

Волошин В. О.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Мадінов М. Л.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Бойко О. В.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Мацкевич В. Л.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Паламарчук В. О.

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АЛГОРИТМИ КОРЕКЦІЇ ПОМИЛОК У СУПУТНИКОВО-ОПТИЧНИХ МЕРЕЖАХ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПЕРЕДАЧ ДАНИХ

Стаття присвячена дослідженню інтелектуальних алгоритмів корекції помилок у супутниково-оптичних мережах, орієнтованих на забезпечення високошвидкісної передачі всіх видів даних. Проаналізовано основні фактори, які впливають на поширення оптичного сигналу, зокрема загасання, шумові перешкоди, хроматичну дисперсію, нелінійні ефекти, поляризаційні спотворення та спектральну фільтрацію, а також враховано гетерогенність сучасних оптичних мереж, де різні сегменти ліній характеризуються унікальними параметрами, що ускладнює оптимізацію їхньої роботи. Виявлено, що якість сигналу в процесі лінійного поширення поступово погіршується через накопичення підсиленого спонтанного випромінювання (ASE), яке генерується ербієвими підсилювачами (EDFA). Обґрунтовано, що при відсутності нелінійних спотворень коли базове значення відповідає конфігурації «back-to-back», тоді як у реальних умовах значення OSNR у лінії значно перевищує це значення через «штраф OSNR», зумовлений нелінійною деградацією сигналу, що ускладнює його відновлення. Запропоновано моделювання нелінійних спотворень як адитивного нелінійного шуму, що додається до лінійного шуму, що дозволило сформулювати аналітичні вирази для загальної потужності шуму та зворотного OSNR, які є основою для оптимізації параметрів багатопролітних DWDM-ліній. Розроблено методологію побудови калібрувальних кривих, які забезпечують однозначний зв'язок між OSNR і рівнем бітових помилок (BER), а також принцип локальної оптимізації, який веде до глобального покращення характеристик системи, зокрема через визначення оптимальної потужності для кожного прольоту. Оцінено ефективність IGN-моделі адитивного нелінійного шуму, яка довела свою доцільність для проектування високошвидкісних ліній зв'язку, хоча її точність залежить від попереднього вимірювання коефіцієнтів нелінійності. Експериментально досліджено характеристики ліній за допомогою спеціальної установки, що включає BER-тестер, транспондери, мультиплексори, демультимплексори та ербієві підсилювачі, що дозволило встановити відхилення розрахункових значень OSNR від експериментальних, підтвердивши високу точність е-моделі.

Ключові слова: інтелектуальні алгоритми, корекція помилок, супутниково-оптичні мережі, високошвидкісна передача даних, нелінійні спотворення, оптичне відношення сигнал/шум (OSNR).

Постановка проблеми. Сучасний розвиток інформаційного суспільства, масова цифровізація всіх сфер життєдіяльності, а також впровадження інноваційних технологій зв'язку, сприяють стрімкому зростанню обсягу переданої інформації та підвищенню вимог до швидкості її обробки й доставки у високошвидкісних оптичних мере-

жах. Відповідно до сучасних тенденцій розвитку телекомунікаційної інфраструктури, збільшення пропускної здатності оптичних каналів є одним із ключових завдань, що вирішується шляхом поступового переходу від традиційних систем далекого зв'язку з каналною швидкістю 10 Гбіт/с, які використовують амплітудну модуляцію, до коге-

рентних систем зв'язку, здатних працювати на швидкостях 100 Гбіт/с і вище.

