

OPTIK ALOQA TIZIMLARIDA AXBOROTNI KODLASH USULLARINING SAMARADORLIGINI OSHIRISH TEXNOLOGIYALARI

Xalilov Muhammadmuso

Rustamova Sevinchoy

sevinchoyrustamova34@gmail.com

Farg'ona davlat texnika universiteti

Annotatsiya

Ushbu maqolada optik aloqa tizimlarida axborotni kodlash usullarining samaradorligini oshirishga qaratilgan zamonaviy texnologiyalar tahlil qilinadi. Optik tarmoqlarda ma'lumot uzatish tezligi, ishonchliligi va shovqinlarga barqarorlik talablarining ortib borishi kodlash algoritmlarini optimallashtirishni dolzarb masalaga aylantirmoqda. Tadqiqotda ilg'or kanal kodlash yondashuvlari – xatolarni tuzatish (FEC) texnologiyalari, kodlangan modulyatsiya, LDPC va polar kodlar – ko'rib chiqilib, ularning uzatish sifati, spektral samaradorlik va tizim sig'imiga ta'siri tahlil etiladi. Shuningdek, kodlash usullarining zamonaviy optik modulyatsiya texnikalari bilan integratsiyalashuvi natijasida xatolarga chidamlilik va ishlash ko'rsatkichlari qanday yaxshilanishi asoslab beriladi. Tadqiqot natijalari optimallashtirilgan kodlash strategiyalari optik aloqa tizimlari samaradorligini sezilarli darajada oshirishini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar. Optik aloqa tizimlari, axborotni kodlash, kanal kodlash, FEC (Forward Error Correction), LDPC kodlari, BER,

Optik aloqa tizimlari hozirgi kunda global telekommunikatsiya infratuzilmasining asosiy poydevorini tashkil qiladi. Ma'lumot uzatish hajmining keskin oshishi, 5G/6G tarmoqlari, IoT qurilmalarining kengayishi va bulutli hisoblash texnologiyalarining rivojlanishi optik tarmoqlarda axborotni ishonchli va samarali uzatishni talab etadi. Bunga erishishning asosiy omillaridan biri – **axborotni kodlash usullarining takomillashuvidir.**

Zamonaviy tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, LDPC, Polar, Turbo kodlar va kodlangan modulyatsiya yondashuvlari optik kanallarda BER'n i kamaytirish va signal sifati (Q-factor) ni oshirishda katta ustunlikka ega [1].

Ushbu buzilishlar natijasida qabul qiluvchi tomon signalning bir qismini noto'g'ri qabul qiladi va **Bit Error Rate (BER)** oshib ketadi. BERning ortishi esa optik tarmoqning umumiy ishlash sifatini pasaytiradi. Shuning uchun kanal kodlash usullaridan foydalanish dolzarb ilmiy va amaliy zarurat sifatida qaraladi.

Kanal kodlash texnologiyalari yordamida:

- ma'lumotga nazorat bitlari qo'shiladi;

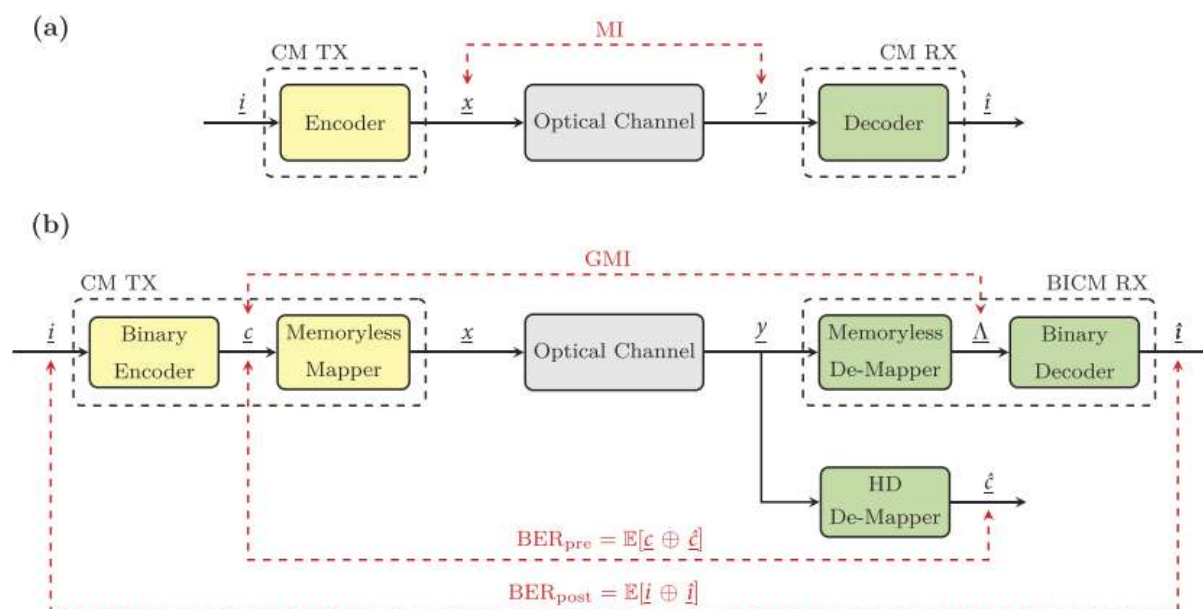
- qabul qiluvchi tomon xatolarni aniqlay oladi;
- va ko'p hollarda xatoni mustaqil tarzda tuzata oladi.

