

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І ЗВ'ЯЗКУ**

РОЗЕНВАССЕР ДЕНИС МИХАЙЛОВИЧ



УДК 621.391.1

**КОДОВІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеській національній академії зв'язку ім. О.С. Попова

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент
Брескін Валентин Олександрович

кандидат технічних наук, доцент
Педяш Володимир Віталійович,
Державний університет інтелектуальних
технологій і зв'язку,
доцент кафедри телекомунікаційних систем

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Уривський Леонід Олександрович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри телекомунікаційних
систем

доктор технічних наук, доцент
Єременко Олександра Сергіївна
Харківський національний університет
радіоелектроніки,
професор кафедри інфокомунікаційної
інженерії ім. В. В. Поповського

Захист дисертації відбудеться 7 травня 2021 р. о 10.00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.816.01 в Державному університеті інтелектуальних технологій і зв'язку за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.

Автореферат розісланий «30» березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради


В.І.Тіхонов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Впровадження на транспортній мережі систем передавання оптичної транспортної ієрархії (ОТН) є сучасним етапом еволюції волоконно-оптичних систем передавання (ВОСП), що використовуються для транспортування трафіку в мережах NGN та IMS. В них зменшення собівартості послуг зв'язку досягається використанням технології спектрального розподілу оптичних каналів (СРК). При розповсюдженні по оптичному волокну в сигнал вносяться лінійні (загасання та дисперсія) та нелінійні (ефект Керра та розсіювання оптичного випромінювання) спотворення. Збільшення довжини ділянки регенерації та/або швидкості передавання (інформаційної ефективності) по каналах ВОСП-СРК в умовах спотворення сигналу та дії адитивних шумів волоконно-оптичного лінійного тракту досягається сумісним використанням методів кодування каналу зв'язку, ефективних за використанням смуги частот методів модуляції та лінійних кодів.

Підвищення швидкості передачі ВОСП-СРК досягається збільшенням кількості оптичних каналів та вимагає збільшення потужності групового сигналу системи, що в свою чергу викликає збільшення рівня нелінійних спотворень та ймовірності помилки. Зменшення ймовірності помилки досягається застосуванням коректувальних кодів (КК). Введення додаткових перевірних символів знижує спектральну ефективність. З іншого боку, використання коректувальних кодів призводить до підвищення енергетичної ефективності за рахунок виправлення помилок. В системах передавання ОТН згідно Рекомендації МСЕ-Т G.709 використовується коректувальний код Ріда-Соломона. Залишається відкритим питання порівняння інформаційної ефективності ВОСП при застосуванні рекомендованого коду та інших кодів в сполученні з ефективними за використанням смуги частот методами модуляції сигналу.

Кодові методи - це сукупність методів формування та обробки сигналів у кінцевому обладнанні ВОСП, які використовують коректувальні, модуляційні та лінійні коди, а також ефективні коди повідомлень. Для підвищення інформаційної ефективності (швидкості передавання) ВОСП доцільно сумісно застосовувати вказані кодові методи, що вимагає дослідження впливу їх параметрів на показники системи передавання.

Питання побудови та застосування коректувальних кодів розглядаються в багатьох роботах, як закордонних (Шеннон К., Кларк Дж., Кейн Дж., Морелос-Сарагоса Р., Вернер М., Мак-Вільямс Ф.Дж.А., Золотарьов В.В., Сидельников В.М.), так і вітчизняних (Захарченко М.В., Банкет В.Л., Уривський Л.О.) авторів. Дослідження сигналів з парціальним кодуванням виконано в роботах Лендера А., Кретцмера Е., Сукачова Е.О, Банкета В.Л.

В умовах обмеженої смуги частот каналу ВОСП-СРК актуальним завданням є також дослідження енергетичних параметрів оптичного сигналу (втрати відношення сигнал/шум) внаслідок появи міжсимвольної інтерференції, що породжується дисперсійними спотвореннями сигналів у середовищі розповсюдження. Зменшити втрату відношення сигнал/шум та відповідно

підвищити інформаційну ефективність можливо використанням ефективних методів формування лінійних сигналів ВОСП та сигналів з контрольованою міжсимвольною інтерференцією (парціальним кодуванням).

Внаслідок сказаного вище, виникає актуальна науково-прикладна задача – удосконалення кодових методів формування та обробки сигналів для підвищення інформаційної ефективності волоконно-оптичних систем передавання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дослідження відповідає держбюджетним науково-дослідницьким роботам «Дослідження та розроблення перспективних телекомунікаційних технологій передавання мереж наступного покоління» (0115U000854), «Підвищення пропускну здатності волоконно-оптичних систем передавання» (0113U005354) та «Підвищення ефективності волоконно-оптичних систем передавання» (0114U004799, 0115U005948), що були проведені на кафедрі «Телекомунікаційні системи» Одеської національної академії зв'язку ім. О. С. Попова, науковим планам кафедри. Проведені в дисертаційній роботі дослідження впроваджені у навчальний процес кафедр «Телекомунікаційні системи» та «Теорія електров'язку» ім. А.Г. Зюко Одеської національної академії зв'язку ім. О. С. Попова.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення інформаційної ефективності ВОСП-СРК кодовими методами. Досягнення мети дослідження зумовило постановку і вирішення наступних завдань:

1. Виконати аналіз коефіцієнтів інформаційної, енергетичної та спектральної ефективності ВОСП із завадостійким кодуванням.
2. Навести і обґрунтувати параметри коректувального коду, за яких забезпечується підвищення швидкості передавання ВОСП-СРК.
3. Дослідити підвищення інформаційної ефективності ВОСП використанням методів багаторівневої модуляції у сполученні з завадостійким кодуванням.
4. Виконати порівняння лінійних кодів за коефіцієнтами енергетичної ефективності за обмеженої смуги частот сигналу у каналі ВОСП-СРК.
5. Дослідити ефективність застосування парціально кодованих сигналів у ВОСП з використанням пристрою виправлення помилок.

Об'єктом дослідження у дисертаційній роботі є процеси перетворення сигналів у волоконно-оптичних системах передавання.

Предмет дослідження — кодові методи підвищення інформаційної ефективності у волоконно-оптичних системах передавання.

Методи дослідження. Порівняння коректувальних кодів, методів модуляції сигналів, оцінка ефективності систем передавання, лінійних кодів та парціально кодованих сигналів виконано методами теорії електричного зв'язку, теорії електричних кіл, теорії інформації та кодування. У дослідженні коректувальних кодів ВОСП застосовувались методи імітаційного комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів. В роботі отримано наступні основні наукові результати:

Вперше:

- визначено параметри блокових коректувальних кодів, за яких досягається найбільше значення швидкості волоконно-оптичної системи передавання зі спектральним розділенням каналів;
- визначено параметри сигналів квадратурної амплітудної модуляції, за яких у сполученні з коректувальним кодом забезпечується найбільше значення інформаційної ефективності ВОСП зі спектральним розділенням каналів при фіксованій піковій потужності сигналу передавача.

Удосконалено:

- метод порівняння характеристик ВОСП із завадостійким кодуванням;
- метод оцінки енергетичної ефективності лінійних кодів у ВОСП за обмеженої смуги частот оптичного каналу;
- систему передавання з парціально кодованими сигналами шляхом її доповнення реєстратором помилок та пристроєм виправлення помилок, що дозволило збільшити інформаційну ефективність ВОСП.

