

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ნანა როსტიაშვილი

კავშირის ხარისხის კვლევა გადაცემის
ციფრულ-ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: „ტელეკომუნიკაცია“

შიფრი: 0714

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0160, საქართველო

ივნისი, 2021 წ.

საავტორო უფლება © 2021 წელი, ნანა როსტიაშვილი

თბილისი

2021 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავცანით ნანა როსტიაშვილის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „კავშირის ხარისხის კვლევა გადაცემის ციფრულ-ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

....., 2021 წელი

ხელმძღვანელი: პროფესორი რ. სვანიძე

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2020

ავტორი: ნანა როსტიაშვილი

დასახელება: „კავშირის ხარისხის კვლევა გადაცემის ციფრულ-ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში“

ფაკულტეტი: ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

აკადემიური ხარისხი: აკადემიური დოქტორი

სხდომა ჩატარდა:, 2021 წ.

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემოთ მოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

სადისერტაციო ნაშრომში წარმოდგენილია გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან - ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს) კავშირის ხარისხის კვლევის საკითხები. საქართველოში კავშირგაბმულობის ქსელი ხასიათდება მრავალფეროვნებით, ქვეყნის სატელეკომუნიკაციო ქსელებში ფუნქციონირებს მრავალი სახის ტექნოლოგია, ერთის მხრივ მომსახურების სერვისების სიმრავლე და მეორეს მხრივ მომსახურების მიწოდებაზე კონკურენცია, დღის წესრიგში აყენებს კავშირის მომსახურების ხარისხის ამაღლების საკითხს, რაც თავისთავად მომხმარებელთა უფლებების დაცვასთან არის დაკავშირებული. კავშირის მომსახურების ხარისხის მაჩვენებლების ჩამონათვალის შედგენა, პარამეტრებისა და მაჩვენებლების შეფასების მეთოდოლოგიის შემუშავება, კავშირის ხარისხის მაჩვენებლების ნორმების განსაზღვრა მთლიანობაში გულისხმობს კავშირის მომსახურების რეგულირების ამოცანის გადაწყვეტას. შედეგად კი მივიღებთ საქართველოს სატელეკომუნიკაციო ბაზარზე, კავშირის მომსახურების ხარისხის ამაღლებას, ახალი ტექნოლოგიების დანერგვას, მომხმარებელთა უფლებების დაცვას, ქვეყნის ინტეგრაციას ევროკავშირის სივრცეში. ასევე სატელეკომუნიკაციო სექტორში კავშირის მომსახურების ხარისხის ამაღლება ხელს შეუწყობს კონკურენტუნარიანი გარემოს გაუმჯობესებას სატელეკომუნიკაციო ქსელის ბაზარზე ასევე ოპერატორების მხრიდან ქსელური ინფრასტრუქტურის მოდერნიზაციას.

ქსელური ოპერატორის არჩევის დროს მომხმარებლები ორიენტაციას აკეთებენ ორ პარამეტრზე: მომსახურების ღირებულება და ხარისხი. პირობებში, სადაც სხვადასხვა ქსელური ოპერატორების მომსახურების ღირებულება საშუალოდ თანაბარია. მომსახურების ხარისხი აბონენტისათვის თამაშობს გადამწყვეტ როლს. ქსელის მაჩვენებლების მუდმივი მონიტორინგი და მათ ცვლილებაზე დროული რეაგირება, ოპერატორ კომპანიებს საშუალებას აძლევს გააკონტროლონ ქსელის ტექნიკური მდგომარეობა, აწარმოონ მოწყობილობების დროული განახლება, შეინარჩუნონ არსებული აბონენტები და ჰქონდეთ გარანტია მიიღონ ახალი მომხმარებლები, იმ პირობებში, სადაც ადგილი აქვს აბონენტების ერთი ქსელიდან მეორე ქსელში გადასვლას, რასაც მნიშვნელოვნად უწყობს ხელს პორტაბელობა.

კავშირის მომსახურების ხარისხზე მონიტორინგის განხორციელებით ფართოდ უნდა ჩაერთონ კავშირგაბმულობის ოპერატორები და მომხმარებლები. კავშირის ხარისხის მომსახურების მონიტორინგის ძირითადი ამოცანებია:

სატელეკომუნიკაციო ბაზარზე კონკურენტუნარიანობის მხარდაჭერა. გატარებული ტრაფიკის მოცულობის ზრდის პირობებში კავშირგაბმულობის ქსელის გაფართოების აუცილებლობა და მოდერნიზაცია.

არსებული აბონენტებისადმი სერვისის მაღალი ხარისხით მიწოდება და ახალი აბონენტების მოზიდვა.

ხარისხის მონიტორინგის სისტემის შემუშავება და მისი ფუნქციონირების ძირითადი პრინციპების განსაზღვრა.

საქართველოს სატელეკომუნიკაციო სექტორის ევროკავშირის შესაბამის სტრუქტურებთან ინტეგრაციის ხელშეწყობა.

ნაშრომში განხილულია კავშირის მომსახურების ძირითადი ასპექტები, შეფასების მეთოდოლოგია და გადაწყვეტის გზები, სტრუქტურული სქემისა და გადამწყვეტი მოწყობილობის ანალიზი, ხმაურის ბუნება, მისი კლასიფიკაცია და როლი ბიტურ შეცდომათა ალბათობის (კოეფიციენტის) ფორმირებაში. გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან - ოპტიკური სისტემის ხარისხის განმსაზღვრელი ძირითადი მაჩასიათებლებია: ბიტურ შეცდომათა ალბათობა Bit Error Rate (BER), Q-ფაქტორი, კავშირი BER-სა და Q-ფაქტორს შორის.

წარმოდგენილია გცბოს მიმღების გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის დონის გაანგარიშების მოდელი p-i-n და ზვავისებური APD ფოტოდეტექტორების, შემთხვევაში, აგრეთვე, იდეალური მოდელის შემთხვევაში. ნაშრომში განხილულია Q-ფაქტორის ოპტიმალური მნიშვნელობის დადგენა გცბოს-ში. ოპტიკური არხების ხარისხობრივი მაჩვენებლების განსაზღვრის დროს მოცემულია გცბოს-ის მიმღების გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის ოპტიმალური დონის (I_D) დადგენის პრინციპი კავშირგაბმულობის საერთაშორისო ორგანიზაციის ITU-T O.201 რეკომენდაციის მიხედვით.

განხილულია დროითი ჯიტერის წარმოშობის ფიზიკური არსი და მისი გავლენა ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე. შეფასებულია დროითი ჯიტერის ეფექტის გამო წარმოშობილი სიმძლავრის ჯარიმის ($P_{ჯარ.}$) დამოკიდებულება ჯიტერისა და სისტემის გადაცემის სიჩქარის კომპლექსურ პარამეტრთან. ნაშრომში, ასევე წარმოდგენილია სიმბოლოთშორისი ინტერფერენციის ძირითადი მიზეზები გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს). მოყვანილია მათი ფიზიკური არსი და შემცირების გზები. ასევე ხმაურების კლასიფიკაცია გცბოს-ში და სიგნალ-ხმაურს შორის ფარდობის შეფასება. თერმული (ჯონსონის) ხმაური მისი გამომწვევი მიზეზები. საფანტისებური (კვანტური) ხმაურის გამომწვევი მიზეზები, გცბოს ერთ - ერთი ძირითადი კვანძის - ფოტოდეტექტორის ფუნქციონირების პრინციპი და მისი მგრძნობიარობა დენის მიმართ (მონოქრომატული მგრძნობიარობა), ასევე დამოკიდებულებები OSNR -სა და ESNR-ს შორის. მიღების კოეფიციენტი, ლაზერის გამოსხივების ინტენსივობის ხმაური RIN და მიმღების მგრძნობიარობა. ნაშრომში მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებულ იქნას გცბოს-ის კვანძების შემუშავების და პროექტირებისას.

ABSTRACT

The dissertation presents the issues of connection quality research in digital fiber-optic transmission systems. Communication network in Georgia is characterized by diversity, many types of technology operate in the telecommunication networks of the country, on the one hand the abundance of services and on the other hand competition for service delivery, raises the issue of improving the quality of union services, which is related to the protection of consumer rights. Compilation of a list of quality services of the union service, develop a methodology for evaluating parameters and indicators, determining the norms of connection quality indicators as a whole means solving the task of regulating the connection services. As a result, we will improve the quality of communication services in the Georgian telecommunications market, introduction of new technologies, protection of consumers' rights, integration of the country into the EU space. Improving the quality of connection services in the telecommunications sector will also help improve the competitive environment in the telecommunications network market. As well as modernization of network infrastructure by operators. When choosing a network operator, users focus on two parameters: cost and quality of service. When the cost of services of network operators is equal to the average, the quality of service for the customer plays a crucial role.

Continuous monitoring of network indicators and timely response to their change, allows operators to monitor the technical condition of the network, perform timely device upgrades, retain existing subscribers, and guarantee new customers, provided, where there is a transition of customers from one network to another, which is greatly facilitated by portability. Communication operators and users should be widely involved in monitoring the quality of communication services. The main tasks of monitoring the quality of connection services are:

Supporting competitiveness in the telecommunications market. The need to expand and modernize the communication network in the conditions of increasing the volume of traffic. Providing high quality service to existing customers and attracting new customers. Develop a quality monitoring system and define the basic principles of its operation. Facilitate the integration of the Georgian telecommunications sector with the relevant structures of the European Union.

The paper discusses the main aspects of union services, evaluation methodology and solutions, analysis of the structural scheme and the decisive device, the nature of the noise, its classification and the role in the formation of the probability (coefficient) of bit errors.

The main characteristics that determine the quality of a digital fiber-optic transmission system are: Bit Error Rate (BER), Q-factor, connection between BER and Q-factor. The threshold model for calculating the threshold level of the transmitting device of the digital fiber-optic transceiver is p-i-n and in the case of avalanche APD photodetectors, as well as the ideal model. The paper discusses the determination of the optimal value of the Q-factor in digital fiber-optic

transmission systems. When determining the quality of optical channels, the principle of determining the optimal level (ID) threshold of the decisive device of the digital fiber-optic transmission systems receiver is given according to the recommendation of the International Communication Organization ITU-T O.201. The physical essence of the origin of the temporal jitter and its effect on the probability of bit errors are discussed. The relationship of the power penalty (P pen.) Due to the temporal jitter effect to the complex parameter of the jitter and system transmission speed is evaluated. The paper also presents the main causes of interfacial interference in digital fiber-optic transmission systems. Their physical essence and ways of reduction are given. As well as the classification of noise in the digital fiber-optic transmission systems and the evaluation of the relationship between signal-noise. Thermal (Johnson) noise, its challenging causes. Causes of scattering (quantum) noise, the principle of operation of one of the main nodes - photodetector and its sensitivity to current (monochromatic sensitivity), as well as the relationship between OSNR and ESNR. Mileage coefficient, laser radiation intensity noise RIN and receiver sensitivity. The results of this work can be used in designing of the units of Digital Fiber-Optics Transmission Systems.

შინაარსი

	88-
შესავალი -----	18
თავი 1. კავშირის ხარისხის პრობლემა გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან - ოპტიკურ სისტემებში.(გცბოს) -----	24
1.1 ზოგადი მიმოხილვა -----	24
1.2. კავშირის მომსახურების რეგულირების საერთაშორისო გამოცდილების ანალიზი -----	25
1.3. კავშირის მომსახურების ხარისხის მიწოდების კონტროლის მონიტორინგის სისტემის პრინციპები და ფუნქციონირება -----	27
1.4. შეთანხმება მომსახურებისდონეზე (SLA- Service Agreement) და კავშირის მომსახურების ხარისხის განსაზღვრის მოდელი ETSI - ის მიხედვით -----	29
1.5. კავშირის მომსახურების ხარისხის მონიტორინგის ჩატარება -----	31
პირველი თავის დასკვნა -----	32
თავი 2. გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან ოპტიკურ სისტემებში კავშირის ხარისხის კვლევის საკითხები -----	33
2.1. ბიტურ შეცდომათა ალბათობის კოეფიციენტის (BER) შეფასება ციფრული კავშირის ხარისხისა მაჩვენებლის Q-ფაქტორის განსაზღვრის მეშვეობით ციფრული ორობითი სიგნალის სიმბოლოების დონეებისა და დისპერსიების სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის -----	38
2.2. შეცდომათა ალბათობის გაზომვის პრინციპები გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან- ოპტიკურ სისტემებში(გცბოს) -----	41
მეორე თავის დასკვნა -----	45
თავი 3. ჯიტერის არსი გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში მისი წარმოშობის მიზეზები და კავშირის ხარისხზე შესაძლო გავლენის პირობები. შეცდომათა ალბათობის შეფასება დროითი ჯიტერის გათვალისწინებით და სიმბოლოთაშორისი ინტერფერენციის (ISI) პირობებში -----	46

3.1.	სიმბოლოთშორისი ინტერფერენციის ძირითადი მიზეზები გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს). მოყვანილია მათი ფიზიკური არსი და შემცირების გზები -----	51
3.2.	სიმბოლოთშორისი ინტერფერენციის (სში) გავლენა გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან – ოპტიკური სისტემის (გცბოს) შეცდომათა ალბათობაზე (BER), სში-ის შედეგად თვალის დიაგრამის ლიობის შემცირების გამო -----	54
	მესამე თავის დასკვნა -----	58
თავი 4. ხმაურის პრობლემა ოპტიკურ მიმღებებში. მიმღების მგრძნობიარობა ბიტურ შეცდომათა ალბათობა და Q-ფაქტორი --59		
4.1.	ხმაურის ძირითადი სახეები გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს) -----	59
4.2.	ფოტოდეტექტორი -----	61
4.3.	მგრძნობიარობა დენის მიმართ (მონოქრომატიული მგრძნობიარობა) -----	62
4.4.	საფანტისებური (კვანტური) (SHOT NOISE) ხმაური -----	63
4.5.	თერმული (სითბური) ჯონსონის ხმაური (Thetrmal Noise) -----	71
4.6.	ფარდობა სიგნალი/ხმაური -----	75
4.7.	მიმღები დომინანტური თერმული ხმაურით -----	77
4.8.	ხმაურის ექვივალენტური სიმძლავრე (Noise Equivalent Power) -----	79
4.9.	მიმღები დომინანტური საფანტისებური ხმაურით -----	79
4.10.	ციფრული მიმღების მწარმოებლურობა და ბიტურ შეცდომათა ალბათობა-----	80
4.11.	გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის (ბარიერის) შერჩევა და ოპტიმიზაცია -----	82
4.12.	მინიმალური საშუალო ოპტიკური სიმძლავრე -----	89
4.13.	დამოკიდებულება OSNR-სა და ESNR-ს შორის -----	90

მეოთხე თავის დასკვნა -----	91
დაშვებები და დასკვნები -----	91
თავი 5. ლაზერის ფარდობითი ინტენსივობის ხმაური (RIN), მოდების გაყოფის ხმაური (MPN), ფარდობითი ინტენსივობის ხმაური, მათი დამოკიდებულება ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე. ხმაურების შეფასება სიმძლავრის ჯარიმით -----	-94
5.1. ხმაურის ინტენსივობის ეფექტი -----	94
5.2. ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე და ენეგეტიკულ პოტენციალზე მოქმედი ფაქტორები გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემებში (გცბოს) -----	95
5.3. ბიტურ შეცდომათა ალბათობა (BER) და გადამცემის ლაზერის მოდების ფარდობითი ინტენსივობის ხმაურის (RIN) რეჟიმი გადამცემის ციფრულ- ბოჭკოვან- ოპტიკურ სისტემებში -----	100
5.4. სიმბოლოთაშორისი დამახინჯება, მოდების გაყოფის ხმაური და სიმძლავრის ჯარიმის შეფასება გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან - ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს) -----	107
მეხუთე თავის დასკვნა -----	115
საერთო დასკვნა -----	117
გამოყენებული ლიტერატურა -----	121
დანართები -----	126

ნახაზების ნუსხა

83.

ნახ. 1.1. საქართველოს კავშირის მომსახურების ხარისხის მონიტორინგის სისტემა -----	27
ნახ. 1.2. ოთხი მოსაზრება მომსახურების ხარისხზე -----	28
ნახ. 1.3. მომსახურების ხარისხის მაჩვენებლების განსაზღვრის მოდელი ETSI-ს შესაბამისად -----	31
ნახ. 2.1. დამოკიდებულება $BER = \psi(Q)$ -----	35
ნახ. 2.2. შეცდომათა კოეფიციენტის ნორმირება საერთაშორისო კავშირის (შეერთების) დროს -----	36
ნახ. 2.3. შეცდომათა კოეფიციენტის ნორმირება ძირითად ციფრულ არხზე საერთაშორისო კავშირის (შეერთების) დროს -----	36
ნახ. 2.4. ბიტური სიმბოლოების დისპერსიები $\sigma_0 = \sigma_1 = \frac{I_1}{10}; \frac{I_1}{12}; \frac{I_1}{15}$, „1“-ის დონე $I_1=1$, „0“-ის დონე $I_0=0$ -----	40
ნახ. 2.5. ბიტური სიმბოლოების დისპერსიები $\sigma_0 = \sigma_1 = \frac{I_1}{10}; \frac{I_1}{12}; \frac{I_1}{15}$, „1“-ის დონე $I_1=1$, „0“-ის დონე $I_0=0.2$ -----	40
ნახ. 2.6. ბიტური სიმბოლოების დისპერსიები $\sigma_0 = 0.05; 0.066; 0.083$, $\sigma_1 = 0.1$, „1“-ის დონე $I_1=1$, „0“-ის დონე $I_0=0.2$ -----	40
ნახ. 3.1. იდეალური და რეალური ციფრული სიგნალი -----	47
ნახ. 3.2. სიგნალის მთლიანობის მნიშვნელოვანი მახასიათებლები: დადებითი მოვარდნა უარყოფითი ამვარდნა, სიგნალის გამომახილი ----	47
ნახ. 3.3. ამპლიტუდური ხმაურის დროით ჯიტერში გარდაქმნა -----	48
ნახ. 3.4. მოცემულია დროითი ჯიტერის გავლენა გადაწყვეტილების მიღებაზე გცბოს მიმღების გადამწყვეტ მოწყობილობაში -----	49
ნახ. 3.5. მოყვანილია $P_{\chi^2} = \Psi(B\tau_j)$, როდესაც $Q=5,6,7,8$ -----	50
ნახ. 3.6. ბინარულ ციფრულ სისტემაში სიმბოლოთაშორისი ინტერფერენციის მაგალითი -----	51

ნახ. 3.7. გცბოს-ის მიმღები მოწყობილობის ამპლიტუდურ-სიხშირული მახასიათებელი -----	52
ნახ. 3.8. თვალის დიაგრამა ხმაურის გარეშე -----	54
ნახ. 3.9. რეალური თვალის დიაგრამა ხმაურის შემთხვევაში და მისი ზოგიერთი პარამეტრი („0“ და „1“ დისპერსია და დროითი ჯიჭერი) -----	54
ნახ. 3.10. ა) Q-ფაქტორის დამოკიდებულებასში-ზე: Q= Ψ (ISI); $I_0 = 0.05$, $I_1 = 0.1$ -----	55
ნახ. 3.10. ბ) BER-ის დამოკიდებულება სში-ზე: BER= Ψ (ISI) $I_0 = 0.05$, $I_1 = 0.1$ -----	55
ნახ. 3.11. ა) Q –ფაქტორის დამოკიდებულება: BER= Ψ (ISI) $I_0 = 0.047$, $I_1 = 0.09$ -----	56
ნახ. 3.11. ბ) BER-ის დამოკიდებულება სში-ზე: BER= Ψ (ISI) $I_0 = 0.047$, $I_1 = 0.09$ -----	56
ნახ. 3.12. Q –ფაქტორის დამოკიდებულება BER= Ψ (ISI) $I_0 = 0.033$, $I_1 = 0.087$ -----	56
ნახ. 3.13. BER-ის დამოკიდებულება სში-ზე: BER= Ψ (ISI) $I_0 = 0.033$, $I_1 = 0.087$ -----	57
ნახ. 4.1. გცბოს მიმღები მოწყობილობის გამარტივებული სქემა -----	60
ნახ. 4.2. გცბოს სტრუქტურული სქემა -----	60
ნახ. 4.3. ფოტოდეტექტორის მგრძნობიარობის დამოკიდებულება ტალღის სიგრძეზე კრემნიუმის, გერმანიუმის და InGaAs მასალებისათვის -----	72
ნახ. 4.4. მიმღებში დომინანტი თერმული (სითბური) ხმაური -----	77
ნახ. 4.5. მიმღები დომინანტი საფანტისებური ხმაურით -----	79
ნახ. 4.6. ადიტიური (შეკრებითი) ხმაურების ზედდება „1“ და „0“ დონეების საშუალო მნიშვნელობებზე და ხმაურის მარაგი -----	82

ნახ. 4.7. წარმოდგენილია ხმაურის ზედდება სიგნალზე (ა); „1“ და „0“ ზედდებული ხმაურების ალბათობათა სიმკვრივების განაწილების ფუნქციები -----	82
ნახ. 4.8. ოპტიკურ მიმღებში მონაცემების მიღება $P(1/0)$ „1“-ის „0“ ში გადასვლის -----	83
ნახ. 4.9. $BER = \square(Q)$ დამოკიდებულების გრაფიკი -----	86
ნახ. 4.10. $I_1 = 0.053$, $I_0 = 0.035$, $I_{Dopt} = 0.0434$, $I_{Dopt} = 0.0483$, $Q_{opt} = 2.4821$, $BER_{opt} = 6.5 \cdot 10^{-3}$ -----	87
ნახ. 4.11. $I_1 = 0.075$, $I_0 = 0.025$, $Q_{opt} = 6.8946$, $BER_{opt} = 2.69 \cdot 10^{-12}$ -----	87
ნახ. 4.12 . $I_1 = 0.068$, $I_0 = 0.021$, $I_{Dopt} = 0.0429$, $I_{Dopt} = 0.0649$, $Q_{opt} = 6.481$, $BER_{opt} = 4.55 \cdot 10^{-11}$ -----	88
ნახ. 4.13. $I_1 = 0.089$, $I_0 = 0.044$, $Q_{opt} = 6.2$, $BER_{opt} = 2.73 \cdot 10^{-10}$ -----	88
ნახ. 5.1. სიგნალზე დამოკიდებული ხმაურები გცბოს-ში -----	101
ნახ. 5.2. ა) სიმძლავრის ჯარიმის დამოკიდებულება მოდური სეგმენტის ხმაურზე, მოდური სეგმენტის კოეფიციენტის (k) სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის: ა) $k=0.3; 0.5; 0.7$. $Q=6$; $BER \approx 10^{-9}$. ნახ. ბ) $k=0.14; 0.2; 0.4$. $Q=6$, $BER \approx 10^{-9}$ -----	104
ნახ. 5.3. ა) სიმძლავრის ჯარიმის დამოკიდებულება მოდური სეგმენტის ხმაურზე, მოდური სეგმენტის კოეფიციენტის (k) სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის. $k=0.3; 0.5; 0.7$. $Q=7$, $BER \approx 10^{-12}$. ბ) $k=0.14; 0.2; 0.4$ $Q=7$, $BER \approx 10^{-12}$ -----	105
ნახ. 5.4. ა) სიმძლავრის ჯარიმის დამოკიდებულება მოდური სეგმენტის ხმაურზე მოდური სეგმენტის კოეფიციენტის (k) სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის. $k=0.3; 0.5; 0.7$. $Q=8$, $BER \approx 10^{-15}$. ბ) $k=0.14; 0.2; 0.4$. $Q=8$, $BER \approx 10^{-15}$ -----	105
ნახ. 5.5. Q ფაქტორის დამოკიდებულება მოდური სეგმენტის კოეფიციენტზე (k). მოდური სეგმენტის ხმაური (მსხ) $\sigma_{pc}^2 = 0.18$, სიმძლავრის ჯარიმა $P_{მსხ}=0.1$ დბ -----	106
ნახ. 5.6. სიმბოლოთაშორისი დამახინჯების ილუსტრაცია ოპტიკურ კაბელში ციფრული სიგნალების გადაცემის დროს -----	108

ნახ. 5.7. სიმბოლოთაშორისი დამახინჯების სიმძლავრეზე ჯარიმის დამოკიდებულება მილევაზე $P_{isi} = \Psi(\alpha)$ -----	109
ნახ. 5.8. Q ფაქტორის $Q = \Psi(BER)$ დამოკიდებულება მილევაზე, მოდური სეგმენტის კოეფიციენტის (k) სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის. $k=0.3; 0.5; 0.7$. მოდური სეგმენტის ხმაურის $P_{MPN}=0.2$ დროს -----	110
ნახ. 5.9. Q- ფაქტორის - $Q = \Psi(BER)$ დამოკიდებულება მილევაზე მოდური სეგმენტის კოეფიციენტის (k) სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის. $k=0.14; 0.2; 0.4$. მოდური სეგმენტის ხმაურის $P_{MPN}=0.2$ მნიშვნელობისათვის -----	111
ნახ. 5.10. $P_{MPN} = \Psi(Q)$ გრაფიკი, როდესაც $Q=6; 7; 7,5; 8$ $K=0.7$; $\varepsilon = \alpha = 0,1$ დბ/კმ -----	111
ნახ. 5.11. $P_{MPN} = \Psi(Q)$ გრაფიკი, როდესაც $K=0,3$ $\varepsilon = \alpha = 0,05$ დბ/კმ -----	112
ნახ. 5.12. $P_{MPN} = F(\alpha)$ დამოკიდებულების გრაფიკი, როდესაც, ($Q=6; 7; 7,5$ და $k=0.14$) -----	112
ნახ. 5.13. $P_{MPN} = F(\alpha)$ დამოკიდებულება, როდესაც $Q=6; 7; 7,5$, $k=0.2$ -----	112
ნახ. 5.14. $P_{MPN} = F(\alpha)$ დამოკიდებულება, როდესაც, $Q=6; 7; 7,5$; $k=0,5$ -----	113
ნახ. 5.15. $P_{MPN} = F(\alpha)$ დამოკიდებულება, როდესაც, $Q=6$; $k=0.14, 0.2$ -----	113
ნახ. 5.16. $P_{MPN} = F(\alpha)$ დამოკიდებულება, როდესაც, $Q=7$; $k=0.14$ -----	113
ნახ. 5.17. $P_{MPN} = F(k)$ დამოკიდებულების გრაფიკი $Q=6; 7; 7,5$, $\alpha = 0.2$ დბ/კმ მნიშვნელობებისათვის -----	114

გამოყენებული აბრევიატურების ნუსხა

აბრევიატურა	განმარტება	
1	2	3
BER	Bit Error Rate	ბიტურ შეცდომათა ალბათობა
APD	Avalanche photodiode	ზვავისებური ფოტოდიოდი
TDM	Time Division Multiplexing	დროითი მულტიპლექსირების მეთოდი
WDM	Wavelength Division Multiplexing	ტალღური მულტიპლექსირება (დაყოფა, შემჭიდროვება, დამკვრივება ტალღების სიგრძის მიხედვით)
DWDM	Dense WDM	მჭიდროტალღური მულტიპლექსირება
ITU-T	International Telecommunications Union	ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო გაერთიანება (ორგანიზაცია)
ES	Errored Second	წამების რაოდენობა შეცდომებით
SES	Severely Errored Second, SES	წამების რაოდენობა მრავალრიცხოვან შეცდომებით
ATM	Asynchronous Transfer Mode	ასინქრონული გადაცემის რეჟიმი
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	სინქრონული ციფრული იერარქია
IP	Internet Protocol	ინტერნეტ პროტოკოლი
ISI	Inter-Symbol Interference	სიმბოლოთშორისი დამახინჯება
OSNR	Optical Signal Noise Ratio	ოპტიკური სიგნალ/ხმაურის ფარდობა
GBR	Guaranteed Bit Rate	გარანტირებული სიჩქარე
DCD	Duty-Cycle Distortion	გადაცემის (მუშა ციკლის) დამახინჯება
PJ	Periodic Jitter	პერიოდული ჯიტერი
BUJ	Bounded Uncorrelated Jitter	შეზღუდული არაკორელირებული ჯიტერი

STM	Synchronous Transport Module	სინქრონული სატრანსპორტო მოდული
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy	პლესიოქრონული ციფრული იერარქია
ESNR	Electrical Signal Noise Ratio	ელექტრული სიგნალის ფარდობა/ხმაურთან
MPN	Mode Partition Noise	მოდების გაყოფის რეჟიმი
RIN	Relative Intensity Noise	ფარდობითი ინტენსივობის ხმაური
MLM	Multi –Longitudine Mode	მრავალგრძივი მოდიანი
DFB	Distributed feedback laser	ლაზერი განაწილებული უკუკავშირით
SLA	Service Layer Agreement	შეთანხმება მომსახურების დონეზე

მადლიერება

გამოვხატავ პატივისცემას და მადლობას ვუხდი ჩემს სადოქტორო ნაშრომის ხელმძღვანელს, ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორს, პროფ. რევაზ სვანიძეს, ნაშრომზე გაწეული დახმარებისთვის, ნაშრომის გასწორებისთვის, მოცემული რჩევებისა და დარიგებისთვის. ასევე გამოვხატავ მადლიერებას აკადემიური დოქტორის ბატონ მამუკა ჩხაიძის, ბატონ კობა მესტიაშვილის მიმართ, სადისერტაციო ნაშრომში შეტანილი წვლილისთვის. მადლიერი ვარ ყველა იმ პიროვნების, ვინც რაიმე ფორმით გამოხატა თანადგომა სადისერტაციო ნაშრომის შესრულებაში.

შესავალი

კავშირის მომსახურების ხარისხის უზრუნველყოფის მიდგომების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ კავშირის მომსახურების თანამედროვე ბაზარზე მოთხოვნამ კავშირის მომსახურებაზე გაჯერებას მიაღწია, სალექომუნიკაციო ქსელების მრავალფეროვნება, სერვისების სიმრავლე და მომსახურების მიწოდებაზე კონკურენცია, დღის წესრიგში აყენებს საკითხს კავშირის მომსახურების ხარისხის ამაღლების შესახებ, რაც უკავშირდება მომხმარებელთა უფლებების დაცვას. შედეგად კი მივიღებთ საქართველოს სატელეკომუნიკაციო ბაზარზე, კავშირის მომსახურების ხარისხის ამაღლებას, ახალი ტექნოლოგიების დანერგვას, მომხმარებელთა უფლებების დაცვას, და ქვეყნის ინტეგრაციას ევროკავშირის სივრცეში. ქსელური ოპერატორის არჩევის დროს მომხმარებლები ორიენტაციას აკეთებენ ძირითად პარამეტრზე - ხარისხზე. მობილური ქსელის მაჩვენებლების მუდმივი მონიტორინგი და მათ ცვლილებაზე დროული რეაგირება, ოპერატორ კომპანიებს საშუალებას აძლევს გააკონტროლონ ქსელის ტექნიკური მდგომარეობა, აწარმოონ მოწყობილობების დროული განახლება, შეინარჩუნონ არსებული აბონენტები და ჰქონდეთ გარანტია მიიღონ ახალი მომხმარებლები. საერთაშორისო ორგანიზაციების ნორმატიული ბაზის, მრავალი ქვეყნის გამოცდილებისა და პრაქტიკის საფუძველზე მოთხოვნები კავშირის ხარისხის უზრუნველყოფაზე ძირითადად ეხება: ფიქსირებული სატელეფონო ქსელებს, უნივერსალურ მომსახურებას, მოძრავ მობილურ კავშირს და ინტერნეტზე დაშვებას. უნდა განისაზღვროს:

- კავშირის ხარისხის მაჩვენებლები, მოდელები და პირობები.
- კავშირის მომსახურების ხარისხის განმსაზღვრელი ორგანიზაციები.

კავშირის მომსახურების ხარისხზე მონიტორინგი ხორციელდება მსოფლიოს 150 -ზე, მეტ ქვეყანაში. ათეულობით ქვეყნის ანლიზის მიხედვით ფიქსირებულ სატელეფონო ქსელების მომსახურების ხარისხზე მოთხოვნილება აიხსნება იმით, რომ ისტორიულად ფიქსირებული

ქსელები წარმოადგენენ სატელეკომუნიკაციო ინფრასტრუქტურის საფუძველს. ფიქსირებული ქსელები, მიუხედავად მათი განვითარების ტემპების შემცირებისა მობილური და უსადენო ტექნოლოგიების მზარდი განვითარების გამო წარმოადგენენ სადენიანი საკაბელო ინფრასტრუქტურის (ტელეფონია, ინტერნეტი, საკაბელო კანალიზაცია და ა.შ) შენარჩუნების მყარ გარანტიას. აუცილებელია საქართველოს ფიქსირებული საკაბელო ქსელის ინფრასტრუქტურის (საკანალიზაციო-საკაბელო ნაგებობები, შახტები, ჭები და სხვა) შენარჩუნება, რაც უზრუნველყოფს მომავალი თაობის ტექნოლოგიების, უპირატესად ინტერნეტის ოპტიკური ქსელების განვითარებას.

თემის აქტუალობა გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან ოპტიკური სისტემები (გცბოს) თანამედროვე ტექნიკური პროგრესის მნიშვნელოვანი შემადგენელი ნაწილია, ასეთი ქსელები მოიცავენ ტელეკომუნიკაციის ინფრასტრუქტურის უდიდეს ნაწილს ხოლო, კავშირის ხარისხის მაჩვენებლის შეფასება აქტუალურ საკითხს წარმოადგენს. ვინაიდან, თანამედროვე პირობებში, როდესაც სხვადასხვა ქსელური ოპერატორების მომსახურების ღირებულება საშუალოდ თანაბარია, მომსახურების ხარისხი აბონენტისათვის თამაშობს გადამწყვეტ როლს. ხარისხის შეფასების უმნიშვნელოვანესი პარამეტრია ბიტურ შეცდომათა ალბათობა (BER), მასზე მოქმედი ფაქტორები მოიცავენ სისტემის კვანძებში და კომპონენტებში მიმდინარე ფიზიკურ პროცესებს. გცბოს - ზე, ექსპლუატაციის პროცესში მოქმედი ფაქტორები აუარესებენ BER-ის მნიშვნელობას, ზღუდავენ სისტემის ენეგეტიკულ პოტენციალს (ბიუჯეტს). რაც აუარესებს გცბოს მწარმოებლურობას. აქედან გამომდინარე, წინამდებარე ნაშრომის კვლევის ამოცანა აქტუალურ გამოწვევას წარმოადგენს.

ნაშრომის მიზანი და ძირითადი ამოცანები: ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს ბიტურ შეცდომათა გამომწვევი მიზეზების კვლევა გადაცემის

ციფრულ ბოჭკოვან ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს), და პრობლემის გადაწყვეტის გზები.

ძირითად ამოცანებს წარმოადგენს:

1. ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე და ენეგეტიკულ პოტენციალზე მოქმედი ფაქტორები გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემებში (გცბოს).

2. სიმბოლოთაშორისი ინტერეფერენციის (ISI) მიზეზები და (BER)-ის შეფასება

გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან ოპტიკურ სისტემებში.

3. გცბოს მიმღების გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის (ბარიერის) შერჩევა

და ოპტიმიზაცია.

4. ჯიტერის გამოწვევი მიზეზები, მისი შეფასება და გავლენა ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე.

5. ბიტურ შეცდომათა ალბათობის (BER) დამოკიდებულება ლაზერის ფარდობითი ინტენსივობის ხმაურზე (RIN Relative Intensity Noise)), მოდების გაყოფის ხმაურზე (MPN Mode Partition Noise)), სიმბოლოთაშორისი დამახინჯებაზე (ISI- Intersymbol Interference). ამ ფაქტორების ასახვა სიმძლავრის ჯარიმაზე.

6. სიმბოლოთაშორისი დამახინჯება, მოდების გაყოფის ხმაური და სიმძლავრის ჯარიმის შეფასება გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან - ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს).

7. გცბოს-ის მიმღები მოწყობილობების ანალიზი, ხმაურები მათი გამომწვევი მიზეზები, დომინანტი ხმაურების ანალიზი.

8. კავშირი ბიტურ შეცდომათა ალბათობასა და გცბოს მწარმოებლურობას შორის

9. ჯარიმის შეფასება ცალკეული პარამეტრების მიხედვით და საერთო ჯარიმის შეფასება.

კვლევის საგანი და მეთოდები; კვლევის საგანს წარმოადგენს გამომწვევი მიზეზების კვლევა გცბოს- ში მიმდინარე სხვადასხვა მოვლენების გამო ჯიტერი, სიმბოლოებს შორის ინტერფერენცია, მიმღების გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის არაოპტიმალურობა. გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის დონის დადგენა;

- ხმაურის დონის დადგენა და სიგნალი/ხმაურის ფარდობის, ბიტური შეცდომათა ალბათობის განსაზღვრა;

- დამახინჯების წყაროების იმიტაცია, სიმბოლოთაშორისი დამახინჯება, დროითი ჯიტერის გავლენა და მათი შემცირება გცბოს- ის ფუნქციონალური კვანძების მოდელირებით და სხვა.

ოპტიკური კაბელის ჩადებისა და მონტაჟის პროცესში დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ამ პროცესის სწორ და სტანდარტების შესაბამის ორგანიზებას. მაგალითად ოკ- ის მიღება შედგება საკუთარი (ოზ-ს კლასიკური მიღება: მიღება შთანთქმაზე, მიღება ინფრაწითელ გამოსხივებაზე და ა.შ) და დამატებით (რადიაციულ, ინსტალაციის, შეერთებების) მიღებისგან.

შეცდომათა ალბათობის კოეფიციენტის (BER) ოპტიმალური მნიშვნელობის განსაზღვრა გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემის (გცბოს) მიმღების გადამწყვეტ მოწყობილობაში ზღურბლის დონის შერჩევით ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო გაერთიანების ITU-ს მეთოდოლოგიის საფუძველზე. ასევე ჯიტერის წარმოშობის მიზეზები გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში, ჯიტერის ფიზიკური არსი, ჯიტერის კავშირის ხარისხზე შესაძლო გავლენის პირობები.

დროითი ჯიტერის ეფექტის გამო წარმოშობილი სიმძლავრის ჯარიმის (Pჯარ.) დამოკიდებულება ჯიტერისა და სისტემის გადაცემის სიჩქარის კომპლექსურ პარამეტრთან.

წარმოდგენილია ასევე სიმბოლოთაშორისი ინტერფერენციის ძირითადი მიზეზები მოყვანილია მათი ფიზიკური არსი და შემცირების გზები.

