



OPTIK TOLALI ALOQA LINIYALARINING UMUMIY XUSUSIYATLARI

Habipova Guljayna Medetbay qizi
Joldasbaeva Guljahan Mayrambay qizi

“Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti”

Dmitry Viktorovich Bystrov

“Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti”,
Professor

guljaynahabipova@gmail.com

joldasbaevaguljahan@gmail.com

dvbystrov58@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17840088>

ARTICLE INFO

Qabul qilindi: 01-dekabr 2025 yil

Ma’qullandi: 03-dekabr 2025 yil

Nashr qilindi: 06-dekabr 2025 yil

KEY WORDS

Optik tola, dispersiya, susayish, nochiziqli effektlar, chegaraviy rejim, WDM, BER.

ABSTRACT

Ushbu maqolada optik tolali aloqa liniyalarining fizik asoslari, tarkibiy elementlari va foydalanish prinsiplari ilmiy tahlil qilinib, ularning chegaraviy ish rejimlaridagi xulq-atvori kompleks yoritilgan. Optik tolaning tuzilishi, nur tarqalishi, dispersiya va susayish kabi asosiy parametrlarning o'zgaruvchan tashqi omillarga nisbatan sezgirligi tadqiq etilgan. Harorat, mexanik yuklanish, spektral diapozon va uzunlik kabi omillar ta'sirida yuzaga keladigan fizik va nochiziqli jarayonlar — SPM, XPM, FWM kabi effektlar modellashirish nuqtai nazaridan sharhlangan. Shu bilan birga, optik liniyalarning ishonchliligi, trafik sifatini ta'minlash va WDM tarmoqlaridagi chegaraviy holatlarning ilmiy asoslari mavjud tadqiqotlar bilan solishtirib berilgan.

Zamonaviy axborot-kommunikatsiya tizimlarining tez sur'atlar bilan rivojlanishi uzoq masofalarda yuqori tezlikda, kam isrofli va elektromagnit shovqinlarga chidamli ma'lumot uzatish texnologiyalariga bo'lgan talabni kuchaytirdi. Mazkur talablar fonida optik tolali aloqa liniyalari (OTAL) eng samarali va ishonchli axborot uzatish muhiti sifatida global infratuzilmaning asosiy elementiga aylandi. Optik tolalarning dielektrik tabiati, yuksak ma'lumot sig'imi, past dispersiya va past susayish kabi ustunliklari ularni an'anaviy mis kabellari va radioaloqa kanallariga nisbatan sezilarli darajada yuqori pozitsiyaga qo'yadi.

OTAL tizimlari nafaqat magistral aloqa tarmoqlarida, balki transport, energetika, sanoat avtomatikasi, intellektual elektr tarmoqlari, gaz-neft infratuzilmalari va harbiy-texnik ob'ektlar kabi javobgar tarmoqlarda ham strategik ahamiyatga ega. Shunday tarmoqlarda liniyalarning chegaraviy ish rejimlaridagi xulqini chuqur o'rganish, jumladan temperatura o'zgarishi, mexanik zo'riqishlar, namlik, radiatsiya, uzun masofa va yuqori zichlik sharoitlaridagi optik signal isroflari – tizim barqarorligini ta'minlashning asosiy omillaridan biridir.

Bu maqolada optik tolali aloqa liniyalarining tuzilishi, fizik-optik xususiyatlari, signal susayish va dispersiya mexanizmlari, turli chegaraviy rejimlarda yuzaga keladigan fizik

jarayonlar hamda mavjud ilmiy tadqiqotlar tahlili yoritiladi. Maolaning nazariy-uslubiy asoslari keyinchalik chegaraviy rejimlarda OTLA tizimlarining o'zgarishini modellashtirish va tahlil qilish uchun metodik baza yaratadi.