Практичне значення одержаних результатів. Результати, які отримані у дисертаційній роботі, можуть бути використані при проектуванні і розвитку транспортних мереж із СРК. Результати дисертаційної роботи використані у навчальному процесі в Одеській національній академії зв'язку ім. О.С. Попова при вивченні дисципліни «Теорія зв'язку» та «Телекомунікаційні системи передавання», також можуть бути використані для вибору методу підвищення сумарної швидкості існуючих волоконно-оптичних систем передавання на базі СРК при проектуванні нових систем, що підтверджується актами впровадження. Запропонована система передавання парціально кодованих сигналів з квадратурною амплітудною модуляцією дозволяє збільшити відносну швидкість передавання.

Особистий внесок здобувача. Роботи [1, 2] виконані автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належать: у патентах на корисні моделі [3, 4] - розрахунок ефективності запропонованих систем передавання парціально кодованих сигналів з АМ-М та КАМ-М; у статтях [5] - розрахунок підвищення пропускної здатності оптичного каналу існуючих ВОСП шляхом заміни передавальних і приймальних оптичних модулів, які використовують АМ-2 на КАМ-М; [6] - обчислення виграшу від застосування блокових коректувальних кодів БЧХ та Ріда-Соломона для збільшення кількості оптичних каналів та сумарної швидкості передавання ВОСП-СРК; [7] - розрахунок спектральної ефективності ВОСП при переході від лінійного коду NRZ до коду RZ; [8] - постановка задачі, аналіз отриманих результатів; [9] - розрахунок ефективності системи передавання парціально кодованих сигналів; [10] – запропоновано спосіб стиснення бінарних даних методом множинного укрупнення алфавіту; [11] - розрахунок кількості рівнів сигналу КАМ-М, а також відповідної кількості оптичних каналів; [12] - запропоновано спосіб обрання архіватора до конкретних типів повідомлень.

Апробація результатів дисертації. Основні матеріали дисертації

доповідалися та обговорювалися на державних та міжнародних науково-технічних конференціях, а саме: 63-я [13], 65-а [14] 66-а [15], 69-а [16] та 71-а [17] науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів (Одеса, 2008, 2010, 2011, 2014, 2016); 4-а Міжнародна конференція "Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання" ACSN'2009 (Львів, 2009) [18]; 10-я міжнародна науково-практическа конференція «Современные информационные и электронные технологии СИЭТ-2009» (Одесса, 2009) [19]; Матеріали науково-методичного семінару "Інформаційні технології в навчальному процесі" (Одеса, 2009) [20]; III Міжнародна науково-технічна конференція «Нові технології в телекомунікація» (Київ, 2010) [21]; 7-я міжнародная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2011» (Севастополь, 2011) [22]; Інформаційні технології в навчальному процесі: праці науково-методичного семінару (Одеса, 2011) [23]; Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science, Proceedings of the XIth International Conference "TCSET-2012" (Lviv-Slavske, 2012) [24]; VI Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (Запоріжжя, 2012) [25]; 2-а [26] та 3-я [27] Міжнародні науково-практичні конференції «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє» (Одеса, 2012, 2013), Інформатика, інформаційні системи та технології: дванадцята всеукраїнська конференція студентів і молодих науковців (Одеса, 2015) [28], Матеріали науково-технической конференции «Современные информационно-телекоммуникационные технологии» (Київ, 2015) [29], 2017 IEEE International Conference on Information- Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017) [30].

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 30 наукових робіт, зокрема: 2 патенти на корисні моделі [3, 4], 2 одноосібних статті [1, 2], 2 статті у закордонних виданнях [10, 12], 5 статей згідно Переліку наукових фахових видань України [5-9, 11], 2 публікації індексовані у Scopus [24, 30], 16 публікацій у матеріалах державних та міжнародних науково-технічних конференціях [13-23, 25-29].

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із 132 сторінок основного тексту і містить вступ, 4 розділи, висновки, 54 рисунки, 14 таблиць, перелік посилань із 152 джерел, а також 1 додаток.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У **вступі** розкрито стан і зміст проблеми, обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено мету роботи і сформульовано завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, сформульовано наукову новизну і практичне значення одержаних результатів. Подано дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та публікації.

В **першому розділі** – «Аналіз кодових методів у волоконно-оптичних системах передавання» – уточнено класифікацію кодів у волоконно-оптичних

системах передавання, наведено характеристики кодів, структурну схему оптичного каналу ВОСП, метод порівняння систем передавання на основі коефіцієнтів ефективності.

Швидкість та завадостійкість передавання інформації є найважливішими показниками при проектуванні, будівництві та експлуатації сучасних волоконно-оптичних систем передавання. Максимальна швидкість передавання цифрових потоків в оптичних каналах ВОСП обмежена пропускнуою здатністю каналу зв'язку.

Сформульована задача дисертаційної роботи: підвищення інформаційної ефективності волоконно-оптичних систем передавання шляхом використання багаторівневої модуляції в сполученні із завадостійким кодуванням. Для підвищення інформаційної ефективності ВОСП можливо використання інших кодових методів: лінійних кодів, парціально кодованих сигналів. У дисертаційній роботі поставлена задача порівняння лінійних кодів за коефіцієнтом інформаційної ефективності за обмеженої смуги частот сигналу у каналі ВОСП-СРК та дослідження ефективності застосування реєстратора помилок та пристрою виправлення помилок для приймання парціально кодованих сигналів у ВОСП. Зроблено висновок щодо необхідності порівняння різних методів підвищення інформаційної ефективності та надання рекомендацій щодо їхнього використання у волоконно-оптичних системах передавання.

У другому розділі – «Дослідження характеристик волоконно-оптичних систем передавання із завадостійким кодуванням» – виконано порівняння коректувальних кодів ВОСП, розглянуто особливості використання коректувальних кодів в ВОСП-СРК та шляхи збільшення швидкості передавання оптичним каналом зв'язку, а також проведено імітаційне моделювання системи передавання з модуляцією та завадостійким кодуванням в математичному пакеті MatLab.

Система передавання забезпечує передавання цифрового сигналу зі швидкістю R каналом зв'язку зі смугою пропускання F_k . Ймовірність помилки біта $P_{\text{пом}}$ залежить від відношення потужностей сигналу P_c та шуму $P_{\text{ш}}$ (захищеності) на виході каналу зв'язку. Потужність шуму є добутком його спектральної густини потужності N_0 та смуги пропускання каналу зв'язку F_k . Дослідження дисертаційної роботи базуються на аналізі трьох показників ефективності: інформаційної η , енергетичної β та спектральної γ , запропонованих А.Г. Зюко.

Коефіцієнти енергетичної $\beta = R/(P_c / N_0)$ та спектральної (частотної) ефективності $\gamma = R/F_k$ характеризують ступінь використання основних ресурсів каналу зв'язку. Інформаційна ефективність системи визначає ступінь використання пропускнуої здатності каналу C_k

$$\eta = R/C_k. \quad (1)$$

Інформаційна, енергетична та спектральна ефективності зв'язані між собою співвідношенням

$$\eta = \frac{\gamma}{\log_2(1 + \gamma/\beta)}. \quad (2)$$

Для системи передавання, наближеної до ідеальної ($\eta \rightarrow 1$) існує гранична залежність між β і γ :

$$\beta = \frac{\gamma}{2^\gamma - 1}. \quad (3)$$

У координатах (β, γ) кожному методу передавання інформації буде відповідати точка на площині нижче межі Шеннона.

Для порівняння та оцінки ефективності використання коректувальних кодів застосовуються декілька параметрів. Найпоширенішими з них є розширення необхідної смуги частот та енергетичний виграш кодування (ЕВК).