ასევე სიმბოლოთშორისი ინტერფერენციის (სში) გავლენა გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემის (გცბოს) ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე (BER). ხმაურების კლასიფიკაცია თერმული (ჯონსონის) ხმაური და საფანტისებური (კვანტური) ხმაურის გამომწვევი მიზეზები. ფოტოდეტექტორის ფუნქციონირების პრინციპი, და მისი მგრძნობიარობა. გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის (ბარიერის) შერჩევა და ოპტიმიზაცია. მილევის კოეფიციენტი, ლაზერის გამოსხივების ინტენსიობის ხმაური RIN და მიმღების მგრძნობიარობა.

გამოყენებული კვლევის მეთოდები: გადაცემის ბოჭკოვან - ოპტიკური სისტემების თეორია, ალბათობის და შემთხვევითი სიგნალების თეორია, იმიტაციური მოდელირების საკითხი.

ნაშრომის მეცნიერული სიახლე ძირითადი შედეგები თეორიული და პრაქტიკული ღირებულება. ნაშრომის მეცნიერულ სიახლეს წარმოადგენს ერთიანი მიდგომა გცბოს კავშირის ხარისხის ძირითადი მაჩვენებლის- ბიტურ შეცდომათა ალბათობის (BER) და სისტემის მწარმოებლურობის მიმართ გცბოს კვანძებში მიმდინარე ისეთი ფიზიკური პროცესების მიმართ, როგორიცაა: ჯიტერი, ოპტიკური მიმღების გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის (ბარიერის) ოპტიმიზაცია, ხმაურის რეჟიმების ანალიზი, ლაზერის ფარდობითი ინტენსიობის ხმაური (RIN Relitive Intensaity Noise)), მოდების გაყოფის ხმაური (MPN Mode Partition Noise)), სიმბოლოთაშორის დამახინჯება (ISI- Intersymbol Interferene). აღნიშნული ფაქტორების ასახვა სიმძლავრის ჯარიმაზე, გცბოს ხარისხის ძირითადი მაჩვენებლების Q-ფაქტორისა და BER-ის დამოკიდებულების ფუნქციონალური დადგენა შესაბამისი ანალიზური გამოსახულების მიხედვით და მისი შეფასება რეალური გადაცემის ციფრული სისტემის დაპროექტებისას არსებული ნორმების და სტანდარტების გათვალისწინებით. რასაც მნიშვნელოვანი პრაქტიკული ღირებულება გააჩნია.

ნაშრომის აპრობაცია სადისერტაციო ნაშრომის შესახებ ძირითადი შედეგები სხვადასხვა წლებში მოხსენებული და განხილული იყო სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციებზე და სემინარებზე. მათ შორის:

✓ საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, სტუდენტთა 84-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია 6.06.2016 წ. სამი მოხსენება მიენიჭა II ადგილი [გვ. 107,108,109];

✓ საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, სტუდენტთა 85-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია 07.06.2017 წ. ორი მოხსენება მიენიჭა I ადგილი [გვ. 136,137] ;

✓ აკაკი წერეთლის სახელობის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, მეოთხე საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, ქუთაისი 29 ოქტომბერი 2016 წ. ორი მოხსენება [გვ. 182 -187];

✓ საერთაშორისო კონფერენცია. სამეცნიერო კვლევები თანამედროვე სამყაროში: თეორიული საფუძვლები და ინოვაციური მიდგომები. 2020 წლის 20 აგვისტო. სან-ფრანცისკო კალიფორნია, აშშ. (ორი მოხსენება)
http://www.bmpublgroupp.com/126_15.htm

doi:10.15350/L_26/15.9/doi: 10.15350/L_26/15.10

მთლიანი ნაშრომის მიმოხილვითი და ძირითადი ნაწილები მოხსენებულია სადოქტორო პროგრამით გათვალისწინებულ სამ კოლოქვიუმზე.

პუბლიკაციები სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი მასალები გამოქვეყნებულია 7 სამეცნიერო სტატიაში

თავი 1. კავშირის ხარისხის პრობლემა გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან ოპტიკურ სისტემებში(გცბოს)

1.1. ზოგადი მიმოხილვა

საქართველოს სატელეკომუნიკაციო სექტორში, ისევე როგორც მთლიანად მსოფლიო ტელეკომუნიკაციაში კავშირის მომსახურების ხარისხის ამაღლების საკითხი, ასევე ხარისხის ერთიანი მაჩვენებლების შეფასების, მისი მონიტორინგის ღონისძიებებების გეგმა აქტუალურ ამოცანას წარმოადგენს. მომსახურების ხარისხის ამაღლება ხელს შეუწყობს კონკურენტუნარიანი გარემოს გაუმჯობესებას სატელეკომუნიკაციო ქსელის ბაზარზე ასევე ოპერატორების მხრიდან ქსელური ინფრასტრუქტურის მოდერნიზაციას. ქსელის ოპერატორის არჩევის დროს მომხმარებლები ორიენტაციას აკეთებენ ორ პარამეტრზე: მომსახურების ღირებულება და ხარისხი. იმ პირობებში, სადაც სხვადასხვა ქსელური ოპერატორების მომსახურების ღირებულება საშუალოდ თანაბარია მომსახურების ხარისხი აბონენტისათვის თამაშობს გადამწყვეტ როლს. მობილური ქსელის მაჩვენებლების მუდმივი მონიტორინგი და მათ ცვლილებაზე დროული რეაგირება, ოპერატორ კომპანიებს საშუალებას აძლევს გააკონტროლონ ქსელის ტექნიკური მდგომარეობა, აწარმოონ მოწყობილობების დროული განახლება, შეინარჩუნონ არსებული აბონენტები და ჰქონდეთ გარანტია მიიღონ ახალი მომხმარებლები, იმ პირობებში, სადაც ადგილი აქვს აბონენტების ერთი ქსელიდან მეორე ქსელში გადასვლას, რასაც მნიშვნელოვნად უწყობს ხელს პორტაბელობა. ქსელის მუშაობის ხარისხი წარმოადგენს მობილური ქსელის ოპერატორის მნიშვნელოვან ვალდებულებას.

კავშირის მომსახურების ხარისხზე მონიტორინგის განხორციელებით ფაქტიურად იწყება ახალი რეგულაციები ქვეყნის მოძრავი მობილური კავშირის ქსელების არსებობის ისტორიაში, რომელშიც ფართოდ უნდა

ჩაერთონ კავშირგაბმულობის ოპერატორები და მომხმარებლები. კავშირის ხარისხის მომსახურების მონიტორინგის ძირითადი ამოცანებია: სატელეკომუნიკაციო ბაზარზე კონკურენტუნარიანობის მხარდაჭერა. გატარებული ტრაფიკის მოცულობის ზრდის პირობებში კავშირგაბმულობის ქსელის გაფართოების აუცილებლობა და მოდერნიზაცია კავშირის მომსახურების ხარისხის საკონტროლო მნიშვნელობების უზრუნველყოფისათვის. არსებული აბონენტებისადმი სერვისის მაღალი ხარისხით მიწოდება და ახალი აბონენტების მოზიდვა. ხარისხის მონიტორინგის სისტემის შემუშავება და მისი ფუნქციონირების ძირითადი პრინციპების განსაზღვრა. საქართველოს სატელეკომუნიკაციო სექტორის ევროკავშირის შესაბამის სტრუქტურებთან ინტეგრაციის ხელშეწყობა. საერთაშორისო ორგანიზაციების ნორმატიული ბაზის, მრავალი ქვეყნის გამოცდილებისა და პრაქტიკის საფუძველზე მოთხოვნები კავშირის ხარისხის უზრუნველყოფაზე ძირითადად ეხება: ფიქსირებული სატელეფონო ქსელებს, უნივერსალურ მომსახურებას, მოძრავ მობილურ კავშირს და ინტერნეტზე დაშვებას. კონცეფციაში განსაზღვრულია:

- კავშირის მომსახურების ხარისხის მაჩვენებლები, მოდელები და პირობები;
- კავშირის მომსახურების ხარისხის განმსაზღვრელი ორგანიზაციები.

კავშირის მომსახურების ხარისხზე მონიტორინგი ხორციელდება მსოფლიოს 150 -ზე მეტ ქვეყანაში, ტელეკომუნიკაციის განვითარების ამ ეტაპზე საქართველოში კავშირის მომსახურების ხარისხის მონიტორინგის ამოქმედება აუცილებლობას წარმოადგენს.

1.2. კავშირის მომსახურების რეგულირების საერთაშორისო გამოცდილების ანალიზი

რამოდენიმე ათეული ქვეყნის ანალიზის მიხედვით საზღვარგარეთის უმეტეს ქვეყანაში მოთხოვნები კავშირის ხარისხის უზრუნველყოფაზე

ძირითადად ეხება: ფიქსირებულ სატელეფონო ქსელებს, უნივერსალურ მომსახურებას, მოძრავ მობილურ კავშირს და ინტერნეტზე დაშვებას. ფიქსირებულ სატელეფონო ქსელების მომსახურების ხარისხზე მოთხოვნილება აიხსნება იმით, რომ ისტორიულად ფიქსირებული ქსელები წარმოადგენენ სატელეკომუნიკაციო ინფრასტრუქტურის საფუძველს. ფიქსირებული ქსელები, მიუხედავად მათი განვითარების ტემპების შემცირებისა მობილური და უსადენო ტექნოლოგიების მზარდი განვითარების გამო წარმოადგენენ სადენიანი საკაბელო ინფრასტრუქტურის (ტელეფონია, ინტერნეტი, საკაბელო კანალიზაცია და ა.შ) შენარჩუნების მყარ გარანტიას. აუცილებელია საქართველოს ფიქსირებული საკაბელო ქსელის ინფრასტრუქტურის (საკანალიზაციო-საკაბელო ნაგებობები, შახტები, ჭები და სხვა) შენარჩუნება, რაც უზრუნველყოფს მომავალი თაობის ტექნოლოგიების ოპტიკური ქსელების განვითარებას.

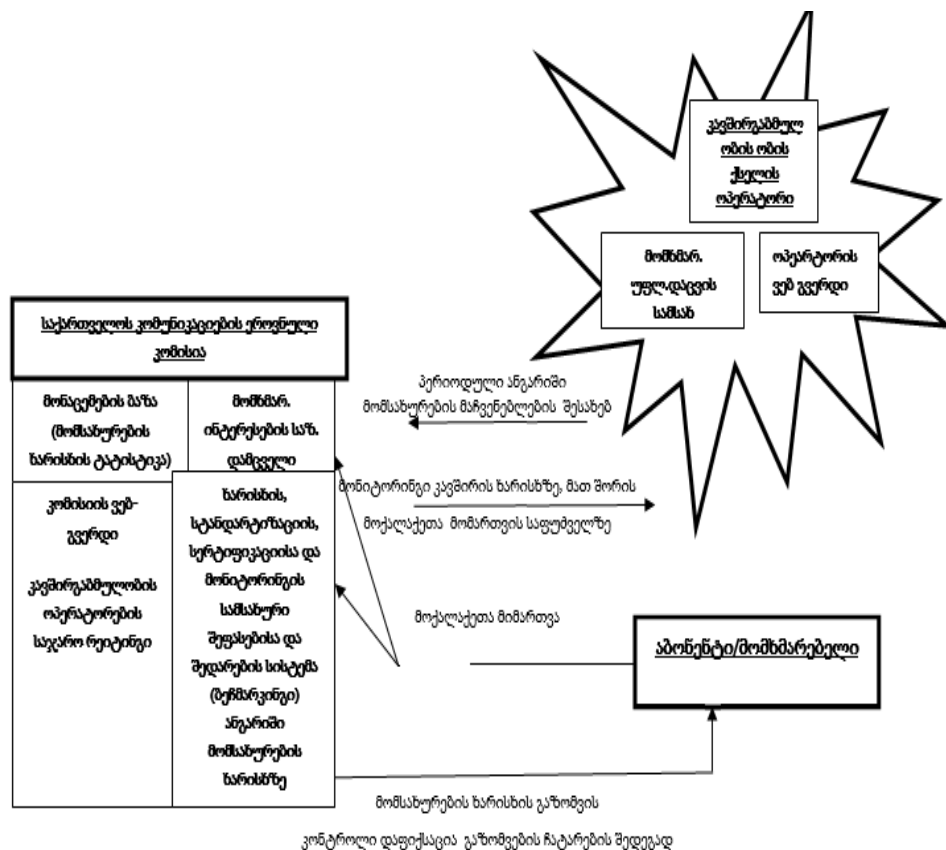
უნივერსალურ მომსახურებაზე მოთხოვნა განპირობებულია იმით, რომ ასეთი მომსახურება მოქალაქეებს საშუალებას აძლევს განახორციელონ კავშირი მისაღები ფასებით და ხარისხით. ქვეყნებში მაგ: აშშ, კანადა, ფინეთი, სადაც მარეგულირებელმა ორგანოებს არ აქვთ დააწესებული მოთხოვნები უნივერსალური მომსახურების ხარისხზე, კავშირის ოპერატორები ვალდებული არიან გამოაქვეყნონ ანგარიშები თავიანთი მომსახურების ხარისხის შესახებ ვებ-საიტებზე და მომსახურების რეალიზაციის ადგილებში. კავშირის ოპერატორები, რომლებიც არ შეასარულებენ დადგენილ მოთხოვნებს ჯარიმდებიან.

საქართველო მიეკუთვნება იმ ქვეყნების კატეგორიას, სადაც მარეგულირებელ კომისიას არ აქვს დააწესებული მოთხოვნები უნივერსალური მომსახურების ხარისხზე, კომისია ამ ეტაპზე არ უწესებს ოპერატორებს რაიმე მოთხოვნას გამოაქვეყნონ ინფორმაცია ხარისხის მაჩვენებლების შესახებ, თუმცა ეს რიგ ქვეყნებში აუცილებელია, ასევე აუცილებელია მარეგულირებელმა კომისიამ გამოქვეყნოს ოპერატორი

კომპანიების რეიტინგები მათ მიერ განხორციელებული კავშირის მომსახურების ხარისხის შესახებ მონაცემები. შექმნილი გარემოებების გამო უახლოეს ხანებში საქართველოს კომუნიკაციების კომისიაც ოპერატორების მიმართ დაადგენს ასეთ მოთხოვნებს.

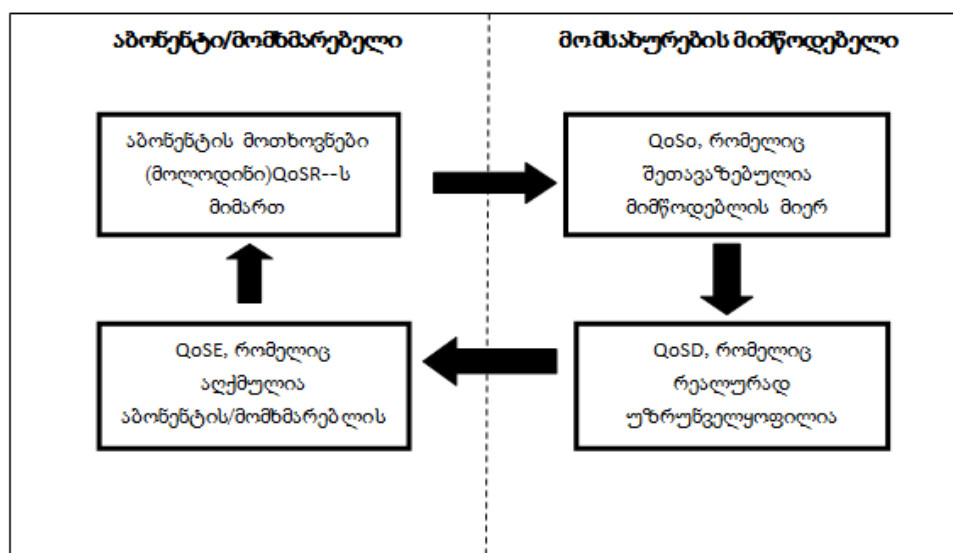
1.3. კავშირის მომსახურების ხარისხის მიწოდების კონტროლის მონიტორინგის სისტემის პრინციპები და ფუნქციონირება

კავშირის მომსახურების ხარისხის სისტემა ითვალისწინებს სამ მონაწილეს: საქართველოს კომუნიკაციების კომისიას, კავშირგაბმულობის ოპერატორებს და აბონენტებს/მომხმარებლებს (ნახ.1.1)



ნახ. 1.1. საქართველოს კავშირის მომსახურების ხარისხის მონიტორინგის სისტემა

საქართველოს კავშირის მომსახურების ხარისხის მონიტორინგის სისტემის ძირითადი რგოლებია: აბონენტი/მომხმარებელი, რომელიც აყალიბებს თავის მოთხოვნებს მომსახურების ხარისხის მიმართ (იხ. ნახ.1.2. ოთხი მოსაზრება), საერთო სარგებლობის კავშირგაბმულობის ქსელის ოპერატორი, რომელიც წარმოადგენს მომსახურების მიმწოდებელს, საქართველოს კომუნიკაციების ეროვნული კომისია, რომელიც კავშირის მომსახურების ხარისხზე წინასწარ შემუშავებული გაზომვისა და შეფასების მეთოდოლოგიის, მაჩვენებლებისა და ნორმების, შესაბამისი აპარატურული და სხვა საშუალებებით (მაგალითად, მომხმარებელთა გამოკითხვებით) აფასებს და განსაზღვრავს კავშირის მომსახურების ხარისხს. კავშირის მომსახურების ხარისხის მონიტორინგის სისტემაში ჩართული არიან კომისიის ხარისხის, სტანდარტიზაციის, სერტიფიკაციისა და მონიტორინგის მომხმარებელთა უფლებების დაცვის სამსახურები. ინფორმაცია კავშირგაბმულობის ოპერატორების საჯარო რეიტინგის შესახებ პერიოდულად ქვეყნდება კომისიისა და ოპერატორების ვებ გვერდებზე, აისახება კომისიის სტატისტიკურ ინფორმაციაში და ანგარიშებში.



ნახ. 1.2. ოთხი მოსაზრება მომსახურების ხარისხზე

1.4. შეთანხმება მომსახურების დონეზე (SLA- Service Layer Agreement) და კავშირის მომსახურების ხარისხის განსაზღვრის მოდელი ETSI-ის მიხედვით

კავშირის მომსახურების უზრუნველსაყოფად გამოყენებულ უნდა იქნას მეთოდი შეთანხმება მომსახურების დონეზე (SLA- Service Layer Agreement), რომელიც არეგულირებს მხარეების (მომხმარებლისა და მომსახურების მიმწოდებლის) მოვალეობებს, მათ შორის საექსპლუატაციო, სამართლებრივ და ეკონომიკურ საკითხებზე). ITU-T E.860 (International Telecommunication Union-ITU) კავშირგაბმულობის საერთაშორისო გაერთიანება, რეკომენდაციის მიხედვით ტერმინი SLA-განსაზღვრულია, როგორც ოფიციალური შეთანხმება ორ ან მეტ მხარეს შორის საექსპლუატაციო მახასიათებლების საკითხებზე, წაყენებულ მოთხოვნებზე და მხარეების ვალდებულებებზე. SLA შეიძლება მოიცავდეს მდგომარეობას პარამეტრებზე, რომლებიც ახასიათებს კავშირგაბმულობის ქსელის მუშაობას, ტარიფიკაციას, ბილინგს, მიწოდებული მომსახურებების მახასიათებლებს. SLA შეიძლება გაფორმებული იყოს როგორც კავშირგაბმულობის ოპერატორებს ისე კავშირგაბმულობის ოპერატორსა და აბონენტს/მომხმარებელს შორის. SLA საკითხებით დაკავებულია საერთაშორისო ორგანიზაციები: ITU-T, ETSI, IETF, და სხვა. მომსახურების ხარისხის პარამეტრები - მნიშვნელობები, რომლებიც მიღებულია გაზომვის და/ან მომხმარებლების გამოკითხვის შედეგად, რომლებითაც ფასდება მომსახურების ხარისხის პარამეტრები. მომსახურების ხარისხის მაჩვენებლები - მნიშვნელობები, რომლებიც მიღებულია კავშირის ხარისხის პარამეტრების გამოთვლების შედეგად. კავშირის ხარისხის მაჩვენებლების და პარამეტრების არჩევა უნდა განხორციელდეს შემდეგი პრინციპებით:

I პრინციპი: მაჩვენებლები და პარამეტრები გასაგები უნდა იყოს აბონენტებისა და მომხმარებლებისათვის;

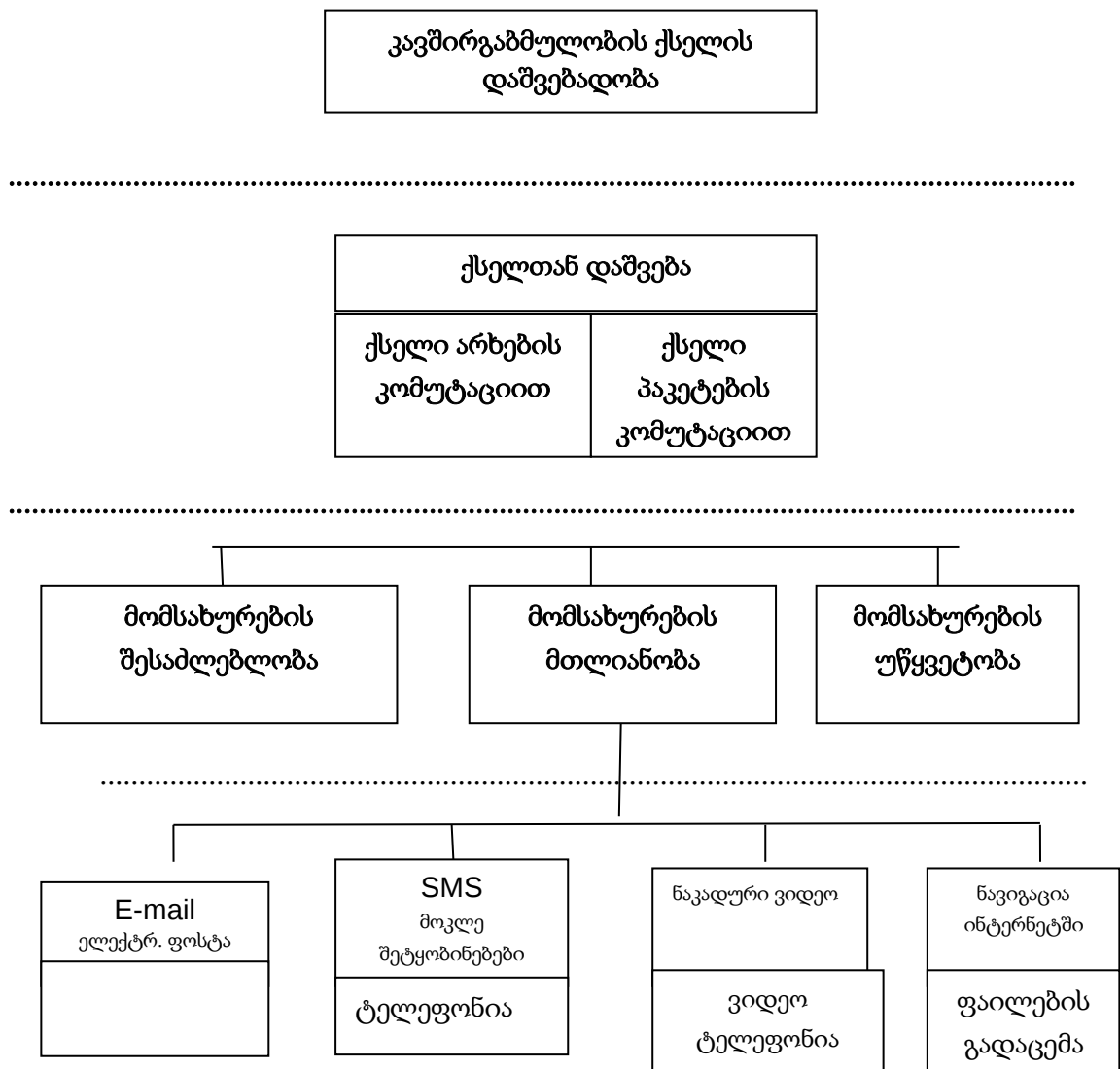
II პრინციპი: მაჩვენებლებით და პარამეტრებით უნდა ხასიათდებოდეს მომსახურება დასაწყისიდან ბოლომდე, ანუ მიმწოდებლიდან მომხმარებელამდე და არა ქსელის ცალკეულ უბნამდე;

III პრინციპი: მაჩვენებლები და პარამეტრები არჩეული უნდა იქნას საუკეთესო პრაქტიკის საფუძველზე;

IV პრინციპი: მაჩვენებლები და პარამეტრები არჩეული უნდა იქნას მათი შეფასების მეთოდების გათვალისწინებით (ჩატარებული გაზომვების ღირებულება და შედეგების დამუშავება).

V პრინციპი: ხარისხის მაჩვენებლების და პარამეტრების დამტკიცებამდე მარეგულირებელმა ორგანომ უნდა ჩაატაროს მათი საჯარო განხილვა კავშირგაბმულობის ოპერატორებისა და მომსახურების მიმღებებისათვის (მომხმარებლებისათვის).

მომსახურების ხარისხის მაჩვენებლების განსაზღვრის მოდელი ETSI-ს შესაბამისად წარმოდგენილია ნახ.1.3.



ნახ. 1.3. მომსახურების ხარისხის მაჩვენებლების განსაზღვრის მოდელი ETSI-ს შესაბამისად

1.5. კავშირის მომსახურების ხარისხის მონიტორინგის ჩატარება

კავშირის მომსახურების ხარისხის მონიტორინგის ჩასატარებლად წინასწარ უნდა განისაზღვროს მონიტორინგის ჩატარების არეალი, დასადგენი მაჩვენებლები და პარამეტრები, სატრანსპორტო საშუალების სიჩქარე, რომელზეც დამონტაჟებულია გამზომი აპარატურა, გაზომვის პერიოდულობა და სხვა. კავშირის მომსახურების ზედამხედველობას უნდა დაექვემდებაროს ძირითადი მაგისტრალები, როგორც მობილური კავშირით, ისე FM რადიომაუწყებლობის არხის (არხების) გამჭოლი

დაფარვის თვალსაზრისით. საქართველოს ძირითადი, მეორეხარისხოვანი ავტო და სარკინიგზო მაგისტრალების, დიდი ქალაქების კავშირის ხარისხის მაჩვენებლების განსაზღვრა.

პირველი თავის დასკვნა

განსაზღვრულია, რომ სატელეკომუნიკაციო სერვისების განვითარების თანამედროვე პირობებში ქსელური ოპერატორის არჩევის დროს მომხმარებლები ორიენტაციას აკეთებენ ორ პარამეტრზე: მომსახურების ღირებულებასა და ხარისხზე, ხოლო მომსახურების თანაბარი ღირებულების შემთხვევაში - მომსახურების ხარისხზე.

ქვეყნის სატელეკომუნიკაციო სისტემაში აჟამად არსებული მდგომარეობიდან გამომდინარე, საქართველო მიეკუთვნება იმ ქვეყნების კატეგორიას, სადაც მარეგულირებელ კომისიას არ აქვს დაწესებული მოთხოვნები უნივერსალური მომსახურების ხარისხზე, ჩნდება მოთხოვნა მარეგულირებელმა კომისიამ გამოაქვეყნოს ოპერატორი კომპანიების რეიტინგები მათ მიერ განხორციელებული კავშირის მომსახურების ხარისხის შესახებ. რაც გაზრდის კონკურენციას ტელეკომუნიკაციის ოპერატორებს შორის.

კავშირის ხარისხის მაჩვენებლების მუდმივი მონიტორინგი და მათ ცვლილებაზე დროული რეაგირება, ოპერატორ კომპანიებს საშუალებას მისცემს გააკონტროლონ ქსელის ტექნიკური მდგომარეობა, აწარმოონ მოწყობილობების დროული განახლება, შეინარჩუნონ არსებული აბონენტები და ჰქონდეთ გარანტია მიიღონ ახალი მომხმარებლები, იმ პირობებშიც, როდესაც ადგილი აქვს აბონენტების პორტაბელობას.

წარმოდგენილი რეკომენდაციების და ღონისძიებების გატარება მნიშვნელოვნად შეუწყობს ხელს საქართველოს სატელეკომუნიკაციო სექტორის ევროკავშირის შესაბამის სტრუქტურებთან ინტეგრაციას.

თავი 2. გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან ოპტიკურ სისტემებში კავშირის ხარისხის კვლევის საკითხები

კავშირის ხარისხის შეფასების ერთ - ერთ მთავარ კრიტერიუმს წარმოადგენს ბიტურ შეცდომათა კოეფიციენტის ან ბიტურ შეცდომათა ალბათობის (BER- Bit Error Rate) მნიშვნელობის განსაზღვრა. [2,3]. ორობითი სიმბოლოების (ბიტების) გადაცემისას გცბოს-ში, შეცდომათა კოეფიციენტი რიცხობრივად ემთხვევა შეცდომათა ალბათობის მნიშვნელობას, ვინაიდან „1“ და „0“ თანაბარალბათური გადაცემის დროს შეცდომათა ალბათობა შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

$$P_{\text{Sec d}} = [P(0/1) + P(1/0)]$$

სადაც $P(0/1)$ - „0“-ის მიღების ალბათობაა „1“-ის გადაცემისას (ცრუ „1“-ის გაშვების ალბათობა); $P(1/0)$ - „1“-ის მიღების ალბათობაა „0“-ის გადაცემის დროს. (ცრუ „1“-ის მიღების ალბათობა). აქედან გამომდინარე, ცნებებს „ბიტურ შეცდომათა კოეფიციენტი“ და „ბიტურ შეცდომათა ალბათობა“ თანაბარი მნიშვნელობები გააჩნიათ, წარმოადგენს გცბოს - ის განზოგადებულ მაჩვენებელს და რიცხობრივად:

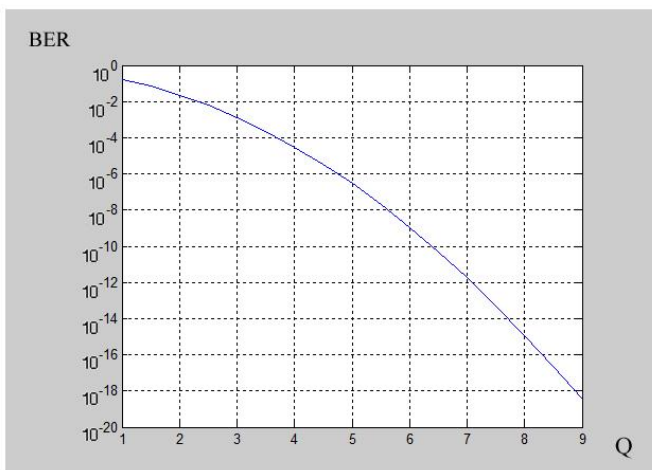
$$\text{BER} \equiv P_{\text{Sec d}} = K_{\text{Sec d}} \cdot$$

ბიტური შეცდომები წარმოადგენს კავშირის ხარისხის გაუარესების და არხის გამტარუნარიანოს შემცირების ძირითად წყაროს და ხასიათდებიან სტატისტიკური პარამეტრებით და ნორმებით, რომლებიც განისაზღვრებიან ამ ნორმების შესრულების შესაბამისი ალბათობით. არსებობს გრძელვადიანი და ოპერატიული ნორმები. გრძელვადიანი ნორმები განისაზღვრება ITU-T G.821 და G.826 რეკომენდაციებით, ხოლო ოპერატიული - M.2100, M.2110 და M.2120 რეკომენდაციებით. ამასთან ერთად M.2100-ის მიხედვით ციფრული ტრაქტის ხარისხი შეცდომათა კრიტერიუმის მიხედვით იყოფა სამ კატეგორიად:

ნორმალური - $\text{BER} < 10^{-6}$; შემცირებული - $10^{-6} \leq \text{BER} < 10^{-3}$
(წინასაავარიო მდგომარეობა); მიუღებელი $\text{BER} \geq 10^{-3}$ (ავარიული

მდგომარეობა). მოთხოვნები გცბოს-ში კავშირის ხარისხისა და შეცდომათა ალბათობის მიმართ მნიშვნელოვნად მაღალია, ვიდრე კავშირის სხვა სისტემებში. გცბოს-ში ბიტურ შეცდომათა ალბათობის განსაზღვრისას განასხვავებენ გაზომვების რეჟიმს კავშირის სისტემის ექსპლუატაციის პირობებში და რეჟიმს გცბოს -ის მშენებლობისა და გამოცდის (ინსტალაციის) პირობებში. ცხადია, პირველ შემთხვევაში გაზომვები და შეფასება უნდა განხორციელდეს კავშირის შეუწყვეტლად. აქედან გამომდინარე, გცბოს დაპროექტებისას ტექნიკური დავალების პირობები მოიცავს მრავალ მოთხოვნას: ოპტიკური კაბელის და მულტიპლექსირების ტიპის შერჩევა, მაგისტრალის კონფიგურაციის, ოპტიკური გამაძლიერებლებისა და რეგენერატორების რაოდენობის განსაზღვრა, საბოლოო და საშუალო პუნქტებში გამოყოფილი არხების რაოდენობა (რომელიც თავისთავად დამოკიდებულია ამ პუნქტებში გამოსაყოფ არხებზე), რეგიონის ეკონომიკური სტატუსი და განვითარების პერსპექტივა, სადაც დაგეგმილია ოპტიკურ - ბოჭკოვანი მაგისტრალის მშენებლობა და მრავალი სხვა ფაქტორი. გაზომვების ჩატარებისას მნიშვნელოვანია არხების გამტარუნარიანობა, ანუ გადაცემის სიჩქარე. ამიტომ განასხვავებენ გაზომვებს დაბალი სიჩქარის და მაღალი სიჩქარის პირობებში. მაღალი სიჩქარის პირობებში 5 - 10 გბტ/წმ სიჩქარის დროს შეცდომათა კოეფიციენტის დადგენას შეიძლება რამოდენიმე საათი დასჭირდეს, მითუმეტეს, რომ გცბოს ხასიათდება შეცდომათა დაბალი ალბათობით $10^{-9} - 10^{-15}$. ვინაიდან ასეთი გაზომვები იკავებს დროის დიდ შუალედს გცბოს არხებისათვის (16-160-300 არხი WDM, DWDM ტალღური მულტიპლექსირების სისტემები), რაც სრულიად მიუღებელია. პრობლემის გადასაწყვეტად შეიძლება ვისარგებლოთ ირიბი მეთოდით, ცალსახა ფუნქციონალური დამოკიდებულებით BER- სა და სიგნალი/ხმაური ფარდობას შორის. ამ დროს BER -ის დასადგენად საჭიროა გამზომი აპარატურის მეშვეობით გამოვთვალოთ ფარდობა სიგნალი/ხმაური. ანალიზურად მიღებულია და ექსპერიმენტალურად დადასტურებულია

ფუნქციონალური კავშირი $BER = \Psi(s/x)$ სიგნალი/ხმაური რომლის მიხედვითაც შესაძლებელია შეცდომის კოეფიციენტის გამოთვლა. ორობითი სიგნალისათვის ასეთ ფუნქციას წარმოადგენს კრამპის ფუნქცია. ოპტიკური სიგნალების გადაცემის ხარისხობრივი მახასიათებლების შეფასებისთვის იდენტურია Q - ფაქტორის განსაზღვრა, ვინაიდან არსებობს ცალსახა დამოკიდებულება BER -სა და Q - ფაქტორს შორის. ამის გამო, ხშირად ამ მაჩვენებლებს მიუთითებენ, როგორც - $Q(BER)$. აქედან გამომდინარე სარგებლობენ დამოკიდებულებით $BER = \psi(Q)$ (ნახ.2.1)



ნახ. 2.1. დამოკიდებულება $BER = \psi(Q)$

Q -ფაქტორი იანგარიშება ფორმულით:

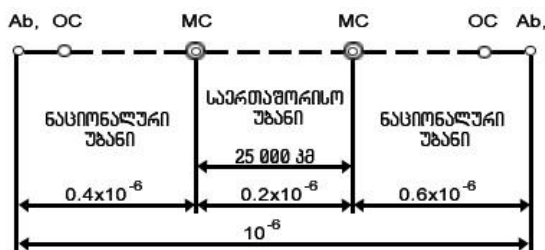
$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad Q(db) = 10 \lg(Q^2) = 20 \lg(Q); \quad (2.1)$$

სადაც I_1 - ციფრული ნაკადის „1“-ის დონეა, I_0 - ციფრული ნაკადის „0“ დონის მნიშვნელობაა, შესაბამისად σ_1 და σ_0 „1“-ის და „0“-ის დონეების საშუალო კვადრატული გადახრებია. BER -ის მნიშვნელობა გამოითვლება შეცდომათა ფუნქციის (ლაპლასის ფუნქცია, ალბათობის ინტეგრალი) საშუალებით ან მისი მაპროქსიმირებელი ფორმულით:

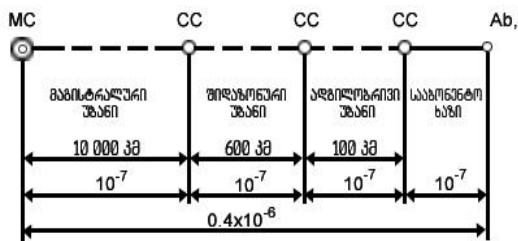
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{Q\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right); \quad (2.2)$$

გცბოს - ის ხარისხობრივი მაჩვენებლების განსაზღვრისას ყურადღება უნდა მივაქციოთ შემდეგ ძირითად ფაქტორებს: არსებობს ძირითადი არხის სიჩქარის (64 კბტ/წმ) იმპულსურ კოდურად მოდულირებული (იკმ) სიგნალის გადაცემის შეცდომათა კოეფიციენტის ნორმირებული დონე 27500 კმ მანძილზე (ნახ. 2.2)

შეცდომათა კოეფიციენტის ნორმირება ძირითადი ციფრული არხისთვის საერთაშორისო კავშირის შემთხვევაში წარმოდგენილია ნახ. 2.3 -ზე.



