УДК 621.391.63:623.618

О. В. Коломійцев, В. І. Панченко, Н. М. Бєлоус, О. О. Сапельников, Д. В. Пустоваров

МЕТОД ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ТА АТМОСФЕРНО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЯХ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ЛАЗЕРА З СИНХРОНІЗАЦІЄЮ ПОЗДОВЖНІХ МОД ДЛЯ ВІЙСЬКОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

***Анотація**: у роботі запропоновано метод багатоканальної передачі даних у волоконно-оптичних (ВОЛЗ) та атмосферно-оптичних (АОЛЗ) лініях зв'язку на основі оптичного частотного гребінця одномодового лазера з синхронізацією поздовжніх мод (СПМ), орієнтований на застосування в системах зв'язку, керування та передачі даних зразків озброєння та військової техніки (ОВТ). Метод поєднує диференційне міжканальне кодування (DICE), що усуває спільний атмосферний фазовий зсув усіх каналів, фазову преемпфазу (PPE) для зниження нелінійних спотворень у волокні та трирежимне адаптивне керування за станом каналу. За результатами чисельного моделювання пропускна здатність ВОЛЗ на дистанції 100 км сягає 280 Гбіт/с (проти 160 Гбіт/с для WDM-8 без синхронізації), а в АОЛЗ на дистанції 1 км – 18 Гбіт/с (проти 8 Гбіт/с) при одночасному спрощенні приймальної частини завдяки єдиному місцевому осцилятору. Розглянуто можливості методу щодо стійкості каналів до засобів радіоелектронної боротьби, резервування ліній та вдосконалення технічного обслуговування і ремонту.*

***Ключові слова:** оптичний частотний гребінець, синхронізація поздовжніх мод, волоконно-оптична лінія зв'язку, атмосферно-оптична лінія зв'язку, радіоелектронна боротьба.*

***Abstract**: the paper proposes a method of multichannel data transmission in fiber-optic (FOL) and free-space optical (FSO) links based on the optical frequency comb of a single-mode mode-locked laser (MLL), intended for use in communication, control and data transmission systems of weapons and military equipment. The method combines differential inter-channel encoding (DICE), which eliminates the common atmospheric phase shift of all channels, phase pre-emphasis (PPE) to reduce nonlinear distortions in the fiber, and three-mode adaptive control based on the channel state. According to numerical simulation results, the throughput of a fiber-optic link over 100 km reaches 280 Gbit/s (versus 160 Gbit/s for unsynchronized WDM-8), and that of an FSO link over 1 km reaches 18 Gbit/s (versus 8 Gbit/s), while the receiver is simplified by using a single local oscillator. The method's potential for resistance to electronic warfare, link redundancy and improved maintenance and repair is considered.*

***Keywords:** optical frequency comb, mode locking, fiber-optic link, free-space optical link,electronic warfare.*

Сучасні бойові дії характеризуються високою насиченістю поля бою засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ), завдяки чому радіоканали керування, розвідувальної та телеметричної інформації стають найвразливішою ланкою багатьох зразків озброєння та військової техніки (ОВТ): безпілотних літальних апаратів (БпЛА), наземних роботизованих комплексів (НРК), засобів розвідки, пунктів управління тощо. Одночасно зростають обсяги даних реального часу: відео високої роздільної здатності, тепловізійні зображення, дані лідарів та інших сенсорів. Одним із напрямів вирішення даної суперечності є оптичне волокно для керування безпілотними засобами (БпЛА та НРК). Так, оборонний кластер Brave1 провів перші випробування FPV-дронів на оптичному волокні з дальністю понад 20 км, які не залежать від засобів РЕБ та не створюють радіовипромінювання. Аналогічні вимоги до захищених каналів зв'язку висуваються й до НРК військового призначення [1].

Водночас кабельний канал окремого БпЛА (дрона) або НРК є одноканальним, обмежений довжиною котушки та вразливий до фізичного пошкодження кабелю, а нарощування пропускної здатності ліній зв'язку на основі ВОЛЗ наштовхується на нелінійні ефекти в оптичному волокні – самофазову й перехресну фазову модуляцію та змішування чотирьох хвиль [2].

