkonnosť HEC algoritmov v neprekladanom kanáli

Najskôr budeme skúmať, aká je výkonnosť protokolu ATM bez použitia metódy prekladania v prostredí kanála modelovaného zdrojom s nezávislými a potom závislými chybami. Tieto hodnoty budú smerodajné pre porovnávanie s prípadmi, kedy bude použitá niektorá z metód prekladania.

#### 4.2.1 Výkonnosť HEC algoritmov pre model kanála s nezávislými chybami

V tomto prípade budeme uvažovať kanál s nezávislými chybami, pričom pravdepodobnosť, že sa daný bit pokazí, označme  $P_e$ . Keďže je to kanál s nezávislými chybami potom pravdepodobnosť, že sa pokazí aktuálny bit je nezávislá od toho, či bol pokazený alebo nepokazený predošlý bit a podobne.

##### Detekčný mód HEC algoritmu

V prípade, keď HEC algoritmus využíva iba detekčný stav, všetky ATM bunky, ktoré obsahujú aspoň jednu bitovú chybu v hlavičke, sú zahodené. Potom hodnotu parametra CLR pre tento typ HEC algoritmu môžeme vyrátať ako pravdepodobnosť, že sa bunka zahodí. Potom platí

$$CLR_{DET} = P(\text{bunka sa zahodí}) = \sum_{n=1}^{40} P_H(n) = 1 - P_H(0) = 1 - (1 - P_e)^{40} \quad (4.2)$$

kde  $P_H(n)$  je pravdepodobnosť, že bunka obsahuje v hlavičke  $n$  bitových chýb a  $P_e$  je pravdepodobnosť bitovej chyby. Člen  $(1 - P_e)^{40}$  predstavuje pravdepodobnosť, že hlavička má všetky bity v poriadku (nepokazené). Parameter CER udáva pravdepodobnosť, že úspešne prijatá bunka obsahuje aspoň jednu chybu v informačnej časti. Potom platí

$$CER_{DET} = \sum_{n=1}^{384} P_p(n) = 1 - P_p(0) = 1 - (1 - P_e)^{384} \quad (4.3)$$

kde  $P_p(n)$  reprezentuje pravdepodobnosť, že informačná časť bunky obsahuje práve  $n$  bitových chýb. Člen  $(1 - P_e)^{384}$  predstavuje pravdepodobnosť, že všetky bity informačného poľa bunky sú prenesené bez chyby. CBER je rovné pomeru súčtu všetkých pokazených bitov informačných poľí všetkých úspešne prijatých ATM buniek počas životnosti daného spojenia k počtu všetkých informačných bitov všetkých úspešne prijatých ATM buniek. Týmto spôsobom by sme vedeli vypočítať hodnotu CBER pri simulácii. Pretože uvažujeme zdroj nezávislých chýb, platí jednoduchá rovnosť

$$CBER_{DET} = P_e \quad (4.4)$$

Korekčný mód HEC algoritmu

V tomto prípade musíme vziať do úvahy fakt, že HEC algoritmus dokáže opraviť ATM bunky s jednou chybou v hlavičke. Potom parameter CLR vypočítame podobným spôsobom ako sme ho vypočítali pri detekčnom móde a to

$$\begin{aligned} CLR_{COR} &= P(\text{bunka\_sa\_zahodí}) = \sum_{n=2}^{40} P_H(n) = 1 - P_H(0) - P_H(1) = \\ &= 1 - \left( (1 - P_e)^{40} + 40 \cdot P_e \cdot (1 - P_e)^{39} \right) = 1 - (1 - P_e)^{39} \cdot (1 + 39 \cdot P_e) \end{aligned} \quad (4.5)$$

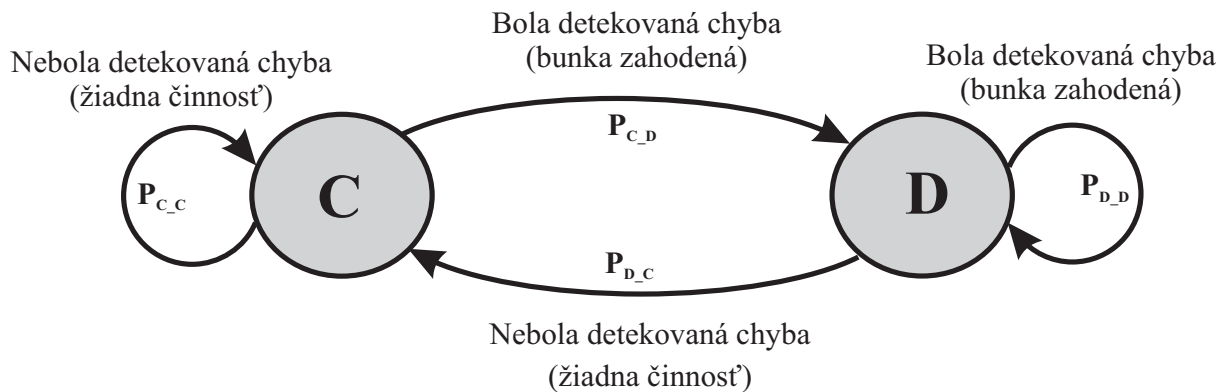
$P_H(1)$  je pravdepodobnosť, že hlavička bunky obsahuje jednu bitovú chybu, vyrátame ako súčet pravdepodobností, že je táto bitová chyba práve na prvom mieste, práve na druhom mieste až po prípad umiestnenia práve na poslednom (40.) mieste hlavičky bunky. Nezávislosť bitových chýb nám zjednodušuje výpočet zvyšných parametrov, pre ktoré platia nasledujúce rovnosti

$$CER_{COR} = CER_{DET} = 1 - (1 - P_e)^{384} \quad (4.6)$$

$$CBER_{COR} = CBER_{DET} = P_e \quad (4.7)$$

Štandardný HEC algoritmus

Štandardný HEC algoritmus využíva oba stavy, medzi ktorými sa dynamicky presúva podľa aktuálneho stavu chybovosti ATM buniek. Na obr. 4.2 je uvedený opäť stavový diagram HEC algoritmu doplnený o prechodové pravdepodobnosti. HEC algoritmus reprezentuje dvojstavový Markovovský model a preto na jeho popis môžeme využiť zákonitosti platiace pre Markovovské modely.



Obr. 4.2 HEC algoritmus ako dvojstavový Markovovský model

Pretože HEC algoritmus pracuje na úrovni ATM buniek, môžeme pre prechodové pravdepodobnosti tohto modelu napísať, že

$$P_{C\_C} = P_{D\_C} = (1 - P_e)^{40} \quad (4.8)$$

$$P_{C\_D} = P_{D\_D} = 1 - (1 - P_e)^{40} \quad (4.9)$$

pričom musí platiť:  $P_{C\_C} + P_{C\_D} = 1 = P_{D\_C} + P_{D\_D}$ .

Pomocou vety o úplnej pravdepodobnosti alebo vzťahu (2.9) vieme vypočítať finálne pravdepodobnosti  $P_C$  a  $P_D$ .  $P_C$  resp.  $P_D$  reprezentuje pravdepodobnosť, že HEC algoritmus je v stave korekčnom resp. detekčnom. Potom

$$P_C = \frac{P_{D\_C}}{P_{D\_C} + P_{C\_D}} = (1 - P_e)^{40} \quad (4.10)$$

$$P_D = \frac{P_{C\_D}}{P_{D\_C} + P_{C\_D}} = 1 - (1 - P_e)^{40} \quad (4.11)$$

Ďalej nás bude zaujímať chybovosť každého stavu, čo znamená pravdepodobnosť zahodenia ATM bunky v každom stave (stratovosť stavov). Túto pravdepodobnosť udáva vlastne parameter CLR, preto aby sme našli celkovú hodnotu parametra CLR, potrebujeme nájsť stratovosť bunky v každom stave HEC algoritmu. Označme pravdepodobnosť straty bunky v korekčnom resp. detekčnom ako  $P_{CLR\_C}$  resp.  $P_{CLR\_D}$ . Pravdepodobnosť straty bunky v korekčnom stave je daná pravdepodobnosťou, že bunka obsahuje minimálne dve chyby v hlavičke. Pravdepodobnosť straty (zahodenia) ATM bunky v detekčnom stave je daná pravdepodobnosťou, že ATM bunka obsahuje minimálne jednu chybu v hlavičke. Potom platí

$$P_{CLR\_C} = 1 - \binom{40}{0} \cdot P_e^0 \cdot (1 - P_e)^{40} - \binom{40}{1} \cdot P_e^1 \cdot (1 - P_e)^{39} = 1 - (1 - P_e)^{40} - 40 \cdot P_e \cdot (1 - P_e)^{39} \quad (4.12)$$

$$P_{CLR\_D} = 1 - \binom{40}{0} \cdot P_e^0 \cdot (1 - P_e)^{40} = 1 - (1 - P_e)^{40} \quad (4.13)$$

Hodnota parametra CLR celého HEC algoritmu reprezentuje pravdepodobnosť, že HEC algoritmus zahodí danú ATM bunku. Potom parameter CLR vypočítame ako pravdepodobnosť, že HEC algoritmus je práve v stave korekčnom krát pravdepodobnosť straty bunky v korekčnom stave plus pravdepodobnosť, že HEC algoritmus je práve v stave

detekčnom krát pravdepodobnosť straty bunky v detekčnom stave. Zapísaním do vzťahu dostaneme

$$\begin{aligned} CLR_{HEC} &= P_C \cdot P_{CLR\_C} + P_D \cdot P_{CLR\_D} = \\ &= (1 - P_e)^{40} \cdot \left(1 - (1 - P_e)^{40} - 40 \cdot P_e \cdot (1 - P_e)^{39}\right) + \left(1 - (1 - P_e)^{40}\right)^2 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Výpočet zvyšných parametrov je omnoho jednoduchší. Je to spôsobené opäť tým, že výskyt chýb je nezávislý. Potom pre parameter  $CER_{HEC}$  platí

$$CER_{HEC} = CER_{COR} = CER_{DET} = (1 - P_e)^{384} \quad (4.15)$$

a podobne

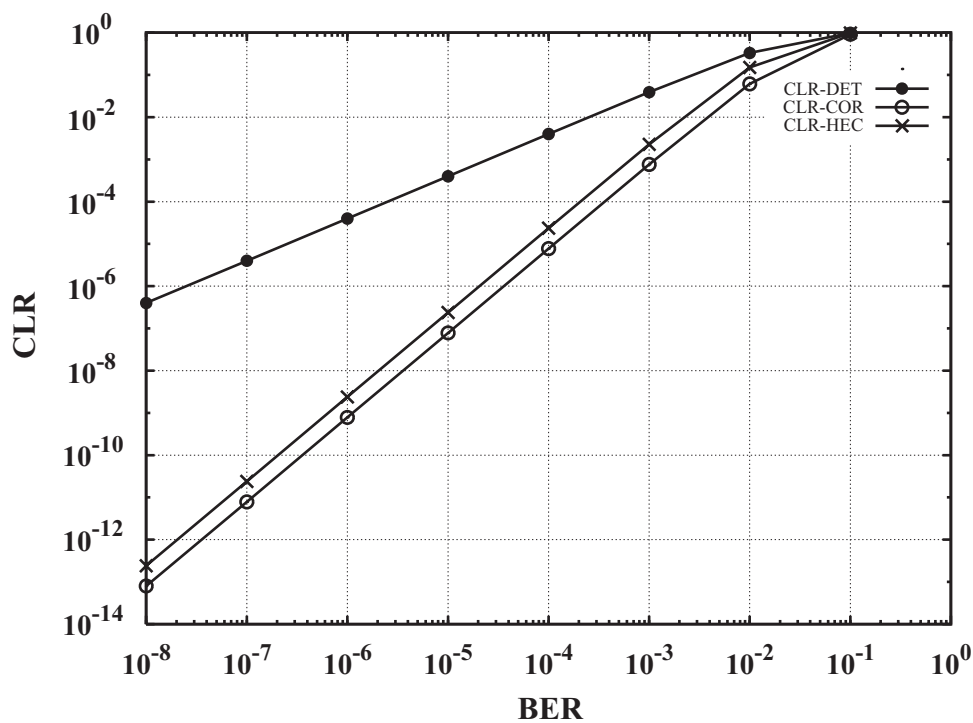
$$CBER_{HEC} = CBER_{COR} = CBER_{DET} = P_e \quad (4.16)$$

kde  $P_e$  je stále pravdepodobnosť, že sa daný bit pokazí.

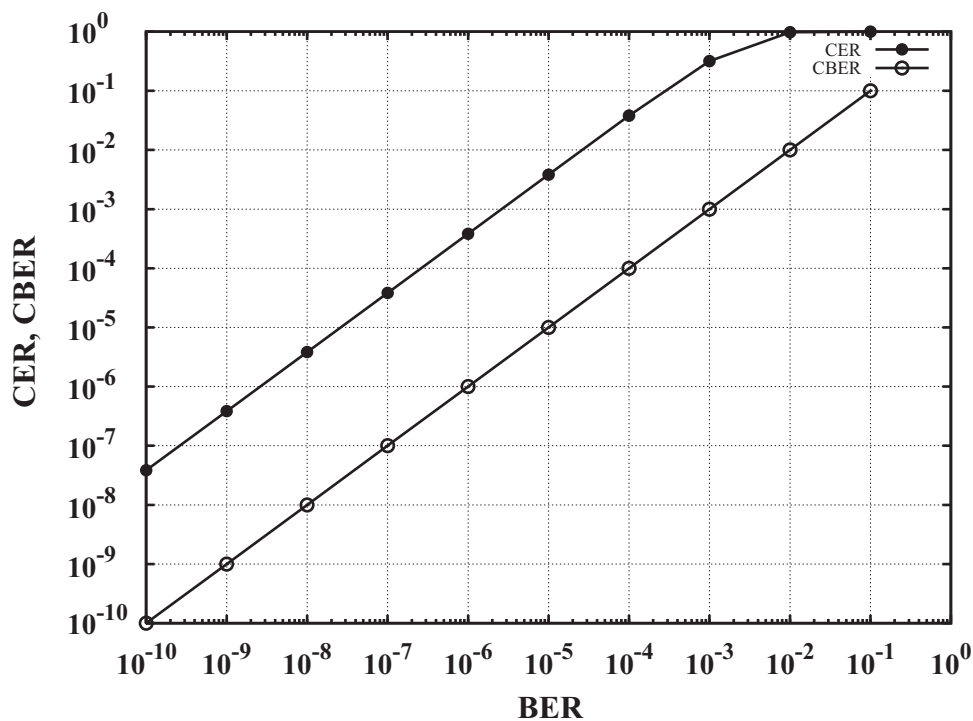
### Grafické zobrazenie a vyhodnotenie výsledkov

Na obr. 4.3 sú zobrazené graficky jednotlivé závislosti pre parameter CLR daný vzťahom (4.2) pre detekčný mód, vzťahom (4.5) pre korekčný mód a vzťahom (4.14) pre štandardný typ HEC algoritmu. Všetky závislosti majú s rastúcou hodnotou chybovosti kanála rastúci charakter.

Najhoršie výsledky dáva detekčný mód HEC algoritmu, čo vyplýva z toho, že prítomnosť akéhokoľvek počtu chýb v hlavičke ATM bunky znamená jej automatické zahodenie. Najlepšie výsledky, ako sa dalo očakávať, ponúka korekčný mód HEC algoritmu. Dokonca rozdiel výkonnosti korekčného módu v porovnaní s detekčným kódom s klesajúcou hodnotou bitovej chybovosti kanála narastá. Avšak výkonnostný rozdiel medzi štandardným a korekčným typom nie je až tak veľký ako v porovnaní s výkonnosťou detekčného typu HEC algoritmu.



Obr. 4.3 Závislosť CLR od chybovosti kanála (BER) pre všetky tri typy HEC algoritmu v kanáli s nezávislými chybami

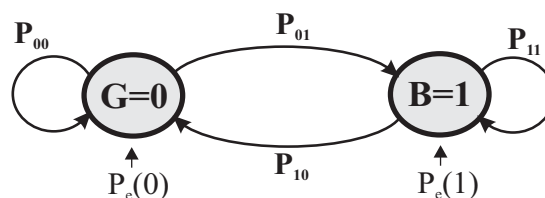


Obr. 4.4 Závislosť parametrov CER a CBER od chybovosti kanála (BER) pre všetky tri typy HEC algoritmu v kanáli s nezávislými chybami

Hodnoty parametrov CER a CBER sú rovnaké pre všetky typy HEC algoritmu. Zo závislosti pre parameter CER vidno, že pre bitovú chybovosť kanála väčšiu ako  $10^{-2}$  takmer každá ATM bunka, ktorá prejde úspešne HEC algoritmom, obsahuje chybu v informačnej časti. Pre chybovosť kanála rovnú  $10^{-3}$  približne tretina všetkých ATM buniek bude obsahovať nejakú chybu v informačnom poli. Pri chybovosti kanála  $10^{-4}$  približne tri zo sto ATM buniek budú obsahovať nejakú chybu v informačnom poli atď. Bitová chybovosť kanála, ktorú uvidia protokoly AAL vrstvy bude rovnaká ako skutočná chybovosť kanála.

#### 4.2.2 Výkonnosť HEC algoritmov pre model kanála so závislými chybami

Ako už bolo spomenuté vyššie, značná časť bezdrôtových kanálov má charakter zdroja závislých chýb, preto budú nasledujúce analýzy a vyhodnocovania realizované najmä pre tento typ kanála. Model, ktorý budeme používať na modelovanie takéhoto kanála, je dvojstavový Markovovský model, ktorý navrhol Gilbert a bol podrobnejšie opísaný v časti 2.4.2. Výber viacstavového Markovovského modelu by možno vykazoval presnejšie výsledky, no analytické odvodenie a výpočtová náročnosť by bola príliš zložitá. Preto aj mnohí autori využívajú pri vyhodnocovaní výkonnosti metód práve Gilbertov model. Keďže chyby sú v kanáli závislé, správne či nesprávne prijatie bitu je závislé od toho, ako bol prijatý (prenesený) predošlý bit. Tento princíp nám žiaľ komplikuje odvodenie vzťahov, preto sa budeme musieť pozrieť na prenos blokov údajov cez Gilbertov kanál trochu detailnejšie. Aby bolo možné používať všeobecné označenia pravdepodobností, budeme ďalej používať nasledovné označenia (obr. 4.5):  $P_{ij}$  bude reprezentovať pravdepodobnosť prechodu zo stavu  $i$  do stavu  $j$ ,  $P_e(i)$  bude reprezentovať pravdepodobnosť chyby v stave  $i$ ,  $\pi_i$  bude finálna pravdepodobnosť, že kanál je v stave  $i$ , pričom  $i, j \in \{0, 1\}$ , kde 0 predstavuje dobrý stav a 1 zlý stav.



Obr. 4.5 Použitý Gilbertov model kanála

Najskôr sa budeme zaujímať, aké zákonitosti platia pri prenose bloku, ktorý kvôli jednoduchosti bude pozostávať iba z dvoch bitov. Potom pravdepodobnosť, ktorá bude veľmi

potrebná pre toto skúmanie bude nasledovná: označme ju  $\varnothing_{ij}(0,2)$  a bude reprezentovať pravdepodobnosť, že bity prijaté v časových okamihoch (taktach) 0 a 1 neobsahujú chybu a kanál ostal čase 2 v stave  $j$  za predpokladu, že v čase 0 bol v stave  $i$ . Potom platí

$$\varnothing_{ij}(0,2) = (1 - P_e(i)) \cdot P_{i0} \cdot (1 - P_e(0)) \cdot P_{0j} + (1 - P_e(i)) \cdot P_{i1} \cdot (1 - P_e(1)) \cdot P_{1j} \quad (4.17)$$

pričom uvažujeme, že správny prenos druhého bitu môže nastať vtedy, ak bude kanál v časovom okamihu 1 buď v stave 0 alebo v stave 1 a nebude vygenerovaná chyba. Potom vzťah (4.17) môžeme prepísať pomocou sumy dvomi spôsobmi. V prvom sa sústredíme na prenos prvého bitu a prenos ostatných (v našom prípade toho druhého) bitov popíšeme pomocou pravdepodobnosti  $\varnothing_{ij}$  alebo sa sústredíme na prenos posledného bitu a prenos predošlých zapíšeme opäť pomocou pravdepodobnosti  $\varnothing_{ij}$ . Prepis bude nasledovný

$$\varnothing_{ij}(0,2) = \sum_{m=0}^1 (1 - P_e(i)) \cdot P_{im} \cdot \varnothing_{mj}(0,1) = \sum_{m=0}^1 \varnothing_{im}(0,1) \cdot (1 - P_e(j)) \cdot P_{mj} \quad (4.18)$$

Ako bude vyzerat' pravdepodobnosť prenosu bloku dlhého 2 bity, ak má obsahovať práve jednu chybu? Použitím prvého spôsobu budeme musieť zrátať pravdepodobnosť, že chybný bit nebude prvý ale druhý s pravdepodobnosťou, že chybný bit bude prvý a druhý nie. Potom dostaneme

$$\varnothing_{ij}(1,2) = \sum_{m=0}^1 (1 - P_e(i)) \cdot P_{im} \cdot \varnothing_{mj}(1,1) + \sum_{m=0}^1 P_e(i) \cdot P_{im} \cdot \varnothing_{mj}(0,1) \quad (4.19)$$

alebo použijeme druhý spôsob zápisu a dostaneme

$$\varnothing_{ij}(1,2) = \sum_{m=0}^1 \varnothing_{im}(1,1) \cdot (1 - P_e(m)) \cdot P_{mj} + \sum_{m=0}^1 \varnothing_{mj}(0,1) \cdot P_e(m) \cdot P_{mj} \quad (4.20)$$

Zovšeobecnením posledných dvoch vzťahov vieme napísať výsledné vzťahy pre  $\varnothing_{ij}(s,n)$  – pravdepodobnosť, že presne  $s$  chýb sa nachádza bloku  $n$  bitov prijatých v časových intervaloch (taktach)  $\{0, 1, 2, \dots, n-1\}$  za predpokladu, že kanál bude čase  $n$  v stave  $j$ , pričom v čase 0 bol v stave  $i$ . Platí

$$\varnothing_{ij}(s,n) = \sum_{m=0}^1 (1 - P_e(i)) \cdot P_{im} \cdot \varnothing_{mj}(s,n-1) + \sum_{m=0}^1 P_e(i) \cdot P_{im} \cdot \varnothing_{mj}(s-1,n-1) \quad (4.21)$$



$$\varnothing_{ij}(s,n) = \sum_{m=0}^1 \varnothing_{im}(s,n-1) \cdot (1 - P_e(m)) \cdot P_{mj} + \sum_{m=0}^1 \varnothing_{im}(s-1,n-1) \cdot P_e(m) \cdot P_{mj} \quad (4.22)$$

s nasledovnými počiatočnými podmienkami

$$\varnothing_{ij}(s,0) = 0 \quad \text{ak } (s < 0) \text{ alebo } (s > 0) \quad (4.23)$$

$$\varnothing_{ij}(0,0) = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (4.24)$$

Ak máme pravdepodobnosť  $\varnothing_{ij}(s,n)$ , ktorá je viazaná na stav  $i$  kanála v čase 0 a stav  $j$  v čase  $n$ , potom ak budeme vysielat' kanálom bloky, ktoré budú veľkosti napr. ATM buniek (53 bajtov, čo je 424 bitov), pravdepodobnosť, že tieto bloky (ATM bunky) budú obsahovať práve  $s$  chýb, bude

$$\Pr_{ATM}(s) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \pi_i \cdot \varnothing_{ij}(s,424) \quad (4.25)$$

Celý tento koncept využívajúci pravdepodobnosť  $\varnothing_{ij}(s,n)$  sa označuje ako „tagging“ koncept. Táto práca sa koncentruje na prenos ATM buniek bezdrôtovým kanálom, preto všetky súvislosti budú vzťahované pre tento prípad. Vzťah (4.25) pre naše výpočty nie je použiteľný, pretože nás zaujímajú prípady pravdepodobností výskytu určitého počtu chýb v hlavičke a/alebo v informačnom poli ATM buniek. Ako už bolo uvedené pri opise štruktúry ATM bunky, skladá sa táto z hlavičky, ktorá obsahuje 40 bitov ( $N_1$ ) a informačného poľa o dĺžke 384 bitov ( $N_2$ ). Definujme si náhodnú premennú  $\beta$ , ktorá môže nadobúdať hodnotu 0 alebo 1. Táto náhodná premenná bude udávať, či hlavička ATM bunky je zasiahnutá neopraviteľným počtom chýb ( $\beta = 1$ , celá ATM bunka bude preto zahodená) alebo hlavička je v poriadku ( $\beta = 0$ , ATM bunka je úspešne prijatá). Presnejší popis týchto prípadov je už závislý od typu použitého HEC algoritmu. Okrem toho si označme ďalšiu náhodnú premennú ako  $\alpha$ , ktorá bude udávať počet chýb v informačnom poli ATM bunky. Aby sme mohli robiť následné výpočty potrebných parametrov, potrebujeme mať k dispozícii rozdelenie združenej pravdepodobnosti  $[\beta, \alpha]$ , ktoré označíme ako  $Pr(\beta, \alpha)$ .

#### Detekčný mód HEC algoritmu

Prípad náhodnej premennej  $\beta = 1$  znamená, že hlavička ATM bunky bude obsahovať minimálne jednu a viac chýb. Vtedy bude celá ATM bunka detekčným módom HEC

algoritmu zahodená. Preto prípad  $\beta = 0$  reprezentuje stav prijatia ATM bunky bez chyby v hlavičke. Potom pre zodpovedajúce hodnoty združenej pravdepodobnosti  $Pr(\beta, \alpha)$  platí

$$\Pr_{DET}(\beta = 0, \alpha) = \sum_{i=0}^1 \sum_{m=0}^1 \sum_{j=0}^1 \pi_i \cdot \varnothing_{im}(0, N_1) \cdot \varnothing_{mj}(\alpha, N_2) \quad (4.26)$$

Ako vidíme, vo vzťahu (4.26) sme použili dva krát pravdepodobnosť  $\varnothing_{ij}(s, n)$ . Je to z toho dôvodu, lebo potrebujeme vedieť pravdepodobnosť, že žiadna chyba sa nevyskytla v hlavičke danej ATM bunky dlhej  $N_1$  bitov a súčasne  $\alpha$  chýb sa vyskytlo v informačnom poli dlhom  $N_2$  bitov tej istej ATM bunky [Zorz99]. Pre druhý prípad hodnoty náhodnej premennej  $\beta$  bude združená pravdepodobnosť nasledovná

$$\Pr_{DET}(\beta = 1, \alpha) = \sum_{i=0}^1 \sum_{m=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{l=1}^{N_1} \pi_i \cdot \varnothing_{im}(l, N_1) \cdot \varnothing_{mj}(\alpha, N_2) \quad (4.27)$$

Výpočet združenej pravdepodobnosti vzťahmi (4.26) a (4.27) je spojený s  $(N_1 + N_2)$  prechodmi kanála medzi stavmi počas prenosu jednej ATM bunky. Kanál sa nachádza v stave  $i$  (s pravdepodobnosťou  $\pi_i$ ) pri prenose prvého bitu ATM bunky, potom pri prenose prvého bitu informačného poľa bunky prechádza stavom  $m$  ( $N_1$ -stav) a končí v stave  $j$  po prenose celej ATM bunky daným kanálom. Potom výsledná hodnota združenej pravdepodobnosti je daná súčtom všetkých pravdepodobností prechodu kanála zo stavu  $i$  do stavu  $j$  cez stav  $m$ , počas ktorých nastalo  $l$  chýb v hlavičke a  $\alpha$  chýb v informačnom poli pre všetky možné kombinácie výskytov daných stavov, čiže  $i, j, m \in \{0, 1\}$ .

Výpočet parametra CLR pre detekčný mód HEC algoritmu zahŕňa prípad  $\beta = 1$ . Potom výsledný vzťah je daný ako suma pravdepodobností, keď  $\beta = 1$  a počet chýb v informačnej časti prejde cez všetky možnosti od bezchybného stavu až po stav s pokazenými všetkými bitmi:

$$CLR_{DET} = \sum_{\alpha=0}^{N_2} \Pr_{DET}(\beta = 1, \alpha) \quad (4.28)$$

Hodnota parametra CER je spojená naopak s pravdepodobnosťou prípadu, keď náhodná premenná  $\beta = 0$ , to znamená, že ATM bunka je úspešne prijatá, ale obsahuje minimálne jednu chybu v informačnej časti. Výsledný vzťah bude

$$CER_{DET} = \sum_{\alpha=1}^{N_2} \Pr_{DET}(\beta = 0, \alpha) \quad (4.29)$$

Parameter CBER reprezentuje bitovú chybovosť buniek, ktoré sú doručené do AAL vrstvy, čo predstavuje priemerný počet chýb v informačnej časti bunky za predpokladu, že hlavička je v prípade detekčného módu bez chyby. Potom pre parameter CBER platí

$$CBER_{DET} = \frac{\sum_{\alpha=0}^{N_2} \alpha \cdot \Pr_{DET}(\beta = 0, \alpha)}{N_2 \cdot \sum_{\alpha=0}^{N_2} \Pr_{DET}(\beta = 0, \alpha)} \quad (4.30)$$

#### Korekčný mód HEC algoritmu

V prípade korekčného módu HEC algoritmu bude prípad náhodnej premennej  $\beta = 1$  znamenať to, že hlavička ATM bunky bude obsahovať minimálne dve a viac chýb, kedy bude ATM bunka zahodená. Preto prípad  $\beta = 0$  reprezentuje stav prijatia ATM bunky buď bez chyby v hlavičke alebo s jednou chybou v hlavičke, ktorú HEC algoritmus dokáže opraviť. Potom pre zodpovedajúce hodnoty združenej pravdepodobnosti  $\Pr(\beta, \alpha)$  platí

$$\Pr_{COR}(\beta = 0, \alpha) = \sum_{i=0}^1 \sum_{m=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{l=0}^1 \pi_i \cdot \varnothing_{im}(l, N_1) \cdot \varnothing_{mj}(\alpha, N_2) \quad (4.31)$$

$$\Pr_{COR}(\beta = 1, \alpha) = \sum_{i=0}^1 \sum_{m=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{l=2}^{N_1} \pi_i \cdot \varnothing_{im}(l, N_1) \cdot \varnothing_{mj}(\alpha, N_2) \quad (4.32)$$

Výpočet parametra CLR pre korekčný mód HEC algoritmu je po stránke zápisu rovnaká ako v prípade detekčného módu HEC algoritmu. Rozdiel je vo výpočte združenej pravdepodobnosti  $\Pr_{COR}(\beta, \alpha)$ , ktorú využíva.

$$CLR_{COR} = \sum_{\alpha=0}^{N_2} \Pr_{COR}(\beta = 1, \alpha) \quad (4.33)$$

Obdobne aj hodnoty parametrov CER a CBER majú rovnaký zápis ako v prípade detekčného algoritmu akurát s využitím združenej pravdepodobnosti  $\Pr_{COR}(\beta, \alpha)$ . Výsledné vzťahy budú

$$CER_{COR} = \sum_{\alpha=1}^{N_2} \Pr_{COR}(\beta = 0, \alpha) \quad (4.34)$$

$$CBER_{COR} = \frac{\sum_{\alpha=0}^{N_2} \alpha \cdot \Pr_{COR}(\beta = 0, \alpha)}{N_2 \cdot \sum_{\alpha=0}^{N_2} \Pr_{COR}(\beta = 0, \alpha)} \quad (4.35)$$

#### Štandardný HEC algoritmus

Pri hľadaní hodnôt jednotlivých parametrov v prípade štandardného HEC algoritmu budeme vychádzať z obr. 4.2. Najskôr potrebujeme zistiť hodnoty prechodových pravdepodobností medzi oboma stavmi (detekčným a korekčným) HEC algoritmu. Prechod zo stavu korekčného do detekčného ( $P_{C\_D}$ ) nastáva, keď práve prijatá bunka obsahuje chybu v hlavičke. To zodpovedá pravdepodobnosti, že ATM bunka obsahuje aspoň jednu chybu v hlavičke, čo je rovné hodnote parametra  $CLR_{DET}$ . Táto hodnota je rovná aj prechodovej pravdepodobnosti  $P_{D\_D}$ . Celkovo pre prechodové pravdepodobnosti platí

$$P_{C\_C} = P_{D\_C} = 1 - CLR_{DET} \quad (4.36)$$

$$P_{C\_D} = P_{D\_D} = CLR_{DET} \quad (4.37)$$

Pravdepodobnosť, že HEC algoritmus je v stave detekčnom, resp. korekčnom už ľahko vyrátame použitím vzťahu (2.9) zovšeobecnením na model HEC algoritmu

$$P_C = 1 - CLR_{DET} \quad (4.38)$$

$$P_D = CLR_{DET} \quad (4.39)$$

Pre úplný popis HEC algoritmu, ak modelujeme kanál modelom so závislými náhodnými chybami, potrebujeme ešte určiť pravdepodobnosti zahodenia ATM bunky v oboch stavoch. Pravdepodobnosť zahodenia bunky v stave korekčnom je rovná pravdepodobnosti, že bunka má v hlavičke viac než jednu chybu, čo sa rovná hodnote  $CLR_{COR}$  a analogicky pravdepodobnosť zahodenia bunky v stave detekčnom je rovná hodnote  $CLR_{DET}$ . Platí teda

$$P_{CLR\_C} = CLR_{COR} \quad , \quad P_{CLR\_D} = CLR_{DET} \quad (4.40)$$

Potom výsledná hodnota parametra CLR pre štandardný HEC algoritmus a model kanála so závislými chybami je rovný

$$\begin{aligned} CLR_{HEC} &= P_C \cdot P_{CLR\_C} + P_D \cdot P_{CLR\_D} = \\ &= (1 - CLR_{DET}) \cdot CLR_{COR} + CLR_{DET} \cdot CLR_{DET} \end{aligned} \quad (4.41)$$

Výpočet ďalších dvoch parametrov je založený na podobnom systéme popisu a odvádzania parametrov dvojstavového modelu štandardného HEC algoritmu. Výpočet vychádza z určenia zodpovedajúcej hodnoty parametra pre každý stav HEC algoritmu a pre násobení s pravdepodobnosťou zotrvania v danom stave. Na základe toho môžeme písať

$$CER_{HEC} = P_C \cdot CER_{COR} + P_D \cdot CER_{DET} \quad (4.42)$$

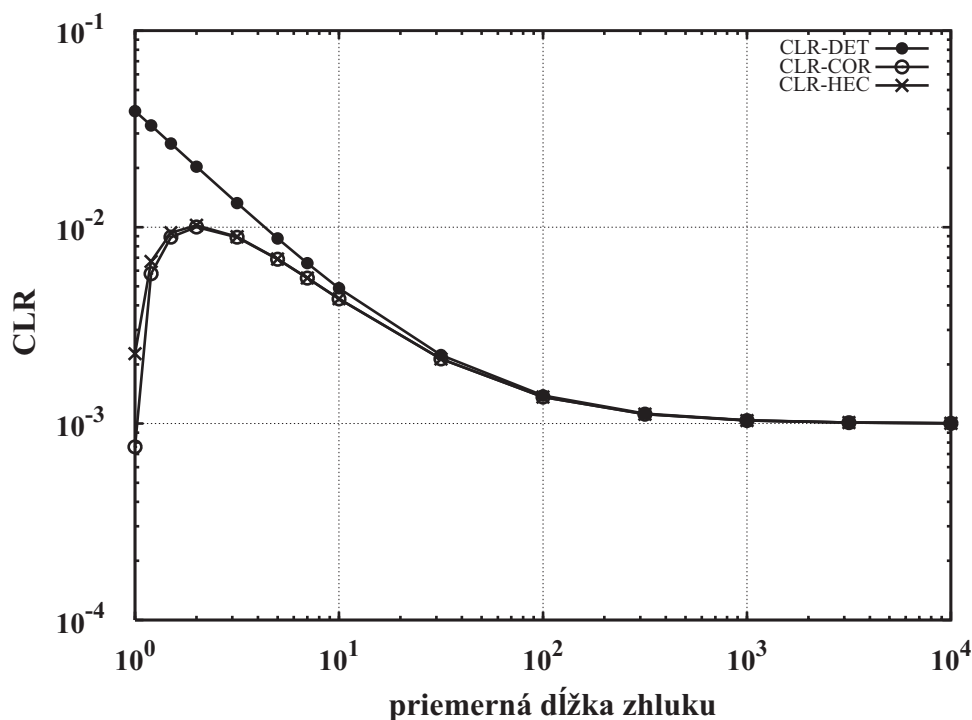
$$CBER_{HEC} = P_C \cdot CBER_{COR} + P_D \cdot CBER_{DET} \quad (4.43)$$

### Grafické zobrazenie výsledkov a ich vyhodnotenie

Hodnoty parametrov CLR, CER a CBER môžeme v prípade modelu kanála so závislými chybami analyzovať v závislosti od chybovosti kanála (BER) a povahy chýb v kanáli. Pretože výskyt bitových chýb je v zhlukoch, budeme ich charakterizovať priemernou dĺžkou ( $\varepsilon$ , [bit]). Vzťahy, ktorými je možné vypočítať priemernú dĺžku zhluku bitových chýb pre použitý Gilbertov model, boli uvedené v časti 2.4.2 ako vzťahy (2.13) a (2.15).