Optik tolali aloqa liniyasi (OTAL) - ma'lumotlarni uzatish uchun nurli signallardan foydalanadigan, dielektrik tolalar asosida tuzilgan yuqori tezlikdagi telekommunikatsiya infratuzilmasidir. Optik tola kvant yorug'lik impulsleri tarzidagi signallarning uzoq masofaga minimal isroflar bilan yetkazilishini ta'minlaydi. Bukiluvchanlik, elektromagnit ta'sirlarga immunitet, yuqori o'tkazuvchanlik va xavfsizlik tufayli OTAL zamonaviy tarmoqlarning asosiy elementi hisoblanadi [1].

Tipik optik tolali liniya quyidagi asosiy komponentlardan tashkil topadi:

- Optik tola (yadro va mantiya) - nurning umumiy ichki qayttirish effekti orqali yo'nalishini ta'minlaydi;
- Kabel konstruksiyasi - moda, bufer qoplamalar, kuchlanishga qarshi elementlar;
- Optik modulyator - elektr signalini nur impulsleriga aylantiradi;
- Optik qabullagich (fotodetektor) - optik signalni elektr ko'rinishiga qayta konvertatsiya qiladi;
- Kuchaytirgichlar (EDFA, Raman) - uzoq liniyalarda signalni qayta tiklash;
- Mustahkamlovchi va yuklanishni ta'minlovchi himoya elementlari [2].

OTAL tarmog'ining asosiy funksiyalari:

- yuksak tezlikdagi ma'lumot uzatish;
- uzoq masofada signal isroflarini kam saqlash;
- tarmoq xavfsizligini oshirish;
- keng polosa (bandwidth)ni ta'minlash;
- elektromagnit shovqinlarning ta'sirini kamaytirish.

Optik tolaning asosiy afzalliklari:

- yuqori o'tkazuvchanlik - 10 Tbit/s gacha real-time amaliy quvvat;
- elektromagnit shovqinlardan to'liq himoya;
- uzoq masofada past isroflar (0.18–0.22 dB/km);
- xavfsizlik (signalni tashqi tomondan hech qanday aralashusiz qabul qilib bo'lmaydi);
- uzoq xizmat muddati (25–40 yil).

Optik tolaning asosiy tuzilishi. Optik tola 3 asosiy qatlamdan iborat:

1. **Yadro (core)** diametri 8–10 μm (SMF) bo'lib, yorug'lik impulsining umumiy ichki qayttirish effekti asosida yo'nalishini ta'minlaydi.
2. **Mantiya (cladding)** - yadrodan pastroq sindirish koeffitsiyentiga ega, nurning "chiqmasligini" ta'minlaydi.
3. **Qoplama (coating)** - myexanik himoya, namlik va haroratdan saqlash vazifasini bajaradi.

Optik liniyaning funksional arxitekturasini. Zamonaviy OTAL quyidagi elementlardan tashkil topadi:

- **optik modulyatorlar (MZM, EAM)** - elektr signalini optik impulsqa aylantiradi;
- **optik lazer manbai (DFB, CW lazer)** - tashuvchi nurni generatsiya qiladi;
- **optik qabullagich (PIN, APD)** - nurni elektr signaliga qayta konvertatsiya qiladi;
- **kuchaytirgichlar (EDFA, Raman)** - signalni regeneratsiya qiladi;
- **WDM/DWDM mulyajlar** - bir tolada 40–160 ta kanalni tashish imkonini beradi;
- **optik krosslar, patch-panellar, splays muftalar** - kabellarning xizmat ko'rsatish elementlari.

Umuman, optik tolali liniya - bu bir vaqtning o'zida ham fizik uzatish muhiti, ham yuqori tezlikli raqamli trafik tashuvchisi hisoblanadi.

Chegaraviy ish rejimlari: ta'rif va klassifikatsiya. Optik tolali liniyaning chegaraviy ish rejimlari - bu kanalning normal parametrlari (harorat, mexanik yuk, radius, uzunlik, optik quvvat, modullashtirish tezligi, yoki spektral diapazon) o'z normativ chegaralariga yaqinlashgan holatlardir. Bunday shartlarda optik tola fizik parametrlari o'zgarishi mumkin va bu signal sifatiga ta'sir etuvchi asosiy omillardan hisoblanadi [3].