Атмосферно-оптичні лінії зв'язку забезпечують безліцензійний широкосмуговий обмін даними вузьким променем на відстанях до 1–3 км, їх складніше перехопити та придушити

засобами РЕБ радіодіапазону, а розгортання потребує мінімального часу. Однак, якість АОЛЗ суттєво залежить від турбулентності атмосфери, туману та дощу, які спричиняють флуктуації інтенсивності та фази сигналу [3, 4].

Перспективною основою багатоканальної передачі є оптичний частотний гребінець, який формує одномодовий лазер із синхронізацією поздовжніх мод (СПМ, англ. mode-locked laser) [5]. Такий лазер генерує N еквідистантних спектральних компонент із кроком $f_{rep} = c/(2nL)$, фази яких жорстко пов'язані між собою. У відомій системі WDM кожен канал створюється окремим DFB-лазером. Тому, міжканальні фазові співвідношення випадкові. Для кожного каналу потрібен власний когерентний приймач, а складність, маса та енергоспоживання апаратури лінійно зростають із кількістю каналів [6]. Для військових зразків це означає більші габарити, більше вузлів, що можуть відмовити, та ширшу номенклатуру запасних частин. Єдиного методу, який за допомогою одного когерентного джерела ефективно працював би як у ВОЛЗ, так і в АОЛЗ, у відомих публікаціях не виявлено.

Авторами запропоновано метод, у якому фазова когерентність мод гребінця використовується як ресурс для кодування інформації та компенсації збурень каналу. Передавач містить СПМ-лазер на основі InGaAsP (N≥10 (8) мод, FSR=40 ГГц, λ_0=1550 нм), блок диференційного міжканального кодування DICE, мультиплексор AWG та блок фазової преемпфази PPE. Приймач включає блок моніторингу стану каналу (CSM), блок адаптивного керування, демультиплексор AWG, когерентний диференційний детектор CDICD з єдиним місцевим осцилятором та декодер LDPC.

Сутність DICE полягає у тому, що міжмодові біти кодуються не фазою кожного каналу, а різницею фаз між сусідніми каналами: $\Delta\psi_k=(\pi/2)\cdot(2b_{2k-1}+b_{2k})$, $\psi_{k+1}=\psi_k+\Delta\psi_k \pmod{2\pi}$, де b – біти k-ї пари каналів. Для N = 8 формується 7 пар по 2 біти, тобто 14 біт на символьний інтервал замість 16 при незалежному QPSK; втрата ємності становить 12,5 %. На приймальній стороні обчислюється різниця аргументів сигналів сусідніх каналів: $\Delta\psi_k^{rx}=\arg r_{k+1} - \arg r_k$. За умови, якщо атмосферний відгук однаковий для обох каналів пари, $r_k = s_k\cdot\beta\cdot\exp(j\Phi_{atm}) + n_k$, то Φ_{atm} у різниці скорочується, що доведено як теорема про інваріантність CDICD до спільного фазового зсуву. Оцінений диференційний фазовий зсув між сусідніми модами гребінця становить ~$8{,}4\cdot10^{-5}$ рад, що значно менше за поріг помилки QPSK, який дорівнює $\pi/4$.

Моделювання методом Монте-Карло показало, що DICE зберігає BER<10^{-3} при середньоквадратичному відхиленні фази σ_φ до 1,8 рад, тоді як стандартний QPSK при σ_φ = 1 рад деградує до BER=0,44. Тобто, майже до випадкового вгадування. У АОЛЗ при сильній турбулентності $C_n^2=10^{-14}$ м$^{-2/3}$ метод забезпечує BER=$1{,}23\cdot10^{-26}$, проти ~10^{-5} без DICE, а гранична турбулентність, за якої досягається поріг FEC (BER=10^{-3}), становить ~$3\cdot10^{-13}$ м$^{-2/3}$.

У ВОЛЗ когерентність мод дозволяє передбачити фазу змішування чотирьох хвиль, оскільки вона визначається початковими фазами мод, відомими на передавачі:

$$\varphi_{FWM} = \varphi_i + \varphi_j - \varphi_k + \Delta\varphi_{prop}.$$

Алгоритм PPE додає до фази k-го каналу попередню компенсацію:

$$\psi_k^{TX} = \psi_k + \alpha_{PPE}\cdot\delta\varphi_k^{PPE},$$

де коефіцієнт $\alpha_{PPE} \in [0; 1]$ адаптивно оптимізується за вимірюваним BER із застосуванням пілот-символів, що вставляються у кожен сотий часовий слот.

