

# Karakteristike zaštitnog kodovanja (FEC) u OTN/DWDM platformi OTP10G IRITEL

Predrag Mićović, Bojan Pajčin, Vladimir Kostić,  
Miroslav Ilić  
Sektor za optičke sisteme prenosa  
IRITEL A.D.  
Beograd, Srbija  
[micovic@iritel.com](mailto:micovic@iritel.com), [bojan@iritel.com](mailto:bojan@iritel.com), [kosicv@iritel.com](mailto:kosicv@iritel.com),  
[miroslav@iritel.com](mailto:miroslav@iritel.com)

Predrag Ivaniš  
Katedra za telekomunikacije  
Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu  
Beograd, Srbija  
[predrag.ivanis@etf.rs](mailto:predrag.ivanis@etf.rs)

*Sadržaj*—*Forward error correction* (FEC) je nezaobilazni aspekt u optičkom prenosu, posebno kada se koriste WDM tehnike multipleksiranja. Kodni dobitak FEC-a je važan parametar pri određivanju maksimalne dužine trase prenosa optičkog signala pre njegove regeneracije, tj. optičko-električne konverzije. OTP10G predstavlja optičku transportnu platformu koja podržava mapiranje i multipleksiranje svih tipova korisničkih signala (TDM, CBR, paketski saobraćaj) u jedinstveni linijski signal osnovnog protoka 10 Gbit/s (OTN G.709) za prenos po optičkim vlaknima. U OTP10G platformi su implementirana tri FEC mehanizma. Opisaćemo ova tri FEC mehanizma, merićemo njihove performanse i predstaviti rezultate i metode merenja kao i telekomunikacionu opremu i uređaje koji su korišćeni.

*Ključne reči*—FEC, kodni dobitak, OTN, OTP10G

## I. UVOD

Optički sistemi prenosa predstavljaju okosnicu telekomunikacionih mreža u kojima se zahtevaju visoki kvalitet i pouzdanost prenosa na velike distance. SDH mreže su prvobitno dizajnirane za optičke interfejse koji koriste jednu talasnu dužinu za prenos po jednom optičkom vlaknu. S razvojem i napretkom tehnologija za izradu optičkih komponenti postalo je ekonomičnije vršiti prenos više SDH signala multipleksiranih po talasnim dužinama preko jednog vlakna nego povećavati brzinu prenosa signala po jednom vlaknu. Na osnovu iskustva iz razvoja i eksploatacije SDH mreža, ITU-T je definisao transportnu mrežu koja je optimizovana za ekonomski efikasan transparentni prenos različitih klijentskih signala preko WDM (*Wavelength Division Multiplex*) infrastrukture. ITU-T je razvio niz standarda koji definišu talasne dužine i formate signala u svrhu bolje podrške multipleksiranju znatnog broja signala za prenos po jednom optičkom vlaknu. Optička transportna mreža (*Optical Transport Network* - OTN) je specificirana ITU-T G.872 preporukom, dok su struktura frejma, mapiranje i multipleksiranje signala za prenos SONET/SDH, Ethernet i SAN (*Storage Area Network*) definisani u ITU-T G.709 preporuci [1].