ნახ. 2.2 შეცდომათა კოეფიციენტის ნორმირება საერთაშორისო კავშირის (შეერთების) დროს



ნახ. 2.3 შეცდომათა კოეფიციენტის ნორმირება ძირითად ციფრულ არხზე საერთაშორისო კავშირის (შეერთების) დროს

თუ გავითვალისწინებთ, რომ ციფრული გადაცემის დროს ძირითად ციფრულ არხში შეცდომები ჯამდება, შესაძლებელია მივიღოთ პირობა შეცდომის კოეფიციენტის დასაშვები მნიშვნელობისათვის სახაზო ტრაქტის 1 კმ მანძილისათვის. კერძოდ, მაგისტრალური უბნისათვის $K_{Sec\ d\ ma} = 10^{-7}/100000 = 10^{-11}$; შიდა ზონური უბნისათვის $K_{Sec\ d\ Sz} = 10^{-7}/600 = 1.67 \cdot 10^{-10}$; ადგილობრივი უბნისათვის $K_{Sec\ d\ au} = 10^{-7}/100 = 10^{-9}$. სადაც

მა(მაგისტრალური), შზ (შიდა ზონური) აუ (ადგილობრივი უბანი) $K_{Sec d}$ მითითებული საფუძვლად უდევს მოთხოვნებს ერთეულოვანი რეგენერატორების მიმართ

$$K_{Sec d.r eg} = K_{Sec d} \cdot L_{r eg}$$

საბოლოო პუნქტებს შორის მანძილის შესაბამისად სახაზო ტრაქტის სიგრძეზე შესაძლებელია განთავსდეს რამოდენიმე რეგენერაციული პუნქტი. შეცდომები, რომლებიც წარმოიშვება ციფრული სახაზო ტრაქტის თითოეულ რეგენერატორში შეიძლება ჩავთვალოთ დამოკიდებულ შემთხვევით სიდიდეებად. ამის გამო შეცდომათა ალბათობა სახაზო ტრაქტში n რეგენერატორის არსებობისას იზრდება n - ჯერ, ანუ მთლიანი სახაზო ტრაქტისათვის დამაბოლოვებელ სადგურებს შორის შეცდომის კოეფიციენტი:

$$K_{Sec d.r eg.sae r To} = n \cdot K_{Sec d.r eg.1}$$

აქედან გამომდინარე თუ მოცემულია $K_{Sec d.r eg.sae r To}$ ერთ რეგენერაციულ უბანზე უნდა უზრუნველყოთ

$$K_{Sec d.r eg.1} = K_{Sec d.r eg.sae r To} / n$$

ე. ი. რაც მეტია სახაზო ტრაქტის გასწვრივ განთავსებული რეგენერატორების რაოდენობა, მით მეტი მოთხოვნა წაეყენება გცბოს შეცდომათა კოეფიციენტის მიმართ. როგორც წესი, შეცდომათა კოეფიციენტი მთელი სახაზო ტრაქტისათვის მოიცემა პროექტირების პირობით.

2.1. ბიტურ შეცდომათა ალბათობის კოეფიციენტის (BER) შეფასება ციფრული კავშირის ხარისხისა მაჩვენებლის Q- ფაქტორის განსაზღვრის მეშვეობით ციფრული ორობითი სიგნალის სიმბოლოების დონეებისა და დისპერსიების სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის

რიგ შემთხვევაში გვბოს - ის მიმღების გადამწყვერ მოწყობილობაში ზღურბლის დონე (I_0) განისაზღვრება, როგორც „1“ და „0“-ის დონეებს შორის სხვაობის ნახევარი. [35]თუმცა ზღურბლის დონე დამოკიდებულია მრავალ ფაქტორზე, როგორებიცაა „1“-ის და „0“-ის დონეები, ბიტური სიმბოლოების დისპერსიების σ_0, σ_1 მნიშვნელობები. ვინაიდან, ნებისმიერი ციფრული სისტემის ხარისხის მაჩვენებელი ძირითადად განისაზღვრება Q-ფაქტორით, ამიტომ მნიშვნელოვანია განვსაზღვროთ ბიტურ შეცდომათა ალბათობის კოეფიციენტის (BER) დამოკიდებულება ზღურბლის დონის (I_0) მნიშვნელობის მიმართ. ციფრული სისტემების მუშაობა ითვლება ნორმალურად მხოლოდ იმ შემთხვევაში თუ BER არ აღემატება მოცემულ შემთხვევაში გამოყენებული ციფრული სტანდარტით განსაზღვრულ დონეს. თანამედროვე კავშირის ოპტიკური ხაზები აიგება ისე, რომ დააკმაყოფილოს ნებისმიერი ქსელური სტანდარტი. ამის გამო, ასეთი ციფრული სისტემების დაპროექტების, ანგარიშისა და მშენებლობის დროს გაითვალისწინება საკმაოდ მკაცრი შეზღუდვა ბიტურ შეცდომათა ალბათობის კოეფიციენტის მიმართ ($BER=10^{-9}$ -დან $BER=10^{-15}$ -მდე). გვბოს-ის ხარისხის შემცირებაზე მოქმედებს ისეთი ფაქტორები, როგორიცაა: დისპერსია(საშუალო კვადრატული გადახრა), არაწრფივი ეფექტები ოპტიკურ ბოჭკოში, ტაიმერების არასტაბილობა, პირობითი სპონტანური გამოსხივება და სხვა. ამ ფაქტორების კუმულიანტური ზემოქმედება შეიძლება აღიწეროს ოთხი პარამეტრით: ციფრულ ხაზში გადაცემული „0“ და „1“ დონეებით, შესაბამისად, I_0 და I_1 და მათი საშუალოკვადრატული

გადახრებით σ_0 და σ_1 . აქედან გამოდინარე, BER-ის განსასაზღვრად საჭიროა ერთი მაჩვენებლის, კავშირის ხარისხის მაჩვენებლის Q-ფაქტორის განისაზღვრა, რომელიც იანგარიშება, როგორც:

$$BER = \frac{|I_1 - I_0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (2.3)$$

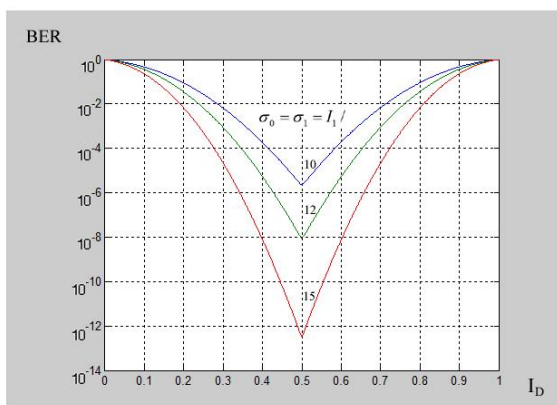
BER-ის მნიშვნელობასა და Q-ს მნიშვნელობას შორის არსებობს ასეთი დამოკიდებულება

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{Q\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right) \quad (2.4)$$

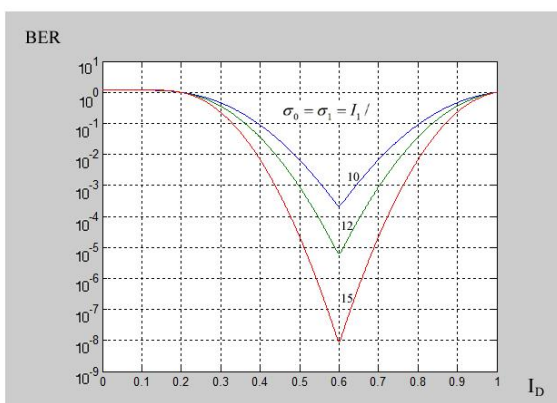
ქვემოთ მოყვანილია ფორმულა, რომლის მიხედვითაც გამოთვლილ იქნა ბიტურ შეცდომათა ალბათობის (BER) მნიშვნელობის დამოკიდებულება ზღურბლის დონე (I_D) მნიშვნელობის მიმართ $/2/$:

$$BER = \frac{1}{4} \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{I_1 - I_D}{\sigma_1 \sqrt{2}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{I_D - I_0}{\sigma_0 \sqrt{2}}\right) \right] \quad (2.5)$$

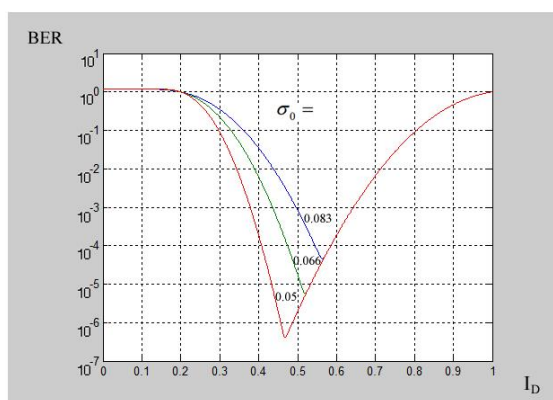
ნახ. 2.4. 2.5. 2.6 – ზე, წარმოდგენილია გრაფიკები $BER=Y(I_D)$, როდესაც ბიტური სიმბოლოების დისპერსიები $\sigma_0 = \sigma_1 = \frac{I_1}{10}; \frac{I_1}{12}; \frac{I_1}{15}$, აგრეთვე σ_0 -ის, σ_1 -ის, „1“-ის (I_1) და „0“-ის (I_0) დონეების სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის.



ნახ. 2.4. ბიტური სიმბოლოების დისპერსიები $\sigma_0 = \sigma_1 = \frac{I_1}{10}; \frac{I_1}{12}; \frac{I_1}{15}$, „1“-ის დონე $I_1=1$, „0“-ის დონე $I_0=0$



ნახ. 2.5. ბიტური სიმბოლოების დისპერსიები $\sigma_0 = \sigma_1 = \frac{I_1}{10}; \frac{I_1}{12}; \frac{I_1}{15}$, „1“-ის დონე $I_1=1$, „0“-ის დონე $I_0=0.2$



ნახ. 2.6. ბიტური სიმბოლოების დისპერსიები, $\sigma_0 = 0.05; 0.066; 0.083$ $\sigma_1 = 0.1$. „1“-ის დონე $I_1=1$, „0“-ის დონე $I_0=0.2$

ამ დამოკიდებულებებიდან ჩანს, რომ, როდესაც, „1“ და „0“ დონეებს გააჩნიათ მაქსიმალური და მინიმალური შესაძლო მნიშვნელობები „1“-ის დონე $I_1=1$, „0“-ის დონე $I_0=0$, მაშინ, გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის მნიშვნელობა $I_D=0.5$, $\sigma_1 = \sigma_0$ ნებისმიერი დასაშვები მნიშვნელობის დროს (ნახ. 2.4), ამ შემთხვევაში BER-ს გააჩნია სხვადასხვა მნიშვნელობები, კერძოდ, $\sigma_1 = \sigma_0 = I_1/10$, $BER \approx 10^{-6}$; $\sigma_1 = \sigma_0 = I_1/12$, $BER = 10^{-8}$; $\sigma_1 = \sigma_0 = I_1/15$, $BER \approx 10^{-12}$. გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის ზრდის კვალობაზე ($I_D=0.6$) შეცდომათა ალბათობის მნიშვნელობა თანდათან მატულობს და შესაბამისად ხდება $BER=10^{-3.5}$; $BER=10^{-5}$, $BER=10^{-8}$ (ნახ. 2.4). ბიტური სიმბოლოების დისპერსიების სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს $\sigma_0 = 0.05$; 0.066 ; 0.083 , $\sigma_1 = 0.1$, 0.2 , ხოლო „1“-ის დონე $I_1=1$ და „0“-ის დონე $I_0=0.1, 0.2$, ბიტურ შეცდომათა კოეფიციენტი მოქცეულია $BER=10^{-2}-10^{-8}$ ფარგლებში, გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლი კი $I_D=0.3-0.45$ -მდე (ნახ.2.5).

ამრიგად, დადგენილია დამოკიდებულებები გცბოს-ის მიმღების გადამწყვეტ მოწყობილობაში ორობითი სიმბოლოების დონეების და შესაბამისი დისპერსიების სხვადასხვა მნიშვნელობებს შორის, რომელთა მიხედვითაც შესაძლებელია შევაფასოთ ციფრული სისტემის ხარისხის მაჩვენებელი Q-ფაქტორის (ბიტურ შეცდომათა კოეფიციენტის - BER) მნიშვნელობა.

2.2. შეცდომათა ალბათობის გაზომვის პრინციპები გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში(გცბოს)

შეცდომათა კოეფიციენტი (BER - Bit Error Rate) შეუცვლელი პარამეტრია გცბოს-ის ხარისხობრივი მაჩვენებლების შეფასებისას. [35] კერძოდ, ბოჭკოვან ოპტიკური არხების, ციფრული სისტემებისა და აპარატურის (მაგალითად რეგენერატორების) გამოცდისას მისი დაპროექტების, მონტაჟის და რემონტის ეტაპების დროს, როდესაც

აპარატურა ექსპლუატაციაში შესული არ არის. მაგრამ. მას გააჩნია ერთი ნაკლი, ეს მაჩვენებელი პრაქტიკულად შეუძლებელია გამოყენებულ იქნას მაგალითად IP ტელეფონიის ციფრული არხის არხის შეფასებისას. ციფრული კავშირის არხში (ტრაქტში) სეანსის შეფასებისათვის ლოგიკურია გამოვიყენოთ გადაცემის შეცდომათა ფარდობითი რიცხვი დროის ფიქსირებულ შუალედში - წამში ან ბიტრების ჯგუფის გადაცემის პერიოდში, რომელსაც ეწოდება ბლოკი. სწორედ ეს მაჩვენებელი უდევს საფუძვლად ITU-T- ს ორ საბაზო რეკომენდაციას G.821 და G.826. G.821 რეკომენდაციაში ციფრული შეერთების შეცდომის პარამეტრების სახით არჩეულია შემდეგი: 1.წამების რაოდენობა შეცდომებით (Errored Second, ES), რომელთაც მოიკუთვნება თითოეული წამი, რომელშიც აღმოჩენილი (აღრიცხული) იქნება თუნდაც ერთი შეცდომა, როგორც განსაზღვრებიდან გამომდინარეობს, ასეთი მიდგომის დროს ერთეულოვანი შეცდომა და შეცდომათა პაკეტი ერთმანეთისაგან არ განსხვავდებიან. 2.წამების რაოდენობა მრავალრიცხოვან შეცდომებით (Severely Errored Second, SES), სადაც SES ნიშნავს შეცდომათა კოეფიციენტით $\geq 10^{-3}$. ვინაიდან ორივე პარამეტრი ES და SES დამოკიდებული არიან გაზომვის t დროზე, ციფრული შეერთების პრაქტიკული შეფასებისათვის იღებენ მათ ფარდობით მნიშვნელობას. უნდა აღინიშნოს, რომ შეცდომათა შეფასების ორი ფართოზოლოვანი მომსახურებების სულ უფრო ფართოდ გავრცელების პირობებში G.821 რეკომენდაციის გამოყენების ჩარჩოები თანდათან ვიწროვდება. მცდელობები გამოყენებულ იქნას ფართოზოლოვანი ციფრული ტრაქტების გასაზომად წარუმატებელი აღმოჩნდა. გარდა ამისა, ხარისხის განსაზღვრა G.821- ის მიხედვით ეფუძნება ბიტურ შეცდომათა ალბათობის შეფასებას, ხოლო ეს შეცდომები თავის მხრივ შიძლება განსაზღვრულ იქნას მხოლოდ მაშინ, როდესაც ცნობილია გასაზომი ციფრული მიმდევრობა (ამ პრინციპის მიხედვით, როდესაც გვაქვს სატესტო სიგნალები (სახაზო კოდები) BER-ის გაზომვა ხდება კავშირის სისტემის გამორთულ მდგომარეობაში ყოფნისას)) ამის

გამო ტესტირება G.821- ის მიხედვით შესაძლებელია მხოლოდ ციფრული სისტემის ექსპლუატაციიდან გამოყვანის (შეჩერების) შემთხვევაში. მთლიანად გცბოს- ში, ერთ -ერთი მნიშვნელოვანი (თუ არა უმთავრესი) არის სახაზო ტრაქტის ხარისხი. გცბოს -ის მიმართ მაღალი მოთხოვნილებების შესრულებისათვის ინფორმაციის ხარისხიანად მიტანის მიზნით სახაზო ტრაქტი შეიძლება დარეზერვირდეს მთლიანად (რეჟიმი 1+1 ერთი სამუშაო, ერთი სარეზერვო) ან ნაწილობრივ 1:n - ერთი სარეზერვო და n მუშა $n=(1,2,...,14)$). მუშა და სარეზერვო ტრაქტები პროექტირდება ხარისხის მოცემული მაჩვენებლის მიხედვით, რომელთა შორის ძირითადია შეცდომათა კოეფიციენტი, ანუ გცბოს-ის დაპროექტებისას ტექნიკურ დავალებაში თავიდანვე ცადებულია შეცდომათა კოეფიციენტის მისაღწევი მნიშვნელობა. ამრიგად სპეციალისტები საჭიროებენ ახალ რეკომენდაციებს, სადაც გათვალისწინებული იქნება კავშირის ციფრული სისტემის რეალიები, მათ შორის ციფრულ შეერთებებში SDH სისტემებში და ATM სისტემებში. ამ მხრივ ყველა ამ მოთხოვნებს აკმაყოფილებს G.826 რეკომენდაცია „საერთაშორისო ციფრული შეერთებების შეცდომათა პარამეტრების და ნორმებიპირველადზე მარალ სიჩქარეზე“ უზრუნველყო ციფრული ციფრული შეერთებების შეცდომათა ტესტირების სამი მთავარი ამოცანა - ტესტირება: ნორმალური ექსპლუატაციის დროს: 1544 კბტ/წმ, 2048 კბტ/წმ და უფრო მაღალ სიჩქარეებზე ქსელებში SDH და ATM ტექნოლოგიების გამოყენებით.

პირველი ამოცანა გადაწყვეტილ იქნა ბიტებზე შეცდომების ტესტირებიდან ბლოკების მიხედვით შეცდომათა ტესტირებაზე გადასვლით. ლოკი წარმოადგენს შეცდომითი ბიტებისაგან შემდგარი ჯგუფისაგან, რომლებიც მიეკუთვნება განსაზღვრულ ბლოკს. ბლოკების კონტროლი სრულდება გადაცემის სისტემაში ჩაშენებული სპეციალური მოწყობილობების სახით, რომელთა გამოყენება გარანტიას იძლევა აღმოჩენილ იქმას შეცდომები არანაკლებ 90% საიმედოობით. შეცდომები

ციფრული კავშირის დროს კავშირის დაყოვნების გარეშე შესაძლებელია აღმოჩენილ იქნას მერავალი ხერხით. შეზღუდვა უპირველეს ყოვლისა მდგომარეობს მათ კერძო ხასიათსა და არასაკმარის სიზუსტეში. ამასთან ერთად, შეცდომათა აღმოჩენის მეთოდების მიმართ მნიშვნელოვანი მოთხოვნაა უნივერსალურობა, ეკონომიურობა და სიზუსტე. უნივერსულობა ნიშნავს მეთოდის გამოყენების შესაძლებლობას ნებისმიერი ციფრული სიგნალის მიმართ, ეკონომიურობა - დამატებითი გამტარუნარიანობის ეფექტური გამოყენება, მტავარი მოთხოვნა ბუნებრივია არის მაღალი სიზუსტე.

ამდენად BER-წარმოადგენს ერთგვარ „პოპულარულ“ მაჩვენებელს ის უჩვენებს გადაცემის მოცემული გარემოს ხარისხს და მისი გაზომვა ადვილია

BER-ტესტერის საშუალებით. ამის გამო ეს მაჩვენებელი ფართოდ გამოიყენა თანამგზავრული კავშირის არხის (თკა), სადიოსარელეო კავშირის არხის (რსკა), მოჭკოვან-ოპტიკური კავშირის არხის (ბოკა) ხარისხის შესაფასებლად. მაგალითისთვის, რსკა-თვის $BER \leq 10^{-6}$ ფაქტიურად წარმოადგენს არხის ფუნქციონალური მუშაობის უნარიანობის საზომს. კავშირგაბმულობის ქსელის თანამგზავრული კავშირის არხის ნორმალურია $BER = 10^{-7}$; ასევე, სააბონენტო არხისთვის (უკანასკნელი მილი) $BER = 10^{-7}$; ხოლო ბოკა-თვის $BER \leq 10^{-10}$. ამავე დროს, როდესაც ბოკა-თვის $BER = 10^{-9} - 10^{-15}$. მაგრამ, როდესაც მთლიანი კავშირის სისტემა შედგება რამოდენიმე მონაკვეთისაგან (სეგმენტისაგან): კავშირგაბმულობის სიმეტრიული/კოაქსიალური არხი (კს/კკ)- თკა-რსკა-ბოკა-სა, ასეთი კავშირის სისტემა უზრუნველყოფს თითქმის იმავე მოთხოვნებს კავშირის თანამგზავრული კავშირის ხარისხის მიმართ, რასაც უზრუნველყოფს კავშირის თანამგზავრული არხი $BER = 10^{-7}$ შევადაროთ ბოა-ის შეცდომათა ალბათობას $BER = 10^{-9} - 10^{-15}$. აქედან გამომდინარე, საერთაშორისო შეერთებებისა და მრავალსეგმენტიანი არხებისათვის კავშირის ხარისხის მაჩვენებლად BER არ გამოდგება. ცხადია, კავშირის ცალკეული,

დამოუკიდებელი არხებისათვის BER- ის მნიშვნელობის განსაზღვრას დიდი მნიშვნელობა აქვს.

აქედან გამომდინარე, BER- ის მნიშვნელობის დასადგენად გცბოს-ის მთლიანი შეფასებისათვის აუცილებელია გამოვიყენოთ მისი მოდელირება. როგორც ცნობილია, გცბოს წარმოადგენს მოდელირების რთულ სისტემას ინტერესს წარმოადგენს მოდელის შექმნა რომლის დროსაც შესაძლებელი იქნება ისეთი საკითხების გადაწყვეტა როგორიცაა: BER- ის ოპტიმალური მნიშვნელობის დადგენა ზვავისებური APD (Avalanche Photodiode) ფოტომიმდების ოპტიმალური მგრძნობიარობის, დროით ჯიტერზე, ოპტიკური კაბელის დისპერსიაზე, სიმბოლოთაშორის დამახინჯებაზე დამოკიდებულების მიმართ და სხვა.

მეორე თავის დასკვნა

1. ბიტური შეცდომების დიდი მნიშვნელობა ადეკვატურია კავშირის ხარისხის გაუარესების და არხის გამტარუნარიანობის შემცირების. ხასიათდება სტატისტიკური პარამეტრებით და ნორმებით, რომლებიც განისაზღვრება ამ ნორმების შესრულების შესაბამისი ალბათობით.

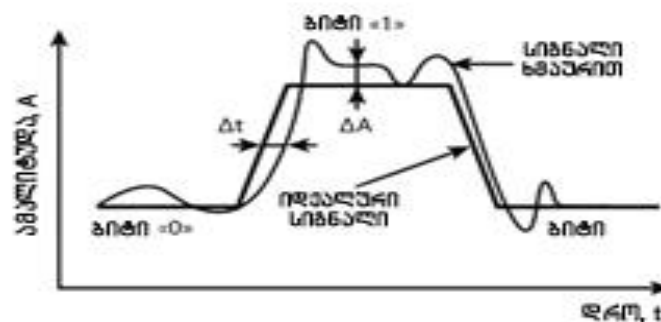
2. არსებობს ცალსახა დამოკიდებულება BER- სა და Q ფაქტორს შორის $BER = \psi(Q)$ ამიტომ ოპტიკურისიგნალების გადაცემის ხარისხობრივი მახასიათებლების შეფასებისთვის იდენტურია Q - ფაქტორის განსაზღვრა,

3. დადგენილ იქნა დამოკიდებულებები გცბოს-ის მიმდების გადამწყვეტ მოწყობილობაში ორობითი სიმბოლოების დონეების და შესაბამისი დისპერსიების სხვადასხვა მნიშვნელობებს შორის, რომელთა მიხედვითაც შესაძლებელია შევაფასოთ ციფრული სისტემის ხარისხის მაჩვენებელი Q-ფაქტორის (ბიტურ შეცდომათა კოეფიციენტის - BER) მნიშვნელობა. გამოთვლილი და აგებული იქნა კონკრეტული დამოკიდებულებები $BER = f(Q)$ და $I_1; I_0; \sigma_1; \sigma_0$ რეალურ მნიშვნელობებს შორის, აგებულია შესაბამისი გრაფიკები.

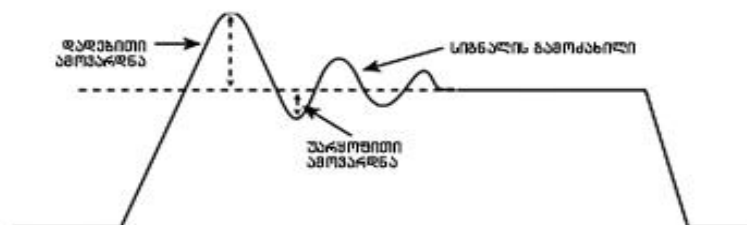
**თავი 3. ჯიტერის არსი გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან-
ოპტიკურ სისტემებში, მისი წარმოშობის მიზეზები და კავშირის
ხარისხზე შესაძლო გავლენის პირობები. შეცდომათა აღბათობის
შეფასება დროითი ჯიტერის გათვალისწინებით და
სიმბოლოთაშორისი ინტერფერენციის (ISI) პირობებში**

ჯიტერი, ანუ ფაზის ციმციმი, შეიძლება განვსაზღვროთ, როგორც „სიგნალის დასაფიქსირებელი (საჩვენებელი) უბნების გადახრა დროში მათ მიმართ მოთხოვნილი მდებარეობიდან“. [25]. ეს ნიშნავს, რომ სიგნალი სხვადასხვა მიზეზით ადრე თუ გვიან იცვლის მდგომარეობას მისი თავდაპირველად დაფიქსირებული მდებარეობის მიმართ. აქ იგულისხმება ციფრული სიგნალის მიმდევრობის იდეალურიდან გადახრა დროში და ამპლიტუდაში, ანუ, ციფრული სიგნალისათვის ”საჩვენებელ უბნებად” ითვლება მისი დაფიქსირებული მომენტიდან დროში და ამპლიტუდაში გადახრა. ჯიტერი გამოწვეულია გარე და შიდა წარმოშობის ამპლიტუდური და ფაზური ხმაურით. სიგნალის ჯიტერს გააჩნია სხვადასხვა მახასიათებლები მათი მიზეზებისა და წყაროებისაგან დამოკიდებულების თვალსაზრისით. ბოლო პერიოდში ჯიტერის მიმართულებით ჩატარებულმა თეორიულმა, ექსპერიმენტალურმა და აპარატურულმა კვლევებმა განაპირობეს ჯიტერის ზუსტი განსაზღვრის და წინასწარმეტყველების შესაძლებლობა, რაც საშუალებას იძლევა გცბოს დაპროექტებისა და ესექლუატაციის პირობებში ავამაღლოთ და გავაუმჯობესოთ გცბოს ხარისხობრივი მაჩვენებლები. გცბოს მიმდების გადამწყვეტი მოწყობილობის შედარების ბლოკში მიწოდებული ხმაურით ზედდებული იმპულსების და ამავე გადამწყვეტი მოწყობილობის სინქრონიზაციის ბლოკში გამომუშავებული მოკლე ხანგრძლიობის სტრობიმპულსების შედარებისას (ზღურბლის დონის გათვალისწინებით) მნიშვნელოვანია თავად გადაწყვეტის მიღების დრო და სტრობირების (შედარების) ადგილზე მოსული სიმბოლოს ფორმა. ჯიტერის ეფექტის გამო ადგილი აქვს გადაწყვეტილების მიღების დროის ფლუქტუაციას. თუ

სიგნალის მთლიანობა დარღვეული არ არის ასეთ შემთხვევაში სიგნალი იდეალურია. სიგნალის იდეალურობა ძირითადად ირღვევა ორი მაჩვენებლით: ამპლიტუდაში ან დროში ცვლილებით. ნახ.3.1 წარმოდგენილია იდეალური და რეალური ციფრული სიგნალები, ხოლო 3.2-ზე, წარმოდგენილია სიგნალის მთლიანობის მნიშვნელოვანი მახასიათებლები: დადებითი და უარყოფითი ამოვარდნები ასევე, სიგნალის გამომახილი.



ნახ. 3.1. იდეალური და რეალური ციფრული სიგნალი

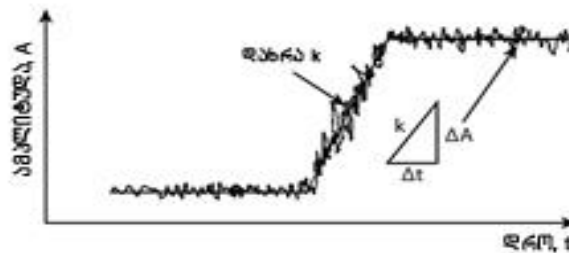


ნახ. 3.2. სიგნალის მთლიანობის მახასიათებლები: დადებითი და უარყოფითი ამოვარდნები ასევე სიგნალის გამომახილი

ხმაური შესაძლებელია აღწერილ იქნას შემდეგი ფიზიკური სიდიდეებით: ძაბვით ან სიმძლავრით. გამოვიყენოთ ტერმინი “ამპლიტუდა“. ამპლიტუდური ხმაური $\Delta A(t)$ ზედ ედება ამპლიტუდურ სიგნალს $A_0(t)$, ისე რომ, ჯამური სიგნალი $A(t) = A_0(t) + \Delta A(t)$, რომელიც შეესაბამება დროით ჯიტერს, შესაძლებელია შევაფასოთ მცირე სიგნალის დამახინჯების წრფივი თეორიით შემდეგი განტოლების მიხედვით:

$$\Delta t(t) = \frac{\Delta v}{(dA_0(t)/dt)} = \frac{\Delta t}{k} \quad (3.1)$$

სადაც, $k = (dA_0(t)/dt)$ – სიგნალის დახრა ან სიგნალის აღმასვლაა. ამპლიტუდური ხმაურის დროით ჯიტერში წრფივი გადასვლა ნაჩვენებია ნახ. 3.3-ზე.



ნახ.3.3. ამპლიტუდური ხმაურის გარდაქმნა დროით ჯიტერში დამახინჯების წრფივი მოდელის თანახმად.

განვიხილოთ ჯიტერის კავშირის ხარისხზე გავლენის კონკრეტული მაგალითი. როგორც აღინიშნა, ჯიტერის გავლენა გამოიხატება გცბოს გადაწყვეტ მოწყობილობაში ციფრული ხმაურით მასკირებული სიგნალის მიმართ გადაწყვეტილების მიღებაში, ვინაიდან მოცემული სიგნალი განიცდის ფლუქტუაციას (ფიქსირებული მდგომარეობიდან გადახრას), რაც შესაბამისად აისახება გადაწყვეტილების მიღების სიზუსტეზე. შედეგი გამოისახება სიმძლავრის ჯარიმაში, რომელიც დამოკიდებულია იმპულსის ფორმაზე.

Q-ფაქტორი შეიძლება გამოვსახოთ ფორმულით

$$Q = \frac{I_1 - \langle \Delta i_j \rangle}{(\sigma_T^2 + \sigma_j^2)^{1/2} + \sigma_T} \quad (3.2)$$

სადაც, I_1 - „1“ დონეა ციფრული ნაკადის მიმდევრობაში; Δi_j -დენის ფლუქტუაციაა; σ_T -სითბური ხმაურის დისპერსიაა; $\sigma_j - \Delta t$ დროის მიმართ დისპერსია.

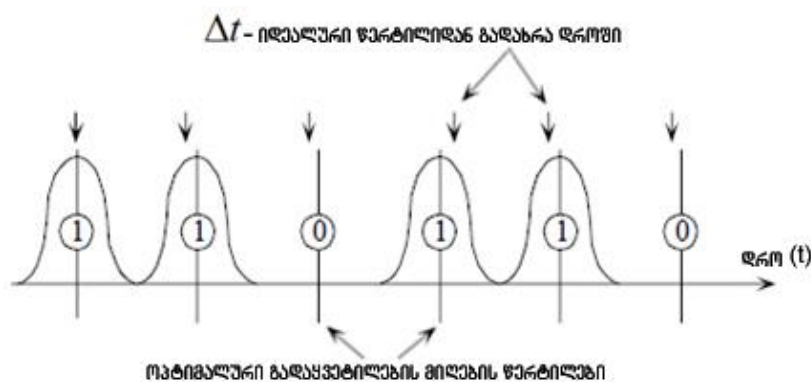
კოეფიციენტები b და δ_j გამოისახება შემდეგნაირად:

$$b = (4\pi^2 / 3 - 8)(B\tau_j)^2, \quad (3.3)$$

$$\delta_j = 10 \log_{10} \left(\frac{\overline{P(b)}}{P(0)} \right) = 10 \lg_{10} \left(\frac{1 - b/2}{(1 - b/2)^2 - b^2 Q^2 / 2} \right), \quad (3.4)$$

სადაც, $P_{\text{მიმლ.}}(b)$ -მიმღების საშუალო ოპტიკური მგრძნობიარობაა სიმძლავრის მიხედვით $P_{\text{მიმლ.}}(0)$ -მიმღების მგრძნობიარობაა სიმძლავრის მიხედვით გამორთულ მდგომარეობაში. დავამყაროთ დროითი ჯიჭერის ეფექტის გამო წარმოშობილი სიმძლავრის ჯარიმის ($P_{\text{ჯარ.}}$) დამოკიდებულება ჯიჭერის პარამეტრთან. ამისათვის მართებულია ავიღოთ დროითი ჯიჭერის პარამეტრი - $B\tau_j$ ნამრავლის სახით. ანუ, ავაგოთ დამოკიდებულება $P_{\text{ჯარ.}} = \Psi(B\tau_j)$. აქ B -ციფრული მიმდევრობის გადაცემის სიჩქარეა $B=1/T$; τ_j - საშუალო კვადრატული გადახრაა (დისპერსია), ასეთი გრაფიკი საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ ჯარიმა ნებისმიერი იერარქიის ციფრული სისტემის (STM-1, STM-4, STM-16, STM-64, STM-256...) შემთხვევაში.

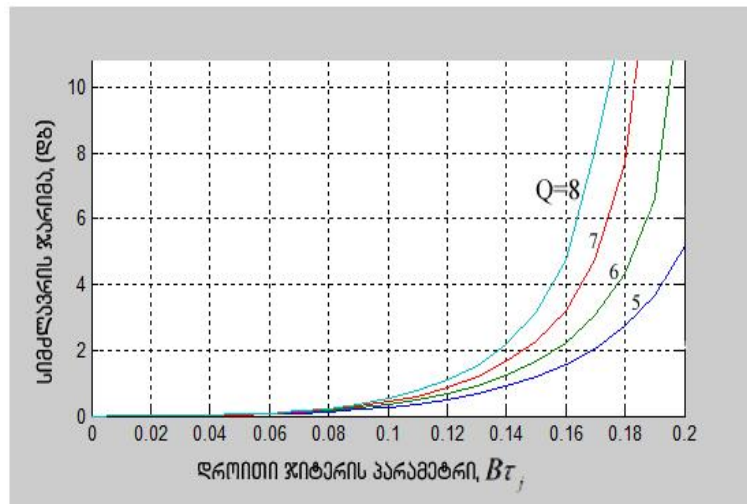
ნახ.3.4-ზე მოცემულია დროითი ჯიჭერის გავლენა გადაწყვეტილების მიღებაზე გცბოს მიმღების გადამწყვეტ მოწყობილობაში.



ნახ. 3.4. დროითი ჯიჭერის გავლენა გადაწყვეტილების მიღებაზე: ა) ოპტიმალური იმპულსის ცენტრში, ბ) რეალური იდეალური წერტილიდან Δt დროით გადახრილი ორობითი იმპულსების მიმდევრობა

1	1	0	1	1	0
1	2	3	4	5	6

ნახ. 3.5 –ზე მოყვანილია $P_{\text{ჯარ}} = \Psi(B\tau_j)$, როდესაც $Q=5,6,7,8$.



ნახ. 3.5. დროითი ჯიტერის პარამეტრის $B\tau_j$ დამოკიდებულება სიმძლავრის ჯარიმაზე Q ფაქტორის სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს. $Q=5,6,7,8$.

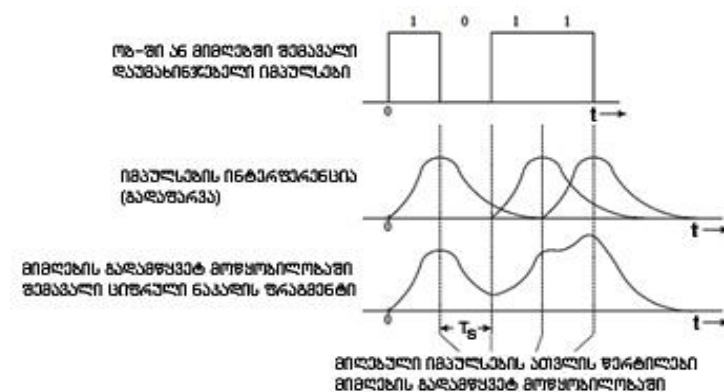
დროითი ჯიტერი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს გცბოს ხარისხობრივ მაჩვენებლებზე: სიმძლავრის ჯარიმა დამოკიდებულია $Q(\text{BER})$ მნიშვნელობაზე. ჯარიმა მით მეტი იქნება, რაც უფრო მაღალია ბიტურ შეცდომათა ალბათობა (BER); ჯიტერის მოქმედი მნიშვნელობა უნდა მერყეობდეს ბიტური ინტერვალის ხანგრძლივობის 5-10 % - ის ფარგლებში.

გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან - ოპტიკური სისტემის (გცბოს) დაპროექტებისას ამოსავალ პარამეტრს წარმოადგენს სისტემის ენერგეტიკული პოტენციალი რომელშიც კომპლექსურად არის გაერთიანებული გცბოს პოტენციალის ისეთი მახასიათებლები, როგორიცაა გცბოს გადამცემი ოპტიკური მოდულის (გომ) სიმძლავრე, გცბოს მიმღები ოპტიკური მოდულის (მომ) მგრძნობიარობა, ოპტიკური ბოჭკოს (ობ) მილევა და დისპერსია. თუმცა ვინაიდან ოპტიკური მიმღების მგრძნობიარობა პირდაპირ კავშირშია მთლიანად გცბოს ბიტურ შეცდომათა ალბათობასთან (BER), გადამწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება გცბოს ექსპლუატაციის პირობებში გასათვალისწინებელ მრავალ ფაქტორს. აქედან გამომდინარე მნიშვნელოვანია გცბოს - ის დამახასიათებელი ისეთი

მოვლენების ანალიზი როგორებიცაა სიმბოლოთშორისი ინტერფერენცია (სში-ISI), ჯიტერი, არაწრფივი პროცესები ობ- ში და სხვა.