Однією з головних проблем, які виникають під час збільшення пропускної здатності оптичних мереж, є суттєве погіршення якості сигналу через накопичення шумів оптичних підсилювачів, а також виникнення лінійних і нелінійних спотворень під час передавання інформації. Такого формату явища значно ускладнюють забезпечення стабільності зв'язку та вимагають впровадження передових методів обробки даних для корекції помилок. У зв'язку з цим методи корекції помилок (Forward Error Correction, *FEC*) та цифрова обробка сигналів відіграють вирішальну роль у сучасних високошвидкісних системах зв'язку, оскільки вони дозволяють підвищити якість передавання інформації, знизити вартість обладнання та оптимізувати експлуатаційні витрати [6, 13]. Розвиток інтелектуальних алгоритмів корекції помилок у супутниково-оптичних мережах дозволяє вирішити низку зазначених проблем, використовуючи методи машинного навчання та адаптивні алгоритми обробки сигналів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження зосереджені на вдосконаленні методів передачі даних, спрямованих на зменшення впливу фізичних спотворень та підвищення ефективності виправлення помилок. У наукових роботах [7, 11] детально аналізуються такі ключові проблеми, як загасання сигналу, хроматична дисперсія та поляризаційні ефекти, які суттєво впливають на якість передачі інформації в оптичних лініях зв'язку.

Результати аналізу останніх досліджень [1, 8] демонструють, що традиційні методи фізичної компенсації дисперсії поступово втрачають свою актуальність, поступаючись місцем когерентним системам зв'язку без компенсації дисперсії (NDC-лінії). У таких системах основним інструментом для боротьби зі спотвореннями є цифрова обробка сигналів.

Перспективним напрямом у вдосконаленні супутниково-оптичних мереж є розвиток інтелектуальних методів обробки сигналів, зокрема використання алгоритмів машинного навчання для корекції помилок, що активно обговорюється у працях [5, 14]. Дослідження підтверджують, що адаптивні алгоритми, здатні аналізувати та прогнозувати спотворення в режимі реального часу, значно підвищують ефективність роботи оптичних мереж і забезпечують зниження рівня помилок. Отже, провідні наукові опубліковані результати підкреслюють доцільність і необхідність

продовження розробок в сфері компенсації нелінійних ефектів та впровадження інтелектуальних алгоритмів виправлення помилок в функціонуванні супутниково-оптичних мереж.

Постановка завдання. Метою статті є розробка та обґрунтування широкого використання алгоритмів інтелектуальної корекції можливих помилок в роботі супутниково-оптичних мереж, для забезпечення надійності високошвидкісної передачі даних.

Виклад основного матеріалу. Проектування ефективних та економічно доцільних оптичних мереж із високими швидкостями передавання даних є складним багатофакторним завданням, оскільки фізичні процеси, що впливають на розповсюдження інформаційного сигналу, залежать від багатьох параметрів. Серед основних проблем можна виділити загасання сигналу, вплив шумів, хроматичну дисперсію, нелінійні ефекти, поляризаційні спотворення та спектральну фільтрацію. Крім того, сучасні оптичні мережі стають усе більш гетерогенними: різні сегменти ліній можуть містити оптичні канали з різними характеристиками, що ускладнює вибір оптимальних параметрів системи [2].

У процесі лінійного поширення оптичного сигналу його якість поступово погіршується через накопичення шумів, зокрема підсиленого спонтанного випромінювання (*ASE*), що генерується ербієвими оптичними підсилювачами (*EDFA*). Дальність передачі даних у супутниково-оптичних мережах є обмеженою, оскільки збільшення потужності шуму *ASE* спричиняє зниження оптичного відношення сигнал/шум у лінії (*ON+*), і при досягненні граничної дальності цей показник наближається до критично допустимого рівня (*ON-*). За відсутності нелінійних спотворень (*ON-*) відповідає значенню $ON + B$, яке визначається для випадку прямого з'єднання передавача з приймачем у конфігурації back-to-back [12]. Лінійні спотворення, такі як хроматична дисперсія та поляризаційна модова дисперсія, мають мінімальний вплив на ефективність роботи когерентних систем зв'язку, оскільки такі перешкоди компенсуються на рівні цифрової обробки сигналу у когерентному приймачі (рис. 1).

