

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-55-36>

УДК 004.77

Мадінов Микола Леонідович, аспірант

<https://orcid.org/0009-0005-5910-8774>

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ, Україна

ОПТИЧНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ

Мадінов М.Л. Оптичні лінії зв'язку. Передача сигналів паралельними шляхами є ключовим аспектом сучасних ліній зв'язку, особливо тих, що включають використання оптичних волокон. Просторовий паралелізм, фундаментальна концепція в цій області, відіграє вирішальну роль у підвищенні пропускної здатності та ефективності волоконно-оптичних мереж зв'язку. Завдяки одночасному передаванню сигналів через кілька просторових каналів просторовий паралелізм значно підвищує швидкість передачі та пропускну здатність даних. Цей підхід дозволяє одночасно використовувати різні шляхи в межах оптичного волокна, ефективно збільшуючи доступну пропускну здатність і підвищуючи загальну продуктивність мережі. Завдяки ретельному аналізу стає очевидним, що фактор паралельності, який представляє кількість просторових каналів, створених за допомогою мультиплексування, є ключовим визначальним фактором для оптимізації спектральної ефективності та сукупної швидкості передачі даних. Наголошується, що роль просторового мультиплексування полягає в тому, щоб ефективно та якомога рівномірніше поєднувати світло від пучка одномодових волокон на ядра багатоядерного волокна або моди багатоходових або когерентних ядерних волокон, і навпаки. У випадку мультиплексування для одномодового багатоядерного або когерентного волокна механізм з'єднання є простим і відображає масив одномодових вхідних променів на масив одномодових вихідних променів. Загалом, робота містить уявлення про роль просторового паралелізму в сучасних волоконно-оптичних системах зв'язку. Вона досліджує, як передача сигналів через паралельні шляхи підвищує швидкість передачі та пропускну здатність даних. У статті кількісно оцінено внесок просторового мультиплексування у швидкість передачі даних та спектральну ефективність. Вона підкреслює важливість методів просторового мультиплексування, таких як поляризація, спектральне, модальне та базове мультиплексування для оптимізації продуктивності мережі.

Ключові слова: просторовий паралелізм, волоконно-оптичний зв'язок, мультиплексування, передача даних, сміність мережі, ефективність зв'язку.

Madinov M. Optical communication lines. The transmission of signals through parallel paths is a key aspect of modern communication lines, especially those involving the use of optical fibers. Spatial parallelism, a fundamental concept in this field, plays a crucial role in increasing the capacity and efficiency of fiber optic communication networks. By simultaneously transmitting signals through multiple spatial channels, spatial parallelism significantly enhances transmission speed and data throughput. This approach allows for the simultaneous utilization of different paths within the optical fiber, effectively increasing the available bandwidth and improving the overall network performance. Through careful analysis, it becomes evident that the parallel factor, representing the number of spatial channels created through multiplexing, is a key determinant for optimizing spectral efficiency and aggregate data transmission speed. It is emphasized that the role of spatial multiplexing is to efficiently and as uniformly as possible couple light from a bundle of single-mode fibers onto the cores of a multi-core fiber or the modes of a few-mode, multi-mode, or coherent-core fiber, and vice versa. In the case of multiplexing for single-mode multi-core or coherent fiber, the connection mechanism is straightforward, reflecting an array of single-mode input beams onto an array of single-mode output beams. The work provides insights into the role of spatial parallelism in modern optical fiber communication systems. It examines how transmitting signals through parallel paths enhances transmission speed and data throughput. The article quantitatively evaluates the contribution of spatial multiplexing to data transmission speed and spectral efficiency. It highlights the importance of spatial multiplexing techniques such as polarization, spectral, modal, and core multiplexing in optimizing network performance. Overall, the abstract emphasizes the significance of spatial parallelism in improving the efficiency and capacity of optical fiber communication networks.

Key words: spatial parallelism, fiber optic communication, multiplexing, data transmission, network capacity, communication efficiency.

Вступ та постановка проблеми. У загальному розумінні цього терміну, оптичні лінії зв'язку являють собою системи, які використовують світло, що зазвичай передається через оптичні волокна, забезпечуючи передачу інформації на великі відстані з високою пропускну здатністю та низькими втратами сигналу.