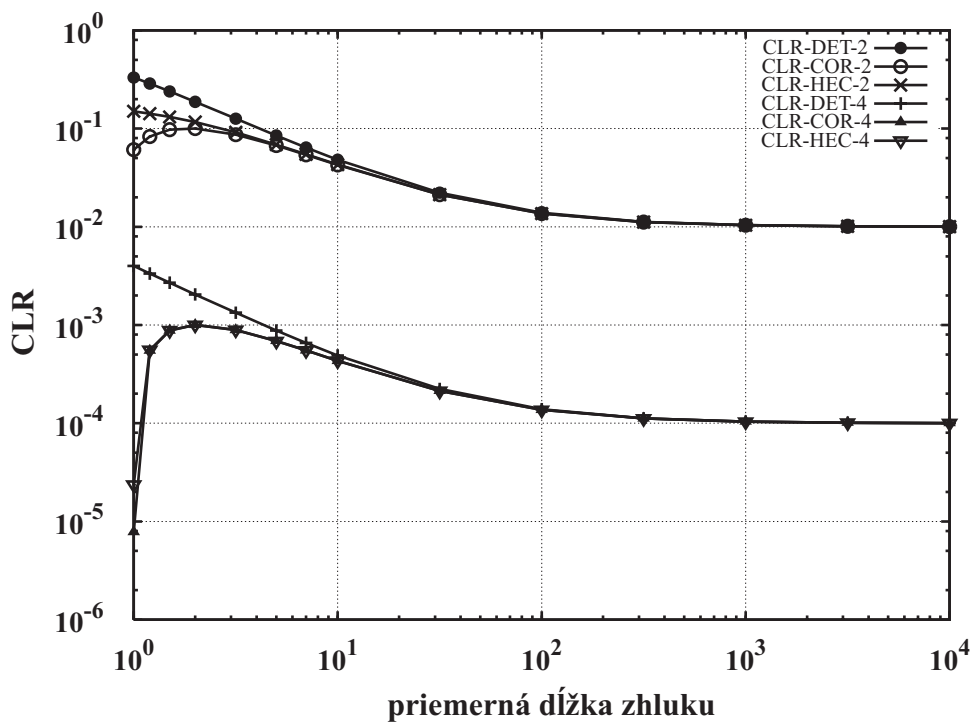
Graf závislosti hodnôt parametra CLR od priemernej dĺžky zhluku chýb pre prípad  $BER = 10^{-3}$  je znázornený na obr. 4.6 pre všetky typy HEC algoritmu. Z grafu (obr. 4.6) je vidieť, že hodnoty CLR pre všetky typy HEC algoritmu s rastúcou hodnotou priemernej dĺžky zhluku konvergujú k hodnote rovnjej BER kanála. Výkonnostný rozdiel medzi typmi HEC algoritmu je zjavný po hodnotu približne  $\varepsilon = 30$  bitov, potom už všetky podávajú rovnaké výsledky. Najhoršie výsledky vykazuje detekčný mód HEC algoritmu. Úplne najlepšie výsledky síce dáva korekčný mód, ale rozdiel od výkonu štandardného HEC algoritmu je veľmi malý a s rastúcou hodnotou  $\varepsilon$  sa znižuje. Z grafu taktiež vyplýva, že všetky typy HEC algoritmu majú najväčšie problémy pri menších dĺžkach zhlukov chýb ako pri väčších. Je to dané tým, že CRC kód má schopnosť opravovať iba jednu chybu v hlavičke a v kritickej oblasti je kanál charakteristický veľkým počtom malých zhlukov, s ktorými si CRC kód nedokáže „poradiť“ a tým veľké percento ATM buniek je zahodených. Najväčšia a tým najhoršia hodnota parametra CLR je dosahovaná približne pre prípad  $\varepsilon = 2$  bity (pre štandardný a korekčný mód HEC algoritmu). Pre oblasť dlhších zhlukov (približne od  $\varepsilon = 30$

bitov) platí, že sú zhľuky síce dlhšie, ale na druhej strane je ich menej (v zmysle frekvencie výskytu) a vtedy zasiahnú len jednu prípadne niekoľko nasledujúcich ATM buniek, ktoré budú zahodené. Až to príde do stavu, keď sa vyskytne veľmi dlhý zhľuk chýb, kedy sú zahodené pravdepodobne všetky ATM bunky ním zasiahnuté, no potom až po výskyt ďalšieho zhľuku bude veľmi dlhá séria správne prijatých buniek. Tieto priebehy budú pre nás ďalej smerodajné pri porovnávaní s výkonnosťou HEC algoritmu, ak sa použije niektorá z metód prekladania.

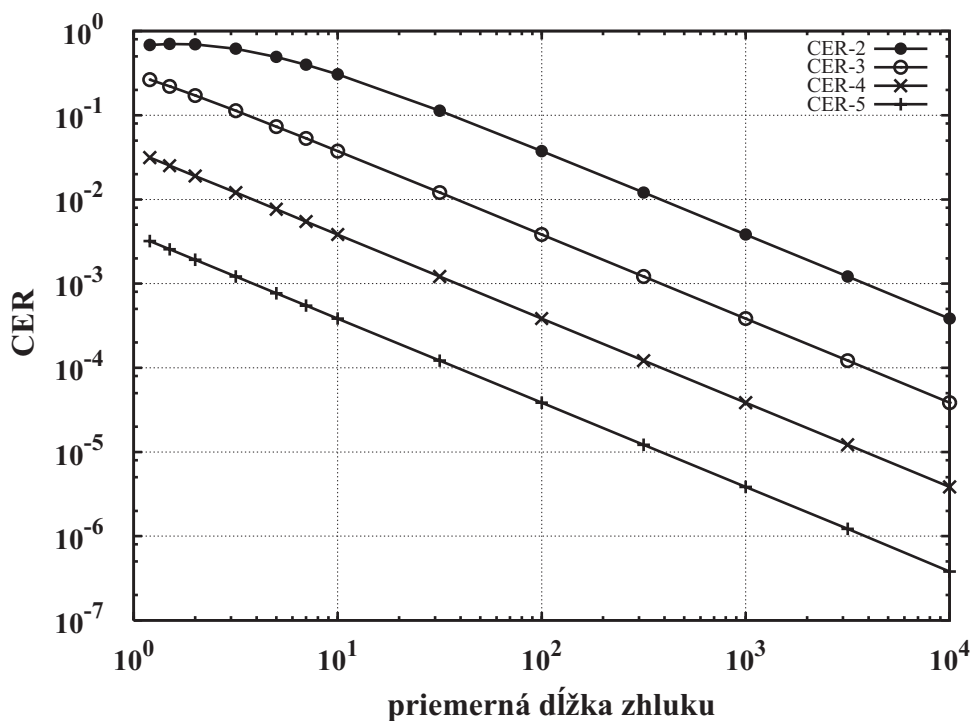


Obr. 4.6 Parameter CLR v závislosti od priemernej dĺžky zhľuku chýb pre model kanála so závislými chybami pre  $BER = 10^{-3}$

Porovnanie správania sa jednotlivých HEC algoritmov pre ďalšie hodnoty chybovosti kanála ( $10^{-2}$ ,  $10^{-4}$ ) je uvedené na obr. 4.7. Porovnaním priebehov parametra CLR pre rôzne BER je vidieť, že od hodnoty  $\varepsilon = 10$  bitov konverguje hodnota CLR reprezentujúca výkon HEC algoritmov k hodnote BER. S rastúcou hodnotou BER sa znižuje rozdiel medzi výkonom korekčného a štandardného HEC algoritmu. Pre hodnoty  $BER = 10^{-3}$  a menšie dosahuje výkon korekčného a štandardného algoritmu najhoršie výsledky pre prípad, keď je priemerná dĺžka zhľuku chýb rovná 2 bitom. Fyzická bitová chybovosť mnohých bezdrôtových kanálov sa pohybuje v intervale  $10^{-2}$  až  $10^{-3}$ , preto v rámci mnohých ďalších analýz a vyhodnocovaní budeme určovať hodnoty výkonnostných parametrov najmä pre hodnotu  $BER = 10^{-3}$ .



Obr. 4.7 Parameter CLR v závislosti od priemernej dĺžky zhluku chýb pre model kanála so závislými chybami pre  $BER = 10^{-2}$  a  $BER = 10^{-4}$



Obr. 4.8 Parameter CER v závislosti od priemernej dĺžky zhluku chýb pre model kanála so závislými chybami pre hodnoty  $BER = \{10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}\}$

Priebehy pre parameter CER, ktorý predstavuje pravdepodobnosť, že úspešne prijatá ATM bunka bude obsahovať jednu alebo viac chýb v informačnej časti, sú zobrazené v grafe na obr. 4.8. Každý priebeh je realizovaný pre konkrétnu hodnotu BER (CER-2 je závislosť hodnôt parametra CER od priemernej dĺžky zhľuku pri  $BER = 10^{-2}$ , CER-3 pri  $BER = 10^{-3}$ , CER-4 pri  $BER = 10^{-4}$  a CER-5 zodpovedá kanálu s  $BER = 10^{-5}$ ). Na základe porovnania hodnôt uvedených v tab. 4.1 môžeme stanoviť, že najhoršie hodnoty parametra CER dosahuje korekčný typ HEC algoritmu. Rozdiely medzi jednotlivými hodnotami priebehov pre všetky tri typy HEC algoritmu sú však až na treťom platnom (rátanom od prvej nenulovej číslice za desatinnou čiarkou) desatinnom mieste, preto môžeme povedať, že výber typu HEC algoritmu len veľmi málo ovplyvní výsledný priebeh parametra CER.

$\varepsilon$ [bit]	CER-DET	CER-COR	CER-HEC
1.20	0.26513530	0.27269058	0.27244133
1.50	0.22009121	0.22427839	0.22416670
2.00	0.17133839	0.17334325	0.17330252
3.16	0.11303071	0.11372239	0.11371322
5.00	0.07335423	0.07364229	0.07363976
7.00	0.05308499	0.05325667	0.05325554
10.00	0.03752640	0.03763447	0.03763394
31.60	0.01206357	0.01209503	0.01209496
100.00	0.00383115	0.00384110	0.00384109
316.00	0.00121430	0.00121746	0.00121746
1000.00	0.00038391	0.00038491	0.00038491
3160.00	0.00012151	0.00012183	0.00012183
10000.00	0.00003840	0.00003850	0.00003850

Tab. 4.1 Hodnoty priebehov parametra CER pre detekčný (CER-DET), korekčný (CER-COR) a štandardný (CER-HEC) typ HEC algoritmu v závislosti od  $\varepsilon$  ( $BER = 10^{-3}$ )

Z grafu na obr. 4.8 ďalej vidíme, že parameter CER má v závislosti od priemernej dĺžky zhľuku klesajúci charakter. To znamená, že ak sú zhľuky dlhšie a menej častejšie, znižuje sa nám hodnota parametra CER. Je to dané tým, že pre menšie hodnoty  $\varepsilon$  sú zhľuky kratšie a častejšie, preto mnohé bunky, ktoré sú úspešne prijaté s veľkou pravdepodobnosťou obsahujú nejaký zhľuk (alebo jeho časť) v informačnom poli. Naopak, keď dlhý zhľuk zasiahne jednu prípadne viac buniek, všetky alebo takmer všetky bunky budú zahodené, no potom nastane dlhý sled buniek bez chýb, pretože s rastúcou priemernou veľkosťou zhľukov narastá aj priemerná vzdialenosť medzi nimi.



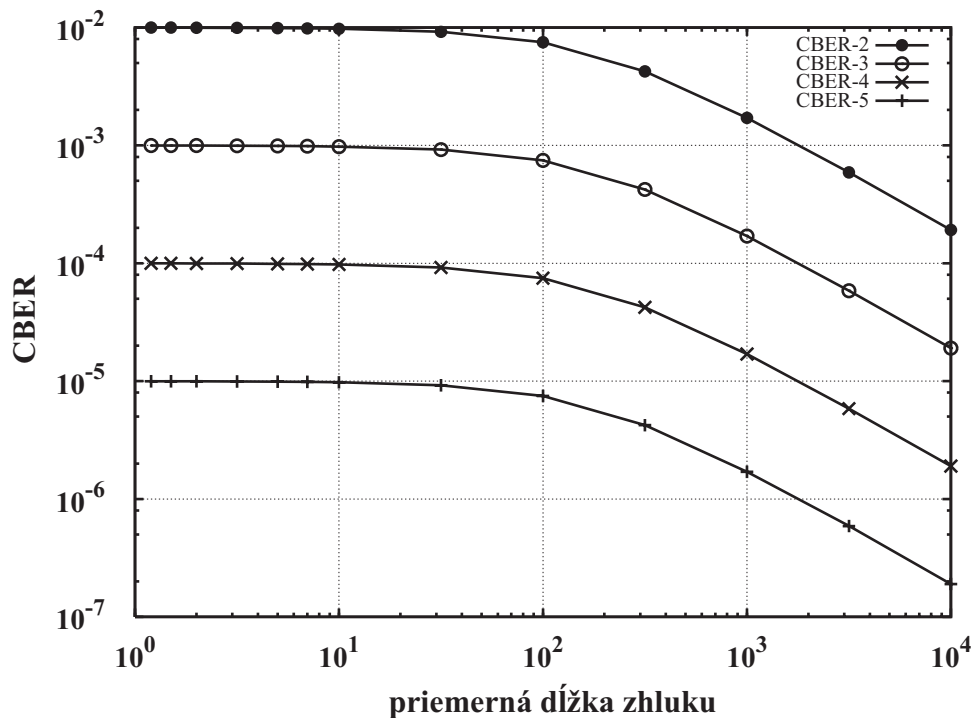
Priebehy parametra CER pre hodnoty  $BER = 10^{-3}$  a menšie zachovávajú lineárny klesajúci charakter a sú vždy posunuté o jeden rád.

Posledným skúmaným parametrom je CBER udávajúci početnosť chýb v informačných častiach úspešne prijatých ATM buniek. Cieľom je, aby hodnota CBER bola čo najmenšia. Tab. 4.2 obsahuje hodnoty parametra CBER v závislosti od priemernej dĺžky zhľuku chýb pri  $BER = 10^{-3}$  pre všetky tri typy HEC algoritmu. Porovnaním zodpovedajúcich hodnôt opäť vidíme, že výber typu HEC algoritmu ovplyvňuje výsledný priebeh CBER len veľmi málo (rozdiel je opäť až na treťom platnom desatinnom mieste hodnôt).

$\varepsilon$ [bit]	CBER-DET	CBER-COR	CBER-HEC
1.20	0.00099948	0.00099990	0.00099989
1.50	0.00099870	0.00099955	0.00099953
2.00	0.00099740	0.00099869	0.00099866
1.16	0.00099438	0.00099616	0.00099613
5.00	0.00098960	0.00099168	0.00099166
7.00	0.00098439	0.00098662	0.00098661
10.00	0.00097659	0.00097893	0.00097892
31.60	0.00092040	0.00092292	0.00092291
100.00	0.00074786	0.00075038	0.00075038
316.00	0.00042285	0.00042468	0.00042468
1000.00	0.00017025	0.00017108	0.00017108
3160.00	0.00005859	0.00005888	0.00005888
10000.00	0.00001903	0.00001912	0.00001912

Tab. 4.2 Hodnoty priebehov parametra CBER pre detekčný (CBER-DET), korekčný (CBER-COR) a štandardný (CBER-HEC) typ HEC algoritmu v závislosti od  $\varepsilon$  ( $BER = 10^{-3}$ )

Výsledné priebehy parametra CBER v závislosti od priemernej dĺžky zhľuku chýb pre štyri rôzne hodnoty BER (CBER-2 zodpovedá chybovosti  $BER = 10^{-2}$ , CBER-3 zodpovedá  $BER = 10^{-3}$  atď.) sú zobrazené na obr. 4.9. Parameter CBER má klesajúci charakter s rastúcou hodnotou  $\varepsilon$ . Pre relatívne krátke zhľuky chýb je hodnota CBER takmer rovná fyzickej chybovosti kanála (BER). Čím sú zhľuky chýb v priemere dlhšie, tým sú takmer všetky zasiahnuté ATM bunky zhľukom chýb zahodené. Množstvo chýb sa preto nedostane prostredníctvom ATM buniek do AAL vrstvy a tým je chybovosť kanála, ktorú uvidia protokoly AAL vrstvy nižšia ako BER. Závislosti parametra CBER pre rôzne hodnoty BER, ako je vidieť z grafu na obr. 4.9, síce nemenia svoj tvar, ale sú posunuté vždy o jeden rád.

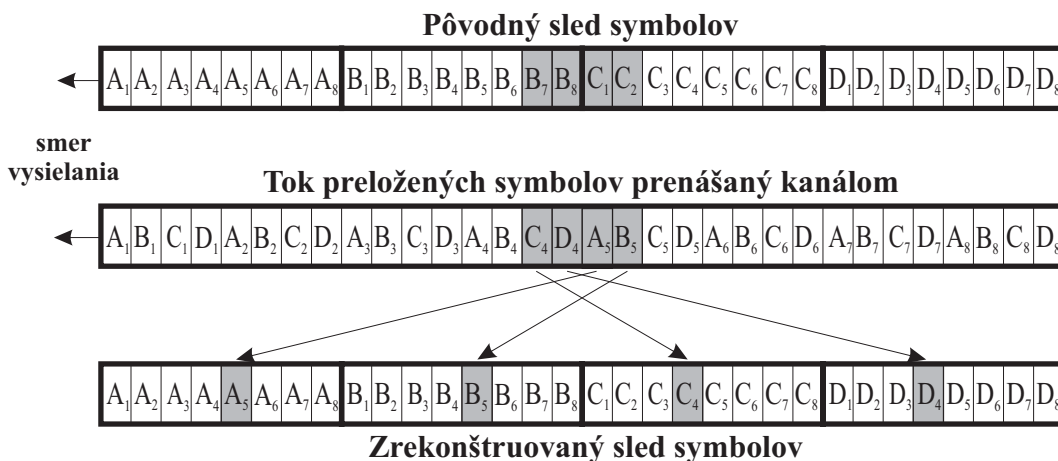


Obr. 4.9 Parameter CBER v závislosti od priemernej dĺžky zhluky chýb pre model kanála so závislými chybami pre hodnoty  $BER = \{10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}\}$

### 4.3 Štandardná metóda prekladania bitov

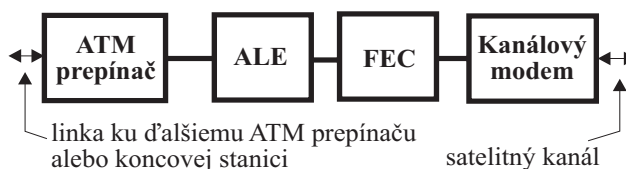
Jednou z metód navrhnutou v časti 2.2, ktorú možno použiť pre ochranu údajov proti zhlukovému prejavu chýb, bola metóda prekladania údajov, ktorá však prináša zlepšenie len v súčinnosti s kódom, ktorý má korekčné schopnosti. Pomocou obr. 4.10 si stručne ukážeme princíp činnosti blokovej metódy prekladania údajov. Situácia je založená na tom, že kanálom, ktorý je charakteristický zhlukovým prejavom chýb, prenášame bloky – symboly – dlhé jeden bajt (8 bitov). Prvý riadok reprezentuje spôsob prenosu bez prekladania – symbol za symbolom. Druhý riadok predstavuje prenos tých istých symbolov, ale s použitím metódy blokového prekladania po bitoch s hĺbkou prekladania 4 symboly. Tretí riadok obsahuje opätovne zložené prenesené symboly v prijímači. Ďalej obr. 4.10 obsahuje zasiachnutie oboch prenosov tým istým zhlukom bitových chýb (zvýraznené bity). Jednotlivé symboly obsahujú v sebe kód, ktorý dokáže opraviť jednu chybu vo vnútri symbolu. Pri prvom type prenosu vidíme, že pri takomto zasiachnutí sú zahodené dva symboly, pretože každý obsahuje dve chyby a tie použitý kód nedokáže opraviť. V druhom prípade vidíme, že po prenesení prekladaných symbolov a následnom zostavení pôvodných symbolov, sa zhluk bitových chýb rozdelil po jednom chybnom bite do každého symbolu. Použitý kód v každom symbole

dokáže opraviť danú chybu a preto žiaden symbol nie je zahodený. Na druhej strane v prípade dlhších zhlukov chýb nám účinnosť metódy prekladania zlyháva. Preto je potrebné zvoliť primeranú hĺbku prekladania symbolov vzhľadom ku kvalite použitého kanála.



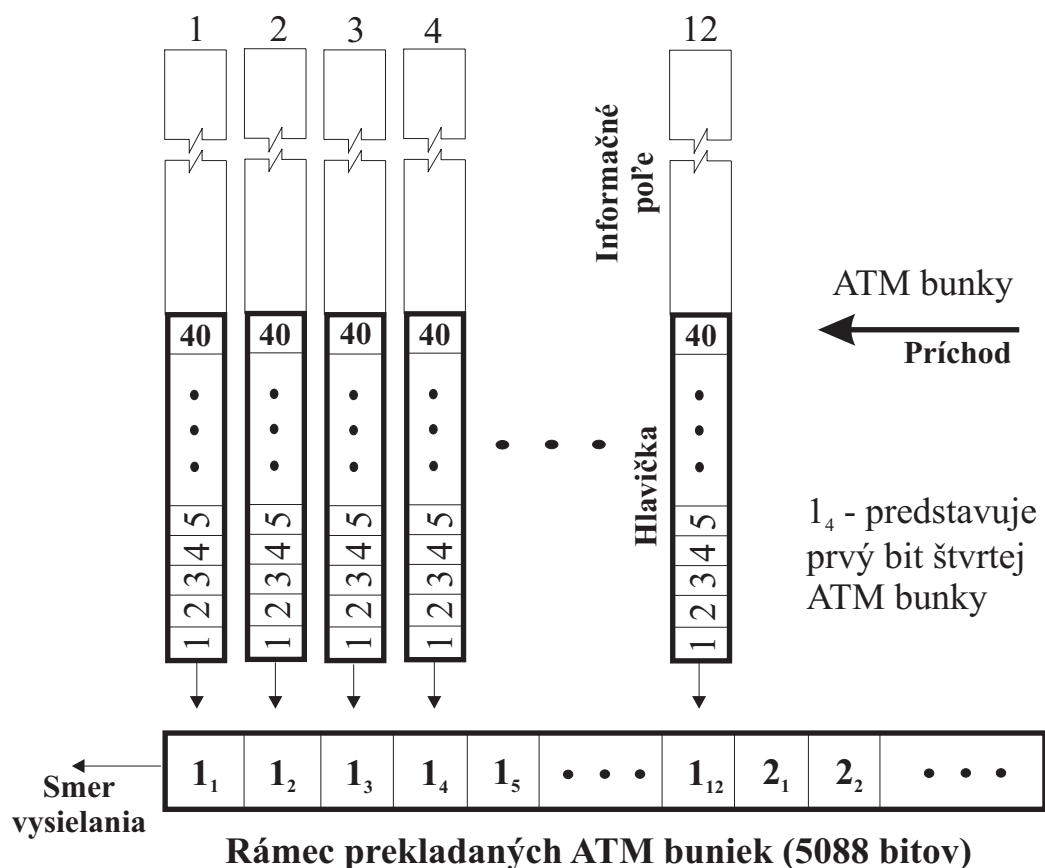
Obr. 4.10 Všeobecný princíp prekladania údajov

Autori v [Chit94] navrhli použiť túto metódu prekladania, ktorú sme kvôli prehľadnosti označili ako štandardná metóda prekladania, v satelitnom ATM systéme. Techniku označili ako ALE (ATM link enhancement) a jej umiestnenie je zobrazené na obr. 4.11.



Obr. 4.11 Zakomponovanie funkcie ALE do prenosového reťazca

Aplikáciu štandardnej metódy prekladania po bitoch na prenos ATM buniek zobrazuje obr. 4.12. Prekladanie je realizované s hĺbkou 12 ATM buniek. Výhodou metódy prekladania je aj to, že nevnáša do prenosu dodatočnú réžiu. Na druhej strane nevýhodou je ďalšie oneskorenie, ktoré je pridané do prenosu ATM buniek. Účinnosť metódy prekladania sa prejavuje vtedy, ak maximálna dĺžka zhluku bitových chýb je menšia nanajvýš rovná hĺbke prekladania ATM buniek.



Obr. 4.12 Princíp štandardného blokového prekladania ATM buniek

Na základe obr. 4.12 je možné vypožorovať dve možnosti, ako realizovať štandardné prekladanie ATM buniek. Vychádza to z toho, že bezpečnostný kód, s ktorým je zviazaná metóda prekladania, je CRC kód v HEC poli hlavičky ATM bunky. Tento kód ale ochraňuje iba hlavičku ATM bunky, preto sa vynára otázka, či realizovať prekladanie po bitoch iba hlavičiek ATM buniek a informačné časti sa už nebudú prekladať alebo sa budú prekladať po bitoch celé ATM bunky (aj informačné časti). Spôsob, či sa informačné polia prekladajú alebo nie, neovplyvní ATM vrstvu, ale pociťia to hlavne protokoly AAL vrstiev a prípadne aj vyššie vrstvy. Podrobnejšiemu skúmaniu a vyhodnoteniu týchto vplyvov sa budeme venovať pri vyhodnotení výsledných závislostí parametrov CLR, CER a CBER pre túto štandardnú metódu prekladania.

Hľadanie analytického vyjadrenia skúmaných parametrov je teraz skomplikované tým, že jednotlivé bity buniek sú poprehadzované. Ak sú ATM bunky vysielané jedna za druhou, sú aj susedné bity buniek vysielane za sebou. To znamená, že pri prenose prvého z dvoch po sebe idúcich bitov bol kanál v stave  $i$ , potom nastal prechod do stavu  $j$  a bol prenesený s danou pravdepodobnosťou druhý bit. Prechodová pravdepodobnosť  $P_{ij}$  je teda jednokroková prechodová pravdepodobnosť, ktorá je daná prechodovou maticou  $\mathbf{P}$  Gilbertovho modelu

použitého na modelovanie bezdrôtového kanála a zobrazeného na obr. 4.5. Ak použijeme metódu prekladania, susednosť bitov buniek sa poruší. Prekladanie spôsobí to, že medzi pôvodne dva susedné bity sa vložia bity ďalších prekladaných buniek. Vzdialenosť medzi dvomi pôvodne susednými bitmi bude rovná hĺbke prekladania ( $d$ ), čo znamená, že pri prenose prvého bitu bude kanál v stave  $i$  potom nastane  $d$  prechodov cez stavy kanála až nastane prenos druhého bitu z tejto dvojice v stave  $j$ . Z toho vyplýva, že potrebujeme nájsť vyjadrenie vo všeobecnosti  $n$ -krokovej prechodovej pravdepodobnosti  $P_{ij}^n$ , ktorá vyjadruje pravdepodobnosť, že ak bol kanál v stave  $i$  po  $n$  prechodoch (krokoch) bude v stave  $j$ :

$$P_{ij}^n = P\{X_{n+r} = j \mid X_r = i\}, \quad r, n \geq 0, \quad i, j \in \{0,1\} \quad (4.44)$$

kde zápis  $X_r = i$  reprezentuje situáciu, že stochastický proces  $X$  (kanál) je v čase  $r$  v stave  $i$ . Týmto problémom sa zaoberali Chapman a Kolmogorov, ktorý našli rovnice, pomocou ktorých je možné vypočítať hľadané  $n$ -krokové prechodové pravdepodobnosti. Tieto rovnice sú nasledovné

$$P_{ij}^{n+r} = \sum_{m=0}^{M-1} P_{im}^n \cdot P_{mj}^r \quad (4.45)$$

kde  $M$  predstavuje počet stavov kanála.