Однак у реальних умовах значення (*ON-*) в оптичній лінії часто виявляється значно вищим, ніж $ON + B$, що призводить до виникнення так званого «штрафу по *OSNR*» – різниці між цими двома параметрами, вираженої в децибелах. Основною причиною цього явища є деградація оптичного сигналу під впливом нелінійних ефек-

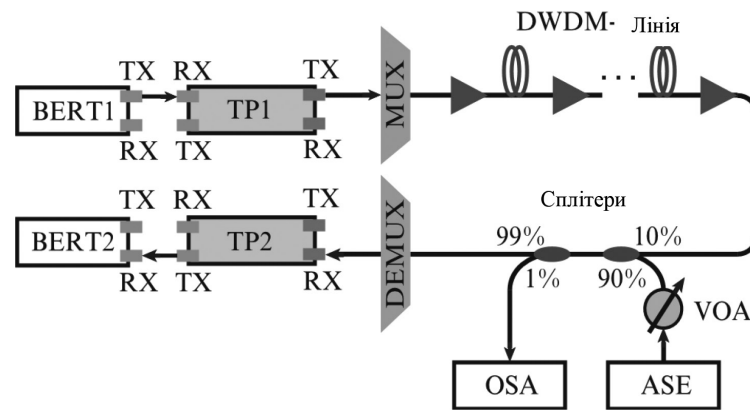


Рис. 1. Схема діючої установки для дослідження інтелектуальних алгоритмів корекції помилок у супутниково-оптичних мережах із використанням DWDM-лінії (удосконалено автором)

тів, які істотно спотворюють передану інформацію та ускладнюють її відновлення на приймальному боці.

Природа нелінійних ефектів у супутниково-оптичних лініях зв'язку залежить від того, чи використовується фізична компенсація дисперсії. У традиційних системах, що включають компенсатори дисперсії (DC-лінії), нелінійні ефекти виявляються головним чином у вигляді викривлень переданих оптичних сигналів, що ускладнює корекцію помилок та ефективно відновлення інформації. У той же час у сучасних когерентних мережах, які не використовують компенсацію дисперсії на фізичному рівні (NDC-лінії), механізм нелінійної деградації сигналу відрізняється – і відбувається накопичення нелінійного інтерференційного шуму, який поступово ускладнює корекцію помилок і призводить до значного зниження ефективності системи [3, 9].

Нелінійні спотворення можна змодельовати як нелінійний шум, який додається до лінійного шуму в адитивний спосіб, то загальна потужність шуму в оптичній лінії зв'язку буде виражена через суму потужностей цих двох компонентів, що позначається як:

$$PS = PASE + PNL. \quad (1)$$

Розглядаючи це співвідношення детальніше, якщо обидві частини поділити на потужність сигналу P у певній точці лінії, отримуємо вираз:

$$\frac{1}{ON + B} = \frac{1}{(ON -)} + \frac{1}{ON + R}, \quad (2)$$

де величина $ON + B$, яка визначається як відношення P до PS , відображає рівень бітових помилок (BER), який вимірюється транспондером до того, як він розпочне процес корекції помилок, причому взаємозв'язок між $ON + R$ і BER у даній моделі є однозначним і описується за допомогою калібрувальної кривої транспондера, що являє собою експериментально отриману залежність логарифма BER від $ON + R$ у лінійному режимі роботи лінії, коли внесок нелінійного шуму PNL дорівнює нулю, а отже, $ON + R$ збігається з $ON +$ (рис. 2).

Наведена калібрувальна крива відіграє ключову роль у визначенні $ON + R$ у нелінійному режимі на основі виміряного рівня BER , причому методика її побудови детально викладена у відповідному розділі дослідження. Для аналізу багатопролітної DWDM-лінії, яка застосовується в супутниково-оптичних мережах, зручно ввести певні позначення, розбиваючи умовно лінію на N секцій, кожна з яких включає відрізок оптичного волокна та ербієвий підсилювач, а також характеризується такими параметрами, як потужність сигналу на вході в волокно (P_n), оптичні втрати у волокні (A_n), коефіцієнт нелінійності (η_n), коефіцієнт підсилення (G_n) і шумовий фактор підсилювача (F_n) для n -ї секції [4]. Оскільки ASE-шум