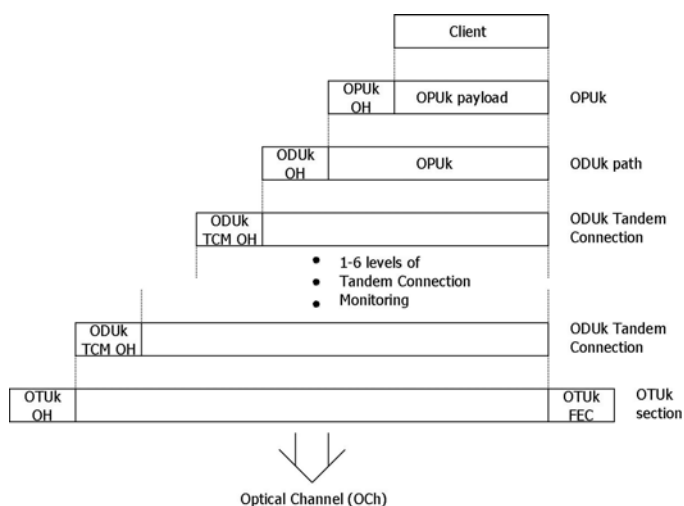
Drugi razlog za razvijanje novog standarda je bila potreba da se obezbedi snažniji mehanizam za ispravljanje grešaka u napred (FEC). U početku je primena OTN-a u *point-to-point* linkovima, uz poboljšani i standardizovani FEC, trebalo da rezultuje povećanjem dužine optičkog vlakna između dva čvora, većim brzinama prenosa preko optičkog vlakna ili oboje. Danas OTN se ne posmatra samo kao *point-to-point* tehnologija već i kao potpuno novi mrežni sloj za tranziciju transportnih mreža sa SDH i kao tehnologija za realizaciju “*video-ready*” optičkih metro mreža za pružanje servisa koji zahtevaju veliki propusni opseg korisnicima preko širokopojasne pristupne mreže. Ova transportna tehnologija omogućava transparentan prenos preko skalabilne i ekonomski optimizovane mreže gde su klijentski signali, video i Ethernet, mapirani u OTN na ulazu u transportnu mrežu. U ovakvom modelu SDH predstavlja još jedan klijentski signal.

Razlozi za migraciju na WDM transportne mreže zasnovane na ITU-T OTN standardima, koje postaju sve značajnije, su:

- OTN transportna tehnologija je znatno manje kompleksnosti u odnosu na SDH/SONET.
- Zaglavlje OTN paketa je optimizovano za prenos preko WDM mreže.
- Kombinacija smanjene kompleksnosti tehnologije i optimizovanog zaglavlja dovodi do značajne redukcije operativnih troškova transportne mreže.
- Granularnost OTN multipleksiranja je za jedan ili dva reda veličine veća u odnosu na SDH, čineći OTN skalabilnijim na većim brzinama prenosa.
- OTN sada pruža novčano efikasniji metod za prenos *high-speed wide area network* (WAN) klijentskih signala, uključujući i Ethernet i SAN.
- OTN obezbeđuje integrisani mehanizam za FEC što omogućava veću prostornu udaljenost između optičkih čvorova i/ili veće brzine prenosa po istom vlaknu.
- Klijentski signali se mogu preneti kroz OTN mrežu potpuno transparentno. Ova transparentnost se odnosi i na izvorni SDH signal za “*carrier’s carrier*” [2] primene gde je neophodno da kompletno zaglavlje

kljentskog SDH signala ostane očuvano, tj. nepromenjeno pri prenosu kroz OTN.

Struktura OTN frejma je prikazana na Sl. 1. Sa slike se mogu videti u kojim vezama su sadržaj i zaglavlja kljentskih, OPU, ODU i OTU slojeva. Ono što je važno zapaziti na Sl. 1 je da se FEC dodaje frejmu na OTU nivou, što je poslednji korak pre optičkog prenosa signala. Veličina OTU frejma je 4x4080 bajtova (logički prikaz: 4080 kolona u četiri reda [2]). OPU, ODU i OTU određene brzine prenosa se označavaju sa OPU<sub>k</sub>, ODU<sub>k</sub> i OTU<sub>k</sub>, gde je k=0, 1, 2, 3 ili 4. Odgovarajuće brzine prenosa pomenutih signala su date u tabeli I [1].