3.1. სიმბოლოთშორისი ინტერფერენციის ძირითადი მიზეზები გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს). მოყვანილია მათი ფიზიკური არსი და შემცირების გზები

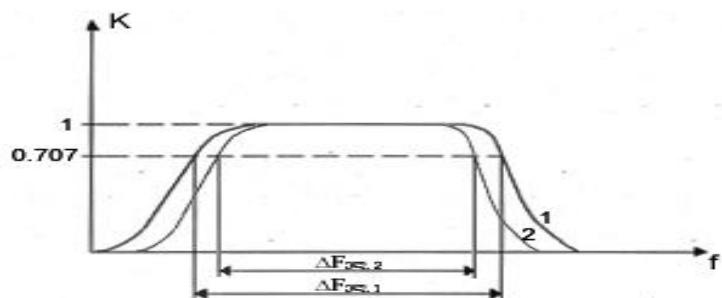
სში იწვევს დამახინჯებას ერთეულოვანი იმპულსების ურთიერთგადაფარვების გამო [28] გცბოს-ში სში გამოწვეული შეიძლება იყოს ოპტიკურ ბოჭკოში გაცემული ოპტიკური იმპულსების დისპერსიით, ასევე, გცბოს ოპტიკური მიმღები მოწყობილობის გატარების ზოლის სასრული სიგანით. ნახ. 3.7-ზე წარმოდგენილია ორობითი ციფრული სიგნალის ობ-ში გავლისას არსებული სში.



ნახ. 3.6. ბინარულ ციფრულ სისტემაში სიმბოლოთშორისი ინტერფერენციის მაგალითი

რაც შეეხება გცბოს მიმღებ მოწყობილობას, იქაც ანალოგურ მოვლენას აქვს ადგილი ოპტიკური მიმღების გატარების ზოლის სასრული სიგანის გამო. შევნიშნავთ, რომ ოპტიკური მიმღების გატარების ზოლი რამდენადმე ოპტიმალური უნდა იყოს გცბოს სახაზო ტრაქტიდან მიღებული ცოფრული მიმდევრობის სპექტრთან. ამასთან, თუ მიმღების გატარების ზოლი

მნიშვნელოვნად აღემატება ამ ციფრული სიგნალის გატარებისათვის საჭირო სიხშირულ ზოლს, მაშინ აუცილებელია მისი შემცირება, ვინაიდან ფართე ზოლის დროს შესაბამისად, პროპორციულად გაიზრდება ხმაურის დონე. ამავე დროს, გატარების ზოლის ქვემოდან შემცირება იწვევს დამახინჯებას პირველი რიგის სში-ის სახით, ხოლო გატარების ზოლის ზემოდან შეზღუდვა დამახინჯებას მეორე რიგის სში-ის სახით. ნახ.3.8–ზე წარმოდგენილია გცბოს-ის ოპტიკური მიმღების ამპლიტუდურ-სიხშირული მახასიათებელი. ცხადია, სში-ის მთლიანდ თავიდან აცილება შეუძლებელია, რადგან გცბოს-ში ერთდროულად შეიძლება არსებობდეს როგორც ობ-ს დისპერსია, ისე სში. მიმღების გადამწყვეტ მოწყობილობაში შემოსული სიგნალი საწყის, იდეალურ ციფრულ სიგნალთან შედარებით შეცვლილია, როგორც ამპლიტუდით, ისე, დროის მასშტაბში აქედან გამომდინარე, გადამწყვეტი მოწყობილობის შემადარებელ ბლოკში შემოსული იმპულსების ფიქსირების (სტრობირების) წერტილი შეიძლება იყოს სხვადასხვა სში-ის გამო. ამდენად, მოსული სიგნალის ამპლიტუდით და დროში ცვლილებამ შეიძლება გამოიწვიოს გადამწყვეტი მოწყობილობის მიერ არასწორი გადაწყვეტილების მიღება, ანუ, რიგ შემთხვევაში შეიძლება „1“-ის ნაცვლად მივიღოთ „0“ და პირიქით. აქედან გამომდინარე, შეიძლება შეიცვალოს BER.



ნახ. 3.7. გცბოს-ის მიმღები მოწყობილობის ამპლიტუდურ-სიხშირული მახასიათებელი

გცბოს-ის დაპროექტებისა და ექსპლუატაციის დროს უნდა ვეძებოთ კომპრომისი - ერთის მხრივ მემღების ეფექტური გატარების ზოლსა და

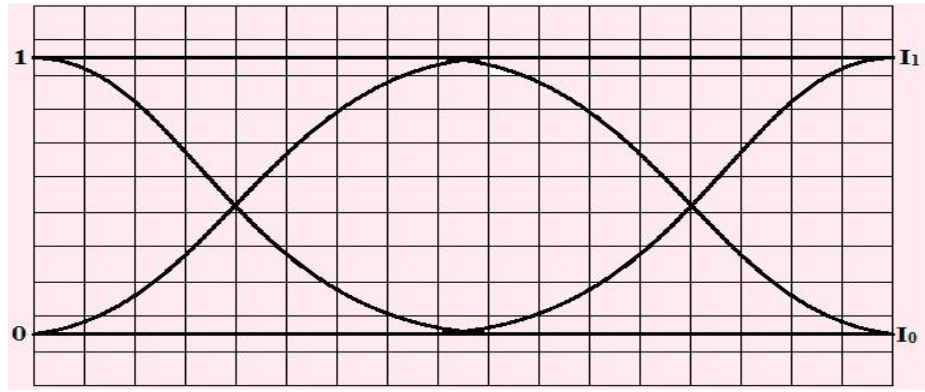
ხმაურს შორის, იმ მიზნით, რომ არ მივიღოთ მნიშვნელოვანი ხმაური ძალიან ფართე გატარების ზოლის გამო, და მეორეს მხრივ არ მივიღოთ სში მცირე გატარების ზოლის გამო.

სიმბოლოთშორისი ინტერფერენციისა და ჯიტერის წარმოქმნა შეიძლება ერთიდაიგივე წყაროდან მომდინარეობდეს. მაგალითად, არასაკუთარი ხმაური, სატელეკომუნიკაციო სისტემის კონფიგურაცია, არაიდეალური სინქრონიზაცია და სხვა. სში-ის და ჯიტერის ფიზიკურ ბუნებას შორის გარკვეული კორელაცია არსებობს. მაგალითად. ჯიტერის დეტალურ კლასიფიკაციაში ჯიტერის სახეობათა შორის (დეტერმინირებული ჯიტერი, კორელირებული ჯიტერი გვაქვს სიმბოლოთშორისი ინტერფერენცია (დამახინჯება).

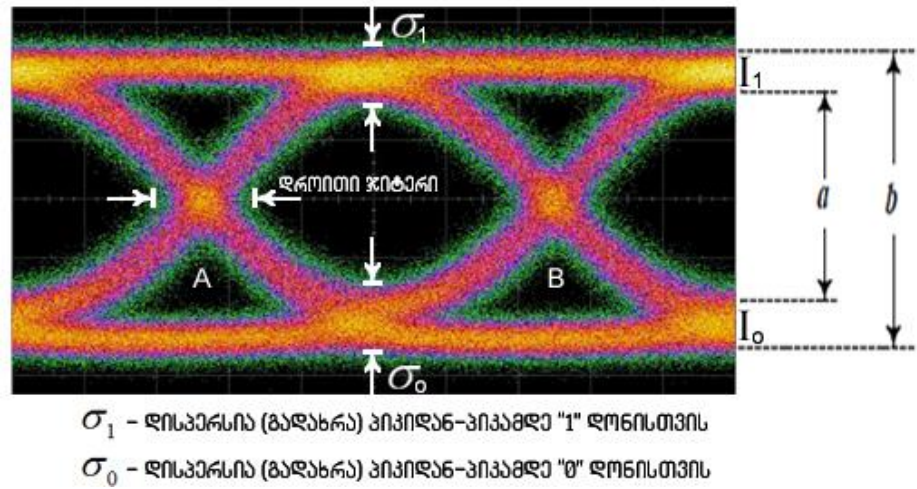
სში განპირობებულია მრავალი ფაქტორით: დისპერსიით ოპტიკურ ბოჭკოში, გცბოს მიმღები მოწყობილობის გატარების ზოლის სასრული სიგანით, მონაცემების სიგნალისა და სატაქტო სიგნალის ურთიერთქმედებით, გადაცემის მუშა ციკლის დამახინჯებით (DCD) და სხვა.

3.2. სიმბოლოთშორისი ინტერფერენციის (სში) გავლენა გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემის (გცბოს) შეცდომათა ალბათობაზე (BER), სში-ის შედეგად თვალის დიაგრამის ლიობის შემცირების გამო

გცბოს ხარისხობრივი მაჩვენებლები შეიძლება შევაფასოთ თვალის დიაგრამის საშუალებით. [26]



ნახ. 3.8. თვალის დიაგრამა ხმაურის გარეშე



ნახ. 3.9. რეალური თვალის დიაგრამა ხმაურის შემთხვევაში და მისი ზოგიერთი პარამეტრი („0“ და „1“ დისპერსია და დროითი ჯიჭერი)

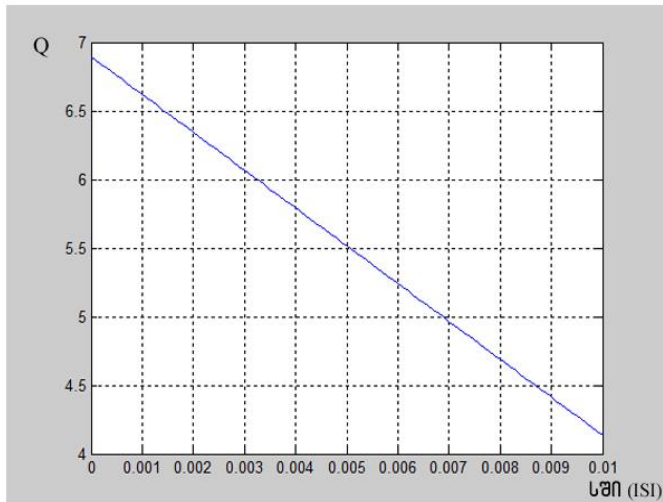
თვალის დიაგრამა საშუალებას იძლევა რაოდენობრივად დავადგინოთ მისი პარამეტრები: დიაგრამის სიმაღლე, გაშლილობა, ჯიჭერი და ა.შ. შესაძლებელია დავადგინოთ თვალის დიაგრამის ნორმალიზებული მაქსიმალური სიდიდე, სში-ის მაქსიმალური ნორმალიზებული მნიშვნელობა, სში-ის მაქსიმალური მნიშვნელობა.

$$ISI_{\max, \text{normalized}} = \frac{b-a}{b} \quad (3.5)$$

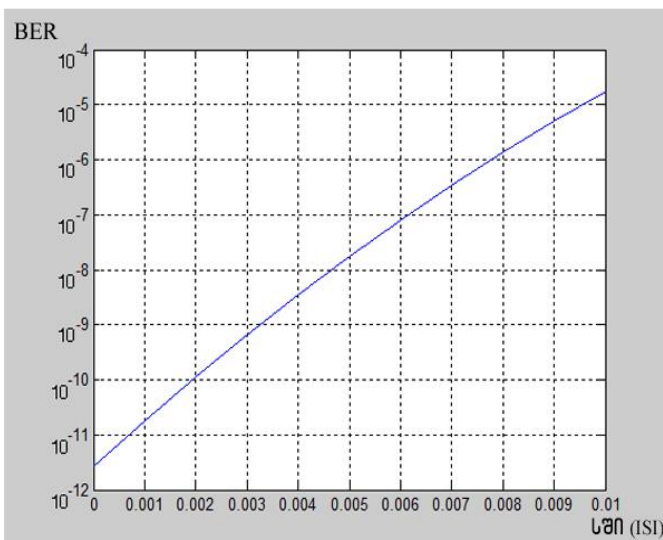
$$\delta_{ISI, \max} = 10 \log_{10} \left(\frac{b}{a} \right) \quad (3.6)$$

$$\delta_{ISI, \max} = -10 \log_{10} (1 - ISI_{\max, \text{normalized}}) \quad (3.7)$$

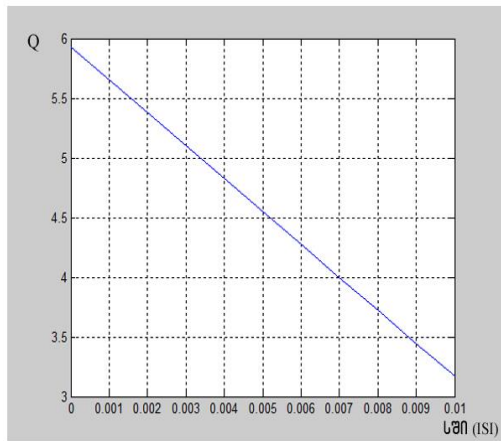
შესაძლებელია დავამყაროთ რაოდენობრივი დამოკიდებულებები Q - ფაქტორსა და სში (ISI) - $Q = \Psi(\text{ISI})$ და აქედან გამომდინარე $\text{BER} = \Psi(\text{სში})$ შორის. ქვემოთ ნახ.3.10-3.13 მოყვანილია $Q = \Psi(\text{ISI})$, $\text{BER} = \Psi(\text{ISI})$ დამოკიდებულებები I_1 და I_0 სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს, σ_1 , σ_0 მუდმივი მნიშვნელობებისას $\sigma_1 = 3.378 \cdot 10^{-3}$, $\sigma_0 = 3.373 \cdot 10^{-3}$.



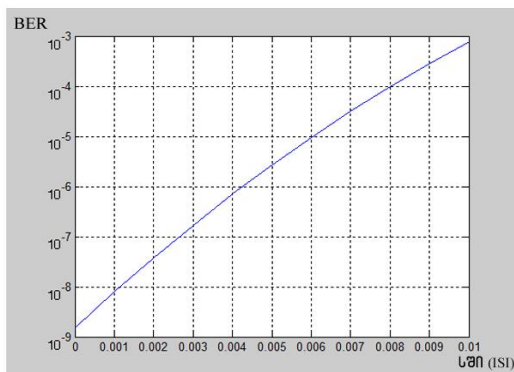
ნახ. 3.10. ა) Q -ფაქტორის დამოკიდებულება სში - ზე: $Q = \Psi(\text{ISI}); I_0 = 0.05, I_1 = 0.1$



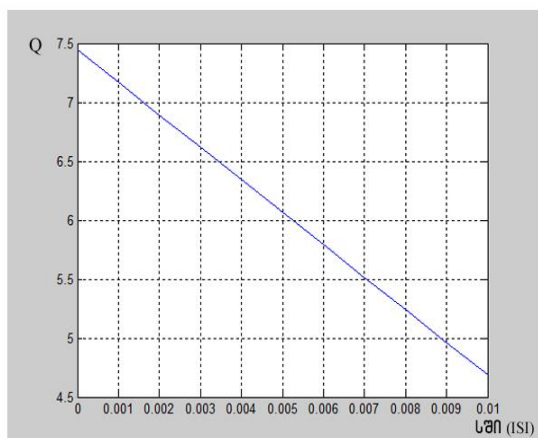
ნახ. 3.10. ბ) BER-ის დამოკიდებულება სში-ზე: $\text{BER} = \Psi(\text{ISI})$ $I_0 = 0.05, I_1 = 0.1$



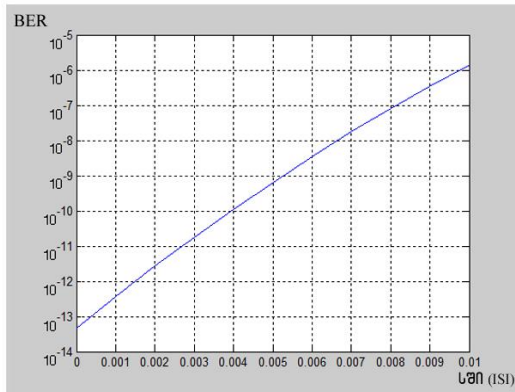
ნახ. 3.11. ა) Q-ფაქტორის დამოკიდებულება სში -ზე: $Q = \Psi (ISI); I_0 = 0.047, I_1 = 0.09$



ნახ. 3.11. ბ) BER-ის დამოკიდებულება სში-ზე: $BER = \Psi (ISI) I_0 = 0.047, I_1 = 0.09$



ნახ. 3.12. Q-ფაქტორის დამოკიდებულება სში-ზე: $Q = \Psi (ISI); I_0 = 0.033, I_1 = 0.087$



ნახ. 3.13. BER-ის დამოკიდებულება სში-ზე: $BER = \Psi (ISI)$ $I_0 = 0.033$, $I_1 = 0.087$

ამრიგად, სიმბოლოთშორისი ინტერფერენცია (ISI), რომელიც გამოწვეულია ოპტიკური ბოჭკოს დისპერსიით და მიმღების გატარების ზოლის სასრული სიგანით, არაწრფივი პროცესებით ოპტიკურ ბოჭკოში და სხვა მნიშვნელოვან გავლენას ახდეს მთლიანად გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემის ხარისხობრივ მაჩვენებელზე ბიტურ შეცდომათა ალბათობის (BER) კოეფიციენტის გაუარესების (გაზრდის) სახით. სახელდობრ, გცბოს მიმღების გადამწყვეტ მოწყობილობაში ციფრული ნაკადის „1“ და „0“ დონეების მოცემული მნიშვნელობების და შესაბამისი σ_1 , σ_0 დისპერსიების უცვლელი (ფიქსირებული) მნიშვნელობების დროს BER იზრდება და უარესდება კავშირის ხარისხი. ყოველივე გასათვალისწინებელია გცბოს მოდელირების დროს.

მესამე თავის დასკვნა

1. გაანალიზებულია ჯიტერის ფიზიკური არსი და ბუნება, მისი წარმოშობის მიზეზები. დადგენილია ჯიტერის კავშირის ხარისხზე გავლენა, მოყვანილია კონკრეტული მაგალითები. ამ მიზნით Q-ფაქტორი წარმოდგენილი იქნა გამოსახულებით, რომლითაც დადგენილ იქნა მისი დამოკიდებულება ჯიტერის ცვლილებაზე და შესაბამისად განსაზღვრული იქნა გავლენა ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე.

2. ჯიტერის, როგორც უარყოფითი მოვლენის გავლენა გცბოს-ის მუშაობის ხარისხობრივ მახასიათებლებზე შეფასებულ იქნა ჯიტერის მოვლენაზე ასახული ჯარიმის სახით; განსაზღვრულია დროითი ჯიტერის პარამეტრის B_T , დამოკიდებულება სიმძლავრის ჯარიმაზე Q ფაქტორის სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს. $Q=5,6,7,8$. რამაც საშუალებამოგვცა დაგვედგინა ჯარიმა ნებისმიერი იერარქიული სისტემის (STM-1, STM-4, STM-16, STM-64, STM-256....) შემთხვევაში.

3. დადგენილი იქნა, რომ:

დროითი ჯიტერი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს გცბოს ხარისხობრივ მაჩვენებლებზე; სიმძლავრის ჯარიმა დამოკიდებულია Q (BER) მნიშვნელობაზე. ჯარიმა მით მეტი იქნება, რაც უფრო მაღალია ბიტურ შეცდომათა ალბათობა (BER); ჯიტერის მოქმედი მნიშვნელობა უნდა მერყეობდეს ბიტური ინტერვალის ხანგრძლიობის 5-10 %-ის ფარგლებში.

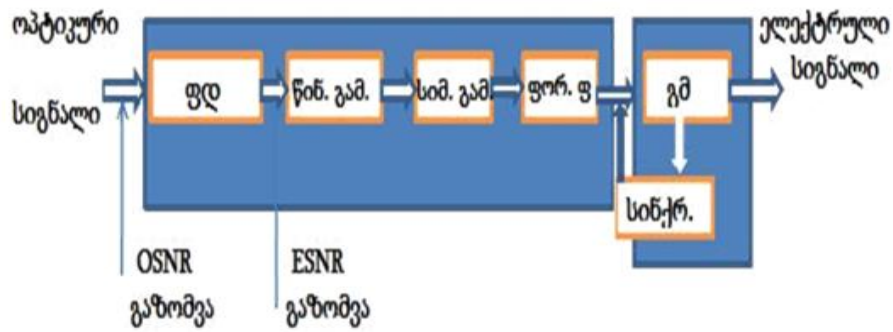
4. განსაზღვრულ იქნა სიმბოლოთაშორისი ინტერფერენციის ძირითადი მიზეზები გცბოს- ში. მოყვანილია მისი ფიზიკური არსიდა შმცირების გზები.

5. დადგენილია, რომ სიმბოლოთაშორისი ინტერფერენცია (ISI), რომელიც გამოწვეულია ოპტიკური ბოჭკოს დისპერსიით და მიმღების გატარების ზოლის სასრული სიგანით, არაწრფივი პროცესებით ოპტიკურ ბოჭკოში და სხვა მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მთლიანად გცბოს ხარისხობრივ მაჩვენებელზე - ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე და ზრდის მას. სახელდობრ, გცბოს მიმღების გადამწყვეტ მოწყობილობაში ციფრული ნაკადის „1“ და „0“ დონეების მოცემული მნიშვნელობების და შესაბამისი σ_1 , σ_0 დისპერსიების უცვლელი (ფიქსირებული) მნიშვნელობების დროს BER იზრდება და უარესდება კავშირის ხარისხი. ყოველივე გასათვალისწინებელი უნდა იყოს გცბოს პროექტირების დროს.

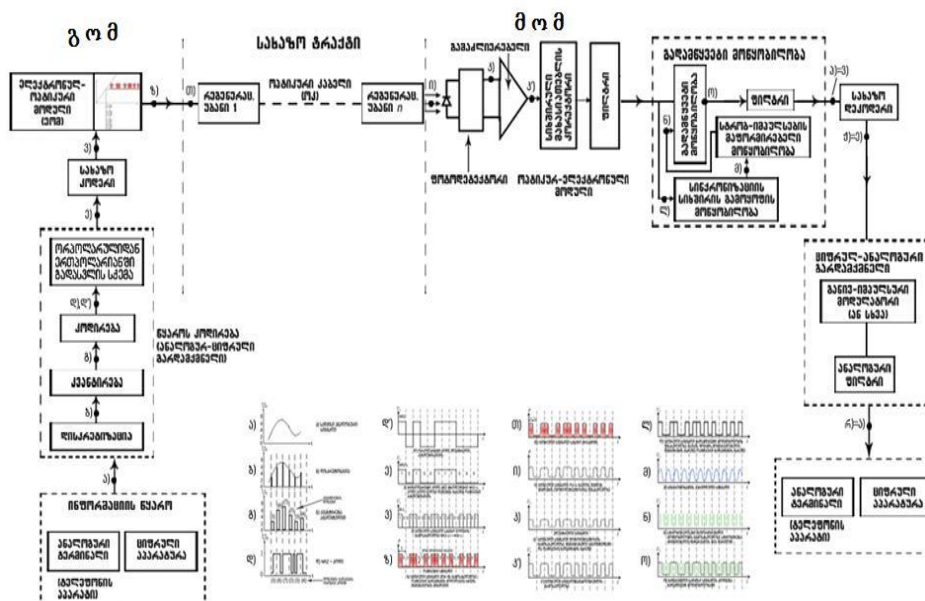
თავი 4. ხმაურის პრობლემა ოპტიკურ მიმღებებში. მიმღების მგრძნობიარობა ბიტურ შეცდომათა ალბათობა და Q-ფაქტორი

4.1. ხმაურის ძირითადი სახეები გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს)

განვიხილოთ გცბოს ერთ-ერთი ძირითადი კვანძის ფოტოდეტექტორის ფუნქციონირების პრინციპი. [29,51]. ფოტოდეტექტორზე დაცემული ფოტონები მის წრედში აღძრავენ ელექტრულ დენს. ფოტოდეტექტორის მგრძნობიარობა საკმაოდ მაღალი უნდა იყოს, რომ მან დააფიქსიროს თუნდაც ძალზე მცირე ოპტიკური სიმძლავრე (ათეული და რამოდენიმე ასეული ნანოვატის ტოლი). ამის გამო, მიმღებში ხდება ასეთი სიგნალების ელექტრულად გაძლიერება, ჯერ წინასწარი გამაძლიერებლით, ხოლო შემდეგ სიმძლავრის გამაძლიერებლით. რასაც თან ახლავს დამახინჯებაც. ფოტოდეტექტორის მგრძნობიარობაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ხმაური. ხმაური ეწოდება ელექტრული და ოპტიკური ხასიათის ნებისმიერ შემფოთებას სიგნალისაგან განსხვავებით, რომელსაც გადააქვს სასარგებლო ინფორმაცია, ხმაური წარმოადგენს სიგნალის მიმართ დამატებით, მიმდინარე მოვლენას, რომელსაც არავითარი სარგებელი არ მოქვს მთლიანად კავშირის პროცესისათვის, პირიქით, აფერხებს ამ პროცესს. მცირე ოპტიკური სიმძლავრის სიგნალის დეტექტირებისას ხმაურის ფონს (მნიშვნელობას) დიდი გავლენა შეუძლია მოახდინოს მთლიანად მიღებული სიგნალის ხარისხზე. რიგ შემთხვევებში, სასარგებლო სიგნალის და ხმაურის დონეები შესაძლებელია თანაბარი იყოს, რის გამოც შემუშავებულია დეტექტირების მრავალი მეთოდი და ალგორითმი. ამრიგად, ხმაური ახდენს არსებით გავლენას დეტექტორის მგრძნობიარობის ზღურბლზე, რაც წარმოდგენილია ქვემოთ.



ნახ. 4.1. გცბოს მიმღები მოწყობილობის გამარტივებული სქემა



ნახ. 4.2. გცბოს სტრუქტურული სქემა

4.2. ფოტოდეტექტორი

ოპტიკურ მიმღებში ხორციელდება ოპტიკური ფოტოდეტექტორის შუქმგრძნობიარე შრეზე დაცემული ოპტიკური ენერგიის P_{in} გარდაქმნა I_p ელექტრულ დენში. ოპტიკურ მიმღებებში გამოიყენება ორი ტიპის

ფოტოდეტექტორი (ფდ): p-i-n და ზეგვისებური APD ფოტოდეტექტორები. გცბოს-ის ტექნოლოგიებში ტექნიკურად ოპტიკური მიმღები, ანუ ოპტიკური სიგნალის ელექტრულ სიგნალად გარდაქმნელი (ოეგ) განხორციელებულია ცალკე მოდულის სახით, რომელშიც ინტეგრალური ტექნოლოგიების სახით დამონტაჟებულია ზემოთ მითითებული კვანძები და ტემპერატურული სტაბილიზაციის სქემა. როგორც აღინიშნა, ოპტიკური მიმღების მხარეს ჩვენ ვღებულობთ სხვადასხვა სახის და წარმომავლობის ხმაურებს. ამ ხმაურებს გააჩნია სხვადასხვა ფიზიკური ბუნება. გცბოს ოპტიკურ ტრაქტში ოპტიკური გადამცემიდან მიმღების ფოტოდეტექტორამდე ჩვენ გვაქვს ოპტიკური სიგნალი. ამ შემთხვევაში ფარდობა **ოპტიკური სიგნალი/ხმაური (OSNR)**, ხოლო ფოტოდეტექტორის შემდეგ ჩვენ გვაქვს **ელექტრული სიგნალის ფარდობა/ხმაურთან (ESNR)**, ვინაიდან ფოტოდეტექტორში ოპტიკური სიგნალი გარდაიქმნა ელექტრულ სიგნალად, აქედან გამომდინარე, სიგნალი/ხმაური ფარდობის პარამეტრები OSNR გაზომვისას უნდა მოხდეს ფდ-ის შესასვლელში, ხოლო ESNR-გადამწვეტი მოწყობილობის წინ (იხ. ნახ 4.1). აქვე შევნიშნავთ, რომ გცბოს-ში სახაზო სიგნალების სახით გამოიყენება ერთპოლარული სახაზო კოდები[6]. ნაშრომში ტელეკომუნიკაციაში გავრცელებული მოდულაციის ძირითადი ტიპებიდან გამოიყენება პირდაპირი ამპლიტუდური (ASK) მოდულაცია პირდაპირი მიღებით.

4.3. მგრძნობიარობა დენის მიმართ (მონოქრომატიული მგრძნობიარობა)

ფოტოდეტექტორის მგრძნობიარობას აფასებენ დენის მიმართ (მონოქრომატიული მგრძნობიარობა), რომელიც გამოისახება განზომილებით ა/ვტ; ასევე, ოპტიკური მიმდების მგრძნობიარობა ფასდება ფარდობით ერთეულებში: დბს (დეციბელი სიმძლავრით).

დენის მიმართ მგრძნობიარობა არის ფდ-ის ფოტოდენის სიდიდე შეფარებული იმ მთლიან ოპტიკურ სიმძლავრესთან $P(\lambda)$, რომელიც λ ტალღის სიგრძით ეცემა ფდ-ის შუქმგრძნობიარე ფართობზე:

$$\mathcal{R} = \frac{I_f}{P(\lambda)} = \frac{\frac{e\eta\lambda}{(hc)}}{P(\lambda)} \quad (4.1)$$

სადაც, $I_p = I_f$ (ამპერებში) არის ფოტოდენი,

$$I_p = \mathcal{R} P_{in} = \frac{e\eta\lambda}{(hc)} P_{in} \quad (4.2)$$

$$e \equiv q$$

$$I_p = \mathcal{R} P_{in} = \frac{e\eta\lambda}{(hc)} P_{in} \quad (4.3)$$

$P(\lambda)$ - მთლიანი ოპტიკური სიმძლავრე $P(\lambda)$, რომელიც λ ტალღის სიგრძით ეცემა ფდ-ის შუქმგრძნობიარე ფართობზე, დენის მიმართ მგრძნობიარობის განზომილებაა ამპერი/ვატი, რომელიც წარმოდგენილია ფოტოდეტექტორების საპასპორტო მონაცემებში ვინაიდან $I = \frac{e\eta\lambda}{(hc)}$ η - ფდ-ის ეფექტურობაა, η -0,7-0,9 ფარგლებში, მივიღებთ:

$$\mathcal{R} = \frac{e\eta\lambda}{hc} \quad (4.4)$$

აქედან გამომდინარეობს, რომ მგრძნობიარობა მით მეტია, რაც დიდია ქვანტური გამოსასვლელი, ანუ სინათლის ნაკადის რაც მეტი წილი გამოიყენება ელექტრონულ-ხვრელური ($h-e$) მატარებლების შესაქმნელად. უნდა აღვნიშნოთ, რომ მგრძნობიარობა დენის მიმართ ახასიათებს ოპტიკურ მიმღებს მოდულაციის დაბალ სიხშირეზე. გავიხილოთ ხმაურები ფდ-ში. ფოტოდეტექტორზე დაცემული ფოტონები მის წრედში აღძრავენ ელექტრულ დენს. ფოტოდეტექტორის მგრძნობიარობა საკმაოდ მაღალი უნდა იყოს, რომ მან დააფიქსიროს თუნდაც მცირე ოპტიკური სიმძლავრე (ათეული და რამოდენიმე ასეული ნანოვატის ტოლი) ამის გამო, მიმღებში ხდება ასეთი სიგნალების ელექტრულად გაძლიერება, რასაც თან ახლავს დამახინჯებაც, ფოტოდეტექტორის მგრძნობიარობაზე მნიშვნელოვან ზემოქმედებას ახდენს ხმაური.

განიხილავენ რამოდენიმე სახის ხმაურს: საფანტისებური (კვანტური) ხმაური; სითბური ხმაური (ჯონსონის ხმაური); სიჩუმის დენის ხმაური, რომელთა რაოდენობრივი შედარება საშუალებას მოგვცემს განვსაზღვროთ მათი როლი ამ პროცესში. ოპტიკური მიმღების შესასვლელზე მოსულ სასარგებლო I_p სიგნალთან ერთად თავს იჩენს შემდეგი სახის ხმაურები, მიმღებში: საფანტისებური კვანტური ხმაური, რომლითაც შენიღბულია I_p სიგნალი და თერმული, ანუ ჯონსონის ხმაური გადამცემში: მოდების ინტენსიობის ხმაური ლაზერში - RIN. ამას გარდა, ადგილი აქვს სხვა სახის ხმაურებსაც, რომლებიც განხილულია ქვემოთ.

4.4. საფანტისებური (კვანტური) (SHOT NOISE) ხმაური

საფანტისებური ხმაური წარმოიშვება ელექტრონების დისკრეტული ბუნების გამო. ელექტრული დენი არ არის ელექტრული მუხტების უწყვეტი და ერთგვაროვანი ნაკადი. ფოტოდეტექტორი მუსაობს შუქმგრძნობიარე შრის მიერ ფოტონების შთანთქმის ეფექტზე, რომელიც ახდენს ელექტრონულ-ხვრელური ($e-h$) წყვილების ამოფრქვევის ინიცირებას,

განაპირობებს ფოტოდეტექტორის გარე ელექტრულ კონტურში ელექტრული მუხტების წარმოქმნას და ვინაიდან ელექტროდენი წარმოადგენს მუხტების წარმოადგენს მუხტების მიმართულ მოწესრიგებულ მოძრაობას, საბოლოოდ ფოტოდეტექტორის წრედში გაედინება ელექტრული დენის სახით. ე.ი. საქმე აქვს სამსაფეხუროვან პროცესს: ფოტონი, ელექტრონ-ხვრელი, ელექტრონ-მუხტი. თითოეული ფოტონის დაცემა და მათი შთანთქმა, გადამტანების წყვილების (e-h) გენერაცია, წარმოადგენენ დისკრეტულ მოვლენებს და არა მდორედ მიმდინარე ერთგვაროვან ნაკადს. ამრიგად, სინამდვილეში დენი ფლუქტუირებს იმისდა მიხედვით, თუ რამდენად ნაკლები ან რამდენად მეტი ელექტრონულ ხვრელური (e-h) წყვილი აღიძრა დროის მოცემულ მომენტში.[30]

სიგნალის არსებობისას ჩვენ გვქვავს ეს ხმაური, მაგრამ, საფანტისებური ხმაური არსებობს მაშინაც, როდესაც შესასვლელი სიგნალი არ არსებობს, ანუ შუქი დეტექტორზე არ ეცემა. ამ შემთხვევაში იმის გამო, რომ ფდ-ზე ეცემა გარემომცველი სინათლის სხივი და იწვევს ფოტოდენის ფლუქტუაციას, ამ შემთხვევაში ფდ-ში, დენის მცირეოდენი რყევაც კი გენერირდება სითბური ფლუქტუაციების გამო; ასეთ დენს ეწოდება გაჟონვის (ჩრდილოვანი) დენის ხმაური. ამასთან, მისი დონე იზრდება დაახლოებით 10%-ით ტემპერატურის 1° -ით ზრდისას. ხმაურის დენის ტიპური მნიშვნელობა შეადგენს 25 ნა-ს 25° -გრადუსი ტემპერატურის დროს. ამრიგად, ჩრდილოვანი (გაჟონვის) დენის ხმაური იყოფა ორ კატეგორიად: ე.წ. მოცულობითი ჩრდილოვანი დენის ხმაური, რომელიც არსებითად იმყოფება მოწყობილობის შიგნით, ასევე, გვაქვს დენი, რომელიც მიედინება მოწყობილობის თითქმის ზედაპირზე, რომელსაც ეწოდება ზედაპირული ჩრდილოვანი დენის ხმაური. შენიშვნა: ვინაიდან ორივე სახის დენი (მოცულობითი და ზედაპირული) ჩვენთვის წარმოადგენს პარაზიტულ დენებს, მათ შესაბამისად ვუწოდებთ მოცულობით ჩრდილოვანი დენის და ზედაპირულ ჩრდილოვანი დენის

ხმაურებს. განვიხილოთ ხმაურის ეს სახეები დეტალურად: ამასთან, ფოტონის ურთიერთქმედება ფოტოდეტექტორში წარმოადგენს სტატისტიკურ პროცესს. ეს ნიშნავს, რომ ზემოთ ნახსენები წრფული დამოკიდებულება სიმძლავრესა და დენს შორის გასაშუალებულია ანუ, თუ ამ პროცესებს განვიხილავთ მიკრო დონეზე მაშინ ფოტოდეტექტორში ხორციელდება ფოტომასალის რხევები მასში აღგზნებული დენის საშუალო მნიშვნელობიდან გარკვეული ვიბრაციით, ანუ ფოტოდენის მისი საშუალო მნიშვნელობიდან გადახრები რასაც ეწოდება ხმაური მიმღებში. საერთოდ არსებობს ხმაურის მრავალი სახე, ოპტიკურ სისტემებში, კერძოდ, მიმღებებში განიხილება ხმაურის რამოდენიმე ფუნდამენტალური მექანიზმი. საფანტისებური (კვანტური) ხმაური: გამოწვეულია თავად ოპტიკური სიგნალის სტატისტიკური რყევებით და სტატისტიკური ურთიერთქმედების პროცესით. კერძოდ, გცბოს-ის გადამცემში, რომელსაც ძირითადად წარმოადგენს ნახევარგამტარული ლაზერი, ლაზერის მოქმედების ფიზიკური ბუნებიდან გამომდინარე ადგილი აქვს ელექტრონების ქაოტიურ გამოსხივებას ლაზერზე მოდებული გარკვეული სიმძლავრის გამო, და, შედეგად ფოტონების სპონტანურ მოუწესრიგებელ (გარკვეულ მომენტამდე) გამოსხივებას, რაც თავს იჩენს მიმღების ფოტოდეტექტორში.[30] ე.ი. ფდ-ის გამაძლიერებლის შესასვლელში არსებულ რეზისტორზე სასარგებლო ოპტიკური სიგნალის გარდა ხვდება სპონტანური სიგნალიც, რაც ფოტოდენში წარმოგვიდგება ხმაურის სახით. ამიტომ ასეთ ხმაურს კვანტურ ხმაურსაც უწოდებენ. საფანტისებური (კვანტური) ხმაური გამოწვეულია ფოტოდეტექტირების პროცესში წარმოქმნილი შემთხვევითი რყევებით. საფანტისებური ხმაური პირველად გამოკვლეული იქნა შოტკის მიერ 1918 წელს და ეწოდება შოტკის ეფექტი. როგორც, აღნიშნულიყო საფანტისებური ხმაური გამოწვეულია ფოტოდეტექტორში ფოტო გადამტანების შემთხვევითი გენერაციის (რხევების) გამო, ანუ პუასონის შემთხვევითი განაწილების კანონით ფოდოდეტექტორის ფოტომგრძნობიარე შრეზე დაცემული ფოტონების

მიერ ამიფრქვეული ელექტრონების და ხვრელების შემთხვევითად წარმომნილი მუხტების შედეგად. ამ მუხტების მოწესრიგებული მოძრაობა ფდ -ის გარე წრედში წარმოადგენს ელექტრულ დენს, ხოლო ამავე შრეზე დაფრქვეული სპონტანური ფოტონების ნაკადი წარმომნის საფანტისებურ ხმაურს. ჯამური დენი შეიძლება დაიწეროს ასე:

$$I(t) = I_p + i_s(t) \quad (4.5)$$

სადაც, I_p არის ფდ-ის მყისიერი დენი, $i_s(t)$ დენის ფლუქტუაცია საფანტისებური ხმაურის გამო, რაც აღნიშნული იყო ზემოთ. ხმაურის $i_s(t)$ დენი წარმოადგენს სტაციონარულ შემთხვევით პროცესს პუასონის განაწილების სტატისტიკური კანონით. ხმაურის დენის სპექტრალური სიმკვრივე პრქატიკულად მუდმივია საკმაოდ ფართო ზოლში და შესაბამისად ხმაური წარმოადგენს თითქმის თეთრ ხმაურს (თეთრი ხმაური თეორიული იდეალიზირებული ცნებაა და მისი სპექტრალური სიმკვრივე თითქმის მთელ გატარებულ ზოლში მკაცრად მუდმივია).[33]

განვიხილოთ ბინარული (ორობითი სიგნალების) იდეალური ოპტიკური მიმღები. გცბოს-ში ლაზერის სხივის ინტენსივობით მოდულაციის დროს როგორც წესი, „1“ სიმბოლოს (ბიტის) დროს გვაქვს საინფორმაციო იმპულსი, შევსებული ოპტიკური გადამტანით, ხოლო პაუზის დროს (სიმბოლო „0“) ოპტიკური ენერგია არ არსებობს. ამ შემთხვევაში „1“ ბიტის დროს მიიღება ფოტონების საშუალო რიცხვი n , ხოლო „0“ ბიტის დროს ენერგია არ არის და ფოტონები არ მიიღება. მაშინ ფოტონების რაოდენობა „1“ ბიტზე არის n ან $a = 0, 5n$. ვინაიდან, მიღებული ფოტონების მოქმედი რაოდენობა ნებისმიერი შეიძლება იყოს, ბიტების იდენტიფიკაციის დროს მიმღებში, ანუ იმის გარკვევისას, თუ რამდენი ფოტონია 1 ბიტ სიმბოლოში, შეიძლება ადგილი ჰქონდეს შეცდომას. ამის გამო გადამცემის (ლაზერი, შუქდიოდი) მიერ გამოსხივებული ფოტონების საშუალო n რაოდენობის მიღებისას, როდესაც ფოტონების განაწილება ემორჩილება პუასონის განაწილების (იშვიათ რიცხვთა განაწილების)

კანონს და ფოტონების აღმოჩენის ალბათობას ($e^{-\bar{n}}$ ელექტრონ-წყვილის განაწილების ალბათობას) ალბათობას აქვს სახე:

$$P(n) = \frac{\bar{n}^n \exp(-\bar{n})}{n!} \quad (4.6)$$

დავუშვათ, ერთი ან მეტი ფოტონის აღმოჩენისას მიმღები იღებს გადაწყვეტილებას, რომ გადაცემული იყო სიმბოლო „1“, მაშინ, „1“ ბიტის მიღების ალბათობა აღვნიშნოთ P -ით (ე.ი. P -ის „1“ ბიტის „0“ ბიტად მიღების ალბათობა ანუ, ფოტონების არარსებობის აღმოჩენის ალბათობა

$$P_i = P(0) = \exp(-\bar{n}) \quad (4.7)$$

ხოლო, როდესაც გადაიცემა „0“ ბიტი, ფოტონები არ არის და მიმღები სრულიად სწორად გადაწყვეტს, რომ გადაცემული იყო „0“, ე.ი. $P_0 = 0$, ანუ, მთლიანად სისტემის ბიტურ შეცდომათა ალბათობა, რომელიც წარმოადგენს ამ ორი ალბათობის საშუალო მნიშვნელობას ტოლია

$$BER = 0.5 \exp(-\bar{n}) = 0.5 \exp(-2\bar{n}_a) \quad (4.8)$$

ვინაიდან, $\bar{n}_a = 0, 5\bar{n}$ შეიძლება განისაზღვროს მიმღების მგრძნობიარობა ბიტზე მოსული ფოტონების საშუალო რაოდენობის მიხედვით, რომლის დროსაც უზრუნველყოფა BER-ის დასაშვები მნიშვნელობა. თუ ამოვხსნით ამ განტოლებას $BER=10^{-9}$ მნიშვნელობის დროს მივიღებთ ფოტონების საშუალო მნიშვნელობას $\bar{n}_a = 10$. შესაბამისად, იდეალური მიმღების მგრძნობიარობა პირდაპირი მიღების სისტემებში ტოლია 10 ფოტონი/ბიტზე. ანუ, „1“ ბიტი სიმბოლო აუცილებლად უნდა შეიცავდეს მინიმუმ 20 ფოტონს, ვინაიდან განსაზღვრის თანახმად „0“ ბიტი არ შეიცავს ფოტონებს. ხმაურის სხვა სახეების არსებობისას მგრძნობიარობა შეიძლება არსებითად შემცირდეს.