Необхідну смугу пропускання каналу зв'язку оцінено за виразом, за яким визначають ширину спектру модульованого сигналу:

$$\Delta F = \frac{R(1 + \alpha)}{m_{\text{кк}} \log_2 M}, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт скагу спектра сигналу, M – кількість рівнів модульованого сигналу, $m_{\text{кк}}$ – швидкість коректувального коду, яка визначається

$$m_{\text{кк}} = \frac{k}{n}, \quad (5)$$

де k - кількість символів на вході кодера блокового коректувального коду або кількість входів кодера згорткового коректувального коду, n - кількість символів на виході кодера блокового коректувального коду або кількість виходів кодера згорткового коректувального коду. У коректувальних кодах $m_{\text{кк}} \in (0; 1)$.

В даному розділі роботи виконано завдання з аналізу характеристик ВОСП з основними класами коректувальних кодів на основі розрахунку вихідних параметрів системи передавання в залежності від вхідних. Першою з них досліджувалася залежність ймовірності помилки на виході декодера від захищеності сигналу. На прикладі модуляції ФМ-2 встановлено, що при малій захищеності сигналу (до 2,5 дБ) найменшу ймовірність помилки на виході декодера забезпечує турбо-код (37, 21, 65536), а при більших значеннях захищеності сигналу кращі результати забезпечує каскадний код, який складається з коду БЧХ (255,239) та згорткового коду з кодовою віддалю 5.

Другим параметром, який досліджувався був енергетичний виграш кодування

$$\text{ЕВК} = 10 \lg \left(\frac{h_1^2}{h_2^2} \right), \quad (6)$$

де h_1^2 та h_2^2 – відношення енергії сигналу на біт E_b до спектральної густини потужності шуму N_0 (відношення сигнал/шум) в СП без кодування і в СП з завадостійким кодуванням відповідно.

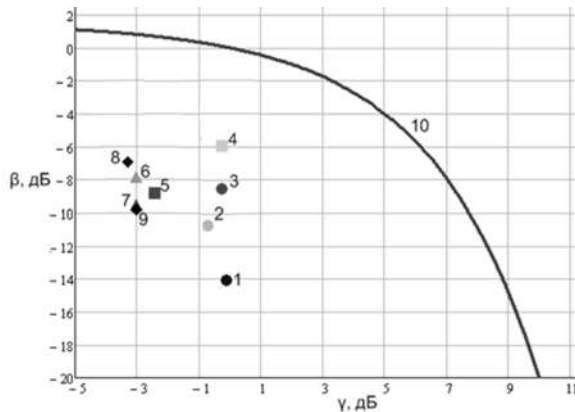
Співставлення результатів розрахунків показало (табл. 1), що за ймовірності помилки на виході декодера 10^{-12} найбільше значення ЕВК у 8,2 дБ відповідає коду Ріда-Соломона, який має найвищу серед розглянутих кодів швидкість $m_{\text{кк}}$.

Таблиця 1

ЕВК проаналізованих класів коректувальних кодів, дБ

Коректувальний код	Ймовірність помилки на виході декодера коректувального коду				
	10^{-5}	10^{-6}	10^{-8}	10^{-10}	10^{-12}
Хемінга (31, 26)	1,55	1,74	2,16	2,36	2,94
БЧХ (255, 239)	3,82	4,33	5,01	5,42	5,72
Ріда–Соломона (РС) (255, 239)	5,42	6,04	7,03	7,72	8,20
Згортковий код $d_f = 18$ (ЗК-18)	4,68	4,79	5,30	5,51	5,67
Згортковий код $d_f = 5$ (ЗК-5)	3,19	3,39	3,8	3,89	3,97
Каскадний код (БЧХ (255,239) та ЗК-5)	4,41	4,9	5,74	6,1	6,51
Турбокод (37, 21, 65536)	7,19	6,73	5,29	4,28	3,85

Результати дослідження залежності коефіцієнтів енергетичної та спектральної ефективності СП з коректувальними кодами представлені на рис.1. Аналіз графіку показав, що найближче до межі Шеннона знаходиться СП № 4 з коректувальним кодом Ріда-Соломона (255, 239).



Умовні позначення: 1 – без коректувального коду, 2 – з кодом Хемінга, 3 – з кодом БЧХ, 4 – з кодом РС, 5 – з БПД–СОК, 6 – ЗК-18, 7 – ЗК-5, 8 – з каскадним кодом, 9 – з турбокодом, 10 – межа Шеннона

Рис. 1. Показники енергетичної та спектральної ефективності систем передавання з ФМ-2 та коректувальними кодами за ймовірності помилки 10^{-12}

Для модуляції ФМ-2 використання коду РС (255, 239) з ЕВК 8,2 дБ дозволило збільшити інформаційну ефективність в $0,43/0,21 \approx 2$ рази порівняно з СП без коректувального коду.

Для експериментального підтвердження отриманих аналітичних розрахунків, в середовищі MatLab була розроблена модель системи передавання, з методами модуляції АМ-М, ФМ-М, КАМ-М та коректувальними кодами Хеммінга, БЧХ та Ріда-Соломона. Результати моделювання підтвердили теоретичні розрахунки.

Друге завдання дисертаційної роботи полягало в обґрунтуванні параметрів коректувального коду, що забезпечує підвищення швидкості передавання ВОСП-СРК.

Сумарна швидкість передавання ВОСП-СРК на $N_{ок}$ оптичних каналів, в якій швидкість передавання по всіх каналах однакова і дорівнює B , розраховується за виразом $B_{\Sigma} = B \cdot N_{ок}$. Підвищити інформаційну ефективність ВОСП-СРК можливо шляхом збільшення $N_{ок}$, але це призведе до пропорційного підвищення потужності групового сигналу СП та зростанню нелінійних спотворень.

Підвищити показники ВОСП-СРК можливо за рахунок зміни кількості оптичних каналів з застосуванням коректувальних кодів. Було розроблено метод оцінки впливу лінійних та нелінійних спотворень сигналу який враховує запас по загасанню, ЕВК та швидкість коду. Встановлено, що при запасі по загасанню 12 дБ, використання коду з ЕВК в 5 дБ дозволяє збільшити кількість $N_{ок}$ з 20 до 35, тобто на 75%. Розрахунок кількості каналів удосконаленим варіантом методу для кодів БЧХ та РС показав, що ефективним способом збільшення $N_{ок}$ ВОСП-СРК є збільшення довжини коду. Так, при довжині коду БЧХ $n = 63$ біта, швидкості $B = 2,5$ Гбіт/с ($m_{кк} = 0,2$) отримуємо 75 оптичних каналів, а при $n = 1023$ – вже 90 ОК. Проведені для коду РС дослідження показують, що при більшій довжині коду n можна отримати суттєве збільшення кількості оптичних каналів переобладнаної ВОСП-СРК. Так для коду РС з використанням тих же довжин кодів, що і для БЧХ, отримуємо 105 і 135 оптичних каналів відповідно.

В роботі було досліджено метод оцінки швидкості передавання ВОСП з багаторівневою модуляцією у сполученні з коректувальним кодом. За наявності в каналі зв'язку міжсимвольної інтерференції, викликаній дисперсійними спотвореннями, багаторівнева модуляція дозволяє збільшити інформаційну швидкість системи $B_{сп}$. Ефективність застосування багаторівневої модуляції у сполученні з КК визначалась розрахунком відносної швидкості згідно виразу

$$\delta B = \frac{B_{сп}}{B_{АМ-2}}, \quad (7)$$

де $B_{АМ-2}$ - швидкість передавання СП з АМ-2 без КК.

