

OPTIK ALOQA TARMOQLARIDA XAVFSIZLIKNI TA'MINLASHDA OPTIK STEANOGRAFIYANI OMMAVIY BPSK KANALI ORQALI OPTIK CDMA SIGNALLARIDA QO'LLASH

Nuriddin Akbarovich Jabbarov

Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti,
o'qituvchi-stajyor

nuriddinjabbarov2696@gmail.com

ANNOTATSIYA

Biz ushbu tadqiqot ishida SAC-OCDMAga asoslangan steganografiya tizimlari orasidagi signal va quvvatni o'rtacha nisbatini tahlil qilamiz. SAC-OCDMA tizimi mavjud shovqinlardan faqat PIIN va termal shovqinlarni o'z ichiga oladi. Tadqiqot ishida faqat PIIN shovqini ko'rib chiqildi, chunki qabul qilingan optik quvvat katta bo'lganda u dominant shovqin hisoblanadi. Natijalar bit-xato tezligi (BER) ifodalarini aniq olish orqali kengaytiriladi. Tizim xavfsizligini oshirish uchun tarmoq orqali yuborishdan oldin uzaytirilgan yashirin signalga spektr amplitudasini kodlash qo'llaniladi. Tizim har xil kod turlari va kod uzunligi sharti ostida baholanadi. Yashirin xabar muvozanat detektori tomonidan aniqlanadi, u yashirin kanalning sezgirligini 3dBga oshirishi mumkin.

Kalit so'zlar: Optik kodli ko'p kirish tizimlari (OCDMA), guruh tezligi dispersiyasi (GVD), Walsh-Hadamard kodi, BPSK jamoat kanali, Tolali Bragg panjaralari (FBGs), fazaviy intensivlik shovqinini (PIIN).

ABSTRACT

In this research paper, we analyze the signal-to-power ratio using qualitative steganography systems for SAC-OCDMA. The SAC-OCDMA system includes only PIIN and thermal noise from existing devices. Only the PIIN noise was considered in the research work, because the received optical power is large and it acts dominantly. The results are obtained by accurately obtaining the bit-error-rate (BER) expressions. Before sending the system over the network for the source, the stored hidden signal is spectrum encoded. The system is evaluated under various code types and code conditions. There is a hidden information detector, which can improve the sensitivity of the hidden channel by 3dB.

Keywords: Optical Code Multiple Access Systems (OCDMA), Group Velocity Dispersion (GVD), Walsh-Hadamard Code, BPSK Public Channel, Fiber Bragg Gratings (FBGs), Phase Intensity Interference (PIIN).

KIRISH

Optik kodli ko'p kirish tizimlari (OCDMA) har bir foydalanuvchiga tarmoqqa asinxron kirishni ta'minlash afzalliklariga ega va mahalliy tarmoqlarda qo'llash uchun mos deb hisoblanadi. Biroq, bu turdagi tizim chastotalar domenida kodlanganligining asosiy kamchiligi ma'lumotlar impulsi shakli vaqt domenida kodlanmagan bo'lib qoladi. Agar kimdir tanqidiy xabar yuborsa, ma'lumotlarni hech qanday kodlashsiz tinglovchi tomonidan osongina o'g'irlash mumkin [1].

So'nggi paytlarda xavfsiz ma'lumotni past intensivlikdagi shovqinga o'xshash signallarga kodlashni va ularni umumiy tarmoqning fon shovqin qavati bilan uzatishni o'z ichiga olgan OCDMA-ga asoslangan yashirin optik aloqa tobora ortib bormoqda. Optik steganografiyaning asosiy printsipi yuqori dispersiyali elementlardan foydalangan holda yashirin ma'lumotlar impulslarini vaqtincha uzaytirishdir. Signal impulslarining amplitudasi cho'zilgandan so'ng keskin kamayadi, shuning uchun signal umumiy tarmoqning tizim shovqinida yashirin bo'lishi mumkin.

Biroq, yashirin aloqada xromatik dispersiya birinchi navbatda umumiy tarmoq tizimi shovqini bilan solishtirganda past darajadagi amplitudani ta'minlash uchun steganografik optik impulsni cho'zish uchun ishlatiladi va xavfsiz ma'lumotlar keyin fon shovqini bilan uzatiladi. Yashirin kanal qabul qiluvchi terminalida dispersiyani qoplash moslamasi talab qilinadi, bu tizimning zaif nuqtasidir. Tinglovchi xavfsiz signal mavjudligidan shubhalansa, xavfsiz ma'lumotni olish uchun faqat bitta oddiy sozlanishi dispersiya kompensatsiyasi moslamasi kifoya qiladi. Zhensen ta'kidlaganidek, tarqaladigan yashirin signallarning vaqtinchalik fazali modulyatsiyasi optik steganografiya uzatish maxfiyligini yaxshilashdir. Bu tinglovchining jamoat uzatish ostida yashiringan yashirin kanalni aniqlash va ushlab qolish qiyinligini oshiradi, hatto dispersiya kompensatsiyasi bilan ham. Ommaviy kanalning shovqini optik yashirin signalni aniqlashdan oldin spektral kesish orqali bostiriladi [2].

Tizim xavfsizligini oshirish uchun tarmoq orqali yuborishdan oldin cho'zilgan yashirin signalga spektr amplitudasini kodlash qo'llaniladi. Spektr amplitudasini kodlash ko'p sonli faol foydalanuvchilar tomonidan ishlatilishi mumkin, chunki uning o'ziga xos xususiyati shundaki, u fotoaniqlash jarayonida shovqinni yo'q qiladi va fazaviy intensivlik shovqinini (PIIN) oldini oladi. Bundan tashqari, mos keladigan kod so'zi bo'lmasa, tinglovchilar to'g'ri dispersiya qiymatini bilishlariga qaramay, xavfsiz ma'lumotni ololmaydilar [3].