При α_{PPE}=0,7 та потужності 3 мВт нелінійні спотворення знижуються на 65 %, що дає виграш за SNR 2,5 дБ відносно WDM-8 без компенсації за обчислювальної складності на порядок нижчої, ніж у повного цифрового зворотного поширення (DBP).

Адаптивне керування реалізує блок CSM: у ВОЛЗ оцінюється OSNR (оновлення кожні 100 мс), а у АОЛЗ – сцинтиляційний індекс σ_I^2 за вибіркою тривалістю 100 мс з похибкою до 5 %. Залежно від σ_I^2 обирається один із трьох режимів: стандартне когерентне детектування ($\sigma_I^2 < 0{,}3$), диференційне міжканальне детектування ($0{,}3 \le \sigma_I^2 < 1{,}0$) та диференційне детектування з просторовим рознесенням ($\sigma_I^2 \ge 1{,}0$), а також гістерезис – 0,05. Час на реакцію системи не перевищує 10 мс. У гібридній мережі типу FiWi спільний СПМ-лазер через оптичний роздільник (80 % / 20 %) живить ВОЛЗ та АОЛЗ. При зниженні OSNR волоконної лінії нижче 15 дБ відбувається автоматичне переключення на АОЛЗ зі збільшеною потужністю, а при густому тумані – повернення на резервну ВОЛЗ або зниження швидкості.

За даними таблиці 1 запропонований метод забезпечує у ВОЛЗ на дистанції 100 км пропускну здатність 280 Гбіт/с при BER = $8{,}1\cdot10^{-13}$. Тобто, у 1,75 рази більше, ніж WDM-8 на

DFB-лазерах, а у АОЛЗ на дистанції 1 км за середньої турбулентності – 18 Гбіт/с, що у 2,25 рази перевищує 8 Гбіт/с для WDM-8. Заміна восьми DFB-лазерів та восьми когерентних приймачів одним СПМ-лазером та одним місцевим осцилятором, за орієнтовною оцінкою, знижує вартість апаратної частини на 69 %, а енергетична ефективність зростає з 9,4 до 30,1 Гбіт/Дж.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика методів передачі даних (результати моделювання)

Метод	С у ВОЛЗ, 100 км, Гбіт/с	С в АОЛЗ, 1 км, Гбіт/с	BER при $\sigma_I^2 = 0{,}5$	Кількість місцевих осциляторів
WDM-8 на DFB без синхронізації	160	8	$\sim 10^{-2}$	8
СПМ-8 без DICE	250	14	$\sim 5 \cdot 10^{-3}$	1
СПМ-8 + DICE + PPE (запропонований)	**280**	**18**	**$\sim 10^{-6}$**	**1**

З погляду бойового застосування, експлуатації та ремонту ОВТ запропонований метод відкриває наступні можливості.

По-перше, одне волокно може одночасно нести декілька каналів (відео, телеметрію, команди керування, дані сенсорів тощо) без додаткових лазерних джерел, що актуально для оптоволоконного керування БпЛА та НРК, де масогабаритні характеристики й енергоспоживання апаратури жорстко обмежені.

По-друге, поєднання ВОЛЗ і АОЛЗ у єдиній системі дозволяє резервувати лінію зв'язку на ділянках, де кабель пошкоджено або його неможливо прокласти, а відсутність радіовипромінювання та вузька спрямованість променя ускладнюють виявлення, радіоперехоплення й радіоелектронне придушення каналу.

По-третє, стійкий та достовірний обмін даними між розвідувальними засобами, пунктами управління та виконавцями зменшує ризик спотворення інформації у каналі й тим самим створює умови для протидії ворожим інформаційно-психологічним операціям, спрямованим на дезорієнтацію командирів і операторів.

Окремо слід відзначити переваги для технічного обслуговування й ремонту. Заміна групи DFB-лазерів єдиним СПМ-лазером та єдиним місцевим осцилятором скорочує кількість змінних модулів та номенклатуру комплектів запасних інструментів та приладів (ЗІП), а уніфікація трактів ВОЛЗ і АОЛЗ спрощує підготовку особового складу та ремонт у польових умовах. Вбудований блок CSM постійно оцінює OSNR та σ^2. Тому, деградацію каналу можливо виявити до повної відмови та перейти до технічного обслуговування за станом.