Slika 1: Struktura OTN frejma

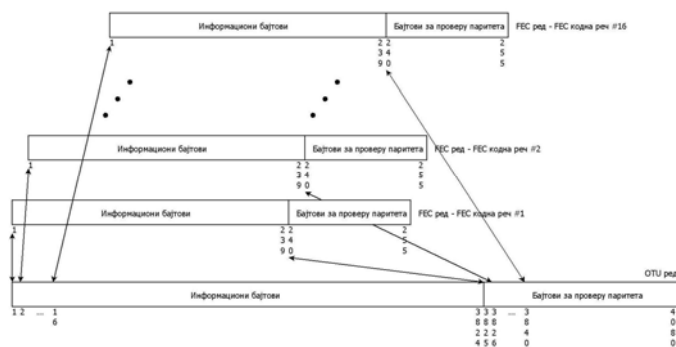
Tabela I: Bitski protoci OTN signala

k	OTU <sub>k</sub>	ODU <sub>k</sub>	Perioda frejma OTU <sub>k</sub> /ODU <sub>k</sub>
0	/	1 238 954 kbit/s	98.354 μs
1	2 666 057 kbit/s	2 488 320 kbit/s	48.971 μs
2	10 709 225 kbit/s	9 995 277 kbit/s	12.191 μs
3	43 018 414 kbit/s	40 150 519 kbit/s	3.035 μs
4	111 809 974 kbit/s	104 355 975 kbit/s	1.168 μs

## II. FEC u OTN-U

U [1] je specificiran FEC koji se koristi u OTN-u. Za formiranje FEC kodnih reči u OTU<sub>k</sub> se koristi Rid-Solomonov RS(255,239) kod. U pitanju je nebinarni kod, pošto FEC algoritam svoje operacije vrši nad bajtovima, a ne nad bitovima i pripada porodici sistematskih cikličnih kodova [3].

Za FEC procesiranje informacija potrebno je redove OTU paketa podeliti u 16 podredova primenom interlivinga na nivou bajta prikazanog na Sl. 2. Svaki FEC koder/dekoder obrađuje jedan od ovih podredova, tj. bajtove od 1 do 239 jednog podreda. Potom se sračunati FEC bajtovi za proveru parnosti dodaju na kraj podreda (bajtovi od 240 do 255). Ovako formirani podredove čine OTU red sa FEC bajtovima za proveru parnosti kao što je prikazano na slici 2.



Slika 2: Formiranje OTU frejma sa FEC simbolima za proveru parnosti

Pošto su Rid-Solomonovi kodovi spadaju u klasu MDS (*Maximum Distance Separable*) kodova, njihovo minimalno Hemingovo rastojanje uvek iznosi  $d_{\min}=n-k$ , pri čemu je sa  $n$  označena dužina kodne reči a sa  $k$  dužina informacione reči. Hemingovo rastojanje RS(255,239) koda je  $d_{\min}=17$  pa ovaj kod može da ispravi do 8 pogrešno prenetih simbola kada se FEC kodna reč koristi za ispravljanje grešaka. Moguće je otkriti do 16 simbolskih grešaka kada se FEC kodna reč koristi samo za detekciju. Generišući polinom koda RS(255,239) dat je u [1], dok su opšte osobine Rid-Solomonovih kodova opisane u [3].

U OTP10G IRITEL platformi su implementirana još dva FEC mehanizma: G.975.1 I.4 FEC i G.975.1 I.7 FEC. U ITU preporuci [4] opisan je FEC postupak G.975.1 I.4, nazvan RS(1023,1007)/BCH(2047,1952) super FEC kod. U ovom slučaju se ODU *payload* sastoji od ukupno  $4 \cdot 16 \cdot 239 \cdot 8 = 122368$  bitova a on se potom deli na 16 grupa od kojih se 15 koduje RS(781, 765) kodom a jedna RS(778, 762) kodom. Ovi kodovi su dobijeni skraćivanjem osnovnog RS(1023, 1007) koda koji svoje operacije obavlja nad poljem Galoa GF(2<sup>10</sup>) [3]. Dakle, 10 bitova svake grupe formira jedan dektet. Operacije nad dektetima su slične operacijama nad bajtovima opisanim u prethodnom FEC mehanizmu, odnosno od 765 dekteta se formira 16 dekteta za proveru parnosti. Treba zapaziti da je  $122368 - 15 \cdot 10 \cdot 765 = 7618$ . Zbog ovoga se poslednjoj grupi dodaju dva bita logičke vrednosti 0, koji ne služe za prenos informacije, već se pomoću njih dopunjava informaciona reč RS(778, 762) koda. Ukupan broj ODU informacionih bita i bita za proveru parnosti je  $122368 + 16 \cdot 160 = 124928$ , oni se zatim grupišu u 64 informacione reči koje se dovode na ulaz BCH(2047,1952) kodera, što za rezultat ima dodavanje po 88 bita za proveru parnosti u svakoj kodnoj reči. Ovako se dobija OTU frejm ( $124928 + 64 \cdot 88 = 130560$  bitova) koji se šalju na optičku liniju prenosa. Više detalja o G.975.1 I.4 FEC mehanizmu se može naći u [4].