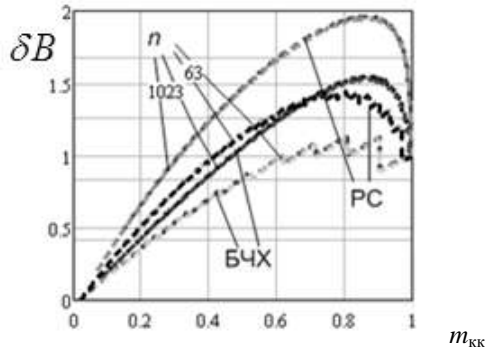


Рис. 2. Залежність відносної швидкості передавання ВОСП від швидкості коректувальних кодів БЧХ та РС за $P_{\text{пом}} = 10^{-12}$ для довжин коду 63 та 1023

Встановлено (рис. 2), що збільшення довжини коду n з 63 до 1023 символів дозволяє збільшити відносну швидкість для БЧХ на 35% і для РС на 60%.

Системи передавання грубого мультиплексування по довжині хвилі (CWDM) використовуються для заміни застарілого обладнання ЦСП СЦІ на місцевих та внутрішньозонових ділянках телекомунікаційної мережі. Довжина ділянки 3R регенерації ВОСП CWDM визначається енергетичними втратами сигналу в ОВ та його дисперсійними спотвореннями. Передавання цифрового сигналу з допустимою ймовірністю помилки для заданого методу модуляції забезпечується за допустимого значення захищеності сигналу $A_{\text{доп}}$. Як правило, при проектуванні ВОСП також враховують певний запас по захищеності ΔA_3 , який включає експлуатаційний запас $\Delta A_{\text{ЕЗ}}$, запас по загасанню ΔA_L за рахунок різниці фактичної та розрахункової довжини ділянки регенерації та втрату захищеності за рахунок дисперсійних спотворень ΔA_{σ} , вигравш по захищеності за рахунок використання завадостійкого кодування $\Delta A_{\text{КК}}$. Втрата захищеності при переході від АМ-2, яке, в основному, ще використовується в ВОСП, до нового методу модуляції, з кількістю рівнів $M - \Delta A_M$:

$$\Delta A_3 = \Delta A_{\text{ЕЗ}} + \Delta A_L + \Delta A_{\text{КК}} - \Delta A_{\sigma} - \Delta A_M. \quad (8)$$

На рис. 3 наведена залежність відносної швидкості передавання ВОСП від швидкості коректувального коду для значень запасу по загасанню 5 дБ та 12 дБ.

За результати дослідження встановлено (рис. 2 та 3), що максимум відносної швидкості досягається за $m_{\text{КК}} \in (0,8; 0,9)$ незалежно від типу блокового коду та запасу по загасанню: максимальне значення відносної швидкості дорівнює 140% для БЧХ і 180% для РС.

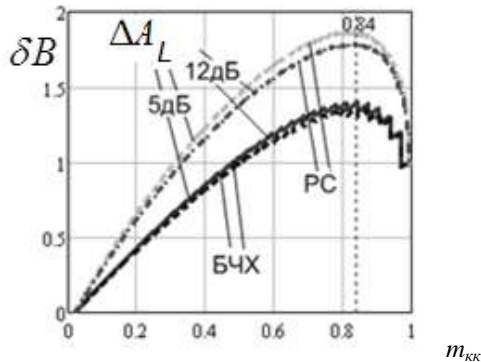


Рис. 3. Залежність відносної швидкості передавання ВОСП від швидкості кодів БЧХ та РС при $n = 255$ і $P_{\text{пом}} = 10^{-12}$ для значень запасу по загасанню 5 дБ та 12 дБ

Третій розділ – «Дослідження методів підвищення інформаційної ефективності ВОСП» – присвячений впливу застосування коректувальних та лінійних кодів на показники ефективності ВОСП.

Третім завданням дисертаційної роботи була оцінка підвищення інформаційної ефективності ВОСП застосуванням багаторівневої модуляції у сполученні з коректувальним кодуванням.

Найбільше розповсюдження у ВОСП отримали дворівневі методи модуляції (AM-2), які мають низьку інформаційну ефективність. Підвищити її можливо завдяки застосуванню методів багаторівневої модуляції сигналу. Для модуляцій AM-М, ФМ-М та КАМ-М був проведений розрахунок трьох вищевказаних коефіцієнтів ефективності СП. Встановлено, що використання КАМ-М дозволяє найбільш суттєво підвищити спектральну та інформаційну ефективність, тому використання цього методу модуляції і було досліджено в подальшому.

Використання багаторівневої модуляції призводить до збільшення пікової потужності сигналу та нелінійних спотворень сигналу. При фіксації пікової потужності оптичного сигналу збільшення позиційності сигналу M призводить до зменшення середньої потужності та захищеності сигналу, що доцільно компенсувати використанням коректувального коду.

Основний ефект збільшення інформаційної ефективності ВОСП досягається за рахунок багаторівневої модуляції. Використання квадратурної амплітудної модуляції КАМ-16 підвищує максимальну швидкість передавання системи передавання до трьох разів, якщо є запас по довжині регенераційної ділянки. Якщо такого запасу немає, або потрібно отримати більший виграш, то необхідно використовувати методи багаторівневої модуляції в сполученні з завадостійким кодуванням. Це дозволяє збільшити інформаційну ефективність ВОСП.

Каналами ВОСП-СРК оптичної транспортної мережі (ОТН) передаються

структуровані ієрархічні цифрові потоки, що передбачають використання методів завадостійкого кодування. В попередньому розділі роботи було доведено, що для збільшення інформаційної ефективності СП доцільно використання модуляції КАМ-М. В даному розділі вирішені завдання по дослідженню впливу кількості рівнів сигналу КАМ-М та параметрів групового сигналу на сумарну швидкість ВОСП-СРК.

Наступним завданням даного розділу була розробка методу для оцінки ефективності заміни модуляції АМ-2 ВОСП-СРК застосуванням модуляції КАМ-М з врахуванням лінійних та нелінійних спотворень середовища розповсюдження.

За основу був узятий метод розрахунку кількості оптичних каналів з розділу 2 по нелінійним спотворенням, який був модифікований врахуванням іншого методу модуляції (КАМ-М), параметрами когерентного приймача, а також лінійними спотвореннями оптичного волокна.

Ефективність модернізації визначалась розрахунком відношення сумарних швидкостей ВОСП з КАМ-М та АМ-2 (рис. 4) за фіксованої пікової потужності сигналу $\frac{B_{\Sigma_КАМ-М}}{B_{\Sigma_АМ-2}}$ в залежності від кількості біт b на каналний символ сигналу.

Дослідження довело, що використання КАМ-4 без завадостійкого кодування забезпечує вигравш в збільшенні сумарної швидкості СП удвічі. За ймовірності помилки в каналі 10^{-12} сполучення КАМ-4 з широко розповсюдженим КК Ріда-Соломона (255, 239) та його удосконаленим варіантом (2720, 2550) дозволяє збільшити вигравш сумарної швидкості передавання ВОСП-СРК більш ніж утричі. Сполучення КАМ-16 з удосконаленим КК забезпечує збільшення сумарної швидкості передавання ВОСП-СРК більш ніж в чотири рази порівняно з АМ-2.

