

УДК 681.321

В. П. КОЖЕМ'ЯКО¹, В. І. МАЛІНОВСЬКИЙ¹, А. В. КЛЕПКОВСЬКИЙ², В. П. НЕЗДОРОВІН³,
Я. І. ЯРОСЛАВСЬКИЙ¹, Л. В. КУЗЬМЕНКО¹

МУЛЬТИКАНАЛЬНА ВІДКРИТА АТМОСФЕРНА ОПТИЧНА СИСТЕМА ЗВ'ЯЗКУ

¹*Вінницький національний технічний університет,
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна*

²*Буковинський державний медичний університет,
58002, вул. Театральна пл., 2, м. Чернівці, Україна*

³*Хмельницький національний університет,
29016, вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна*

Анотація. Розглянуто метод і засоби багатоканального передавання інформації у повітряній атмосфері із використанням лазерної апаратури і адаптивної системи зв'язку. Виконано опис та моделювання впливу атмосфери на передачу інформації. Розглянуто шляхи забезпечення максимальної надійності і швидкодії. Запропоновано оптимальний режим роботи і конструкція адаптивного каналу.

Abstract. Methods and means of the multi-channel transmission information in an air atmosphere using a laser apparatus and an adaptive communication system are considered. Also were described simulation effects on data transmission in of atmospheric environment. Considered ways to ensure maximum reliability and performance. An optimal operation mode and construction of the adaptive channel are proposed.

Аннотация. Рассмотрены метод и средства многоканального передачи информации в воздушной атмосфере с использованием лазерной аппаратуры и адаптивной системы связи. Выполнено описание и моделирование влияния атмосферы на передачу информации. Рассмотрены пути обеспечения максимальной надежности и быстродействия. Предложен оптимальный режим работы и конструкция адаптивного канала.

Ключеві слова: адаптивний канал, середовище передачі, лазерна атмосферна лінія зв'язку.

ВСТУП

Останнім часом відкриті оптичні канали зв'язку, все частіше стали використовувати для заміни кабельних оптичних і електричних ліній в інформаційних мережах з метою економії ресурсів і спрощення їх встановлення. Їх також ще називають атмосферними оптичними лініями зв'язку (АОЛЗ) та використовують для передачі інформації на відносно невеликих відстанях (1—5 км) при побудові локальних мереж (наприклад, для зв'язку між будинками, коли через місцеві умови між ними важко прокласти кабель, або це є економічно невигідним).

Задачею будь-якого каналу зв'язку є передача інформації на необхідну відстань, з максимальною швидкістю [1]. Тому характеристики каналу можна оцінювати за кількістю інформації, яку він здатний передати на відстань без ретрансляторів за певний інтервал часу. Оскільки середовищем передачі відкритих систем є повітряна атмосфера з нестабільністю, то більшість відкритих оптичних каналів зв'язку можуть передавати інформацію на відстань обмежену 5—7 км. Причому, чим довша оптична траса, тим менша швидкість систем передачі за рахунок завад. Окрім системних факторів (таких як, елементна база, діапазон передачі, юстування оптичної системи каналу) найбільший вплив на швидкість і стабільність спричиняють метеорологічні явища, тобто зміна характеристик середовища. При

погіршенні погодних умов стрімко зростає коефіцієнт виникнення помилки при передачі (BER). Це спричиняє повторну передачу пакетів даних, тим самим зменшуючи швидкодію [2]. В результаті загального впливу чинників, що послаблюють оптичний сигнал, втрати при погіршенні погодних умов можуть становити більше 30 дБ, що обумовлює майже повну втрату сигналу і неможливість відновлення його навіть за допомогою найсучасніших фотоприймальних систем. Для забезпечення кращої стабільності роботи та зменшення впливу погодних умов на характеристики передачі, пропонується адаптивна система лазерного атмосферного зв'язку.