ASOSIY QISM

So'nggi paytlarda ikkilik fazani almashtirish (BPSK) kabi fazali modulyatsiya texnologiyalari yuqori uzatish samaradorligi tufayli katta e'tibor qaratilmoqda. Spektr amplitudali kodlangan (SAC)-OCDMA signalining fazali modulyatsiyalangan kanal bilan solishtirilishini ko'rib o'tamiz. Steganografiya usullarini va umumiy kanalni

ifodalash uchun ikkita ortogonal polarizatsiyadan foydalanadigan SAC-OCDMA tizimi va kodlovchilarga yuborilgan "0" yashirin kanal signali birlashtiriladi. Bundan tashqari, SPE-OCDMA tizimida Walsh-Hadamard kodlaridan foydalanish bir nechta kirish shovqinlarini (MAI) bostirishi mumkin. Tolali Bragg panjaralari (FBGs) kodlovchi/dekoderning asosiy komponenti sifatida foydalanilgan bo'lib, ular qisqa uzunlikdagi yashirin impulsga erisha oladi. Biz impulsni cho'zish va siqish moslamasi sifatida tolali Bragg panjarasidan (FBG) foydalaniladi. Umumiy BPSK signalini olib tashlash uchun qabul qilgichdagi polarizator ishlatiladi [4].

Optik tolali aloqada erishish mumkin bo'lgan bit tezligi masofasiga toladagi guruh tezligi dispersiyasi (GVD) cheklovlari to'sqinlik qiladi. Optik tolalarda uzoq masofalarga ultra qisqa optik impulslarning uzatilishi GVD sabab mavjud impulsning kengayishiga ta'sir qiladi. Tolalar muhitining sinishi indeksi va tarqalish konstantasi to'liq uzunligining funksiyalaridir. Impuls tola bo'ylab o'tganda, har bir to'liq uzunligi turli tezlikda harakat qiladi va impuls kengayadi, bu xromatik dispersiya deb ataladi [5].

Optik tolalar zamonaviy telekommunikatsiya tizimlarida keng qo'llaniladigan optik chastotalar (yorug'lik) uchun bir xil to'liq manbasidir. Yuqori bit tezligida, tolada tarqaladigan qisqa impulslarning dispersiyaga bog'liq kengayishi qo'shni vaqt oralig'i o'rtasida o'zaro suhbatni keltirib chiqaradi, bu esa aloqa masofasi oshganda xatolarga olib keladi [6]. Ko'p rejimli optik tolalar holatida modal dispersiya deb ataladigan narsa ham impulsning kengayishiga olib keladi. Hatto bitta rejimli tolalarda ham impulsning kengayishi polarizatsiya rejimining tarqalishi natijasida yuzaga kelishi mumkin (chunki ikkita polarizatsiya rejimi hali ham mavjud). Bular xromatik dispersiyaga misol emas, chunki ular tarqaladigan impulslarning to'liq uzunligi yoki tarmoq kengligiga bog'liq emas. Xromatik dispersiya - to'liq uzunligi bilan guruh kechikishining o'zgarish tezligi. Umumiy tarqalish konstantasi β Teylor qatorida kengaytirilishi mumkin:

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + 0.5\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (1)$$

bu yerda β_1 - guruh tezligiga teskari; β_2 , 1-rasmda ko'rsatilgan impulsning kengayishiga olib keladigan GVD.

Xromatik dispersiya material dispersiyasi va to'liq uzunligi dispersiyasidan iborat (shuningdek, to'liq uzatuvchi dispersiya deb ham ataladi). To'liq uzunligi dispersiyasi ps/nm-km bilan o'lchanadi (ya'ni to'liq uzunligi o'zgarishi va tola uzunligi uchun kechikish).

L tola uzunligi bo'yicha guruh tezligi v_g uchun harakatlanish vaqti t:

$$\tau = \frac{L}{v_g} = L\beta' = L\left(\frac{\partial\beta}{\partial\omega}\right) \quad (2)$$

bu yerda β - tarqalish doimiysi; β' - ω ga nisbatan birinchi hosila; ∂ - qisman hosila.

Spektral kengligi $\Delta\omega$ bo'lgan signal uchun:

$$\Delta\tau = (\beta'')L\Delta\omega \quad (3)$$

Boshqacha qilib aytganda, impulsning tarqalishi $\Delta\tau$ (xromatik dispersiya) ω , β'' ga nisbatan ikkinchi hosilaga bog'liq va L tolasining uzunligi va $\Delta\omega$ spektral diapazoni bilan proporsionaldir.

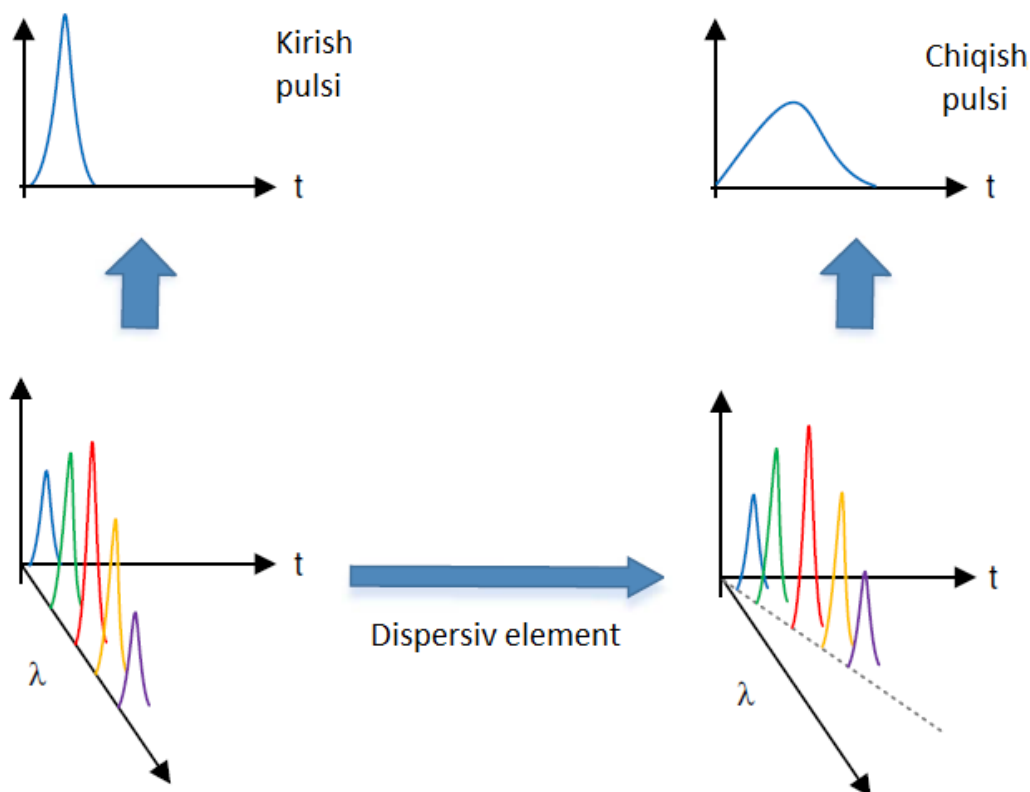
Shunga ko'ra, GVD koeffitsienti L tola uzunligi birligiga to'lqin uzunligi o'zgarishi natijasida kelib chiqadigan D harakatlanish vaqtining o'zgarishi sifatida aniqlanadi:

$$D = (1/L) (\partial\tau / \partial\lambda) = (1/L) (\partial\tau / \partial\omega) (\partial\omega / \partial\lambda) \quad (4)$$

D koeffitsienti xromatik dispersiya koeffitsienti deb ham ataladi va u to'lqin uzunligi bilan guruhning kechikish tezligi o'zgarishini o'lchashni ta'minlaydi. Nihoyat, impulsning tarqalishi yoki xromatik dispersiya quyidagicha ifodalanadi (bu yerda ∂ almashtirilgan Δ bilan):

$$\Delta\tau = |D|L\Delta\lambda \quad (5)$$

bu yerda $\Delta\lambda$ - signalning optik spektral kengligi (nanometrlarda). Salbiy dispersiya qisqaroq to'lqin uzunliklari uzunroq to'lqin uzunliklariga qaraganda sekinroq harakat qilishini anglatadi. Shunday qilib, salbiy dispersiyaga ega bo'lgan tolalar ijobiy dispersiyani qoplash uchun ishlatilishi mumkin.



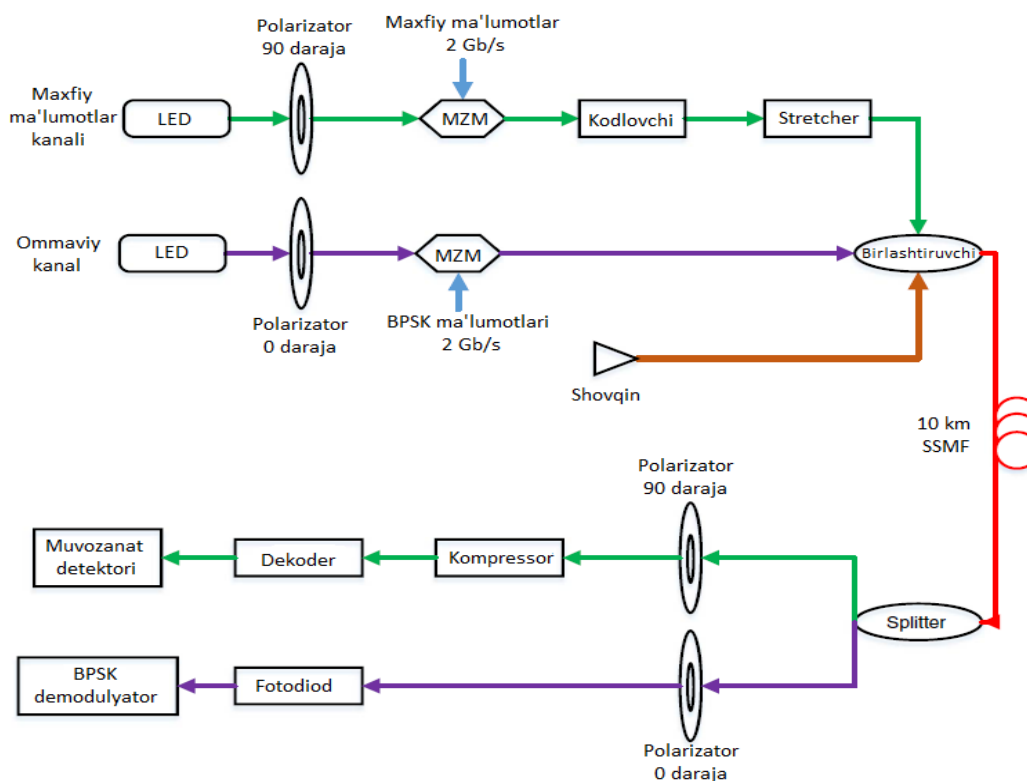
1-rasm. Guruh tezligi dispersiyasidan kelib chiqqan impulsning kengayishi.

MUHOKAMA VA NATIJA

SAC-OCDMA tizimining simulyatsiyalari OptiSystem dasturiy ta'minoti yordamida amalga oshirildi. OptiSystem - Optiwave kompaniyasining dasturiy simulyatsiya to'plami bo'lib, u optik tizimlar va tarmoqlarning ishlashini tahlil qiladi. Eksperimental o'rnatish 2-rasmda ko'rsatilgan. Yorug'lik chiqaradigan diod yorug'lik manbai sifatida markaz to'lqin uzunligi 1550 nm bo'lgan, har bir kanal uchun ikkita ortogonal polarizatsiyaga ega polarizatorlardan o'tgan. Yorug'lik polarizatorga yetib kelganida, faqat yorug'lik polarizatorining o'rnatilgan darajasi o'tadi, boshqalari esa so'riladi.

Ommaviy kanalda polarizatsiya darajasi 0 ga o'rnatiladi va axborot kodlar bilan modulyatsiya qilishdan oldin nolga qaytarilmaydigan chiziqli kodlash bilan psevdotasodifiy bit ketma-ketligi generatorida, ommaviy 2 Gb/s tezlikda BPSK signali yaratish uchun esa tashqi Mach-Zehnder modulyatoridan foydalaniladi. Boshqa impulsning polarizatsiya darajasi 90 ga o'rnatildi va signallar 2 Gb/s tezlikda modulyatsiya qilinadi, shundan so'ng ular FBG kodlovchisiga yuboriladi. BPSK jamoat kanali quriladi va tizimdagi yashirin kanal bilan birlashtiriladi [32].