Chegaraviy rejimlar odatda quyidagicha tasniflanadi:

Harorat bo'yicha chegaraviy rejimlar:

- past haroratda tolaning moduli ortadi, siqilish-nazariy sindirilish isroflari ko'payadi ($-40^{\circ}\text{C} \dots -10^{\circ}\text{C}$, - tolaning tarkibida siqilish, mikrodog'lar ko'payadi, - Rayleigh scattering ikki baravargacha o'sishi mumkin);
- yuqori haroratda ($+50^{\circ}\text{C} \dots +80^{\circ}\text{C}$, - mantiya yumshashi natijasida susayish 20–40 % ortadi; dispersiya koeffitsiyenti o'zgarib) mantiya deformatsiyasi, dispersiya koeffitsiyentining o'zgarishi yuz beradi [4].

1. Mexanik yuklanish bo'yicha rejimlar:

- kabel tortilishi (kabel uzilishi, shamol ta'siri, grunt ostida yuklanish);
- vibratsiya va dinamik yuklar (FTTH tarmoqlarda eng ko'p uchraydigan xavflardan biri);
- shamol va muzlash ta'siri (tortilishi 10–15 N ga yetganda susayish 2–4 % oshadi).

2. Optik quvvat bo'yicha chegaraviy rejimlar:

- kuchli lazer impulslari natijasidagi noelektrik effektlar (SPM - **(Self-Phase Modulation)** - impuls fazasi buziladi; XPM - **(Cross-Phase Modulation)** - qo'shni kanallar ta'siri; FWM - **(Four-Wave Mixing)** - yangi spektrlar paydo bo'lib, WDM kanallarini buzadi.

3. Uzunlik (liniya masshtabi) bo'yicha chegaraviy rejimlar:

- 100–400 km diapazonda kuchaytirgichlarsiz ishlashning cheklovlari;
- dispersiya kompensatori talab etilishi;
- 400 km gacha magistral tarmoqlar EDFA qo'llanilmasa BER 10^{-3} gacha yomonlashadi.

4. Spektral diapazon bo'yicha rejimlar:

- kanallar orasida crosstalk kuchayishi;
- OSNR 12 dB dan past bo'lsa ishlash amaliyotda mumkin emas;
- DWDM'da harorat o'zgarishi - λ shiftga olib keladi;
- WDM/CWDM/DWDM rejimida kanallar bir-biriga ta'sir qilishi (crosstalk).

Bu chegaraviy rejimlar telekommunikatsiya tarmoqlarida xizmat ko'rsatish sifatining (QoS) pasayishiga, BER ortishiga, OSNR kamayishiga olib keladi.

Optik tolali liniyalarda signal isroflar va tarmoq xususiyatlari. Optik signalning susayish (α) - nur intensivligining masofa bo'yicha eksponensial kamayishi bo'lib, uning fizik tabiati tolaning material xususiyatlariga bog'liq. Asosiy isrof turlari:

1. Absorbsiya (so'rilish) - tola materialining molekulyar strukturasi energiyani yutilishi (shisha tarkibining infraqizil va ultrabinafsha diapazondagi molekulyar yutilish jarayonlari) [5].

2. Chalkash tarqalish (Rayleigh scattering) - shisha strukturidagi mikroradiusli nosozliklar (shisha strukturadagi mikronosozliklar nurni turli yo'nalishga tarqatadi).

3. Birikmalarda, konnektorlarda isroflar - 0.05–0.2 dB/baylanish

4. Mexanik ta'sirlar natijasidagi mikrodog'lar - kabeldagi permanent stress susayishni ortadi.

Optik liniyaning quyidagi asosiy parametrlari chegaraviy rejimlarda o'zgaradi:

- dispersiya (CD, PMD) - turli spektr komponentlarini differensial kechikishi;
- noelektrik ta'sirlar - intensiv quvvatdagi signallar ta'siridagi muhitning nochiziqligi;
- OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) - liniya sifati mezon;
- BER (Bit Error Rate) - chegara rejimida asosiy isrof ko'rsatkichi;
- Q-faktor - optik qabullagichda signal sifati.