Але перед розробниками постає надзвичайно важлива задача підвищення надійності і швидкодії оптичних систем зв'язку. Вирішити цю задачу можливо шляхом використання концепції багатоканальної системи лазерного атмосферного зв'язку, у якій забезпечуються функції одночасної передачі інформації по багатьом каналам з метою організації комунікацій у інформаційних мережах.

Метою статті є підвищення якості передачі інформації у мультिकанальній відкритій атмосферній оптичній системі зв'язку.

Сучасні технології в області оптичного зв'язку активно використовуються світовими виробниками. Одна з всесвітньо відомих фірм PAV Data Systems представила у 2013 р. лазерний канал на 6,5 Гбіт/с. При цьому забезпечується як висока швидкість передачі на великі (для ІЧ систем) відстані, так і малий коефіцієнт BER. Завдяки високим енергетичним характеристикам променя, технології одержання круглого перетину променів і збалансованості параметрів, на сьогоднішній день серійно випускаються системи на 1,25 Гбіт/с з дальністю до 4 км. Застосування новітньої технології мультиплексування по довжині хвилі, реалізованої в оптоволоконних системах (WDM), не має принципових обмежень на застосування її в беспровідних оптичних ІЧ системах передачі. Перші кроки в цьому напрямку вже зроблені провідними виробниками відкритих оптичних систем передавання даних.

ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ОПТИЧНИЙ СИГНАЛ ПРИ ЙОГО ПЕРЕДАВАННІ В АТМОСФЕРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Погіршення умов передачі в атмосфері є комплексним явищем і складається з таких складових як [3]:

- Релеєвське розсіювання;
- Аерозольне розсіювання;
- Молекулярне поглинання;
- Вплив турбулентних повітряних потоків;
- Нелінійні ефекти при розповсюдженні випромінювання.

При розповсюдженні випромінювання крізь повітряну атмосферу мають місце багато факторів, що призводять до неминучих втрат інформаційного сигналу. Поряд з різноманітним ослабленням відбуваються структурні спотворення випромінювання, зумовлені градієнтом температури та турбулентністю, що викликає неоднорідність показника заломлення повітря. Але найбільший вплив вносять такі фактори [4]:

- а) поглинання молекулами атмосферних газів;
- б) розсіювання на молекулах, аерозолях та частинках, присутніх в атмосфері;
- в) ослаблення за рахунок гідрометеорів (мікрочастинок в складі : хмар, туману, дощу, снігу та ін.).

При розрахунку втрат сигналів в атмосфері, в залежності від виду системи передачі в більшості випадків нехтують іншими умовами, що викликають загасання. Для точного опису процесів послаблення оптичного випромінювання використовується величина спектрального коефіцієнта пропускання [3]:

$$\tau_A(\lambda) = \tau_m(\lambda) \cdot \tau_s(\lambda) \cdot \tau_{rs}(\lambda), \quad (1)$$

де $\tau_m(\lambda)$, $\tau_s(\lambda)$, $\tau_{rs}(\lambda)$ — спектральні коефіцієнти пропускання атмосфери, зумовлені поглинанням, розсіюванням і ослабленням за рахунок гідрометеорів відповідно. В атмосфері існують спектральні області, де поглинання дуже мале. Ці області називаються вікнами прозорості. Найбільше значення у сучасній інфрачервоній техніці мають вікна прозорості 0,78—0,95 та 2,1—3,5 мкм. Коефіцієнти пропускання є табульованим і наведений у [3]. Спектральний коефіцієнт пропускання пов'язан з коефіцієнтом ослаблення $k_A(\lambda)$, що визначає втрати сигналу:

$$\tau_A(\lambda) = \frac{\Phi_e(\lambda, d)}{\Phi(\lambda, 0)} = \exp[-k_A(\lambda) \cdot d], \quad (2)$$

де $\Phi_e(\lambda, d)$ — спектральний потік випромінювання, що залежить від відстані оптичної траси d ; $\Phi(\lambda, 0)$ — спектральний потік випромінювання від джерела.