როგორც ცნობილია, ფოტოდიოდის მგრძნობიარობას $\bar{n}_a$ /ბიტზე შეესაბამება ოპტიკური ენერგია – $E = \lambda \nu \hbar$, სადაც, ν λ , სინათლის სიხერე და ტალღის სიგრძეა გარემოში, $\nu = f/\lambda$, f - სინათლის გავრცელების სიხერე

ოპტიკურად გამჭვირვალე გარემოში თავისთავად დაკავშირებულია ამ გარემოს გარდატეხის მაჩვენებელთან

$$v = \frac{c}{n}$$

სადაც, c - სინათლის გავრცელების სიჩქარეა $c \approx 299\,792\,458$ მ/წმ, n - მასალის გარდატეხის მაჩვენებელი. როგორც (2) ფორმულიდან ჩანს I_p არის ფდ-ის მყისიერი დენი, $i_s(t)$ დენის ფლუქტუაცია საფანტისებური ხმაურის გამო. მაგრამ, გარდა ამ დენისა, როგორც აღვნიშნეთ, P-I-N ფოტოდიოდისთვის:

$$\sigma_s^2(\sigma_o^2) = 2qI_p B \quad (4.9)$$

APD ფოტოდიოდისთვის: საფანტისებური ხმაურის დენის მნიშვნელობა განისაზღვრება ფორმულით:

$$i_{\text{saf xm}}^2 = 2qi\Delta f \quad (4.10)$$

სადაც, q -ელექტრონის მუხტია), $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ კულონი), i - დენის საშუალო მნიშვნელობაა (ფონური დენის და სიგნალის დენის ჩათვლით) და $\Delta f = B$ -მიმღების სიხშირული ზოლის სიგანეა. განტოლებიდან ჩანს, რომ საფანტისებური ხმაური ძლიერდება დენის და გატარების ზოლის ზრდის დროს. საფანტისებური ხმაური მინიმალურია, როდესაც არსებობს მხოლოდ ფონური დენი (ე.ი. როდესაც $i =$ ფონური დენი) და იზრდება ოპტიკური სიგნალის მიერ აღგზნებული დენის წარმოშობისას. შედარებისათვის ვიანგარიშოთ საფანტისებური და თერმული ხმაურის დენების მნიშვნელობები თუ მოცემულია: ფოტოდეტექტორის ფონური დენი $i \approx 2$ ნა, გატარების ზოლი $\Delta f = 10$ მგჰც, განვსაზღვროთ საფანტისებური ხმაური

$$i_{\text{saf xm}}^2 = 2 \cdot (1.6 \cdot 10^{-19}) \cdot (2 \cdot 10^{-9}) \cdot (10 \cdot 10^6) = 80 \text{ პა} \quad (4.11)$$

განვიხილოთ მოცულობით ჩრდილოვანი დენის ხმაური

მოცულობითი ჩრდილოვანი დენის ხმაურის საშუალო მნიშვნელობა განისაზღვრება ფორმულით (P-I-N)

$$i_{DB}^2 = 2qI_d B_e \quad (4.12)$$

APD

$$i_{DB}^2 = 2qI_d B_e M^2 F(M) \quad (4.13)$$

სადაც, Id-მოცულობითი ჩრდილოვანი დენია.

ზედაპირულ ჩრდილოვანი დენის ხმაური შესაბამისად:

$$\langle i_{DS}^2 \rangle = 2qI_L B \quad (4.14)$$

სადაც, IL-ზედაპირული ჩრდილოვანი დენია.

მიმღების საერთო ჯამური ხმაური:

$$\sigma_{jamuri}^2 = \langle i_s^2 \rangle + \langle i_{DS}^2 \rangle + \langle i_{DB}^2 \rangle = 2qI_p M^2 F(M) B + 2qI_d M^2 F(M) B + 2qI_L M^2 F(M) B \quad (4.15)$$

თუ ჩავთვლით, რომ ამ ხმაურების მნიშვნელობები ერთმანეთისაგან დამოუკიდებელია (ამუ ხმაურების წარმოშობის წყაროები დამოუკიდებელია), მაშინ საფანტისებური ხმაურის ჯამური მნიშვნელობა იქნება და ზედაპირული ჩრდილოვანი დენები მინიმალურია, მივიღებთ:

$$\sigma_s^2 \approx \langle i_s^2 \rangle = 2qI_p M^2 F(M) B \quad (4.16)$$

განვიხილოთ ხმაურების ბუნება მიმღების გატარების ზოლის სიგანე B დამოკიდებულია იმაზე, თუ მიმღების რომელ წერტილში იზომება ხმაური. თუ ხმაური იზომება უშუალოდ ფოტოდეტექტორის შემდეგ, მაშინ გატარების ზოლი დეტექტორის საკუთარი გატარების ზოლის ტოლია. ხოლო, თუ ხმაური იზომება მიმღების ბოლოს, მაშინ გათვალისწინებული უნდა იყოს მიმღების გადაცემის ფუნქცია $H(f)$ და ხმაურის დისპერსია განისაზღვრება, როგორც

$$\sigma_s^2 = \langle i_s^2(t) \rangle = 2q I_p \int_0^\infty |H(f)|^2 df \quad (4.17)$$

ამავე დროს, უნდა გავითვალისწინოთ ერთი ფაქტი: ყველა ფოტოდეტექტორი, მის შესასვლელზე ოპტიკური სიგალის არარსებობის დროსაც კი გენერირებს დენის მცირე რაოდენობას ეს ხდება იმიტომ, რომ პარაზიტული სინათლე მაინც აღწევს და ეცემა ფდ-ის შუქმგრძნობიარე შრეზე და იწვევს მცირე რაოდენობის ელექტრონების ამოფრქვევას, მას ემატება აგრეთვე გადამტანების სითბოგამოყოფა. ასეთ დენს ეწოდება სიჩუმის დენი I_d . ამდენად, როგორც აღვნიშნეთ, სიგნალის არსებობის დროს საერთო დენი ფდ-ის წრედში წარმოადგენს სიგნალის და სიჩუმის დენების ჯამს. ორობითი (ბინარული) შეტყობინებების გადაცემის დროს სიჩუმის დენი მცირეა და პრაქტიკულად ნულის ტოლია. თუმცა აქ უნდა განვიხილოთ ორი შემთხვევა: ფდ-ის შესასვლელზე სიმბოლო „0“-ის მოსვლა და სიმბოლო „1“ მოსვლა:

1. „0“ ბიტის მოსვლის დროს (პაუზა) ოპტიკური სიგნალი ძალზედ მცირეა (იდეალურ შემთხვევაში 0-ის ტოლია), სიჩუმის დენი უნდა გავითვალისწინოთ.

2. „1“ ბიტის შემთხვევაში შესაძლებელია სიჩუმის დენი შეიძლება არ იქნას გათვალისწინებული. ვინაიდან, ხმაურის დისპერსი ასიგნალის დენის საშუალო მნიშვნელობის პროპორციულია, საფანტისებური ხმაური არსებითად წარმოადგენს მულტიპლიკაციურ ხმაურს. (ეს ნიშნავს, რომ ასეთი სახის ხმაური მრავლდება სიგნალზე). ამის გამო მიმღების მხარეზე ხმაურის გამოყოფა სიგნალისაგან რთულია. ამდენად, საფანტისებური ხმაური არსებითად მრავლობითი ხმაურია. ამიტომ საფანტისებური ხმაური მრავლობითი თეთრი ხმაურია. ამრიგად, მიმღებში გვაქვს ძირითადად ორი ხმაური: საფანტისებური და თერმული. მაგრამ როგორც ქვემოთ ვნახავთ, მიმღების შესასვლელზე თავს იჩენს კიდევ ერთი ხმაური გამოწვეული ლაზერში მოდების ინტენსიობის ცვლილებით (RIN).

4.5. თერმული (სითბური) ჯონსონის ხმაური (Thermal Noise)

თერმული (სითბური) ხმაური, ანუ ჯონსონ-ნაიკვისტის ხმაური, წარმოიშობა დეტექტორის გამამდიერებლის წინაღობის (რეზისტორის) ფლუქტუაციის შედეგად. ელექტრონები ელექტროდებს შორის სივრცეში იქცევიან არამუდმივი კანონით, სითბური ენერგია საშუალებას აძლევთ მათ წანაცვლდნენ შემთხვევითი სახით. დროის თითოეულ მომენტში ელექტრონების შემთხვევითი მოძრაობის ჯამური ნაკადი შეიძლება მიმართული იყოს ხან ერთი, ხან მეორე ელექტროდისაკენ. ამრიგად, წარმოიშობა მუდმივად ცვლადი შემთხვევითი დენი. ხდება ამ დენის ზედდება სასარგებლო სიგნალის დენზე და ცვლის მას. სითბური ხმაური განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$i_{\text{si Tb}} = \frac{4kT\Delta f}{R_L} \quad (4.18)$$

აქ და შემდგომ $\Delta f \cdot B$ სადაც, k - ბოლცმანის მუდმივაა ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ ჯ/კ), T - აბსოლუტური ტემპერატურაა კელვინის შკალით, Δf - მიმღების გატარების ზოლია, R_L - დატვირთვის წინაღობა.

მაგალითი: ზემოთ მოცემული მაგალითის მიხედვით განვიხილოთ ოპტიკური მიმღები, რომლის დატვირთვა $R_L = 510$ ომი, რომელიც მუშაობს აბსოლუტურ ტემპერატურაზე $T = 298$; Δf - 10 მგჰც. მაშინ, სითბური ხმაური ტოლია:

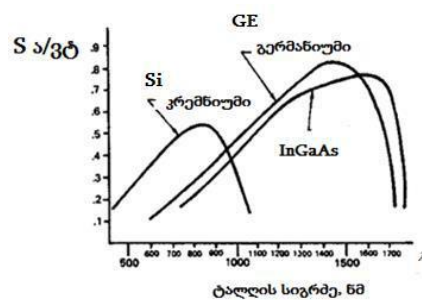
$$i_{\text{si Tb}} = \frac{4 \cdot (1.38 \cdot 10^{-23}) \cdot 298 \cdot (10 \cdot 10^6)}{510} = 18 \text{ ნა} \quad (4.19)$$

მიმღების ჯამური ხმაური I ჯამ. მიმღ.=ისაფ+ისითბ

ამრიგად, ფოტოდეტექტორის მოცემული მნიშვნელობის დროს სითბური ხმაური გაცილებით მეტია, ვიდრე საფანტისებური ხმაური $18 \text{ ნა} \gg 80 \text{ პა}$. ($1 \text{ ნა} = 10^3 \text{ პა}$). სითბური და საფანტისებური ხმაურები მოსული ოპტიკური სიმძლავრისაგან ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად

წარმოიშვებიან. ისინი განისაზღვრებიან მასალის სტრუქტურით და შეიძლება შემცირებულ იქნან დეტექტორის გაუმჯობესებით; თუმცა მათგან მთლიანი განთავისუფლება შეუძლებელია, ვინაიდან, ოპტიკური, ელექტრული თუ ხმოვანი სიგნალი-აუცილებლად არსებობენ ხმაურთან ერთად. ისე, როგორც, ზოგადად კავშირგაბმულობის სისტემა (გადამცემი, გადამცემის გარემო, მიმღები - არ არსებობს დამახინჯების ხმაურის წყაროების გარეშე). თუ სიგნალის ამპლიტუდა ხმაურის ამპლიტუდის ტოლია, ასეთი შემთხვევა წარმოადგენს არაადეკვატური დეტექტირების პროცესს. ამდენად, ადეკვატური დეტექტირების დროს სიგნალის ამპლიტუდა მინიმუმ ორჯერ უნდა აღემატება ხმაურის ამპლიტუდას. საერთოდ, ანალოგური კავშირის დროს მიიღება, რომ ფარდობა სიგნალი/ხმაური უნდა იყოს 5-ზე მეტი. რაც შეეხება ციფრულ სისტემებს სიგნალი/ხმაური ფარდობით ასევე შეიძლება ირიბად სიგნალი /ხმაური ფარდობით განსაზღვრულ იქნას ბიტურ შეცდომათა ალბათობის კოეფიციენტი - BER. ტელეკომუნიკაციის თეორიაში ხმაურის მათემატიკური აღწერისათვის გამოიყენება სხვადასხვა აპროქსიმაცია. საერთოდ მიღებულია აპროქსიმაცია გაუსის (ნორმალური) განაწილების კანონით.

ნახ.4.3-ზე წარმოდგენილია ფოტოდეტექტორის მგრძნობიარობის დამოკიდებულება ტალღის სიგრძეზე კრემნიუმის, გერმანიუმის და InGaAs მასალებისათვის.



ნახ. 4.3. ფოტოდეტექტორის მგრძნობიარობის დამოკიდებულება ტალღის სიგრძეზე კრემნიუმის, გერმანიუმის და InGaAs მასალებისათვის

თანაფარდობა ფოტოდეტექტორის გამოსავლელებზე მიღებულ დენსა და ოპტიკურ სიმძლავრეს შორის წრფივია, ანუ ელექტრული დენის სიდიდე მის შესასვლელებზე პირდაპირპროპორციულია არსებული ოპტიკური სიმძლავრისა. თერმული, ანუ ჯონსონის ხმაურის წარმოქმნის ფიზიკური ბუნება საფანტისებური ხმაურის ბუნებისაგან განსხვავებულია. თერმული ხმაური წარმოიშვება ელექტრონების შემთხვევითი თერმული მოძრაობის შედეგად გამტარის შიგნით. როგორც აღინიშნა, ასეთ გამტარს წარმოადგენს ფოტოდეტექტორის დატვირთვის რეზისტორი (წინაღობა). თერმული ხმაურს ასევე აქვს მუდმივი სპექტრალური სიმკვრივე სიხშირის ძალიან ფართო დიაპაზონში და, შესაბამისად, თერმული ხმაურიც ასევე, თეთრი ხმაურია. თერმული ხმაური მოდელირდება გაუსის პროცესით. მას შემდეგ, რაც ამ ხმაურს გარედან ემატება ფოტოდენი ის შეიძლება აღიწეროს ალბათობის ნორმალური განაწილების კანონით, რომელსაც აქვს სახე:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.20)$$

სითბური ხმაურის დისპერსია მიმდებში მონაცემების გადაცემის B ეფექტური სიჩქარის და T ტემპერატურის პირდაპირპროპორციულია, ხოლო დატვირთვის R_L წინაღობის უკუპროპორციულია თერმული ხმაურის დისპერსია მოცემულია როგორც:

$$\sigma_T^2 = \langle i_T^2(t) \rangle = \frac{4KT B}{R_L} \quad (4.21)$$

სადაც, k - ბოლცმანის მუდმივაა ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ ჯ/კ), T - აბსოლუტური ტემპერატურაა კელვინის შკალით, B - მიმღების გატარების ზოლია, R_L - დატვირთვის წინაღობა. მაგალითი: განვიხილოთ დატვირთვა $R_L = 510$ ომი, რომელიც მუშაობს აბსოლუტურ ტემპერატურაზე $T = 298$ K. სადაც, k - ბოლცმანის მუდმივაა, $kB = 1,38054 \cdot 10^{-23}$ J/კ T - მიმღების ტემპერატურაა, $T = 293$ K, R_L - დატვირთვის წინაღობაა (ომი). რეზისტორის შემდეგ განთავსებულ გამაძლიერებელსაც შეაქვს ხმაური, რომელიც თავისი

მახასიათებლებით თერმულ ხმაურს ჰგავს. თერმული ხმაური სიგნალისაგან დამოუკიდებელია, ამიტომ, ასეთი ხმაური „0“ ბიტისათვის და „1“ ბიტისათვის ერთნაირია. გამაძლიერებლის წილი თერმულ ხმაურში შეიძლება გათვალისწინებული იქნას პარამეტრით, რომელსაც ეწოდება გამაძლიერებლის ხმაურის კოეფიციენტი - F_n თერმული ხმაური გამაძლიერებლის მიერ შეტანილი ხმაურის გათვალისწინებით ტოლია:

$$\sigma_i^2 = \langle i_i^2(t) \rangle = \frac{4KT}{R_L} B F \quad (4.22)$$

როგორც (4.22) ფორმულიდან ჩანს სითბური ხმაური შეიძლება შევამციროთ ფდ-ის დატვირთვის მაღალი R_L წინააღობის გამოყენებით. ეს მართლაც ქმნის პრობლემას ფდ-ის შემდეგ განთავსებული გამაძლიერებლისათვის, თუმცა ეს საკითხი განხილვადი საკითხისაგან დამოუკიდებელია. ოპტიკურ მიმღებში ფდ-ის შემდეგ განთავსებული გამაძლიერებლის შერჩევის საკითხი მოყვანილი როგორც წესი, ფდ-ის შემდეგ გამოიყენება მაღალი შემავალი გამტარობის წინააღობის მქონე გამაძლიერებლები თერმულ ხმაურს მულტილკაციურ ხმაურთან (საფანტისებური ხმაური) განსხვავებით გააჩნია ადიტიური (შეკრებითობის) ბუნება, ამიტომ მიმღების მხარეზე ასეთი ხმაურის შემცველი სიგნალისაგან მისი გამოყოფა შედარებით ადვილია. ამრიგად, როგორც ავლნიშნეთ, მიმღებში გვაქვს ძირითადად ორი ტიპის ხმაური საფანტისებური და თერმული. მაგრამ მიმღების შესასვლელზე თავს იჩენს კიდევ ერთი ხმაური გამოწვეული ლაზერში მოდების ინტენსიობის ცვლილებით (RIN). მაშინ, ვინაიდან ამ ხმაურებს დამოუკიდებელი წყაროები გააჩნიათ საერთო ჯამური ხმაური იქნება:

$$\begin{aligned} \sigma_{jasm} = & \langle i_I^2 \rangle + \langle i_{DS}^2 \rangle + \langle i_{DB}^2 \rangle + \langle i_t^2 \rangle + (RIN)I_p^2 = 2qI_p M^2 F(M)B + 2qI_D M^2 F(M)B + \\ & 2qI_p M^2 F(M) + 4k_s TB / R_L + (RIN)I_D^L B = \\ & [2q(I_p + I_D)M^2 F(M) + 2qI_L B M^2 F(M) + 4k_s TB / R_L + (RIN)I_p^L] B \end{aligned} \quad (4.23)$$

ამ ფორმულაში მე-2 და მე-3 შესაკრებები რომლებიც შესაბამისად არიან სიჩუმის მოცულობითი და ზედაპირული დენები გადახაზულია მათის სიმცირის გამო, ხოლო მე-4 და მე-5 შესაკრებები წარმოადგენენ თერმულ და ლაზერის იმტენსიობის ხმაურებს.

4.6. ფარდობა სიგნალი/ხმაური

ფარდობა სიგნალი / ხმაური ერთ -ერთი უმნიშვნელოვანესია ეკომუნიკაციაში ვინაიდან ამ მახასიათებლით განისაზღვრება როგორც ანალოგური ისე ციფრული კავშირის ძირითადი მახასიათებლები. როგორც აღნიშნული იყო ოპტიკურ ტელეკომუნიკაციაში განიხილება სიგნალი/ხმაური ფარდობის ორი მახასიათებელი OSNR- ფარდობა: ოპტიკური სიგნალი/ხმაური; SNR-ფარდობა: ელექტრული სიგნალი/ხმაური. როგორც აღვნიშნეთ, პირველი სახის ფარდობა იზომება ფდ-ის შესასვლელამდე, მეორე ტიპის ფდ-ის გამოსასვლელის შემდეგ (ნახ. 3.1). ამის გამო ხმაურების ანალიზი წარმოადგენს ციფრული ოპტიკური სისტემების კავშირის ხარისხის შეფასების განუყოფელ ნაწილს. სიგნალი/ხმაური ფარდობის მიხედვით შესაძლებელია გცბოს ხარისხობრივი მახასიათებლის ბიტურ შედომათა ალბათობის (BER) განსაზღვრა, იმ შემთხვევაშიც კი, როდესაც ამ პარამეტრის განსაზღვა მაღალ

$$\text{სიგნ/ხმაური} = \frac{\text{სიგნალი: ფდ-ის ფოტოდენი (სიმძლავრე)}}{\text{ფდ-ის ხმაურის სიმძლ.+გამამღლ ხმაურ. სიმძლ}} \quad (4.24)$$

სიჩქარეებზე გამზომი ხელსაწყოებით შეუძლებელია. ჩვენ განვიხილავთ ელექტრული სიგნალი/ხმაური (ESNR) ფარდობას:

მიმღების და გადამცემის ხმაურების გათვალისწინებით ფარდობა სიგნალი/ხმაური გამოისახება ასე:

$$SNR = \frac{\langle i_p^2 \rangle M^2}{\left| 2q(I_p + I_D)M^2 F(M) + 4k_B \frac{TB}{R_L} + (RIN)I_p^2 \right| B} \quad (4.25)$$

როგორც აღვნიშნეთ, ხმაურის სრული სიმძლავრის მისაღებად ჩვენ ვთვლით, რომ საფანტისებური ხმაური შეიძლება წარმოვადგინოთ არა პუასონის, არამედ, მიახლოებით ნორნალური (გაუსის) განაწილების კანონის სახით მისი საშუალო მნიშვნელობით, რომელიც ფოტოდეტექტორის დენის საშუალო მნიშვნელობის ტოლია. ამ დაშვებებით სთბური ხმაურის ალბათური განაწილება წარმოგვიდგება გაუსის განაწილების კანონის სახით და მოქმედებები ორივე ხმაურის განაწილებისათვის ადვილი განსახორციელებელია. მაშინ, საფანტისებური და სითბური პროცესები წარმოადგენენ გაუსის დამოუკიდებელ პროცესებს და სრული ხმაურის დისპერსია ორივე ხმაურის დისპერსიების ჯამის ტოლია.

$$\sigma^2 = \langle I^2 \rangle = \sigma_s^2 + \sigma_r^2 = 2q I_p B + \frac{4KT}{R_L} B F_n \quad (4.26)$$

მაშინ, ფარდობა

$$\text{სიგნალი/ხმაური} = SNR = \frac{I_p^2}{\sigma^2} \quad (4.27)$$

ანუ, თუ ჩავსვამთ (3.21)-ში (3.23) მნიშვნელობებს მივიღებთ სიგნალი/ხმაურის ფარდობას:

$$SNR = \frac{P_{in}^2}{2q I_p B + \frac{4KT}{R_L} B} \quad (4.28)$$

იმისდა მიხედვით როგორია ოპტიკური სიგნალი, გადამცემის და მიმღების მახასიათებლები გცბო-ში შეიძლება სითბური ხმაური აჭარბებდეს საფანტისებურს ამრიგად, მიმღებში პრაქტიკულად არსებული მიმღების ორი ძირითადი ხმაურიდან რიგ შემთხვევაში დომინანტურია

საფანტისებური ხმაური, რიგ შემთხვევაში თერმული ხმაური. განვიხილოთ ეს რეჟიმები ცალ - ცალკე.

4.7. მიმღები დომინანტური თერმული ხმაურით

თერმული ხმაური აჭარბებს საფანტისებურ ხმაურს. მაშინ, $\sigma_T > \sigma_S$, მაშინ (4.28) დან მივიღებთ:

$$SNR = \frac{g^2 P_{in}^2 R_L}{4 K T B F_n} \quad (4.29)$$

(4.29) გამოსახულება ცხადყოფს, რომ SNR შესაძლებელია გავაუმჯობესოთ ორი ხერხით:

1. სიგნალის სიმძლავრის გაზრდით (SNR არის სიგნალის ენერგიის კვადრატის P_{in}^2 პროპორციული).
2. დატვირთვის წინააღმდეგობის გაზრდით



ნახ. 4.4. მიმღებში დომინანტი თერმული (სითბური) ხმაური

ოპტიკური მიმღების ანალიზის დროს ჩვენ უნდა მივიხსნათ იმისაკენ, რომ შევარჩიოთ ომ-ის ისეთი რეჟიმები, კომპონენტები, პარამეტრები და მახასიათებლები $BER = \Psi(Q)$ დამოკიდებულებისათვის ოპტიმალურია, ანუ ოპტიკური კავშირის შემთხვევაში Q პარამეტრი, რომელსაც Q ფაქტორსაც უწოდებენ $Q > 6$, საერთოდ $Q = 6, 7, 8$. ბიტურ

შეცდომათა ალბათობის BER-ის განსაზღვრისას ჩვენ ვუბრუნდებით ფარდობას სიგნალი/ხმაური. ამავე დროს დაცული უნდა იყოს ბალანსი ერთის მხრივ ოპტიკურ სიმძლავრესა და მთლიანად გცბოს ენერგომოხმარებას შორის. ვინაიდან, ოპტიკურ სისტემაში არსებულ 5-6 ხმაურის სახეებს შორის ჩვენ გამოვარჩიეთ ორი ძირითადი: საფანტისებური (კვანტური) და თერმული (ჯონსონის ხმაური) ამიტომ შემდგომში ძირითადად ვიხილავთ ამ ორ ხმაურს. როდესაც თერმული ხმაური ჭარბობს საფანტისებურ ხმაურს $\sigma_T \gg \sigma_S$. აგრეთვე გაჟონვის დენი ძალზედ მცირეა. გვაქვს თერმული ხმაურის დომინანტური რეჟიმი. ეს ხდება მიმდებარე მიწოდებული მცირე ოპტიკური სიმძლავრის დროს. ამ შემთხვევაში თერმული ხმაური მცირეა და გვაქვს მხოლოდ თერმული ხმაური. შეიძლება ითქვას, რომ ეს ხდება მაშინ, როდესაც მიმღები შორს არის გადამცემისაგან, თუმცა საკითხის ასეთი დასმა კორექტულია მხოლოდ კერძო შემთხვევაში, ტროდესაც ოპტიკური გადამცემი და მიმღები ერთმანეთთან ჩართული არიან პირდაპირ და არა რეგენერატორის, გამაძლიერებლის გარსე, რომლებიც უზრუნველყოფენ სიგნალის დასაშვებ დონეს მიმღების შესასვლელზე. თუ ოპტიკური სიგნალის სიმძლავრე (დომე) მიმღების შესასვლელზე მაღალია, ანუ ეს ხდება მაშინ, როდესაც მიმღები შორს არის გადამცემისაგან (იგივე პირობებით, რაც ზემოთ იყო განმარტებული) მაშინ და გვაქვს დომინანტური საფანტისებური ხმაური (აქვე ვგულისხმობთ, რომ გაჟონვის დენს სიმცირის გამო უგულებელვყოფთ) მესამე რეჟიმი, რაც შეიძლება გვქონდეს ოპტიკურ სისტემებში, არის რეჟიმი, როცა $\sigma_S = \sigma_T$

4.8. ხმაურის ექვივალენტური სიმძლავრე (Noise Equivalent Power)

თერმული ხმაური რაოდენობრივად განისაზღვრება პარამეტრით, რომელსაც ეწოდება ხმაურის ექვივალენტური სიმძლავრე (NEP- noise equivalent power) და განისაზღვრება ასე :

$$NEP = \frac{P_{in}}{\sqrt{B}} = \left[\frac{4KT}{R} \frac{F}{\mathcal{R}^2 L} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.30)$$

NEP ინვერსიას ეწოდება მიმრეზის აღმოჩენისუნარიანობა. კარგი მიმღებისთვის NEP -სტიპიური მნიშვნელობა დევს დიაპაზონში $1 - \frac{10 pW}{\sqrt{Hz}}$. NEP-ის მნიშვნელობიდან შიძლება მივიღოთ სიგნალის სიმძლავრე რომელიც საჭიროა სასურველი NEP- ის მისაღებად ვინაიდან ციფრულ სისტემებში მიმღების გატარების ზოლი გადაცემის სიჩქარის პროპორციულია, მოთხოვნა მოცემული SNR-ის დროს კვადრატული ფესვი გატარების ზოლიდან პროპორციულია, ე.ი

$$P_{in} \propto \sqrt{B} \quad (4.31)$$

4.9. მიმღები დომინანტური საფანტისებური ხმაურით

თუ სიგნალის ამპლიტუდა დიდია (ეს შეიძლება მოხდეს მიმღებებისთვის, რომლებიც ოპტიკურ ქსელში გადამცემთან ახლოს მდებარეობს), მაშინ საფანტისებური ხმაური დომინირებს თერმულ ხმაურზე,

ანუ., $\sigma_s \gg \sigma_T$ და $\sigma_T \approx 0$.

ამ შემთხვევაში:

$$SNR = \frac{\mathcal{R} P_{in}}{2qB} \quad (4.32)$$



ნახ. 4.5. მიმღები დომინანტი საფანტისებური ხმაურით

ციფრულ სისტემებში მიმღების გატარების ზოლი გადაცემის სიჩქარის პროპორციულია, ამიტომ, SNR-ის ამაღლების მოთხოვნა განპირობებულია P_{in} ოპტიკური სიმძლავრის გაზრდით, რომელიც პროპორციულია კვადრატული ფესვი გატარების ზოლიდან- $\sqrt{B}$ (და არა P_{in} სიგნალის მიმართ წრფივი გაძლიერებით):

$$P_{in} \propto \sqrt{B} \quad (4.33)$$

საფანტისებური ხმაურის რეჟიმის დროს SNR -ფარდობის გაუმჯობესებაში დატვირთვის წინააღმდეგობა რაიმე როლს არ თამაშობს, და მისი ამაღლება შეიძლება მოხდეს ოპტიკური P_{in} სიგნალის სიმძლავრის წრფივი გაძლიერებით. ოპტიკური სიმძლავრე შეიძლება წრფივად გაძლიერდეს მიმღების გატარების ზოლის სიგნალის ზრდასთან ერთად.

$$P_{in} \propto B \quad (4.34)$$

სადაც, $\square$ -პროპორციულობის ნიშანია, ძალზედ საინტერესოა, რომ დაბალ სიმძლავრეებზე მიმღების მწარმოებლურობა უარესდება, ვიდრე სიგნალის მაღალი სიმძლავრის დროს. ხმაურის სხვადასხვა პირობებს არ გააჩნია ერთნაირი წონა, თუმცა თერმული და კვანტური ხმაურები მაინც უფრო მნიშვნელოვანია.

4.10. ციფრული მიმღების მწარმოებლურობა და ბიტურ შეცდომათა ალბათობა

ციფრული მიმღების მწარმოებლურობა არის მიმღების ტექნიკური შესაძლებლობა შეინახოს მიმღების ძირითადი მახასიათებლები, როგორც მისი ექსპლუატაციის სტანდარტული (ნორმალური) მუშაობის პირობებში, ისე, ავარიული რეჟიმის დროს. ამ მახასიათებლებიდან ერთ-ერთი მნიშვნელოვანია კავშირის მაღალი ხარისხი ბიტურ შეცდომათა ალბათობა (BER), მთლიანად გცბოს დაპროექტებულ დონეზე. ოპტიკური

ტელეკომუნიკაციის სისტემის მწარმოებლურობის გაუარესება /დარღვევა სხვა ფაქტორებთან ერთად ერთმნიშვნელოვნად დამოკიდებულია მიმღების ხმაურებზე, გადამცემის ინტენსიობის ხმაურზე (RIN), რასაც სჭირდება სწორი დაპროექტება და ექსპლუატაციის რეჟიმების შერჩევა გცბოს მუშაობის პირობების გათვალისწინებით. ხმაურის არსებობა აუარესებს მთლიანად კავშირის ხარისხს, ვინაიდან უარესდება სასარგებლო სიგნალის ხარისხი. ტელეკომუნიკაციის ანალოგურ სისტემებში სიგნალის ხარისხი ფასდება პარამეტრით ფარდობა სიგნალი/ხმაური, ხოლო ციფრულ სისტემებში ფარდობით

$$BER = \frac{N_{\text{Sec d}}}{N_{\text{gad ac}}} \quad (4.35)$$

სადაც, BER-ბიტურ შეცდომათა ალბათობაა (კოეფიციენტი);

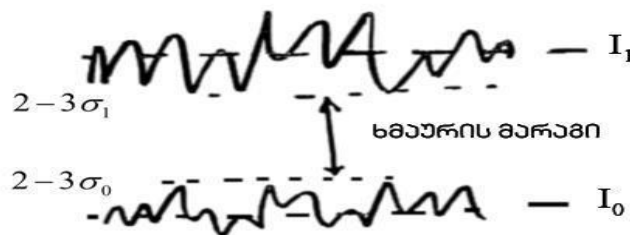
N შეცდ - შეცდომით მიღებული სიმბოლოების, ბიტების რაოდენობაა;

N გადაც - მთლიანად გადაცემული სიმბოლოების, ბიტების რაოდენობაა.

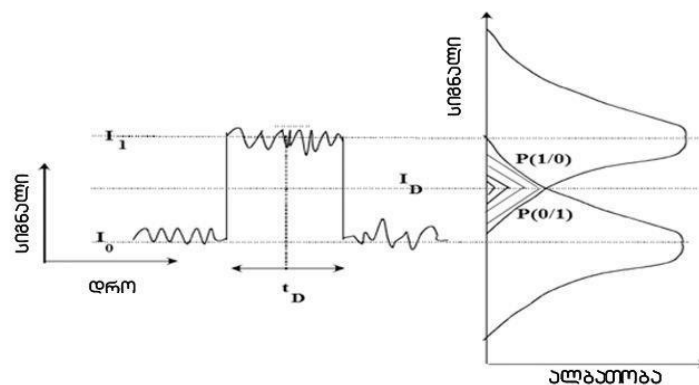
როგორც არაერთხელ აღინიშნა, შეცდომათა ალბათობა (BER) მონაცემების თანაბარალბათური განაწილების შემთხვევაში, იგივეა, რაც ბიტურ შეცდომათა ალბათობის კოეფიციენტი K. ეს წარმოდგენილი იყო (2) ფორმულით. თანამედროვე გცბოს-ში $BER < 10^{-9}$. საერთოდ ოპტიკური სისტემები გამოირჩევიან კავშირის მაღალი ხარისხით. ოპტიკურ სისტემებში კავშირის დამაკმაყოფილებელი ხარისხისათვის BER უნდა იყოს მეტი, ვიდრე. 10^{19} კერძოდ, მაღალი ხარისხის ოპტიკურ სისტემებში $BER = 10^{-9} - 10^{-15}$ საზღვრებშია.