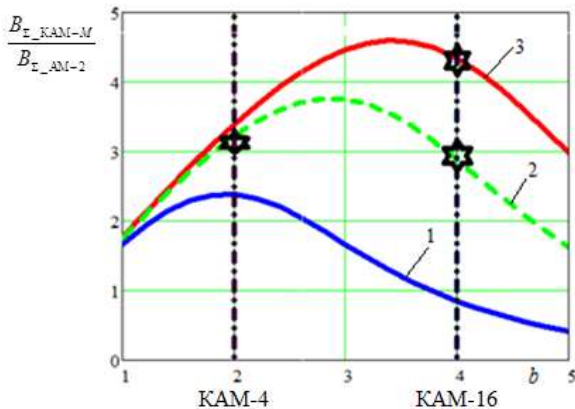


Рис. 4. Залежність відношення швидкостей ВОСП з КАМ-М та АМ-2 від кількості біт b на каналний символ сигналу (1 – без КК, 2 – ЕВК 6 дБ, 3 – ЕВК 9 дБ)

На основі результатів досліджень розділів 2 та 3 роботи були розраховані показники ефективності для розглянутих варіантів побудови ВОСП (табл. 2).

Таблиця 2

Інформаційна ефективність сумісного використання модуляції та коректувальних кодів

Метод модуляції та коректувальний код	Спектральна ефективність γ , дБ	Енергетична ефективність β , дБ	Інформаційна ефективність η
ФМ-2 + PC (255, 239)	-0,27	-5,83	0,43
АМ-2 + БЧХ (1023, 103)	-10,00	-3,03	0,38
АМ-4 + PC (255, 239)	2,73	-17,04	0,28
КАМ-4 + PC (255, 239)	5,19	-14,03	0,52
КАМ-4 + PC (255, 239)	2,74	-5,83	0,62
КАМ-16 + PC (255, 239)	2,73	-9,85	0,44
КАМ-16 + PC (2720, 2550)	6,23	-14,03	0,62
КАМ-16 + PC (2720, 2550)	2,72	-9,05	0,47
КАМ-32 + PC (2720, 2550)	4,77	-11,19	0,56
КАМ-64 + PC (2720, 2550)	2,55	-13,48	0,34

Відносне підвищення інформаційної ефективності $\delta\eta$ запропонованими кодовими методами по відношенню до системи передавання з модуляцією АМ-2 без використання запропонованих кодових методів у дисертаційній роботі оцінено за виразом

$$\delta\eta = \frac{m_{\text{кк}} \cdot \log_2 M \cdot \log_2(1 + h_1^2 \cdot \frac{1}{1 + \alpha})}{\log_2(1 + h_2^2 \cdot m_{\text{кк}} \cdot \frac{\log_2 M}{1 + \alpha})} = \frac{m_{\text{кк}} \cdot \log_2 M \cdot \log_2(1 + h_1^2 \cdot \frac{1}{1 + \alpha})}{\log_2(1 + \frac{h_1^2}{10^{0,1 \cdot \Delta A_1}} \cdot m_{\text{кк}} \cdot \frac{\log_2 M}{1 + \alpha})} \quad (9)$$

Результати дослідження доводять доцільність використання модуляції КАМ-4 та КАМ-16 сумісно з відповідним коректувальним кодом, що дозволяє підвищити інформаційну ефективність до 3,44 разів порівняно з модуляцією АМ-2 та лінійним кодом NRZ. Подальше збільшення кількості рівнів сигналу КАМ- M не доцільно, оскільки призводить до зниження коефіцієнту інформаційної ефективності ВОСП.

В більшості сучасних ВОСП-СРК для зменшення впливу дисперсійних спотворень середовища використовуються лінійні коди NRZ. Але в ряді випадків для покращення параметрів тактового колювання в приймачі доцільно застосувати інший код, наприклад RZ або Манчестерський, що призведе до необхідності розширення смуги частот $\Delta F_{\text{к}}$ каналу ВОСП. Тому четверте завдання дисертаційної роботи полягало в розробці методу порівняння лінійних кодів за коефіцієнтами енергетичної ефективності за обмеженої смуги частот сигналу у каналі ВОСП-СРК, що було виконано на прикладі кодів NRZ та RZ.

Дослідження проводилися на основі еквівалентної схеми тракту ВОСП-СРК, що включала каскадне включення передавального оптичного

модуля (ПОМ), оптичного волокна та приймального оптичного модуля (ПрОМ). На вході ПОМ діяв імпульс гаусової форми. Всі три блоки моделювались фільтрами нижніх частот (ФНЧ) з передавальними функціями, які відповідали фізичним прототипам блоків. Після відповідних аналітичних перетворень були отримані наскрізні імпульсні відгуки тракту ВОСП. Для коду RZ вираз має форму:

$$h_{RZ}(t_H) = \frac{0,5}{\sqrt{0,25+z_2^2+0,4\left(\frac{f_T}{\Delta F_k}\right)^2}} \cdot e^{-\frac{2,76}{0,25+z_2^2+0,4\left(\frac{f_T}{\Delta F_k}\right)^2} t_H^2}, \quad (10)$$

де $t_H = t/T_T$ – нормований час; f_T та T_T – відповідно тактова частота та тактовий інтервал цифрового сигналу; z_2 - відносна хроматична дисперсія ОВ.

В роботі оцінено можливість і ефективність переходу до RZ не тільки по зменшенню амплітуди прийнятих імпульсів ΔA_{3A} , а також по погіршенню захищеності, яке визначається зменшенням амплітуди, збільшенням шумів $\Delta A_{3ш}$ і дисперсії $\Delta A_{3\sigma}$:

$$\Delta A_3 = \Delta A_{3A} + \Delta A_{3ш} + \Delta A_{3\sigma}. \quad (11)$$

Розрахунок довжини ділянки регенерації по дисперсії згідно стандартним виразам для ВОСП передбачає розширення вхідного імпульсу в 1,25 рази ($z_2=0,25$), що відповідає втраті захищеності сигналу $\Delta A_3 \approx 2$ дБ. В даній роботі виконано порівняння лінійних кодів і для інших значень $0 \leq z_2 \leq 1$, з врахуванням p - коефіцієнту можливого розширення смуги частот каналу зв'язку порівняно зі смугою частот каналу з використанням сигналів коду NRZ (рис. 5). Крива різниці втрати захищеності доводить можливість покращення показників ВОСП з дисперсійними спотвореннями середовища завдяки використанню коду RZ та розширенням смуги частот каналу зв'язку мінімум на 20% ($p=1,2$).

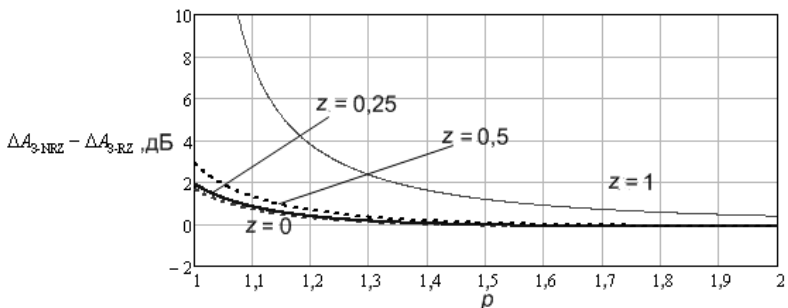


Рис. 5. Вплив смуги пропускання ВОСП на різницю погіршення захищеності кодів NRZ та RZ

Отримані результати доводять, що при заміні лінійного коду NRZ на RZ немає необхідності в розширенні смуги частот оптичного каналу вдвічі.

Збільшення ΔF_k на 20% дозволить майже повністю скомпенсувати погіршення захищеності сигналу і лише незначно погіршить спектральну ефективність. Згідно з (9) та (11) розширення смуги частот на 20% зменшує інформаційну ефективність тільки на 3%.