Ak označíme  $\mathbf{P}^{(n)}$  maticu, ktorá obsahuje  $n$ -krokové prechodové pravdepodobnosti, potom platí

$$\mathbf{P}^{(n)} = \mathbf{P}^n = \prod_{k=1}^n \mathbf{P} \quad (4.46)$$

Analytický popis prenosu ATM buniek kanálom so závislými chybami bez prekladania vychádza zo základných jednokrokových prechodových pravdepodobností  $P_{ij}$ , ktoré tvoria maticu prechodov  $\mathbf{P}$ , pričom platí  $\mathbf{P} = \mathbf{P}^1$ . V prípade, že použijeme metódu štandardného prekladania, musíme použiť  $d$ -krokové prechodové pravdepodobnosti, ktoré vypočítame ako  $\mathbf{P}^d$ , pričom  $d$  je hĺbka prekladania. To znamená, že pôvodný Gilbertov model sa zmení na nový Gilbertov model s inými prechodovými pravdepodobnosťami. Na základe tohto vieme analyticky vypočítať hodnoty hľadaných parametrov pre všetky typy HEC algoritmu.

Zmeny, ktoré nastanú vo výpočtoch parametrov pre prípad s prekladaním v porovnaní s výpočtami parametrov pre prenos bez metódy prekladania, sa budú týkať najmä výpočtu pravdepodobností  $\varnothing_{ij}(s,n)$ . Na výpočet teda potrebujeme pravdepodobnosť, že  $n$  bitov prenesených v časových okamihoch  $\{0, 1, 2, \dots, n-1\}$  bude obsahovať práve  $s$  chýb za predpokladu, že kanál modelovaný Gilbertovým modelom s maticou prechodov  $\mathbf{P}^d$  bol v čase 0 v stave  $i$  a v čase  $n$  v stave  $j$ . Označme ju  $\varnothing_{ij}^{(d)}(s,n)$  a platí

$$\varnothing_{ij}^{(d)}(s,n) = \sum_{m=0}^1 (1 - P_e(i)) \cdot P_{im}^d \cdot \varnothing_{mj}^{(d)}(s,n-1) + \sum_{m=0}^1 P_e(i) \cdot P_{im}^d \cdot \varnothing_{mj}^{(d)}(s-1,n-1) \quad (4.47)$$

$$\varnothing_{ij}^{(d)}(s,n) = \sum_{m=0}^1 \varnothing_{im}^{(d)}(s,n-1) \cdot (1 - P_e(m)) \cdot P_{mj}^d + \sum_{m=0}^1 \varnothing_{im}^{(d)}(s-1,n-1) \cdot P_e(m) \cdot P_{mj}^d \quad (4.48)$$

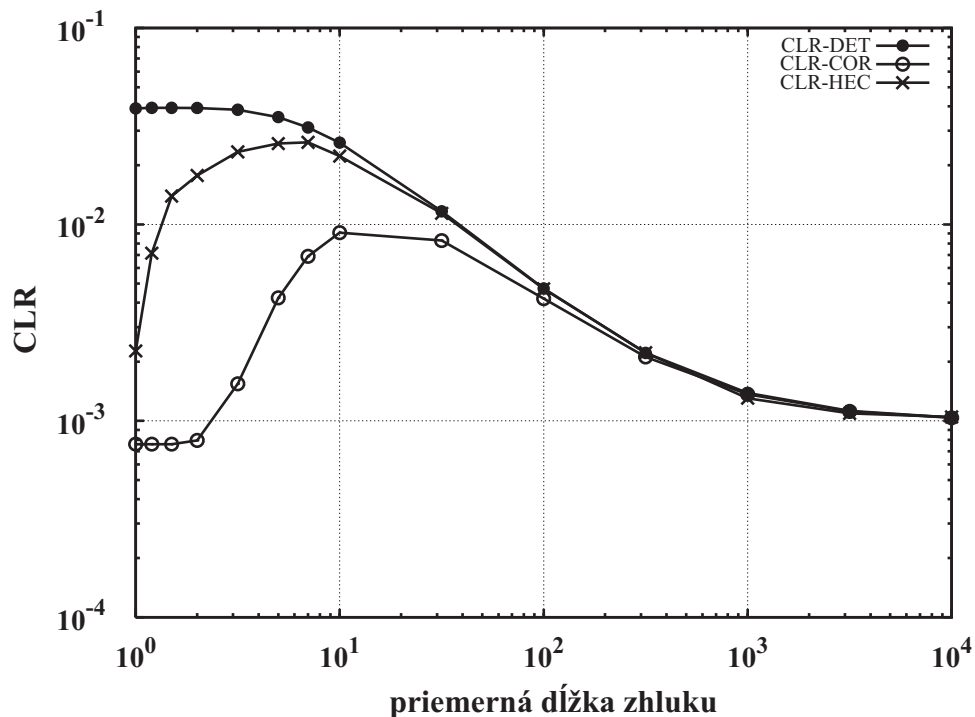
Túto pravdepodobnosť ( $\varnothing_{ij}^{(d)}(s,n)$ ) potom použijeme vo všetkých ďalších výpočtoch. Pre prípad štandardného prekladania celých ATM buniek (vrátane informačných polí) nahradíme vo všetkých ostatných vzťahoch uvedených pre prípad bez prekladania pravdepodobnosť  $\varnothing_{ij}(s,n)$  pravdepodobnosťou  $\varnothing_{ij}^{(d)}(s,n)$ . Potom by napríklad vzťah na výpočet združenej pravdepodobnosti  $Pr(\beta, \alpha)$  pre detekčný mód HEC algoritmu vyzeral

$$\Pr_{DET\_PREK}(\beta = 0, \alpha) = \sum_{i=0}^1 \sum_{m=0}^1 \sum_{j=0}^1 \pi_i^{(d)} \cdot \varnothing_{im}^{(d)}(0, N_1) \cdot \varnothing_{mj}^{(d)}(\alpha, N_2) \quad (4.49)$$

$$\Pr_{DET\_PREK}(\beta = 1, \alpha) = \sum_{i=0}^1 \sum_{m=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{l=1}^{N_1} \pi_i^{(d)} \cdot \varnothing_{im}^{(d)}(l, N_1) \cdot \varnothing_{mj}^{(d)}(\alpha, N_2) \quad (4.50)$$

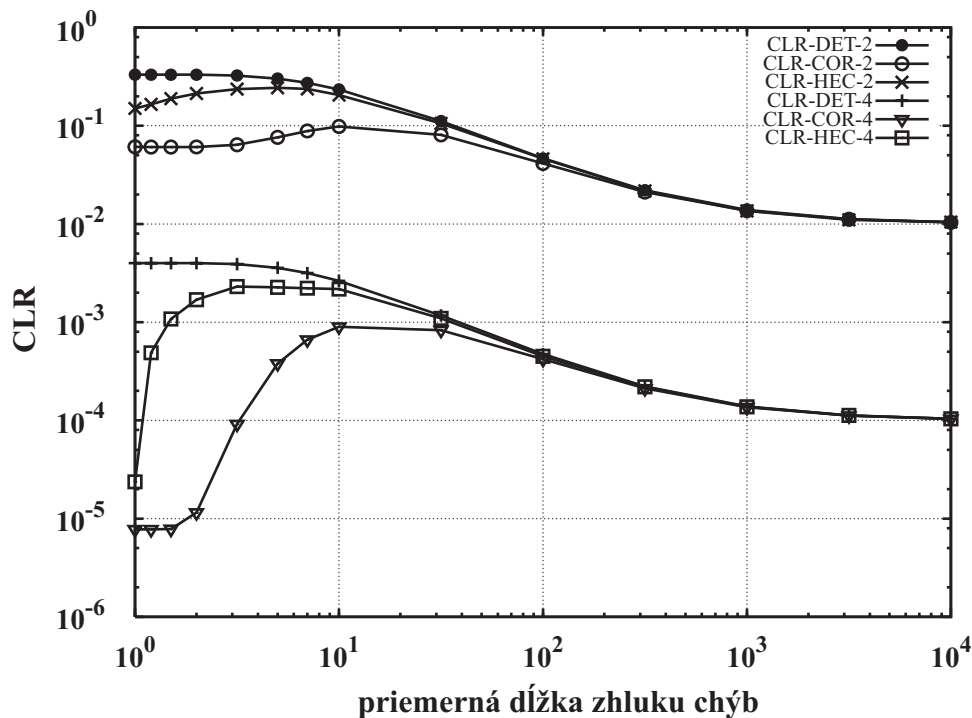
kde  $\pi_i^{(d)}$  sú finálne pravdepodobnosti vypočítané z prechodových pravdepodobností  $P_{ij}^n$ .

Prípad, keď pred prenosom ATM buniek prekladáme iba hlavičky je zložitejší, pretože v tomto prípade vzdialenosť informačného poľa od posledného hlavičkového bitu rovnakej ATM bunky je závislá od indexu (číslo v rade) danej ATM bunky pred predkladaním. Preto výpočet by musel byť prevádzaný na celom bloku vytvorenom z preložených ATM buniek, ktorého veľkosť by bola  $d \cdot 424$  bitov, lebo až na jeho úrovni je dodržaná opakovateľnosť pri prenose kanálom. To je však spojené s výpočtom požadovanej združenej pravdepodobnosti  $Pr(\beta, \alpha)$  pre každú preloženú bunku zvlášť a až výsledný priemer zo všetkých združených pravdepodobností by bolo možné použiť ďalej vo výpočtoch.

**Grafické zobrazenie výsledkov a ich vyhodnotenie**

Obr. 4.13 Závislosti parametra CLR pre jednotlivé typy HEC algoritmu od priemernej dĺžky zhluku chýb ( $\epsilon$ ), keď BER je  $10^{-3}$  a je použitá štandardná metóda prekladania ATM buniek

Pohľad na výslednú závislosť parametra CLR pre všetky typy HEC algoritmov od priemernej dĺžky zhluku chýb v kanáli s bitovou chybovosťou  $10^{-3}$ , ak sa pri prenose použije štandardná metóda prekladania bitov, opísaná v tejto časti, je znázornený na obr. 4.13. Hĺbka prekladania je 10 ATM buniek. Ako sa dalo predpokladať, najlepší výkon podal korekčný mód a najhorší výkon detekčný mód. Aj pri použití prekladania konverguje hodnota parametra CLR pre všetky typy HEC algoritmu k hodnote BER kanála. Môžeme to sledovať aj na obr. 4.14, kde je závislosť parametra CLR zobrazená aj pre BER =  $10^{-2}$  a  $10^{-4}$ . Výkon korekčného módu je v dôsledku použitého prekladania pre malé priemerné dĺžky zhlukov (do dĺžky 2 bitov pri  $d = 10$ ) udržaný na najnižšej úrovni až potom nastáva jeho nárast kvôli nedostatočnej hĺbke prekladania. Štandardný HEC algoritmus je značne nevýkonný, ak použijeme metódu štandardného prekladania, lebo so zoskupovaním chýb okamžite narastá hodnota CLR na svoje maximum.

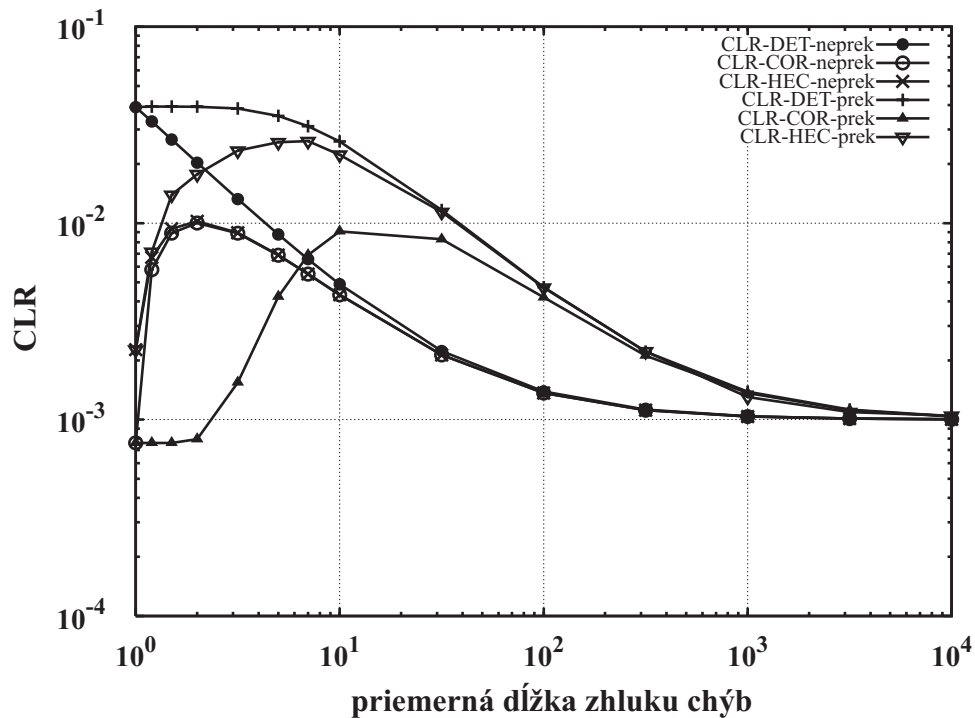


Obr. 4.14 Závislosť parametra CLR pre všetky typy HEC algoritmu prijímača od  $\epsilon$  pre rôzne BER ( $10^{-2}$  a  $10^{-4}$ ) s použitím štandardnej metódy prekladania ATM buniek

Oveľa zaujímavšie je porovnanie výkonnosti všetkých typov HEC algoritmu v závislosti od priemernej dĺžky zhluku chýb  $\epsilon$  pri BER =  $10^{-3}$  medzi prípadom, kedy sa pri prenose nepoužije prekladanie a prípadom, kedy je štandardné prekladanie ATM buniek použité. Toto porovnanie je zobrazené na obr. 4.15. V oboch prípadoch dosahuje detekčný mód HEC algoritmu najhoršie výsledky a korekčný mód naopak najlepšie výsledky (čiže najnižšie hodnoty parametra CLR). Ako už bolo spomenuté skôr, metóda prekladania musí byť zviazaná s kódom s korekčnými schopnosťami. Pri detekčnom móde sa však táto schopnosť CRC kódu nevyužíva, preto sa dá čakať, že detekčný mód bude dávať najhoršie výsledky vždy, keď sa použije niektorá z metód prekladania. Preto pri použití detekčného módu v reálnych aplikáciách, je použitie metódy prekladania nevhodné. Z grafu na obr. 4.15 je vidieť, že výkon korekčného a štandardného HEC algoritmu v prípade bez prekladania dáva porovnateľný výkon. Akonáhle sa pri prenose použije štandardné prekladanie, výkon štandardného HEC algoritmu je značne degradovaný až do takej miery, že dáva horšie výsledky ako v prípade, keď sa nepoužilo prekladanie. Porovnanie výkonnosti korekčného módu v prípade bez prekladania s prípadom s prekladaním je závislé na časti osi reprezentujúcej priemernú dĺžku zhluku chýb ( $\epsilon$ ). Všeobecne možno povedať, že pre malé  $\epsilon$  metóda štandardného prekladania zlepšuje jeho výkonnosť, no pre väčšie  $\epsilon$  zhoršuje. Pre

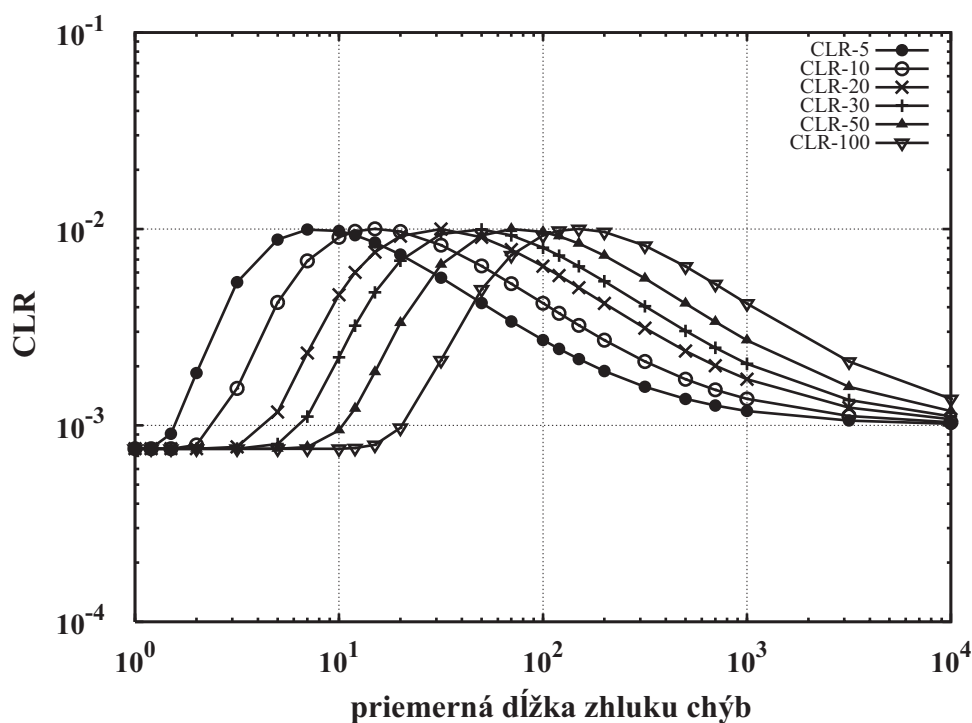


prípád prekladania na obr. 4.15 s hĺbkou prekladania 10 ATM buniek je bod preklopenia tejto výkonnosti pre  $\varepsilon$  rovné približne 6 bitov.

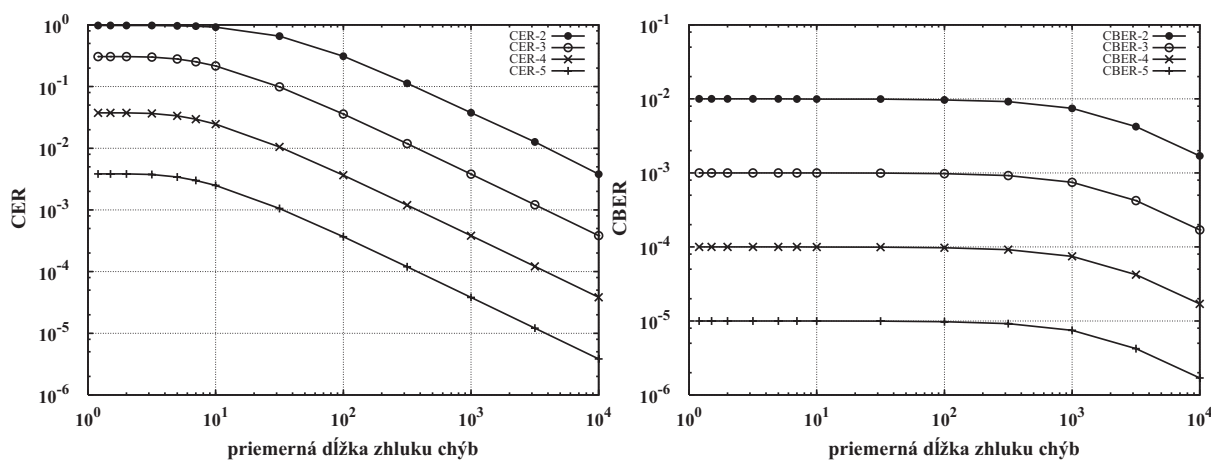


Obr. 4.15 Porovnanie závislostí parametra CLR od  $\varepsilon$  pre všetky typy HEC algoritmu pre BER kanála  $10^{-3}$  s a bez použitej štandardnej metódy prekladania ATM buniek

Vplyv hĺbky prekladania na výkonnosť korekčného módu HEC algoritmu je uvedená na obr. 4.16. Je zrejmé, že čím väčšia hĺbka prekladania, tým je aj oblasť, na ktorej je výkonnosť korekčného módu lepšia oproti prípadu bez prekladania, väčšia. To má ale za následok vnášanie značného oneskorenia do prenosu, čo je pre interaktívne služby neprijateľné. Preto je potrebné nájsť kompromis medzi hĺbkou prekladania a dodatočným oneskorením, ktoré je prekladáním spôsobené [Desi02], [Zorz99].



Obr. 4.16 Parameter CLR pre korekčný mód HEC algoritmu s použitím štandardnej metódy prekladania ATM buniek v závislosti od  $\varepsilon$  pre rôzne hĺbky prekladania ( $\text{BER} = 10^{-3}$ )



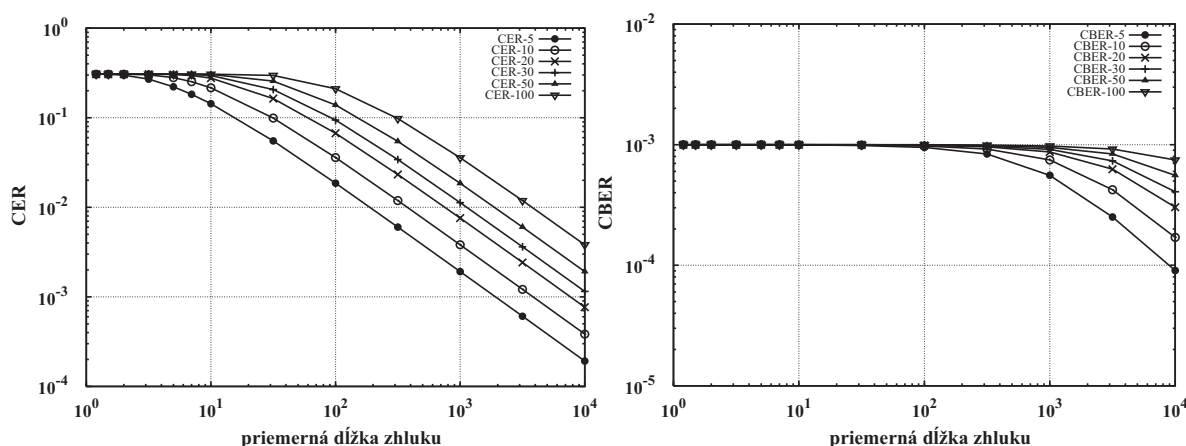
Obr. 4.17 Závislosť parametrov CER a CBER od priemernej dĺžky zhluku chýb pre rôzne BER ( $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$ ) s použitím štandardnej metódy prekladania pri prenose

Na základe tab. 4.3 je vidieť, že typ HEC algoritmu ovplyvňuje hodnoty parametrov CER a CBER, ak je použité prekladanie, veľmi málo (rozdiely sú až na treťom platnom desatinnom mieste). Preto bude na nasledujúcich grafoch braný do úvahy len jeden typ. Z obr. 4.17 je vidieť, že v prípade prekladania má hodnota parametra CER klesajúci charakter. Je to dané tým, že so zväčšujúcim sa zhlukom chýb oproti hĺbke prekladania má prekladanie malý

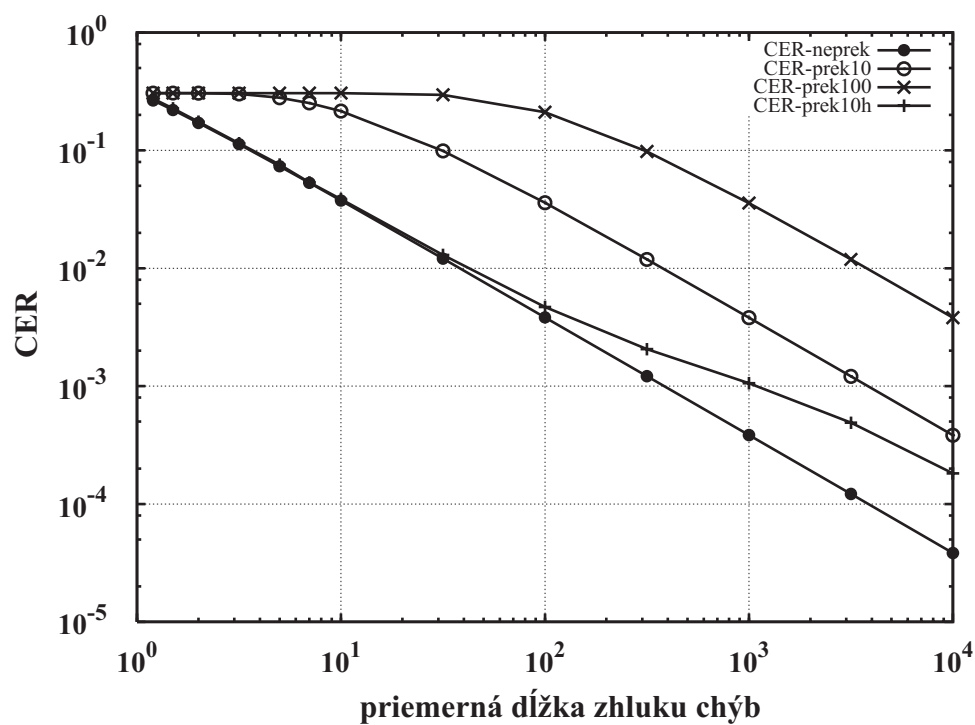
vplyv na zmenu charakteru zhľuku chýb, a preto bunky napadnuté týmto zhľukom budú takmer všetky zahodené. Ak sa bude hĺbka prekladania zväčšovať (obr. 4.18), bude aj klesajúci charakter parametra CER posunutý k vyšším hodnotám priemernej dĺžky zhľuku chýb. Podobné je možné konštatovať aj pre parameter CBER. Ak sa použije prekladanie, hodnota parametra CBER má tiež klesajúci charakter (obr. 4.17), pretože s rastúcou dĺžkou zhľuku chýb je so zahodenými bunkami zahodených viac chýb a klesanie ovplyvní iba hodnota hĺbky prekladania (obr. 4.18).

$\varepsilon$ [bit]	CER-DET	CER-COR	CER-HEC	CBER-DET	CBER-COR	CBER-HEC
2	0.30625350	0.31849341	0.31801368	0.00100000	0.00100000	0.00100000
3.16	0.30114760	0.31270389	0.31226015	0.00099994	0.00100000	0.00099999
5	0.28015660	0.28921721	0.28889824	0.00099969	0.00099996	0.00099995
7	0.25257517	0.25903065	0.25882935	0.00099929	0.00099984	0.00099982
10	0.21568674	0.21962253	0.21951988	0.00099861	0.00099950	0.00099948
31.6	0.09913708	0.09965438	0.09964834	0.00099314	0.00099502	0.00099500
100	0.03591651	0.03601893	0.03601844	0.00097540	0.00097775	0.00097774
316	0.01189427	0.01192529	0.01192522	0.00091922	0.00092174	0.00092173
1000	0.00381398	0.00382389	0.00382387	0.00074680	0.00074933	0.00074932
3160	0.00121257	0.00121573	0.00121573	0.00042245	0.00042427	0.00042427
10000	0.00038374	0.00038474	0.00038474	0.00017019	0.00017102	0.00017101

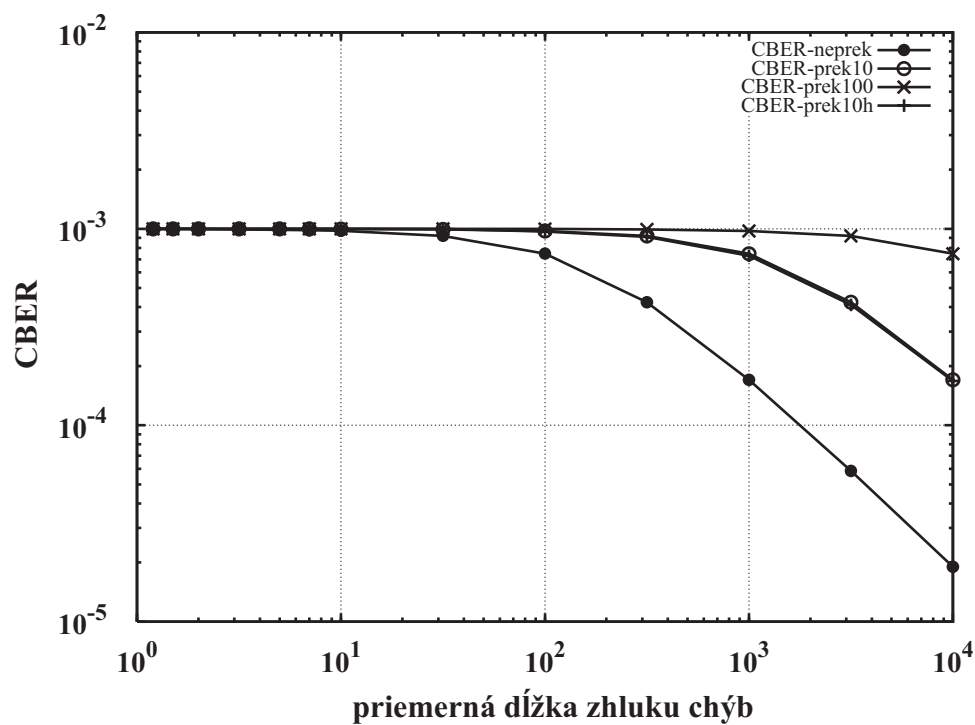
Tab. 4.3 Hodnoty parametrov CER a CBER v závislosti od priemernej dĺžky zhľuku chýb pre módy HEC algoritmu (DET – detekčný, COR – korekčný, HEC – štandardný mód)



Obr. 4.18 Závislosť parametrov CER a CBER od priemernej dĺžky zhľuku bitových chýb pre  $BER = 10^{-3}$  a rôzne hĺbky prekladania (5, 10, 20, 30, 50 a 100 buniek)



a.)



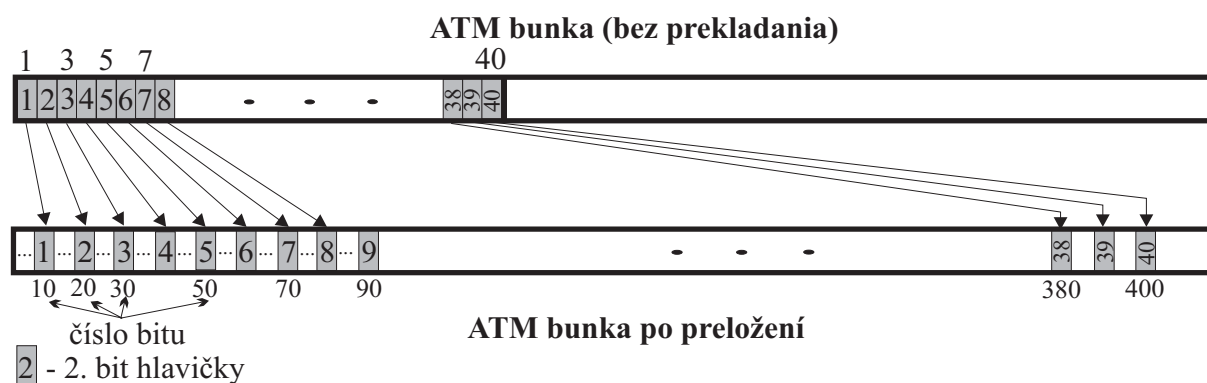
b.)

Obr. 4.19 Závislosť parametra CER (a.) a CBER (b.) od  $\varepsilon$  pre prípady bez prekladania („neprek“), s prekladaním celých ATM buniek s hĺbkou 10 a 100 ATM buniek („prek10“ a „prek100“) a s prekladaním iba hlavičiek s hĺbkou 10 buniek („prek10h“)

Na grafoch na obr. 4.19 je uvedené porovnanie parametrov CER a CBER v závislosti od  $\varepsilon$  pre prípady bez prekladania, s prekladaním celých ATM a s prekladaním iba hlavičiek ATM buniek, pričom informačné časti budú neprekladané. Z hľadiska parametra CER, je možné zistiť, že najmenšie CER sa dosiahne, keď sa nepoužije prekladanie. Keď sa použije prekladanie, hodnotu parametra CER značne zhoršuje aj rastúca hĺbka prekladania. Prípady štandardného prekladania iba hlavičiek ATM buniek nám zlepšuje parameter CER až na úroveň hodnoty parametra CER v prípade bez prekladania. Je to spojené s tým, že zhľuky chýb nie sú prekladaním roz distribuované do informačných polí viacerých buniek. Pre veľmi dlhé zhľuky chýb táto výhoda je potlačená, pretože hlavičkové bity prekladanej sady buniek sú zoskupené a tým je medzi touto skupinou a nasledujúcou ďalšou skupinou hlavičkových bitov veľký počet informačných bitov, do ktorých môže padnúť veľký zhľuk chýb a dostať sa tak až do vyšších vrstiev. Hodnota parametra CBER je opäť najlepšia pre prípad bez prekladania. V prípade prekladania je pre rovnakú hodnotu hĺbky prekladania rovnaká aj hodnota parametra CBER pre oba prípady prekladania (iba hlavičiek buniek ako aj celých buniek).