Поглинання в основному відбувається двома основними газами, які присутні в атмосфері в більшій порівняно з іншими концентрації це — пара води H_2O та вуглекислим газом CO_2 . Виходячи з цього, основною залежністю, що вносить найбільший вклад для коефіцієнта поглинання є :

$$\tau_m(\lambda) = \tau_{H_2O}(\lambda) \cdot \tau_{CO_2}(\lambda) . \quad (3)$$

Значення $\tau_m(\lambda)$ табульовані у [3] і визначаються в залежності від значень температури і вологості середовища і довжини оптичної траси. Середній коефіцієнт пропускання для спектрального діапазон становить:

$$\overline{\tau_A} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) d\lambda , \quad (4)$$

де $\lambda_1 - \lambda_2$ — робочий діапазон довжин хвиль системи передачі. Тоді інтегральний коефіцієнт пропускання обчислиться як:

$$\tau_A^i = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda, 0) \tau_A(\lambda, d) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda, 0) d\lambda} , \quad (5)$$

де $\Phi_e(\lambda, 0)$ — спектральний потік випромінювання від об'єкта і (або) фону.

Величина τ_A^i показує характер комплексного пропускання атмосферної траси, і залежить від багатьох факторів. За допомогою показника інтегрального коефіцієнта пропускання τ_A^i можна оцінити характер впливу різних чинників на оптичний сигнал при проходженні його в повітряній атмосфері.

Основним якісним показником оптичного каналу, як і будь-якого каналу зв'язку є інформаційна пропускна здатність. Вона визначається як параметрами самого середовища каналу, так і елементною базою інформаційного тракту (елементами, що її обмежують). Канал має інформаційну пропускну здатність B (біт/с), якщо він здатний передавати сигнал, що займає смугу частот Δf і підтримувати на виході приймача відношення пікового значення сигналу до середньоквадратичного значення шуму S/N . У цьому випадку величина B визначається по формулі Шеннона[1]:

$$B = 2\Delta W \log_2[1+(S/N)^2] . \quad (6)$$

У кожному випадку швидкість передачі інформації прямопропорційна смузі частот ΔW , в якій вона передається і логарифмічно залежить від відношення сигнал-шум. Відношення сигнал-шум визначається ефективним рівнем шуму на вході підсилювача приймача. На практиці величина S/N значно більше одиниці і виражається у [дБ]. Якщо величину S/N позначити як P , то $P = 20\lg(S/N)$, то тоді формула (6) матиме вигляд:

$$B = 0,332X \cdot \Delta W . \quad (7)$$

Максимальна пропускна здатність оптичного каналу визначається з теорем Шеннона і Найквіста:

$$\begin{aligned} \max Data \ rate &= 2B \log_2 V \ [bit / s]; \\ \max Bit \ rate &= B \log_2[V + P][bit / s] \end{aligned} , \quad (8)$$

де B — смуга пропускання каналу передачі; V — кількість рівнів сигналу; P — відношення сигнал шум, $P = S/N$.

Відношення сигнал-шум P у оптичних системах описується відношенням потужності корисного оптичного сигналу до потужності завади $P_S = S/N = P_i/P_n$. Загальна потужність завади P_n оцінюється як [25]: $P_n = \sqrt{\sum_n P_{ijk}^2}$ з для n — кількості її складових. Для визначення чисельних значень максимальної

швидкості передачі даних в атмосферних каналах зв'язку $\max Data \ rate$ доцільно використовувати другу залежність (теорема Шеннона), оскільки вона максимально повно враховує співвідношення сигнал/шум в каналі.