G.975.1 I.7 FEC šema formira OTU frejm od 130560 bita korišćenjem primenom dva ortogonalno umetnuta (engl. *interleaved*) BCH koda. Generišuće polinome ova dva BCH koda i više detalja o ovoj FEC šemi je dato u [4].

### III. METODE MERENJA

Rezultati merenja u mnogome mogu zavisiti od resursa i karakteristika uređaja koji su korišćeni pri merenju. Važno je poznavati snage predajnika i osetljivosti prijemnika koji će se koristiti. Potom je bitno znati karakteristike i slabljenja optičkih filtara u multiplekserima i demultiplekserima na onim talasnim dužinama na kojima rade primopredajnici DWDM sistema. Na kraju je data blok šema povezivanja opisanih uređaja korišćenih pri merenju. Takođe je dat i opis postupaka pri merenju, a navedeni su i uslovi koji su morali biti ispoštovani pri merenju rezultata.

#### 1) IRITEL OTP10G uređaj:

a) *OT10G-2 jedinica*: OT10G-2 je multiservisna transponderska i muksponderska jedinica OTR10G sistema. Jedinica obezbeđuje linijske i klijentske interfejsne različitih brzina i protokola. Podržani protokoli na svim interfejsima su OTN, SDH, Ethernet, SAN, video i bit transparentni protokoli [5]. Protokoli i brzine interfejsa su softverski konfigurabilni. Za potrebe formiranja DWDM multipleksiranog signala korišćene su 4 jedinice u jednom OTP10G uređaju. Na svakoj jedinici korišćena su 2 XFP 10G interfejsa koja su konfigurisana kao OTN OTU2 linijska interfejsa, i jedan ili više od 16 univerzalnih SFP klijentskih.

b) *pDWDM-8Cx*: Pasivna jedinica za multipleksiranje i demultipleksiranje osam optičkih signala iz C opsega (1530 nm – 1565 nm). Rastojanje između susednih optičkih komponenti 100 GHz [5]. Na jedinici izvedena je optička monitoring tačka za povezivanje OSA instrumenta. Raspored talasnih dužina koji se koristi u osmokanalnom sistemu prikazan je u tabeli II.

Tabela II: Oznake, talasne dužine i frekvencije korišćene u osmokanalnom DWDM multipleksu

Oznaka kanala	CH28	CH29	CH30	CH31
Talasna dužina [nm]	1554.94	1554.13	1553.33	1552.52
Frekvencija [THz]	192.8	192.9	193	193.1
Oznaka kanala	CH32	CH33	CH34	CH35
Talasna dužina [nm]	1551.72	1550.92	1550.12	1549.32
Frekvencija [THz]	193.2	193.3	193.4	193.4

2) *Optički primopredajnici*: Za optičke interfejsne brzine prenosa od 10Gb/s korišćeni su izmenljivi optički XFP moduli OI.D10G-L-CHx sa LC konektorima. Osnovne karakteristike ovih XFP modula su date u tabeli ispod, a detaljnija specifikacija primopredajnika se može naći u [5].

Tabela III: Karakteristike korišćenog XFP modula

Oznaka optičkog interfejsa	Bitska brzina [Gb/s]	Izlazna snaga predajnika	Osetljivost optičkog prijemnika	Premostivo rastojanje
OI.D10G-L-CHx	9.95-11.3	0÷4 dBm	-24 dBm	80 km

3) *OSA instrument i SDH/ETH/OTN Analyzer*: Kao izvor smetnji u DWDM kanalu korišćen je SDH/ETH/OTN Analyzer. O načinu generisanja šuma i njegovom ubacivanju u optički kanal će biti reči kasnije pri detaljnom opisu metode merenja i postavljanju okruženja za merenje. Za posmatranje

optičkog spektra DWDM multipleksiranog signala, kao i spektra pojedinih kanala, korišćen je *Optical Spectrum Analyzer* (OSA). Ovaj instrument je korišćen i za merenje optičke snage signala i merenje OSNR-a u pojedinim kanalima.

