

ხელშეშლამდგრადობის საკითხები ოპტიკურ სატრანსპორტო ქსელებში

კახა ხომტარია, ლევანი კახელი, ნიკოლოზ აბზიანიძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

რეზიუმე

განხილულია ოპტიკური სატრანსპორტო ქსელის ფიზიკური დონის, DWDM სისტემების, ხელშეშლამდგრადობისათვის ისეთი უმნიშვნელოვანესი პარამეტრების ურთიერთდამოკიდებულება, როგორცაა შეცდომების კოეფიციენტი, სიგნალ/ხელშეშლის ფარდობა, Q ფაქტორი; ოპტიკური სიგნალ/ხმაურის სიდიდის ცვლილების ხასიათი ოპტიკური მამლიერებლების კასკადში ინფორმაციული სიგნალის გავლისას; განსაზღვრულია გადაცემაზე და მიღებაზე სიგნალის სიმძლავრის ზღვრული მნიშვნელობები და გამლიერების უზენების სიგრძეები სხვადასხვა სიჩქარის სიგნალების გადაცემისას ოპტიკურ-ბოჭკოვანი ხაზით.

საკვანძო სიტყვები: DWDM. შეცდომების კოეფიციენტი. Q-ფაქტორი. ოპტიკური სიგნალ/ხელშეშლის ფარდობა. სპონტანური ემისია. ხმაურის კოეფიციენტი.

1. შესავალი

OTN (ოპტიკური სატრანსპორტო ქსელი) ტექნოლოგია დაკავშირებულია WDM(DWDM) ტალღის სიგრძის მიხედვით მულტიპლექსირების ტექნოლოგიასთან, რადგან ამ უკანასკნელის სპექტრული არხებით გადაიცემა OTN-ით ფორმირებული სიგნალები და აღნიშნული ქსელების პროექტირებისას ერთერთი მთავარი ამოცანაა ე.წ. სიმძლავრის ბიუჯეტის სწორად განაწილება DWDM სისტემაში, რაც გულისხმობს ამ უკანასკნელის ცალკეულ არხებში ოპტიკური სიგნალის გადაცემისას მიღვეის, დისპერსიის, სხვადასხვა ტიპის ხელშეშლების გამო გამოწვეული კარგების ანალიზსა და ამის საფუძველზე OSNR (ოპტიკური სიგნალი/ხელშეშლა ფარდობის) ისეთი მინიმალური მნიშვნელობის დადგენას ქსელის ნებისმიერ მონაკვეთზე, რომლის დროსაც ჯერ კიდევ შესაძლებელია მიმღებ მხარეს სიგნალის საჭირო ხარისხის უზრუნველყოფა.

სტატიის მიზანია ოპტიკური გადაცემის სისტემების ხელშეშლამდგრადობის საკითხების ანალიზი და სიგნალ-ხელშეშლის ფარდობის ოპტიმალური მნიშვნელობების დადგენა სხვადასხვა სიჩქარის ციფრული სიგნალებისათვის არხში შეცდომების მოთხოვნილი კოეფიციენტის, გამოყენებული მოდულაციის ტიპის, მამლიერებლების ხმაურის კოეფიციენტისა და ოპტიკური მამლიერებლებისათვის დამახასიათებელი ხელშეშლების დაგროვების თვისების გათვალისწინებით.

2. ძირითადი ნაწილი

OSNR-ის განსაზღვრისას უნდა გვახსოვდეს, რომ გადაცემის ციფრული სისტემების ფუნქციონირებისათვის აუცილებელია მოთხოვნილი შეცდომების ალბათობის მნიშვნელობის (შეცდომების კოეფიციენტის სიდიდის) უზრუნველყოფა. თანამედროვე მაღალსიჩქარიანი სისტემები შექმნილია პრაქტიკულად უშეცდომო მუშაობისათვის