Оптичні лінії зв'язку широко використовуються в різних сферах застосування, яке наприклад реалізується у вигляді хребта Інтернету, який являє собою основні маршрути передачі даних між великими стратегічно пов'язаними комп'ютерними мережами та основними маршрутизаторами Інтернету. Дана концепція також реалізується завдяки прокладанню підводних волоконно-оптичних кабелів. У сфері телекомунікацій телефонні компанії покладаються на волоконно-оптичні лінії зв'язку між центральними офісами, надаючи високошвидкісні послуги передачі голосу та даних споживачам і підприємствам. Так само в кабельному телебаченні оптичні волокна передають телевізійні сигнали високої чіткості в громадське житло. Великі центри обробки даних використовують оптичні лінії зв'язку для внутрішньої та зовнішньої передачі даних, забезпечуючи швидке та ефективно з'єднання між серверами та системами зберігання. У

мегаполісах міста оптичні лінії зв'язку використовуються для з'єднання різних локальних мереж, забезпечуючи високошвидкісний Інтернет і послуги зв'язку в межах столичного регіону. У сфері медичної візуалізації та діагностики оптичні волокна є невід'ємною частиною медичного обладнання, що дозволяє виконувати візуалізацію та діагностичні процедури з високою роздільною здатністю, прикладом якого є магнітно-резонансна томографія. Наведені приклади підкреслюють універсальність і важливість оптичних ліній зв'язку для підвищення можливостей підключення та передачі даних у різних секторах.

З одного боку, завдяки меншому загасанню та зменшенню перешкод оптичне волокно пропонує значні переваги перед мідним дротом для застосування на великих відстанях із високою пропускнуою здатністю. З іншого боку, розвиток інфраструктури в містах є відносно складним і трудомістким, а волоконно-оптичні системи є складнішими та дорожчими для встановлення та експлуатації. Через ці проблеми волоконно-оптичні системи зв'язку в основному впроваджуються для додатків на великі відстані, завдяки чому використовується їхня повна пропускна здатність, що виправдовує вищі витрати. Крім того, під час передачі сигналів у волоконно-оптичних мережах може виникнути загасання багатопроменевого поширення через вплив загасання сигналу та відстані передачі, більш того, електромагнітні хвилі сигналів легко піддаються впливу електричних і магнітних полів навколишнього середовища, що призводить до великої неоднозначності у вихідних сигналах зв'язку. Тому існує потреба в оптимізації конструкції передачі сигналів в волоконно-оптичних мережах зв'язку.

Таким чином, існує метод паралельної передачі сигналу і, зокрема, просторовий паралелізм, який полягає у передачі сигналів шляхом надсилання кількох сигналів одночасно через різні канали або частоти, що, у свою чергу може вирішити проблему швидкості передачі даних у оптично-волоконній лінії зв'язку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науково-дослідницькому просторі сьогодення з'являються роботи, присвячені винаходу та аналізу методології по розробці методів формування високої напруги шляхом каскадування підсилювачів та розширення робочої напруги окремих каскадів.

Дослідження роботи [1] було зосереджене на розробці методу точної передачі сигналів релейного захисту у волоконно-оптичних мережах зв'язку на основі змінного у часі придушення багатопроменевого завмирання та адаптивного формування променя. Система аналізує джерела сигналів перешкод бездротового сигналу болю на великій відстані, запроваджує технології захисту від перешкод, такі як двовимірна спільна обробка (Space Time Adaptive Processing – STAP), забезпечує алгоритми захисту від перешкод і пов'язаний аналіз посилення, а також проводить моделювання посилення обробки сигналу за допомогою мови програмування MATLAB. На підставі аналізу всебічних результатів моделювання при заданій довжині символу пропускна здатність сигналу збільшується, а коефіцієнт підсилення обробки нескінченно наближається до заданого теоретичного граничного значення, а не зростає нелінійно. Причина полягає в тому, що на канал впливає шум, а значення оцінки каналу та сполучене множення сигналу створюють квадратичний член шуму. У цей момент оцінене значення каналу когерентної області зменшується під впливом шуму, а втрата відношення сигнал/шум, спричинена квадратичним членом шуму, зменшується, тому посилення обробки збільшується. У процесі нескінченного збільшення смуги пропускання сигналу відношення потужності вхідного сигналу до шуму приймача прагне зменшитися до нескінченного значення, обмеженого розміром когерентної області. Значення оцінки каналу зростає під впливом шуму, а квадратичний член шуму є основним фактором, що впливає на потужність вихідного шуму. За умови більшої довжини символу у порівнянні з когерентним часом, діє наступне: чим менший максимальний доплерівський зсув частоти і чим більша область когерентного виявлення, тим більше коефіцієнт збільшення обробки даних.