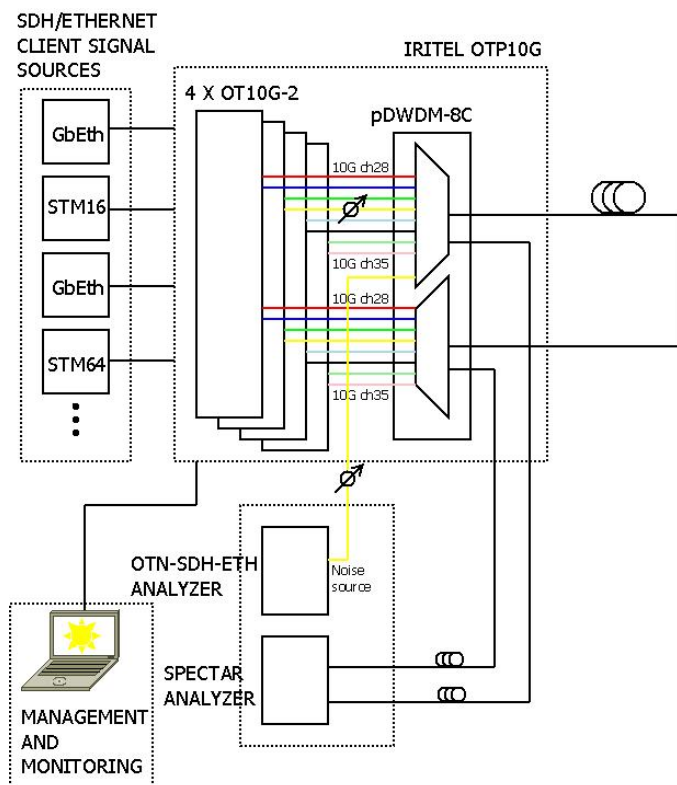
4) *Generatori i testeri klijentskog saobraćaja*: Ovi uređaji, osim kao generatori saobraćaja, su korišćeni za merenje BER-a. Klijentski saobraćaj se dovodi na neki od 16 klijentskih SFP interfejsa OT10G-2 jedinice, u kojoj se mapira u OUT2 frejmove. BER merenja su vršena nad SDH klijentskim saobraćajem. Uređaji koji su korišćeni kao generatori klijentskog SDH saobraćaja su pomenuti SDH/ETH/OTN Analyzer (STM64 klijentski signal) i Anritsu MP1590B Network Performanse Tester (STM16 klijentski signal).

5) *Optički atenuatori*: Koriste se za podešavanje snage belog šuma koji se ubacuje u multipleksirani kanal. Podešavanjem snage šuma direktno se podešava i OSNR kanala u kojem se vrši merenje, a samim tim i BER-a klijentskog signala na prijemu.

6) *Softver sistem „SUNCE+ modul za OTN“*: namenjen je upravljanju uređajima OTP10G, koji u ovom sistemu predstavljaju elemente mreže. Softver je koncipiran na osnovu ITU-T serije M.3000 preporuka kao NMS/EMS sistem [5]. Softverom je omogućeno upravljanje greškom, konfiguracijom, performansama i sigurnošću na OTP10G uređajima.

Metoda merenja se sastojala iz sledećih postupaka. Najpre se instrumenti, uređaji, telekomunikacione jedinice i atenuatori povežu tako da se napravi okruženje za merenje prikazano na Sl. 3. Potom se kroz softverski sistem „SUNCE+ modul za OTN“ pristupi OTP10G uređaju radi podešavanja konfiguracije OT10G-2 jedinica koje se nalaze u tom uređaju. Pomoću funkcionalnog i jednostavnog grafičko-korisničkog interfejsa ovog softvera lako se prepoznaju i odaberu željeni 10G interfejsi na jedinicama koji se žele koristiti. U softveru se podesi i koji tip klijentskog signala se dovodi na koji od 16 SFP portova jedinice, kao i mapiranje tih signala u linijske 10G interfejsne. Osam ovakvih 10G linijski interfejsa čini DWDM multipleksirani signal. Jedan od tih osam kanala se konstantno monitoriše (prati se nivo signala na prijemu, OSNR i BER). Taj kanal je konfigurisan tako da se u ODU2 frejm mapira STM16 klijentski signal. Nivo signala na predaji u kanalu koji se monitoriše se može menjati atenuatorom koji je povezan između lasera i DWDM multipleksa. U prenosni kanal se pomoću *SDH/ETH/OTN Analyzer*-a ubacuje uskopojasni šum i to na istoj centralnoj talasnoj dužini kao i DWDM kanal koji se posmatra. Između *SDH/ETH/OTN Analyzer*-a i DWDM multipleksa se takođe nalazi atenuator. Menjanjem slabljenja postojeća dva atenuatora direktno se podešava OSNR signala u ometanom kanalu, ali tako da se ne oslabi previše korisni signal. U svakom momentu merenja se prati nivo signala na prijemu kako se ne bi probio prag