(სხვადასხვა გამოყენებისათვის შეიძლება გვექონდეს BER-ის მნიშვნელობები დაწყებული 10^{-9} , 10^{-10} , 10^{-12} , 10^{-15} ...), ამასთანავე, საკმაოდ რთულია უშუალოდ BER-ის მნიშვნელობების მონაცემებით სისტემის მახასიათებლების შემოწმება (შედეგების დათვლა რეალური სტატისტიკისათვის) [1]. ბევრად უფრო მოსახერხებელია გაზომვების ჩატარება ე.წ. Q- ფაქტორის გამოყენებით. Q-ფაქტორი არის პარამეტრი, რომელიც უშუალოდ ასახავს ციფრული გადაცემის სისტემის სიგნალის ხარისხს. არსებობს ფუნქციური დამოკიდებულება სიგნალის Q-ფაქტორსა და BER-ს შორის. Q-ფაქტორი განისაზღვრება სიგნალის ამპლიტუდისა და ფაზის გაზომვების შედეგების სტატისტიკური დამუშავებით ელექტრულ დონეზე, კერძოდ, უშუალოდ „თვალის დიაგრამის“ მიხედვით. ამასთანავე აიგება „1“ და „0“ -ის მდგომარეობების განაწილების ფუნქციები, იმის გათვალისწინებით, რომ მათ აქვთ გაუსის ფორმა, შეფასდება მდგომარეობების მათემატიკური მოლოდინები E1 და E0 და მათი საშუალო კვადრატული გადახრები σ_1 და σ_0 .

$$Q = (E1 - E0)/(\sigma_1 + \sigma_0) \tag{1}$$

$$BER(Q) = 1/2 \operatorname{erfc}(Q/\sqrt{2}) \tag{2}$$

ზოგადად $\operatorname{erfc}x = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \operatorname{EXP}\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$.

როცა $x > 3$, აღნიშნული ფუნქცია შეიძლება გამოვითვალოთ მიახლოებითი ფორმულით:

$$\operatorname{erfc}x \approx \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} \operatorname{EXP}\left(-\frac{x^2}{2}\right),$$

ე.ი. BER შეიძლება გამოვითვალოთ მიახლოებით:

$$BER(Q) \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \operatorname{EXP}\left(-\frac{Q^2}{2}\right).$$

ხმაურის გარეშე იდეალური დეტექტირებისას ($\sigma_0 = 0$), ე.ი. $Q = \frac{E1-E0}{\sigma_1}$. ამ შემთხვევაში $OSNR = Q^2$. რეალურ არხში, რომელშიც მაღალია ხმაურის დონე $OSNR = 4Q^2$ [2].

ქვემოთ მოყვანილია გამოთვლილი მნიშვნელობები ასეთი შემთხვევისათვის:

Q = 6,0	BER = 1.14 × 10⁻⁹	OSNR = 4Q²	OSNR = 144	OSNR = 21.6დბ
Q = 6,36	BER = 1.18 × 10⁻¹⁰	OSNR = 4Q²	OSNR = 161.8	OSNR = 22.09დბ
Q = 7.05	BER = 1.002 × 10⁻¹²	OSNR = 4Q²	OSNR = 198.8	OSNR = 22.9დბ
Q = 7.95	BER = 1.16 × 10⁻¹⁵	OSNR = 4Q²	OSNR = 252.8	OSNR = 24დბ

OSNR-ის მნიშვნელობაზე სხვა ფაქტორებთან ერთად გავლენას ახდენს EDFA (ერბიუმით ლეგირებული ოპტიკური ოპტიკური მამლიერებელი)-ის ხმაურის ფაქტორი. ის ხასიათდება 3 ძირითადი პარამეტრით: გაძლიერების კოეფიციენტი, გაჯერების სიმძლავრე, ხმაურის ფაქტორი. გაძლიერების კოეფიციენტი G და მისი ლოგარითმული ეკვივალენტი $g = 10\lg G$ [დბ] განისაზღვრება:

$$G = P_{s \text{ out}}/P_{s \text{ in}}, \quad g = p_{s \text{ out}} - p_{s \text{ in}} \tag{3}$$

სადაც $P_{s \text{ in}}$ და $P_{s \text{ out}}$ სიმძლავრეები მაძლიერებლის შესასვლელზე და გამოსასვლელზე, ხოლო $p_{s \text{ in}}$ და $p_{s \text{ out}}$ - შესაბამისი დონეები, გამოსახული ლოგარითმულ ერთეულებში:

$$p_s = 10\lg(P/1\text{მვტ}) \text{ [დბს]}.$$

ოპტიკური მაძლიერებლის ხმაურის კოეფიციენტი განისაზღვრება მაძლიერებლის შესასვლელზე OSNR_{in} -ის ფარდობით გამოსასვლელზე OSNR_{out} - თან:

$$NF = OSNR_{in}/OSNR_{out} \quad (4),$$

სადაც OSNR_{in} = P_{s in} / P_{n in}, ხოლო OSNR_{out} = P_{s out} / P_{n out}.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ NF განისაზღვრება იმ პირობით, რომ მაძლიერებლის შესასვლელზე გვაქვს იდეალური კოჰერენტული სიგნალი, ე.ი. ხმაურის მინიმალური თეორიული მნიშვნელობა განისაზღვრება კვანტური ფლუქტუაციებით: P_{N in} = hγΔγ, სადაც h - პლანკის მუდმივაა, γ - ოპტიკური ტალღის სიხშირე; Δγ- არხის სპექტრული სიგანე. ხმაურის სიმძლავრე ამაზე ნაკლები არ შეიძლება იყოს. ასეთი იდეალური სიგნალის შემთხვევაში სიგნალ/ხმაურის ფარდობა იქნება მაქსიმალური:

$$OSNR_{in} = P_{s in}/h\gamma\Delta\gamma.$$

იმავედროულად, მაძლიერებლის გამოსასვლელზე ხმაურის სიმძლავრე იქნება

$$P_{N out} = P_{ASE} + h\gamma\Delta\gamma.$$

გაძლიერებული სპონტანური გამოსხივების სიმძლავრე განისაზღვრება ასე [3]:

$$P_{ASE} = 2n_{sp}(G - 1)h\gamma\Delta\gamma$$

სადაც n_{sp} სპონტანური ემისიის კოეფიციენტი. n_{sp} = 2.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ P_{s out}/P_{s in} = G, მაშინ (2) - ს მიხედვით ხმაურის ფაქტორი შეიძლება შემდეგნაირად გამოისახოს:

$$NF = 1/G(1 + 2n_{sp}(G - 1)). \quad (5)$$

განვიხილოთ მაგალითი: ვთქვათ გვაქვს გაძლიერების 7 უბანი, შესაბამისად 6 მაძლიერებელი. თითოეული უბნის სიგრძე არის 80კმ. მთლიანი სიგრძე იქნება 560 კმ. ჯერ განვსაზღვროთ გაძლიერების კოეფიციენტი:

$g = a_{ობ} + a_{ოშ}$; ოპტიკური ბოჭკოს დანაკარგები $a_{ობ} = a \cdot \sum L_i$; L_i არის ოპტიკური კაბელის სამშენებლო სიგრძე.

$$a_{ობ} = a_{ფშ} \cdot N_{ფშ} + a_{აგ} \cdot N_{rc}; \quad N_{nc} = \frac{L}{L_i} - 1; \quad L_i = 5\text{კმ}.$$

$$a = 0.21\text{დბ}; \quad a_{ობ} = a_{of} = a \cdot L_A = 0.21 \cdot 80 = 16.8\text{დბ};$$

$$a_{ოშ} = 0.05 \cdot 16 + 0.25 \cdot 2 = 1,3 \text{ დბ}; \text{ მაშინ } g = 16.8 + 1.3 = 17,1\text{დბ}.$$

გამოთვლას ვაწარმოებთ ერთი ოპტიკური არხისათვის გადაცემის სხვადასხვა სიჩქარით: 2,5 გბტ/წმ; 10გბტ/წმ და 40გბტ/წმ. ვუშვებთ, რომ ყველა მაძლიერებელს აქვს ერთიდაიგივე გაძლიერების კოეფიციენტი.

ხმაურის მინიმალური სიმძლავრე ოპტიკური მაძლიერებლის შესასვლელზე გადასაცემი ოპტიკური სიგნალის სიხშირულ ზოლში P_{ბმ შეს.} = hγΔγ = N₀, სადაც h = 6.652.10⁻³⁴

$j.c$ – პლანკის მუდმივა; γ - ოპტიკური სიხშირე; $\Delta\gamma$ - არხის სპექტრული სიგანე. ხმაური ოპტიკური მაძლიერებლის გამოსასვლელზე წარმოადგენს კვანტური ხმაურებისა და გაძლიერებული სპონტანური ემისიის ჯამს ASE (Amplified Spontaneous Emission). გაძლიერებული სპონტანური გამოსხივების სიმძლავრე აღვნიშნოთ ASE_{AF}.

ჩვენ შემთხვევაში $g = 18.05$ დბ. ე.ი. $10\lg G = 18.05$. $G = 63$.

$NF = 1/3 (1 + 4 \times (63 - 1)) = 4$. $10\lg 4 = 6$ დბ. $k = 6$. ხაზის ბოლოში OSNR შემცირდება სიდიდით $\Delta OSNR = 10 \lg(k \cdot NF - k + 1) = 10 \lg 28 = 14,5$ დბ.