Слід зазначити й обмеження: результати отримано чисельним моделюванням, а не натурними випробуваннями; диференційне кодування зменшує ємність гребінця на 12,5 %; АОЛЗ потребує прямої видимості, а кабель залишається вразливим до механічних пошкоджень. Подальшими шляхами дослідження є розширення DICE до 8-PSK, прогнозування стану
АОЛЗ за допомогою LSTM, а також реалізації DICE і PPE на фотонних інтегральних схемах та натурної перевірки.

Висновки.

Таким чином, запропонований метод передачі даних на основі оптичного частотного гребінця СПМ-лазера, диференційного міжканального кодування DICE, фазової преемпфази PPE та трирежимного адаптивного керування дозволяє підвищити пропускну здатність ВОЛЗ до 280 Гбіт/с на дистанції 100 км (у 1,75 рази порівняно з WDM-8 без синхронізації) та забезпечити стійку передачу даних у АОЛЗ при сильній турбулентності, де відомі методи деградують до неприйнятного рівня помилок.

Використання єдиного когерентного джерела та єдиного місцевого осцилятора спрощує апаратну частину, знижує її масо-габаритні, енергетичні і вартісні показники, скорочує номенклатуру запасних частин та створює основу для технічного обслуговування за станом. Такий підхід дозволяє розглядати метод як один із напрямів удосконалення систем зв'язку та передачі даних зразків ОВТ, підвищення їх стійкості до засобів РЕБ та достовірності обміну інформацією в умовах інформаційно-психологічних операцій противника.

Впровадження розробленого методу потребує стендової та натурної перевірки.

Список використаних джерел:

1. Коломійцев О.В., Комаров В.О., Катунін А.М., Семенченко С.В., Кібальник В.М., Джуманязов Ю.У., Коломієць Б.І., Співак Т.А., Кувшинова О.С., Єловець О.А. Особливості застосування безпілотних наземних легко броньованих транспортних засобів та наземних роботизованих комплексів України. ГРААЛЬ НАУКИ: міжнар. наук. журнал. Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа»; НУ «Інститут науково-технічної інтеграції та співпраці», 2024. № 45. С. 298–307. DOI https://doi.org/10.36074/grail-of-science.01.11.2024.039.

2. Agrawal G. P. Nonlinear Fiber Optics. 6th ed. London: Academic Press, 2019.

3. Khalighi M. A., Uysal M. Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014. Vol. 16, No. 4. P. 2231–2258. DOI https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2329501.

4. Andrews L. C., Beason M. K. Laser Beam Propagation in Random Media. New and Advanced Topics. Bellingham: SPIE Press, 2023.

5. Marin-Palomo P. et al. Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications. Nature. 2017. Vol. 546. P. 274–279. DOI https://doi.org/10.1038/nature22387.

6. Kikuchi K. Fundamentals of Coherent Optical Fiber Communications. Journal of Lightwave Technology. 2016. Vol. 34, No. 1. P. 157–179. DOI https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2463719.

Коломійцев Олексій Володимирович *– д.т.н., професор, Заслужений винахідник України, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, буд. 2, інд. 61002, e-mail: alexus_k@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8228-8404.*

Панченко Володимир Іванович *– к.т.н., доцент кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, буд. 2, інд. 61002, e-mail: Volodymyr.Panchenko@khpi.edu.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3364-3398.*

Бєлоус Наталія Михайлівна *– молодший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5596-4889.*

Сапельников Олександр Олександрович *– старший науковий співробітник науково-дослідного відділу Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5667-1662.*

Пустоваров Денис Володимирович *– магістр Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, буд. 2, інд. 61002.*

Oleksii Kolomiitsev *– Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Inventor of Ukraine, Professor of the Department of Computer Engineering and Programming, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Kyrpychova str., building 2, ind. 61002, e-mail: alexus_k@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8228-8404.*

Volodymyr Panchenko *– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Engineering and Programming, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Kyrpychova str., building 2, ind. 61002, e-mail: Volodymyr.Panchenko@khpi.edu.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3364-3398.*

Nataliia Bielous *– Junior Researcher of the Research Laboratory, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska str., building 77/79, ind. 61023, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5596-4889.*

Oleksandr Sapelnikov *– Senior Researcher of the Research Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska str., building 77/79, ind. 61023, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5667-1662.*

Denis Pustovarov *– Master, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Kyrpychova str., building 2, ind. 61002.*