prijema. Kada je snaga signala, bez obzira na OSNR, ispod praga osetljivosti fotodiode signal neće biti detektovan (kako je fizički nemoguće rekonstruisati informaciju kada je snaga signala ispod praga prijema, merenja performansi FEC kodova nisu merena pri ovakvim uslovima (pošto tada FEC nema svrhu)). Linijski 10G interfejs je u softveru namešten tako da najpre nije uključen ni jedan FEC mehanizam. Menjanjem OSNR-a menjamo i posmatramo BER na prijemu STM16 signala. Kada podesimo OSNR i očitamo BER sa STM16 instrumenta, u softveru uključimo prvi FEC mehanizam zaštite, i ne menjajući OSNR očitavamo BER sa STM16 instrumenta. Potom u softveru uključujemo druge FEC mehanizme i merimo BER za njih. Potom gasimo FEC, menjamo OSNR i ceo postupak ponavljamo.



Slika 3: Blok šema korišćenog sistema za merenje FEC karakteristika

#### IV. REZULTATI MERENJA

Vrednosti izmerenih verovatnoća grešaka za različite OSNR u slučajevima kada se ne koristi ni jedan FEC i kada se koriste implementirani FEC mehanizmi su dati u tabelama ispod.

Tabela IV: BER u funkciji OSNR-a kada se ne koristi FEC zaštitno kodovanje

OSNR [dB]	12.49	11.56	8.71	7.62
BER	2.80E-09	6.80E-06	3.40E-04	1.00E-03

Tabela V: BER u funkciji OSNR-a kada se koristi G.709 FEC

OSNR [dB]	8.74	7.46	7.27	7.14
BER	6.00E-10	4.50E-09	1.30E-04	6.00E-04

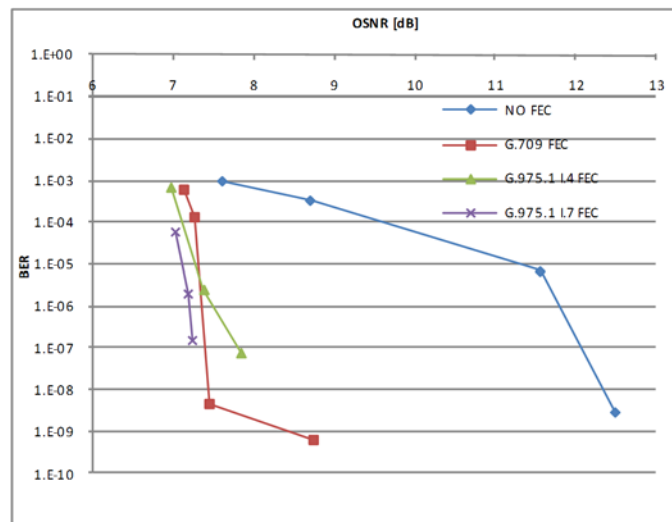
Tabela VI: BER u funkciji OSNR-a kada se koristi G.975.1 I.4 FEC

OSNR [dB]	7.84	7.38	6.97
BER	7.50E-08	2.50E-06	7.00E-04

Tabela VII: BER u funkciji OSNR-a kada se koristi G.975.1 I.7 FEC

OSNR [dB]	7.25	7.2	7.02
BER	1.50E-07	2.00E-06	5.60E-05

Na slici ispod su radi uporede analize prikazan dobijeni rezultati iz prethodnih tabela.