#### 4.4 Metóda vnútrobunkového prekladania bitov

Ako už bolo spomenuté v predchádzajúcej časti, metóda štandardného prekladania vnáša do prenosu značné oneskorenie údajov, ktoré je ešte závislé od hĺbky prekladania. Autori v [Lim98] a [Lim96] navrhli metódu vnútrobunkového prekladania. Princíp tejto metódy je znázornený na obr. 4.20. Názov metódy napovedá, že prekladanie sa neuskutočňuje medzi bitmi po sebe idúcich buniek, ale medzi bitmi v rámci danej bunky. Omnoho väčšia váha hlavičkových bitov oproti informačným bitom na úrovni ATM vrstvy umožňuje vykonať prekladanie hlavičkových bitov s informačnými bitmi aj v rámci jednej bunky. Ak uvažujeme, že ATM bunka má 40 hlavičkových a 384 informačných bitov, potom maximálne možný odstup hlavičkových bitov bude 10 bitov. Z toho vyplýva, že pri prekladaní sa vezme 9 informačných bitov, jeden hlavičkový, ďalších 9 informačných bitov, ďalší jeden hlavičkový, atď.

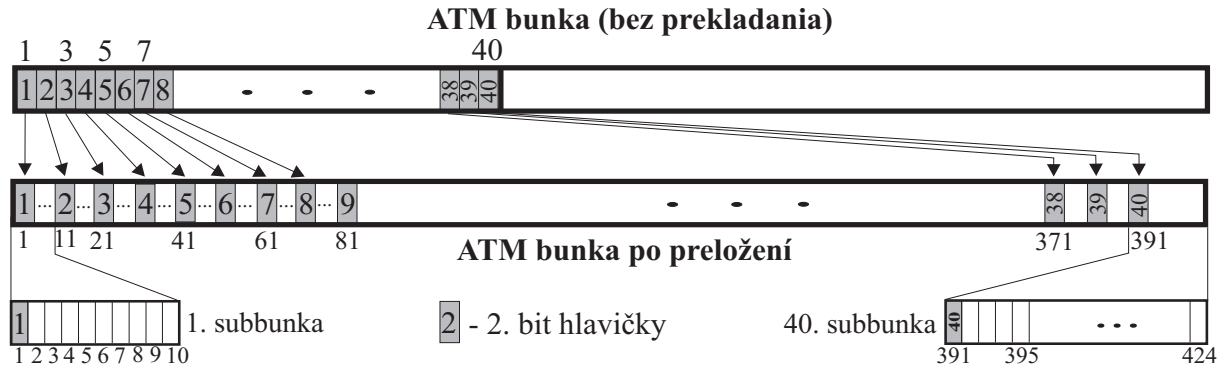


Obr. 4.20 Princíp metódy vnútrobunkového prekladania

Výhoda plynúca z prekladania bitov v rámci jednej ATM bunky je spojená s oveľa menším oneskorením ako v prípade štandardného prekladania bitov. Metóda štandardného prekladania bitov spôsobuje oneskorenie takmer toľko ATM buniek, aká je hĺbka prekladania. Vnútrobunkové prekladanie by potom predstavovalo oneskorenie rovné maximálne jednej ATM bunke, ale ak sa podrobnejšie pozrieme na princíp, zistíme, že oneskorenie je len 40 bitov. Je to dané tým, že na prekladanie potrebujem informačné bity, preto musím počkať až po prvý informačný bit, aby sa mohlo začať prekladať a vysielat'.

Fyzická vrstva využíva HEC kód okrem zisťovania správnosti bunky aj na zisťovanie samotných hraníc ATM buniek (cell delineation). Použitie štandardnej metódy prekladania nám znemožní využiť tento mechanizmus pri prenose. Metóda vnútrobunkového prekladania však len zmení pozície hlavičkových bitov v rámci ATM bunky a nezmení ich poradie. Preto je možné použiť metódu zisťovania hraníc buniek, ako bola definovaná iba s tou zmenou, že hlavičkové bity nie sú za sebou, ale každý desiaty.

Hĺbka prekladania v tomto prípade nemá význam, pretože prekladanie je realizované v rámci jednej ATM bunky. V tomto prípade je dôležitý odstup medzi hlavičkovými bitmi v rámci jednej bunky. Pre metódu vnútrobunkového prekladania je tento odstup zhora ohraničený a nemôže byť väčší ako 10 bitov. Prínos tejto metódy bude pravdepodobne iba v kanáloch, v ktorých sa budú vyskytovať zhluky bitových chýb do dĺžky maximálne 10 bitov. Pre dlhšie zhluky chýb metóda vnútrobunkového prekladania nedokáže zabezpečiť po jednom bite v hlavičke ATM bunky. Na druhej strane však v prípade dlhších zhlukov sa zahodí iba jedna ATM bunka.



Obr. 4.21 Delenie preloženej ATM bunky na subbunky

Odvodenie vzťahov pre hľadané parametre je značne skomplikované, pretože hlavičkové bity sú síce v konštantných odstupoch, ale informačné bity už nie, dokonca sú umiestnené medzi hlavičkovými bitmi. Na riešenie tohto problému si rozdelíme preloženú ATM bunku na subbunky, tak ako ukazuje aj obr. 4.21. Na tomto obrázku je zmenený systém prekladania oproti obr. 4.20. Ak ale dodržíme vzdialenosť susedných hlavičkových bitov, hodnoty výsledných parametrov budú rovnaké. Rozdelením dostaneme toľko subbuniek, koľko je hlavičkových bitov (40). Prvých 39 subbuniek má rovnakú štruktúru, iba posledná (40.) obsahuje viac informačných bitov. Zadefinujeme si novú pravdepodobnosť  $\Psi_{ij}^{(1)}(l, k)$ , ktorá bude reprezentovať pravdepodobnosť, že v časovom okamihu (kroku) 0 nastane práve  $l$  chýb a v časových okamihoch 1, 2, ...,  $n-1$  nastane práve  $k$  chýb za predpokladu, že bol kanál v časovom okamihu 0 v stave  $i$  a v časovom okamihu  $n$  v stave  $j$ . Pričom  $n$  reprezentuje počet bitov subbunky to znamená 10 pre prvých 39 subbuniek a 34 pre poslednú 40. subbunku. Potom platí

$$\Psi_{ij}^{(1)}(l, k) = \sum_{m=0}^1 \varnothing_{im}(l, 1) \cdot \varnothing_{mj}(k, L) \quad (4.51)$$

$$\Psi_{ij}^{(last)}(l, k) = \sum_{m=0}^1 \varnothing_{im}(l, 1) \cdot \varnothing_{mj}(k, 33) \quad (4.52)$$

kde  $L$  je vo všeobecnosti rovné celočíselnej hodnote z  $(N_2/N_1-1)$ . Pre náš prípad je to rovné hodnote 9 bitov, čo je počet informačných bitov subbuniek (okrem poslednej subbunky).  $\Psi_{ij}^{(last)}(l, k)$  sa týka poslednej subbunky. Celkovo pravdepodobnosť  $\Psi_{ij}^{(1)}(l, k)$  je daná súčtom pravdepodobností, že  $l$  chýb nastalo v hlavičkovom bite danej subbunky a  $k$  v  $L$  nasledujúcich informačných bitoch subbunky pre všetky prípady stavov v okamihu prechodu prvého informačného bitu subbunky kanálom.

Výpočet združenej pravdepodobnosti  $Pr(\beta, \alpha)$  pre napríklad korekčný mód HEC algoritmu bude nasledovný

$$\Pr_{COR\_PREK}(\beta = 0, \alpha) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{l=0}^1 \pi_i \cdot \Psi_{ij}^{(bunka)}(l, \alpha) \quad (4.53)$$

$$\Pr_{COR\_PREK}(\beta = 1, \alpha) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{l=2}^{N_1} \pi_i \cdot \Psi_{ij}^{(bunka)}(l, \alpha) \quad (4.54)$$

kde  $\Psi_{ij}^{(bunka)}(l, \alpha)$  je pravdepodobnosť, že pre stav kanála  $i$  v čase 0 a stav kanála  $j$  v čase  $n$  (424) bolo v časových okamihoch 0, 1, ...,  $n-1$  práve  $l$  chýb v hlavičkových bitoch a  $\alpha$  v informačných bitoch danej ATM bunky. Pre túto pravdepodobnosť platí

$$\Psi_{ij}^{(bunka)}(l, k) = \sum_{m=0}^1 \sum_{l_1=0}^l \sum_{k_1=0}^k \Psi_{im}^{(39)}(l-l_1, k-k_1) \cdot \Psi_{mj}^{(last)}(l_1, k_1) \quad (4.55)$$

a  $\Psi_{ij}^{(n)}(l, k)$  je daná rekurzívnym vzťahom cez všetky prvé  $n$  subbunky, aby sme prešli cez všetky možné kombinácie výskytov chýb v subbunkách

$$\Psi_{ij}^{(n)}(l, k) = \sum_{m=0}^1 \sum_{l_1=0}^l \sum_{k_1=0}^k \Psi_{im}^{(1)}(l-l_1, k-k_1) \cdot \Psi_{mj}^{(n-1)}(l_1, k_1) \quad (4.56)$$

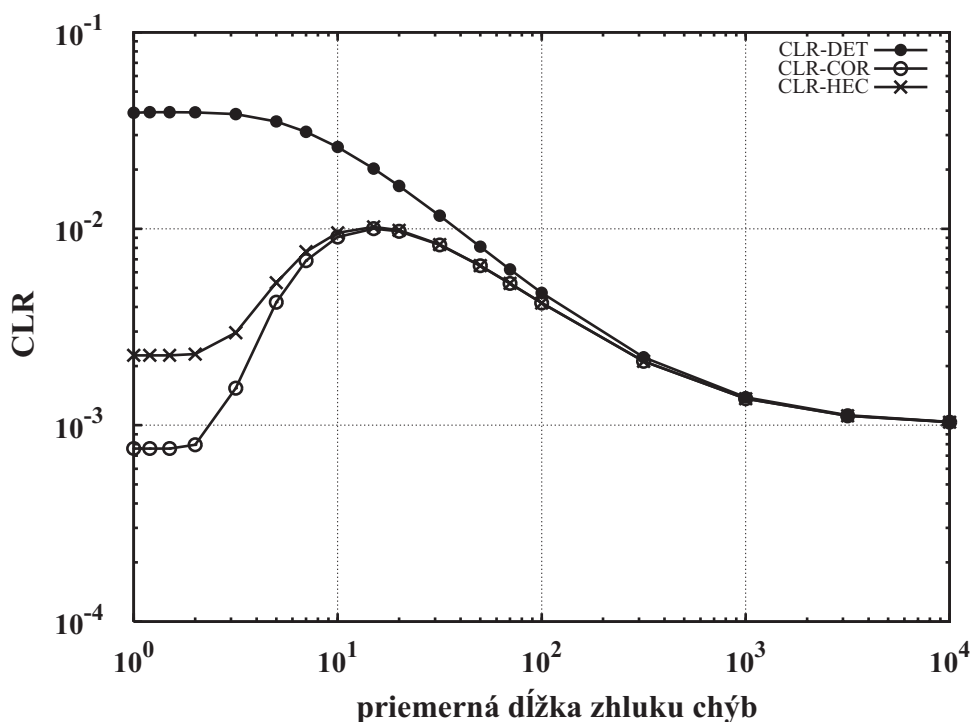
Vzťahy pre vyjadrenie hľadaných parametrov dostaneme pomocou vzťahov uvedených pre prípad kanála so závislými chybami bez implementovaného prekladania bitov (časť 4.2.2) použitím združenej pravdepodobnosti  $Pr(\beta, \alpha)$  uvedenej v tejto časti. Vzťahy (4.53) a (4.54) uvádzajú jej vyjadrenie pre prípad korekčného módu a vnútrobunkového prekladania. Pre ostatné módy HEC algoritmu je vyjadrenie pravdepodobnosti  $Pr(\beta, \alpha)$  analogické.

### Grafické zobrazenie výsledkov a ich vyhodnotenie

Na obr. 4.22 a 4.23 sú zobrazené závislosti parametra CLR od priemernej dĺžky zhluku chýb v kanáli pre rôzne hodnoty chybovosti kanála, ak sa použije metóda vnútrobunkového prekladania. Podobne ako pri štandardnom prekladaní konvergujú závislosti k hodnote BER kanála s rastúcou dĺžkou zhluku chýb. Taktiež najlepšiu výkonnosť podáva korekčný mód a najhoršiu detekčný mód HEC algoritmu. Štandardný HEC algoritmus sa umiestnil medzi

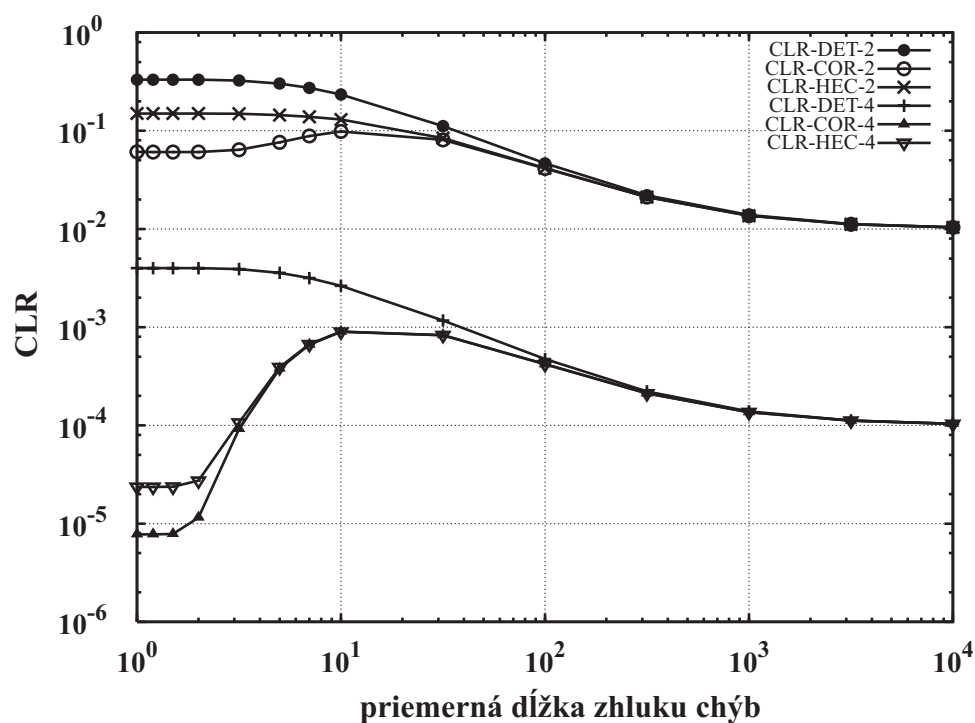


výkonmi detekčného a korekčného módu, ale v prípade vnútrobunkového prekladania sa svojim výkonom blíži skôr k výkonu korekčného módu ako detekčného, ako tomu bolo pri štandardnom prekladaní. Hodnota CLR dosahuje svoje maximum (čo reprezentuje najhorší výkon) pre hodnoty priemernej dĺžky zhlukov chýb v intervale 10 až 20 bitov, ak chybovosť kanála je  $10^{-3}$  a menšia. Je to dané tým, že tieto dĺžky zhlukov nám prevyšujú odstup hlavičkových bitov a tým sa prínos metódy prekladania potlačuje. Pre metódu vnútrobunkového prekladania je na obr. 4.22 a 4.23 uvedený maximálny výkon módov HEC algoritmu, pretože väčší odstup hlavičkových bitov pri tejto metóde nie je možné dosiahnuť.

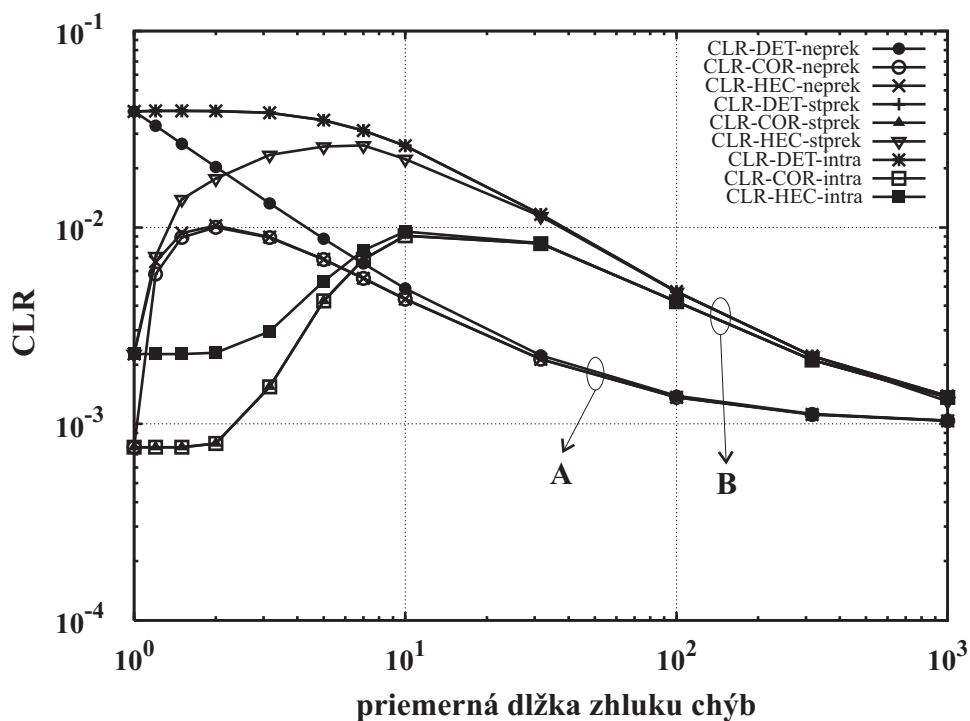


Obr. 4.22 Závislosť parametra CLR od priemernej dĺžky zhlukov chýb pre  $BER = 10^{-3}$  s použitím metódy vnútrobunkového prekladania bitov

Porovnanie všetkých prípadov prenosu, ktoré sme doteraz spomenuli pre závislosť parametra CLR od priemernej dĺžky zhlukov chýb pre všetky módy HEC algoritmu (chybovosť kanála  $10^{-3}$ ), prináša obr. 4.24. Kvôli jednoduchšej orientácii sú označené priebehy parametra CLR bez prekladania ako A a priebehy pre prípad s prekladaním ako B.



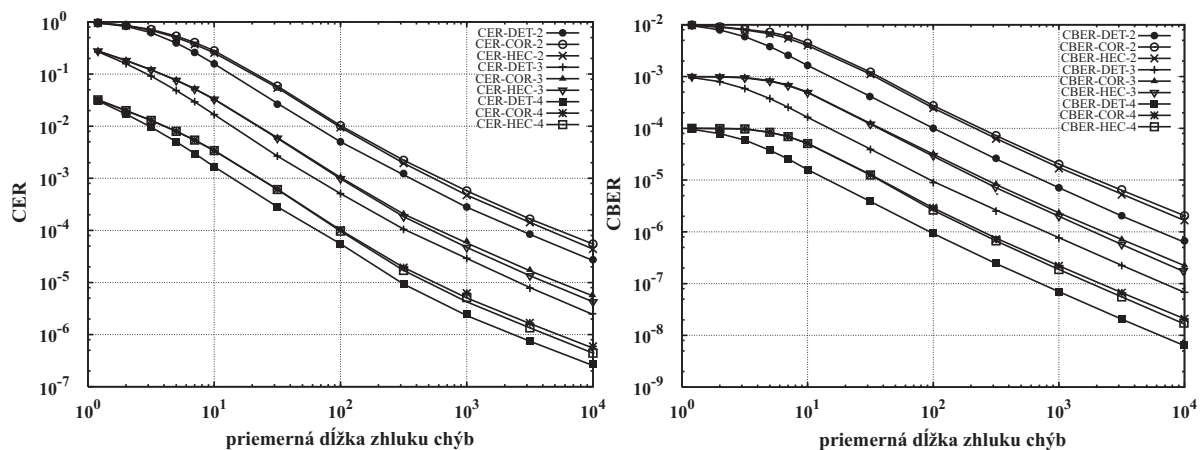
Obr. 4.23 Závislosť parametra CLR od priemernej dĺžky zhluku chýb pre chybovosť kanála  $10^{-2}$  a  $10^{-4}$  s použitím metódy vnútrobunkového prekladania bitov



Obr. 4.24 Porovnanie závislostí CLR pre prípady bez prekladania („neprek“), so štandardným („stprek“) a vnútrobunkovým prekladaním („intra“)

Porovnaním závislosti parametra CLR pre detekčný mód HEC algoritmu, zistíme, že metódy prekladania iba zhoršujú jeho výkon. Štandardný HEC algoritmus dáva najlepšie výsledky pre vnútrobunkové prekladanie, ale iba po hodnotu priemernej dĺžky zhluku chýb ( $\varepsilon$ ) približne 6 bitov, potom je výhodnejší prípad prenosu bez prekladania. Závislosť parametra CLR pre korekčný mód HEC algoritmu pre oba prípady prekladania dáva rovnaké priebehy, ak hĺbka prekladania štandardného prekladania je rovná 10 ATM bunkám. Použitie korekčného módu je výhodné pre zhluky s priemernou dĺžkou približne 6 bitov a menej. Pre väčšie  $\varepsilon$  je výhodnejší prípad prenosu ATM buniek bez prekladania.

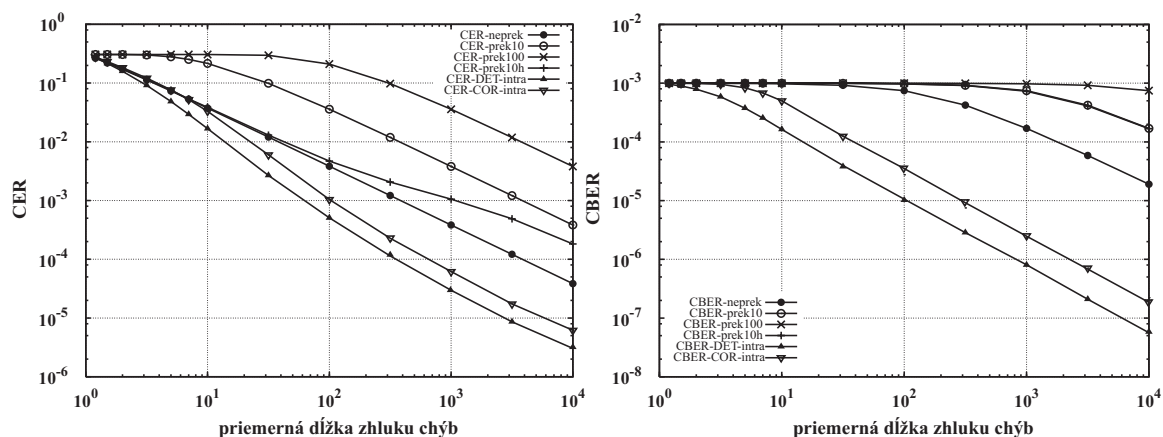
Závislosť parametrov CER a CBER od priemernej dĺžky zhluku chýb pre všetky typy HEC algoritmu a pre rôzne hodnoty chybovosti kanála uvádza obr. 4.25. S rastúcou hodnotou  $\varepsilon$  hodnoty parametrov klesajú, čo je stále spojené s tým, že chyby sú zoskupované do väčších zhlukov a sú zahodené s bunkami, ktoré zasiahnú. Najnižšie hodnoty parametrov dosahuje detekčný mód HEC algoritmu. Je to dané tým, že ak sa pri veľkom zhluku chýb podarí prekladaniu zabezpečiť iba jednu chybu v hlavičke, aj tak je bunka zahodená a tým aj všetky chyby, ktoré boli v informačnom poli. Hodnoty parametrov síce dosahujú pre veľké zhluky chýb nižšie hodnoty parametrov, ale v praxi sa budeme pohybovať skôr v prvej časti grafov, to znamená pre nižšie priemerné dĺžky zhlukov.



Obr. 4.25 Závislosť parametrov CER a CBER od priemernej dĺžky zhluku chýb pre všetky typy HEC algoritmu (DET, COR, HEC) a rôzne hodnoty BER ( $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ )

Rozšírenie grafov na obr. 4.19 o prípad pre vnútrobunkové prekladanie nám prinášajú grafy na obr. 4.26. Ak CER-neprek reprezentuje hodnotu parametra CER pre neprekladaný prenos, CER-prekX je hodnota CER pre prenos so štandardným prekladaním s hĺbkou X (h

znamená prekladanie iba hlavičiek) a CER-DET-intra je hodnota CER pre detekčný mód HEC algoritmu pre prenos s vnútrobunkovým prekladáním, tak z grafov vidíme, že vnútrobunkové prekladanie nám dáva najnižšie hodnoty parametrov zo všetkých metód, dokonca aj oproti prípadu prenosu bez prekladania. Je to dané tým, že prekladanie sa uskutočňuje iba v rámci danej bunky, čiže chyby sa pri spätnom preložení nedostanú do iných buniek, ako je to v prípade štandardného prekladania. Z hľadiska parametra CBER, v prípade vnútrobunkového prekladania oproti prípadu bez prekladania, zhuk chýb umiestnený niekde v rámci bunky s veľkou pravdepodobnosťou zasiahne aj hlavičkový bit, lebo sú rovnomerne roz distribuované po celej bunke a preto sa bunka zahodí a značné množstvo chýb s ňou, čo nám znižuje hodnotu tohto parametra. To je spojené aj s parametrom CER, pretože sa bunka zahodí, znižuje sa počet buniek správne prijatých ale s chybami v informačnej časti.

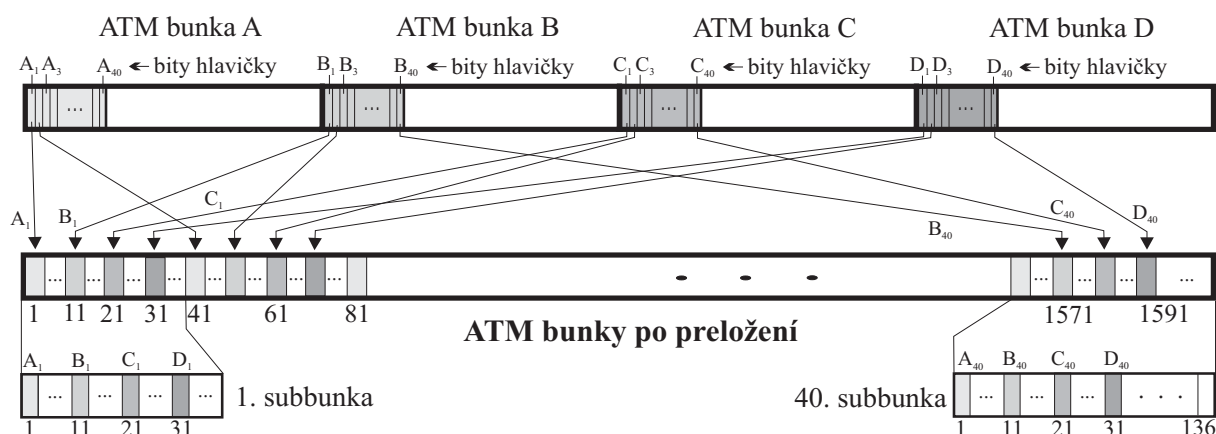


Obr. 4.26 Porovnanie závislostí CER a CBER pre prípady bez prekladania, so štandardným prekladáním a vnútrobunkovým prekladáním

#### 4.5 Metóda rozšíreného prekladania bitov

Metóda vnútrobunkového prekladania nám poskytuje mnoho výhod z pohľadu oneskorenia alebo hodnôt parametrov CER a CBER. Z hľadiska parametra CLR podáva výhody iba po hodnotu priemernej dĺžky zhuku bitových chýb približne 6 bitov. Ak však máme kanál, ktorý je charakteristický väčšou hodnotou  $\varepsilon$ , jej výkon najmä z pohľadu parametra CLR je nedostačujúci. Aby sme využili niektoré výhody metódy vnútrobunkového prekladania a súčasne umožnili udržať požadovanú hodnotu parametra CLR na čo najnižšej možnej úrovni pre kanály s väčšou hodnotou priemernej dĺžky zhuku chýb, navrhli sme rozšíriť princíp tejto metódy na blok viacerých ATM buniek. Princíp navrhutej **metódy rozšíreného**

**prekladania** je zobrazený na obr. 4.27. Princíp vychádza zo základnej myšlienky vnútrobunkového prekladania, to znamená, že hlavičkové bity sa rozdeľujú medzi informačné bity. Postup je nasledovný: informačné polia všetkých prekladaných ATM buniek sa umiestnia za sebou a hlavičkové bity sa postupne po jednom z každej bunky kladú takým spôsobom, aby každý desiaty bit bol hlavičkový bit. Zatiaľ sa môže od prvého bitu, ako je uvedené aj na obr. 4.27 alebo prípadne od desiateho bitu. Desaťbitová vzdialenosť medzi hlavičkovými bitmi je založená na tom, čo už bolo spomenuté pri metóde vnútrobunkového prekladania, že umiestniť 40 hlavičkových bitov v rámci 384 informačných bitov s najväčšou možnou vzdialenosťou medzi susednými hlavičkovými bitmi je daná celočíselným pomerom  $384/40$ , čo je rovné 9 bitov. Preto medzi dvoma susednými hlavičkovými bitmi musí byť maximálne 9 informačných bitov.



Obr. 4.27 Princíp metódy rozšíreného prekladania

Analytické vyjadrenie parametrov CLR, CER a CBER pre tento prípad prekladania je značne skomplikované dokonca aj oproti prípadu vnútrobunkového prekladania. Pre jednoduchosť interpretácie si ukážeme príklad rozšíreného prekladania pre hĺbku prekladania rovnú 4 ATM bunkám (obr. 4.27). Pred prenosom tak vytvárame bloky, ktoré vzniknú preložením 4 po sebe idúcich ATM buniek. Na výpočet združenej pravdepodobnosti  $Pr(\beta, \alpha)$ , ktorá udáva, či ATM bunka je zahodená alebo nie a súčasne obsahuje  $\alpha$  chýb v informačnej časti, musíme zistiť jej hodnotu pre každý blok preložených buniek. Tú vypočítame, iba ak zistíme hodnotu tejto pravdepodobnosti pre každú bunku v preloženom bloku a určíme ich priemernú hodnotu. Každý vytvorený blok si môžeme rozdeliť do subbuniek, z ktorých každá bude obsahovať po jednom hlavičkovom bite z každej bunky plus informačné bity jednej alebo dvoch buniek. Jeden z problémov, ktorý nám prináša skomplikovanie výpočtov je, že hodnota podielu  $N_2/N_1$  nie je celočíselná. To znamená, že v prípade vnútrobunkového

prekladania musela byť posledná subbunka spracovávaná nezávisle od ostatných. Tento problém sa v prípade rozšíreného prekladania znásobuje, pretože jedna subbunka môže obsahovať informačné bity až dvoch buniek. Výpočet združenej pravdepodobnosti  $Pr(\beta, \alpha)$  vo všeobecnosti pre napríklad detekčný mód HEC algoritmu bude nasledovný

$$\Pr_{DET\_PREK}(\beta = 0, \alpha) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \pi_i^{(x)} \Psi_{ij}^{(bunka)}(0, \alpha) \quad (4.57)$$

$$\Pr_{DET\_PREK}(\beta = 1, \alpha) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{l=1}^{N_l} \pi_i^{(x)} \Psi_{ij}^{(bunka)}(l, \alpha) \quad (4.58)$$

kde  $^{(x)}\Psi_{ij}^{(bunka)}(l, \alpha)$  je pravdepodobnosť, že pre stav kanála  $i$  v čase 0 a stav kanála  $j$  v čase  $r$  bolo v časových okamihoch zodpovedajúcich prenosu bitov  $x$ -tej ATM bunky (0 až  $r-1$ ) práve  $l$  chýb v hlavičkových bitoch a  $\alpha$  v informačných bitoch danej ATM bunky. Pre túto pravdepodobnosť platí

$$^{(x)}\Psi_{ij}^{(bunka)}(l, k) = \sum_{m=0}^1 \sum_{l_1=0}^l \sum_{k_1=0}^k ^{(x)}\Psi_{im}^{(39)}(l-l_1, k-k_1) ^{(x)}\Psi_{mj}^{(last)}(l_1, k_1) \quad (4.59)$$

a  $^{(x)}\Psi_{ij}^{(n)}(l, k)$  je daná rekurzívnym vzťahom cez všetky prvé  $n$  subbunky, aby sme prešli cez všetky možné kombinácie výskytov chýb v subbunkách

$$^{(x)}\Psi_{ij}^{(n)}(l, k) = \sum_{m=0}^1 \sum_{l_1=0}^l \sum_{k_1=0}^k ^{(x)}\Psi_{im}^{(1)}(l-l_1, k-k_1) ^{(x)}\Psi_{mj}^{(n-1)}(l_1, k_1) \quad (4.60)$$

čím sme sa dostali do stavu, ako vyjadriť pravdepodobnosti  $^{(x)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k)$  a  $^{(x)}\Psi_{ij}^{(last)}(l, k)$ , ktoré sú už viazané na konkrétnu preloženú  $(x)$  bunku. Ak sa zamyslíme nad subbunkami z pohľadu bitov skúmanej bunky, dospejeme k štyrom typom subbuniek:

- typ I - subbunka, ktorá obsahuje zo skúmanej bunky iba jeden hlavičkový bit;
- typ II - subbunka, ktorá obsahuje zo skúmanej bunky jeden hlavičkový bit a  $d \cdot 9$  informačných bitov (t.j. všetky informačné bity subbunky patria do skúmanej bunky);
- typ III - subbunka, ktorá obsahuje zo skúmanej bunky jeden hlavičkový bit a prvých  $M$  ( $M < d \cdot 9$ ) informačných bitov subbunky patrí tiež do skúmanej bunky;
- typ IV - subbunka, ktorá obsahuje zo skúmanej bunky jeden hlavičkový bit a posledných  $M$  ( $M < d \cdot 9$ ) informačných bitov subbunky patrí tiež do skúmanej bunky.