В аналогових системах відношення сигнал-шум визначає якість зв'язку, у цифрових системах - ймовірність передачі помилки. Ймовірність помилки при передачі [3]:

$$BER = \frac{P_s}{P_n} = \frac{P_s}{\sqrt{\sum_n P_{ijk}^2}} = \frac{N_{\text{пом}}}{N_{\text{норм}}} \quad (9)$$

В оптичних системах лазерного зв'язку це відношення можна контролювати за рахунок багатоканальності передачі інформації або адаптивності рівня потужності корисного сигналу. Це дозволяє зменшити ймовірність інформаційної похибки, а відповідно підвищувати швидкість системи. Корегуючи рівень корисного сигналу можна звести BER до мінімуму. В сучасних системах, наприклад, ця величина досягає значень 10^{-12} – 10^{-13} , що відповідає гігабітному трафіку. Кардинальним способом зниження ймовірності помилок при прийомі є введення надлишковості в передану інформацію. У системах передачі інформації без зворотного зв'язку даний спосіб реалізується у вигляді завадостійкого кодування, багаторазової передачі інформації або одночасної передачі по декількох паралельно працюючих каналах. Завадостійке кодування доступніше і дозволяє обходитись меншою надлишковістю, за рахунок чого відбувається підвищення швидкодії каналу.

Для вирішення задач підвищення пропускної здатності, шляхом збільшення відношення сигнал шум у відкритих оптичних каналах можна використати об'єднання оптичних сигналів шляхом технології оптичного хвильового мультиплексування WDM (Wave Division Multiplexing).

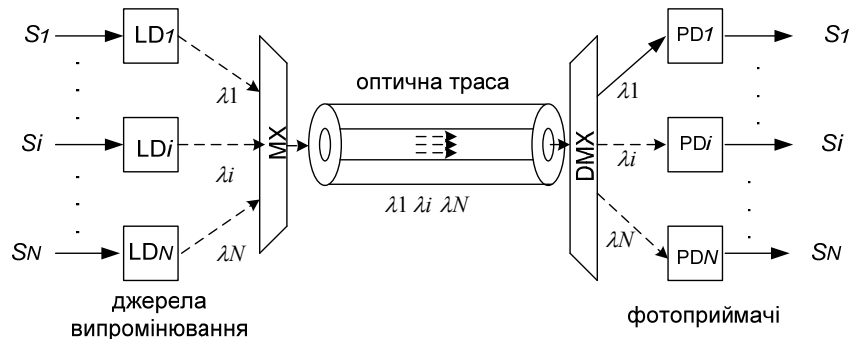


Рис. 1. Застосування технології хвильового мультиплексування WDM у відкритих оптичних лініях передачі даних

Інформаційні сигнали S_1 – S_N представляються на різних довжинах хвиль λ_i ($i = 1$ – N) і передають інформацію одного каналу. Оптичні потоки цього каналу формуються від лазерних джерел LD_1 – LD_N випромінювання. На виході, ці потоки реєструються фотоприймачами PD_1 – PD_N . Мультиплексування різних потоків здійснюється хвильовим мультиплексором MX, а розгалуження на кожен фотоприймач PD_i — демультиплексором DMX.

Оскільки джерела випромінювання мають не визначені довжини хвиль випромінювання, а деякі смуги довжин хвиль $\Delta\lambda_i$ (наприклад, для лазерних діодів LD ВОЛЗ $\Delta\lambda = 2$ – 8 нм, а для світлодіодів LED $\Delta\lambda = 35$ – 40 нм), то необхідною умовою при здійсненні хвильового WDM-мультиплексування є виключення можливості перекриття (накладання) смуг спектрів довжин хвиль для кожного з каналів S_1 – S_N . Оптичні смуги довжин хвиль $\Delta\lambda_3$, $\Delta\lambda_4$ сигналів перекиваються, що створює умови високих завад для цих сигналів при їх відновленні на фотоприймачі WDM-каналу АОЛЗ. Тому для стабільної роботи необхідно розміщувати канали з певним мінімально допустимим інтервалом $\Delta\lambda_{i,i+1}$, як це показано для спектрів сигналів $\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_2$.