შესასვლელი OSNR_{შეს} არ უნდა იყოს ნაკლები, ვიდრე OSNR_{შეს} = OSNR + $\Delta OSNR$ = 22,09 + 14,5 = 36,6 დბ.

პირველი ოპტიკური მაძლიერებლის შესასვლელზე ხმაურის სიმძლავრე განისაზღვრება კვანტური ხმაურით $P_{Nin} = h\nu\Delta\gamma$. ამ შემთხვევაში ოპტიკური სიმძლავრის დონეები მიღებაზე და გადაცემაზე გადაცემის სხვადასხვა სიჩქარისას **BER = 10⁻¹⁰**- ის შემთხვევაში იქნება:

$C1 = 2,5$ გბტ/წმ; $N_0 = -65$ დბ;

$P_{მიღ} = OSNR_{შეს} - N_0 = -28,4$ დბს. $P_{გად} = P_{მიღ} + g = -28,4 + 18,05 = -10,35$ დბს.

$C2 = 10$ გბტ/წმ; $N_0 = 10 \lg (6.6252 \times 10^{-34} \times 193.4 \times 10^{12} \times 10 \times 10^9 \times 10^3) = -59$ დბ

$P_{მიღ} = OSNR_{შეს} - N_0 = -22,4$ დბს. $P_{გად} = P_{მიღ} + g = -22,4 + 18,05 = -4,35$ დბს.

$C3 = 40$ გბტ/წმ $N_0 = 10 \lg (6.6252 \times 10^{-34} \times 193.4 \times 10^{12} \times 40 \times 10^9 \times 10^3) = -52,9$ დბ

$P_{მიღ} = OSNR_{შეს} - N_0 = -16,3$ დბს. $P_{გად} = P_{მიღ} + g = -16,3 + 18,05 = 1,75$ დბს.

როცა **BER = 10⁻¹²**

$OSNR_{შეს} = 23$ დბ; $OSNR_{შეს} = OSNR + \Delta OSNR = 23 + 14,5 = 37,5$ დბ.

C1-სათვის $P_{მიღ} = -27,5$ დბს. $P_{გად} = -9,45$ დბს.

C2-სათვის $P_{მიღ} = -21,4$ დბს. $P_{გად} = -4,3$ დბს.

C3- სათვის $P_{მიღ} = -15,4$ დბს. $P_{გად} = 1,7$ დბს.

განვიხილოთ შემთხვევა, როცა **BER = 10⁻¹⁵**

$OSNR_{შეს} = 24$ დბ ; $OSNR_{შეს} = OSNR + \Delta OSNR = 24 + 14,5 = 38,5$ დბ.

C1- სათვის $P_{მიღ} = -26,5$ დბს; $P_{გად} = -8,45$ დბს.

C2 -სათვის $P_{მიღ} = -20,5$ დბს; $P_{გად} = -2,45$ დბს.

C3 - სათვის $P_{მიღ} = -14,4$ დბს. $P_{გად} = 3,65$ დბს.

40 გბტ/წმ სიგნალისათვის შიძლება გამოვიყენოთ დუობინარული კოდირება, რომელიც ერთნახევარჯერ ამცირებს გადასაცემი სიგნალის სიხშირულ ზოლს [5]. ამ შემთხვევაში თუ ფილტრში გავატარებთ დუობინარულ სიგნალს და მერე აღვადგენთ საწყის ორობით კოდურ მიმდევრობას, N_0 -ს განსაზღვრისას გავითვალისწინებთ

$40/1,5 = 26,6$ გბტ/წმ სიხშირულ ზოლს. შესაბამისად გვექნება:

$N_0 = 10 \lg (6.6252 \times 10^{-34} \times 193.4 \times 10^{12} \times 26,6 \times 10^9 \times 10^3) = -54,7$ დბ.