В четвертому розділі – «Дослідження системи передавання з парціально кодованими сигналами» – розроблено метод підвищення інформаційної ефективності системи передавання з парціально кодованими сигналами.

Для виконання п'ятого завдання дисертаційної роботи було проаналізовано літературу щодо парціального кодування. З відомих класів парціально кодованих сигналів були відібрані сигнали з відгуками $g[k]=1, 1; g[k]=1, 2; g[k]=1, 2, 1$.

Для обрання класу парціально кодованих сигналів, вони були співставлені за втратою по захищеності ΔA за рахунок збільшення кількості рівнів на вході вирішуючого пристрою приймача та виграшем за рахунок зменшення смуги частот по відношенню до сигналу з відгуком $g[k]=1$. Серед проаналізованих класів найменшу загальну втрату по захищеності забезпечує сигнал з відгуком $g[k]=1,1$, але його використання не дозволяє виправляти помилки, тому подальші дослідження проводилися для сигналів з відліками $g[k]=1,2$.

На рис. 6 наведена схема системи передавання парціально кодованих сигналів з амплітудною модуляцією АМ-2. У роботі запропоновано доповнити стандартну схему СП ПКС ресстратором помилок (РП) і пристроєм виправлення помилок (ПВП).

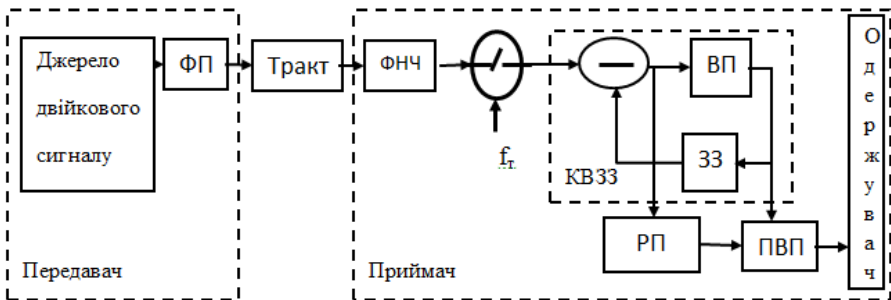


Рис. 6. Система передавання парціально кодованими сигналами з амплітудною модуляцією

Запропонований метод прийому передбачає виправлення поодиноких помилок, тому ймовірність помилки на виході СП ПКС розраховується як ймовірність подвійної помилки, що забезпечує збільшення захищеності.

Для підвищення коефіцієнтів ефективності доцільно доповнити запропоновану СП каскадно включеними перемежувачем та коректувальним кодом (наприклад, кодом з подвійною перевіркою на парність (ППП), який дозволяє виправити однократні помилки).

Запропонована система з АМ-2 гірша за спектральною ефективністю, ніж квадратурна амплітудна модуляція КАМ-М, але її значно простіше реалізувати в волоконно-оптичних системах передавання.

Збільшити інформаційну ефективність СП можна сумісним використанням ПКС та модуляції КАМ-М. Функціональна схема такої СП доповнюється приймачем, аналогічно наведеному на рис. 6.

Запропонована система передавання парціально кодованих сигналів з квадратурною амплітудною модуляцією дозволяє збільшити відносну швидкість передавання з більшим виграшем по захищеності ніж у розглянутих альтернативних методах.

Загальна зміна захищеності сигналу оцінювалася за виразом

$$\Delta A_3 = \Delta A_{CC} + \Delta A_{ПК} + \Delta A_{ВП}, \quad (12)$$

де ΔA_{CC} - зміна захищеності за рахунок зміни сигнального сузір'я;

$\Delta A_{ПК}$ - зміна захищеності за рахунок парціального кодування;

$\Delta A_{ВП}$ - зміна захищеності за рахунок виправлення помилок.

За аналогією з попередніми розділами розраховано інформаційну ефективність систем передавання з парціально кодованими сигналами (табл. 3).

Таблиця 3

Інформаційна ефективність систем передавання з парціально кодованими сигналами за ймовірності помилки 10^{-12}

Метод передавання	Спектральна ефективність γ , дБ	Енергетична ефективність β , дБ	Інформаційна ефективність η
АМ-2 з ПКС	3,01	-20,54	0,26
АМ-2 з ПКС та ППП	2,92	-17,04	0,29
КАМ-4 з ПКС за середнім значенням потужності сигналу	6,02	-20,54	0,45
КАМ-4 з ПКС та ППП за середнім значенням потужності сигналу	5,93	-17,04	0,51
КАМ-4 з ПКС за піковим значенням потужності сигналу	6,02	-17,04	0,52
КАМ-4 з ПКС та ППП за піковим значенням потужності сигналу	5,93	-13,54	0,60

З таблиці 3 видно, що найбільша серед розглянутих у четвертому розділі варіантів побудови ВОСП інформаційна ефективність 0,6 відповідає запропонованій системі передавання з парціально кодованими сигналами, перемешувачем та кодом з подвійною перевіркою на парність.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі сформульована і вирішена актуальна науково-прикладна задача, яка полягає в удосконаленні кодових методів формування та обробки сигналів для підвищення інформаційної ефективності волоконно-оптичних систем передавання. Основними результатами роботи є наступні.

1. Виконано аналіз коректувальних кодів основних класів, методів модуляції та лінійних кодів волоконно-оптичних систем передавання за коефіцієнтами інформаційної, енергетичної та спектральної ефективності, що дозволило дати рекомендації для подальших досліджень.

2. Досліджено методи підвищення інформаційної ефективності ВОСП-СРК за рахунок багаторівневих методів модуляції у сполученні з завадостійким кодуванням. Показано, що використання КАМ-4 або КАМ-16 у сполученні із завадостійким кодуванням дозволяє підвищити інформаційну ефективність системи передавання у 3,4 рази порівняно з модуляцією АМ-2. Доведено, що подальше збільшення кількості рівнів сигналу призводить до зниження інформаційної ефективності ВОСП.

3. Оцінено сумарну швидкість ВОСП-СРК в залежності від параметрів коректувального коду з врахуванням нелінійних спотворень сигналу в оптичному волокні. Сполучення КАМ-16 з коректувальним кодом Ріда-Соломона (2720, 2550) забезпечує підвищення інформаційної ефективності системи передавання. Доведено, що найбільше значення відносної швидкості передавання ВОСП-СРК відповідає швидкості коректувального коду Ріда-Соломона $m_{\text{кк}} = 0,84$.

4. Виконано порівняння лінійних кодів за коефіцієнтом енергетичної ефективності за обмеженої смуги частот сигналу у каналі ВОСП-СРК. Доведено, що при переході від лінійного коду NRZ до RZ для підвищення енергетичної ефективності доцільно збільшити ширину смуги каналу зв'язку на 20%, що зменшує інформаційну ефективність на 3%.

5. Досліджено ефективність застосування реєстратора помилок та пристрою виправлення помилок для приймання парціально кодованих сигналів у ВОСП. Запропонована удосконалена схема приймача парціально кодованих сигналів з КАМ-4, що дозволяє збільшити інформаційну ефективність системи передавання у порівнянні з модуляцією АМ-2.

ОСНОВНІ РОБОТИ, ОПУБЛКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Розенвассер Д.М. Спектральная эффективность корректирующего кодирования [Електронний ресурс] / Д.М. Розенвассер // Проблеми телекомунікацій. – 2012. – № 4 (9). – С. 86 - 95. – Режим доступу до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2012/4/1/124_rozenvasser_code.pdf.

2. Розенвассер Д.М. Сравнение помехоустойчивых кодов ВОСП / Д.М. Розенвассер // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С.Попова. – Одеса, 2010. – №1.