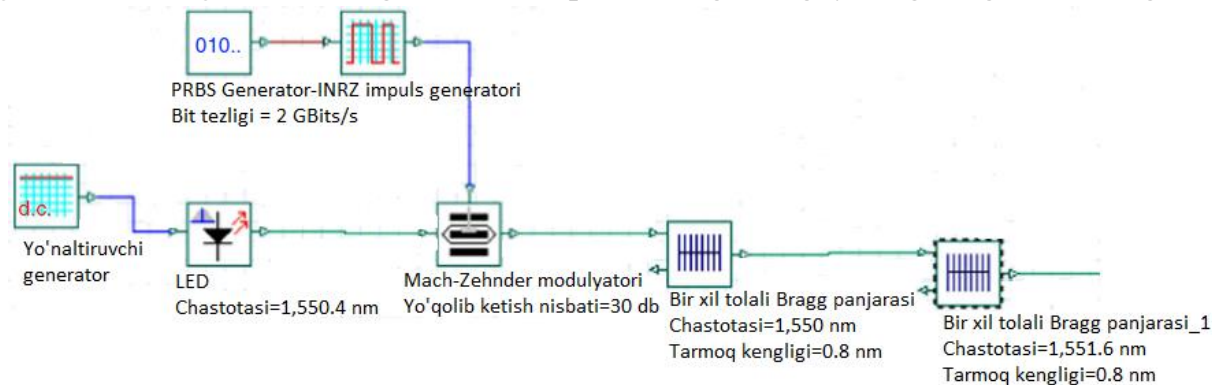
FBG enkoderining FBG to'lqin uzunligi 0 yoki 1 bit yordamida kodlangan, bu yerda 1 FBG aks ettirilgan to'lqin uzunligi mavjudligini va 0 FBG aks ettiruvchi to'lqin uzunligi yo'qligini bildiradi.



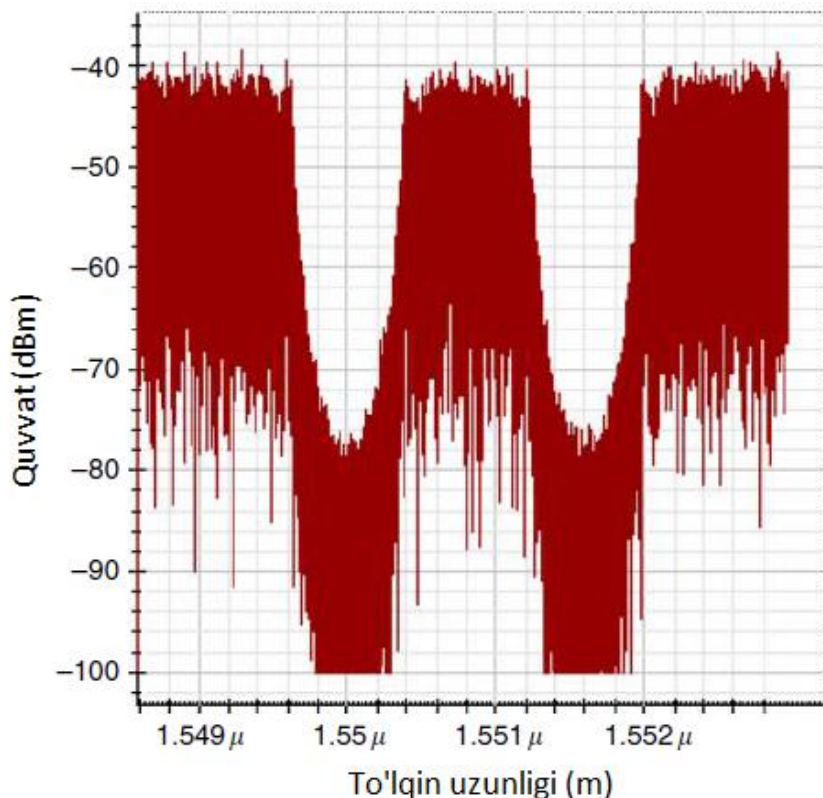
2-rasm. Optik steganografiya uzatishning sxematik diagrammasi

3-rasmda ko'rsatilganidek, FBG kodlovchini loyihalash uchun FBG kodlovchining aks ettirilgan to'lqin uzunligi uchun 0 va 1 bitli kodlash texnikasini

qo'llanilgan. Ushbu tadqiqotda FBG kodlovchi/dekoder uchun ishlatiladigan FBG rezonans to'lqin uzunliklari 1,549.2, 1,550, 1,550.8, va 1,551.6 nm, mos ravishda λ_1 , λ_2 , λ_3 , va λ_4 , ni ifodalaydi. Bu to'lqin uzunliklari nol va birlarning ikkilik ketma-ketligiga to'g'ri keladi. 4-rasmda FBG enkoderining o'lchangan aks ettirilgan spektrlari (λ_1 , λ_3) ko'rsatilgan. Spektr amplitudasini kodlovchi kod so'zi (1, 0, 1, 0) edi; tegishli markaziy to'lqin uzunliklari mos ravishda 1549,2 va 1550,8 nm; yorug'lik intensivligi -16,625 dBm. 4-rasmda kodlashdan keyingi spektr va NRZ formatidagi signallarni uzatgandan so'ng har bir to'lqin uzunligi kengaytirilganligi ko'rsatilgan [7].