Крім того, варто зазначити праці наступних науковців: Агте О., Образін Дж., Ана П. [2], Горан Н., Ходжич М., Олія А., Муйчич А. [3], Льв З., Шен Л., Лі Ю., Чжан М., Тіан Р., Руан Л., Чжан Ю., Чжао Дж. [4], Фіхтнер А., Богріс А., Боуден Д., Лентас До., Меліс Н., Нікас Т., Сімос До., Сімос І., Смолінський До. [5], Бортник Р., Кичак Ст, Василевський О., Васильківський М., Слободяник О., Романюк Р., Смолярж А., Єрлієва Б. [6], Деревяшкін Ст., Віркунін А., Горлов Н., Малашенко А., Сидоренко А. [7], Кононов С., Кононова О., Самотній І. [8], Ву Р., Ян Ф., Сунь Ю., Ченг Н., Ван Дж., Вей Ф., Гуй Ю., Хайвень К. [9], Нагшваріан Джахромі М., Кумар С., Дін М. Дж., Іва Т., Кімура К., Йосіда М., Хіроока Т., Наказова М. [10], Педяш Ст [11], Малюк І., Куліш Н. [12], Утацу Х., Оцука

Х. [13], Мехта Дж., Моралес Би., Россмейсл Дж., Дебінські Дж., Райландер К. [14], Като Т., Беппу С., Сома Д., Муранака Х., Окада С., Іріє Х., Вакаяма Ю., Ёсікане Н., Цурітані Т., Танака Ю., Хошида Т. [15] та інших.

Проте, беручи до уваги вище зазначену наукову документацію, питання, пов'язане з методологією по розробці поліпшених методів передачі даних з використанням волоконно-оптичних ліній зв'язку все ще залишається недостатньо дослідженим та потребує подальшого опрацювання.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка поліпшених методів передачі даних з використанням волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Викладення основного матеріалу дослідження. При волоконно-оптичній передачі дані передаються за допомогою керованого середовища. Кероване середовище передачі використовує кабельну систему, яка спрямовує сигнали даних по певному шляху; такі носії також можна назвати зв'язаними носіями. Інформаційно-комунікаційний транспорт такого типу постійно нарощує швидкість і рік від року збільшує свою пропускну здатність. Пропускна спроможність оптичних систем зв'язку зі спектральним поділом може досягти 32-400 тбіт/с до 2037 року, а при використанні просторового мультиплексування навіть 5-100 Пбіт/с. Це показує, що паралельна передача сигналів у фізичному просторі може значно збільшити швидкість передачі у 150-250 разів.

Модифікації спектральної ефективності передачі даних по оптичному волокну ґрунтуються на загальному підході до визначення ефективності W технічної системи, яка оцінюється за допомогою співставлення величини досягнутого результату G виконаної операції із відносною кількістю використаних ресурсів H :

$$W = G/H \quad (1)$$

У ролі властивостей у даному випадку розглядаються пропускна здатність оптичного волокна R та агрегована спектральна ефективність передачі даних γ_{agr} :

$$G = \{G_i | i = \overline{1,2}, G_1 = R, G_2 = \gamma_{agr}\} \quad (2)$$

$$H = \{R_i | i = \overline{1,2}, R_1 = V, R_2 = B\} \quad (3)$$

де V – бітрейт а B – символна швидкість у бодах.

Після цього шукається результат проведеної операції з визначеним спектральним ресурсом S :

$$H = \{H_i | i = \overline{1,2}, H_1 = S, H_2 = A\} \quad (4)$$

$$S = \{S_i | i = \overline{1,2}, S_1 = F, S_2 = \Lambda\} \quad (5)$$

де F являє собою ширину діапазону частот, який використовується з метою передачі сигналів; Λ – ширина діапазону довжини хвиль.