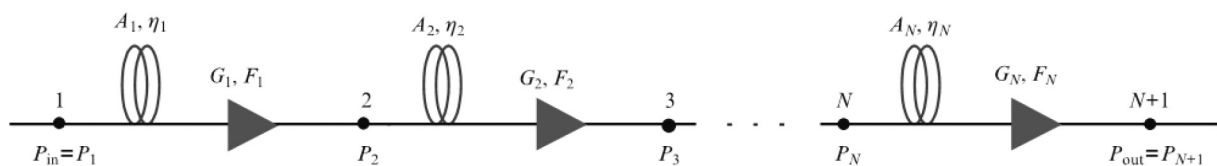


Рис. 2. Схема багатопролітної оптичної лінії з параметрами компонентів і сигналу для дослідження інтелектуальних алгоритмів корекції помилок для супутниково-оптичних мереж із підсилювачами EDFA (удосконалено автором)

від різних ербієвих підсилювачів складається адитивно, вираз для сумарного зворотного $OSNR$, обумовленого цим шумом, набуває вигляду першого доданку у відповідному співвідношенні, що враховує внесок кожного підсилювача в загальну картину шумових характеристик лінії.

$$P_n = \left(\frac{h\nu \times B \times A_n \times F_n}{2\eta n} \right). \quad (3)$$

Припускаючи, що нелінійний шум від різних прольотів також додається адитивно, з урахуванням попередніх співвідношень можна отримати прості аналітичні вирази для зворотного нелінійного $OSNR$ у багатопротітній лінії, які є надзвичайно зручними для обчислень і оптимізації параметрів зв'язку в таких системах, як супутниково-оптичні мережі. Таким чином, $ON + R$ у цій моделі визначається через відповідну формулу, яка стає основою для проектування та оптимізації ліній зв'язку, де задача зводиться до пошуку мінімуму функції зворотного $ON + R$ при варіюванні значень потужностей P_n за фіксованих значень A_n , ηn , G_n і F_n , причому з цього впливає принцип локальної оптимізації, який веде до глобального покращення характеристик системи, дозволяючи аналітично вивести оптимальну потужність для кожного прольоту, при якій досягається найменше значення зворотного $ON + R$.

Вся модель, відома як *IGN*-модель адитивного (некогерентного) нелінійного шуму, виявляється надзвичайно корисною для розробки високошвидкісних ліній зв'язку в супутниково-оптичних мережах, і її доцільно застосовувати завжди, коли вона забезпечує необхідну точність прогнозу-

вання, хоча для практичного використання необхідно попередньо виміряти або розрахувати коефіцієнти нелінійності ηn для кожного прольоту, враховуючи, що кореляція між нелінійними спотвореннями, які виникають у різних прольотах, може знижувати точність цієї адитивної моделі [4].

Експериментальна частина роботи зосереджена на проведенні серії вимірювань, які спрямовані на визначення нелінійних коефіцієнтів h оптичних прольотів та інших констант, що входять до аналітичних формул для обчислення ключових параметрів ліній зв'язку, причому схема експериментальної установки, зображена на відповідному рисунку, включає такі компоненти, як *BER*-тестер (*BERT*), когерентний транспондер (*TP*), мультиплексор і демультимплексор (*MUX* і *DEMUX*), вхідний та вихідний ербієві підсилювачі (*EDFA_{in}* і *EDFA_{out}*), що функціонують у режимі постійної вихідної потужності, а також багатосекційний макет *DWDM*-лінії, який складається з котушок одномодового оптичного волокна з певними втратами (A_n) і ербієвих підсилювачів (*EDFA_n*), налаштованих на режим постійного коефіцієнта підсилення, разом із джерелом підсиленого спонтанного випромінювання (*ASE*), оптичним спектральним аналізатором (*OSA*), перебудовуваними оптичними атенюаторами (*VOA_{in}* і *VOA_{ASE}*) та спліттерами з різними коефіцієнтами розподілу сигналу (рис. 3).