Platí, že nie každá ATM bunka v preloženom bloku bude obsahovať všetky typy subbuniek. Napríklad prvá bunka nebude obsahovať subbunku typu III. Každá bunka bude ale obsahovať subbunky typu I a II. Popis analytického výpočtu všeobecnej pravdepodobnosti  $^{(x)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k)$  a  $^{(x)}\Psi_{ij}^{(last)}(l, k)$  by bol príliš náročný, preto si ukážeme aspoň časť výpočtu pre prípad štyroch prekladaných ATM buniek. V tomto prípade bude platiť pre jednotlivé bunky:

- prvá ATM bunka sa bude skladať postupne z 10 subbuniek typu II, jednej subbunky typu III ( $M = 24$ ) a 29 subbuniek typu I
- druhá bunka sa bude skladať postupne z 10 sub. typu I, jednej sub. typu IV ( $M = 12$ ), 10 sub. typu II, jednej sub. typu III ( $M = 12$ ) a ďalších 18 sub. typu I
- tretia bunka obsahuje postupne 21 sub. typu I, jednu sub. typu IV ( $M = 24$ ), 10 sub. typu II a ďalších 8 sub. typu I
- štvrtá bunka obsahuje postupne 32 subbuniek typu I a 8 subbuniek typu II

#### Prvá ATM bunka

Výpočet pravdepodobnosti  $^{(1-II)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k)$  pre subbunku typu II prvej bunky si rozložíme na súčin pravdepodobnosti  $l$  chýb v hlavičkovom bite a pravdepodobnosti  $k$  chýb vo zvyšnej časti subbunky, ktorú označíme ako  $\Theta_{ij}^{(n)}(k)$ . Potom platia nasledujúce vzťahy

$$^{(1-II)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k) = \sum_{m=0}^1 \varnothing_{im}(l, 1) \cdot ^{(1-II)}\Theta_{mj}^{(4)}(k) \quad (4.61)$$

$$^{(1-II)}\Theta_{ij}^{(n)}(k) = \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}^*(k - k_1, L) \cdot ^{(1-II)}\Theta_{mj}^{(n-1)}(k_1) \quad (4.62)$$

$$\varnothing_{ij}^*(k, L) = \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}(k - k_1, L - 1) \cdot \varnothing_{mj}^{(2)}(k_1, 1) \quad (4.63)$$

kde  $\varnothing_{ij}^*(k, L)$  je pravdepodobnosť  $k$  chýb v skupine  $L$  po sebe idúcich bitov v časových intervaloch 0, 1, ...,  $L-1$ , ak stav kanála v čase 0 je  $i$  a čase  $L+1$  je  $j$ .  $L$  je celočíselný podiel  $(N_2/N_1 - 1)$  rovný hodnote 9 bitov. Pravdepodobnosť  $\varnothing_{ij}^{(x)}(k, 1)$  je daná vzťahom (4.47) alebo (4.48). Ostala posledná neznáma a to  $^{(1-II)}\Theta_{ij}^{(1)}(k)$ , čo zodpovedá pravdepodobnosti  $k$  chýb v posledných 9 bitoch subbunky typu II a preto platí

$$^{(1-II)}\Theta_{ij}^{(1)}(k) = \varnothing_{ij}(k, L) \quad (4.64)$$

Ďalej budeme potrebovať vypočítať pravdepodobnosť  ${}^{(1-III)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k)$  pre subbunku typu III prvej bunky, pretože má inú štruktúru ako subbunka typu II. Pre jej výpočet platia nasledovné vzťahy

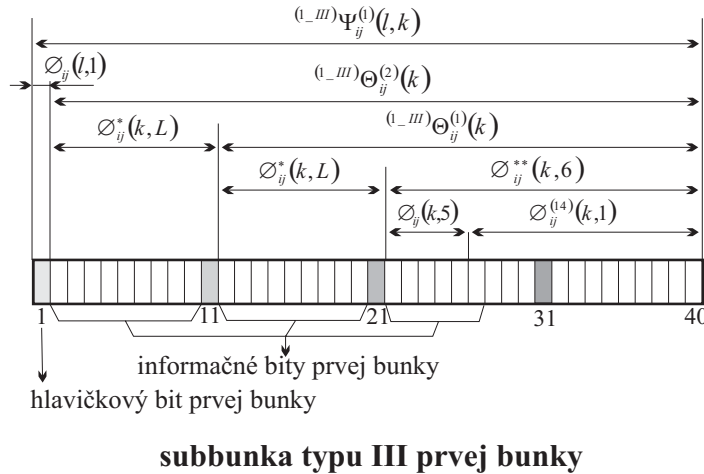
$${}^{(1-III)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k) = \sum_{m=0}^1 \varnothing_{im}(l, 1) \cdot {}^{(1-III)}\Theta_{mj}^{(2)}(k) \quad (4.65)$$

$${}^{(1-III)}\Theta_{ij}^{(2)}(k) = \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}^*(k - k_1, L) \cdot {}^{(1-III)}\Theta_{mj}^{(1)}(k_1) \quad (4.66)$$

$${}^{(1-III)}\Theta_{ij}^{(1)}(k) = \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}^*(k - k_1, L) \cdot \varnothing_{mj}^{**}(k_1, 6) \quad (4.67)$$

$$\varnothing_{ij}^{**}(k, 6) = \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}(k - k_1, 6 - 1) \cdot \varnothing_{mj}^{(14)}(k_1, 1) \quad (4.68)$$

Pravdepodobnosť  $\varnothing_{ij}^*(k, L)$  je daná vzťahom (4.63). Kvôli lepšiemu porozumeniu uvedených vzťahov je subbunka typu III pre prvú bunku a prípad prekladania 4 ATM buniek znázornená na obr. 4.28.



Obr. 4.28 Štruktúra subbunky typu III prvej bunky so zodpovedajúcimi pravdepodobnosťami

Za subbunkou typu III prvej bunky pôjdu už iba subbunky typu I, z ktorých nás zaujíma iba prvý bit, čo je hlavičkový bit skúmanej prvej bunky. Potom pre hľadanie pravdepodobnosť  ${}^{(1-I)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k)$  pre subbunku typu I prvej bunky platí



$${}^{(1-l)}\Psi_{ij}^{(1)}(l,k) = \varnothing_{ij}^{(40)}(l,1) \quad \text{ak } 0 \leq l \leq 1 \text{ a } k = 0 \quad (4.69)$$

$${}^{(1-l)}\Psi_{ij}^{(1)}(l,k) = 0 \quad \text{inak} \quad (4.70)$$

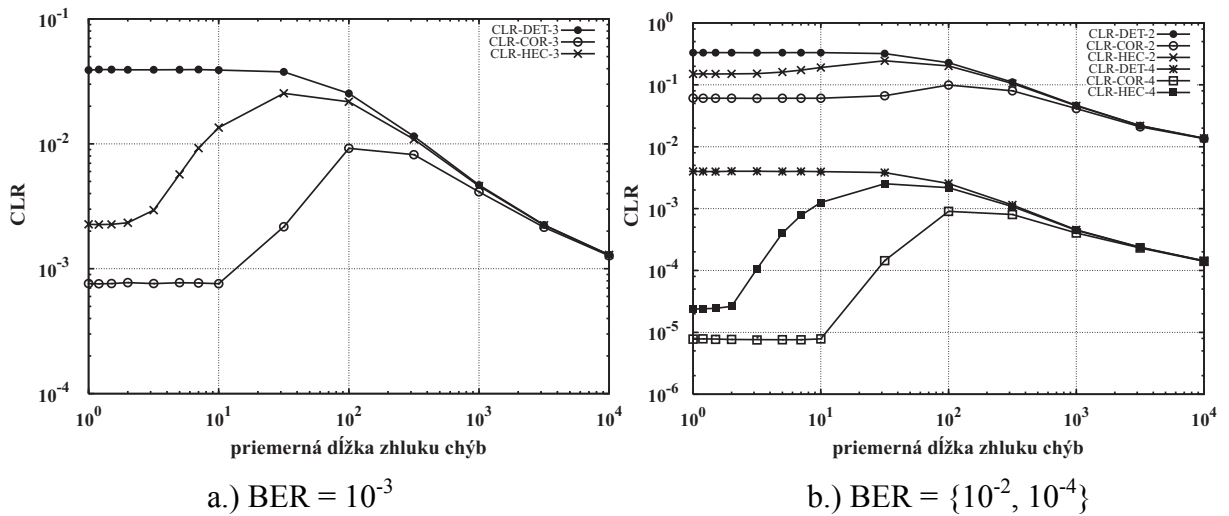
Ak je subbunka typu I skúmanej prvej bunky poslednou subbunkou, potom je táto subbunka dlhá 136 bitov a výpočet pravdepodobnosti  ${}^{(1-l)}\Psi_{ij}^{(1)}(l,k)$  je nasledovný

$${}^{(1-l)}\Psi_{ij}^{(1)}(l,k) = \varnothing_{ij}^{(136)}(l,1) \quad \text{ak } 0 \leq l \leq 1 \text{ a } k = 0 \quad (4.71)$$

$${}^{(1-l)}\Psi_{ij}^{(1)}(l,k) = 0 \quad \text{inak} \quad (4.72)$$

Analogickým spôsobom dostaneme vzťahy pre výpočet pravdepodobnosti  ${}^{(x)}\Psi_{ij}^{(1)}(l,k)$  pre všetky typy subbuniek každej preloženej bunky v bloku. Pretože každý typ subbunky každej preloženej bunky je popísaný podobnou sadou vzťahov, nebudú kvôli rozsiahlosti uvedené v tejto časti ale v prílohe A.

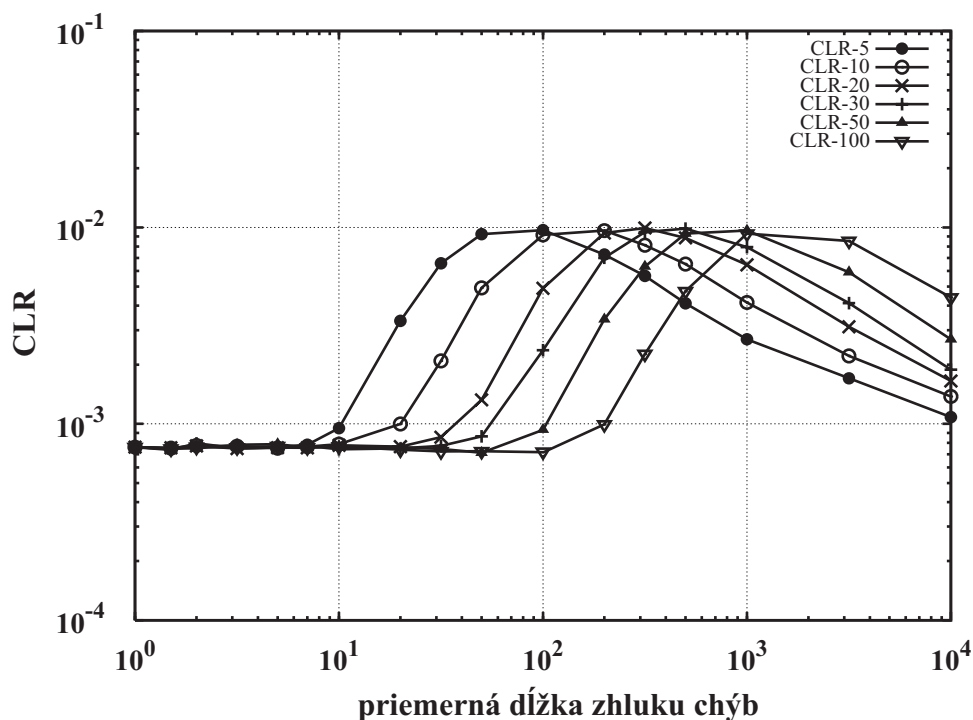
### Grafické zobrazenie výsledkov a ich vyhodnotenie



Obr. 4.29 Závislosť parametra CLR od priemernej dĺžky zhľuku chýb pre všetky módy HEC algoritmu, rozšírenú metódu prekladania,  $d = 10$  buniek a rôznu BER kanála

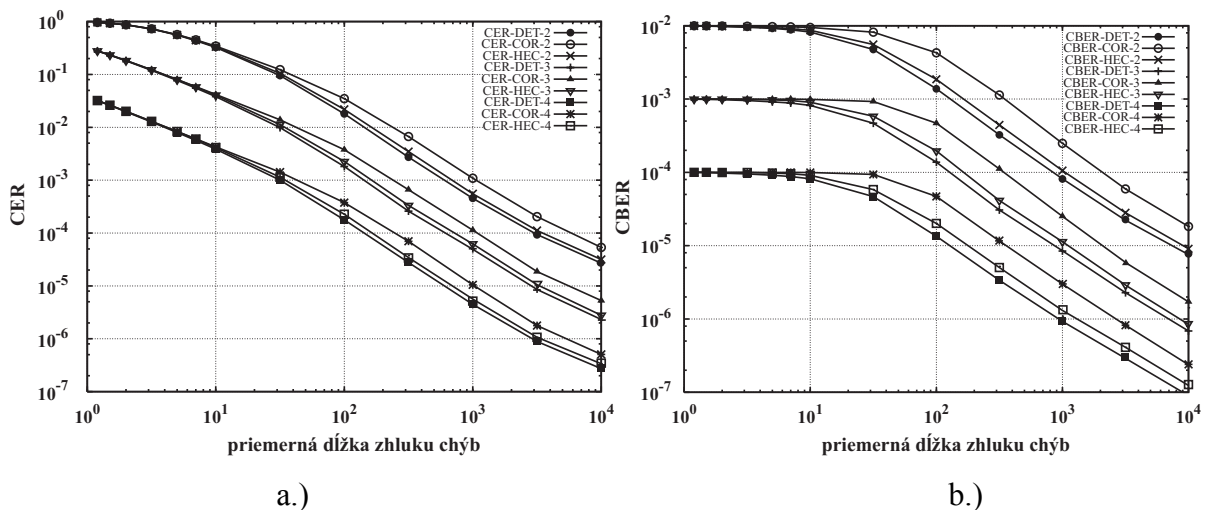
Najskôr sa pozrieme na závislosti parametra CLR od priemernej dĺžky zhľuku chýb pre všetky módy HEC algoritmu a rôzne hodnoty BER. Tieto závislosti ukazujú grafy na obr. 4.29. Priebeh parametra CLR pre metódu rozšíreného prekladania majú podobné tvary ako závislosti parametra CLR pri predchádzajúcich metódach prekladania (štandardnej,

vnútrobunkovej). Najlepšie výsledky dáva korekčný mód, potom štandardný HEC algoritmus a najhoršie detekčný mód. Všetky závislosti parametra CLR s rastúcou hodnotou  $\varepsilon$  konvergujú k BER kanála. Korekčný a štandardný mód HEC algoritmu je charakteristický svojim maximom najhoršej výkonnosti. Je to v oblasti, kde metóda rozšíreného prekladania je už neefektívna, pretože zhluky chýb sú dlhšie ako je hĺbka prekladania. Vtedy sa metódou prekladania rozloží zhluk do hlavičiek všetkých preložených buniek s tým, že niektoré budú obsahovať viac ako jednu chybu. Preto sú všetky tieto bunky zahodené. U štandardného módu HEC algoritmu je toto maximum skôr, čo je dané tým, že jeho schopnosť opravy je spojená iba s prvou bunkou obsahujúcou jednu chybu v hlavičke, pričom všetky ďalšie zasiahnuté bunky (dokonca aj v prípade s jednou chybou v hlavičke) sú zahodené. Ak by sme porovnali výkonnosť korekčného módu HEC algoritmu pre metódu rozšíreného prekladania s výkonnosťou u predchádzajúcich metód prekladania pri rovnakej hĺbke prekladania, zistili by sme, že metóda rozšíreného prekladania nám rozširuje počiatočný interval pre  $\varepsilon$ , na ktorom poskytuje korekčný mód najlepšie výsledky, t.j. najnižšie hodnoty parametra CLR. Podobné by sme mohli tvrdiť aj pre štandardný HEC algoritmus, ale slovo najlepšie by platilo až pre  $\text{BER} = 10^{-4}$  a menšie. Závislosti CLR od  $\varepsilon$  pre rôzne hĺbky prekladania, chybovosť kanála  $10^{-3}$  a korekčný mód znázorňuje obr. 4.30. Čím je väčšia hĺbka prekladania, tým je najlepšia výkonnosť korekčného módu pre väčší počiatočný interval priemernej dĺžky zhluku chýb.



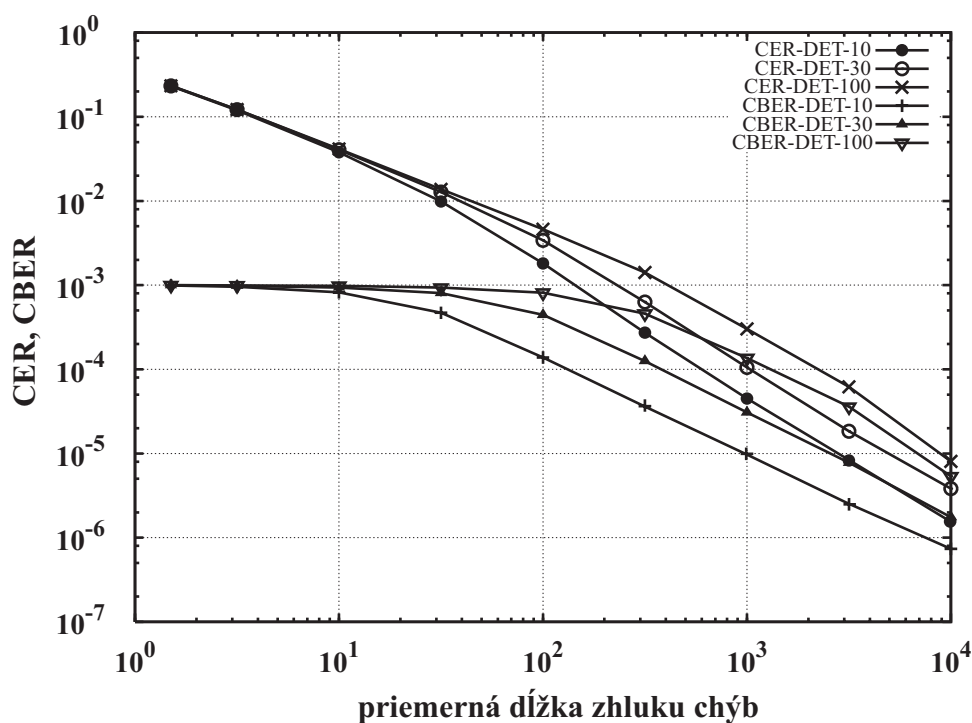
Obr. 4.30 Závislosť parametra CLR od priemernej dĺžky zhluku chýb pre rôznu hĺbku prekladania a korekčný mód HEC algoritmu ( $\text{BER} = 10^{-3}$ )

Závislosti parametrov CER a CBER od  $\varepsilon$ , zobrazené na obr. 4.31, majú klesajúci charakter. Pre hodnoty priemernej dĺžky zhlukov chýb menšie ako je hĺbka prekladania (v zmysle, ak je hĺbka prekladania 10 ATM buniek, tak pre  $\varepsilon$  menšie ako 10 bitov) všetky módy HEC algoritmu podávajú takmer rovnaký výkon, t.j. hodnoty parametrov CER a CBER sú takmer rovnaké. Pre väčšie hodnoty  $\varepsilon$  je situácia opačná ako pre prípad CLR, to znamená, že pre parametre CER a CBER najlepšie výsledky dáva detekčný mód, čo je dané tým, že ak je bunka zasiahnutá chybou, je zahodená aj so všetkými chybami v informačnej časti, preto smerom k vyšším vrstvám prejde omnoho menej chýb ako v prípade korekčného (príp. štandardného) módu HEC algoritmu. Hodnoty parametra CBER pre oblasť, ktorá nás najviac zaujíma, to znamená pre malé hodnoty  $\varepsilon$  (v našom prípade pre  $\varepsilon \leq 10$  bitov), sú takmer konštantné a rovné hodnote BER kanála. V prípade parametra CER pre malé zhľuky chýb platí, že čím menší zhľuk chýb, tým je menšia pravdepodobnosť, že zasiahne hlavičkový bit, preto sa viac chýb dostane k vyšším vrstvám a preto je väčšia hodnota parametra CER.



Obr. 4.31 Závislosť parametrov CER (a.) a CBER (b.) od priemernej dĺžky zhlukov chýb pre všetky módy HEC algoritmu,  $d = 10$  buniek a chybovosť kanála ( $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ )

Vplyv zmeny hĺbky prekladania na hodnoty parametrov CER a CBER je zobrazený na obr. 4.32. Ako môžeme vidieť, zväčšujúca sa hodnota hĺbky prekladania nám zhoršuje výsledné závislosti oboch parametrov. Je to dané tým, že s väčšou hĺbkou prekladania sa zhľuk chýb síce rozloží do rovnakého počtu hlavičkových bitov preložených buniek, ale pretože počet preložených buniek v sade narastá, zvyšné chyby zhlukov môžu padnúť do buniek, ktorých hlavičkové bity neboli zasiahnuté a tak sa zvýši počet správne prijatých buniek s chybami v informačnej časti (CER) a taktiež počet chýb prenesených do AAL vrstvy (CBER).



Obr. 4.32 Závislosť parametrov CER a CBER od priemernej dĺžky zhluku chýb pre rôznu hĺbku prekladania (10, 30, 100) a detekčný mód HEC algoritmu ( $\text{BER} = 10^{-3}$ )

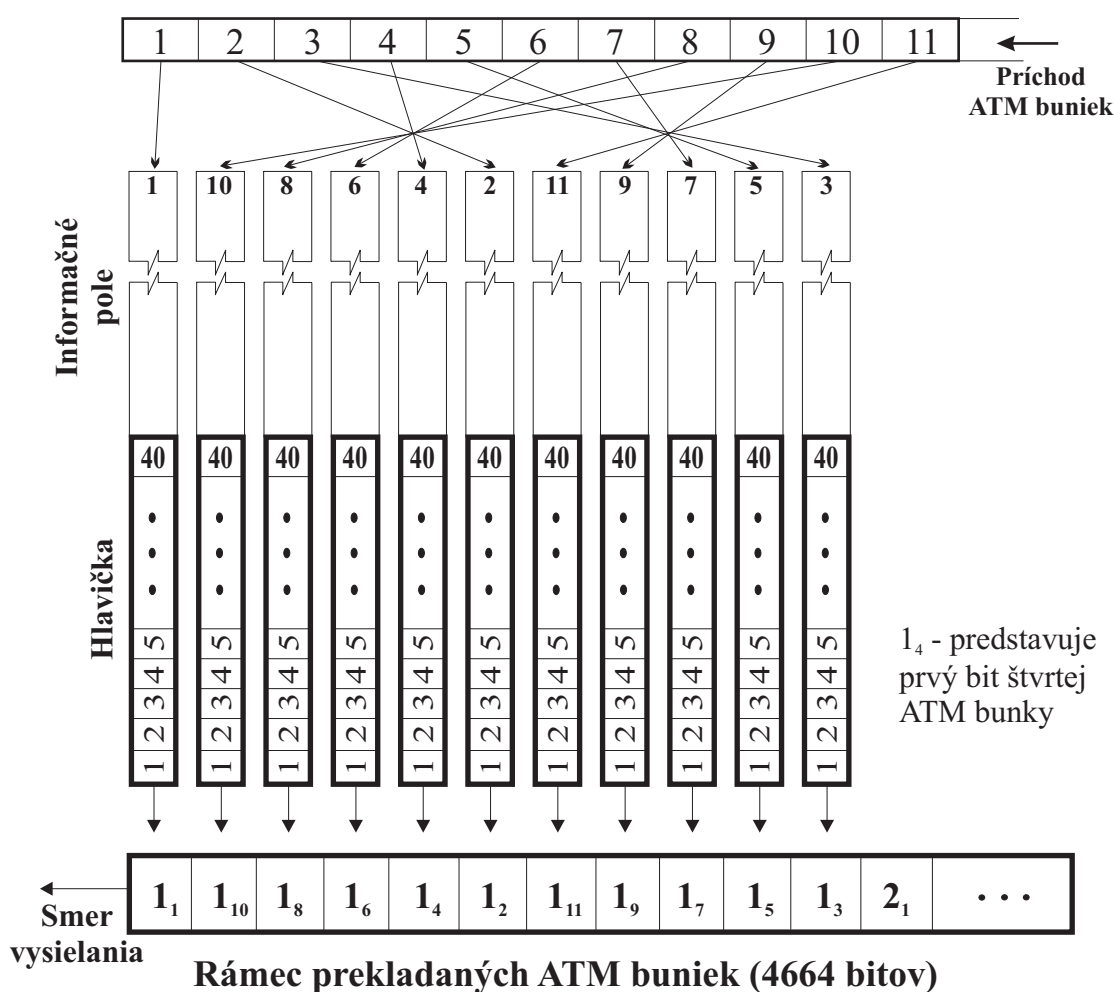
#### 4.6 Modifikované metódy prekladania so zmenenou postupnosťou buniek

Ak by sme skúmali výkonnosť štandardného HEC algoritmu (napr. na obr. 4.13 a obr. 4.29), zistili by sme, že jeho výkonnosť v porovnaní s výkonnosťou korekčného módu z pohľadu parametra CLR je horšia. Je to spôsobené najmä dvomi faktormi a to podmienkou opustenia korekčného stavu a podmienkou návratu do neho. Ináč povedané, ak príde bunka s minimálne jednou chybou, keď HEC algoritmus je v stave korekčnom, nastáva prechod do detekčného stavu a tam zotrúva, až kým nepríde opäť ATM bunka s bezchybnou hlavičkou. Princíp prekladania je však založený na tom, že zhluk chýb, ktorý sa objaví v kanáli, je rozložený do prípadných hlavičkových bitov, čím nastane séria ATM buniek s jednou chybou v hlavičke (ak počet prekladaných buniek je väčší ako priemerná dĺžka zhluku chýb). Štandardný HEC algoritmus však prvú bunku dokáže opraviť, ale potom prechádza do detekčného módu, kde by boli všetky ostatné bunky s chybou v hlavičke zahodené (bez pokusu o opravu) a kým nepríde bunka bez chyby v hlavičke, dovtedy sa do korekčného stavu nevráti. Pre riešenie tohto problému sme navrhli modifikácie dvoch metód:

- *metóda štandardného prekladania so zmenou poradia prekladaných buniek*
- *metóda rozšíreného prekladania so zmenou poradia prekladaných buniek*

Modifikácia metódy štandardného prekladania a nami navrhutej metódy rozšíreného prekladania je založená na tom, že zhuk chýb rozložíme medzi bunky tak, aby výsledná séria buniek obsahovala striedavo bunku s chybou v hlavičke a bunku bez chyby v hlavičke. Túto úlohu dokážeme zabezpečiť iba tak, že poprehadzujeme poradie prekladaných buniek ešte pred prekladaním. Princíp metódy štandardného prekladania so zmenenou postupnosťou (poradím) ATM buniek je pre hĺbku prekladania rovnú 11 ATM bunkám zobrazený na obr. 4.33. Princíp modifikovanej metódy rozšíreného prekladania je analogický.

Zmena poradia je uskutočňovaná na základe princípu maximálneho odstupu medzi pôvodne dvomi susednými ATM bunkami.



Obr. 4.33 Príklad metódy štandardného prekladania so zmenenou postupnosťou ATM buniek, ak hĺbka prekladania je 11 ATM buniek

Analytické vyjadrenie vzťahov pre parametre CLR, CER a CBER pre štandardný algoritmus je tým, že sú jednotlivé bunky poprehadzované, ešte viac sťažené, ako bolo

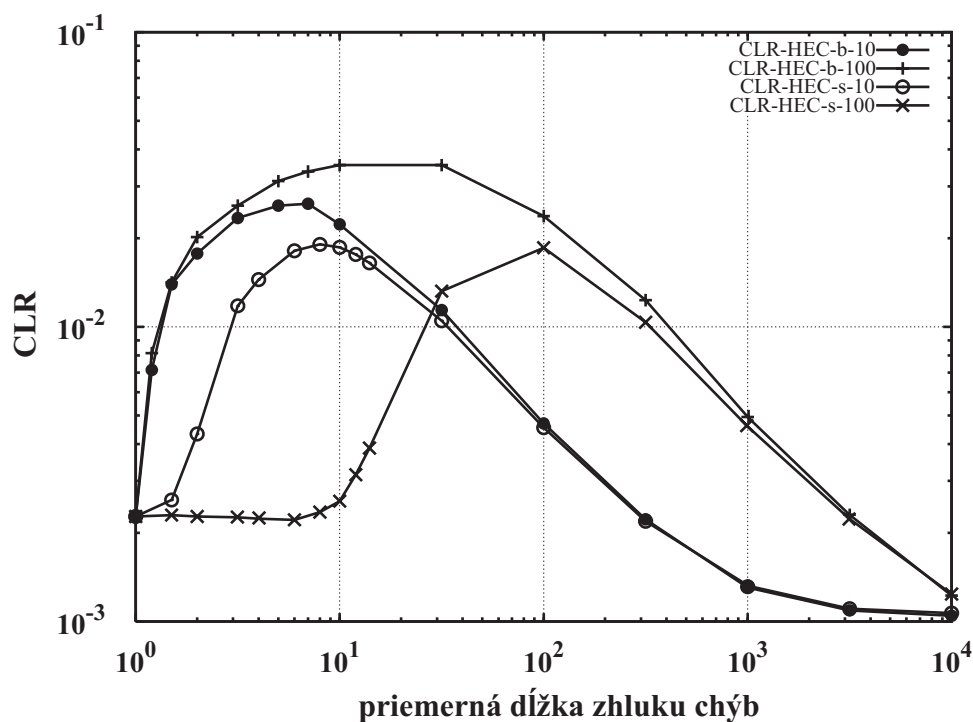
v prípade rozšírenej metódy prekladania. Preto sú hodnoty jednotlivých parametrov získané simuláciou.