ვიდრე გადავიდოდეთ უშუალოდ სიგნალი/ხმაურის (SNR) ანგარიშზე განვიხილოთ ხმაურები ზოგად ქრილში. ნახ.4.6 -ზე, მოყვანილია ადიტიური (შეკრებითი) ხმაურების ზედდება „1“ და „0“ დონეების საშუალო მნიშვნელობებზე როგორც აღნიშნული იყო, ჩვენ განვიხილავთ ხმაურის ალბათური სიმკვრივის განაწილებას გაუსის (ნორმალური) განაწილების კანონით), მაშინ სიგმა 1 და სიგმა 0 „1“ და „0“

საშუალო დონეებიდან პიკურად გადახრილი იქნებიან საშუალოდ $2-3 \sigma$ მნიშვნელობით. ამდენად, შუალედს სიგმა 1 და სიგმა 0 პიკურ მნიშვნელობებს შორის ეწოდება ხმაურის მარაგი (Noise margin). მიმღების მიერ სიგნალი -ხმაურის მიღების თვალსაზრისით ეს რეჟიმი წარმოადგენს ყველაზე ხელსაყრელ (მსუბუქ) რეჟიმს.



ნახ. 4.6. ადიტიური (შეკრებითი) ხმაურების ზედდება „1“ და „0“ დონეების საშუალო მნიშვნელობებზე და ხმაურის მარაგი



ნახ. 4.7. წარმოდგენილია ხმაურის ზედდება სიგნალზე (ა); „1“ და „0“ ზედდებული ხმაურების ალბათობათა სიმკვრივების განაწილების ფუნქციები

4.11. გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის (ბარიერის)

შერჩევა და ოპტიმიზაცია

ამრიგად, იმისათვის, რომ განვსაზღვროთ BER უნდა დავუშვათ, რომ ორივე სახის ხმაური აღიწერება გაუსის (ნორმალური) განაწილების კანონის

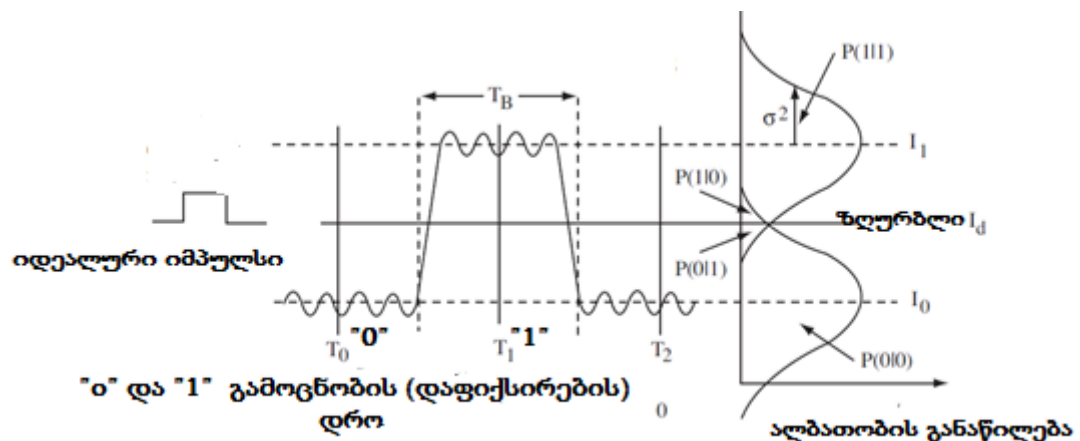
საშუალებით 0 და 1 სიმბოლოებიდან სტანდარტული გადახრის სახით. ამ გადახრების ალბათობა, როგორც წესი 0 და 1 თვის სხვადასხვაა, თუმცა სითბური ხმაურის დომინანტური (უპირატესი) რეჟიმის შემთხვევაში ორივე ხდება ერთნაირი $\sigma_{T. \sigma_s}$.

ნახ. 4.9 -ზე წარმოდგენილია რამოდენიმე შემთხვევა: როგორც ვხედავთ ამ განაწილებებს შორის არის გადაწყვეტილების მიღების I_{th} ზღურბლი (ბარიერი).

თუ $I \geq I_{th} = 1$ არის ბიტი 1

თუ $I < I_{th} = 0$ არის ბიტი 0

ამრიგად, თუ 1 და 0 ალბათობების მრუდები ერთმანეთს კვეთენ გადაკვეთილ და მრუდებს შორის ფართობით განისაზღვრება შეცდომათა ლაბათობა.



ნახ. 4.8. ოპტიკურ მიმღებში მონაცემების მიღება $P(1/0)$ „1“-ის „0“ ში გადასვლის ალბათობა

ოპტიკურ მიმღებში მონაცემების მიღება $P(1/0)$ „1“-ის „0“ ში გადასვლის

ალბათობა, $(0/1)$ ანუ, შეცდომა ხდება, როდესაც 0 ბიტი განისაზღვრება, როგორც $I \geq I_{th}$ ხოლო, 1 ბიტი განისაზღვრება როგორც

$$I < I_{th}. I < I$$

BER მონაცემებისათვის, რომელთაც აქვთ ბიტების სტატისტიკურად თანაბარი მნიშვნელობა (ანუ 1 -ის და 0-ის რაოდენობა საერთო სიგნალში ნაწილდება თანაბრად, (სტატისტიკურად თანაბარია), როგორც 50%/50%, მაშინ:

$$BER = \frac{1}{2} (P(0/1) + P(1/0)) \quad (4.36)$$

სადაც, $P(1/0)$ არის შეცდომის ალბათობა ბიტ -1 – ში, ანუ ალბათობა იმისა, რომ დენი დარჩება ზღურბლის (ბარიერის) ქვემოთ, სინამდვილეში არის როცა გადაწყვეტმა მოწყობილობამ მიიღო ბიტი 1. ხოლო, $P(0/1)$ არის შეცდომის ალბათობა ბიტ 0 – ში, ანუ ალბათობა იმისა, რომ დენი დარჩება ზღურბლის (ბარიერის) ქვემოთ, ფაქტიურად როდესაც მიმდინარე დენი გახდება ზღურბლის (ბარიერის) მნიშვნელობაზე მეტი ან ტოლი და მიიღება 0 ბიტი. მაშინ,

$$P(0/1) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \int_{I_{th}}^{\infty} \left[\frac{(I - I_1)^2}{2\sigma_1^2} \right] dI = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{I - I_{th}}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right) \quad (4.37)$$

$$P(0/1) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \int_{I_{th}}^{\infty} \left[\frac{(I - I_0)^2}{2\sigma_0^2} \right] dI = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{I_{th} - I_0}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right) \quad (4.38)$$

სადაც ალბათობის დამატებითი ფუნქცია ($\operatorname{erfc}(x)$)

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-y^2) dy \quad (4.39)$$

შეცდომათა დამატებითი ფუნქციის საანგარიშოდ არსებობს სტანდარტული ცხრილები. შეცდომათა დამატებითი ფუნქციის გამოყენების შემთხვევაში ორებითი სიგნალებისათვის BER მოიცემა, როგორ

$$BER = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{I_1 - I_{th}}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{I_{th} - I_0}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right) \right] \quad (4.40)$$

ამდენად, BER წარმოადგენს გადაწყვეტილების მიღების მიმდინარე ფუნქციას I_{th} ზღურბლის (ბარიერის) დენის მიმართ. აქედან გამომდინარე, ამ ზღურბლის დენის შერჩევით საჭიროა მივიღოთ მისი ოპტიმალური

მნიშვნელობა, ანუ ზღურბლის დენის ოპტიმიზაციით უნდა მივიღოთ BER - ის ოპტიმალური მნიშვნელობა. ე.ი. ზღურბლი I_{th} უნდა ავირჩიოთ ისე, რომ მინიმიზირებული იქნას BER, როდესაც (19) და (2) გამოსახულებებს ერთმანეთს გავტოვდებით და ამოვხსნით I_{th} -ის მიმართ $/2/$:

$$Q_1 = \frac{I_1 - I_{th}}{\sigma_1} \quad (4.41)$$

$$Q_2 = \frac{I_{th} - I_0}{\sigma_0} \quad (4.42)$$

ანუ,

$$Q_1 = \frac{I_1 - I_{th}}{\sigma_1} = Q_2 = \frac{I_{th} - I_0}{\sigma_0} = Q \quad (4.43)$$

მაშინ, ზღურბლის ოპტიმალური მნიშვნელობა I_{thopt} იქნება BER -ის მინიმუმი:

$$I_{thopt} = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (4.44)$$

ზღურბლის დონის ცვლილება გადამწყვეტ მოწყობილობაში დიდ გავლენას ახდენს $Q=(BER)$ პარამეტრის ოპტიმიზაციაზე. ზღურბლის ოპტიმალური პარამეტრი შეირჩევა ამ ფორმულაში მოცემული ოთხივე (I_1 , I_0 , σ_1 , σ_0) პარამეტრის შერჩევით. პარამეტრები I_1 , I_0 , შესასვლელი სიგნალის დონეებია, ხოლო σ_1 , σ_0 I_1 , I_0 , დონეებიდან თერმული და ქვანტური საშუალო კვადრატული გადახრის მნიშვნელობებია. ვინაიდან საშუალო დენი I_p სხვადასხვაა 1 და 0 დონეებისათვის, ამიტომ საფანტისებური ხმაური და სითბური ხმაურის დონეები და დისპერსიები განსხვავებული იქნება. იმ შემთხვევაში, როდესაც სითბური რეჟიმი დომინირებს ($\sigma_0 \gg \sigma_1$ სითბური ხმაური ($\sigma_0 = \sigma_T$) ზღურბლი იქნება საშუალო მნიშვნელობის, ანუ ზღურბლი იქნება 1 და 0 დონეების ნახევარზე ზღურბლი იქნება საშუალო მნიშვნელობის ანუ ზღურბლი იქნება 1 და 0 დონეების ნახევარზე

$$I_{th} = \frac{I_1 + I_0}{2} \quad (4.45)$$

საფანტისებური რეჟიმის დომინირების შემთხვევაში (საფანტ ხმაური $\sigma_1 = \sigma_s$) $\sigma_0 \ll \sigma_1$ ზღურბლი უახლოვდება ზღურბლს (ზღურბლს ქვემოთაა) ოპტიმალური ზღურბლისათვის

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (4.46)$$

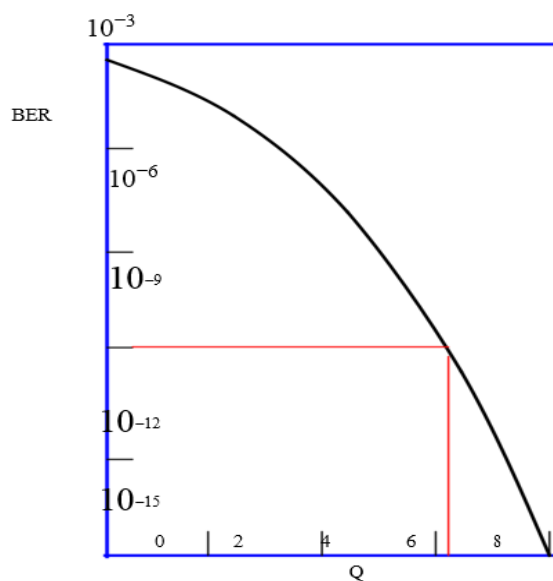
სადაც Q -ფაქტორი განისაზღვრება, როგორც

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (4.47)$$

$Q > 3$ შემთხვევაში ალბათობის ფუნქცია, რომელიც, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ ცხრილებით მოიცემა შეიძლება მიახლოებით აპროქსიმირებულ (მიახლოებულ იქნას) იქნას შემდეგი გამარტივებული სახით:

$$BER \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{Q^2}{2} \right) \quad (4.48)$$

ეს ფორმულა არსებითად გვაძლევს ორობითი სიგნალის საფანტისებური ხმაურის რეზერვს. დამოკიდებულება $BER = \Psi(Q)$ შესაძლებელია განვსაზღვროთ გრაფიკიდან (ნახ. 4.9.)

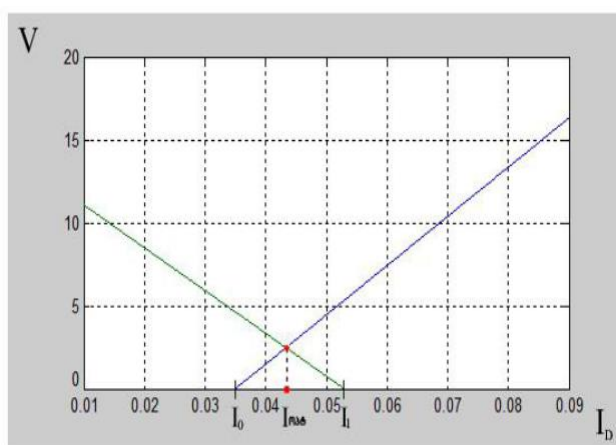


ნახ. 4.9. $BER = \Psi(Q)$ დამოკიდებულების გრაფიკი

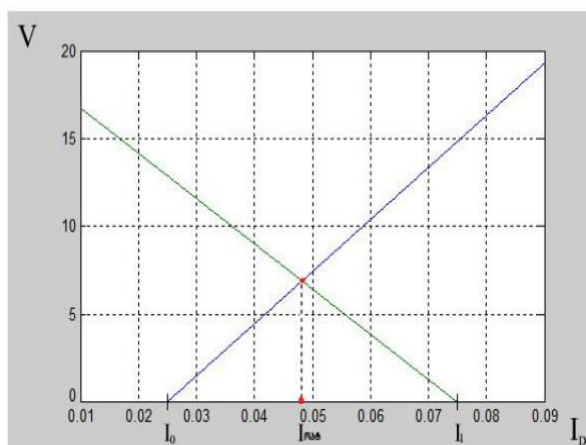
მოყვანილ გრაფიკზე ჩანს, რომ $Q=6$ ($BER=10^{-9}$) მარჯვნივ ($Q=7,8$) შუალედში, როდესაც BER-ის მნიშვნელობა ძალიან სწრაფად, რამოდენიმე თანრიგით იცვლება ($BER=10^{-10}-10^{-15}$), ამ შუალედში $BER=\Psi(Q)$ დამოკიდებულების მრუდი ძალიან ციცაბოდ იცვლება და Q -ს მცირე ცვლილებაც კი იწვევს BER-ის მნიშვნელოვან შემცირებას (გაუმჯობესებას). ეს ძალიან კარგია, თუმცა, მოგვეჩვენება, ერთი შეხედვით ვინაიდან, პრაქტიკულად ამის მიღწევა ტექნიკურად ძალიან რთულია.

ნაშრომში წარმოდგენილია შეცდომათა ალბათობის კოეფიციენტის (BER) ოპტიმალური მნიშვნელობის განსაზღვრა გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემის (გცბოს) მიმღების გადაწყვეტ მოწყობილობაში ზღურბლის დონის შერჩევით ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო გაერთიანების ITU-ს მეთოდოლოგიის საფუძველზე.

ამრიგად, ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო გაერთიანების ITU-ს მეთოდოლოგიის საფუძველზე დადგინდა გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემის (გცბოს) შეცდომათა ალბათობის კოეფიციენტის (BER) ოპტიმალური მნიშვნელობა მიმღების გადაწყვეტ მოწყობილობაში ზღურბლის ოპტიმალური დონის შერჩევით „1“-ის და „0“-ის დონეების სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის.



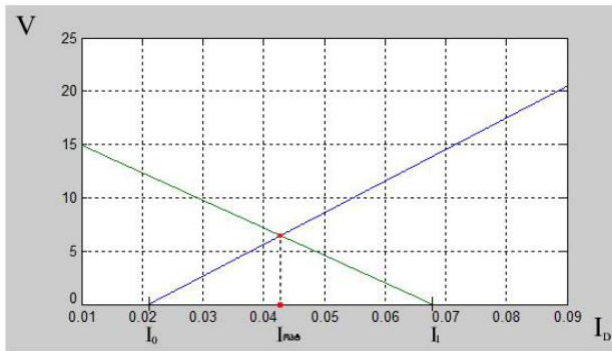
ნახ.4.10.



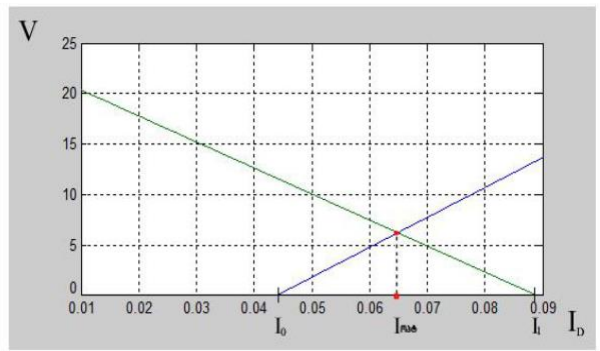
ნახ.4.11.

ნახ. 4.10. $I_1 = 0.053$, $I_0 = 0.035$, $I_{Dopt} = 0.0434$, $I_{Dopt} = 0.0483$, $Q_{opt} = 2.4821$, $BER_{opt} = 6.5 \cdot 10^{-3}$ $opt = 2.69 \cdot 10^{-12}$

ნახ. 4.11. $I_1 = 0.075$, $I_0 = 0.025$, $Q_{opt} = 6.8946$, $BER_{opt} = 4.55 \cdot 10^{-11}$



ნახ.4.12.



ნახ.4.13.

ნახ.4.12 . $I_1 = 0.068$, $I_0 = 0.021$, $I_{Dopt} = 0.0429$, $I_{Dopt} = 0.0649$, $Q_{opt} = 6.481$, $BER_{opt} = 4.55 \cdot 10^{-11}$

ნახ. 4.13. $I_1 = 0.089$, $I_0 = 0.044$, $Q_{opt} = 6.2$, $BER_{opt} = 2.73 \cdot 10^{-10}$

პროგრამა „მატლაბის“ საშუალებით გაანგარიშებულია და ქვემოთ მოყვანილია მაგალითები, სადაც „1“-ის და „0“-ის დისპერსიები შესაბამისად $\sigma_1 = 3.378 \cdot 10^{-3}$, ხოლო $\sigma_0 = 3.373 \cdot 10^{-3}$, ვცვლით „1“-ის და „0“-ის დონეების I_1 -ის და I_0 -ის მონაცემებს და ვღებულობთ (ნახ.4.10 – 4.11). ნახაზებიდან ჩანს, რომ რაც უფრო მეტია სხვაობა „1“-ის (I_1) და „0“-ის (I_0)

დონეებს შორის, მით უფრო მაღალია Q -ს მნიშვნელობა და შესაბამისად დაბალია (უკეთესია) შეცდომათა ალბათობის მიღებული მნიშვნელობა. „1“-ის და „0“-ის დისპერსიების მნიშვნელობის (σ_1 , σ_0) შემცირება კი გამოიწვევს დონეებს შორის სხვაობის გაზრდას და შესაბამისად Q -ს (5) და BER -ის (5) კავშირის ხარისხის მაღალი მნიშვნელობების მიღებას. აგრეთვე უნდა აღინიშნოს, რომ ჩვენს მიერ მიღებული I_{Dopt} -ის მნიშვნელობები აბსოლუტურად ემთხვევა (2) ფორმულით გამოთვლილ I_{Dopt} -ის მნიშვნელობებს. მეტი თვალსაჩინოებისათვის ავაგოთ „1“-ის და „0“-ის დონეების სხვაობის $I_1 - I_0$ -ის Q -ზე დამოკიდებულების გრაფიკი.

შენიშვნა: გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის (ბარიერის) მიღებული სიდიდის მნიშვნელობა შიძლება გადამოწმდეს (4.49) ფორმულით:

$$I_{thopt} = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (4.49)$$

4.12. მინიმალური საშუალო ოპტიკური სიმძლავრე

მიღებული მინიმალური საშუალო სიმძლავრე

$$P_{\min} = \frac{(P + P_{10})}{2} \quad (4.50)$$

თუ დავუშვებთ, რომ სიჩუმის დენი ნულის ტოლია, ხოლო $I_0 = 0$

$$Q = \frac{I_1}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{2\mathcal{R}P_{av}}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (4.51)$$

სადაც გათვალისწინებულია, რომ მონაცემები მიღებისას წანაცვლებული არ არის და ვინაიდან $I_0 = 0$ საშუალო სიმძლავრე ტოლია სიმძლავრის ნახევრისა რომელიც, შეესაბამება სიმბოლოს „1“ ($I_1=1$). SNR - ისათვის საშუალო სიმძლავრე ტოლია:

$$P_{\min} = \frac{7(\sigma_1 + \sigma_0)}{2\mathcal{R}} \quad (4.52)$$

თერმული ხმაურის სიჭარბისას (შეზღუდული რეჟიმის) დროს $\sigma_0 = \sigma_1$,

$Q = I_1 / 2\sigma_1$, ხოლო მიმდინარე საშუალო სიგნალი არის $I_p = \frac{I_1}{2}$, რაც

გვაძლევს $Q = \frac{I_p}{\sigma_1}$ მაშინ, მინიმალური SNR იქნება:

$$SNR = \frac{I_p^2}{\sigma_1^2} = Q^2 = (7)^2 = 49 \quad (4.53)$$

$$SNR=10 \text{ Log}49=10*16,9=17$$

საფანტისებური რეჟიმის შეზღუდვისას

$$\sigma_0 \ll \sigma_1, \Rightarrow Q = I_1 / \sigma_1 = 2 I_p / \sigma_1$$

მინიმალური SNR იქნება:

$$SNR = \frac{I_p^2}{\sigma_1^2} = \frac{Q^2}{4} = \frac{(7)^2}{4} \approx 12 \quad (4.54)$$

$$SNR=10\text{Log}12=10*10,79=11 \text{ დბ}$$

4.13. დამოკიდებულება OSNR-სა და ESNR-ს შორის

ჩვენ განვიხილეთ ფარდობა ელექტრული სიგნალი/ხმაური (SNR), ახლა განვიხილოთ ფარდობა ოპტიკური სიგნალი/ხმაური (OSNR) და მისი კავშირი Q ფაქტორთან. ამავე დროს, დავადგენთ დამოკიდებულებას ოპტიკურ ს/ხ და ელექტრულ ს/ხ შორის.

$$(i^2_{jam}) = (i_{DS^2}) + (i_{DB^2}) + (i_{IL^2}) \text{ db}$$

ყვითელის ადგილას უნდა ჩაჯდეს მწვანე ფორმულა ლაზერის ინტენსიობის ხმაურია

$$Q_{dB} = 20 \log \sqrt{OSNR} \sqrt{\frac{B_0}{B_c}} \quad (4.55)$$

(4.55) ფორმულაში B0-დამაბოლოებელი მოწყობილობის გატარების (ოპტიკური მიმღების) გატარების ზოლია, B0- ოპტიკური მიმღების ფილტრის გატარების ზოლია. შესაბამისად:

$$Q(\text{დბ}) = OSNR + \text{Log} B_0 / B_e \quad (4.56)$$

და

$$Q(\text{დბ}) = \text{Log} Q(\text{წრფივი}) \quad (4.57)$$

მეოთხე თავის დასკვნა

დაშვებები და დასკვნები

გცბოს მიმღები მოწყობილობის საერთო ანალიზიდან და ხმაურების კვლევიდან შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი დაშვებები და დასკვნები:

1. გცბოს-ში არსებული ხმაურები შეგვიძლია დავყოთ ორ ჯგუფად: მიმღებში არსებული ხმაურები და გადამცემში (ლაზერი) არსებული ხმაურები. თავისთავად, მიმღებში ადგილი აქვს შემდეგ ხმაურებს: საფანტისებური (კვანტური) ხმაური, გაჟონვის (სიჩუმის) მოცულობითი ხმაური, გაჟონვის (სიჩუმის) ზედაპირული ხმაური, აგრეთვე თერმული (ჯონსონის) ხმაური. ვინაიდან მოცულობითი და ზედაპირული ხმაურების ხვედრითი წილი საფანტისებურ ხმაურში ძალიან მცირეა მიმღებში არსებობს ძირითადად ორი სახის ხმაური: საფანტისებური და თერმული ხმაურები. გადამცემში: ლაზერის სიმძლავრის ინტენსივობის (RIN) ხმაურები რომელიც განეკუთვნება სისტემატიური ხმაურების კატეგორიას, ამიტომ ფარდობა სიგნალი/ხმაური შეფასებისას მათი გათვალისწინება აუცილებელია.

2. საფანტისებური ხმაურის დისპერსია ექვემდებარება ალბათობის პუასონის განაწილების კანონს, ხოლო თერმული ხმაურის დისპერსია-ნორმალური (გაუსის) განაწილების კანონს. ალბათობათა ნორმალური განაწილების გამოსათვლელად ვიყენებთ სამი სიგმას წესს, რომლის სიზუსტე სრულიად აკმაყოფილებს ჩვენს მოთხოვნებს. ვუშვებთ, რომ ხმაურის ყველა წყარო ერთმანეთისაგან დამოუკიდებელია, ამიტომ მათი აჯამვა შესაძლებელია.

3. ფარდობა სიგნალი/ხმაური (ESNR) ოპტიკურ ტელეკომუნიკაციაში განიხილება ორი სახის სიგნალი/ხმაური ფარდობა: ოპტიკური OSNR და ელექტრული ESNR. პირველი სახის ფარდობა იზომება ოპტიკური მიმღების

(ფოტოდეტექტორის) წინ, ხოლო მეორე სახის ფარდობა-ფდ-ის შემდეგ, ან გადამწყვეტი მოწყობილობის წინ.

4. ფოტოდეტექტორის შერჩევისას უნდა გავითვალისწინოთ ერთი ფაქტი: ყველა ფოტოდეტექტორი, მის შესასვლელზე ოპტიკური სიგალის არარსებობის დროსაც კი გენერირებს დენის მცირე რაოდენობას ეს ხდება იმიტომ, რომ პარაზიტული სინათლე მაინც აღწევს და ეცემა ფდ-ის შუქმგრძნობიარე შრეზე და იწვევს მცირე რაოდენობის ელექტრონების ამოფრქვევას, მას ემატება აგრეთვე გადამტანების სითბოგამოყოფა. ასეთ დენს ეწოდება სიჩუმის დენი I_d .

5. ციფრული მიმღების მწარმოებლურობა არის მიმღების ტექნიკური შესაძლებლობა შეინაჩუნოს მიმღების ძირითადი მახასიათებლები, როგორც მისი ექსპლუატაციის სტანდარტული (ნორმალური) მუშაობის პირობებში, ისე, ავარიული რეჟიმის დროს. ამ მახასიათებლებიდან ერთ-ერთი მნიშვნელოვანია კავშირის მაღალი ხარისხი ბიტურ შეცდომათა ალბათობა (BER), მთლიანად გცბოს დაპროექტებულ დონეზე. ოპტიკური ტელეკომუნიკაციის სისტემის მწარმოებლურობის გაუარესება /დარღვევა

სხვა ფაქტორებთან ერთად ერთმნიშვნელოვნად დამოკიდებულია მიმღების ხმაურებზე, გადამცემის ინტენსივობის ხმაურზე (RIN), რასაც სჭირდება სწორი დაპროექტება და ექსპლუატაციის რეჟიმის შერჩევა გცბოს მუშაობის პირობების გათვალისწინებით.

6. გცბოს მიმღების ზღურბლის ოპტიმიზაციას დიდი მნიშვნელობა აქვს მთლიანად ოპტიკური კავშირის ხარისხობრივი მაჩვენებლების გაუმჯობესების საქმეში. მიმღების გადამწყვეტი მოწყობილობის ოპტიმიზაციით უზრუველვოფთ ბიტურ შეცდომათა ალბათობის ოპტიმიზაციას. გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის ოპტიმიზაციის ამოცანა მდგომარეობს შემდეგში: $(I_1, I_0, \sigma_r \equiv \sigma_1, \sigma_s \equiv \sigma_0)$ პარამეტრების ისეთ შერჩევაში, როდესაც გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის ყველა შესაძლო შემთხვევებს შორის მიიღება საუკეთესო (ოპტიმალური) მნიშვნელობა, რომლთაც გარანტირებულია BER_{opt} საუკეთესო

მნიშვნელობა. ITU-ს M.201 მეთოდოლოგიის საფუძველზე გამოთვლილი იქნა რიგი რეალური მიმღებების გადამწყვეტი მოწყობილობების ზღურბლის ოპტიმალური მნიშვნელობები, შესაბამისი Q- ფაქტორის და BER-ის ოპტიმალური მნიშვნელობები, რომლებიც გადამოწმებული იქნა ფორმულით:

$$I_{thopt} = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_0 + \sigma_1}$$

თავი 5. ლაზერის ფარდობითი ინტენსივობის ხმაური (RIN), მოდების გაყოფის ხმაური (MPN), ფარდობითი ინტენსივობის ხმაური, მათი დამოკიდებულება ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე. ხმაურების შეფასება სიმძლავრის ჯარიმით

5.1. ხმაურის ინტენსივობის ეფექტი

როგორც ქვემოთ იქნება ნაჩვენები ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე და ენეგეტიკულ პოტენციალზე მოქმედებს მრავალი ფაქტორი. ლაზერის მხრიდან საყურადღებოა ფარდობითი ინტენსივობის ხმაური RIN (Relative Intensity Noise) და მოდების გაყოფის ხმაური MPN (Mode Partition Noise) ოპტიკური წყაროების უმეტესობა გამოავლენს გამომავალი სიმძლავრის ინტენსივობის ცვალებადობის გარკვეულ ფორმას ლაზერის ლაზერის გამოსასვლელზე. სიმძლავრის ინტენსივობის ცვალებადობა ზემოთ განხილული მიმდებარის ხმაურებთან ერთად წარმოადგენს გცბოს სისტემური ხმაურის კიდევ ერთ წყაროს, რომელიც გცბოს გადამცემიდან მოდის და აუცილებლად უნდა იქნას გათვალისწინებული მთლიანად გცბოს SNR შეფასებისას.

თუ ვირწმუნებთ, რომ ხმაურის ყველა წყარო დამოუკიდებელია, მაშინ შესაძლებელია ისინი ავჯამოთ

$$\langle i_N^2 \rangle = \langle i_S^2 \rangle + \langle i_T^2 \rangle + \langle i_I^2 \rangle \quad (5.1)$$

ლაზერული ენერგიის რყევები შეიძლება გამოიხატოს ასე:

$$\langle i_I \rangle = R \left(\langle P_{inc}^2 \rangle \right)^{\frac{1}{2}} = R P_{inc} r_I \quad (5.2)$$

მაშინ:

$$r_I^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} RIN(\omega) d\omega \quad (5.3)$$

ლაზერის სხივისათვის

$$r_{\text{int}} = \frac{1}{SNR} = \frac{1}{\sigma} \quad (5.4)$$

როდესაც $SNR > 20$ დბ,

$$r_{\text{int}} = 0,01$$

5.2. ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე და ენეგეტიკულ პოტენციალზე მოქმედი ფაქტორები გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემებში (გცბოს)

გცბოს ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე (BER) მოქმედი ფაქტორები მოიცავენ სისტემის კვანძებში და კომპონენტებში მიმდინარე ფიზიკურ პროცესებს. ესენია გამომსხივებელი (ნახევარგამტარული ლაზერები, შუქდიოდები), ოპტიკური ბოჭკო ოპტიკური მიმღებები (p-i-n, APD ფოტოდიოდები, წინასწარი გამაძლიერებელი, გადამწყვეტი მოწყობილობა), რეგენერატორები და ოპტიკური გამაძლიერებლები, არხების გამომყოფი აპარატურა, სისტემის პასიური კომპონენტები, სხვა ინფრასტრუქტურა. [2,9,15]. მითითებულ კვანძებში და კომპონენტებში არსებული დარღვევები აუარესებენ BER-ის მნიშვნელობას, აგრეთვე ზღუდავენ სისტემის ენეგეტიკულ პოტენციალს (ბიუჯეტს). ამ ფაქტორებმა მთლიანობაში შესაძლებელია გააუარესონ გცბოს მწარმოებლურობა. ცხადია შეცდომათა ალბათობის (კოეფიციენტის) შეფასება დასაპროექტებელი სისტემისათვის ეყრდნობა შესაბამის კრიტერიუმებს. გცბოში მოსალოდნელი დარღვევები შესაძლებელია დავყოთ ოთხ ძირითად ჯგუფად: სითბური ანუ ჯონსონის ხმაური, საფანტისებური (კვანტური) ხმაური, რომელიც დამოკიდებულია სიგნალზე. ეს უკანასკნელი თავისითავად იყოფა მოდალურ ხმაურად, მოდების გაყოფის ხმაურად MPN (Mode Partition Noise) (მოდების გაყოფის

რეჟიმი), ფარდობითი ინტენსივობის ხმაურად RIN (Relative Intensity Noise), სიმბოლოთაშორის ხმაურად - ISI- Intersymbol Interference. ხმაურზე ცხადია დიდ გავლენას ახდენს ოპტიკურ ბოჭკოში და კაბელში მიმდინარე პროცესები (დისპერია: მოდური, მასალის, მატერიალური, პოლარიზაციის), მილევა. BER -თვის მნიშვნელოვანია მიმღების გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის შეჩევა და მისი ოპტიმიზაცია. BER-ის სტაბილური დონის შესანარჩუნებლად რიგ შემთხვევაში საჭირო ხდება მიმღების შესასვლელზე სიმძლავრის დონის გაზრდა (მაგალითად, ოპტიკური ტრაქტის კომპონენტების დეგრადაციის, ან ოპტიკური მაგისტრალის სახაზო ტრაქტში განთავსებული კომპენსატორების მიერ შეტანილი მილევის, გადამცემის, მიმღების და ოპტიკური კაბელის დაძველების გამო), შესაბამისად, ამ შემთხვევაში საჭირო ხდება სიმძლავრის ჯარიმის გადახდა. სიმძლავრის ჯარიმა წარმოადგენს BER-ის სტაბილურობის შესანარჩუნებლად საწყის სიმძლავრესთან შედარებით გაზრდილი (მომატებული) სიმძლავრის ფარდობას საწყის (გადაცემულ) სიმძლავრესთან

სადაც,

$$P_{jar} = 10 \log \frac{P_{gazrd}}{P_0} \quad (5.5)$$

P_{jar} - ჯარიმა სიმძლავრის მიხედვით; P_{gazrd} - გამომავალი სიმძლავრე; P_0 - საწყისი სიმძლავრე სიმძლავრის ჯარიმა შეიძლება გამოწვეული იყოს გცბოს კვანძებში და კომპონენტებში არსებული დარღვევებით:

ოპტიკური სახაზო ტრაქტი

ობ-სმილევიტ; ობ-ს დისპერსიის შედეგად ობ-ში იმპულსის გაფართოების გამო; დისპერსიის გამო სიმბოლოთაშორისი (ISI) დამახინჯებით;

დანაკარგები, რომლიც შეტანილია სახაზო ტრაქტში დისპერსიის კომპენსატორების მოდულების მიერ (თუ ასეთი არის);-

შეერთებების, შემაერთებლების, გამთიშველების, სხვადასხვა საკონტაქტო შენაურებით გამოწვეული დანაკარგების გამო; ობ-ს გატარები ზოლის არასათანადო სიგანის $\Delta f_{\text{ობ}}$ გამო; და სხვა.

გადამცემი ტრაქტი

გადამცემის მახასიათებლების დეგრადაცია (მოწყობილობის დაძველება, გამომსხივებლის მახასიათებლის ცვლილება და ა.შ.);

გადამცემში აღძრული ხმაურები (მოდების ხმაური, მოდების გაყოფის ხმაური -MPN (Mode Partition Noise), ფარდობითი ინტენსივობის ხმაური -RIN (Relative Intensity Noise);

გადამცემი ტრაქტის არასათანადო გატარების ზოლი $\Delta f_{\text{გად}}$; ოპტიკური გადამცემის გამომსხივებლის არასათანადო (დადგენილი სტანდარტისაგან განსხვავებული) სიმძლავრის დონე.

მიმღები ტრაქტი

ფოტოდეტექტორის ეფექტურობის კოეფიციენტის მნიშვნელობა;

ფოტოდეტექტორის წინასწარი გამაძლიერებლის ტიპი;

მიმღების მგრძნობიარობის დეგრადაცია (მიმღების ელემენტების დაძველება, მახასიათებლების ცვლილება და სხვა);

მიმღების არასათანადო გატარების გატარების ზოლი $\Delta f_{\text{მიმღ}}$;

ფარდობითი გატარების სიჩქარე $B/\Delta F$; სადაც, B-გცბოს გადამცემის სიჩქარეა, მბტ/წმ, Δf -გცბოს გატარების ზოლია, მგჰც;

ბიტურ შეცდომათა ალბათობასთან მჭიდროდ არის დაკავშირებული გცბოს ენერგეტიკული პოტენციალი (ბიუჯეტი), რომელიც განსაზღვრავს სისტემის რეგენერაციული უბნის სიგრძეს პროექტის პირობებით განსაზღვრული ბიტურ შეცდომათა ალბათობით. ვინაიდან, თითოეულ რეგენერატორს და გამაძლიერებელს თავის წილი შეაქვს შეცდომათა ალბათობის კოეფიციენტის საბოლოო სიდიდეში.

გცბოს ენერგეტიკული პოტენციალი (ბიუჯეტი)

გცბოს მწარმოებლურობასთან და უპირველეს ყოვლისა ბიტურ შეცდომათა ალბათობასთან მჭიდროდ არის დაკავშირებული გცბოს ენერგეტიკული პოტენციალი (ბიუჯეტი), რომელიც განსაზღვრავს სისტემის რეგენერაციული უბნის სიგრძეს პროექტის პირობებით განსაზღვრული ბიტურ შეცდომათა ალბათობის შესაბამისად. [10]

თავად გცბოს ენერგეტიკული პოტენციალის განსაზღვრისას ჩვეულებრივ გაითვალისწინება შემდეგი პარამეტრები: დაშვებები ბოჭკოვან-ოპტიკური ხაზებისათვის და დამატებითი ჯარიმები, რომლებიც უნდა დაემატოს ბიუჯეტს რეზერვისათვის და მისი უმტყუნო მუშაობის გარანტიისათვის.