Для побудови калібрувальних кривих, які є важливим інструментом у процесі аналізу, частина лінії зв'язку, позначена на схемі в квадратних дужках, замінювалася коротким відрізком волокна, відомим як патчкорд довжиною до

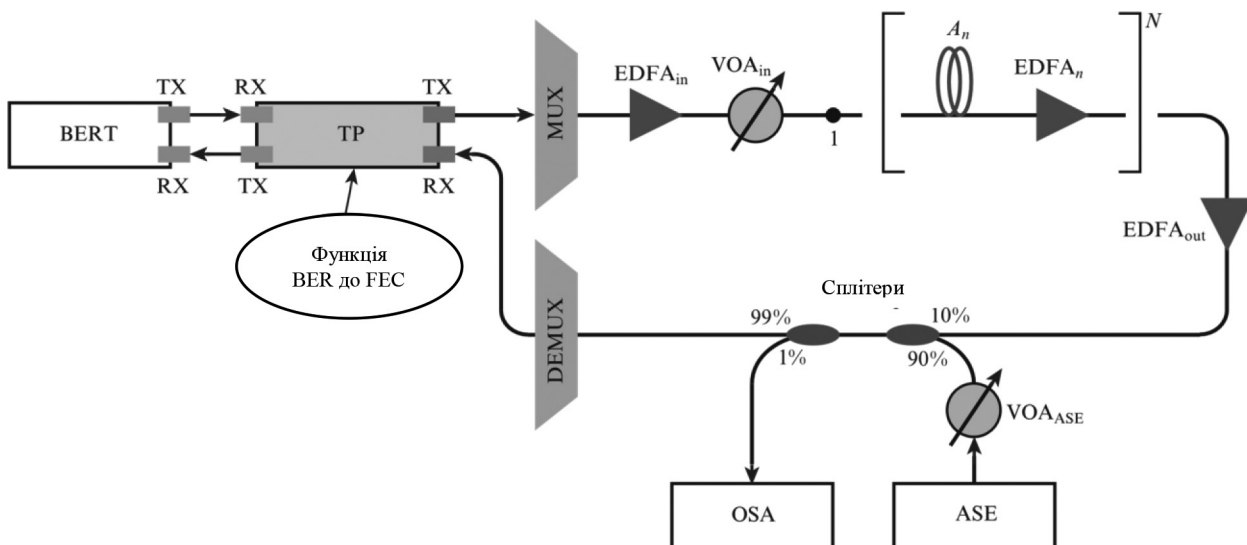


Рис. 3. Схема експериментальної установки для визначення калібрувальних кривих транспондерів та нелінійних параметрів ліній зв'язку при введенні інтелектуальних алгоритмів корекції помилок у роботі супутниково-оптичних мереж (розроблено автором)

3 метрів, при цьому за допомогою атенюатора *VOAASE* змінювалася потужність додаткового *ASE*-шуму, що дозволяло транспондери вимірювати рівень бітових помилок (*BER*), тоді як спектральний аналізатор визначав величину *ON+*, яка в конфігурації back-to-back збігається з *ON + R*.

У процесі визначення коефіцієнта нелінійності для багатопротіної лінії джерело *ASE*-шуму вимикалося, а залежність *BER* від вхідної потужності *Pin* у певній точці вимірювалася шляхом зміни цієї потужності за допомогою цифрового атенюатора *VOAin*, який відображав величину внесених втрат, причому попередньо проводилося вимірювання потужності в цій точці за допомогою *OSA*, тоді як підсилювачі *EDFAin* працювали в режимі постійного коефіцієнта підсилення, налаштованого для компенсації втрат у прольотах довжиною 100 км, що забезпечувало однакову вхідну потужність *Pin* для всіх сегментів, а підсилювач *EDFAout*, навпаки, підтримував постійну вихідну потужність для оптимального сигналу на виході в транспондер [2, 10].