Існує добре відома технологія часового мультиплексування інформаційних каналів TDM (Time Division Multiplexing) [4], що також вбачається перспективною при збільшенні як інформаційної пропускної спроможності, так і загальної кількості каналів. Принцип роботи заключається у розділенні інформаційних каналів при передачі у часовому просторі (рис. 2).

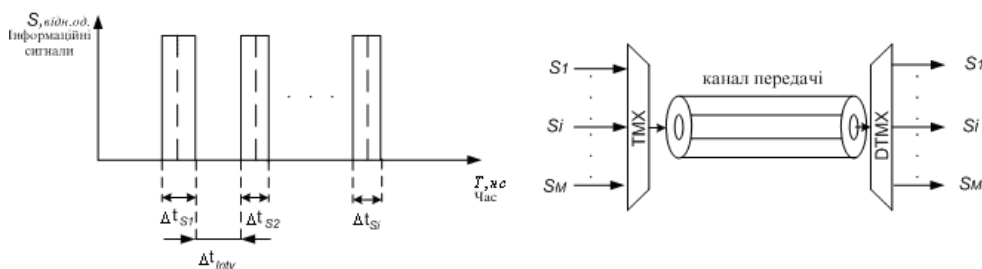


Рис. 2. Принцип роботи відомої схеми часового мультиплексування інформаційних каналів

На рис. 2 прийняті такі позначення: $S_1, S_2, \dots, S_I, \dots, S_N$ — інформаційні сигнали каналів 1– N ; $TMX, DTMX$ — часові мультиплексор та демультимплексор; $\Delta t_{S1}, \Delta t_{S2}, \Delta t_{SI}$ — часові інтервали інформаційних сигналів S_1, S_2, S_I ; Δt_{mn} — часовий інтервал між тривалостями сусідніх інформаційних сигналів.

Зменшивши тривалості інтервалів Δt_{mn} і збільшивши частоту слідування інформаційних каналів можливим є розміщення M -кількості сигналів у одному фізичному інформаційному каналі, і якщо позначити через B -швидкість одного інформаційного каналу, то можливо збільшити загальну швидкість у фізичному інформаційному каналі бінарного провідника до величини $B_z = B \cdot M$.

При комплексному застосування технологій хвильового ущільнення група вхідних S_{in} сигналів формується за допомогою високошвидкісних лазерних джерел випромінювання $LD_1 - LD_N$ (оптичних передавальних модулів на основі лазерних діодів). Детектування інформації забезпечується на виході лінії АОЛЗ оптичними фотодетекторами $PD_1 - PD_N$ (на основі лавинних — APD , або $p-i-n$ — фотодіодів), які формують групу електричних вихідних S_{out} сигналів. Мультиплексовані кодером системи в часі сигнали $S_{TMX1} - S_{TMXN}$ мультиплексуються ще і по оптичним частотам $\lambda_1 - \lambda_N$ мультиплексором MX системи та вводяться у оптичне волокно. На виході відбувається зворотня операція — демультимплексування оптичним демультимплексором DMX та подача на електронний декодер для часового демультимплексування.

Застосування збитковості шляхом формування декількох оптичних несучих частот для одного оптичного сигналу дозволяє формувати паралельні потоки корисних сигналів збільшуючи відношення сигнала-шум та відповідно підвищуючи швидкість передачі АОЛЗ. Єдиний недолік цього підходу — вагоме нагромадження блоків і апаратні витрати.

Враховуючи внесення збитковості за рахунок мультиплексування на різних довжинах хвиль (декілька несучих частот) для одного інформаційного сигналу, з метою підвищення відношення сигнал шум, можна отримати вищі показники інтегрального пропускання атмосферної траси τ_A^i (формула (5)). Так, для узагальненого випадку із M — складовими мультиплексними сигналами ($m = 1..M$) отримуємо інтегральний коефіцієнт пропускання із формули (5) шляхом переходу від інтегралу до узагальненої суми:

$$\tau_{AS}^i = \frac{\sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \Phi_e(\lambda_1 + n\Delta\lambda) \tau_A(\lambda_1 + n\Delta\lambda)}{\sum_{n=0}^{N-1} \Phi_e(\lambda_1 + n\Delta\lambda)}, \quad (10)$$

де $\Delta\lambda$ — інтервал підсумовування між сусідніми довжинами хвиль λ_2 і λ_1 , ($\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$); $N = (\lambda_2 - \lambda_1) / \Delta\lambda$ — номер останнього доданка у сумі.