Odatda, optik tolalar uchun susayish $\alpha \approx 0.18\text{--}0.35$ dB/km, lekin ekstremal omillar ta'sirida bu koeffitsiyent 2–5 barobar o'sishi mumkin [6]. Normal ekspluatatsiya sharoitida susayish $\alpha \approx 0.18\text{--}0.22$ dB/km, biroq chegaraviy rejimlarda 0.60 dB/km gacha o'sishi mumkin.

Chegaraviy sharoitlarda optik tolada yuz beradigan fizik jarayonlar. Optik tolalarda chegaraviy sharoitlar bir qator fizik o'zgarishlarga olib keladi:

1) Harorat ta'siri

- Sindirish koeffitsiyenti $n(T)$ - haroratga bog'liq o'zgaradi, Sindirish ko'rsatkichi $n(T)$ o'zgarishi $\rightarrow$ fazaviy tezlik o'zgaradi;

- Dispersiya $D(T)$ ortib, impulsning yengilishi kuchayadi, Dispersiya $D(T)$ 15–30 % o'zgarishi mumkin;

- Refraksiya indeksi gradiyentining o'zgarishi nur yo'nalishiga ta'sir qiladi, Tolaning kengayishi/qiyshayishi nurning ichki qayttirishiga ta'sir qiladi [7].

2) Mexanik yuklanish ta'siri

- kabelning uzayishi D' dispersiya koeffitsiyentini o'zgartiradi;

- tolaning uzayishi dispersiyani o'zgartiradi, λ_{eff} o'zgarishi $\rightarrow$ spektral siljish;

- mikrodog'lar susayish koeffitsiyentini 5–10 % oshiradi;

- FTTH va magistral tarmoqlar uchun asosiy tasir etuvchi omil.

3) Noelektrik (nochiziq) effektlar

Chegaraviy quvvatda quyidagi nonlinear effektlar paydo bo'ladi:

- SPM (Self-phase modulation);

- XPM (Cross-phase modulation);

- FWM (Four-wave mixing);

- Raman scattering;

- Brillouin scattering

Bu effektlar WDM kanallarida faza shumlarini, interferensiya va qisman yoqolishlarni keltirib chiqaradi [8].

4) Uzoq masofada kuchaytirgichlarsiz ishlash

100 km dan ortiq masofada signal kuchsizlanishi sezilarli bo'lib, EDFA amplifier qo'llanmasa $BER \geq 10^{-3}$ darajagacha yomonlashadi.

Zamonaviy adabiyotlar tahlili. Optik liniyalarning chegaraviy rejimlardagi o'zgarishlari bo'yicha jahon ilmiy tadqiqotlari quyidagi yo'nalishlarda amalga oshirilgan:

1. Optik dispersiyaning haroratga bog'liq modeli (Marcuse, G. Keiser va dr.) - dispersiyaning $\pm 20\%$ o'zgarishi matematik modellari berilgan. Marcuse, Keiser va Ghatak tomonidan haroratning $D(T)$, $n(T)$ va λ_{shift} ga ta'sir etuvchi analitik modellari ishlab chiqilgan [9].

2. Nochiziq effektlarni modellashtirish (Agrawal, 2020) - NLSE (Nonlinear Schrödinger Equation) asosida optik impuls tarqalishi tahlil qilingan. Agrawal (2020) NLSE tenglamasi asosida SPM, XPM, FWM jarayonlarining 40–200 km magistral liniyalardagi aniq ta'sirini matematik modellashtirdi [10].