На кожному етапі вимірювань також фіксувалася величина *OSNR* у лінії за допомогою *OSA*, що дозволяло побудувати залежність зворотного нелінійного *OSNR* ($OSNR-NL^{-1}$) від квадрата вхідної потужності Pin^2 , де коефіцієнт нелінійності h визначався як тангенс кута нахилу цієї залежності, приклад якої для однопрольотної лінії наведено на рис. 3. Для перевірки математичного апарату проводилися експериментальні вимірювання характеристик різних конфігурацій ліній, які потім порівнювалися з результатами, отриманими розрахунковим шляхом, і було встановлено, що

відхилення розрахункових значень необхід *OSNR* від експериментальних перебувають у заданому діапазоні, зокрема позитивне відхилення коливається від 0,12 до 0,76 дБ, а для ліній із прольотами довжиною 100 км параметр e варіюється в межах 0,2–0,3, що свідчить про високу точність e -моделі в прогнозуванні характеристик ліній зв'язку в супутниково-оптичних мережах.

Висновки. У ході дослідження було проаналізовано ефективність традиційних методів виправлення помилок у системах з різними архітектурними підходами, зокрема в когерентних мережах без компенсації дисперсії (*NDC*-лініях) та системах із фізичними компенсаторами дисперсії (*DC*-лініях). Досліджено залежність рівня бітових помилок (*BER*) від оптичного співвідношення сигнал/шум (*OSNR*) у різних мережевих конфігураціях та обґрунтовано доцільність використання інтелектуальних алгоритмів виправлення помилок для підвищення надійності та стабільності передачі інформації.

На основі практичних та експериментальних даних удосконалено модель нелінійного шуму, яка дає змогу прогнозувати ефективність роботи супутниково-оптичних ліній зв'язку при зміні потужності сигналу та інших параметрів системи. Запропоновано новий підхід до адаптивного виправлення помилок із застосуванням інтелектуальних алгоритмів, що базуються на методах машинного навчання та цифрової обробки сигналів, що формує перспективу компенсації впливу нелінійних спотворень і суттєво знизити рівень помилок під час високошвидкісної передачі даних.

Список літератури:

1. Божеску В., Стринадко М. Оптичні рішення для передачі даних у системах зв'язку 6G. *Молодий вчений*. 2024. № 7(131). С. 8–14. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2024-7-131-7>
2. Ільченко М. Ю., Наритник Т. М., Присяжний В. І., Капштик С. В., Матвієнко С. А. Низькоорбітальна супутникова система інтернету речей на базі розподіленого супутника. *Космічна наука і технологія*. 2020. 26, № 4(125). С. 57–85. <https://doi.org/10.15407/knit2020.04.057>
3. Македон В. В., Байлова О. О. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*. 2023. Випуск 47. С. 16–26. DOI: [10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3](https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3)
4. Руденко В. І., Зінченко М. О., Яковчук О. В., Лазута Р. Р. Модель системи супутникового зв'язку та передачі даних спеціального призначення. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2024. № 1(49). С. 45–58. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2024-49-1-45-58>
5. Atayev N., Hasanov M. High-speed data transmission in LEO satellite networks with free space optics-based transponder and 3D switch model. In: *Proceedings of the 2023 IEEE 17th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. 2023 Oct 18–20; Baku, Azerbaijan. IEEE; 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/AICT59525.2023.10313187>
6. Avanesova N., Tahajuddin S., Hetman O., Serhiiienko Y., Makedon V. Strategic management in the system model of the corporate enterprise organizational development. *Economics and Finance*. 2021. № 1/2021. Vol. 9. pp. 18–30. DOI: [10.51586/2311-3413.2021.9.1.18.30](https://doi.org/10.51586/2311-3413.2021.9.1.18.30)