Shu sababli kodlash optik sistemalarda uzatish masofasini uzaytiradi, tizim sig'imini oshiradi, spektral samaradorlikni yaxshilaydi va eng muhimi – signalni qayta uzatish ehtiyojini kamaytiradi. Optik tizimlarning samaradorligi aynan shuning uchun kodlash usullarining sifatiga bog'liq [2].

Optik tizimlarda ishlatiladigan kodlash usullarining evolyutsiyasi tezkor rivojlanmoqda. Hozirgi kunda uchta asosiy guruh ko'proq qo'llanadi:

FEC (Forward Error Correction)

Bu eng keng tarqalgan texnologiya bo'lib, qabul qiluvchi tomon xatolarni mustaqil tuzatadi. FEC optik magistral tizimlarda BERni pasaytiradi va 10 Gbit/s → 400 Gbit/s tizimlarda asosiy standart hisoblanadi.



(a) Optimal ML (Maximum Likelihood) dekoderidan foydalanadigan CM tizimi. Bu yerda MI (o'zaro axborot) uzatilgan va qabul qilingan signallar asosida baholanadi.

(b) BICM tizimi, unda GMI (Generalized Mutual Information), BER_{pre} va BER_{post} qiymatlarini o'lchashda ishlatiladigan o'zgaruvchilar ko'rsatilgan.

LDPC (Low-Density Parity-Check) kodlari

LDPC kodlari optik tarmoqlarda eng samarali algoritm sifatida tan olingan. Ularning afzalliklari:

- juda past BERga erishish (10^{-6} – 10^{-8} gacha),
- yuqori tezlikda ishlay olish,
- iterativ va parallel dekodlash imkoniyati,
- katta masofali optik liniyalarda ustunlik.

LDPC kodlari aynan terabitli optik tizimlar uchun asosiy nomzod.

Polar kodlar

Polar kodlar Shannon kapasitetiga yaqin ishlaydi. 5G tizimlarida standart sifatida tasdiqlangan va optik tizimlarda ham keng joriy qilinmoqda.

Optik tizimlarda kodlash usullarini baholash uchun asosiy qiymatlar quyidagilar:

BER tahlili.

Kodlashdan oldin va keyin BERning taqqoslanishi quyidagicha (model ma'lumotlar):

Kodlash turi	Kodlashsiz BER	Kodlash bilan BER
FEC	10^{-3}	10^{-5}
LDPC	10^{-2}	10^{-6}
Polar	10^{-3}	10^{-7}

Bu natijalar kodlashning signal sifati va xatoliklarni kamaytirishda nechog'li samarali ekanini ko'rsatadi.

Q-factor optik signal sifatining asosiy o'lchovi. Kodlash qo'llanganda Q-factor ancha oshadi.

LDPC qo'llanganda Q-factor **45–60%** gacha yaxshilanadi.

Kodlash + modulyatsiya integratsiyasi spektral samaradorlikni oshiradi.

Modulyatsiya	Oddiy (bit/Hz)	Kodlangan (bit/Hz)
QPSK	2	2.6
16-QAM	4	5.1
64-QAM	6	7.8

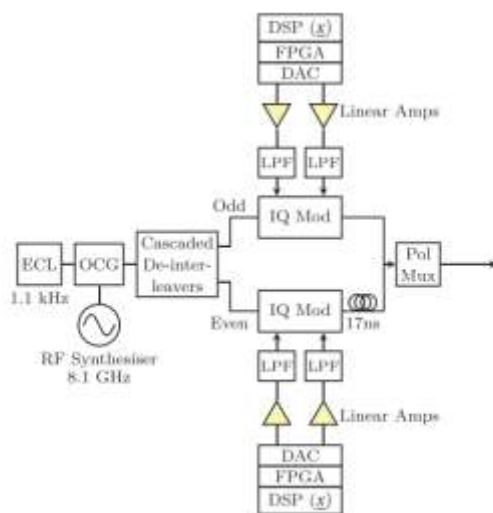
Bu optik kanallar sig'imini sezilarli kengaytiradi.