### Grafické zobrazenie výsledkov a ich vyhodnotenie

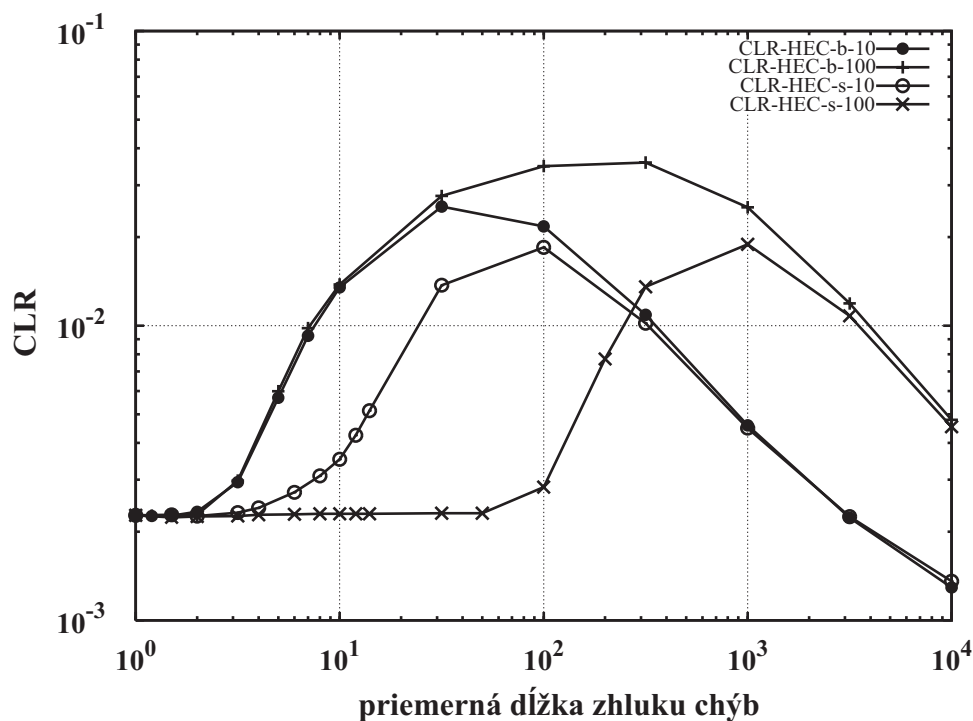
Metóda vnútrobunkového prekladania je založená na prekladaní bitov v rámci jednej ATM bunky, preto zmenu postupnosti ATM buniek pred prekladaním môžeme aplikovať iba pri štandardnom a rozšírenom prekladaní. Obr. 4.34a.) obsahuje prípad štandardného prekladania, kde CLR-HEC-b-10 a CLR-HEC-b-100 predstavujú závislosti parametra CLR od  $\varepsilon$  pre štandardný HEC algoritmus s použitou metódou štandardného prekladania bez zmeny postupnosti ATM buniek (opísanej v časti 4.3) pre hĺbku prekladania 10 a 100 ATM buniek. Krivky označené ako CLR-HEC-s-10 a CLR-HEC-s-100 reprezentujú závislosti parametra CLR od  $\varepsilon$  pre prípad **štandardného prekladania so zmenou postupnosti** prekladaných buniek (obr. 4.33) pre hĺbky prekladania 10 a 100 buniek. Porovnaním týchto kriviek môžeme skonštatovať, že zavedená modifikácia meníaca postupnosť buniek pred prekladaním zlepšila správanie (výkon) štandardného HEC algoritmu. Týka sa to najmä časti pre menšie priemerné dĺžky zhlukov chýb. Prínos tejto metódy je väčší s narastajúcou hĺbkou prekladania. Použitie štandardného HEC algoritmu so štandardnou metódou prekladania je možné, iba ak sa použije práve uvažovaná zmena poradia prichádzajúcich ATM buniek na prekladanie.

Na obr. 4.34b.) je zobrazená rovnaká situácia ako na obr. 4.34a.), ale pre prípad rozšíreného prekladania. Použitie štandardného HEC algoritmu s metódou rozšíreného prekladania ale bez zmeny poradia prekladaných buniek je možné len pre kanály charakteristické priemernou dĺžkou zhlukov do 2 bity (ak chceme udržať hodnotu CLR približne na úrovni hodnoty  $2,3 \cdot 10^{-3}$ ). Ako vidieť aj z obr. 4.34a.), hĺbka prekladania nezlepšuje (skôr naopak) výkonnosť štandardného HEC algoritmu bez zmeny poradia buniek. Ak použijeme metódu **rozšíreného prekladania so zmenou poradia** ATM buniek pred prekladaním, výkonnosť štandardného HEC algoritmu sa nielenže zlepší, ale dokonca s rastúcou hĺbkou prekladania sa nám zväčšuje interval pre  $\varepsilon$ , na ktorom je hodnota parametra CLR udržiavaná na najnižšej možnej úrovni. Napríklad pre hĺbku prekladania 100 ATM buniek a použitú zmenu poradia buniek pred rozšíreným prekladaním, poskytuje štandardný HEC algoritmus optimálny výkon (z hľadiska parametra CLR) až po hodnotu priemernej dĺžky zhluku chýb takmer 100 bitov. Samozrejme hodnota CLR =  $2,3 \cdot 10^{-3}$  na tomto intervale je nepoužiteľná pre prenos údajov, ale doteraz sme neuvažovali zabezpečenie prenášaných

údajov pomocou kódu na najnižšej úrovni (napr. konvolučného kódu). V časti 4.7 budeme uvažovať aj prípad, keď sa použije na najnižšej úrovni zabezpečenie konvolučným kódom.



a.)

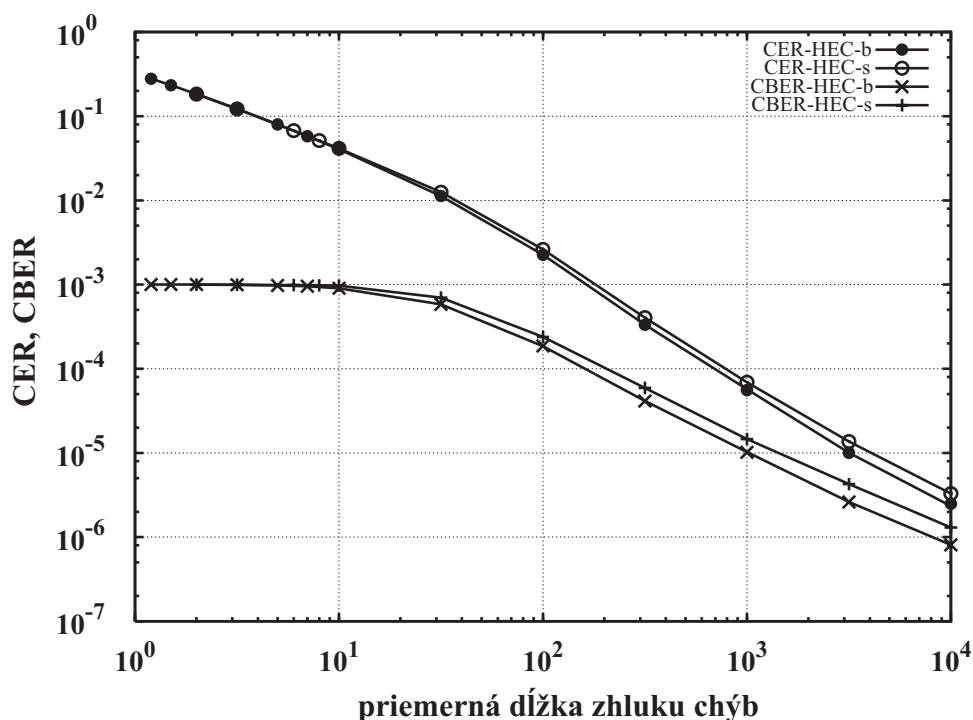


b.)

Obr. 4.34 Závislosť parametra CLR od priemernej dĺžky zhluku chýb pre štandardný HEC algoritmus a a.) štandardnú metódu prekladania s a bez zmeny poradia ATM buniek a b.) rozšírenú metódu prekladania s a bez zmeny poradia ATM buniek

Zlepšenie parametra CLR zmenou poradia ATM buniek je založené na tom, že v mnohých prípadoch (pre menšie zhluky) zhuk chýb zasiahne hlavičky iba tých buniek, ktoré neidú za sebou (iba párne alebo nepárne), ale sú medzi nimi iné bunky, ktoré neboli zasiahnuté týmto zhukom. Preto štandardný HEC algoritmus dokáže opraviť mnohé tieto chyby tým, že sa môže vždy vrátiť nepokazenou bunkou do korekčného stavu.

Porovnaním grafov na obrázkoch 4.34a.) a 4.34b.) zistíme, že najlepšie výsledky nám dáva metóda s rozšíreným prekladaním a zmenou poradia buniek pre hĺbku prekladania rovnú 100 ATM bunkám. Z toho vyplýva, že ak sme viazaní na použitie štandardného HEC algoritmu, táto kombinácia zlepšuje jeho výkon a je už len úlohou nájsť kompromis medzi maximálnym dovoleným oneskorením a veľkosťou hĺbky prekladania ATM buniek v návaznosti na kvalitu prenosového kanála.



Obr. 4.35 Závislosť parametrov CER a CBER od priemernej dĺžky zhuku chýb pre štandardný HEC algoritmus a rozšírenú metódu prekladania so zmenou poradia buniek

Z výsledkov závislostí pre parametre CER a CBER sme zistili, že v prípade štandardného prekladania zmena poradia prekladaných buniek (hlavičkových bitov) podstatne nemení závislosti týchto parametrov pre jednotlivé módy HEC algoritmu v porovnaní s prípadom bez zmeny poradia prekladaných buniek. V prípade rozšíreného prekladania sú hodnoty týchto parametrov zmenou poradia prekladaných buniek taktiež nezmenené, ale iba



pre detekčný a korekčný mód HEC algoritmu. Závislosti parametra CER a CBER od  $\varepsilon$  pre štandardný HEC algoritmus pre prípad s (CER-HEC-s, CBER-HEC-s) a bez zmeny poradia prekladaných buniek (CER-HEC-b, CBER-HEC-b) pre hĺbku prekladania 10 buniek znázorňuje obr. 4.35. Ako vidíme, zmena poradia prekladaných buniek s rastúcou hodnotou priemernej dĺžky zhukov chýb nám zhoršuje hodnoty oboch parametrov. S rastúcou hodnotou  $\varepsilon$  rastie aj rozdiel hodnôt parametrov. Napr. pri  $\varepsilon = 100$  bitov je zhoršenie parametra CER o 15 % a CBER o 21 %.

#### 4.7 Porovnanie a vyhodnotenie blokových metód prekladania

V tejto časti zhrnieme, porovnáme a vyhodnotíme všetky možnosti prenosu ATM buniek zahŕňajúce použitie niektorej z metód prekladania a taktiež niektorý z možných módov činnosti HEC algoritmu v závislosti od priemernej dĺžky zhuku chýb v kanáli pre BER kanála  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$ . Všetky závislosti vychádzali z predpokladu, že cyklický kód použitý v hlavičke ATM bunky je ideálny, t.j. dokáže odhaliť všetky chyby v hlavičke. Ďalším predpokladom je použitie ideálnej metódy určovania hraníc bunky (cell delineation). Model kanála použitý pri výpočtoch a simuláciách generoval zhuky chýb, ktoré obsahovali v rámci zhuku iba chybné bity. Zhuky chýb v reálnych kanáloch sú ohraničené chybnými bitmi, ale vo vnútri sa môžu vyskytnúť aj nepokazené bity. Z toho vyplýva, že výsledky získané na reálnom kanáli by boli lepšie ako tie uvádzané v tejto práci, pretože sme uvažovali najhorší prípad zhukov.

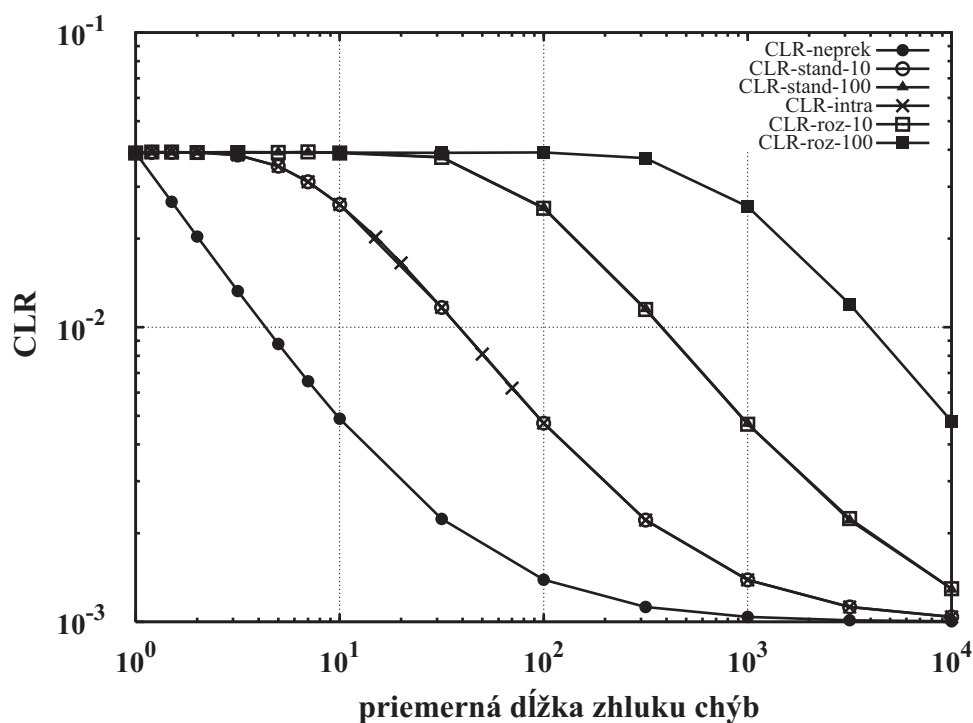
V práci používame pojem výkon HEC algoritmu, čo predstavuje hodnotu parametrov pre daný prípad. Čím lepšie sú výsledky (vo všetkých prípadoch parametrov to znamená čím menšia hodnota), tým je lepší výkon alebo výkonnosť HEC algoritmu a taktiež samotného prijímača. Niektorí autori používajú ako závislú premennú maximálnu dĺžku zhuku chýb, z čoho vyplýva, že ich výsledky sú zdanlivo lepšie. Pretože v tejto práci používame priemernú dĺžku zhuku bitových chýb ( $\varepsilon$ ), sú v prípade konkrétnej hodnoty  $\varepsilon$  zakomponované aj dlhšie zhuky chýb.

Jedným z cieľov práce bola analýza a vyhodnotenie výkonnosti všetkých troch typov HEC algoritmu (detekčný, korekčný a štandardný). Preto si rozoberieme postupne hodnoty skúmaných parametrov (CLR, CER a CBER) pre všetky typy. Najskôr sa sústredíme na správanie sa **detekčného módu HEC algoritmu**. Na tento účel nám poslúži graf závislostí parametra CLR na obr. 4.36. CLR-neprek predstavuje prípad prenosu bez prekladania, CLR-stand-10 resp. CLR-stand-100 predstavuje prenos so štandardným prekladaním s hĺbkou

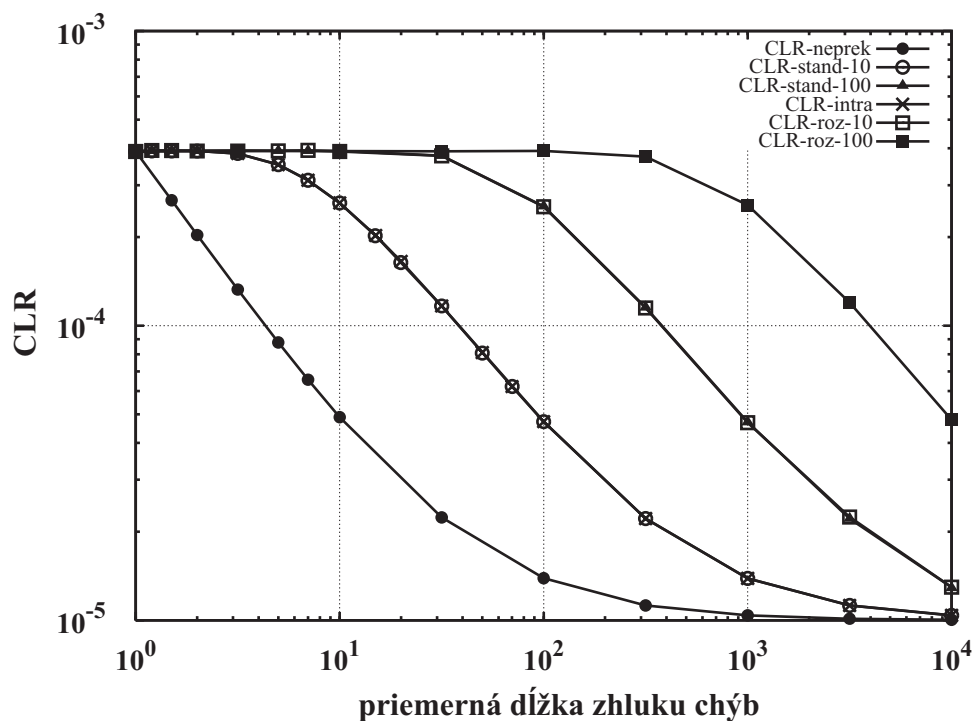
prekladania 10 resp. 100 buniek, CLR-intra je prípad s vnútrobunkovým prekladaním a CLR-roz-10 resp. CLR-roz-100 predstavuje prípad prenosu ATM buniek s rozšíreným prekladaním s hĺbkou 10 resp. 100 buniek. Metóda prekladania prináša zlepšenie iba vtedy, ak sa spojí s kódom, ktorý má korekčné schopnosti a samozrejme sa využijú. Toto ale nie je prípad detekčného módu HEC algoritmu, čo dokazujú aj jednotlivé závislosti na obr. 4.36.

Najnižšie hodnoty parametra CLR dáva prípad prenosu buniek bez prekladania na celom rozsahu hodnôt priemernej dĺžky zhlukov chýb. Akonáhle sa použije pri prenose prekladanie ATM buniek, je hodnota CLR väčšia ako v prípade bez prekladania a dokonca s rastúcou hĺbkou prekladania sa situácia zhoršuje. Je to dané tým, že čím väčšia hĺbka prekladania, tým sa zhluk chýb rozloží do viacerých buniek a tým je viac buniek zahodených (ak sa chyby dostali do hlavičiek). V prípade prenosu bez prekladania s rastúcou hodnotou  $\varepsilon$  hodnota parametra CLR klesá k BER kanála. Z toho vyplýva, že ak je nutné použiť detekčný mód HEC algoritmu, je pri rovnakej hodnote BER lepšie, ak sa chyby vyskytujú vo väčších zhlukoch. Je to dané tým, že chyby prichádzajú v skupinách a zasiahnú menej ATM buniek, a tým je menej ATM buniek zahodených ako v prípade, keď sa chyby objavujú v malých skupinách ale častejšie a viac buniek je tak zasiahnutých chybami. Ak sa použije detekčný mód bez prekladania buniek pri prenose, tak najnižšiu hodnotu parametra CLR, ktorú je možné dosiahnuť, je hodnota rovná chybovosti kanála (BER). Najvyššia hodnota naopak je dosahovaná pre kanál, ktorý je charakteristický tým, že chyby sa objavujú vždy po jednej, čiže  $\varepsilon = 1$  bit, čo je takmer ako kanál s nezávislými chybami. Hodnota CLR v tomto prípade je  $3,9 \cdot 10^{-2}$ .

Zatiaľ sme uvažovali prenos cez kanál, ktorého BER je  $10^{-3}$  a nie je použitý žiaden zabezpečovací kód na úrovni fyzickej vrstvy. Predpokladajme situáciu, že pred prenosom buniek sú tieto bunky zakódované konvolučným kódom, ktorý nám zlepší chybovosť kanála z  $10^{-3}$  na  $10^{-5}$ . Potom jednotlivé závislosti z obr. 4.36 sú pre prípad  $\text{BER} = 10^{-5}$  zobrazené na obr. 4.37. Pozorný čitateľ zistil, že sa tvar jednotlivých závislostí CLR vôbec nezmenil. Zmenili sa iba údaje na vertikálnej osi s tým, že maximálna hodnota parametra CLR je teraz  $3,9 \cdot 10^{-4}$  a minimálna je rovná chybovosti kanála, ktorú vidí fyzická ATM vrstva, t.j.  $10^{-5}$ . Ak si to prevedieme do reči buniek, tak v najlepšom prípade je zahodená jedna ATM bunka z  $10^5$  buniek v priemere a v najhoršom prípade približne štyri z  $10^4$  buniek v priemere.



Obr. 4.36 Porovnanie závislostí parametra CLR od priemernej dĺžky zhluky chýb pre detekčný mód HEC algoritmu pre všetky popísané metódy a  $\text{BER} = 10^{-3}$

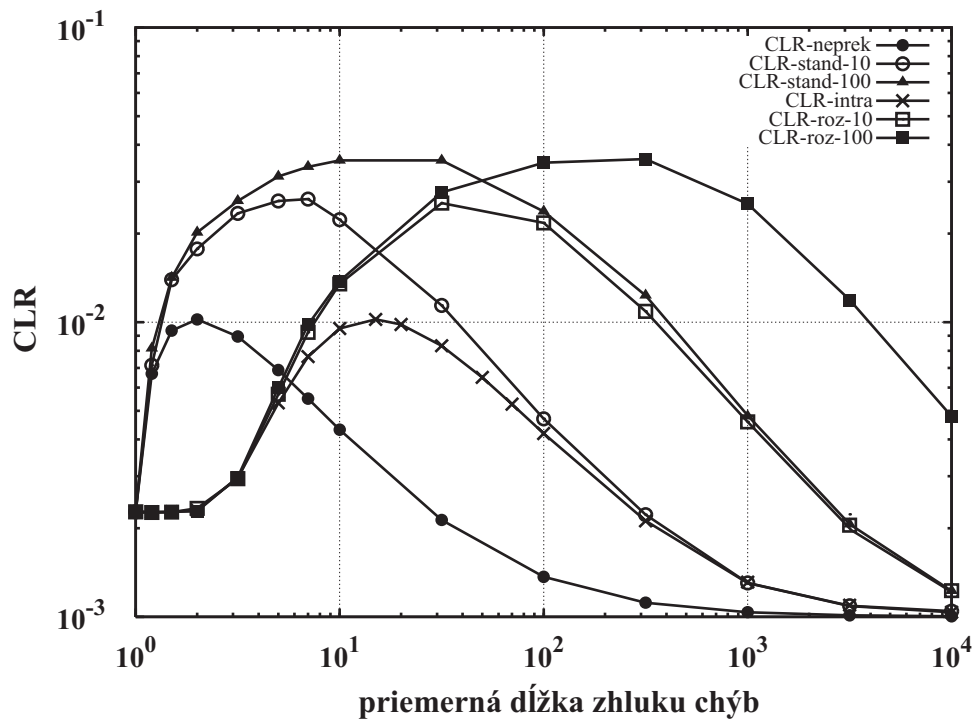


Obr. 4.37 Porovnanie závislostí parametra CLR od priemernej dĺžky zhluky chýb pre detekčný mód HEC algoritmu pre všetky popísané metódy a  $\text{BER} = 10^{-5}$

Závislosti parametra CLR od priemernej dĺžky zhlukov chýb pre rovnaké prípady ako na obr. 4.36 ale pre **štandardný HEC algoritmus** prináša obr. 4.38. Štandardný HEC algoritmus pracuje v dvoch stavoch: detekčnom alebo korekčnom, no iba v korekčnom opravuje chyby. Všetky závislosti parametra CLR začínajú od rovnakej hodnoty  $2,27 \cdot 10^{-3}$  pre prípad  $\varepsilon = 1$  bit ( $\text{BER} = 10^{-3}$ ). Pre oblasť malých zhlukov chýb je možné rozdeliť závislosti do dvoch skupín.

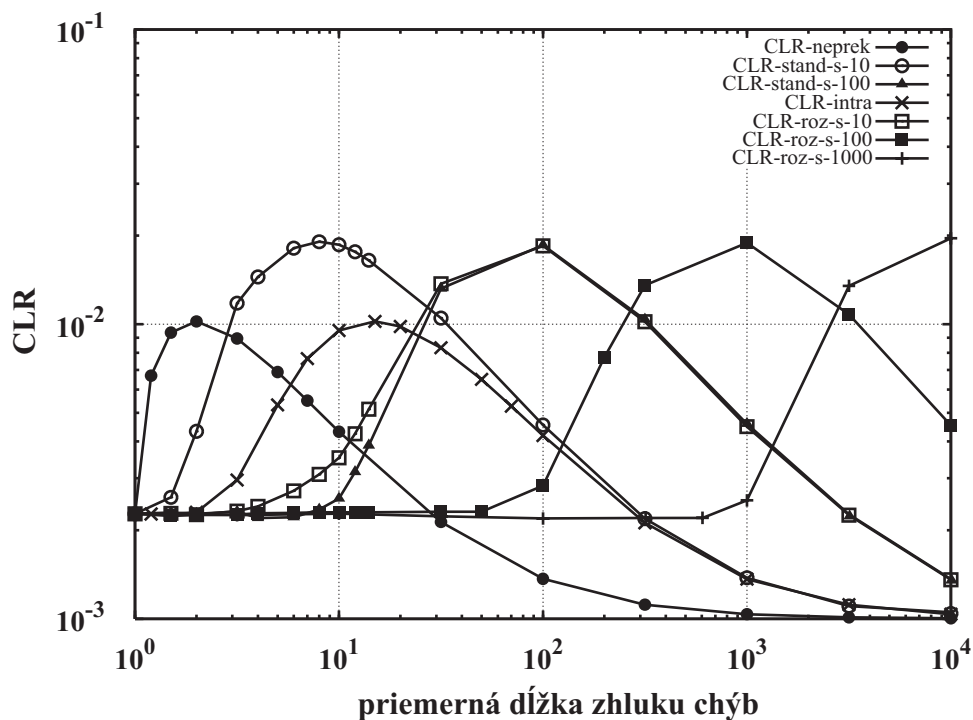
Prvá skupina, reprezentovaná prípadmi prenosu bez prekladania a prenosu so štandardným prekladaním, je charakteristická tým, že v okamihu zoskupovania chýb závislosti parametra CLR prudko stúpajú k svojmu maximu. V prípade prenosu bez prekladania je to dané tým, že zhluk chýb v hlavičke nie je schopný štandardný HEC algoritmus opraviť. V prípade štandardného prekladania je to tým, že zhluk síce je rozmiestnený do viacerých hlavičiek buniek, ale štandardný HEC algoritmus vie opraviť iba prvú bunku, ostatné sa zahodia. Preto je aj v prípade štandardného prekladania nárast pomalší a maximum dosiahnuté pre väčšiu priemernú dĺžku zhlukov chýb.

Druhú skupinu reprezentujú prípady prenosu s vnútrobunkovým a rozšíreným prekladaním. Táto skupina je charakteristická tým, že hodnota CLR pre  $\varepsilon = 1$  bit je po určitéj hodnote dĺžky zhlukov udržiavaná a až potom nastáva nárast na maximum. U vnútrobunkového prekladania je to dané tým, že zhluk chýb sa preloží iba v rámci danej bunky a preto žiadne ďalšie bunky nie sú zahodené až do prípadu, kedy hĺbka prekladania je nedostatočná voči dĺžkam zhlukov. V prípade rozšíreného prekladania je to tým, že medzi hlavičkovými bitmi sú informačné bity, kam sa umiestnenia zvyšné bity zhlukov chýb a opäť iba jedna bunka je zasiahnutá týmto zhlukom v hlavičke (uvažujeme stále prípad najmenších priemerných dĺžok zhlukov chýb). Závislosti parametra CLR pre všetky prípady na obr. 4.38 nakoniec po dosiahnutí svojho maxima konvergujú k hodnote BER kanála. Najst' najlepší prípad prenosu je obtiažne, pretože ani jeden prípad nedáva uspokojivé výsledky na celom intervale pre  $\varepsilon$ . Dá sa zhrnúť, že pre oblasť približne  $\varepsilon < 6$  bitov dávajú prípady prenosu z druhej skupiny (vnútrobunkové a rozšírené prekladanie) najlepšie výsledky, ale pre oblasť  $\varepsilon > 6$  bitov je najvýhodnejší prenos bez prekladania. Taktiež vidíme, že zväčšovanie hĺbky prekladania nám nezlepšuje, ale naopak zhoršuje jednotlivé priebehy.

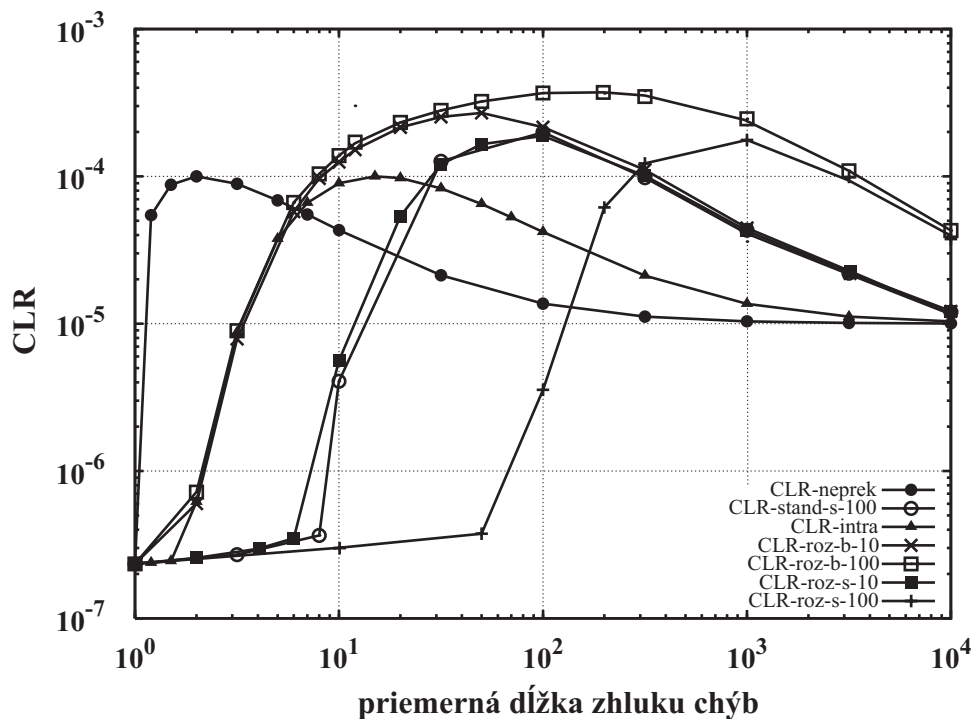


Obr. 4.38 Závislosti parametra CLR od priemernej dĺžky zhľuku chýb pre štandardný HEC algoritmus, rôzne metódy prenosu buniek (bez zmeny ich poradia) a  $BER = 10^{-3}$

Na vylepšenie metód prekladania boli v tejto práci pre štandardný mód HEC algoritmu navrhnuté *modifikované metódy* so *zmenou poradia prekladaných buniek*. Závislosti pre tieto prípady obsahuje obr. 4.39. Ako vidíme, metóda zmeny postupnosti buniek pred prekladaním nám predlžuje interval, na ktorom je hodnota parametra CLR pre  $\varepsilon = 1$  bit udržiavaná približne konštantná s rastúcou hodnotou  $\varepsilon$ . Dokonca sa to deje aj v prípade, ak sa použije štandardné prekladanie. Ale pretože sú pri štandardnom prekladaní prekladané hlavičkové bity navzájom, nepodáva až také zlepšenia ako metóda rozšíreného prekladania, u ktorej zmena poradia prekladaných buniek prináša najväčšie zlepšenia. Je to spojené s tým, že medzi hlavičkovými bitmi je deväť informačných a najbližšie hlavičkové bity po preložení nie sú zo susedných buniek. Preto je štandardný HEC algoritmus rýchlo vracaný do korekčného stavu. V prípade chybovosti kanála  $10^{-3}$  nám prenos bez prekladania dáva od hodnoty  $\varepsilon = 30$  bitov lepšie výsledky ako všetky ostatné metódy prenosu. Preto zvyšovanie hĺbky prekladania neprináša pre  $\varepsilon > 30$  bitov lepšie hodnoty parametra CLR. Tento problém je však spojený iba s kanálmi s chybovosťou kanála  $10^{-3}$  a viac. Pre menšie BER je hodnota parametra CLR pre  $\varepsilon = 1$  bit menšia ako je hodnota BER. Obr. 4.40 prináša pohľad na situáciu z obr. 4.39 pre  $BER = 10^{-5}$ .