Таким чином, просторовий ресурс залежить від того, якої площі є поперечний розріз оптичного волокна (optical fibre – OF) у зоні оптичної оболонки з діаметром D_{OF} :

$$A = \pi D_{OF}^2 / 4 \quad (6)$$

Наступним кроком є визначення паралельної передачі сигналів, яка відбувається шляхом надсилання кількох сигналів одночасно через різні канали або частоти. Одночасна передача кількох потоків даних збільшує загальну пропускну здатність мережі, дозволяючи передавати більше даних за той самий проміжок часу. Таким чином, просторове мультиплексування являє собою особливу форму паралельної передачі сигналу, при якій кілька оптичних каналів використовуються одночасно в одному оптоволоконному кабелі або пучку оптоволокон. Паралельна передача сигналів через різні канали або частоти збільшує загальну пропускну здатність мережі та дозволяє передавати більше даних за той самий проміжок часу. Ця паралельна передача сигналу реалізується шляхом застосування методів мультиплексування, таких як поляризаційне, спектрального, модального та ядерного мультиплексування.

Роль просторового мультиплексування полягає в тому, щоб ефективно і якомога більш унітарно поєднувати світло від пучка одномодового волокна на ядра мультіядерного волокна або моди маломодового, мультимодового або когерентного волокон, і навпаки. У випадку мультиплексування для одномодового мультіядерного або когерентного волокна механізм з'єднання є простим і відображає масив одномодових вхідних променів на масив одномодових вихідних променів.

У випадку маломодових волокон, мультиплексування поєднує просторово розділені одномодові вхідні промені на моди маломодових волокон. Цей зв'язок не обов'язково має відбуватися з будь-якою конкретною модовою основою, доки достатньою мірою зберігається ортогональність просторових каналів, тобто до тих пір, поки мультиплексування реалізує унітарне перетворення між його вхідними фундаментальними модами одномодового волокна і його вихідними керованими модами маломодового волокна. Кожен коефіцієнт мультиплексування K_i впливає на паралельність передачі інформації в оптичних мережах. До таких коефіцієнтів мультиплексування належать:

- $K_1 = p$ відноситься до кількості поляризацій, що відбулися;
- $K_2 = m$ означає кількість спектральних каналів у волоконно-оптичній системі передачі інформації зі спектральним розділенням;
- $K_3 = \mu$ дорівнює числу просторових мод, які передаються;
- $K_4 = \psi$ відповідає числу ядер у оптичному волокні.

Враховуючи бітрейт у спектральному каналі перед поляризаційним мультиплексуванням V_{in} , результуюча швидкість V_{OF} у оптично-волоконному кабелі зазвичай становить:

$$V_{OF} = V_{in} \times \prod_{i=1}^4 K_i | K_i = p, m, \mu, \psi \quad (7)$$

Надалі вводиться термін коефіцієнт паралелізму, який представляє збільшення бітної швидкості передачі даних. Відповідний параметр P представляє добуток використаних коефіцієнтів мультиплексування K_i :

$$P \times \prod_{i=1}^q K_i | q \leq q_{max} = 4 \quad (8)$$

У концептуальній схемі мультиплексування, де дані об'єднуються та передаються на різних етапах застосовуються чотири види паралелізму: поляризаційний, спектральний, модальний і просторовий. Сигнал спектрального каналу до поляризаційного мультиплексування з бітрейтом V_{in} реалізується за допомогою квадратурної амплітудної модуляції (Quadrature Amplitude Modulation – QAM), яка є методом модуляції, при якому і амплітуда, і фаза несучого сигналу модулюються для передачі кількох бітів на символ. Вона поєднує амплітудну модуляцію з фазовою модуляцією в одному складному сигналі. Змінюючи амплітуду та фазу, сигнали QAM можуть передавати кілька бітів в одному символі, що призводить до ефективного використання частотного спектру. Після першого етапу мультиплексування утворюються звичайні для високошвидкісних систем передачі даних формати модуляції з двома поляризаціями.

Наступні етапи мультиплексування утворюють просторовий паралелізм передачі даних в оптичному волокні за рахунок застосування просторового мультиплексування (SDM – space division multiplexing).