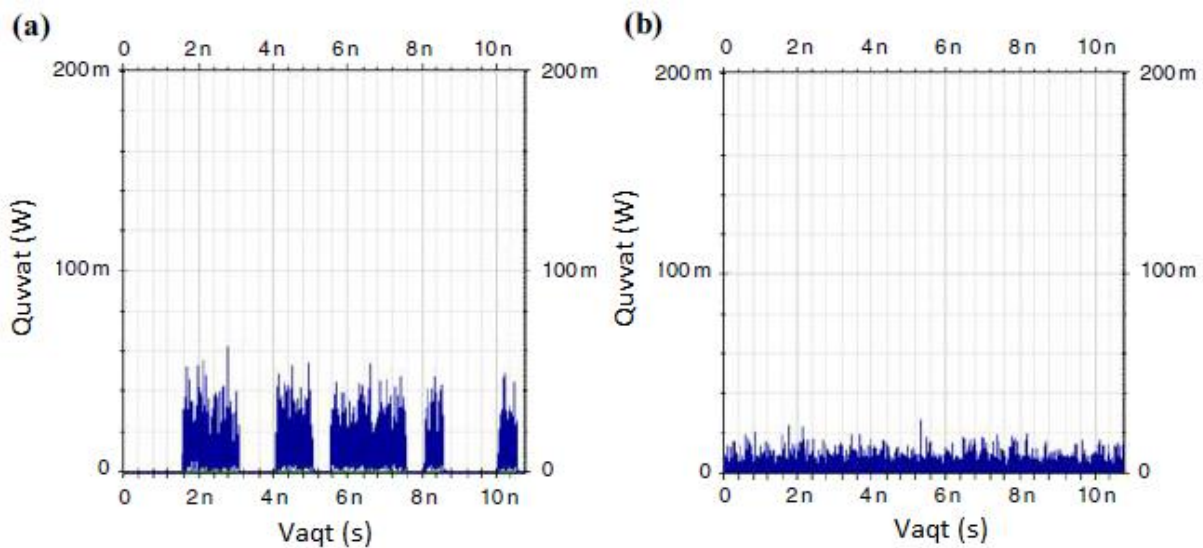
3-rasm. Steganografiya sxemasi bilan spektr amplitudasini kodlash orqali kodlovchining sxematik diagrammasi



4-rasm. FBG enkoderining aks ettirilgan spektrlari

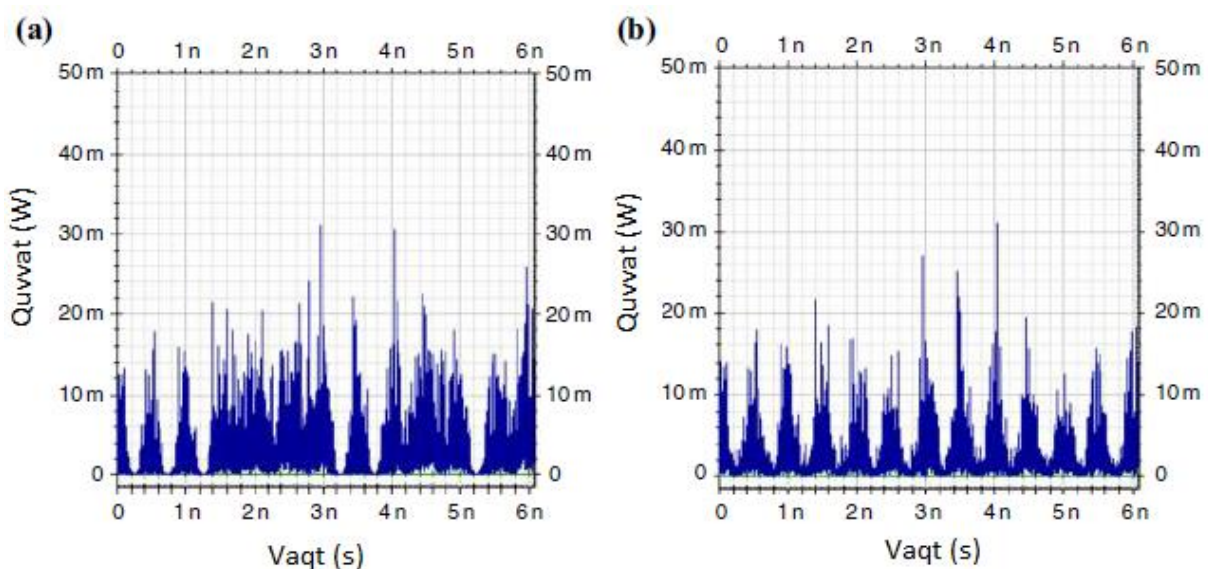
Kodlangan yashirin signal zambil orqali o'tdi va maksimal quvvatni pasaytirish uchun tarqaldi va shu bilan jamoat kanalida xavfsiz kanalni samarali ravishda yashirdi.

Impulsning tarqalishiga erishish uchun jami 500 ps/nm dispersiyani ishlab chiqarish uchun FBGLar ishlatilgan. Cho‘zishdan oldin va keyin to‘lqin shakli 5-rasmda ko‘rsatilgan.



Eslatmalar: (a) impulsning kengayishidan oldin; (b) impulsning kengayishidan keyin