Obr. 4.39 Závislosti parametra CLR od priemernej dĺžky zhluku chýb pre štandardný HEC algoritmus pre rôzne metódy prenosu buniek so zmenou ich poradia a  $BER = 10^{-3}$

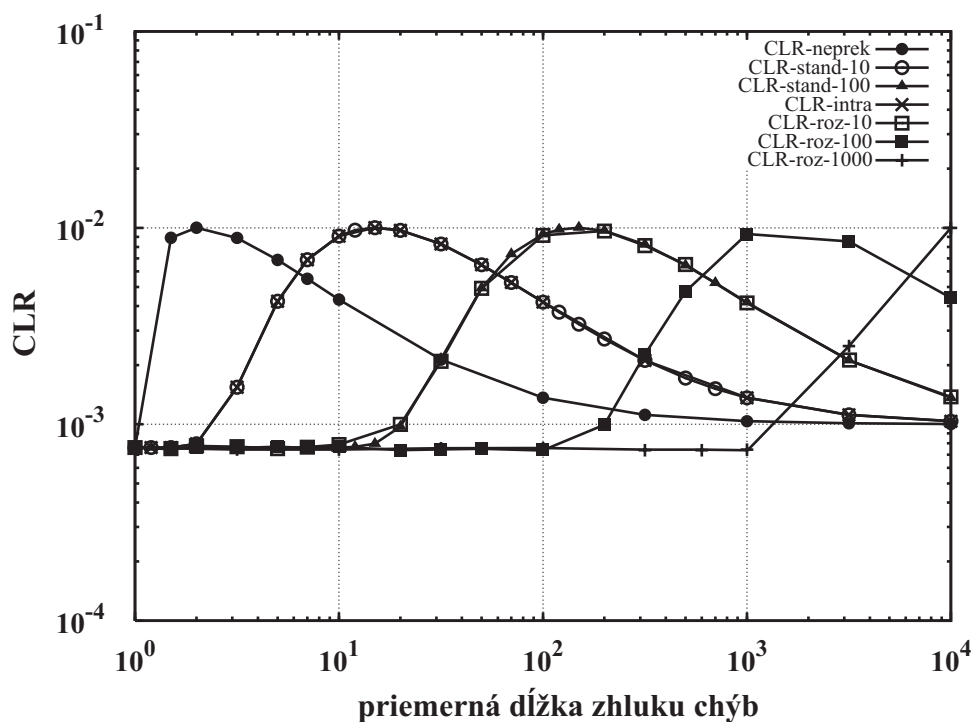


Obr. 4.40 Závislosti parametra CLR od priemernej dĺžky zhluku chýb pre štandardný HEC algoritmus pre rôzne metódy prenosu buniek aj so zmenou ich poradia a  $BER = 10^{-5}$

Posledným typom HEC algoritmu je **korekčný mód**. Závislosti parametra CLR pre tento typ módu HEC algoritmu, rôzne metódy prenosu a BER kanála  $10^{-3}$  zobrazuje graf na obr. 4.41. Každá závislosť je charakteristická tým, že čím skôr (s rastúcou priemernou dĺžkou zhluku chýb) začne závislosť inklinovať do svojho maxima, tým rýchlejšie konverguje k hodnote BER kanála. Prípad prenosu bez prekladania je práve špecifický tým, že v okamihu zoskupovania chýb v kanáli prudko stúpa k svojmu maximu (približne  $10^{-2}$ ), čo je dané tým, že zhluky chýb (dĺžky 2 a viac bitov) padnúce do hlavičiek ATM buniek nedokáže korekčný mód opraviť, preto sú tieto bunky zahodené. S postupným rastom dĺžok zhlukov veľké zhluky koncentrujú množstvo chýb, ktoré sú zahadzované menším a menším počtom buniek. Metóda štandardného prekladania s hĺbkou prekladania 10 buniek a vnútrobunková metóda dávajú rovnaké hodnoty parametra CLR. Súvisí to s tým, že každé dva susedné hlavičkové bity rovnakej bunky sú po preložení oddelené 9 inými bitmi (hlavičkovými iných buniek v prípade štandardného prekladania a informačnými bitmi tej istej bunky v prípade vnútrobunkového prekladania).

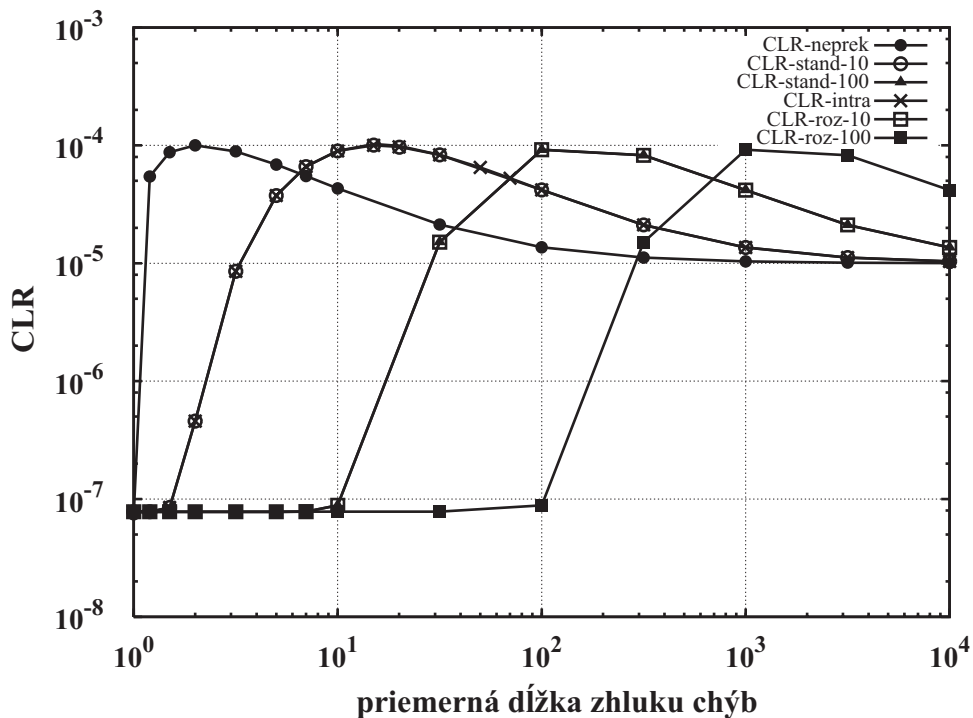
Výkon metódy prekladania sa prejavuje v tom, ako dlho je udržiavaná hodnota CLR pre  $\varepsilon = 1$  bit (v našom prípade  $7,8 \cdot 10^{-4}$ ) konštantná s rastúcou hodnotou  $\varepsilon$ . Pre tieto dve metódy je to po hodnotu približne  $\varepsilon = 2$  bity. Potom začína byť hĺbka prekladania nedostatočná na rozloženie zhlukov po jednej bitovej chybe na hlavičku jednej ATM bunky. Až to príde do stavu, že pri danom zhluku chýb padnúcom do oblasti preložených hlavičkových bitov, budú všetky preložené bunky po spätnom preložení obsahovať po minimálne dvoch chybách v hlavičkách. Preto budú všetky tieto bunky zahodené. S ďalším rastom hodnoty  $\varepsilon$  bude hĺbka prekladania zanedbateľná voči dĺžke zhlukom a hodnota parametra CLR bude klesať. Na obr. 4.41 vidíme, že metóda štandardného prekladania s hĺbkou prekladania 100 ATM buniek a rozšíreného prekladania s hĺbkou prekladania 10 buniek dávajú rovnaký výkon z pohľadu parametra CLR. Tu je vidieť podstatný **prínos rozšíreného prekladania**, pretože dáva rovnaký výkon ako metóda štandardného prekladania ale s desaťkrát menšou hĺbkou prekladania. Je to dané tým, že pri hĺbke prekladania 10 buniek, skutočná vzdialenosť dvoch susedných preložených hlavičkových bitov je až 100 bitov. V prípade týchto dvoch metód je hodnota parametra CLR udržiavaná konštantná až po  $\varepsilon = 13$  bitov. Čím je hĺbka prekladania ďalej zvyšovaná, tým je tento interval konštantnej hodnoty CLR (pri  $\varepsilon = 1$ ) udržiavaný do väčšej hodnoty priemernej dĺžky zhluku chýb. Napr. pre rozšírené prekladanie a hĺbku prekladania 100 ATM buniek je táto hraničná hodnota  $\varepsilon$  približne 130 bitov.

Pre praktické využitie je potrebné sa pozrieť, ako budú vyzeráť tieto priebehy CLR, ak BER kanála (videná fyzickou ATM vrstvou) bude  $10^{-5}$ . Jednotlivé závislosti parametra CLR z obr. 4.41 (korekčný mód HEC algoritmu) pre  $\text{BER} = 10^{-5}$  sú zobrazené na obr. 4.42. Všetky zobrazené závislosti začínajú z počiatočnej hodnoty parametra  $\text{CLR} = 7,8 \cdot 10^{-8}$  pre  $\varepsilon = 1$  bit, čo je už značne menšia hodnota ako BER. Táto hodnota je pri jednotlivých metódach prekladania udržiavaná na približne rovnakých intervaloch, ako v prípade  $\text{BER} = 10^{-3}$ . A toto je práve tá časť, na ktorej bude pracovať náš vybraný mód HEC algoritmu. Je už len potrebné zistiť, aká je predpokladaná hodnota  $\varepsilon$  pre daný reálny kanál a podľa toho nastaviť hĺbku prekladania. Metóda rozšíreného prekladania podáva najlepšie výsledky pre parameter CLR. Zmena poradia buniek pred prekladáním, opísaná v časti 4.6, nemá žiaden vplyv na výkon rozšíreného prekladania z hľadiska parametra CLR. Je to dané tým, že korekčný mód sa snaží opravovať chybu v hlavičke každej ATM bunky.



Obr. 4.41 Parameter CLR v závislosti od priemernej dĺžky zhluku chýb pre korekčný mód HEC algoritmu, pre všetky popísané metódy prenosu ATM buniek a  $\text{BER} = 10^{-3}$





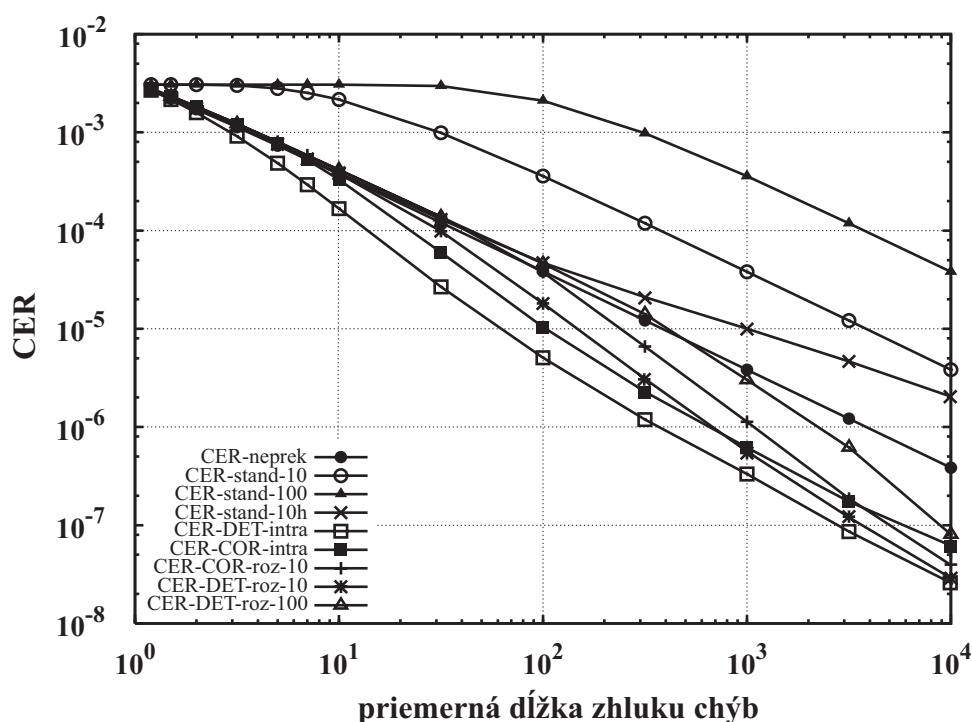
Obr. 4.42 Parameter CLR v závislosti od priemernej dĺžky zhluku chýb pre korekčný mód HEC algoritmu pre všetky popísané metódy prenosu ATM buniek a  $BER = 10^{-5}$

Výkon jednotlivých módov HEC algoritmu je dôležité sledovať aj z pohľadu ďalších dvoch parametrov CER a CBER. Obr. 4.43 zobrazuje závislosť parametra CER od priemernej dĺžky zhluku chýb priamo pre chybovosť kanála  $10^{-5}$ . Závislosti parametra CER sú vybrané len pre niektoré prípady prenosu ATM buniek, ktoré sú reprezentatívne, pretože ostatné sú buď rovnaké alebo analogické. Detailnejší rozbor ostatných prípadov bol uskutočnený v grafických výsledkoch na konci popisu každej metódy. Ako vidieť z grafu na obr. 4.43, všetky závislosti začínajú z bodu  $\varepsilon = 1$  bit pri hodnote  $3,83 \cdot 10^{-3}$ . S rastúcou hodnotou  $\varepsilon$  nadobúdajú všetky závislosti klesajúci charakter, čo je dané tým, že veľké zhluky s veľkou pravdepodobnosťou zasiahnu minimálne jeden alebo viac hlavičkových bitov tej istej bunky, ktorá je následne zahodená (aj s množstvom chýb v informačnej časti).

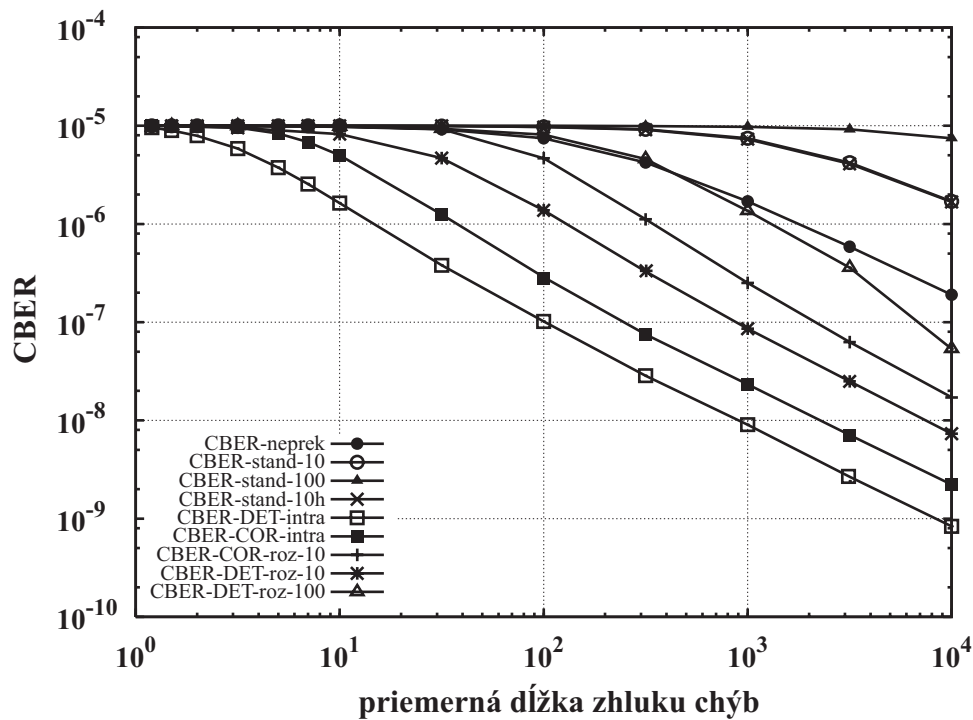
Porovnaním jednotlivých závislostí parametra CER je možné konštatovať, že najhoršie výsledky dáva metóda štandardného prekladania celých ATM buniek, pretože zhluk chýb, ktorý zasiahne informačné bity, je rozložený do informačných častí mnohých buniek, čím narastá hodnota CER. Je jasné, že zvyšovanie hĺbky prekladania iba zhoršuje výsledný priebeh. Určité zlepšenie prináša štandardné prekladanie, pri ktorom sú prekladané iba hlavičky buniek. Ale stále sú hodnoty parametra CER iba rovné alebo horšie (s rastúcou hodnotou  $\varepsilon$ ) ako je prípad prenosu bez prekladania. Na druhej strane najlepšie výsledky dáva

vnútrobunkové prekladanie a detekčný príp. korekčný (pre  $\varepsilon < 1000$  bitov) mód HEC algoritmu. Hlavičkové bity v tomto prípade sú rovnomerne rozložené po celej bunke a zhuk chýb s dĺžkou nad 10 bitov takmer vždy zasiahne hlavičkový bit bunky a preto, ak sa objaví zhuk v niektorej bunke, tak s vysokou pravdepodobnosťou bude táto bunka zahodená aj s daným zhukom chýb. **Metóda rozšíreného prekladania** sa umiestnila medzi prípadom vnútrobunkového prekladania a prípadom bez prekladania buniek. S rastúcou hĺbkou prekladania sa priebeh parametra CER blíži k prípadu bez prekladania.

Na konkrétne porovnanie pre hodnotu  $\varepsilon = 10$  bitov dáva štandardné prekladanie s hĺbkou 10 buniek  $\text{CER} = 2,15 \cdot 10^{-3}$ , detekčný mód HEC algoritmu pri vnútrobunkovom prekladaní hodnotu  $1,67 \cdot 10^{-4}$  a ostatné zobrazené prípady hodnotu CER v rozsahu  $3,7 \cdot 10^{-4}$  až  $4,2 \cdot 10^{-4}$ . Pre  $\varepsilon = 100$  bitov je pre štandardné prekladanie s  $d = 10$  buniek hodnota  $\text{CER} = 3,59 \cdot 10^{-4}$ , pre rozšírené prekladanie s  $d = 10$  buniek (detekčný mód HEC)  $\text{CER} = 1,8 \cdot 10^{-5}$  a pre vnútrobunkové prekladanie a detekčný mód je  $\text{CER} = 5,07 \cdot 10^{-6}$ . Z toho vyplýva, že čím dlhšie zhuky chýb v kanáli, tým je hodnota CER menšia. To má ale opačný vplyv na parameter CLR.



Obr. 4.43 Závislosť parametra CER od priemernej dĺžky zhuku chýb pre rôzne metódy prenosu ATM buniek a rôzne typy HEC algoritmu a  $\text{BER} = 10^{-5}$



Obr. 4.44 Závislosť parametra CBER od priemernej dĺžky zhuku chýb pre rôzne metódy prenosu ATM buniek, rôzne typy HEC algoritmu a  $BER = 10^{-5}$

Pohľad na výkony jednotlivých metód prenosu ATM buniek z pohľadu parametra CBER a chybovosti kanála  $10^{-5}$  prináša obr. 4.44. Podobne ako parameter CER, všetky závislosti vychádzajú z hodnoty  $10^{-5}$  pre  $\varepsilon = 1$  bit a s rastúcou hodnotou  $\varepsilon$  majú klesajúci priebeh. Taktiež najhoršie výsledky dáva prípad so štandardným prekladáním. Je to dané tým, že skupiny hlavičkových bitov sú oddelené veľkým počtom informačných bitov, v rámci ktorých sa môže objaviť aj veľký zhuk chýb, ktorý sa týmto dostane až do AAL vrstvy. Rastúca hĺbka prekladania iba zväčšuje blok informačných bitov medzi skupinami hlavičiek a tým umožňuje preniknúť veľmi veľkým zhukom chýb do AAL vrstvy, čím sa CBER rovná hodnote BER na väčšom intervale pre  $\varepsilon$ . Najlepšie výsledky dáva metóda vnútrobunkového prekladania s detekčným módom HEC algoritmu kvôli tomu, že väčšie zhuky chýb vždy zasiahnu niektorý hlavičkový bit a bunka sa kvôli tomu zahodí aj s príslušným zhukom chýb. Metóda rozšíreného prekladania dáva horšie výsledky ako metóda vnútrobunkového prekladania, ale na druhej strane lepšie ako prípad bez prekladania. Zhoršenie výsledkov rozšíreného prekladania nepriaznivo ovplyvňuje rastúca hĺbka prekladania alebo výber korekčného namiesto detekčného módu HEC algoritmu.

Ak by sme chceli urobiť rekapituláciu, zistili by sme, že žiadna metóda prenosu a žiaden mód HEC algoritmu neprináša najlepšie výsledky pre všetky skúmané parametre súčasne. Ak sa sústredíme na parameter CLR, tak

- **rozšírená metóda prekladania spolu s korekčným módom** HEC algoritmu podáva najlepšie výkony z pohľadu potrebnej hĺbky prekladania a danej priemernej dĺžky zhluku chýb kanála;
- v prípade nutného použitia štandardného HEC algoritmu sa **modifikované metódy so zmenou poradia** prekladaných buniek javia ako veľmi potrebné na zlepšenie jeho výkonnosti.

Na druhej strane z pohľadu parametrov CER a CBER

- prináša najlepšie výsledky metóda vnútrobunkového prekladania, ktorej použitie je obmedzené iba na kanály s hodnotou  $\varepsilon$  do 3 bitov. Pre väčšie  $\varepsilon$  je potrebné použiť opäť **rozšírené prekladanie**;
- najlepšie výsledky podáva detekčný mód HEC algoritmu, ale z pohľadu dôležitosti parametra CLR je dôležité použiť **korekčný mód**.

metóda prenosu	$\varepsilon$ [bit]	CLR	CER	CBER	$N_{D\_7}$	$N_{E\_7}$	$N_{G\_7}$
bez prekladania	10	$4,3 \cdot 10^{-5}$	$3,75 \cdot 10^{-4}$	$9,76 \cdot 10^{-6}$	430	3750	9,9
	100	$1,36 \cdot 10^{-5}$	$3,83 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	136	383	75,196
štand. prek. d = 10 b.	10	$9 \cdot 10^{-5}$	$3,86 \cdot 10^{-4}$	$10^{-5}$	900	3860	9,948
	100	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$9,7 \cdot 10^{-6}$	420	470	79,251
štand. prek. d = 100 b.	10	$8,8 \cdot 10^{-8}$	$3,85 \cdot 10^{-4}$	$9,94 \cdot 10^{-6}$	0,88	3850	9,914
	100	$9,2 \cdot 10^{-5}$	$4,83 \cdot 10^{-5}$	$9,9 \cdot 10^{-6}$	920	483	78,708
vnútrobun. prekladanie	10	$9 \cdot 10^{-5}$	$3,32 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	900	3320	5,783
	100	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$2,76 \cdot 10^{-7}$	420	104	10,191
rozší. prek. d = 10 b.	10	$8,8 \cdot 10^{-8}$	$4,18 \cdot 10^{-4}$	$9,89 \cdot 10^{-6}$	0,88	4180	9,086
	100	$9,2 \cdot 10^{-5}$	$3,76 \cdot 10^{-5}$	$4,67 \cdot 10^{-6}$	920	376	47,694
rozší. prek. d = 100 b.	10	$7,8 \cdot 10^{-8}$	$4,19 \cdot 10^{-4}$	$9,98 \cdot 10^{-6}$	0,78	4190	9,146
	100	$8,8 \cdot 10^{-8}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$9,9 \cdot 10^{-6}$	0,88	510	74,541

Tab. 4.4 Hodnoty parametrov pre korekčný mód HEC algoritmu a vybrané metódy prenosu ATM buniek pre  $BER = 10^{-5}$

Tab. 4.4 umožňuje porovnanie niektorých metód spolu s korekčným módom HEC algoritmu z pohľadu ďalších troch parametrov, ktoré sú odvodené z parametrov CLR, CER a CBER. Parameter  $N_{D\_7}$  predstavuje priemerný počet zahodených buniek v každej

postupnosti 10 miliónov vyslaných buniek. Parameter  $N_{E\_7}$  reprezentuje priemerný počet úspešne prijatých buniek ale s chybami v informačnej časti opäť v každej postupnosti 10 miliónov vyslaných buniek. Parameter  $N_{G\_7}$  je priemerný počet chýb v úspešne prijatých bunkách ale s chybami v informačnej časti. **Metóda rozšíreného prekladania** pri  $\varepsilon = 100$  bitov a uvedených hĺbkach prekladania zahodí v priemere maximálne jednu bunku z každého 10 milióna buniek pri relatívne nízkom počte prijatých buniek s chybami v informačnej časti. Najnižší priemerný počet chýb v úspešne prijatých bunkách s chybami v informačnej časti zabezpečí vnútrobunkové prekladanie.

Hodnota parametra CLR udržiavaná na konštantnej úrovni s rastúcou hodnotou  $\varepsilon$  (od hodnoty  $\varepsilon = 1$  bit) pri metóde rozšíreného prekladania a korekčnom móde HEC algoritmu, ak sa použije výkonný kód zabezpečujúci  $BER = 10^{-5}$ , je rovná  $7,8 \cdot 10^{-8}$ . Táto hodnota je dostatočná pre služby ako prenos hlasu, videotelefónu, videokonferencie alebo elektronickej pošty (tab. 2.2). Nevýhodou metódy rozšíreného prekladania je väčšia zložitosť realizácie a vnášanie dodatočného oneskorenia do prenosu údajov.

## 5. Záver

Pojem bezdrôtového kanála, ktorý je v súčasnosti skloňovaný vo všetkých pádoch, je základným článkom celého prenosového reťazca pri prenose údajov rôznych služieb (úzkopásmových, širokopásmových) bezdrôtovým systémom. Preto je potrebné nájsť a popísať jeho vlastnosti a správanie pre každý prípad použitia (výskytu) či už v oblasti satelitných, mobilných alebo iných bezdrôtových systémov. Od toho sa potom ďalej odvíja hľadanie čo najpresnejšieho modelu, ktorý by vystihoval jeho parametre, umožňoval by dynamickú prispôsobivosť príbuzným typom daného kanála a vychádzal by z fyzikálnych javov, ktoré pri šírení signálu kanálom nastávajú. Táto práca prezentuje základný prehľad typov bezdrôtového kanála a taktiež kategorizuje jeho doterajšie modelovanie. Ak máme model bezdrôtového kanála, môžeme vyšetrovať výkonnosť protokolov použitých v komunikačných sieťach, ktoré využívajú bezdrôtové médium na prístup koncových uzlov do siete alebo, ktoré bezdrôtové médium používajú na vzájomne prepojenie viacerých sietí. Potreba analýzy výkonnosti týchto protokolov vyplýva z toho, že kvalita bezdrôtového kanála je rádovo horšia ako kvalita súčasných „drôtových“ kanálov, najmä z hľadiska hodnoty a charakteru jeho chybovosti, príp. oneskorenia signálu. Táto práca sa zaoberala analýzou výkonu vybraných súčasných protokolov, pričom sa ďalej sústredila výlučne na asynchrónny prenosový mód (ATM).

Ako bolo uvedené v práci, výkonnosť každého protokolu je degradovaná práve kvôli zvýšenej chybovosti kanála a zhlukovému prejavu chýb. Taktiež boli v práci zhodnotené dostupné metódy, ktoré je možné použiť na zvýšenie výkonnosti protokolov od výkonných zabezpečovacích kódov (FEC), cez spätnoväzobné metódy (ARQ) a metódy prekladania až po ich rôzne kombinácie. Na základe odporúčania niektorých autorov [Akyi97] bola vybraná za účelom detailnejšieho skúmania v rámci tejto práce metóda prekladania prenášaných údajov protokolu ATM. Bunky, ktoré používa ATM na prenos údajov služieb, obsahujú v hlavičke na jej ochranu zabezpečovací kód, ktorý dokáže opraviť jednu chybu. Preto bola táto práca zameraná na analýzu a vyhodnotenie výkonnosti ATM prenosu buniek cez bezdrôtový kanál s implementovanou metódou prekladania priamo na ATM bunky.

Metódy prekladania ATM buniek boli navrhnuté doteraz dve: štandardné a vnútrobunkové prekladanie. Vnútrobunkové prekladanie ponúklo mnoho vylepšení oproti štandardnému prekladaniu, no bolo obmedzené svojou výkonnosťou z pohľadu maximálnej priemernej dĺžky zhluku chýb. Aby sme preklenuli tento problém, navrhli sme v práci **metódu rozšíreného prekladania**, ktorá tento problém odstraňuje. Výkonnosť sme vyšetrovali

z pohľadu troch parametrov: CLR, CER a CBER. Zistili sme, že navrhnutá metóda podáva z hľadiska parametra CLR rovnaké výkony ako vnútrobunkové prekladanie, ale na väčšej oblasti  $\varepsilon \in \langle 1, \varepsilon_{\max} \rangle$ . Táto oblasť môže byť ešte rozširovaná zväčšením hĺbky prekladania, samozrejme kým je dodatočné oneskorenie v dovolenom intervale.

ATM prijímač pracuje na úrovni fyzickej vrstvy podľa tzv. HEC algoritmu, ktorý podľa aktuálneho stavu spracováva prichádzajúce ATM bunky. Existujú rôzne variácie tohto algoritmu v závislosti od stavov, ktoré sa použijú. Potom dostaneme tri typy HEC algoritmu: detekčný, korekčný a štandardný typ (mód) HEC algoritmu. Zistili sme, že najlepšie výkony dáva vždy **korekčný mód** a najhoršie detekčný mód z hľadiska parametra CLR. Na zlepšenie výkonu štandardného módu HEC algoritmu sme navrhli *modifikácie pre metódu štandardného a rozšíreného prekladania* týkajúce sa zmeny poradia ATM buniek pred prekladaním. Táto modifikácia v oboch prípadoch **zvyšuje** hodnotu  $\varepsilon_{\max}$  pre parameter CLR a korekčný mód HEC algoritmu.

Pôvodné prínosy v teoretickej oblasti môžeme na základe hore uvedeného zovšeobecniť do nasledovných bodov:

- na základe analýzy existujúcich metód blokového prekladania sme navrhli nasledovné metódy prekladania:
  - metódu rozšíreného prekladania
  - modifikovanú metódu štandardného prekladania
  - modifikovanú metódu rozšíreného prekladania
- návrh, analýza a vyhodnotenie navrhnutej metódy rozšíreného prekladania pre prenos ATM buniek z pohľadu blokových metód prekladania,
- odvodenie analytického modelu pre parametre CLR, CER a CBER pre metódu rozšíreného prekladania s hĺbkou 4 ATM bunky,
- návrh, analýza a vyhodnotenie navrhnutých modifikovaných metód štandardného a rozšíreného prekladania so zmenou postupnosti prekladaných ATM buniek,
- analýza a vyhodnotenie výkonnosti detekčného, korekčného a štandardného módu (typu) HEC algoritmu pre všetky metódy blokového prekladania (existujúce a navrhnuté v tejto práci),
- návrh simulačného prostredia pre vyhodnotenie všetkých v práci analyzovaných metód blokového prekladania a módov HEC algoritmu z pohľadu parametrov CLR, CER a CBER.

Z hľadiska aplikačného sme zistili, že metóda rozšíreného prekladania dosahuje rovnaký výkon z hľadiska parametra CLR ako metóda štandardného prekladania už pri menších hodnotách hĺbky prekladania. Z toho vyplýva, že následné oneskorenie prenosu údajov je menšie.

Ak použijeme na úrovni bezdrôtovej fyzickej vrstvy výkonný zabezpečovací kód (napr. konvolučný), ktorý zníži výslednú chybovosť kanála videnú fyzickou ATM vrstvou na hodnotu  $10^{-5}$ , potom môže byť metóda rozšíreného prekladania spolu s korekčným módom HEC algoritmu použitá na prenos údajov hlasových, videotelefonných a videokonferenčných, príp. elektronickej pošty. Z tab. 4.4 vidieť, že v tomto prípade z bloku 10 miliónov ATM buniek síce viac úspešne prijatých buniek obsahuje minimálne jednu chybu v informačnej časti, ale iba jedna bunka je zo všetkých prenesených buniek zahodená. Pre hlasové služby výsledná chybovosť CBER nie je tak kritická, ako hodnota CLR.

V rámci tejto práce bolo vytvorené simulačné prostredie, ktorého stručná charakteristika je uvedená v prílohe B, a v ktorom boli odsimulované všetky metódy blokového prekladania a všetky typy HEC algoritmu pojednávané v tejto práci. To znamená, že všetky analyticky vypočítané hodnoty priebehov skúmaných parametrov (taktiež programovo kvôli rekurzívnosti a zložitosti vzťahov pre všetky parametre) boli potvrdené hodnotami výsledkov získaných simuláciami.

Analýzy a vyhodnotenia, ktoré boli uskutočnené v tejto práci, využívali zjednodušený všeobecný model bezdrôtového kanála. Taktiež predpoklad použitého zabezpečovacieho kódu na úrovni bezdrôtovej fyzickej úrovni nebol detailnejšie rozoberaný. Potom námety na ďalšiu prácu by mohli byť nasledovné:

- analýza a vyhodnotenie výkonnosti jednotlivých metód prekladania spolu s typmi HEC algoritmu ATM protokolu pre konkrétne modely reálnych kanálov navrhnutých pre mestskú, prímestskú (vidiecku) a otvorenú oblasť
- návrh a analýza výkonnosti metód prekladania ATM buniek založených na konvulučnom prekladaní ATM buniek
- nájdenie efektívnej aplikácie metód prekladania v kombinácii s výkonnými kódmi (konvolučný, RS, turbo kód) v náväznosti na prenos ATM buniek cez bezdrôtový kanál z hľadiska zníženia hodnôt parametrov CLR, CER a CBER
- analyzovať vplyv ATM mechanizmu určovania hraníc ATM buniek (cell delineation) na výkonnosť všetkých prípadov analyzovaných v tejto práci



Práca vznikla v rámci nasledovných výskumných projektov na Katedre telekomunikácií:

1. Číslicové spracovanie obrazových a rečových signálov a ich prenos cez rôzne typy telekomunikačných kanálov, VEGA 1/3164/96
2. Metódy a algoritmy obrazových a rečových signálov, vývoj protokolov, modelovanie komunikačných kanálov a ich simulácia. Prenos signálov cez rôzne komunikačné prostredia, VEGA 1/7627/20
3. Riadenie zabezpečenia prenosu viacrozmerných dát v kanáloch s výrazne meniteľnou chybovosťou, VEGA 1/8265/01
4. Číslicové spracovanie signálov, protokoly, modelovanie, multimedialne služby, sieťové platformy, VEGA 1/0147/03
5. Vplyv nových služieb na architektúru a výkonnosť širokopásmových sietí, COST 257
6. Analýza a návrh moderných multislužbových sietí podporujúcich mobilitu, multimédiá a vzájomné prepájanie, COST 279

Domnievame sa, že sa nám podarilo dosiahnuť ciele práce a tak prispieť k rozšíreniu možnosti zabezpečenia údajov pomocou metód prekladania.