3. Брескін В.О., Розенвассер Д.М. Система прийому дискретних парціально кодованих сигналів з амплітудною модуляцією (Патент на корисну модель № 89073 від 10.04.2014).

4. Брескін В.О., Розенвассер Д.М. Система прийому дискретних парціально кодованих сигналів з квадратурною амплітудною модуляцією (Патент на корисну модель № 90004 від 12.05.2014).

5. Брескін В.А. Увеличение пропускной способности оптического канала волоконно-оптической системы передачи / В.А. Брескин, А.Д. Мазур, Д.М. Розенвассер // *Электроника и связь*. – Киев, 2012. – №6.

6. Брескин В.А. Особенности использования корректирующих кодов в ВОСП-СРК / В.А. Брескин, Д.М. Розенвассер // *Цифрові технології*, №8 – Одеса, 2010. – с. 30-37.

7. Брескин В.А. Спектральная эффективность линейного кода RZ / В.А. Брескин, А.Д. Мазур, Д.М. Розенвассер // *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С.Попова*. – Одеса, 2011. – №2.

8. Розенвассер Д. М. Эффективность методов уменьшения влияния межсимвольной интерференции / Д. М. Розенвассер, С. В. Коновалов // *Східно-європейський журнал передових технологій*. – Харків, 2013. – 2/10 (62). – С. 42-46.

9. Брескін В. О. Система передавання дискретних парціально кодованих сигналів з виправленням помилок / В. О. Брескін, Д. М. Розенвассер // *Цифрові технології*. - 2015. - Вип. 17. - С. 80-86.

10. Константинов М.В. Сжатие бинарных данных методом множественного укрупнения алфавита / М.В. Константинов, Д.М. Розенвассер // *Информационные телекоммуникационные сети*. – Алматы, Казахстан, 2016 – №9-10 (121-122) – С. 39-42.

11. Брескин В.А. Увеличение эффективности волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением каналов / В.А. Брескин, Д.М. Розенвассер // *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С.Попова*. – Одеса, 2017. – №1.

12. Rozenvasser D.M., Pedyash V.V. Comparison of messages effective coding methods // *Sciences of Europe*. – Praha, Czech Republic, 2020. – № 58, vol. 1 – p. 28-35.

13. Розенвассер Д.М. Увеличение пропускной способности WDM корректирующим кодом BCH / Д.М. Розенвассер // 63-я науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів – Одеса, 2009.

14. Брескин В.А. Оптимизация величины объема ВОСП / В.А. Брескин, Д.М. Розенвассер // 65-а науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів - Одеса, 2010.

15. Брескин В.А. Оценка ухудшения защищенности ВОСП при переходе от кода NRZ к коду RZ / В.А. Брескин, А.Д. Мазур, Д.М. Розенвассер // 66-а науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів - Одеса, 2011. – С. 14-15.

16. Польша Ю.М. Применение кодов с низкой плотностью проверок на четность / Ю.М. Польша, К.О. Шестаков, Д.М. Розенвассер // *Матеріали 69-ї НПК професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів - м. Одеса, 3-5 грудня 2014 р.* – Одеса, ОНАЗ, 2014.

17. Брескин В.А. Повышение помехоустойчивости без ухудшения спектральной эффективности систем передачи / В.А. Брескин, Д.М. Розенвассер // 71-а науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів - Одеса, 2016. – с. 11-13

18. Брескин В.А. Error Control Coding in WDM / В.А. Брескин, Д.М. Розенвассер // 4-а Міжнародна конференція "Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання" (ACSN'2009) – Львів, 2009. – с. 107-109.

19. Розенвассер Д.М. Увеличение пропускной способности WDM корректирующим кодом RS / Д.М. Розенвассер // 10-я международная научно-практическая конференция «Современные информационные и электронные технологии СИЭТ-2009» – Одесса, 2009. – 272 с.

20. Розенвассер Д.М. Увеличение пропускной способности WDM корректирующим кодом БЧХ / Д.М. Розенвассер // Матеріали науково-методичного семінару "Інформаційні технології в навчальному процесі". – Одеса: Вид. ВМВ. – 2009. – с. 42-43.

21. Брескин В.А. Особенности помехоустойчивого кодирования для WDM систем / В.А. Брескин, Д.М. Розенвассер // III МНТС «Нові технології в телекомунікація» – Киев, 2010. с.87-88.

22. Розенвассер Д.М. Эффективность применения блоковых корректирующих кодов для увеличения объема ВОСП-СРК / Д.М. Розенвассер // 7-я международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2011» – Севастополь – 2011.

23. Брескин В.А. Влияние кодов NRZ и RZ на амплитуду импульса принимаемого сигнала / В.А. Брескин, Д.М. Розенвассер // Інформаційні технології в навчальному процесі: праці науково-методичного семінару, 16-23 травня 2011 р., ПНПУ імені К.Д. Ушинського, Одеса / наук. ред. М.І. Жалдак. - Одеса: Вид. "ВМВ"., 2011.– с. 111-115.

24. Breskin V.A. Effect of optical channel bandwidth on the immunity of NRZ and RZ linear codes / V.A. Breskin, A.D. Mazur, D.M. Rozenvasser // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science, Proceedings of the XIth International Conference "TCSET– 2012" – Lviv-Slavske, Ukraine, 2012. – p.365 (Scopus).

25. Брескин В.А. Увеличение пропускной способности оптического канала многопозиционным кодированием / В.А. Брескин, А.Д. Мазур, Д.М. Розенвассер // Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки – 2012, с. 103-104.

26. Брескин В.А. Увеличение эффективности использования оптических каналов ВОСП / В.А. Брескин, А.Д. Мазур, Д.М. Розенвассер // Матеріали 2-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє». – Одесса, 2012.–с.50-54.

27. Брескин В.А. Прием парциально кодированных сигналов / В.А. Брескин, Д.М. Розенвассер // Матеріали 3-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє», частина 3. – Одесса, 2013. – с.110-112.

28. Розенвассер Д.М. Альтернативний метод підвищення завадостійкості / Д.М. Розенвассер // Інформатика, інформаційні системи та технології: дванадцята всеукраїнська конференція студентів і молодих науковців. - м. Одеса, 3 квітня 2015р. - Одеса, 2015. – с. 99-100.

29. Брескин В.А. Увеличение пропускной способности ОК WDM / В.А. Брескин, Д.М. Розенвассер // Материалы научно-технической конференции «Современные информационно-телекоммуникационные технологии». Том II. Актуальные вопросы построения современных телекоммуникационных систем и сетей. - г. Киев, 17–20 ноября 2015 г. – Киев, 2015. - с. 49-51.

30. Breskin V.A. Optical transport network capacity optimization / V.A. Breskin, D.M. Rozenvasser // 2017 IEEE International Conference on Information-Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017) – Materials of scientific and technical conference. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017. – p. 386-389 – DOI: 10.1109/UkrMiCo.2017.8095407 (Scopus).

АНОТАЦІЯ

Розенвассер Д.М. Кодові методи підвищення інформаційної ефективності волоконно-оптичних систем передавання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі. – Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку МОН України, Одеса, 2021.