Таким чином можна показати, що у випадку мультиплексування сигналів по M -довжинам хвиль інтегральний коефіцієнт пропускання буде вищим в загальному випадку за коефіцієнт пропускання оптичної траси відкритого каналу без мультиплексування: $\tau_{AS}^i > \tau_A^i$.

Потік випромінювання на фотоприймачі АОЛЗ від комплексного мультиплексного лазерного джерела можна визначити по формулі:

$$\Phi_e(\lambda)_M = \tau_{AS}^i \sum_{m=1}^{M-1} M_\lambda(\lambda, T) \cdot S_t \cdot \sum M_\lambda(\lambda, T) \cdot S_t, \quad (10)$$

де $M_\lambda(\lambda, T)$ — спектральна енергетична світимість одного лазерного джерела; S_t — площа поверхні джерела випромінювання.

Поеднання технологій ущільнення TDM та WDM у системах АОЛЗ не дає у повній мірі використати переваги по підвищенню швидкості передавання та пропускну здатності сучасних оптичних ліній. В першу чергу. Це пов'язано з тим, що не можливо повністю використати паралелізм формування сигналів в різних часових вікнах в ланках ущільнення TDM (рис. 3).

Як видно з рис. 3, якщо сигнали направляються послідовно у лінію АОЛЗ, то часові затрати зростають пропорційно кількості направлених сигналів. Для 4-х сигналів TDM (рис. 3), які займають 4 часових вікна, часова затримка основного несучого сигналу також збільшується в 4 рази.

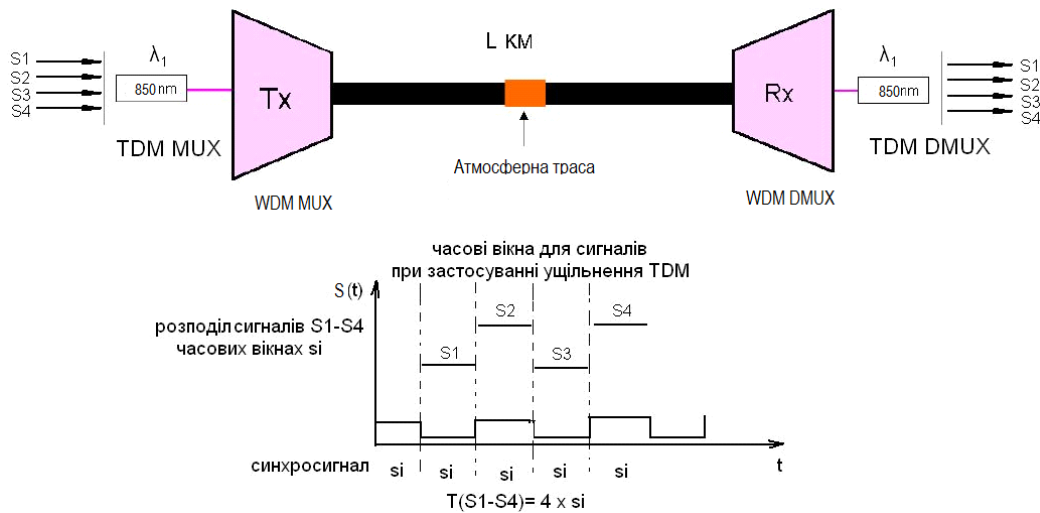


Рис. 3. Обмеження при використанні технології TDM у АОЛЗ

Якщо гіпотетично, представити паралельний процес формування основного ущільненого сигналу на одній довжині хвилі ($\lambda_1 = 850\text{nm}$ як основної для АОЛЗ) із 4-х сигналів, які надходять у АОЛЗ, то часовий вигравш, був би більший на число каналів системи TDM. Відповідно й вигравш по швидкодії АОЛЗ був би пропорційним числу каналів, що надходять на вхід системи TDM-WDM.