Коефіцієнти просторового паралелізму – модовий (mod), ядерний (cor) та комплексний (comp) відповідно:

$$P_M = \mu; P_{cor} = \psi; P_{spat} = P_{mod} \times P_{cor} = \mu \times \psi = M \times \quad (9)$$

де M відповідає кількості просторових каналів.

Наступним чином вводиться інтегральний коефіцієнт паралелізму, який визначається так:

$$P_{int} = p \times m \times \mu \times \psi \quad (10)$$

Приведені величини коефіцієнтів паралелізму слід розглядати в якості максимальних показників швидкості передачі даних задля оцінки пропускну здатності оптичного волокна.

Таким чином просторовий паралелізм впливає на величини бітрейту V та агрегованої спектральної ефективності γ_{agr} . Агрегована спектральна ефективність збільшується коефіцієнтом просторового паралелізму, а спектральна ефективність визначається відношенням каналної швидкості V_c до ширини каналного інтервалу F_{ci} :

$$\gamma_{agr} = \gamma \times P_{spat} \quad (11)$$

$$\gamma = V_c / F_{ci} \quad (12)$$

По такому ж принципу спектрально-хвильова γ_λ ефективність визначається відношенням каналної швидкості V_c до хвильового каналного інтервалу Λ_{ci} , а агрегована спектрально-хвильова ефективність $\gamma_{\lambda agr}$ збільшується коефіцієнтом просторового паралелізму P_{spat} .

Таким чином агрегована швидкість передачі даних по оптичному волокну визначається за допомогою формули:

$$V_{OF} = \begin{cases} F_{ci} \times \gamma \times m \times \mu \times \psi \\ \Lambda_{ci} \times \gamma_\lambda \times m \times \mu \times \psi \end{cases} \quad (13)$$

При застосуванні умови, що канална швидкість дорівнює:

$$V_c \times m \times \mu \times \psi = F_{ci} \times \gamma \times m \times \mu \times \psi = \Lambda_{ci} \times \gamma_\lambda \times m \quad (12)$$

діє наступне:

$$V_{OF} \times \mu \times \psi = V_c \times m \times P_{spat} \quad (12)$$

При гіпотетично наданих даних, що канална швидкість $V_c = 100$ Гбіт/с, ширина каналного інтервалу $F_{ci} = 50$ Гц, хвильовий каналний інтервал $\Lambda_{ci} = 0,4$ нм, $m, \mu, \psi = 2$ діють наступні обчислення:

$$\gamma = \frac{V_c}{F_{ci}} = \frac{100}{50} = 2 \text{ біт/Гц} \quad (13)$$

$$\gamma_{agr} = \gamma \times P_{spat} = 2 \times 4 = 8 \text{ біт/Гц} \quad (14)$$

$$V_{OF} = F_{ci} \times \gamma_{agr} \times m \times \mu \times \psi = 50 \times 8 \times 2 \times 2 \times 2 = 3200 \text{ Гбіт/с} \quad (15)$$

Отже, за допомогою просторового мультиплексування сукупна швидкість передачі даних через оптичне волокно стає 3200 Гбіт/с, що значно перевищує швидкість одноканальної передачі 100 Гбіт/с.

Висновки. У даному дослідженні був запропонований метод паралельної передачі даних, який ґрунтується на методі мультиплексуванні із використанням просторового паралелізму. Загалом, модернізація традиційної одномодової оптоволоконної системи за допомогою підсилювачів з мультиплексуванням просторового розподілу може дати значні переваги, якщо багатоядерні підсилювачі досягнуть підвищення ефективності

Розглядається кількісна оцінка внеску просторового мультиплексування у швидкість передачі даних і спектральну ефективність. У роботі підкреслюється концепція просторового мультиплексування як форми паралельної передачі сигналу, при якій кілька оптичних каналів одночасно використовуються в одному оптичному волокну або пучку волокон. Загалом, було продемонстровано, як методи просторового мультиплексування сприяють ефективному використанню ресурсів оптичного волокна, що призводить до значного покращення швидкості передачі та спектральної ефективності, прокладаючи таким чином шлях для розвитку високошвидкісних мереж передачі даних.