Робота присвячена вирішенню задачі підвищення інформаційної, енергетичної та спектральної ефективності волоконно-оптичних систем передавання, для чого було обгрунтовано вибір значень швидкості коректувальних кодів, за яких досягається максимум швидкості передавання волоконно-оптичної системи передавання зі спектральним розділенням каналів; визначено кількість рівнів сигналу квадратурної амплітудної модуляції у волоконно-оптичних системах передавання зі спектральним розділенням каналів, що відповідає збільшенню інформаційної ефективності у 3 рази у порівнянні з модуляцією АМ-2. Удосконалено метод порівняння коректувальних кодів у волоконно-оптичних системах передавання; метод оцінки інформаційної ефективності лінійних кодів у ВОСП за наявності обмеження смуги частот оптичного каналу; систему передавання з парціально кодованими сигналами шляхом її доповнення реєстратором помилок та пристроєм виправлення помилок, що дозволило збільшити інформаційну ефективність у 3 рази у порівнянні з модуляцією АМ-2.

Розрахунки, які приведені у дисертаційній роботі, можуть бути використані при проектуванні транспортних мереж з ВОСП-СРК. Результати дисертаційної роботи використані у навчальному процесі в Одеській національній академії зв'язку ім. О.С. Попова при вивченні дисциплін «Теорія електрозв'язку» та «Телекомунікаційні системи передавання», також можуть бути використані для вибору метода підвищення швидкості передачі існуючих волоконно-оптичних систем передавання на базі СРК та при проектуванні

новых систем, а запропонована система передавання парціально кодованих сигналів з квадратурною амплітудною модуляцією дозволяє підвищити енергетичну або спектральну ефективність, що підтверджується актами впровадження.

Ключові слова: коректувальні коди, модуляція, лінійні коди, парціально кодовані сигнали, ВОСП, ефективність систем передавання, енергетичний вираш кодування, спектральне розділення каналів.

АННОТАЦІЯ

Розенвассер Д.М. Кодовые методы повышения информационной эффективности волоконно-оптических систем передачи. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – Телекоммуникационные системы и сети. – Государственный университет интеллектуальных технологий и связи МОН Украины, Одесса, 2021.

Работа посвящена решению задачи повышения информационной эффективности волоконно-оптических систем передачи, для чего был использован метод оценки волоконно-оптических систем передачи на основе коэффициентов информационной, энергетической и спектральной эффективности.

Обоснован выбор значений скорости корректирующих кодов, при которых достигается максимум скорости волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением каналов, доказано, что максимум скорости ВОСП-СРК соответствует скорости корректирующего кода Рида-Соломона 0,84.

Определено количество уровней сигнала квадратурной амплитудной модуляции в волоконно-оптических системах передачи со спектральным разделением каналов, что соответствует увеличению информационной эффективности более чем в 3 раза по сравнению с модуляцией по интенсивности. Показано, что использование КАМ-4 или КАМ-16 в сочетании с помехоустойчивым кодированием позволяет повысить информационную эффективность системы передачи по сравнению с модуляцией АМ-2. Доказано, что увеличение количества уровней выше 16 нецелесообразно, так как приводит к снижению информационной эффективности ВОСП.

В диссертационной работе усовершенствован метод сравнения корректирующих кодов в волоконно-оптических системах передачи. Для сравнения и оценки эффективности использования корректирующих кодов в ВОСП применяются несколько параметров.

Выполнено сравнение линейных кодов по коэффициенту энергетической эффективности при ограничении полосы частот сигнала в канале ВОСП-СРК. Доказано, что при переходе от линейного кода NRZ в RZ для уменьшения потери защищенности сигнала целесообразно увеличить ширину полосы канала связи на 20%, что уменьшает информационную эффективность только на 3%.

Исследована эффективность применения регистратора ошибок и устройства исправления ошибок для приема парциально кодированных

сигналов в ВОСП. Предложена усовершенствованная схема приемника парциально кодированных сигналов с КАМ-4, что позволяет увеличить информационную эффективность системы передачи более чем в 3 раза по сравнению с модуляцией АМ-2.

Результаты, представленные в диссертационной работе, могут быть использованы при проектировании транспортных сетей с ВОСП-СРК. Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе в Одесской национальной академии связи им. А.С. Попова при изучении дисциплин «Теория электросвязи» и «Телекоммуникационные системы передачи», также могут быть использованы для выбора метода увеличения суммарной скорости передачи существующих волоконно-оптических систем передачи на базе СРК и при проектировании новых систем, а предложенная система приема парциально кодированных сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией позволяет увеличить энергетическую или спектральную эффективность, что подтверждается актами внедрения.

Ключевые слова: корректирующие коды, модуляция, линейные коды, парциальные сигналы, ВОСП, эффективность систем передачи, энергетический выигрыш кодирования, спектральное разделение каналов.

SUMMARY

Rozenvasser D.M. Code methods for increasing the informational efficiency of fiber-optic transmission systems. – On rights for a manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.12.02 - Telecommunication systems and networks. - State University of Intelligent Technologies and Telecommunications MES of Ukraine, Odessa, 2021.

The work is devoted to solving the problem of increasing the information, energy and spectral efficiency of fiber-optic transmission systems, which justifies the choice of optimal values of the error-control codes rate, which achieves the maximum total rate of the fiber-optic transmission system with wavelength division multiplexing; the optimal number of signal constellation points of quadrature amplitude modulation in fiber-optic transmission systems with wavelength division multiplexing is determined, which corresponds to a 3-fold increase in information efficiency compared to intensity modulation. The method of error-control codes comparing in fiber-optic transmission systems; the method of the information efficiency estimation of linear codes in FOTS in the presence of limitation of the operating frequency band of the optical channel; transmission system with partially coded signals by supplementing it with an error registrar and error correction, which allowed to increase the information efficiency by 3 times compared to intensity modulation have been improved.

The calculations presented in the dissertation can be used in the design of transport networks with FOTS-WDM. The results of the dissertation work were used

in the educational process at the O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications when studying the disciplines "Telecommunication Theory" and "Telecommunication transmission systems", can also be used to select a method for increasing the total transmission rate of existing fiber-optic transmission systems based on the WDM and when designing new systems, and the proposed system for receiving partially encoded signals with quadrature amplitude modulation allows you to increase the energy or spectral efficiency, which is confirmed by the acts of implementation.

Keywords: forward error correction, modulation, linear codes, partial signals, FOTS, transmission systems efficiency, coding energy gain, wavelength division multiplexing.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АБГШ	Адитивний білий гаусів шум
АМ-М	Амплітудна модуляція
БЧХ	Боуз–Чоудхурі–Хоквінгем
ВОСП	Волоконно-оптичні системи передавання
ВП	Вирішуючий пристрій
ЕВК	Енергетичний вигравш кодування
КАМ-М	Квадратурна амплітудна модуляція
КК	Коректувальний код
МСЕ	Міжнародний союз електровз'язку
ОВ	Оптичне волокно
ОК	Оптичні канали
ПВП	Пристрій виправлення помилок
ПКС	Парціально кодовані сигнали
ПОМ	Передавальний оптичний модуль
ПрОМ	Приймальний оптичний модуль
РП	Реєстратор помилок
РС	Рід–Соломон
СРК	Спектральне розділення каналів
ФМ-М	Фазова модуляція
ФНЧ	Фільтр нижніх частот
ФП	Формуючий пристрій
СWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
NRZ	Non return to zero
ОТН	Optical Transport Hierarchy
RZ	Return to zero
WDM	Wavelength Division Multiplexing

Підписано до друку 22.03.2021 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Гарнітура Таймс.
Друк ризографічний. Ум. друк арк. 0,9.
Наклад 100 прим. Зам. № 2203/2.

Надруковано у ФОП Бондаренко М.О.
м. Одеса, вул. В.Арнаутська, 60
т. +38 048 700 11 55

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців ДК № 4684 від 13.02.2014 р.