5-rasm. Vaqt domenidagi yashirin signalning to‘lqin shakli

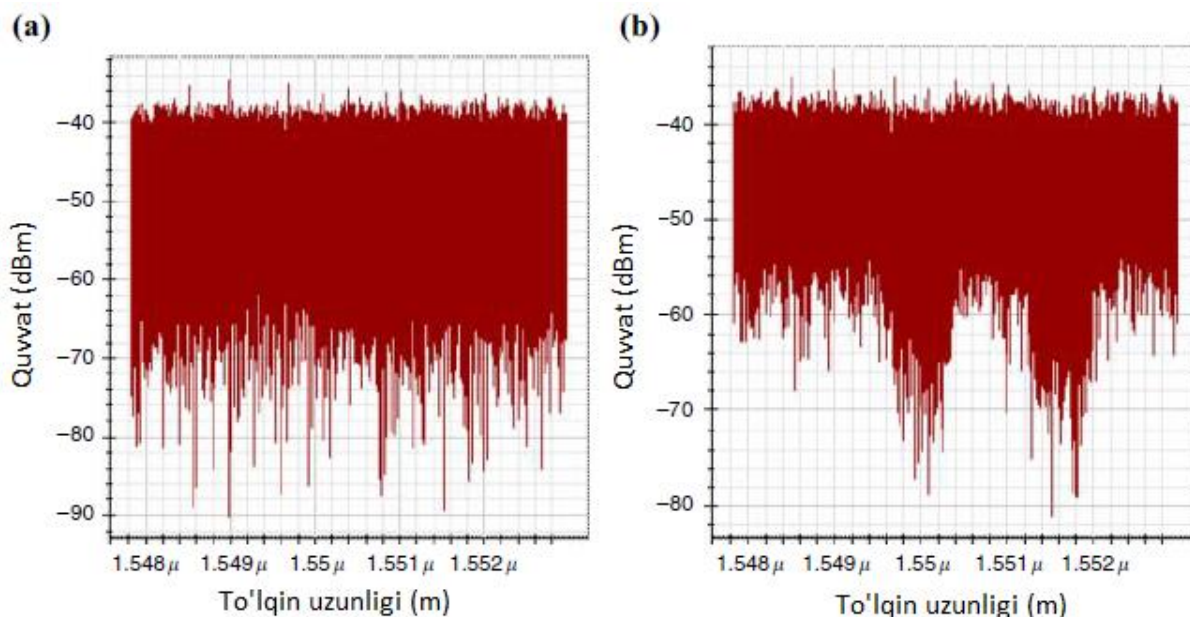


Eslatmalar: (a) impulsning kengayishidan oldin; (b) impulsning kengayishidan keyin

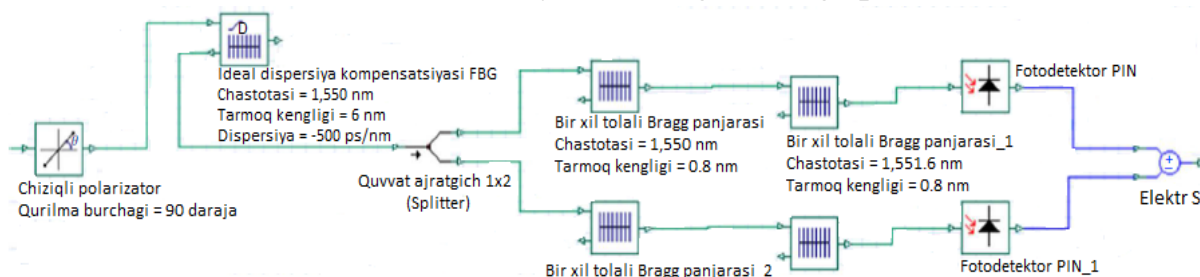
6-rasm. Vaqt domenidagi ulanish signalining to‘lqin shakli

Uzatilgan yashirin signal uzatishdan oldin ulagich orqali umumiy kanalga kiritilgan va ulanish signalining to‘lqin shakli 6-rasmda ko‘rsatilgan. Haqiqiy optik tarmoqdagi tizim shovqiniga taqlid qilish uchun tizimga alohida shovqindan kuchaytirilgan spontan emissiya (ASE) shovqinidan foydalaniladi. ASE shovqinining o‘rtacha quvvati uning yashirin kanalga ta‘sirini ko‘rsatish uchun sozlangan va ASE shovqini tizimga ulaganda o‘zgarish sezilmaydi [8].

7-rasmda umumiy signalning spektrlari, yashirin signalli ommaviy signal va ASE shovqin darajasi $-7,145$ dBm bo'lgan umumiy signal ko'rsatilgan. Yashirin signalli va yashirin signalsiz ommaviy signallarning spektrlari ASE shovqinining mavjudligidan qat'i nazar, o'xshash bo'ladi.



Eslatmalar: (a) yashirin signalsiz; (b) yashirin signal bilan
7-rasm. Umumiy BPSK signalining spektrlari



8-rasm. Steganografiya sxemasi bilan spektr amplitudasini kodlash bo'yicha dekoderning sxematik diagrammasi

10 km uzunlikdagi yagona rejimli toladan (SMF) o'tib, jamoat kanali hali ham ommaviy ma'lumotlarni olish uchun an'anaviy qabul qilgichdan foydalangan. Yashirin signal BPSK umumiy kanalida 8-rasmdagi dekodearlarda ko'rsatilganidek, modulyatsiyadan oldin bir xil polarizatsiya darajasiga o'rnatilgan polarizator yordamida aniqlandi. Shundan so'ng xavfsiz signalning cho'zilishini bekor qilish uchun -500 ps/nm dispersiyani ta'minlovchi impulsi kompressor bajarildi. FBG dekodeerining FBG massivlari mos keladigan FBG kodlovchisiga mos ravishda ishlab chiqilgan. BPD kodlovchidan xabarga kirish, korrelyatsiyani aniqlash uchun ishlatiladi. Shuni ta'kidlash kerakki, FBG dekodearlari mos keladigan kodlovchilarga nisbatan teskari. Keyin BPDlar kutilgan signalni aniqlash uchun FBG dekodeerining dekodlangan signallarini elektr signallariga aylantiradi. Boshqa foydalanuvchilardan

MAI BPD sxemasidan foydalangan holda har qanday ikkita berilgan SAC tizimi kod soʻzlarini ayirish orqali yoʻq qilinadi va shu bilan kirish signali BER ni kamaytiradi. Shuning uchun, "1" va "0" bitlari BPD uchun siqish dekoderi tomonidan dekodlangan.

TIZIM SAMARADORLIGINI TAHLIL QILISH

SAC-OCDMA tizimida mavjud boʻlgan shovqin PIIN va termal shovqinni oʻz ichiga oladi; ammo, ushbu tadqiqotda faqat PIIN koʻrib chiqildi, chunki qabul qilingan optik quvvat katta boʻlganda u dominant shovqin hisoblanadi. Bu turli foydalanuvchilarning keng polosali yorugʻlik manbalarining nomutanosibligidan kelib chiqadi va uning taʼsirini signal kuchini oshirish orqali olib tashlash mumkin emas.