Список бібліографічного опису

1. Wu J., Jin C., Wang Z. Linear Anti-interference Algorithm for Digital Signal Transmission in Fiber Optic Communication Networks based on Link Analysis. *Scalable Computing: Practice and Experience*. 2024. №25. P. 920-927. DOI:10.12694/scpe.v25i2.2607.
2. Atte O., Obidinnu J., Ana P. Fiber Optic Transmission: Architectures, Technologies and Innovations, Applications, Types, Testing and Troubleshooting. 2021. №8. P. 88-93.
3. Goran N., Hodzic M., Maslo A., Mujcic A. Modeling and Simulation of Fiber Optic Transmission Links. *Science, Engineering and Technology*. 2022. №2. P. 16-23. DOI:10.54327/set2022/v2.i1.22.
4. Lv Z., Sheng L., Li Y., Zhang M., Tian G., Ruan L., Zhang Y., Zhao J. An analog fiber optic link developed for electrical pulse signal transmission. *Review of Scientific Instruments*. 2023. №94. DOI:10.1063/5.0132828.
5. Fichtner A., Bogris A., Bowden D., Lentas K., Melis N., Nikas T., Simos C., Simos I., Smolinski K. Sensitivity kernels for transmission fiber optics. *Geophysical Journal International*. 2022. №231. DOI:10.1093/gji/ggac238.
6. Bortnyk G., Kychak V., Vasilevskyi O., Vasylykivskyi M., Slobodyanik A., Romaniuk R., Smolarz A., Yeraliyeva B. Digital restoration of signals in fiber optic transmission systems. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. (2022).
7. Derevyashkin V., Virkunin A., Gorlov N., Malashenko A., Sidorenko A. Marine-based Fiber-optic Systems for Data Collection and Transmission. *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*. 2023. №18. P. 48-58. DOI:10.55648/1998-6920-2024-18-1-48-58.
8. Kononov V., Kononova O., Odinkii I. Designing The Principal Transmission Scheme Fiber Optic Device Fiber Optical Gyroscope. 2019. №6. P.28-32. DOI:10.26906/SUNZ.2019.6.028.
9. Wu R., Yang F., Sun Y., Cheng N., Wang J., Wei F., Gui Y., Haiwen C. Absolute phase marking technology and fiber-optic remote coherent phase transmission. *Optics Express*. 2021. №29. DOI:10.1364/OE.419695.
10. Naghshvarian Jahromi M., Kumar S., Deen M.J., Iwaya T., Kimura K., Yoshida M., Hirooka T., Nakazawa M. Software-Defined Fiber Optic Communications for Ultrahigh-Speed Optical Pulse Transmission Systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2022. №28. P. 1-11. DOI:10.1109/JSTQE.2022.3190885.
11. Pedyash V. Mathematical Modeling of Fiber-Optic Transmission System With Intensity Modulation. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2023. №317. P. 162-166. DOI:10.31891/2307-5732-2023-317-1-162-166.
12. Malysh I., Kulish N. Fiber Optic Information Transmission Systems. *The National Transport University Bulletin*. 2021. №1. P. 203-207. DOI:10.33744/2308-6645-2021-1-48-203-207.
13. Utatsu H., Otsuka H. Performance Analysis of Fiber-Optic Relaying With Simultaneous Transmission and Reception on the Same Carrier Frequency. *IEICE Transactions on Communications*. 2019. DOI:10.1587/transcom.2018EBP3298.
14. Mehta J., Morales B., Rossmeisl Jr J., Debinski W., Rylander C. Solid Fiber Inside of Capillary and Modified Fusion-Spliced Fiber Optic Microneedle Devices for Improved Light Transmission Efficiency. 2022. №16. DOI:10.1115/1.4055607].
15. Kato T., Beppu S., Soma D., Muranaka H., Okada S., Irie H., Wakayama Y., Yoshikane N., Tsuritani T., Tanaka Y., Hoshida T. U-band WDM Transmission over 90-km Deployed Fiber-optic Cable Leveraged by S+C+L-band WDM Channels. 2024. DOI:10.1364/OFC.2024.W4D.3.
16. Klaus W., Winzer P., Nakajima K. The Role of Parallelism in the Evolution of Optical Fiber Communication Systems. *Proceedings of the IEEE*. 2022. №110. P. 1619-1654. DOI:10.1109/JPROC.2022.3207920.