7. Chaudhary S., Meng Y., Sharma A., Naeem M.A. MIMO and PDM-based intersatellite optical link for high-speed data transfer and remote sensing application. *PLoS ONE*. 2024. Nov 12. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313342>
8. Ding R., Fang T., Wang W., et al. Star-ground fusion communication system: network architecture, enabling technologies, and prototype verification. *Space Integr Ground Inf Networks*. 2023. No 4(03). p. 79–87.
9. Liu Z., Jiang Q., Zhao K., Liu X., Ma W., et al. Analysis of reliable transmission performance optimization methods for satellite-to-ground laser communication links. *IgMin Research*. 2024. 2(7). pp. 662–666. IgMin ID: igmin230. DOI: <https://doi.org/10.61927/igmin230>. Available at: <https://igmin.link/p230>
10. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. no 2(13(128)). p. 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>
11. Mohandas R., Paka N., Venkata Ramana D., Kumar V., Swathi A., Turukmane A.V. Enhanced high-speed data transmission with optical switching in fiber optic communication system with security systems. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Optimization Techniques in the Field of Engineering (ICOFE-2024)*. 2024. Nov 15. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5077550>
12. Rappaport T.S., Xing Y., Kanhere O., Ju S., Madanayake A., Mandal S., Alkhateeb A., Trichopoulos G. C. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. pp. 78729–78757. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921522>
13. Saiyyed R., Sindhwani M., Sachdeva S., Pahuja H. Enabling high-speed and large-capacity data transmission in optical inter-satellite communication links under various conditions. *Journal of Optics*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12596-024-02227-9>
14. Sarker S.P.K., Hossain M.A. Analysis of inter-satellite optical wireless communication systems for enhanced data transmission in satellite constellations. *Optics Continuum*. 2024. No 3(7). P. 1224–1243. DOI: <https://doi.org/10.1364/OPTCON.529721>

Voloshyn V.O., Madinov M.L., Boyko O.V., Matskevych V.L., Palamarchuk V.O. INTELLIGENT ERROR CORRECTION ALGORITHMS IN SATELLITE-OPTICAL NETWORKS FOR HIGH-SPEED DATA TRANSMISSIONS

The article is devoted to the study of intelligent error correction algorithms in satellite-optical networks aimed at providing high-speed data transmissions. The main factors affecting the propagation of an optical signal are analyzed, in particular, attenuation, noise interference, chromatic dispersion, nonlinear effects, polarization distortions and spectral filtering, and the heterogeneity of modern optical networks is also taken into account, where different segments of lines are characterized by unique parameters, which complicates the optimization of their operation. It is found that the signal quality in the process of linear propagation gradually deteriorates due to the accumulation of amplified spontaneous emission (ASE), which is generated by erbium-doped amplifiers (EDFA). It is substantiated that in the absence of nonlinear distortions when the base value corresponds to the back-to-back configuration, while in real conditions the OSNR value in the line significantly exceeds this value due to the «OSNR penalty» caused by nonlinear signal degradation, which complicates its recovery. Modeling of nonlinear distortions as additive nonlinear noise added to linear noise is proposed, which allowed formulating analytical expressions for the total noise power and inverse OSNR, which are the basis for optimizing the parameters of multi-span DWDM lines. A methodology for constructing calibration curves that provide a unique relationship between OSNR and bit error rate (BER), as well as the principle of local optimization, which leads to a global improvement in system characteristics, in particular by determining the optimal power for each span, is developed. The effectiveness of the IGN model of additive nonlinear noise, which has proven its feasibility for the design of high-speed communication lines, has been evaluated, although its accuracy depends on the preliminary measurement of nonlinearity coefficients. The characteristics of the lines have been experimentally investigated using a special setup that includes a BER tester, transponders, multiplexers, demultiplexers and erbium amplifiers, which allowed establishing the deviation of the calculated OSNR values from the experimental ones, confirming the high accuracy of the e-model.

Key words: intelligent algorithms, error correction, satellite-optical networks, high-speed data transmission, nonlinear distortions, optical signal-to-noise ratio (OSNR).