Slika 4: Grafički prikaz rezultata merenja verovatnoće greške implementiranih FEC mehanizama

#### V. ZAKLJUČAK

U [6] se za G.709 FEC navodi da je očekivani kodni dobitak od 4÷5 dB. Sa Sl. 4 se vidi da su merenjima dobijeni očekivani rezultati. Što se tiče G.975.1 I.4 i G.975.1 I.7 FEC mehanizama tu nisu dobijeni očekivani rezultati. Naime, u [4] se za ova dva mehanizma navodi da je kodni dobitak oko 6 dB za oba, a analizom rezultata merenja su dobijeni nešto slabiji rezultati. Za G.975.1 I.4 FEC je izmeren kodni dobitak od oko 4.5 dB, dok se G.975.1 I.7, kao što je i očekivano, pokazao bolje sa izmerenim kodnim dobitkom od oko 5 dB. Na osnovu ovih rezultata se zaključuje da su sva tri implementirana mehanizma sličnih osobina, a preporuka koji bi trebalo da se koristiti pri eksploataciji mreža se ne može doneti samo na osnovu kodnog dobitka FEC koda, pošto je kompleksnost obrade svakog od njih na prijemu drugačija. Tako je npr. G.975.1 I.7, koji ima najveći kodni dobitak, najkompleksniji od pomenuta tri mehanizma i njegovo korišćenje unosi veće kašnjenje pri propagaciji paketa u odnosu na ostala dva koda. Ali to nije predmet ovog rada.

Zaključak je da primena FEC zaštitnog kodovanja znatno poboljšava BER u prenosu signala preko optičkih kanala koji je pogođen šumovima, preslušavanjima, hromatskom i polarizacionom disperzijom. Ovo dovodi do povećanja dužine deonice preko koje se vrši prenos, a da se pri tom očuva zahtevani BER. Naravno, treba napomenuti da se povećanje dužine linka može postići samo do fizički mogućih granica,

odnosno sve dok slabljenje signala usled propagacije ne dovede snagu signala do praga osetljivosti fotodiode.

#### ZAHVALNICA

Rad je delimično finansiran sredstvima Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije, projekat TR32007 "Multiservisna optička transportna platforma OTN10/40/100 Gbps sa DWDM/ROADM and Carrier Ethernet funkcionalnostima".

#### LITERATURA

- [1] ITU-T Recommendation G.709/Y.1331, Interfaces for the optical transport network, February 2012.
- [2] Steve Gorshe, "A Tutorial on ITU-T G.709 Optical Transport Networks (OTN)", PMC-Sierra, Inc., Document No.: PMC-2081250, Issue 1, 2010.
- [3] D. Drajić, P. Ivaniš, "Uvod u teoriju informacija i kodovanje", *Akademska misao*, Beograd, 2009.
- [4] ITU-T Recommendation G.975.1, Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems, February 2004.
- [5] OTP10G – OTN/DWDM Optička transportna platforma, Tehnička dokumentacija, IRITEL, avgust 2012.

- [6] ITU-T Recommendation G.975, Forward error correction for submarine systems, October 2000.

#### ABSTRACT

Forward error correction (FEC) is an indispensable aspect of optical transport, especially when WDM multiplexing techniques are being used. The coding gain of the FEC code is an important parameter for determining the maximum span length of optical transmission without signal regeneration (optical-electrical conversion). OTP10G is an optical transport platform that supports mapping and multiplexing of all types of user signals (TDM, CBR, packet traffic) in a single 10 Gbit / s line rate (G.709 OTN) for transmission on optical fibers. The OTP10G platform implements three FEC mechanisms. We will describe these three FECs, we'll measure their performance and present the results and methods of measurement, and telecommunications equipment and devices that are used.

#### **CHARACTERISTICS OF ERROR CONTROL CODES (FEC) IN THE OTN/DWDM OTP10G IRITEL PLATFORM**

Predrag Mićović, Bojan Pajčin, Vladimir Kostić, Miroslav Ilić, Predrag Ivaniš