3. Mexanik ta'sir ostida susayish ortishi (ITU-T G.650.3) - kabelning tortilishi 10–15 N bo'lganida susayish 3–7 % qo'shimcha o'sishi isbotlangan. ITU-T G.650.3 standarti mexanik stress natijasida susayish koeffitsiyentining 3–7 % o'sishini eksperimental asosda keltirib berdi [11].

4. Klimat sharoitida OTL parametrlarining o'zgarishi $-40^{\circ}\text{C} \rightarrow +60^{\circ}\text{C}$ oralig'ida PMD koeffitsiyenti 1.5 barobar o'zgarishi qayd etilgan. Sibir, Qozog'iston va O'zbekiston iqlim sharoitida olib borilgan tadqiqotlar ($-40^{\circ}\text{C}..+60^{\circ}\text{C}$) diapazonida PMD 1.5–2 barobargacha o'zgaradigan holatlarni ko'rsatdi [12].

5. Dual-polyarizatsiyali WDM liniyasining chegaraviy analizi - OSNR 12 dB dan past bo'lganda BER keskin o'sishi isbotlangan. Richardson va Winzerning ishlarida $OSNR \leq 12$ dB bo'lganda WDM tarmoqlarida BER keskin o'sishi isbotlangan [13].

6. Optik liniyalarning chegaraviy holatlarda ishonchlilik tahlilini, Kikuchi (2020) coherent detection texnologiyasi asosida Q-factorning chegaraviy sharoitlarda qanday dinamikada o'zgarishini tahlil qilgan.

Shu tadqiqotlardan kelib chiqib, chegaraviy rejimlarda optik tolali liniya parametrlarining o'zgarishini har tomonlama hisoblash va modellashtirish zamonaviy aloqa tizimlari uchun dolzarb hisoblanadi.

So'nggi 10–15 yilda chegaraviy rejimlardagi optik liniyalar bo'yicha qator ilmiy ishlar olib borilgan.

Xulosa. Ushbu maqolada keltirilgan tahlillar optik tolali aloqa liniyalari tashqi muhit ta'sirlariga nisbatan juda sezgir tizim ekanini ko'rsatdi. Harorat, mexanik kuchlanish yoki optik quvvatning normadan og'ishi signal sifati, BER va OSNR kabi ko'rsatkichlarni sezilarli darajada yomonlashtirishi aniqlandi. Nochiziq optik effektlar WDM/DWDM tarmoqlarida kanallar o'zaro ta'sirini kuchaytirib, chegaraviy rejimlarni yanada xavfli qiladi. Analiz natijalaridan shu xulosa chiqadiki, optik liniyalarning barqaror ishlashi uchun tashqi omillarni nazorat qilish, fizik parametrlarni doimiy monitoring qilish va matematik modellashtirish orqali chegaraviy holatlarni oldindan baholash zarur.

Adabiyotlar ro'yxati:

1. Keiser G. Optical Fiber Communications. - McGraw-Hill, 5th ed., 2021.
2. Senior J.M., Jamro M. Optical Fiber Communications: Principles and Practice. - Pearson, 2019.

3. Agrawal G. Fiber-Optic Communication Systems. - Wiley, 2020.
4. ITU-T G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre. - ITU, Geneva, 2021.
5. Marcuse D. Theory of Dielectric Optical Waveguides. - Academic Press, 2018.
6. ITU-T G.657: Bend-resistant single-mode optical fibre. - ITU, 2020.
7. Ghatak A., Thyagarajan K. Introduction to Fiber Optics. - Cambridge Univ. Press, 2019.
8. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. - Academic Press, 2020.
9. Snyder A., Love J. Optical Waveguide Theory. - Chapman & Hall, 2018.
10. ITU-T G.650.3: Test methods for mechanical reliability of optical fibre. - 2020.
11. Richardson D. et al. "High-capacity optical transmission in extreme environments", J. Lightwave Technology, 2020.
12. Winzer P. "Scaling of optical networks", IEEE Communications Magazine, 2019.
13. Kikuchi K. "Coherent optical communications", Optics Express, 2020.