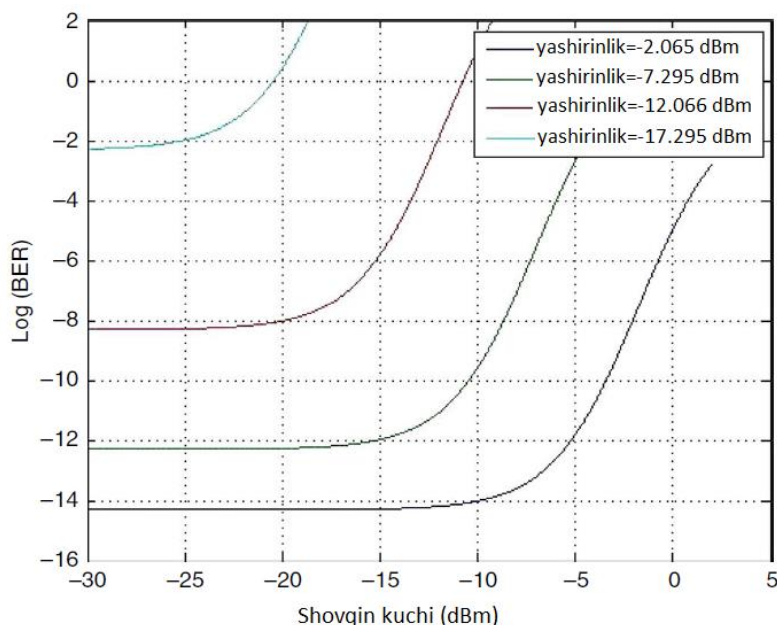
Umumiy shovqin quvvatiga PIIN va ASE shovqinlari kiradi. Umumiy shovqin kuchi taʼsiriga koʻra optik signal-shovqin nisbati (OSNR) quyidagicha berilgan:

$$OSNR = \frac{I(T_b)^2}{\sigma_{PIIN}^2(T_b) + P_n^2} \quad (6)$$

bu yerda P_n - ASE shovqinining kuchi, T_b - bit davomiyligi, σ_{PIIN}^2 - PIIN dispersiyasi. Interferensiya qiluvchi foydalanuvchilar "1" bitini uzatayotgan boʻlsa, 1-bit va 0-bitlarning dispersiyalari taxminan teng boʻladi va ularni ifodalash uchun σ_{PIIN}^2 olinishi mumkin. Gauss yaqinlashuvidan foydalangan holda (Huang va boshq., 2004) BER quyidagicha yoziladi:

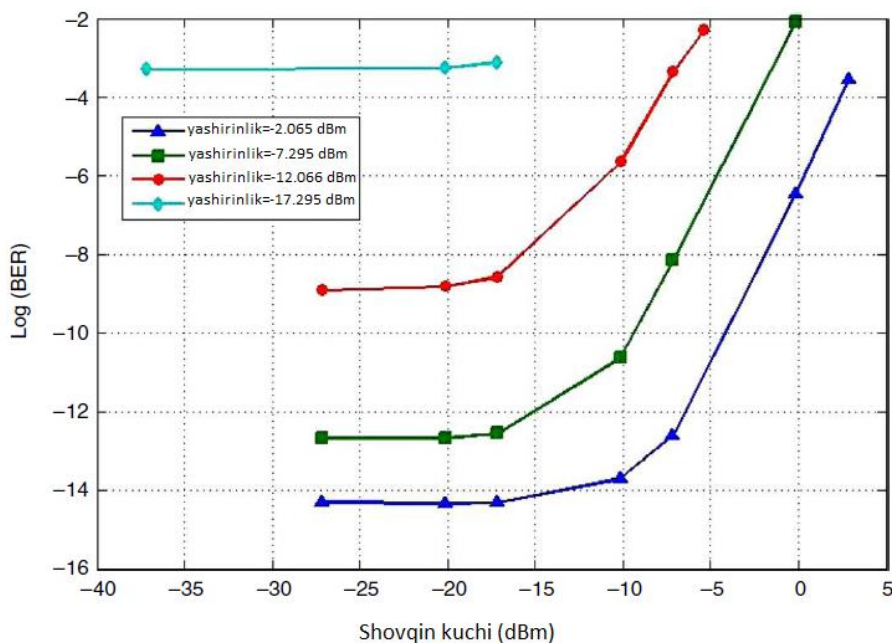
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{OSNR}{2}} \right) \quad (7)$$

Toʻrtta toʻlqin uzunligi uchun Walsh-Hadamard kodidan foydalangan holda ishlash 10 km uzunlikdagi tola va 2 Gbit/s bit tezligi OCDMA uchun sinovdan oʻtkazildi. Parametrlar $B=2 \text{ GHz}$, $\nu=1.24 \text{ THz}$ va $R=0.9 \text{ A/W}$ edi va faza xatosi 0 deb qabul qilindi. (7) dan foydalanib, BER va shovqin kuchi oʻrtasidagi bogʻliqlik 9-rasmda olingan. Walsh-Hadamard kodining kod uzunligi 4 boʻlib, ASE shovqinining kuchi va yashirin maʼlumotlar signali $A(0)$ kuchlari -2,065, -7,295, -12,066 va -17,295 dBm boʻlgan BER oʻrtasidagi munosabatni koʻrsatadi. Yorugʻlik manbasidan ommaviy signalning kuchi -2,065 dBm va shovqin kuchining taʼsiri maʼlum boʻladi. Shovqin kuchi oshgani sayin, signal yanada samaraliroq yashiringan, ammo kichikroq shovqin kuchi yuqori BER natijalarini oldi. PIIN faol foydalanuvchilar soniga va oʻzaro bogʻliqlikka nisbatan ijobiy boʻlganligi sababli, oʻzaro bogʻliqlik qiymati pastroq kod PIINni samaraliroq bostirdi va natijada unumdorlik sezilarli darajada oshadi.