References

17. Wu J., Jin C., Wang Z. Linear Anti-interference Algorithm for Digital Signal Transmission in Fiber Optic Communication Networks based on Link Analysis. *Scalable Computing: Practice and Experience*. 2024. №25. P. 920-927. DOI:10.12694/scpe.v25i2.2607.
18. Atte O., Obidinnu J., Ana P. Fiber Optic Transmission: Architectures, Technologies and Innovations, Applications, Types, Testing and Troubleshooting. 2021. №8. P. 88-93.
19. Goran N., Hodzic M., Maslo A., Mujcic A. Modeling and Simulation of Fiber Optic Transmission Links. *Science, Engineering and Technology*. 2022. №2. P. 16-23. DOI:10.54327/set2022/v2.i1.22.
20. Lv Z., Sheng L., Li Y., Zhang M., Tian G., Ruan L., Zhang Y., Zhao J. An analog fiber optic link developed for electrical pulse signal transmission. *Review of Scientific Instruments*. 2023. №94. DOI:10.1063/5.0132828.
21. Fichtner A., Bogris A., Bowden D., Lentas K., Melis N., Nikas T., Simos C., Simos I., Smolinski K. Sensitivity kernels for transmission fiber optics. *Geophysical Journal International*. 2022. №231. DOI:10.1093/gji/ggac238.
22. Bortnyk G., Kychak V., Vasilevskyi O., Vasylykivskyi M., Slobodyanik A., Romaniuk R., Smolarz A., Yeraliyeva B. Digital restoration of signals in fiber optic transmission systems. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. (2022).
23. Derevyashkin V., Virkunin A., Gorlov N., Malashenko A., Sidorenko A. Marine-based Fiber-optic Systems for Data Collection and Transmission. *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*. 2023. №18. P. 48-58. DOI:10.55648/1998-6920-2024-18-1-48-58.
24. Kononov V., Kononova O., Odinkii I. Designing The Principal Transmission Scheme Fiber Optic Device Fiber Optical Gyroscope. 2019. №6. P.28-32. DOI:10.26906/SUNZ.2019.6.028.
25. Wu R., Yang F., Sun Y., Cheng N., Wang J., Wei F., Gui Y., Haiwen C. Absolute phase marking technology and fiber-optic remote coherent phase transmission. *Optics Express*. 2021. №29. DOI:10.1364/OE.419695.

26. NaghshvarianJahromi M., Kumar S., Deen M.J., Iwaya T., Kimura K, Yoshida M., Hirooka T., Nakazawa M. Software-Defined Fiber Optic Communications for Ultrahigh-Speed Optical Pulse Transmission Systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2022. №28. P. 1-11. DOI:10.1109/JSTQE.2022.3190885.
27. Pedyash V. Mathematical MOdeling of Fiber-Optic Transmission System With Intensity Modulation. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2023. №317. P. 162-166. DOI:10.31891/2307-5732-2023-317-1-162-166.
28. Malysh I., Kulish N. Fiber Optic Information Transmission Systems. *The National Transport University Bulletin*. 2021. №1. P. 203-207. DOI:10.33744/2308-6645-2021-1-48-203-207.
29. Utatsu H., Otsuka H. Performance Analysis of Fiber-Optic Relaying With Simultaneous Transmission and Reception on the Same Carrier Frequency. *IEICE Transactions on Communications*. 2019. DOI:10.1587/transcom.2018EBP3298.
30. Mehta J., Morales B., Rossmesl Jr J., Debinski W., Rylander C. Solid Fiber Inside of Capillary and Modified Fusion-Spliced Fiber Optic Microneedle Devices for Improved Light Transmission Efficiency. 2022. №16. DOI:10.1115/1.4055607].
31. Kato T., Beppu S., Soma D., Muranaka H., Okada S., Irie H., Wakayama Y., Yoshikane N., Tsuritani T., Tanaka Y., Hoshida T. U-band WDM Transmission over 90-km Deployed Fiber-optic Cable Leveraged by S+C+L-band WDM Channels. 2024. DOI:10.1364/OFC.2024.W4D.3.
32. Klaus W., Winzer P., Nakajima K. The Role of Parallelism in the Evolution of Optical Fiber Communication Systems. *Proceedings of the IEEE*. 2022. №110. P. 1619-1654. DOI:10.1109/JPROC.2022.3207920.