$P_{მიღ} = OSNR_{შეს} - N_0 = 38,5 - 54,7 = -16,2$ დბს

ამ შემთხვევაში უბნის სიგრძე იქნება 5.9/ 0.213

ზემოთ მოყვანილი გამოთვლების საფუძველზე ოპტიკური სიგნალის გადაცემის სიმძლავრის ($P_{გად} = -11,3$ დბს) მნიშვნელობის გამოყენებით განვსაზღვრეთ განხილული

ოპტიკური ხაზის გაძლიერების უზნების ზღვრული სიგრძეები STM-16; STM-64 და STM-256 სიგნალებისათვის შეცდომების კოეფიციენტების სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის. შედეგები მოყვანილია 1-ელ ცხრილში. ცხადია, ეს მნიშვნელობები არ არის აბსოლუტური და გვიჩვენებს მხოლოდ თანაფარდობას გაძლიერების უზნების სიგრძეებს შორის სამი სხვადასხვა სიჩქარის სიგნალისათვის (2,5; 10 და 40 გბტ/წმ).

B		გაძლიერების უზნების ზღვრული სიგრძეები			ცხრ.1	
		L, კმ				
BER		STM-16	STM-64	STM-256		
		2,5 გბტ/წმ	10 გბტ/წმ	40 გბტ/წმ		
		10 ⁻¹⁰	80	57		27,8
		10 ⁻¹²	79	52		24
10 ⁻¹⁵	77	47,6	19,4/27.7			

კონკრეტულად ცხრილში ასახულია გაძლიერების უზნების ზღვრული სიგრძეები ოპტიკურ-ბოჭკოვანი ხაზის, 6 ოპტიკური მაძლიერებლით, STM-16; STM-64 და STM-256 სიგნალებისათვის და შეცდომების კოეფიციენტების სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის.

3. დასკვნა

გამოთვლის შედეგები გვიჩვენებს, რომ ოპტიკური მაძლიერებლების გამოყენება ამცირებს გადაცემული ინფორმაციული სიგნალების სიგნალ/ხმაურის ფარდობას, რადგან თითოეული მაძლიერებელი ამატებს საკუთარ ხმაურს, რომელიც გამოწვეულია გაძლიერებული სპონტანური ემისიით, რომელიც გავლენას ახდენს არხში სიმძლავრის მინიმალური დონის დადგენაზე (შეზღუდვაზე). ამასთანავე, გადასაცემი სიგნალის სიჩქარის გაზრდისას გაძლიერების უზნების ერთიდაიგივე სიგრძის შემთხვევაში შესაბამისად იზრდება სიგნალების გადაცემის და მიღების დონეები, ხოლო ერთიდაიგივე გადაცემის დონის გამოყენებისას სიჩქარის ზრდასთან ერთად მცირდება გაძლიერების უზნების სიგრძე.

ლიტერატურა:

1. Bergano Neal S., Kerfoot F.W., Davidson C.R. (1993). Margin Measurements in Optical Amplifier Systems. Reprint of most cited article from IEEE PTL Vol.5. http://photonicsociety.org/newsletters/oct07/margin_measurement.pdf.
2. Dahlgren R. Noise in Fiber Optic Communication Links. <http://www.svphotonics.com/-pub/pub029.pdf>.
3. Убайдулаев Р. Р. (2003). Протяжённые ВОЛС на основе EDFA. Lightwave Russian Edition. №1. – С. 22-28.
4. Багаветдинов Д.Н., Миронов С.А. Расчет помехоустойчивости участка ВОЛС с оптическими усилителями. http://fpro.ifmo.ru/kmu/kmu6/ВЫПУСК_4/Ready_инф_телеком

NOISE IMMUNITY ISSUES IN OPTICAL TRANSPORT NETWORKS

Khoshtaria Kakha, Kakheli Levan, Abzianidze Nikoloz

Georgian Technical University

Summary

The article deals with the physical level of the optical transport network, DWDM systems, noise immunity for the most important parameters of interdependence, such as bit error rates (BER), signal/noise ratio, Q factor; It is estimated the optical signal/noise ratio variations, when information signal is transmitted through cascade of optical amplifiers; There are defined on the transmission and reception points signal power limit values and lengths of amplifying spans for signals with different rates in the fiber-optic transmission line.

ВОПРОСЫ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ

Хоштария К., Кахели Д., Абзианидзе Н.

Грузинский Технический Университет

Резюме

Рассмотрена взаимосвязь таких важнейших параметров помехоустойчивости для физического уровня оптической транспортной сети, DWDM системы, какими являются коэффициент ошибок –BER, отношение сигнал.шум - OSNR, Q фактор; характер изменения величины OSNR при прохождении сигнала через каскад оптических усилителей; определены граничные значения мощности сигнала на передаче и приёме и длины усилительных участков при передаче сигналов с разными скоростями по оптической-волоконной линии.