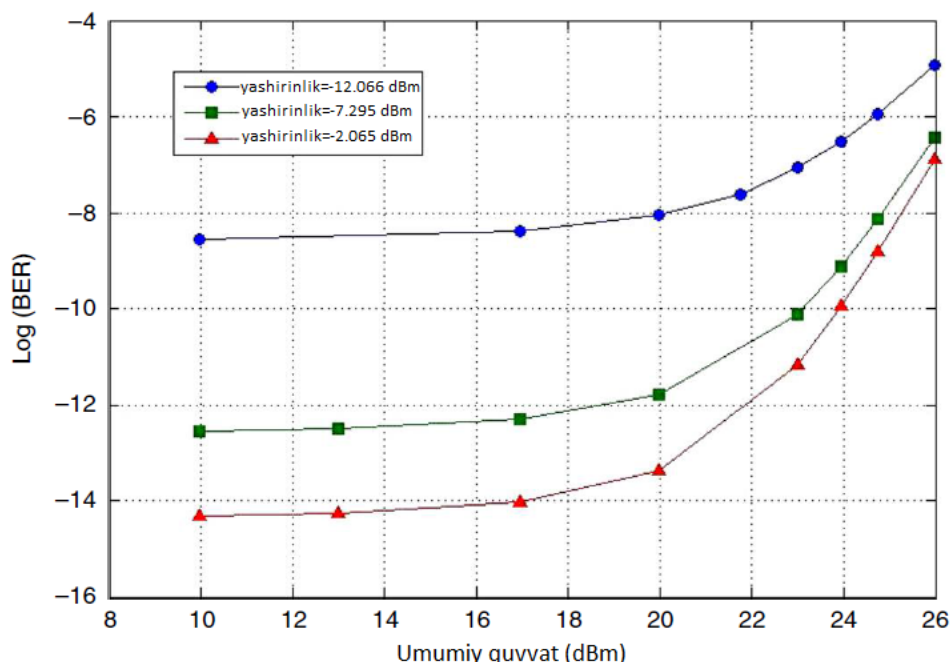


9-rasm. BER va ASE shovqin kuchi

10-rasmda tizimning BER ni simulyatsiya qilish uchun OptiSystem-dan foydalanish natijalari ko'rsatilgan. Turli yashirin kanal quvvatlari uchun ommaviy kanal quvvatining ta'siri 11-rasmda ham ko'rsatilgan. Jamoat signali toladan o'tganda, SMF ning tarqalishi ham bilvosita GVD ni hosil qildi va yashirin kanallardagi signaldan shovqin oldi. Biroq, 11-rasmda ko'rsatilganidek, agar umumiy signallarning kuchi yashirin signaldan yetarlicha yuqori bo'lmasa, tizim kuchli ishlashini saqlab qoladi [32].



10-rasm. Shovqin kuchiga nisbatan yashirin kanalning BER o'lchovlari



11-rasm. Yashirin kanalning davlat kuchiga nisbatan BER o'lovchilari

XULOSA

Biz ommaviy BPSK kanalida SAC-OCDMA dan foydalanadigan yangi optik steganografiya usulini taklif qildik va namoyish etdik. Yashirin kanal BPSK kanalida vaqtinchalik va spektral domenlarda samarali yashiringan va qabul qiluvchida muvaffaqiyatli tiklangan. Tizimning BER o'lovchilari yashirin kanal va jamoat kanali bir-biriga to'sqinlik qilmasligini ko'rsatdi. Bundan tashqari, jamoat kanali yashirin kanal uchun hech qanday qarshilikni keltirib chiqarmadi. Mos keladigan kod so'zi bo'lmasa, tinglovchi to'g'ri dispersiya qiymatini bilishiga qaramay xavfsiz ma'lumotni olo olmaydi. Simulyatsiya natijalariga ko'ra, yashirin quvvat kuchayganda BER ishlashi oshdi. Taklif etilayotgan optik steganografiya, hatto dispersiyani qoplash sxemasidan foydalanganda ham, tinglovchi uchun jamoat tarmog'idagi yashirin kanaldagi signallarni aniqlash va tutib olish qiyinligini oshiradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

- [1] H. Chen *et al.*, "A Tunable Encoder/Decoder Based on Polarization Modulation for the SAC-OCDMA PON," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 11, pp. 748–750, Jun. 2011, doi: 10.1109/LPT.2011.2132701.
- [2] Y. K. Huang, B. Wu, I. Glesk, E. E. Narimanov, T. Wang, and P. R. Prucnal, "Combining cryptographic and steganographic security with self-wrapped optical code division multiplexing techniques," *Electron Lett*, vol. 43, no. 25, pp. 1449–1451, 2007, doi: 10.1049/EL:20071981.

- [3]. K Kravtsov *et al.*, “Demonstration of optical steganography transmission using temporal phase coded optical signals with spectral notch filtering,” *Optics Express*, Vol. 18, Issue 12, pp. 12415-12420, vol. 18, no. 12, pp. 12415–12420, Jun. 2010, doi: 10.1364/OE.18.012415.
- [4] J. F. Huang, C. C. Yang, and S. P. Tseng, “Complementary Walsh-Hadamard coded optical CDMA coder/decoders structured over arrayed-waveguide grating routers,” *Opt Commun*, vol. 229, no. 1–6, pp. 241–248, Jan. 2004, doi: 10.1016/J.OPTCOM.2003.11.007.
- [5] J. P. HERITAGE, O. E. MARTINEZ, and A. FRENKEL, “Compensation of negative group velocity dispersion in optical fibers with a grating and telescope pulse compressor,” *Conference on Lasers and Electro-Optics (1988)*, paper TUP4, p. TUP4, Apr. 1988, Accessed: Feb. 21, 2023. [Online]. Available: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=CLEO-1988-TUP4>
- [6] Z. Wei, H. Ghafouri-Shiraz, and H. M. H. Shalaby, “Modified Quadratic Congruence Codes for Fiber Bragg-Grating-Based Spectral-Amplitude-Coding Optical CDMA Systems,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 19, Issue 9, pp. 1274-, vol. 19, no. 9, pp. 1274-, Sep. 2001, Accessed: Feb. 21, 2023. [Online]. Available: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=jlt-19-9-1274>
- [7] C. T. Yen and G. J. Huang, “Optical steganography transmission of optical CDMA signals over a public BPSK channel,” *Engineering Computations (Swansea, Wales)*, vol. 33, no. 6, pp. 1810–1824, Aug. 2016, doi: 10.1108/EC-08-2015-0253.
- [8] Z. Gao, X. Wang, N. Kataoka, and N. Wada, “Stealth Transmission of Time Domain Spectral Phase Encoded OCDMA Signal over WDM System,” *Optical Fiber Communication Conference (2010)*, paper OThW5, p. OThW5, Mar. 2010, doi: 10.1364/OFC.2010.OTHW5.