Враховуючи вищеприведені умови для випромінювання, яке потрапляє на фотоприймач відкритої системи зв'язку, пройшовши оптичну трасу d , можна записати вираз для інтенсивності [5] :

$$I(\lambda) = -\frac{I_0}{d} \ln \tau_A(\lambda), \quad (11)$$

В результаті апроксимації в ближньому інфрачервоному діапазоні довжин хвиль у вікнах прозорості 0,8... 1.4 мкм отримана залежність спектрального інтегрального коефіцієнта пропускання атмосфери (9):

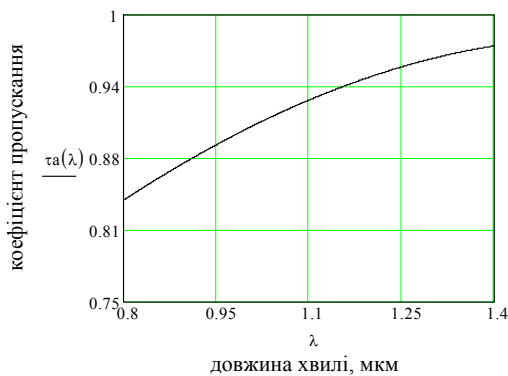


Рис. 4. Спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери

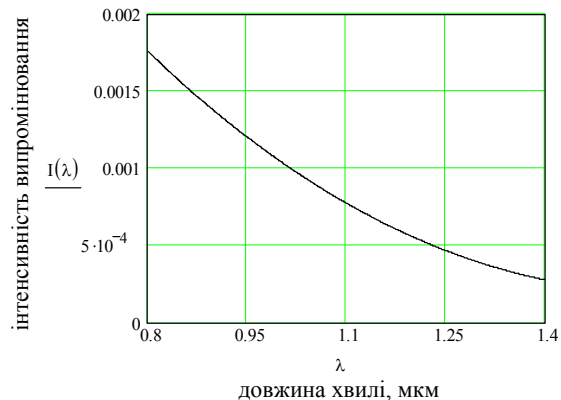


Рис. 5. Інтенсивність випромінювання, прийнятого приймачем адаптивної системи

Відповідно залежність інтенсивності $I(\lambda)$ прийнятої приймачем адаптивної системи згідно з (10).

Як показала практика використання оптичних систем зв'язку дане вікно прозорості відповідає найменшому загасанню оптичного випромінювання [5], до того ж поширені промислові лазерні джерела випромінювання випускаються саме на даний діапазон, що позбавляє від проблеми виготовлення спеціалізованих лазерних діодів. Отриманий графік розрахований з врахуванням дальності передачі до 5 км. На відстанях більше 5 км проявляється гранична нелінійність залежності інтенсивності від довжини хвилі, пов'язана з фоновими шумами від сторонніх джерел засвітлення, а також від проявів турбулентності атмосфери. Детальний опис цих ефектів подано в [7]. Для надійної роботи адаптивної системи передачі даних запас потужності оптичного випромінювання, для забезпечення якісного зв'язку з коефіцієнтом передачі помилки BER $\approx 10^{-12}-10^{-13}$ повинен перевищувати мінімальний поріг інтенсивності випромінювання на фотоприймачі як мінімум в e раз [1].