გცბოს დაპროექტებისას წინასწარ აუცილებელია განისაზღვროს დამატებითი დანაკარგები დეციბელებში, რომელიც შესაძლებელია გამოვლინდეს გცბოს ესქპლუატაციის პროცესში. ეს დაშვებები გარანტიას უნდა იძლეოდეს გაუთვალისწინებელი დანაკარგების კომპენსაციისათვის, რომლებიც გამოწვეულია აქტიური ელემენტების მახასიათებლების გაუარესების გამო(მაგალითად, ლაზერული დიოდების, ფოტოდეტექტორის დამკველებით, დანაკარგების გაბნევით შეერთებებზე, დანაკარგების გაზრდა ტემპერატურის ან ნესტიანობის მკვეთრი ცვლილებების გამო). საერთოდ, რეკომენდებულია ჯამური (სარეზერვო) დაშვება $C_{\text{რეზ}}=6$ დბ-ის ფარგლებში მაგისტრალური ქსელებისათვის. თუმცა, ზოგიერთი მწარმოებლები იზღუდებიან 4,8 დბ-მდე და 3 დბ-მდეც კი. რეკ. ITU-T G.957 ადგენს გცბოს კვანძებში დანაკარგების დასაფარად მომსახურების ვადის დამთავრების მომენტისათვის რეზერვის სახით დატოვებული იქნას 2-4 დბ: დანადგარების დამკველების ან ოპტიკური კაბელის ავარიული დაზიანების და შემდგომი აღდგენისას დამატებითი მილერის გამო მახასიათებლების გაუარესების კომპენსაციისათვის. ამ რეკომენდაციებში მოყვანილია მტკიცებულებები, რომ დაშვებები მიღებაზე გაანგარიშებული უნდა იქნეს უარესი (ყველაზე ცუდი) შემთხვევისათვის,

ოპტიკური მიმღებ - გადამცემების, შეერთებების, გამთიშების, ატენიუატორების და სხვა პასიური ელემენტებისათვის, აგრეთვე დაშვებები ოპტიკური კაბელებისათვის. უნდა აღინიშნოს, რომ შეცდომათა ალბათობის კოეფიციენტის გაზომვას განსაკუთრებით მცირე შეცდომათა ალბათობის დროს დიდი დრო სჭირდება და პრაქტიკულად ნაკლებად გამოყენებადია პრაქტიკაში. მაგალითად, თუ გადაცემის სიჩქარე 10 გბტ/წმ (STM-64) რიგისაა 10 ბიტი შეცდომის რეგისტრაციას, როდესაც $BER=10^{-14}$ რიგისაა, სჭირდება, 27,7 საათი; ხოლო, 1 ბიტი შეცდომის რეგისტრაციას, როდესაც $BER=10^{-14}$ რიგისაა, 2,77 საათი.

ამდენად, გცბოს-ის დაპროექტების უმნიშვნელოვანესი ამოცანაა სისტემის მწარმოებლურობის დარღვევის პირობებში მიღებული იქნას ისეთი გადაწყვეტილება, რომლის მიხედვითაც ერთის მხრივ დაცული იქნება გცბოს ნორმალური ფუნქციონირება, მის ცალკეულ კვანძებში მიმდინარე დარღვევების და რეზერვირების დაბალანსების გათვალისწინებით, ხოლო, მეორეს მხრივ დაპროექტების პირობებისათვის მისაღები ბიტურ შეცდომათა ალბათობის (კოეფიციენტის) დაცვის კუთხით, რომელიც თავისთავად ემყარება ტელეკომუნიკაციის ციფრულ ტრაქტებში კავშირის ხარისხის განსაზღვრის კრიტერიუმებს, გაზომვის პირობებს, რეჟიმებსა და დადგენილ ნორმებს. მაქსიმალური საშუალო სიმძლავრე (არხის)მინიმალური საშუალო სიმძლავრე (არხის);მაქსიმალური საშუალო საერთო გამოსასვლელი სიმძლავრე (მრავალარხიანი).

მიმღების მინიმალური მგრძნობიარობა

მიმღებისა მინიმალური მგრძნობიარობა (უარესი შემთხვევისათვის, ანუ მუშაობის ვადის ბოლოსათვის) განისაზღვრება, როგორც მიღებული საშუალო სიმძლავრის მინიმალური დასაშვები მნიშვნელობა გცბოს ტრაქტის შესაბამის წერტილში $BER=10^{-12}$ მიღწევისათვის. „ცუდი შემთხვევის“ მდგომარეობა გამოიწვევა მოცემულ ტრაქტში გადამცემის შეუთანხმებლობას ოპტიკურ მიმღებთან.

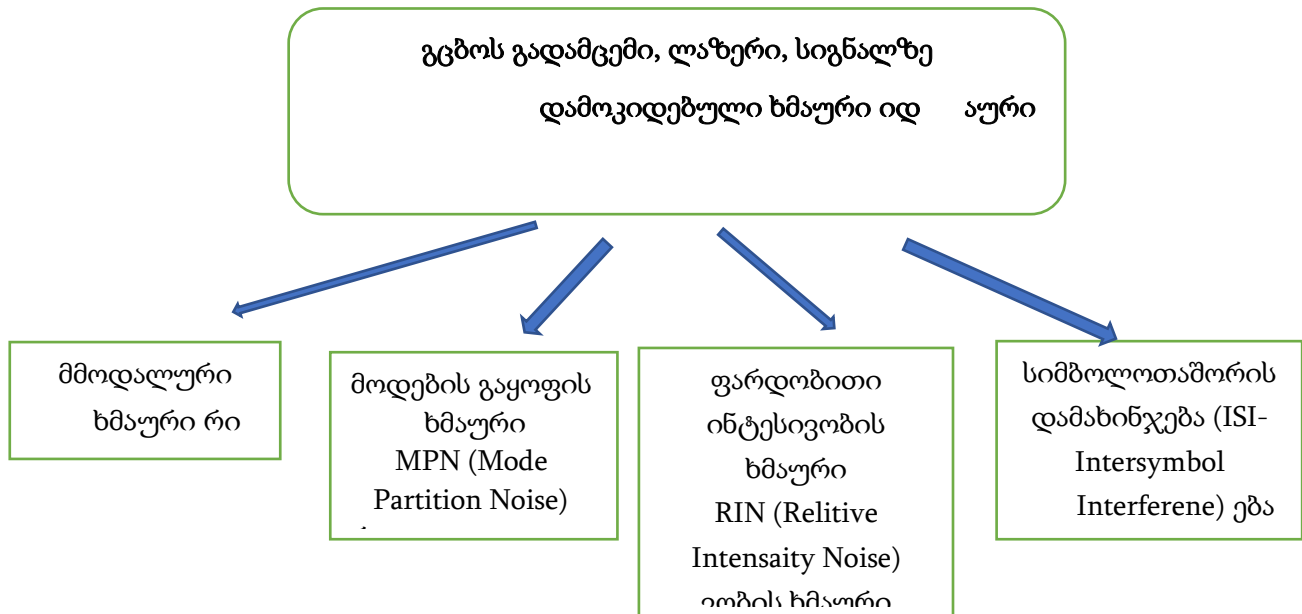
ოპტიკური ტრაქტის მაქსიმალური გაუარესება

გაუარესება სიმძლავრის მიხედვით, რაც დაკავშირებულია ოპტიკურ ტრაქტთან (ისეთი, როგორიცაა ობ-ს ქრომატიული დისპერსია, ან პოლარიზაციის მოდური დისპერსია, ჯიტერი, არეკვლები) შეიცავს ოპტიკური ტრაქტის მაქსიმალურ გაუარესებას და არა მიმღების მინიმალურ მგრძნობიარობას. თუმცა, უნდა შევნიშნოთ, რომ მინიმალური საშუალო ოპტიკური სიმძლავრე მიმღებთან უნდა აჭარბებდეს (აღემატებოდეს) მიმღების მგრძნობიარობას ოპტიკური ტრაქტის გაუარესების დონით. ოპტიკური სისტემები, რომლებიც შეზღუდულია გადაცემის სიშორით, სახელდობრ, ობ-ს ქრომატიული დისპერსიით, გარკვეულ პროცესებში საჭიროებენ დისპერსიის კომპენსაციას (იხ. რეკ. G.991) არსებობს ამ ფაქტორის გადალახვის გზები.

5.3. ბიტურ შეცდომათა ალბათობა (BER) და გადამცემის ლაზერის მოდეების ფარდობითი ინტესივობის ხმაურის (RIN) რეჟიმი გადამცემის ციფრულ-ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს)

გადამცემის ციფრულ ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს) არსებულმა დამახინჯებათა რამოდენიმე სახემ შესაძლებელია მნიშვნელოვანი გავლენა მოახდინოს გადასაცემ სასარგებლო სიგნალზე. ასეთი დარღვევები იწვევენ სისტემის რიგი პარამეტრების და მთლიანად მწარმოებლურობის ბიტურ შეცდომათა ალბათობის გაუარესებას, კერძოდ, და შედეგად, ჯარიმას სიმძლავრის მიხედვით. გადამცემის ოპტიკურ სისტემებში ეს დარღვევები შეიძლება დავეყოს ოთხ ძირითად ჯგუფად: სითბური ხმაური, საფანტისებური ხმაური, სიგნალზე დამოკიდებულ ხმაური, რომელიც იყოფა: (მოდალური ხმაური, მოდეების გაყოფის ხმაური MPN (Mode Partition Noise), ფარდობითი ინტესივობის

ხმაური - RIN (Relative Intensity Noise) და სიმბოლოთაშორისი დამახინჯება (ISI- Intersymbol Interference) (ნახ. 5.1).



ნახ. 5.1. სიგნალზე დამოკიდებული ხმაურები გვბოს-ში

განვიხილოთ მოდების გაყოფის ხმაურის რეჟიმი [16] გვბოში და მისი გავლენა ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე და ამ რეჟიმის გამო გამოწვეული ჯარიმა. საერთოდ, ბიტურ შეცდომათა ალბათობა მნიშვნელოვნად უარესდება, თუ თუ ოპტიკურ სისტემას გააჩნია არანულოვანი მილევის კოეფიციენტი. უნდა ითქვას, რომ თუ მიმღების გადამწყვეტ მოწყობილობაში ზღურბლი შერჩეულია არასწორად, მაშინ იმისათვის რომ შევინარჩუნოთ BER -ის მუდმივი მნიშვნელობა, საჭირო ხდება მიმღები მოწყობილობის შესასვლელზე სიმძლავრის გაზრდა, რაც იმას ნიშნავს, რომ BER მუდმივობის შესანარჩუნებლად საჭიროა ჯარიმის გადახდა. მიმღების გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის დონის ოპტიმიზაცია წარმოდგენილი იყო ნაშრომში.[18] ნახევარგამტარულ ლაზერებში თითოეული გრძივი მოდის ინტენსიობა ირხევა შემთხვევითი კანონით, იმ შემთხვევაშიც კი როდესაც ლაზერის გამოსასვლელის სიმძლავრე მუდმივია. ეს რხევები მიმდინარეობს როგორც იმპულსის

შიგნით, ისე, იმპულსიდან იმპულსამდე. მაშინაც კი, როდესაც გვერდითი განივი მოდეები საკმარისად ჩახშობილი არ არის, ცვლილებები წარმოიქმნება შინაგანი რყევების შედეგად, რომელიც გამოწვეულია ლაზერის მუშაობით, ბოჭკოების შეერთების და კონექტორების ბოლოებიდან არეკლილი უკუქცევითი (უკუმიმართულების) სხივების გავლენით დისპერსიული ბოჭკოს გასწვრივ თითოეული გრძივი მოდა მოძრაობს სხვადასხვა სიჩქარით და მიმღებს აღწევს დროის სხვადასხვა მომენტში. მიმღების გადამწყვეტ მოწყობილობაში ციფრული სიგნალის რეგისტრირებისას იმპულსების სტრობირების ოპტიმალური დრო ინაცვლებს; შესაბამისად, ადგილი აქვს დროითი ჯიტერის წარმოშობას, ეს საკითხები გამოკვლეული იყო [17,18]. ინტენსივობის რყევების ერთობლიობას გრძივ მოდეებსა და ამ მოდეების დაყოვნებას შორის, რომელიც გამოწვეულია ობ-ს დისპერსიით, მივყავართ ბიტურ შეცდომათა ალბათობის კოეფიციენტის შემცირებასთან. ინტენსივობის ფლუქტუაციის კომბინაცია გრძივ მოდეებს შორის და თითოეული მოდის დროში დაყოვნება, რომელიც გამოიწვევა ობ-ს დისპერსიით, იწვევს ბიტურ შეცდომათა ალბათობის გაუარესებას გცბოს-ში. ფარდობა სიგნალი/ხმაური, რომელიც განპირობებულია მოდეების გაყოფის ხმაურით, არ არის დამოკიდებული სიგნალის სიმძლავრეზე, ვინაიდან, ეს მოვლენა წარმოადგენს ზოგიერთი კონსტრუქციის ლაზერში მიმდინარე ფიზიკური პროცესის თანმდევს. ხმაურის სიმძლავრე პროპორციულია სიგნალის სიმძლავრისა და ინტენსივობის განაწილებისა განივ მოდეებს შორის. მოდეების განცალკევების ხმაურს, მივყავართ სისტემისათვის ბიტურ შეცდომათა ალბათობის ქვედა მიღწევად ზღვრამდე; ანუ, თუ სიმძლავრე, რომელიც მიეწოდება ოპტიკურ ბოჭკოს გაიზრდება, ბიტურ შეცდომათა მიღწეული კოეფიციენტი შემდგომში ვერ იქნება გაუმჯობესებული. უფრო მაღალი ბიტური სიჩქარეებისათვის გარდამავალი პროცესები გვერდით მოდეებში იკავებს გადაცემული იმპულსების ხანგრძლიობის დიდ ნაწილს, ხოლო ინჟექტირებოდი ელექტრონების გაზრდა იწვევს გვერდითი მოდეების

მნიშვნელოვან ამაღლებას საწყის გარდამავალ პროცესში, შესაბამისად მოდის გაყოფის ხმაური გახდება უფრო სერიოზული გადაცემის სიჩქარის გაზრდისას. თუ დავუშვებთ, რომ ლაზერის საერთო გამომავალი სიმძლავრე მუდმივია, ხოლო მოდეების გაყოფის ალბათობა ექვემდებარება სპექტრის დროში გასაშუალების გაუსის კანონს, შეიძლება ვთქვათ, რომ ფარდობა სიგნალი/ხმაური, რომელიც განპირობებულია მოდეების გაყოფით ფასდება, როგორც/5/:

$$SNR = \frac{1}{\sigma_{pc}^2}; \quad (5.6)$$

SNR-ფარდობა სიგნალი/ხმაური, განპირობებული მოდეების გაყოფის ხმაურით σ_{pc}^2 -მოდეების გაყოფის ხმაური, ხმაურის სიმძლავრე მოდური ხმაური გამიჯვნის გამო.

ხოლო, სიმძლავრის ჯარიმა მოდური გაყოფის ხმაურის σ_{pc}^2 გამო განისაზღვრება ფორმულით [19]:

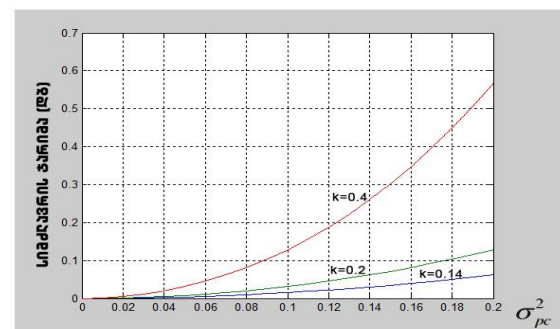
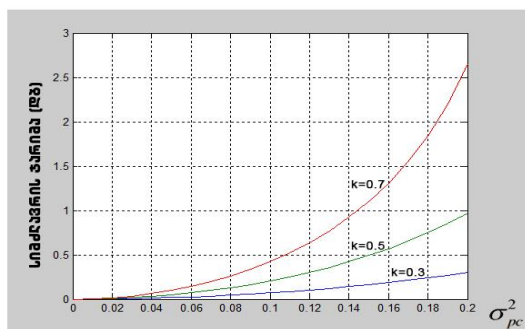
$$P_{mod\ jar} = -5\log(1 - Q^2 \sigma_{pc} k^2) \quad (5.7)$$

სადაც, Q - ფაქტორი დაკავშირებულია ბიტურ შეცდომათა ალბათობასთან (BER) გაუსის მიახლოებით. მაგალითად, როდესაც $BER=10^{-9}$, $Q=6$. მოდეების გაყოფის კოეფიციენტი K აღნიშნავს ლაზერულ დიოდში მოდეების განცალკევების რეჟიმის მახასიათებელს. დიდი k -თვის მოდეების გაყოფის კოეფიციენტი მაღალია. ეს კოეფიციენტი გაზომვადია და არსებობს მისი გაზომვის მარტივი მეთოდები. ექსპლუატაციის სხვადასხვა პირობებში K იცვლება მრავალმოდურიან ოპტიკურ ბოჭკოებისათვის $K=0,14-0,7$ საზღვრებში. როდესაც გადაცემული იმპულსის სიგანის გაზრდისას K მცირდება, ანუ გადაცემის დაბალი სიჩქარის დროს მოდეების გაყოფის ხმაური მცირდება. ერთმოდურიან ოპტიკურ სისტემებში $K=0,4-0,7$,

თუ გამოიყენება ერთმოდინი გრძივმოდებიანი ლაზერები, ერთმოდინ ოპტიკურ სისტემებში გამოსხივებული სპექტრის ვიწრო სიგანით, მოდების გაყოფის ხმაური ითვლება დომინანტ შემზღუდველად.

გცბოს-ის მილევის/დისპერსიის და იერარქიული დონის (STM-1...STM-256) მიხედვით გადამცემის სახით გამოიყენება შუქდიოდები (შდ), ლაზერები, რომლებიც ასხივებენ მრავალ განივ ტალღას (მგტ) და ლაზერები, რომლებიც ასხივებენ ერთ განივ ტალღას (ეგტ). საერთოდ, თითოეული იერარქიის სისტემისათვის შერჩეულია გადამცემი წყაროს ნომინალური ტიპი. თუმცა, რომელიმე იერარქიისათვის რაიმე გადამცემი წყაროს დადგენა არ არის აუცილებელი მოთხოვნა და მაგალითად, ეგტ მომუშავე წყარო შესაძლებელია გამოყენებული იქნას ნებისმიერი იერარქიული სისტემისათვის, რომელშიც შდ ან მგტ მომუშავე ლაზერი გამოიყენება ნომინალური წყაროს სახით, ხოლო მგტ მომუშავე წყარო შესაძლებელია გამოყენებული იქნას ნებისმიერი იერარქიული სისტემისათვის, რომელშიც შდ გამოიყენება ნომინალური წყაროს სახით, სისტემის მუშაობის გაუარესების გარეშე.

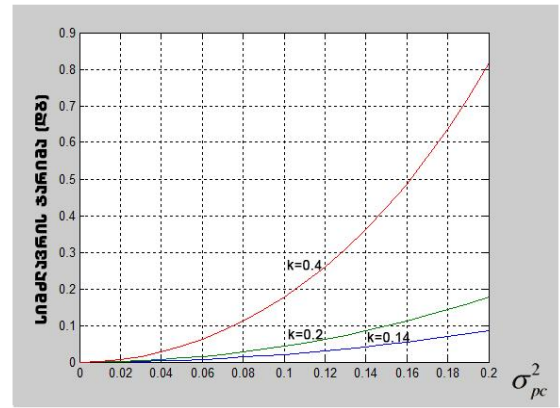
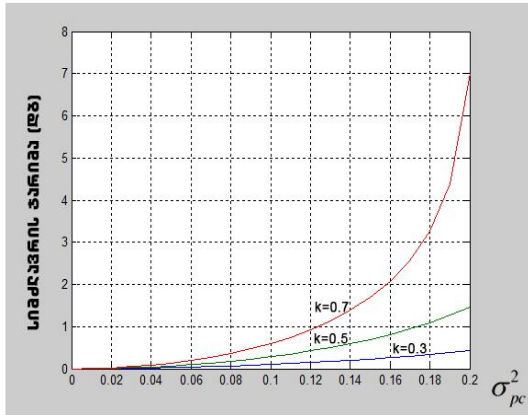
ნახაზებზე 5.2.ა),ბ). წარმოდგენილია ჯარიმა სიმძლავრეზე დამოკიდებულება მოდური სეგმენტის ხმაურზე, მოდური სეგმენტის კოეფიციენტის (k) სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის: ა) $k=0.3; 0.5; 0.7$. $Q=6$, $BER \approx 10^{-9}$. ბ) $k=0.14; 0.2; 0.4$. $Q=6$, $BER \approx 10^{-9}$.



ნახ.5.2. ა) $k=0.3; 0.5; 0.7$. $Q=6$, $BER \approx 10^{-9}$

ბ) $k=0.14; 0.2; 0.4$. $Q=6$, $BER \approx 10^{-9}$

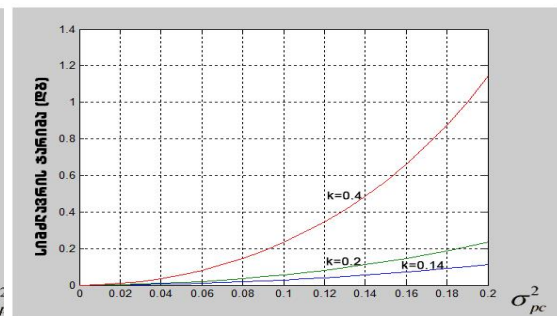
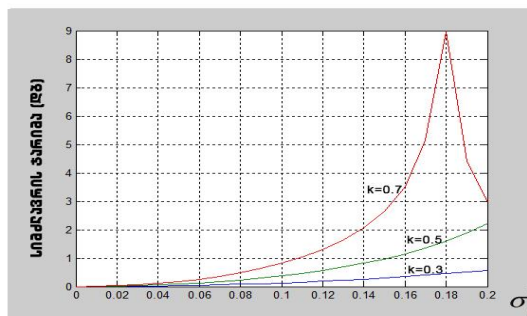
ნახ. 5.3ა),ბ).წარმოდგენილია სიმბლავრის ჯარიმის დამოკიდებულება მოდური სეგმენტის ხმაურზე, მოდური სეგმენტის კოეფიციენტის (k) სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის. ა) $k=0.3; 0.5; 0.7$. $Q=7$, $BER \approx 10^{-12}$.ბ) $k=0.14; 0.2; 0.4$. $Q=7$, $BER \approx 10^{-12}$.



ნახ. 5.3. ა) $k=0.3; 0.5; 0.7$. $Q=7$, $BER \approx 10^{-12}$

ბ) $k=0.14; 0.2; 0.4$. $Q=7$, $BER \approx 10^{-12}$

ნახ.5.4.ა),ბ).სიმბლავრის ჯარიმის დამოკიდებულება მოდური სეგმენტის ხმაურზე, მოდების გაყოფის (სეგმენტის) კოეფიციენტის (k) სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის. ა) $k=0.3; 0.5; 0.7$. $Q=8$, $BER \approx 10^{-15}$.ბ) $k=0.14; 0.2; 0.4$. $Q=8$, $BER \approx 10^{-15}$.



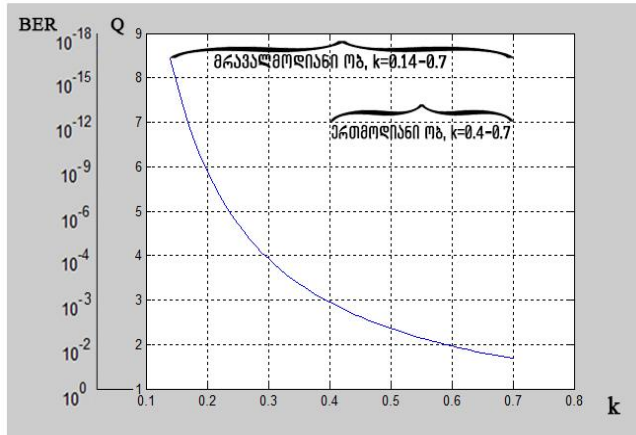
ნახ. 5.4. ა) $k=0.3; 0.5; 0.7$. $Q=8$, $BER \approx 10^{-15}$

ბ) $k=0.14; 0.2; 0.4$. $Q=8$, $BER \approx 10^{-15}$

(5.8) გამოსახულებიდან განვსაზღვროთ Q :

$$Q = \sqrt{1 - \frac{10^{-P_{Mod Jar} / 5}}{\sigma_{pc} k^2}}; \quad (5.8)$$

Q-ფაქტორის დამოკიდებულება მოდური სეგმენტის კოეფიციენტზე (k). მოდური სეგმენტის ხმაური (მსხ) $\sigma_{pc}^2 = 0.18$, სიმძლავრის ჯარიმა $P_{\text{მსხ}}=0.1$ დბ. წარმოდგენილია ნახ. 5.5.-ზე



ნახ. 5.5. Q ფაქტორის დამოკიდებულება მოდური სეგმენტის კოეფიციენტზე (k). მოდური სეგმენტის ხმაური (მსხ) $\sigma_{pc}^2 = 0.18$, სიმძლავრის ჯარიმა $P_{\text{მსხ}}=0.1$ დბ.

ამრიგად:

1. სიმძლავრის ჯარიმა მოდური გაყოფის (სეგმენტის) ხმაურზე დამოკიდებულია მოდური ხმაურის გაყოფის K კოეფიციენტზე; რაც მეტია მოდების ხმაურის სიმძლავრე σ_{pc}^2 . კერძოდ, როდესაც, (ნახ 5.3.ა), ბ) $\sigma_{pc}^2=0.18$; $BER = 10^{-9}$; $K=0.3; 0.5; 0.7$ (შესაბამისად, სიმძლავრის ჯარიმა $\Phi=0.24; 0.75, 1.84$ დბ). ხოლო, ხმაურის იმავე $\sigma_{pc}^2=0.18$ მნიშვნელობისათვის და $BER = 10^{-9}$, როდესაც $K=0.14; 0.2; 0.4$ (ნახ.5.4.1ბა),ბ) სიმძლავრის ჯარიმა შესაბამისად არის $\Phi=0.05; 0.1; 0.25$ დბ. ასევე, $\sigma_{pc}^2=0.18$ და $BER=10^{-12}$ მნიშვნელობისათვის, როდესაც $K=0.3; 0.5; 0.7$, შესაბამისად $\Phi=0.3; 1.3$ დბ., ხოლო $K=0.14; 0.2; 0.4$ $\Phi=0.08; 0.15; 0.6$ დბ.

2. Q-ფაქტორისა და BER-ის დამოკიდებულებიდან (ნახ.5.3.ბ), როდესაც სიმძლავრის ჯარიმა $\Phi=0.1$ დბ, ხოლო $K=0.2$, $BER = 10^{-9}$; $Q=6$; $K=0.15$; , $BER = 10^{-12}$; $Q=7$.

3. ხმაური მოდების გაყოფის გამო შეიძლება შემცირდეს, თუ ბიტურ შეცდომათა ალბათობა მცირდება, ან ოპერაციული ტალღის მუშა სიგრძე

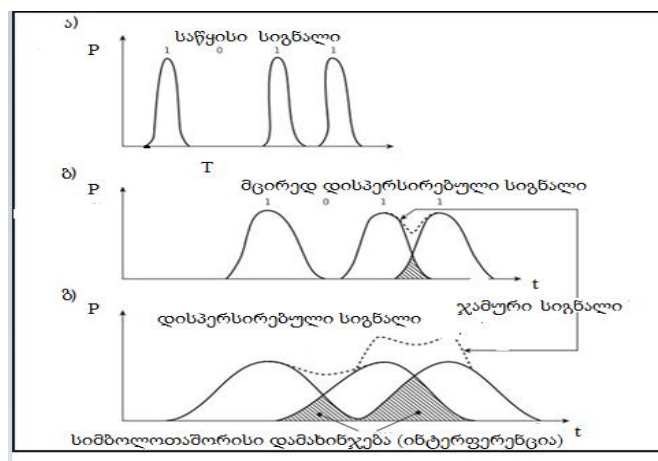
ნულოვანი დისპერსიული ტალღის სიგრძის ტოლია. გცბოს-ისათვის დამახასიათებელია მონაცემების გადაცემის მაღალი სიჩქარე და ხმაურის დაბალი დონე. შესაბამისად, საჭიროა მოიძებნოს მიდგომები მოდების გაყოფის ეფექტის მინიმიზაციისათვის გადაცემის მაღალი სიჩქარეებზე. იმ შემთხვევაშიც კი, როდესაც ლაზერი განაწილებული უკუკავშირით (DFB-distributed feedback laser) გამოიყენება დისპერსიის პრობლემის გადასაწყვეტად ტალღის სიგრძეზე, რომელიც შორს არის ნულოვანი დისპერსიის ტალღის სიგრძისაგან, მოდების გაყოფის ხმაურმა შეიძლება გამოიწვიოს სისტემური პრობლემა. მიზეზი არის ის, რომ DFB ლაზერის ძირითად მოდას თან ახლავს უფრო მცირე ამპლიტუდის მრავალი გვერდითი მოდა. ამ გვერდითმა მოვლენებმა შეიძლება გამოიწვიოს რეჟიმის ფლუქტუაცია, რომელიც განაპირობებს მოდების გაყოფის ხმაურს. გამოითქვა ვარაუდი, რომ ლაზერის სიჩუმის წერტილის წანაცვლებით ზღურბლოვანი მნიშვნელობის ზემოთ, შეიძლება გამოიწვიოს გვერდითი მოდის ჩახშობა, და შესაბამისად შეამციროს მოდის გაყოფის ხმაურის ცდომილება. მიუხედავად ამისა, სიმძლავრის კოეფიციენტის შემცირება და ძლიერი სითბური ეფექტები, სავადრაუდოდ ეწინააღმდეგებიან ამ გაუმჯობესებას. ამრიგად, ეს მეთოდი არ გამოდგება მოდური ხმაურის გაყოფის კარგ ხერხად.

5.4. სიმბოლოთაშორისი დამახინჯება, მოდების გაყოფის ხმაური და სიმძლავრის ჯარიმის შეფასება გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან - ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს)

ნაშრომებში [10.16] წარმოდგენილი იყო ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე და ენეგეტიკულ პოტენციალზე მოქმედი ფაქტორები და გცბოს გადამცემში (ლაზერული დიოდი), სახაზო ტრქატში წარმოქმნილი ხმაურები, რომლებიც განეკუთვნებიან სიგნალზე დამოკიდებულ ხმაურებს: მოდალური ხმაური, მოდების გაყოფის ხმაური - MPN (Mode

Partition Noise, ფარდობითი ინტენსივობის ხმაური - RIN (Relative Intensity Noise) და სიმბოლოთაშორისი დამახინჯება (ინტერფერენცია, ხმაური -ISI- Intersymbol Interference)

ახლა განვიხილოთ პროცესი, რომლის დროსაც გვბოს სახაზო ტრაქტში გავლისას გადაცემული შეტყობინების იმპულსები განიცდიან დისპერსიას, შედეგად, იმპულსები ფართოვდებიან და ადგილი აქვს იმპულსების ურთიერთგადაფარვას, რაც ხდება სიმბოლოთაშორისი დამახინჯების (სშდ-ISI) (ინტერფერენციის) მიზეზი. ამდენად, გაფართოებული (დისპერსირებული) სიმბოლოები იკავებენ სატაქტო ინტერვალის (T) ნაწილს (ნახ.5.6). რაც იწვევს გადაცემული სიმძლავრის გაუარესებას. ITU-T G.957 რეკომენდაცია ადგენს დისპერსიის გამო იმპულსებს შორის ენერგიის გადანაწილების და გადაცემული სიმძლავრის შემცირებისას (გაუარესებას), რაც ფასდება სიმძლავრის ჯარიმის სახით.



ნახ. 5.6. სიმბოლოთაშორისი დამახინჯების ილუსტრაცია ოპტიკურ კაბელში ციფრული სიგნალების გადაცემის დროს

როგორც აღინიშნა, სიმბოლოთაშორისი დამახინჯებისას ადგილი აქვს სიმძლავრის გადანაწილებას მოდებს შორის, რის გამოც გადაცემული სიგნალის სიმძლავრე მცირდება, ხოლო მისი შეფასება ხდება ჯარიმის სახით - P_{ISI} (დბ). NRZ ფორმატის სახაზო სიგნალისათვის და

სელექტიური SLM (Selective laser melting) ლაზერის გამოყენების შემთხვევაში გამოისახება ფორმულით.

$$P_{ISI} = 5 \log(1 + 2\pi\alpha^2); \quad (5.9)$$

ხოლო, მიღება:

$$\alpha = \left(\frac{10^{\frac{P_{ISI}}{5}} - 1}{2\pi} \right)^{0.5}; \quad (5.10)$$

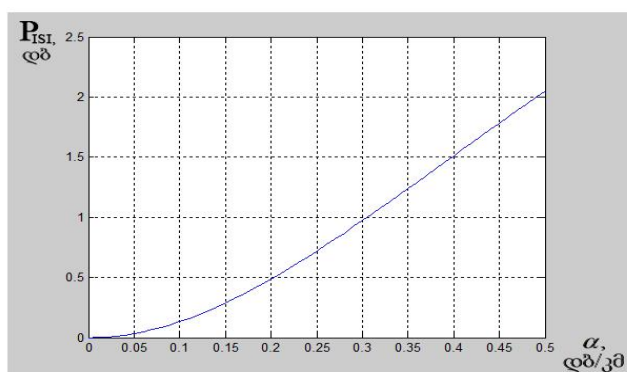
სადაც, P_{ISI}-სიმბოლოთაშორის დამახინჯებით გამოწვეული სიმძლავრის ჯარიმაა, $\varepsilon \equiv \alpha$ მიღებაა, დბ/კმ.

გამოსახულებიდან ჩანს, რომ მიღებული შედეგი არ არის დამოკიდებული ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე, რომელიც

აღებულია BER=10⁻¹⁰ დროს.

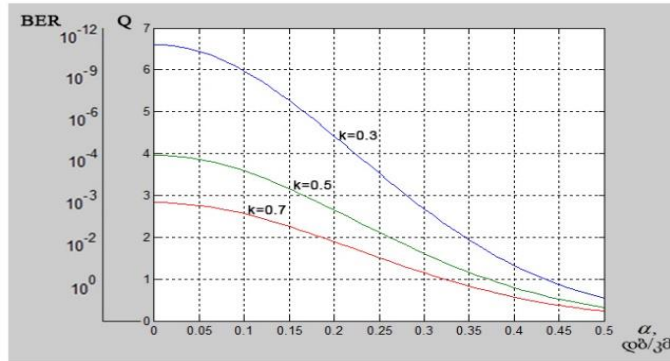
ნახ. 5.7-ზე, მოყვანილია სიმბოლოთაშორისი დამახინჯების გამო

სიმძლავრეზე ჯარიმის დამოკიდებულება მიღებაზე - $P_{isi} = \Psi(\alpha)$.



ნახ. 5.7. სიმბოლოთაშორისი დამახინჯების გამო სიმძლავრეზე ჯარიმის დამოკიდებულება მიღებაზე - $P_{isi} = \Psi(\alpha)$.

ნახ. 5.8. Q ფაქტორის $Q = \Psi(BER)$ დამოკიდებულება მიღებაზე, მოდური სეგმენტის კოეფიციენტის (k) სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის. k=0.3; 0.5; 0.7. მოდური სეგმენტის ხმაურის $P_{MPN}=0.2$ დროს.



ნახ. 5.8. Q ფაქტორის $Q = \Psi(\text{BER})$ დამოკიდებულება მილევაზე, მოდური სეგმენტის კოეფიციენტის (k) სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის. $k=0.3; 0.5; 0.7$. მოდური სეგმენტის ხმაურის $P_{\text{MPN}}=0.2$ დროს

ამრიგად, როგორც მოსალოდნელი იყო ოპტიკური არხის მილევა განაპირობებს სიმძლავრის ჯარიმას სიმბოლოთაშორის დამახინჯებაზე.

შედარებისათვის [10] ნაშრომის ანალოგიურად განვიხილოთ მრავალგრძივი მოდიანი MLM (Multi-Longitudinal Mode) ლაზერების გამოყენების შემთხვევაში სისტემის ენერგეტიკული პოტენციალის გაუარესება (ჯარიმა სიმძლავრის მიხედვით მოდების გაყოფის ხმაურისთვის (MPN - Mode Partition Noise)). მოდების გაყოფის ხმაური იანგარიშება როგორც :

$$P_{\text{MPN-Jar}} = -10 \log_{10} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[kQ \left(1 - e^{-\pi^2 \alpha^2} \right) \right]^2 \right\}; \quad (5.11)$$

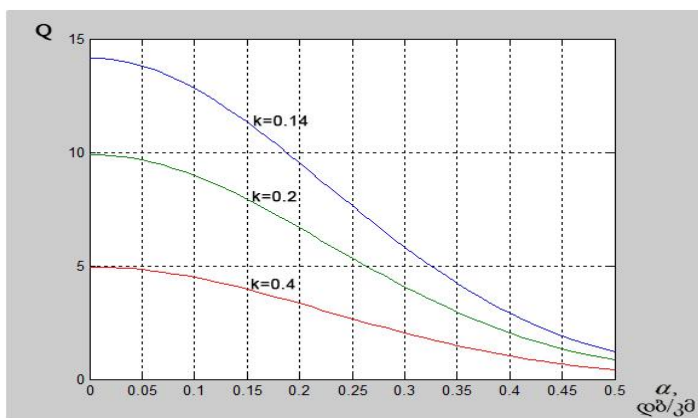
სადაც, K-მოდების გაყოფის (სეგმენტის) ხმაურის კოეფიციენტია, Q-ხარისხის ფაქტორია.

(5.11) ფორმულიდან განვსაზღვროთ Q - ფაქტორი:

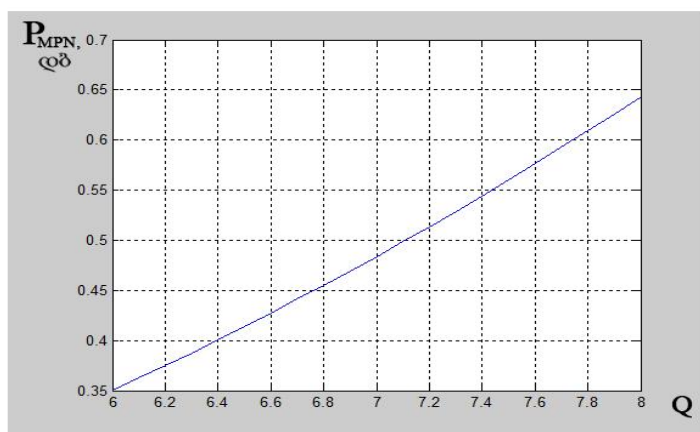
$$Q = \frac{2 \left(1 - 10^{-10 P_{\text{MPN}}} \right)}{k \left(1 - e^{-\pi^2 \alpha^2} \right)}; \quad (5.12)$$

ნახ.5.9.წარმოდგენილია Q ფაქტორის ($Q = \Psi(\text{BER})$) დამოკიდებულება მილევაზე, მოდური სეგმენტის კოეფიციენტის (k) სხვადასხვა

მნიშვნელობებისათვის. ($k=0.14; 0.2; 0.4$) მოდური სეგმენტის ხმაურის $P_{MPN}=0.2$ სიდიდის დროს.