**Zoznam skratiek**

AAL	- ATM Adaptation Layer
ACK	- Acknowledgement
AFD	- Average Fade Duration
ALA	- ATM Link Accelerator
ALE	- ATM Link Enhancement
AMPS	- Advanced Mobile Phone Service
ARQ	- Automatic Repeat reQuest
ASIU	- ATM Satellite Interworking Unit
ATM	- Asynchronous Transfer Mode
AWGN	- Additive White Gaussian Noise
BCH	- Bose Chaudhuri Hocquenghem
BER	- Bit Error Ratio
B-ISDN	- Broadband ISDN
BPSK	- BiPhase Shift Keying
BT	- Burst Tolerance
CAC	- Connection Admission Control
CBER	- Cell Bit Error Rate
CCIR	- International Radio Consultative Committee
CDMA	- Code Division Multiple Access
CDV	- Cell Delay Variation
CER	- Cell Error Rate
CID	- Channel Identifier
CIR	- Committed Information Rate
CLR	- Cell Loss Rate
CMR	- Cell Misinsertion Rate
CPCS	- Common Part CS
CPI	- Common Part Indicator
CPS	- Common Part Sublayer
CPS-PDU	- Common Part Sublayer – Protocol Data Unit
CRC	- Cyclic Redundancy Check
CS	- Convergence Sublayer
CTD	- Cell Transfer Delay

---

DAMA	- Demand Assignment Multiple Access
DECT	- Digital European Cordless Telephone
DLC	- Data Link Control
DVB	- Digital Video Broadcasting
DVB-RCS	- DVB - Return Channel via Satellite
ETSI	- European Telecommunications Standards Institute
FDM	- Frequency Division Modulation
FDMA	- Frequency Division Multiple Access
FEC	- Forward Error Correction
FR	- Frame Relay
FSL	- Free Space Loss
GBN	- Go-back-N
GEO	- Geostationary Orbit
GPS	- Global Positioning System
GSM	- Global System for Mobile
HDLC	- High-level Data Link Control
HEC	- Header Error Check
HEO	- Highly Elliptical Orbit
HIPERLAN	- High Performance Radio Local Area Network
HPA	- High Power Amplifier
IEEE	- Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	- Internet Engineering Task Force
ISDN	- Integrated Services Digital Network
ITU	- International Telecommunication Union
IWF	- Interworking Function
LAN	- Local Area Network
LAP-B	- Link Access Procedure – asynchronous Balance mode
LAP-D	- Link Access Procedure – D channel
LCR	- Level Crossing Rate
LEO	- Low Earth Orbit
LHCP	- Left-Hand Circular Polarization
LI	- Length Indication
LMS	- Land Mobile Satellite
LMSS	- Land Mobile Satellite System

---

LOS	- Line of Sight
MAC	- Media Access Control
MAN	- Metropolitan Area Network
MCR	- Minimal Cell Rate
MCS	- Master Control Station
MEO	- Medium Earth Orbit
MF-TDMA	- Multifrequency TDMA
MID	- Multiplexing Identification
NCC	- Network Control Center
NMT	- Nordic Mobile Telephone
NNI	- Network Network Interface
OBP	- On-Board Processing
OBS	- On-Board Switching
PCR	- Peak Cell Rate
PDC	- Personal Digital Cellular
PDH	- Plesiochronous Digital Hierarchy
PLCP	- Physical Layer Convergence Protocol
PSK	- Phase Shift Keying
QoS	- Quality of Service
QPSK	- Quadrature Phase Shift Keying
RF	- Radio Frequency
RFC	- Requests For Comments
RHCP	- Right-Hand Circular Polarization
RS	- Reed Solomon
RTO	- Retransmission Time Out
RTT	- Round Trip Time
SACK	- Selective Acknowledgement
SAP	- Service Access Point
SAR	- Segmentation and Reassembly
SAR-PDU	- Segmentation and Reassembly – Protocol Data Unit
SCPC	- Single Channel Per Carrier
SCR	- Sustained Cell Rate
SDH	- Synchronous Digital Hierarchy
SDLC	- Synchronous Data Link Control

---

SN	- Sequence Number
SR	- Selective-Repeat
SREJ-ALOHA	- Selective Reject Adaptive Link On-Line Hawaii Area
SSCS	- Service Specific CS
ST	- Segment Type
SW	- Stop-and-Wait
TACS	- Total Access Communications System
TCP/IP	- Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TDMA	- Time Division Multiple Access
UDP	- User Datagram Protocol
UMTS	- Universal Mobile Telecommunications System
UNI	- User Network Interface
UII	- User-to-User Indication
VSAT	- Very Small Aperture Terminal
WAN	- Wide area network
WATM	- Wireless ATM

## Literatúra

- [Abri96] ABRISHAMKAR, F., SIVESKI, Z.: PCS global mobile satellites, In: IEEE Communications Magazine, vol. 34, no. 9, 1996, s. 132 - 136
- [Act97] ACT Networks Inc.: White Paper "SkyFrame: Multimedia Frame-Relay Networking via Satellite", 1997,  
<http://www.itpapers.com/abstract.aspx?&sortby=comp&scid=58&docid=13445>
- [Akyi97] AKYILDIZ, F., I., SEONG-HO, J.: Satellite ATM Networks: A Survey, In: IEEE Communications Magazine, vol. 35, 1997, s. 30 - 44
- [Akyo98] AKYOL, B., TOH, C., K.: A survey of handover techniques in wireless ATM networks, In: International Wireless Information Networks Journal, vol. 5, no. 1, 1998, s. 43 – 60
- [Auli79] AULIN, T.: A Modified Model for the Fading Signal at a Mobile Radio Channel, In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 28, no. 3, 1979, s. 182 – 203
- [Baba98] BABALIS, P., G., CAPSALIS, C., N.: A New Model for the Characterization of the Combined Shadowing and Multipath Effects in Satellite Systems, ICT'98, vol. IV, no. 4, 1998, s. 25 - 28
- [Bene03] BENEDETTO, S., MONTORSI, G., DIVSALAR, D.: Concatenated convolutional codes with interleavers, In: IEEE Communications Magazine, vol. 41, no. 8, 2003, s. 102 - 109
- [Bing00] BING, B.: High-speed wireless ATM and LANs, Londýn: Artech House Inc., 2000, 249 s., ISBN 1-58053-092-3
- [Bois92] BOISSEAU, M., DEMANGE, M., MUNIER, J-M.: High speed networks, Chichester : John Wiley & Sons, 1992, 192 s., ISBN 0-471-95109-9
- [Cain97] CAIN, B., J., MCGREGOR, N., D.: A recommended error control architecture for ATM networks with wireless links, In: IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 15, no. 1, 1997, 16 – 27
- [CCIR88] CCIR: Satellite communications: Fixed satellite service, Ženeva: ITU, 1988, 628 s.
- [Chit94] CHITRE, M., D., GOKHALE, D., S., HENDERSON, J. et al: Asynchronous Transfer Mode (ATM) Operation via Satellite: Issues, Challenges and Resolutions, In: International Journal of Satellite Communications, vol. 12, 1994, s. 211 – 222
- [Chu99] CHU, V., Y., Y., SWEENEY, P.: Channel Modelling and Error Control Strategies for the LEO Satellite Channel, In: International Symposium on Communications Theory and Applications (ISCTA), Ambleside: 1999, 3 s.

- [Cizm00] ČIŽMÁR, A., LEVICKÝ, D. et al.: Mobilné a satelitné technológie, In: Multimediálne telekomunikačné technológie, Bratislava: STU, 2000, s. 269-352
- [Cizm99] ČIŽMÁR, A., DOBOŠ, L., PALITEFKA, R.: Mobilné ATM siete, Košice: Elfa, 1999, 167 s., ISBN 80-88964-08-3
- [Comp99] COMPASSROSE INTERNATIONAL: Introduction to Global Satellite Systems, 1999, [http://www.compassroseintl.com/pubs/Intro\\_to\\_sats.html](http://www.compassroseintl.com/pubs/Intro_to_sats.html)
- [Cora94] CORAZZA, G., E., VATALARO, F.: A Statistical Model for Land Mobile Satellite Channels and Its Application to Nongeostationary Orbit Systems, In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 43, no. 3, 1994, s. 738 - 742
- [Desi02] DESIKAN, T.: Wireless ATM over a burst error channel, EE359 Class Project, 2002, 18 s.
- [Evan99] EVANS, B., G.: Satellite communication systems. 3<sup>rd</sup> edition, Londýn: The Institution of Electrical Engineers, 1999, 727 s., ISBN 0-85296-899-X
- [Ever92] EVERETT, J.: VSAT: Very small aperture terminals, Short Run Press: Londýn, 1992, 560 s., ISBN 0-86341-200-9
- [Fahm95] FAHMY, S., JAIN, R., LU, F., KALYANARAMAN, S.: A Survey of congestion control Techniques and Data Link Protocols in Satellite Networks, In: International Journal of Satellite Communications, 1995, 31 s.
- [Fall96] FALL, K., FLOYD, S.: Simulation-based Comparisons of Tahoe, Reno, and SACK TCP, In: Computer Communication Review, vol. 26, no. 3, 1996, s. 5 - 21, <http://www.icir.org/floyd/papers/sacks.pdf>
- [Fars02] FARSEROTU, J., PRASAD, R.: IP/ATM Mobile Satellite Networks, Londýn: Artech House, 2002, 274 s., ISBN 1-58053-112-1
- [Fieb03] FIEBIG, U., C., CASTANET, L., LEMORTON, J. et al.: Review of propagation channel modeling In: International workshop of COST actions 272 and 280 – Satellite Communications – From fade mitigation to service provision, Noordwijk, 2003, s. 153 - 164
- [Gagl91] GAGLIARDI, M., R.: Satellite communications, 2<sup>nd</sup> edition, New York: Van Nostrand Reinhold, 1991, 584 s., ISBN 0-442-22745-0
- [Gilb65] GILBERT, E., N.: Energy Reception for Mobile Radio, In: Bell Systems Technical Journal, vol. 44, 1965, s. 1779 - 1803
- [Gild97] GILDERSON, J., CHERKAOUI, J.: Onboard switching for ATM via satellite, In: IEEE Communications Magazine, vol. 35, no. 7, 1997, s. 66 – 70

- [Gold93] GOLDBIRSCH, J., VOGEL, W., J.: Earth-satellite tree attenuation at 20 GHz: foliage effects, In: Electronics Letters, vol. 29, no. 18, 1993, s. 1640 - 1641
- [Hass00] HASSAN, M., ATIQUAZZAMAN, M.: Performance of TCP/IP over ATM networks, Londýn: Artech House, 2000, 236 s., ISBN 1-58053-037-0
- [Heck03] HEČKO, M.: Wi-Fi už nie je len vízia, In: PC Revue, vol. 10, 2003, s. 24 – 25
- [Hwan97] HWANG, S., H., KIM, K., J., AHN, J., Y., WHANG, K., C.: A Channel Model for Nongeostationary Orbiting Satellite System, In: Proc. IEEE Vehicular Technology Conf., 1997, s. 41 - 45
- [Imri97] IMRIŠKA, D.: Multimédiá na báze satelitnej technológie. Interaktívne služby a spätný kanál, Bratislava: FEI STU, Diplomová práca, 1997, 71 s.
- [Itu00] ITU-T I.363.2 : B-ISDN ATM Adaptation Layer (AAL) type 2 specification, 2000, 56 s.
- [Kana78] KANAL, L., SASTRY, A., R., K.: Models for channels with memory and their applications to error control, In: IEEE Proceedings, vol. 66, no. 8, 1978, s. 724 - 744
- [Kana96] KANATAS, G., CONSTANTINOU, P.: Narrow-band characterization of the land mobile satellite channel: a comparison of the empirical models, In: European Transactions on Telecommunications, vol. 7, no. 4, 1996, s. 315 - 321
- [Kara99] KARALIOPOULOS, M., S., PAVLIDOU, F., N.: Modelling the land mobile satellite channel: A review, In: Electronics & Communication Engineering Journal, vol. 11, no. 5, 1999, s. 235 - 248
- [Kosu01] KOŠÚT, P.: Analýza priepustností adaptívnych Go-Back-N schém, Bratislava: FEI STU, 2001, 116 s., Doktorská dizertačná práca
- [Kota97] KOTA, S., GOYAL, R., JAIN, J.: Satellite ATM Network architectural considerations and TCP/IP performance, In: Proceedings of the 3rd Ka Band Utilization Conference, Sorrento, 1997, s. 481 - 488
- [Kuku97] KUKURA, P.: ISDN, B-ISDN, ATM: Digitálne siete s integrovanými službami, Faber, Bratislava, 1997, 185 s., ISBN 80-967503-3-X
- [Kyas95] KYAS, O.: ATM networks, Thomson Computer Press, Londýn, 1995, 372 s. ISBN 1-85032-128-0
- [Laks97] LAKSHMAN, T., V., MADHOW, U.: The Performance of {TCP/IP} for networks with high Bandwidth-delay Products and Random Loss, In: IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 5, no. 3, 1997, s. 336 – 350



- [Lemm02] LEMMON, J., J.: Wireless link statistical bit error model, In: NTIA Report 02-394, 2002, <http://www.its.bldrdoc.gov/pub/ntia-rpt/02-394/>
- [Lim96] LIM, H., S., AHN, M., D., KIM, Y., D.: Impact of cell unit interleaving on header error control performance in wireless ATM, In: Proceedings of IEEE Globecom'96, 1996, s. 1705 - 1709
- [Lim98] LIM, H., S., AHN, M., D., KIM, Y., D.: Cell domain interleaving method for wireless ATM links, In: Electronics letters, vol. 34, no. 7, 1998, s. 627 - 628
- [Loo85] LOO, C.: A Statistical Model for a Land Mobile Satellite Link, In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 34, no. 3, 1985, s. 122 - 127
- [Lutz91] LUTZ, E., CYGAN, D., DIPPOLD, M. et al.: The Land Mobile Satellite Communication Channel – Recordings, Statistics and Channel Model, In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-40, no. 2, 1991, s. 375-386
- [Mali97] MALINA, D., PODHRADSKÝ, P.: Služby B-ISDN na báze ATM, TEMPUS TELECOMNET 3rd International Workshop, Košice, 1997, s. 26 - 31
- [Mali98] MALINA, D.: ARQ metódy riadenia zabezpečenia prenosu dát, Bratislava: FEI STU, 1998, 40 s., Rigorózna práca
- [Mara94] MARAL, G., BOUSQUET, M.: Satellite communication systems, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, 1994, 688 s., ISBN 3-519-06445-6
- [Ossa64] OSSANNA, J., F.: A Model for Mobile Radio Fading due to Building Reflections: Theoretical and Experimental Waveform Power Spectra, In: Bell Systems Technical Journal, vol. 43, 1964, s. 2935 – 2971
- [Patz98] PÄTZOLD, M., KILLAT, U., LAUE, F., LI, Y.: On the Statistical Properties of Deterministic Simulation Models for Mobile Fading Channels, In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 47, no. 1, 1998, s. 254 - 269
- [Penn95] PENNONI, G., ZANOTTI, G., GIAMBENE, G.: Satellite system architecture In: COST 227 Final Report – Integrated Space/Terrestrial Mobile Networks, 1995, s. 6 - 29, <http://www.estec.esa.nl/xewww/cost227/cost227.htm>
- [Pole99] POLEC, J., KARLUBÍKOVÁ, T.: Stochastické modely v telekomunikáciách I., Bratislava: Fond Jozefa Murgaša pre telekomunikácie n.f., 1999, 128 s., ISBN 80-968125-0-5
- [Re02] RE, D., E., PIERUCCI, L.: Next-generation mobile satellite networks, In: IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 9, 2002, s. 150 – 159
- [Rfc00] RFC 2760: Ongoing TCP research related to satellite, 2000, 46 s.

- [Rfc81] RFC 793: Transmission control protocol – Darpa internet program protocol specification, 1981, 85 s.
- [Rfc97] RFC 2001: TCP Slow Start, Congestion Avoidance, Fast retransmit and Fast Recovery Algorithms, 1997, 6 s.
- [Rfc99] RFC 2488: Enhancing TCP over Satellite Channels using Standard Mechanisms, 1999, 19 s.
- [Rich95] RICHHARIA, M.: Satellite communications systems: Design Principles, Londýn: The Macmillan Press LTD, 1995, 404 s., ISBN 0-07-052374-6
- [Siu94] SIU, K., Y., JAIN, R.: A Brief Overview of ATM: Protocol Layers, LAN Emulation and Traffic Management, In: ACM SIGCOMM, vol. 25, no. 2, 1994, s. 69 - 79
- [Slac96] SLACK, S., J.: Finite state Markov models for error bursts on the land mobile satellite channel, Brigham Young University: 1996, 144 s., diplomová práca, <http://www.ee.byu.edu/downloads/mdr/downloads/misc/SlackThesis.pdf>
- [Stal98] STALLINGS, W.: High-Speed networks – TCP/IP and ATM design principles, Prentice Hall, New Jersey, 1998, 576 s., ISBN 0-13-525965-7
- [Stev96] STEVENS, R., W.: TCP/IP illustrated - Volume 1: The protocols, Addison-Wesley Longman, Reading Massachusetts, 1996, 576 s., ISBN 0-201-63346-9
- [Swee02] SWEENEY, P.: Error control coding – From theory to practice, Chichester: John Wiley & Sons, 2002, 242 s., ISBN 0-470-84356-X
- [Suzu77] SUZUKI, H.: A Statistical Model for Urban Radio Propagation, In: IEEE Transactions On Communications, vol. 25, no. 7, 1977, s. 673 – 680
- [Tane96] TANENBAUM, S., A.: Computer networks, 3<sup>rd</sup> ed., Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1996, 813 s., ISBN 0-13-349945-6
- [Tao00] TAO, T., LU, J., GONG, K., GU, J.: A Four-States Markov Model for Burst Error Analysis in Satellite Communications, In: International Conference on Communication Technologies, Beijing: 2000, 5 s.
- [Toh98] TOH, C., K., LI, V., O., V.: Satellite ATM network architectures: An overview, In: IEEE Networks, vol. 12, no. 5, 1998, s. 61 – 71
- [Toh99] TOH, C., K., SHIH, C., H., VASSILIOU, V., DELWAY, M.: Emerging and Future Research Issues for Mobile ATM Networks, In: Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 1999, s. 363 – 367
- [Truc97] TRÚCHLY, P., PODHRADSKÝ, P.: Analysis of some WAN Protocols, TEMPUS TELECOMNET 3rd International Workshop, Košice, 1997, s. 22 - 25

- [Trun97] TRUNKVALTER, M. et al.: Družicové systémy, Žilina: Žilinská univerzita, 1997
- [Vata95] VATALARO, F.: Generalised Rice-lognormal Channel for Wireless Communications, In: Electronics Letters, vol. 31, no. 22, 1995, s. 1899 - 1900
- [Vuce92] VUCETIC, B., DU, J.: Channel Modeling and Simulation in Satellite Mobile Communication Systems, In: IEEE Journal in Selected Areas in Communications, vol. 10, no. 8, 1992, s. 1209 - 1218
- [Waka97] WAKANA, H.: Propagation Model for Simulating Shadowing and Multipath Fading in Land Mobile Satellite Channel, In: Electronics Letters, no. 33, vol. 23, 1997, s. 1925 - 1926
- [Yang92] YANG, W., W., O., XIAO-XIONG, Y., MURTHY, K., M., S.: Modeling and performance analysis of File Transfer in a Satellite Wide Area Network, In: IEEE Journal on Selected Area in Communications, vol. 10, no. 2, 1992
- [Yeo03] YEO, E., NIKOLIC, B., ANANTHARAM, V.: Iterative decoder architectures, In: IEEE Communications Magazine, vol. 41, no. 8, 2003, s. 132 – 140
- [Zorz99] ZORZI, M., RAO, R., R.: On the impact of burst errors on wireless ATM, In: IEEE Personal Communications, vol. 6, no. 4, 1999, s. 65 - 76

### **Pôvodné publikácie autora**

- [1] TRÚCHLY, P.: Performance of header error check algorithm in non-interleaved and interleaved wireless ATM systems, In: Proceedings of International Conference - Research in Telecommunication Technology, Častá – Píla, Slovak Republic, 2003, s.153 - 156
- [2] TRÚCHLY, P.: Performance of interleaving methods in wireless ATM systems, In: Proceedings of 26th International Conference – Telecommunications and Signal Processing TSP-2003, Brno, Czech Republic, 2003, s. 16 - 19
- [3] TRÚCHLY, P.: Modely kanálov bezdrôtových sietí, In: 9. medzinárodná vedecká konferencia Cofax-Telekomunikácie, Bratislava, 2003, s. 293 - 294
- [4] TRÚCHLY, P.: Internet cez ATM, In: 8. medzinárodná vedecká konferencia Cofax-Telekomunikácie, Bratislava, 2002
- [5] TRÚCHLY, P., SEDLÁR, M.: Simulation of GEO satellite on LAN, VIPromCom-2002, 4th EURASIP-IEEE Region 8 International Symposium on Video/Image Processing and Multimedia Communications, Zadar, Croatia, 2002, s. 383 - 386

- [6] TRÚCHLY, P., PODHRADSKÝ, P.: The Performance of ATM Traffic Management and Error Control Techniques over Satellite Links; Survey, Journal of Electrical Engineering, no. 5-6, vol. 50, 1999, s. 151 - 160
- [7] TRÚCHLY, P., MALINA, D.: Evolution of TCP, In: Telekomunikácie'99, Bratislava, Slovakia, 1999, s. 213 - 215.
- [8] MALINA, D., TRÚCHLY, P.: ARQ stratégie, In: Telekomunikácie'99, Bratislava, 1999, s. 211 - 212
- [9] TRÚCHLY, P., MALINA, D.: Error control of ATM in satellite environment, In: I. Seminár elektroniky a telekomunikačnej techniky, Ostrava, Czech Republic, 1998, s. 75 - 78.
- [10] MALINA, D., TRÚCHLY, P.: Modifikované a kombinované ARQ metódy, In: I. Seminár elektroniky a telekomunikačnej techniky, Ostrava, Česká Republika, 1998, s. 92 - 94
- [11] TRÚCHLY, P., PODHRADSKÝ, P.: Application of ATM in the satellite communications, In: 4th International TEMPUS TELECOMNET Workshop – ITTW'98, Barcelona, Spain, 1998, s. 63 - 67.
- [12] TRÚCHLY, P., PODHRADSKÝ, P.: Analysis of protocols in satellite communications, In: ELMAR 40<sup>th</sup> International Symposium, Zadar, Croatia, 1998, s. 119 - 123.
- [13] TRÚCHLY, P., PODHRADSKÝ, P.: Analysis of some WAN protocols, In: 3. Medzinárodná konferencia TEMPUS TELECOMNET, Košice, 1997, s. 22 - 25
- [14] TRÚCHLY, P., et al.: Multimediálne telekomunikačné technológie, Bratislava: STU and FABER, 2000, 378 s., ISBN 80-227-1483-6
- [15] TRÚCHLY, P., et al.: Telekomunikačné služby, Bratislava: STU and FABER, 2001, 242 s., ISBN 80-227-1536-0

## **PRÍLOHA A**

**Analytické vyjadrenie pravdepodobností  ${}^{(x)}\Psi_{ij}^{(1)}(l,k)$  pre jednotlivé typy subbuniek ostatných ATM buniek pre metódu rozšíreného prekladania a hĺbku prekladania  $d = 4$  bunky**



**Druhá bunka:**Subbunka typ I

$${}^{(2- I)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k) = {}^{(1- I)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k)$$

platí to aj pre poslednú subbunku.

Subbunka typ II

$$\begin{aligned} {}^{(2- II)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k) &= \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}(k - k_1, L) \cdot {}^{(2- II)}\Theta_{mj}(l, k_1) \\ {}^{(2- II)}\Theta_{ij}(l, k) &= \sum_{m=0}^1 \varnothing_{im}(l, 1) \cdot {}^{(2- II)}\Theta_{mj}^{(3)}(k) \\ {}^{(2- II)}\Theta_{ij}^{(n)}(k) &= \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}^*(k - k_1, L) \cdot {}^{(2- II)}\Theta_{mj}^{(n-1)}(k_1) \\ {}^{(2- II)}\Theta_{ij}^{(1)}(k) &= \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}(k - k_1, L - 1) \cdot \varnothing_{mj}^{(2)}(k_1, 1) = \varnothing_{ij}^*(k, L) \end{aligned}$$

Subbunka typ III

$$\begin{aligned} {}^{(2- III)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k) &= \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}(k - k_1, L) \cdot {}^{(2- III)}\Theta_{mj}(l, k_1) \\ {}^{(2- III)}\Theta_{ij}(l, k) &= \sum_{m=0}^1 \varnothing_{im}(l, 1) \cdot \varnothing_{mj}^{**2}(k, 3) \\ \varnothing_{ij}^{**2}(k, 3) &= \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}(k - k_1, 2) \cdot \varnothing_{mj}^{(37)}(k_1, 1) \end{aligned}$$

Subbunka typ IV

$$\begin{aligned} {}^{(2- IV)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k) &= \sum_{m=0}^1 \varnothing_{im}^{(17)}(l, 1) \cdot {}^{(2- IV)}\Theta_{mj}^{(2)}(k) \\ {}^{(2- IV)}\Theta_{ij}^{(2)}(k) &= \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}(k - k_1, 2) \cdot {}^{(2- IV)}\Theta_{mj}^{(1)}(k_1) \\ {}^{(2- IV)}\Theta_{ij}^{(1)}(k) &= \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}^{(2)}(k - k_1, 1) \cdot \varnothing_{mj}^{**3}(k_1, L) \\ \varnothing_{ij}^{**3}(k, L) &= \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}(k - k_1, L - 1) \cdot \varnothing_{mj}^{(2)}(k_1, 1) \end{aligned}$$

## Tretia bunka

### Subbunka typ I

$$\begin{aligned} {}^{(3-I)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k) &= \varnothing_{ij}^{(40)}(l, 1) && \text{ak nasledujúca subbunka je typu I} \\ {}^{(3-I)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k) &= \varnothing_{ij}^{(34)}(l, 1) && \text{ak nasledujúca subbunka je typu IV} \\ {}^{(3-I)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k) &= \varnothing_{ij}^{(136)}(l, 1) && \text{ak táto subbunka je posledná} \end{aligned}$$

### Subbunka typ II

$$\begin{aligned} {}^{(3-II)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k) &= \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k {}^{(3-II)}\Theta_{im}^*(k - k_1) \cdot {}^{(3-II)}\Theta_{mj}(l, k_1) \\ {}^{(3-II)}\Theta_{ij}^*(k) &= \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}^*(k - k_1, L) \cdot \varnothing_{mj}(k_1, L) \\ {}^{(3-II)}\Theta_{ij}(k) &= \sum_{m=0}^1 \varnothing_{im}(l, 1) \cdot {}^{(3-II)}\Theta_{mj}^{(2)}(k) \\ {}^{(3-II)}\Theta_{ij}^{(2)}(k) &= \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}^*(k - k_1, L) \cdot {}^{(3-II)}\Theta_{mj}^{(1)}(k_1) \\ {}^{(3-II)}\Theta_{ij}^{(1)}(k) &= \varnothing_{ij}^*(k, L) && \text{ak nasledujúca subbunka je typ II} \\ {}^{(3-II)}\Theta_{ij}^{(1)}(k) &= \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}(k - k_1, L - 1) \cdot \varnothing_{mj}^{(21)}(k_1, 1) && \text{ak nasl. sub. je typ I} \end{aligned}$$

### Subbunka typ III

- tento typ subbunky sa v tretej bunke nevyskytne

### Subbunka typ IV

$$\begin{aligned} {}^{(3-IV)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k) &= \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}(k - k_1, 6) \cdot {}^{(3-IV)}\Theta_{mj}(l, k_1) \\ {}^{(3-IV)}\Theta_{ij}(k) &= \sum_{m=0}^1 \varnothing_{im}(l, 1) \cdot {}^{(3-IV)}\Theta_{mj}^{(2)}(k) \\ {}^{(3-IV)}\Theta_{ij}^{(2)}(k) &= \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}^*(k - k_1, L) \cdot \varnothing_{mj}^*(k_1, L) \end{aligned}$$



**Štvrtá bunka**Subbunka typ I

$${}^{(4-1)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k) = \varnothing_{ij}^{(40)}(l, 1) \quad \text{ak nasledujúca subbunka je typu I}$$

$${}^{(4-1)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k) = \varnothing_{ij}^{(11)}(l, 1) \quad \text{ak nasledujúca subbunka je typu II}$$

Subbunka typ II

$${}^{(4-II)}\Psi_{ij}^{(1)}(l, k) = \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k {}^{(4-II)}\Theta_{im}^{**}(k - k_1) \cdot {}^{(4-II)}\Theta_{mj}^{(2)}(l, k_1)$$

$${}^{(4-II)}\Theta_{ij}^{**}(k) = \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}^*(k - k_1, L) \cdot {}^{(4-II)}\Theta_{mj}^*(k_1)$$

$${}^{(4-II)}\Theta_{ij}^*(k) = {}^{(3-II)}\Theta_{ij}^*(k)$$

$${}^{(4-II)}\Theta_{ij}^{(2)}(l, k) = \sum_{m=0}^1 \varnothing_{im}(l, 1) \cdot {}^{(4-II)}\Theta_{mj}^{(1)}(k)$$

$${}^{(4-II)}\Theta_{ij}^{(1)}(k) = \varnothing_{ij}^*(k, L) \quad \text{ak nasledujúca subbunka je typ II}$$

$${}^{(4-II)}\Theta_{ij}^{(1)}(k) = \sum_{m=0}^1 \sum_{k_1=0}^k \varnothing_{im}(k - k_1, 104) \cdot \varnothing_{mj}^{(31)}(k_1, 1) \quad \text{ak táto sub. je posledná}$$

Subbunka typ III

- tento typ subbunky sa v štvrtej bunke nevyskytne

Subbunka typ IV

- tento typ subbunky sa v štvrtej bunke nevyskytne

Pravdepodobnosť  $\varnothing_{ij}^*(k, L)$ , vyskytujúca sa v hore uvedených vzťahoch, je daná vzťahom (4.63).

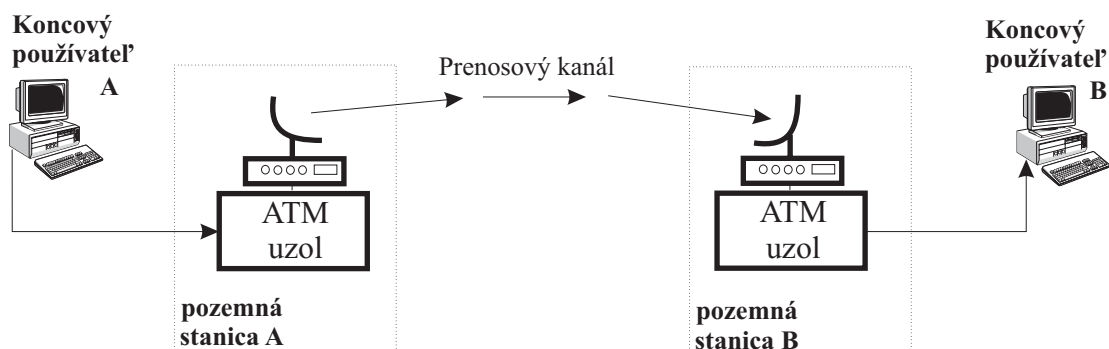


## **PRÍLOHA B**

**Stručná charakteristika simulačného prostredia a simulovanej architektúry**



Architektúra simulovanej siete je nasledovná:



Architektúra je založená na jednosmernej komunikácii medzi koncovými používateľmi A a B cez jedno vytvorené ATM spojenie. Pozemná stanica A vykonáva na úrovni fyzickej vrstvy požadovanú metódu prekladania ATM buniek. Pozemná stanica B vykonáva spätné preloženie ATM buniek. ATM uzol v pozemnej stanici B vykonáva nastavený mód HEC algoritmu, ale nevykonáva funkciu určovania hraníc buniek. Prenosový kanál medzi pozemnými stanicami reprezentuje bezdrôtový kanál, ktorý je modelovaný dvojstavovým Markovovským modelom nastaveným na príslušnú hodnotu chybovosti a priemernej dĺžky zhluku bitových chýb. Predpokladá sa, že cyklický kód v hlavičke každej bunky, dokáže detekovať akúkoľvek kombináciu bitových chýb v hlavičke.