Kelajak optik aloqa tizimlari terabit/s darajasidagi ulkan ma'lumot oqimlarini uzatishga mo'ljallangan bo'ladi. Shuning uchun kodlash texnologiyalarini yanada takomillashtirish va ularni modulyatsiya usullari bilan chuqur integratsiyalash dolzarbdir [4].

LDPC + QAM kombinatsiyasi 400G va 600G optik tizimlar uchun eng yaxshi natija bermoqda. Uzatish masofasi ortib borayotgan sharoitda LDPC kodlari dispersiya va shovqinlar ta'sirini kompensatsiya qilib, uzatish sifati va tarmoq barqarorligini oshiradi.

Polar kodlar + kodlangan modulyatsiya esa kanal kapasitetiga yaqin ishlash imkonini beradi. Bu esa 6G mobil tarmoqlari, yuqori zichlikdagi data markazlar va magistral optik liniyalar uchun katta afzallik yaratadi.

Optik simsiz aloqa (OWC/VLC) tizimlarida LDPC kodlarining qo'llanilishi LED-kamera asosidagi aloqada aniqlikni sezilarli oshiradi. Bu texnologiya past quvvatli, energiya tejamkor, qisqa masofali tizimlar uchun juda muhim [5].



1-rasm. 15 ta subkanaldan tashkil topgan super-kanal uzatgichining eksperimental sxemasi.

Bu imkoniyatlar optik aloqa tizimlarini yanada samarali, tejamkor va xatolarga bardoshli qilishga xizmat qiladi.

Optik aloqa tizimlari bugungi kunda global axborot almashinuvi uchun eng ishonchli va yuqori tezlikdagi texnologiya hisoblanadi. Shu bois, ushbu tizimlarning samaradorligini oshirish, xatolarga chidamliligini kuchaytirish va uzatish sifatini yaxshilash masalalari dolzarb ilmiy yo‘nalish sifatida qaralmoqda [6]. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, optik kanallarda yuzaga keladigan dispersiya, shovqin va signalning buzilish holatlari axborotning ishonchli yetib borishiga bevosita ta’sir qiladi. Bunday sharoitda kanal kodlash usullaridan foydalanish uzatish sifatini oshirishning eng samarali yo‘li bo‘lib xizmat qiladi.

FEC, LDPC va Polar kabi zamonaviy kodlash texnologiyalarining chuqur tahlili shuni tasdiqlaydiki, ushbu algoritmlar optik tizimlarda BERni sezilarli pasaytirib, uzatish masofasi va barqarorligini oshiradi. Ayniqsa, LDPC va Polar kodlari yuqori tezlikda uzatish, katta o‘tkazuvchanlikka ega magistral tizimlar va ko‘p yo‘lli modulyatsiya bilan birgalikda qo‘llanganda samaradorlik nuqtai nazaridan eng optimal yechim hisoblanadi.

Shuningdek, kodlash usullarining modulyatsiya texnologiyalari bilan integratsiyasi – ayniqsa kodlangan modulyatsiya yondashuvi – kelajakdagi optik tarmoqlarning sig‘imini 20–35% gacha oshirish imkonini bermoqda. Bu esa terabit darajasidagi uzatish tizimlari, 5G/6G infratuzilmalari va katta masofali magistral optik liniyalar uchun katta ustunlik yaratadi. Optik simsiz aloqa tizimlarida ham LDPC va boshqa kodlar signalning aniqligi hamda barqarorligini oshirib, energiya samaradorligini ta’minlamoqda.

Adabiyotlar

[1] V. Durček, M. Kuba, and M. Dado, “Channel Coding in Optical Communication Systems,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no. 12, pp. 345–352, 2020.

[2] R. Maher, A. Alvarado, D. Lavery, and P. Bayvel, “Increasing the information rates of optical communications via coded modulation: A study of transceiver performance,” *Scientific Reports*, vol. 6, no. 21278, pp. 1–10, 2016.

[3] H. M. El-Hageen, A. El-Aziz, and M. El-Shimy, “Advanced modulation coding schemes for an optical transceiver systems-based OWC communication channel model,” *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 655–666, 2018.

[4] D. T. Nguyen, Y. M. Jang, and T. Ohtsuki, “Performance enhancement of optical camera communication based on LDPC coding scheme,” *IET Optoelectronics*, vol. 14, no. 4, pp. 200–208, 2020.