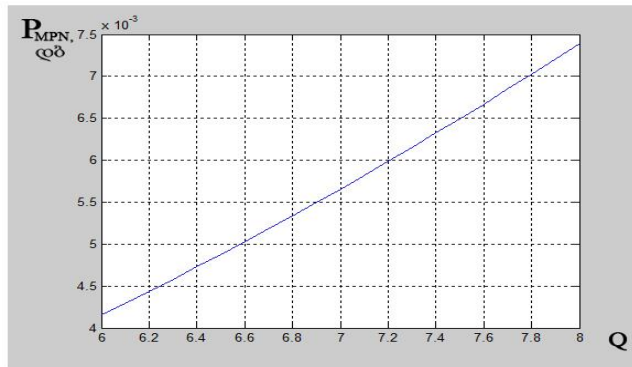


ნახ.5.9.Q - ფაქტორის ($Q=\Psi(BER)$) დამოკიდებულება მილევაზე მოდური სეგმენტის კოეფიციენტის (k) სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის ($k=0.14; 0.2; 0.4$) მოდური სეგმენტის ხმაურის $P_{MPN}=0.2$ სიდიდის დროს.



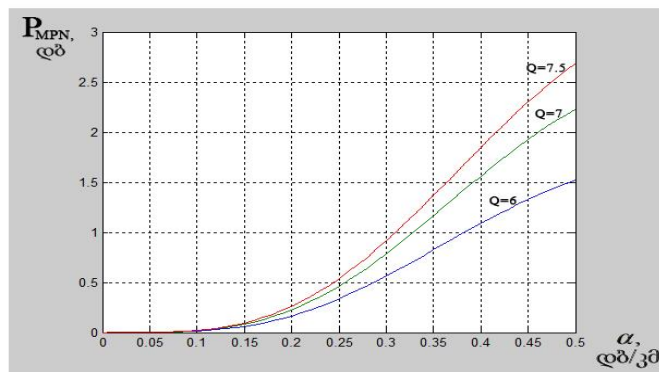
ნახ. 5.10. $P_{MPN} = \Psi(Q)$ გრაფიკი, როდესაც $Q=6; 7; 7.5; 8$ $K=0.7$; $\varepsilon = \alpha = 0.1$ დბ/კმ

ნახ. 5.11. წარმოდგენილია $P_{MPN} = \Psi(Q)$ გრაფიკი, როდესაც $K=0.3$; $\alpha=0.05$ დბ/კმ



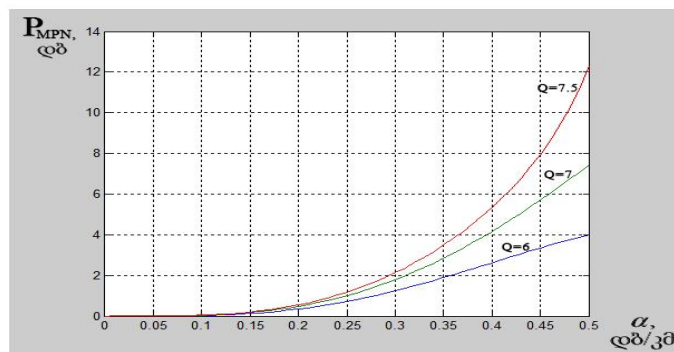
ნახ.5.11. $P_{MPN} = \Psi(Q)$ გრაფიკი, როდესაც $K=0,3$ $\varepsilon = \alpha = 0,05$ დბ/კმ

ნახ. 5.12. მოყვანილია $P_{MPN} = F(\alpha)$ დამოკიდებულების გრაფიკი Q -ს სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის ($Q=6; 7; 7,5$ და $k=0.14$);



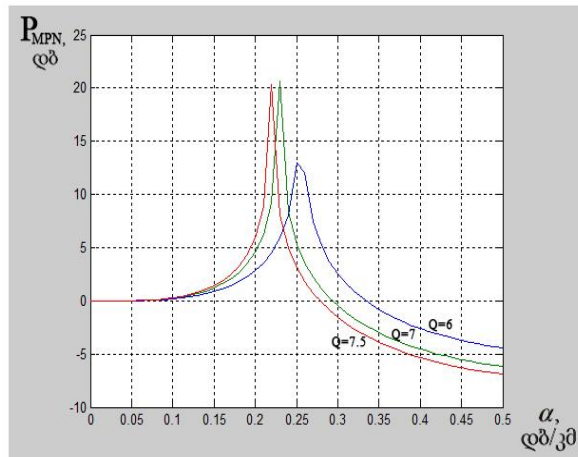
ნახ. 5.12. $P_{MPN} = F(\alpha)$ დამოკიდებულების გრაფიკი, როდესაც, ($Q=6; 7; 7,5$ და $k=0.14$)

ნახ.5.13. წარმოდგენილია $P_{MPN} = F(\alpha)$ დამოკიდებულება, როდესაც $Q=6; 7; 7,5$, $k=0.2$,



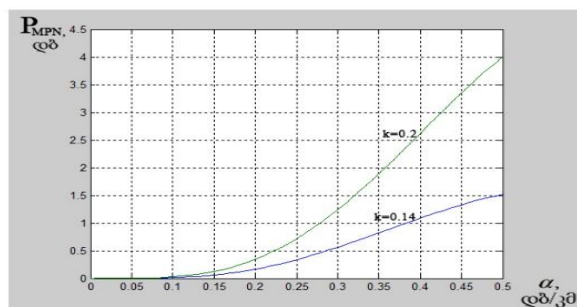
ნახ. 5.13. $P_{MPN} = F(\alpha)$ დამოკიდებულება, როდესაც $Q=6; 7; 7,5$, $k=0.2$

ნახ 5.14. მოყვანილია $P_{MPN}=F(\alpha)$ დამოკიდებულება, როდესაც, $Q=6; 7; 7,5;$
 $k=0,5$



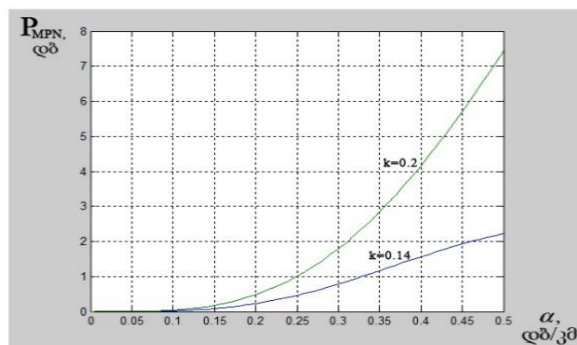
ნახ 5.14. $P_{MPN}=F(\alpha)$ დამოკიდებულება, როდესაც, $Q=6; 7; 7,5; k=0,5$

ნახ. 5.15. წარმოდგენილია $P_{MPN}=F(\alpha)$ დამოკიდებულება, როდესაც,
 $Q=6; k=0.14, 0.2;$



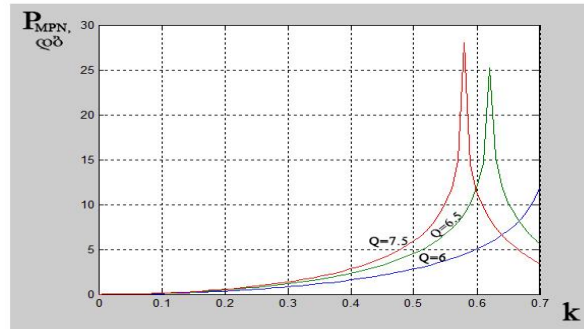
ნახ.5.15. $P_{MPN}=F(\alpha)$ დამოკიდებულება, როდესაც, $Q=6; k=0.14, 0.2$

ნახ. 5.16. წარმოდგენილია $P_{MPN}=F(\alpha)$ დამოკიდებულების გრაფიკი,
 როდესაც $Q=7; k=0.14, 0.2;$



ნახ.5.16. $P_{MPN}=F(\alpha)$ დამოკიდებულება, როდესაც, $Q=7; k=0.14$

ნახ. 5.17. წარმოდგენილია $P_{MPN} = F(k)$ დამოკიდებულების გრაფიკი $Q=6; 7; 7,5$ მნიშვნელობებისათვის.



ნახ. 5.17. $P_{MPN}=F(k)$ დამოკიდებულების გრაფიკი $Q=6; 7; 7,5$, $\alpha=0.2$ დბ/კმ მნიშვნელობებისათვის

ვინაიდან, სიმბოლოთაშორისი დამახინჯების, მოდური სეგმენტის ხმაურის წარმოშობის წყაროები დამოუკიდებლები არიან, ამის გამო, საერთო ჯარიმა სიმძლავრის გაუარესებაზე შეიძლება შევავსოთ, როგორც სიმბოლოთაშორის სიმძლავრეზე ჯარიმისა და ლაზერის მოდური სეგმენტის ხმაურზე (მოდების გაყოფის ხმაურზე) ჯარიმების ჯამი [53]

$$P_{\text{ჯარ. საერთო}} = P_{\text{Pisi}} + P_{MPN} \quad (5.13)$$

შენიშვნა: საერთოდ, სიმძლავრის ჯარიმა (გაუარესება) მერყეობს 0,5 -2 დბ ფარგლებში, კერძოდ, სიმძლავრის ჯარიმა $P_{\text{Pisi}}=0,5$ დბ; $\alpha = 0,203$; $P_{\text{Pisi}}=1,0$ დბ; $\alpha = 0,305$; $P_{\text{Pisi}}=2$ დბ; $\alpha = 0,491$

ვინაგარიშოთ საერთო ჯარიმა სიმძლავრეზე (5.13) ფორმულის მიხედვით: ა) P_{Pisi} : როდესაც მიღევა $\alpha=0,15$ დბ/კმ, მაშინ, $P_{\text{Pisi}}= 0,25$ დბ, (ნახ.5.11), $K=0,3$; $Q=6$, $BER=10^{-9}$. ბ) P_{MPN} : $\alpha=0,15$ დბ/კმ, $P_{MPN}=0,1$ დბ, $K=0,14$; $Q=6$ (ნახ. 5.10;); ამრიგად საერთო ჯარიმა $P_{\text{ჯარ. საერთო}}=0,15+0,1=0,25$ დბ. ანუ, იმისათვის, რომ მივალწიოთ ბიტურ შეცდომათა ალბათობას $BER=10^{-9}$ ($Q=6$), როდესაც $K=0,14$ საერთო ჯარიმა უნდა იყოს $P_{\text{ჯარ. საერთო}}=0,25$ დბ-ის ტოლი.

ამრიგად, სიმბოლოთაშორისი დამახინჯებაზე ჯარიმა - P_{Pisi} და ჯარიმა სიმძლავრის მიხედვით- P_{MPN} მოდების გაყოფის ხმაურზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ გვბოს ხარისხობრივ მახასიათებლებზე: Q -ფაქტორსა და ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე, მის ენერგეტიკულ პოტენციალზე

(ბიუჯეტზე) და როგორც მითითებულია [10]-ში აუცილებლად უნდა იქნას შეფასებული და გათვალისწინებული სისტემის ენერგეტიკული პოტენციალის რეზერვის დაპროექტებისა და ექსპლუატაციის დროს. წარმოდგენილი გრაფიკებით შესაძლებელია შევაფასოთ აგრეთვე $Q = \Psi(BER)$ მნიშვნელობის დამოკიდებულება მიღების და მოდების გაყოფის ხმაურთან მიმართებით.

მეხუთე თავის დასკვნა

1. დადგენილი იქნა, რომ გცბო-ში ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე გავლენას გარდა ჯიტერისა, ოპტიკური არხის გარტარების ზოლის შემცირებისა, გავლენას ახდენენ ისეთი ფაქტორები, როგორებიცაა მოდალური ხმაური, ლაზერის ფარდობითი ინტესივობის ხმაური (RIN Relitive Intensaity Noise)), მოდების გაყოფის ხმაური (MPN Mode Partition Noise)), სიმბოლოთაშორის დამახინჯება (ISI- Intersymbol Interferene). ეს მოვლენები უნდა აისახოს სიმძლავრის ჯარიმის სახით.

2. სიმძლავრეზე ჯარიმის ფიზიკური არსი მდგომარეობს შემდეგში: იმისათვის რომ შევინარჩუნოთ BER -ის მუდმივი მნიშვნელობა, საჭირო ხდება მიმღები მოწყობილობის შესასვლელზე სიმძლავრის გაზრდა, რაც იმას ნიშნავს, რომ BER -ის არსებული მნიშვნელობის შესანარჩუნებლად აუცილებელია ჯარიმის გადახდა.

3. ანალიზით დავადგინეთ და წინამდებარე ნაშრომში ვითვალისწინებთ რეკომენდაციებს ჯამური (სარეზერვო) დაშვებაზე $C_{რეზ}=6$ დბ-ის ფარგლებში მაგისტრალური ქსელებისათვის. თუმცა, ზოგიერთი მწარმოებლები იზღუდებიან 4,8 დბ-მდე და 3 დბ-მდეც კი. რეკ. ITU-T G.957 ადგენს გცბოს კვანძებში დანაკარგების დასაფარად მომსახურების ვადის დამთავრების მომენტისათვის რეზერვის სახით დატოვებული იქნას 2-4 დბ:

4. მოდების გაყოფის რეჟიმი გცბოს-ში, წარმოიშვება იმ ლაზერებში, რომლებშიც გარდა გრძივი მოდებისა ადგილი აქვს განივი მოდების

არსებობას. შედეგად, ამ მოდეის ფლუქტუაციის დროს ადგილი აქვს მოდეის გაყოფის რეჟიმის წარმოშობას.

5. მიღებული იქნა გამოსახულება, რომელმაც საშუალება მოგვცა დაგვეკავშირებინა Q ფაქტორის დამოკიდებულება მოდური სეგმენტის კოეფიციენტზე (k). აგებული იქნა დამოკიდებულებები Q - ფაქტორსა მოდური სეგმენტის კოეფიციენტს (k) შორის ერთმოდინი და მრავალმოდინი ოპტიკური ბოჭკოებისათვის. რაც საშუალებას მოგვცემს გათვალისწინებული იქნას გცბოს გადამცემი მიწყობილობის ლაზერის შერჩევისას.

6. დადგენილ იქნა, რომ ხმაური მოდეის გაყოფის გამო შეიძლება შემცირდეს, თუ ბიტურ შეცდომათა ალბათობა მცირდება, ან ოპერაციული ტალღის მუშა სიგრძე ნულოვანი დისპერსიული ტალღის სიგრძის ტოლია. ვინაიდან, გცბოს-ისათვის დამახასიათებელია მონაცემების გადაცემის მაღალი სიჩქარე და ხმაურის დაბალი დონე. შესაბამისად, საჭიროა მოიძებნოს მიდგომები მოდეის გაყოფის ეფექტის მინიმიზაციისათვის გადაცემის მაღალი სიჩქარეებისათვის.

7. გამოტანილი იქნა მნიშვნელოვანი დასკვნა, რომ, ჯარიმა სიბოლოთაშორის დამახინჯებაზე χ - Pisi და ჯარიმა სიმძლავრის მიხედვით მოდეის გაყოფის ხმაურზე - P_{MPN} მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ გცბოს ხარისხობრივ მახასიათებლებზე - Q -ფაქტორზე და აუცილებლად უნდა იქნას შეფასებული და გათვალისწინებული სისტემის ენერგეტიკული პოტენციალის რეზერვის დაპროექტებისა და ექსპლუატაციის დროს. წარმოდგენილი გრაფიკებით შესაძლებელია შევაფასოთ აგრეთვე $Q = \Psi(BER)$ მნიშვნელობის დამოკიდებულება მილვის და მოდეის გაყოფის ხმაურთან მიმართებით. ყოველივე ეს შესაბამისობაში უნდა მოვიდეს წინამდებარე დასკვნის მე-4 პუნქტში მოცემულ რეკომენდაციებთან გცბოს რეგენერაციული პუნქტის ანგარიშისას მილვის ჯამური, სარეზერვო დაშვების დროს.

საერთო დასკვნა

1. შემუშავებულია რეკომენდაციები კავშირის ხარისხის მონიტორინგის სისტემის დანერგვის შესახებ როგორც ფიქსირებულ, ისე მობილური კავშირის ქსელებში. წარმოდგენილი რეკომენდაციების და ღონისძიებების გატარება მნიშვნელოვნად შეუწყობს ხელს საქართველოს სატელეკომუნიკაციო სექტორის ევროკავშირის შესაბამის სტრუქტურებთან ინტეგრაციას.

2. დადგენილ იქნა დამოკიდებულებები გცბოს-ის მიმღების გადამწყვეტ მოწყობილობაში ორობითი სიმბოლოების დონეების და შესაბამისი დისპერსიების სხვადასხვა მნიშვნელობებს შორის, რომელთა მიხედვითაც შესაძლებელია შევაფასოთ ციფრული სისტემის ხარისხის მაჩვენებელი Q-ფაქტორის (ბიტურ შეცდომათა კოეფიციენტის - BER) მნიშვნელობა. გამოთვლილი და აგებული იქნა კონკრეტული დამოკიდებულებები $BER = f(Q)$ და $I_1; I_0; \sigma_1; \sigma_0$ რეალურ მნიშვნელობებს შორის, აგებულია შესაბამისი გრაფიკები.

3. ჯიტერის, როგორც უარყოფითი მოვლენის გავლენა გცბოს-ის მუშაობის ხარისხობრივ მახასიათებლებზე შეფასებულ იქნა ჯიტერის მოვლენაზე ასახული სიმძლავრის ჯარიმის სახით; განსაზღვრულია დროითი ჯიტერის პარამეტრის $B\tau_j$ დამოკიდებულება სიმძლავრის ჯარიმაზე Q ფაქტორის სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს. $Q=5,6,7,8$. რამაც საშუალება მოგვცა დაგვედგინა ჯარიმა ნებისმიერი იერარქიის ციფრული სისტემის (STM-1, STM-4, STM-16, STM-64 STM-256.....) შემთხვევაში.

4. დადგენილი იქნა, რომ:

- დროითი ჯიტერი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს გცბოს ხარისხობრივ მაჩვენებლებზე;

- სიმძლავრის ჯარიმა დამოკიდებულია $Q(BER)$ მნიშვნელობაზე. ჯარიმა მით მეტი იქნება, რაც უფრო მაღალია ბიტურ შეცდომათა ალბათობა (BER);
- ჯიტერის მოქმედი მნიშვნელობა უნდა მერყეობდეს ბიტური ინტერვალის ხანგრძლიობის 5-10 %-ის ფარგლებში.

5. განსაზღვრული იქნა სიმბოლოთშორისი ინტერფერენციის ძირითადი მიზეზები გცბოს-ში. მოყვანილია მისი ფიზიკური არსი და შემცირების გზები. დადგენილი იქნა იქნა სიმბოლოთშორისი ინტერფერენციის (სში) გავლენა გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემის (გცბოს) შეცდომათა ალბათობაზე (BER), სში-ის შედეგად თვალის დიაგრამის ღიობის შემცირების გამო.

6. დადგენილია, რომ სიმბოლოთშორისი ინტერფერენცია (ISI), რომელიც გამოწვეულია ოპტიკური ბოჭკოს დისპერსიით და მიმღების გატარების ზოლის სასრული სიგანით, არაწრფივი პროცესებით ოპტიკურ ბოჭკოში და სხვა მნიშვნელოვან გავლენას ახდეს მთლიანად გცბოს ხარისხობრივ მაჩვენებელზე - ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე და ზრდის მას.

7. განხორციელდა მიმღების გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის (ბარიერის) ოპტიმიზაცია. დადგინდა, რომ გცბოს მიმღების ზღურბლის ოპტიმიზაციას დიდი მნიშვნელობა აქვს მთლიანად ოპტიკური კავშირის ხარისხობრივი მაჩვენებლების გაუმჯობესების საქმეში. მიმღების გადამწყვეტი მოწყობილობის ოპტიმიზაციით უზრუველყოფთ ბიტურ შეცდომათა ალბათობის ოპტიმიზაციას. გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის ოპტიმიზაციის ამოცანა მდგომარეობს შემდეგში: როდესაც $(I_1, I_0, \sigma_\tau \equiv \sigma_1, \sigma_s \equiv \sigma_0)$ პარამეტრების ისეთ შერჩევაში, როდესაც გადამწყვეტი მოწყობილობის ზღურბლის ყველა შესაძლო შემთხვევებს შორის მიიღება საუკეთესო (ოპტიმალური) მნიშვნელობა, რომლითაც გარანტირებულია BER_{opt} საუკეთესო მნიშვნელობა.

8. დადგენილი იქნა, რომ გცბო-ში ბიტურ შეცდომათა ალბათობაზე გავლენას გარდა ჯიტერისა, ოპტიკური არხის გარტარების ზოლის შემცირებისა, გავლენას ახდენენ ისეთი ფაქტორები, როგორებიცაა მოდალური ხმაური, ლაზერის ფარდობითი ინტესივობის ხმაური (RIN Relitive Intensaity Noise)), მოდების გაყოფის ხმაური (MPN Mode Partition Noise)), სიმბოლოთაშორის დამახინჯება (ISI- Intersymbol Interferene). ეს მოვლენები უნდა აისახოს სიმძლავრის ჯარიმის სახით.

9. სიმძლავრეზე ჯარიმის ფიზიკური არსი მდგომარეობს შემდეგში: იმისათვის რომ შევინარჩუნოთ BER -ის მუდმივი მნიშვნელობა, საჭირო ხდება მიმღები მოწყობილობის შესასვლელზე სიმძლავრის გაზრდა, რაც იმას ნიშნავს, რომ BER -ის არსებული მნიშვნელობის შესანარჩუნებლად აუცილებელია ჯარიმის გადახდა.

10. დადგენილი იქნა, რომ და წინამდებარე ნაშრომში გათვალისწინებულია რეკომენდაციები ჯამური (სარეზერვო) დაშვებაზე $C_{\text{რეზ}}=6$ დბ-ის ფარგლებში მაგისტრალური ქსელებისათვის. თუმცა, ზოგიერთი მწარმოებლები იზღუდებიან 4,8 დბ-მდე და 3 დბ-მდეც კი. რეკ. ITU-T G.957 ადგენს გცბოს კვანძებში დანაკარგების დასაფარად მომსახურების ვადის დამთავრების მომენტისათვის რეზერვის სახით დატოვებული იქნას 2-4 დბ:

11. მიღებული იქნა გამოსახულება, რომლმაც საშუალება მოგვცა დაგვეკავშირებინა Q ფაქტორის დამოკიდებულება მოდური სეგმენტის კოეფიციენტზე (k). მოდური სეგმენტის ხმაური (მსხ)აგებული იქნა დამოკიდებულებები Q - ფაქტორსა მოდური სეგმენტის კოეფიციენტს (k) შორის ერთმოდინი და მრავალმოდინი ოპტიკური ბოჭკოებისათვის. რაც საშუალებას მოგვცემს გათვალისწინებული იქნას გცბოს გადამცემი მიწყობილობის ლაზერის შერჩევისას.

12.გამოტანილი იქნა მნიშვნელოვანი დასკვნა, რომ, ჯარიმა სიბოლოთაშორის დამახინჯებაზე χ - P_{ISI} და ჯარიმა სიმძლავრის მიხედვით მოდების გაყოფის ხმაურზე - P_{MPN} მნიშვნელოვან გავლენას

ახდენენ გცბოს ხარისხობრივ მახასიათებლებზე - Q-ფაქტორსა და აუცილებლად უნდა იქნას შეფასებული და გათვალისწინებული სისტემის ენერგეტიკული პოტენციალის რეზერვის დაპროექტებისა და ექსპლუატაციის დროს. წარმოდგენილი გრაფიკებით შესაძლებელია შევადგასოთ აგრეთვე $Q = \Psi(BER)$ მნიშვნელობის დამოკიდებულება მილევის და მოდების გაყოფის ხმაურთან მიმართებით. ყოველივე ეს შესაბამისობაში უნდა მოვიდეს წინამდებარე დასკვნის მე-4 პუნქტში მოცემულ რეკომენდაციებთან გცბოს რეგენერაციული პუნქტის ანგარიშისას მილევის ჯამური, სარეზერვო დაშვების დროს.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. სვანიძე რ., ჩხაიძე მ., გუბუაძე ზ. კავშირის მომსახურების ხარისხის პრობლემა თანამედროვე ტელეკომუნიკაციაში. Georgian Engineering News, 2014, №2, გვ. 45-50.
2. როსტიაშვილი ნ., ჩხაიძე მ., სვანიძე რ. შეცდომათა ალბათობის შეფასება გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან - ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს). აკაკი წერეთლის სახელობის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, მეოთხე საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. ქუთაისი, 29 ოქტომბერი 2016, გვ. 182-184.
3. Optical Fiber Telecommunications IIIB. Edited by Ivan P. Kaminov, Thomas L. Koch. Academic Press, USA, 1997.
4. როსტიაშვილი ნ., ჩხაიძე მ., სვანიძე რ., შეცდომათა გაზომვის პრინციპები გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან- ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს). აკაკი წერეთლის სახელობის სახელმწიფო უნივერსიტეტი. მეოთხე საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, ქუთაისი 29 ოქტომბერი 2016, გვ. 185-187.
5. Слепов Н. Оценка показателей ошибок цифровых линий связи. Связь и телекоммуникация. Электроника: Наука, Технология, Бизнес, стр. 22-28.
6. ჩხაიძე მ. გადაცემის ციფრული ბოჭკოვანი- ოპტიკური სისტემების (გცბოს) კვლევა. ავტორეფერატი დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად. თბილისი, 2013 წ. სტუ - ის ბიბლიოთეკა.
7. Оценка показателей ошибок цифровых линий передфчи. ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 5/2002, стр. 22-25.
8. <https://www.youtube.com/watch?v=YAgdblqV6VQ> უკანასკნელად გადამოწმდა 07.12.2020.
9. Svanidze R., Rostiashvili N., Chincharauli J. Factors affecting the probability of bit errors and energy potential in digital fiber-optic transmission systems. International Conference. ugust 20, 2020. San Francisco, California, USA. Scientific enquiry in the contemporary world: Theoretical basics and innovative approach 15 th edition http://www.bmpubgroup.com/126_15.htm doi: 10.15350/L_26/15.9.

10. ITU-T G.957 – Optical Interfaces for Equipments and Systems Relating to the Synchronous Digital Hierarchy (SDH) (95, 7.99); Amendment 1, 2 (03.2006).

11. Слепов Н. Бюджет мощности и новые оптические интерфейсы для ВОСП. Фотоника, 2/2008, стр.34-39.

12. რეკომენდაცია МСЭ-Т, серия G, добавление 39 (02/2006). СЕРИЯ G: СИСТЕМЫ И СРЕДА ПЕРЕДАЧИ, ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

13. სვანიძე რ., გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემები და ტექნოლოგიები. თბილისი: კავკასიის უნივერსიტეტის ტექნოლოგიური სკოლის გამომცემლობა, 2019, 694 გვ.

14. Величко М. А. Уменьшение деградации оптических сигналов волоконно- оптических системах связи. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. М. 2009.

15. R. Svanidze, N.Rostiashvili, j.Chincharauli- The probability of bit errors (BER) and the mode of noise division of the transmission laser modes in digital-fiber-optic transmission systems. International Conference. August 20, 2020. San Francisco, California, USA. Scientific enquiry in the contemporary world: Theoretical basics and innovative approach 15 th edition http://www.bmpubgroup.com/126_15.htm doi: 10.15350/L_26/15.10.

16. სვანიძე რ. გ., ჩხაიძე მ. თ., კოდალაშვილი ა. დ. შეცდომათა ალბათობის კოეფიციენტის (BER) ოპტიმალური მნიშვნელობის დადგენა გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემის (გცბოს) მიმღების გადამწყვეტ მოწყობილობაში. Georgian Engineering News, 2017, №2, გვ. 34-37.

17. სვანიძე რ. გ., ჩხაიძე მ. თ. ბიტურ შეცდომათა ალბათობის კოეფიციენტის (BER) შეფასება გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს) დროითი ჯიტერის გათვალისწინებით. Georgian Engineering News, 2017, №2, გვ. 42-46.

18. Surachet Kanprachar Dr. Ira Jacobs, Chairman Electrical Engineering Modeling and analysis of the effects of impairments in fiber optic <https://pdfs.semanticscholar.org/8b23/6ff4a50cd73280bb949f8b6e6317a83b5458.pdf> [f](https://pdfs.semanticscholar.org/8b23/6ff4a50cd73280bb949f8b6e6317a83b5458.pdf) უკანასკნელად გადამოწმდა 7.12.2020

20. Рек. МСЭ-Т, серия G, добавление 39 (02/2006). СЕРИЯ G: СИСТЕМЫ И СРЕДА ПЕРЕДАЧИ, ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ.

19. <https://lr.ttu.ee/irm0120/Loengud/lecture%208.pdf> - უკანასკნელად გადამოწმდა 07.12.2020.

20. ITU-TO.201TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR, OF ITU, (07/2003). Q- factor test equipment to estimate the transmission performance of optical channels.ITU- T Recommendation O.201

21. ITU-T Recommendation G.823 (03/2000). The control of jitter and wander within digital networks which are based on the 2048 kbit/shierarchy.

22. ITU-T Recommendation G.825: (03/2000). Digital Networks: The Control of Jitter and Wander Within Digital Networks which are Based on the Synchronous Digital Hierarchy (SDH).

23. ITU-T Recommendation G.783. (03/2000) Characteristics of synchronous digital hierarchy (SDH) equipment functional blocks.

24. ჩხაიძე მ. გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემების (გცბოს) კვლევა. დისერტაცია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად. თბილისი, 2013 წ, სტუ-ის ბიბლიოთეკა.

25. ჩხაიძე მ. თ., სვანიძე რ. გ. ჯიტერი, მისი გაზომვისა და შეფასების ასპექტები. Georgian Engineering News, , 2012, №2, გვ. 40-44.

26. ჩხაიძე მ. თ., სვანიძე რ. გ. ჯიტერის შეფასება თვალის დიაგრამის ანიმაციური მოდელით. Georgian Engineering News, 2012, №3, გვ. 15-21.

27. Бурдин А. В. Методы и средства измерений в телекоммуникационных системах: Курс лекций - <http://window.edu.ru/resource/446/55446>. - უკანასკნელად გადამოწმდა 07.12.2020.

28. სვანიძე რ. გ. ჩხაიძე მ. თ. სიმბოლოთშორისი ინტერფერენციის (ISI) მიზეზები გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს). „ინტელექტუალი“, 2017, №34, გვ. 180-184.

29. Module 10 : Receiver Noise and Bit Error Ratio Lecture : Receiver Noise and Bit Error Ratio (ШУМ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СВЯЗИ)- უკანასკნელად გადამოწმდა 10.12.2020.

30. Robert Dahlgren, Bob.Dahlgren NOISE IN FIBER OPTIC COMMUNICATION LINKS <http://www.svphotonics.com/pub/pub029.pdf> - უკანასკნელად გადამოწმდა 07.12.2020.

31. Гауэр Дж. Оптические системы связи. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. 504 с.

32. Р Г СВАНИДЗЕ ЛИНЕЙНЫЕ СИГНАЛЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ“, монография, Издательство «Технический университет», Тбилиси 2005 г. 401 стр.

33, Amitabh Shukla Optical Receivers. Theory and Operation
<https://www.slideshare.net/amitabhs5/optical-receivers-46652578> -
უკანასკნელად გადამოწმდა 07.12.2020.

34. Prof. R.K. Shevgaonkar, Advanced Optical Communication
<http://www.infocobuild.com/education/audio-video-courses/electronics/AdvancedOpticalCommunication-IIT-Bombay/lecture-22.html>
უკანასკნელად გადამოწმდა 07.12.2020.

35. როსტიაშვილი ნ., ჩხაიძე მ., სვანიძე რ. შეცდომათა ალბათობის (BER) შეფასება ციფრულ ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს). Georgian Engineering News, 2016, №4, გვ. 37-42.

36.<https://lr.ttu.ee/irm0120/Loengud/lecture%208.pdf> - უკანასკნელად გადამოწმდა 07.12.2020.

37. ITU-TO.201TELECOMMUNICATIONSTANDARDIZATION SECTOR, OF ITU, (07/2003). Q-factor test equipment to estimate the transmission performance of optical channels.ITU-T Recommendation O.201.

38. ITU-T Recommendation G.823 (03/2000). The control of jitter and wander Within digital networks which are based on the 2048 kbit/shierarchy.

39. ITU-T Recommendation G.825: (03/2000) Digital Networks: The Control of Jitter and Wander Within Digital Networks which are Based on the Synchronous Digital Hierarchy (SDH).

40. ITU-T Recommendation G.783.(03/2006) Characteristics of synchronous Digital hierarchy (SDH) equipment functional blocks.

41. ITU-T G.1000 (11/2001) „კავშირის მომსახურების ხარისხი“. მოყვანილია QoS საერთო განსაზღვრება.

42. ITU-T E.800 (09/2008) რეკომენდაცია „ტერმინები და განსაზღვრებები, რომლებიც განეკუთვნებიან კავშირის მომსახურების ხარისხს და ქსელების მუშაობას, საიმედოობის ჩათვლით“. წარმოდგენილია ცნება მომსახურების ხარისხის შესახებ.

43. ITU-T Y.1514 (27-29. 03. 2010) რეკომენდაცია „ქსელების მუშაობის პარამეტრები მომსახურებების მიწოდებაზე რომლებიც ეფუძნებიან IP პროტოკოლს“ მოყვანილია QoS კლასები და QoS ზოგიერთი პარამეტრები ქსელებისათვის პაკეტური კომუტაციით IP პროტოკოლის საფუძველზე.

44. ITU-T J.163(05.07.2009) „დინამიური QoS, მომსახურებებისათვის, რომლებიც მიეწოდება რეალურ რეჟიმში საკაბელო სატელევიზიო ქსელებით საკაბელო მოდელების გამოყენებით“ მოყვანილია QoS პარამეტრები, რომლებიც აუცილებელია დანართებისათვის, რომლებიც მოითხოვენ რეალურ რეჟიმს.

45. ITU-T X.140 (05.12.13 - რეკომენდაცია „კავშირის ხარისხის პარამეტრები საერთო სარგებლობის მონაცემების გადამცემის ქსელებისათვის“. მოყვანილია QoS პარამეტრების ნაკრები საერთო სარგებლობის მონაცემების გადამცემის ქსელებისათვის.

46. ISO 9000 ხარისხის მენეჯმენტის სისტემები. ძირითადი დებულებები და სიტყვარი. (12/11/2015).

47. ITU-T G.1011 (06/2010). რეკომენდაცია. Reference guide to quality of experience assessment methodologies

48. ITU-R M.1079-2 (1994-2000-2003) რეკომენდაცია. წარმადობა და მოთხოვნები მომსახურების ხარისხზე მობილური კავშირის დაშვების საერთაშორისო სისტემის 2000 (IMT-2000) ქსელებათვის.

49. ITU-T Recommendation G.783. Characteristics of synchronous digital hierarchy (SDH) equipment functional blocks. (03.2006)

50. სვანიძე რ. გ, ჩხაიძე მ. თ, როსტიაშვილი ნ. რ. სიმბოლოთაშორისი დამახინჯება, მოდების გაყოფის ხმაური და სიმძლავრის ჯარიმის შეფასება გადამცემის ციფრულ ბოჭკოვან -ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს). Georgian Engineering News, 2020, №1, ტომი 90, გვ. 23-29.

51. RECEIVER SENSITIVITY
<https://uweb.engr.arizona.edu/~ece487/det2.pdf> უკანასკნელად გადამოწმდა 25.12.2020.

52. როსტიაშვილი ნ., ბიტურ შეცდომათა ალბათობის შეფასება გადამცემის ციფრულ ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს) დროითი ჯიტერის და სიმბოლოთაშორისი ინტერფერენციის გათვალისწინებით. საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალი „ინტელექტუალი“ №42, 2021 წ.

დანართები

დანართი 1.

ცხრილი 1. მიმღების მგრძნობიარობა $BER = 10^{-12}$ სხვადასხვა (P-I-N, APD) მიმღებებისათვის, გამამდიერებლის დატექტორის ხმაური გათვალისწინებულია

№	პარამეტრი		Symbol სიმბოლო	2 გბტ/წმ	10 გბტ/წმ
1	Input rms noise due to amplifier	Среднеквадратичный шум (Rms noise) на входе усилителя საშუალო კვადრატული ხმაური	$i_{n, rms}$	380nA	1,47A
2	Sensitivity of p-i-n receiver	Чувствительность приемника p-i-n p-i-n მიმღების მგრძნობიარობა	— $P_{sens, PIN}$	-24,7დბს	-19,1დბს
3	Sensitivity of APD receiver	Чувствительность приемника APD APD მიღების მგრძნობიარობა	— $P_{sens, APD}$	-33,5დბს	-27,8დბს
4	Sensitivity of OA (optical amplifier)+ p-i-n receiver	Чувствительность приемника OA(оптический усилитель) + p-i-n	— $P_{sens, OA}$	-41,5დბს	-35,6დბს

		ოპტიკური გამაძლიერებელი + p-i-n მიმღზის მგრძნობიარობა			
--	--	--	--	--	--

დანართი 2.

ცხრილი 2. ხმაურის კომპონენტებთან დაკავშირებული სპექტრალური სიმკვრივები

№	Noise Spectral density, A ² /Hz	Шум Спектральная плотность ხმაურის სპექტრალური სიმკვრივე A ² /Hz	p-i-n ფდ		APD ფდ	
			1 ბიტი	0 ბიტი	1ბიტი	0 ბიტი
1	Dark current	Темный ток გაჟონვის დენი	1,26*10 ⁻²⁷	1,26*10 ⁻²⁷	0,8*10 ⁻²⁴	0,8*10 ⁻²⁴
2	Thermal noise	Тепловой шум სითბური (თერმული) ხმაური	2*10 ⁻²³	2*10 ⁻²³	2*10 ⁻²⁵	2*10 ⁻²⁵
3	Shot noise without preamp	Дробовой шума без предусилителя საფანტისებური დენი წინასწარი გამაძლიერებლის გარეშე	2,6*10 ⁻²⁴	2,6*10 ⁻²⁵	1,28*10 ⁻²¹	1,28*10 ⁻²²
4	Shot noise with preamp	шум с предусилителем საფანტისებური დენი წინასწარი გამაძლიერებლით	2,6*10 ⁻¹⁹	2,6*10 ⁻²⁰	1,97*10 ⁻²⁰	1,97*10 ⁻²¹
5	Signal ASE beat noise	Сигнал ASE шум სიგნალი ASE ხმაური	1,04*10 ⁻²²	1,04*10 ⁻²²	0,52*10 ⁻¹⁸	0,52*10 ⁻¹⁹
6	Signal ASE beat	ASE шум სიგნალი ASE ხმაური	0,54*10 ⁻²²	0,54*10 ⁻²²	2,7*10 ⁻²⁰	2,7*10 ⁻²⁰

	noise					
--	-------	--	--	--	--	--