Для характеристики спотворення оптичного сигналу вводиться поняття модуляційної передаточної функції атмосфери [7]. Модуляційна передаточна функція атмосфери (МПФ) — величина,

яка визначає спотворення сигналу відносно вхідного. Для більшості випадків вважають, що МПФ атмосфери $M_A(\lambda) \approx 1$. Для значних коефіцієнтів ослаблення κ_A на оптичному шляху d МПФ має вигляд:

$$\mu_A(\lambda) = \exp(-\tau_{AS}^i \cdot d), \quad (12)$$

Функціональна залежність для МПФ може бути подана у вигляді графіку (рис. 6).

При створенні мультिकанальної відкритої оптичної системи зв'язку використовують ряд існуючих методик покращення характеристик передачі [6]:

Підвищення потужності випромінювача в кожному спектральному каналі;

Використання безпосередньо максимальної кількості вікон прозорості атмосфери;

Використання колімації (розширення активного випромінюючого діаметру) каналу;

Використання резервних каналів зв'язку;

Використання стійких до завад протоколів передачі, також для збільшення об'єму трафіка;

Використання більш точної елементної бази систем;

Використання просвітлених покриттів та поляризаційних фільтрів.

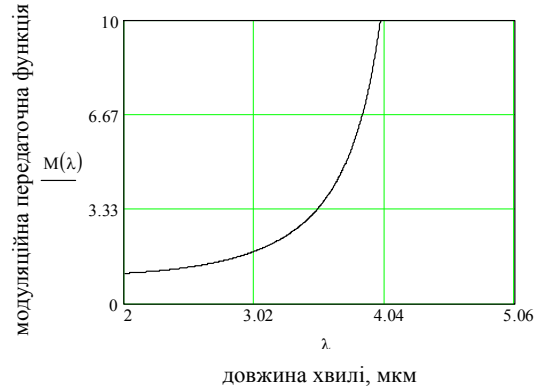


Рис. 6. Залежність модуляційної передаточної функції атмосфери у вікні 2—4 мкм

СТРУКТУРА МУЛЬТИКАНАЛЬНОЇ ВІДКРИТОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

Із врахуванням вищенаведених тверджень та запропонованого підходу мультиплексування каналів АОЛЗ з метою підвищення показника сигнал-шум та інтегрального коефіцієнта пропускання атмосфери, була запропонована структура мультिकанальної системи передачі інформації через повітряну атмосферу (рис. 7).

В більшості випадків реальні системи відкритих каналів мають значно простішу структуру, що знижує їх вартість і робить їх більш зручними і надійними у використанні. Зокрема мультिकанальна АОЛЗ має одну мікро ЕОМ, що забезпечує як керування процесом передачі, так і обробку даних. Система приймача оптичного сигналу не має окремого блоку контролю оптичної траси, характеристики атмосфери контролюються безпосередньо приймачем основного сигналу. Погіршення атмосферних умов сприймається як підвищення рівня завад в каналі.

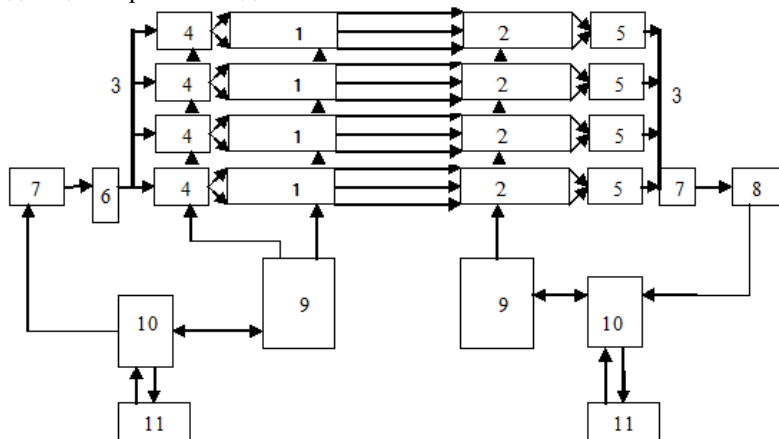


Рис. 7. Структурна схема мультिकанального відкритого оптичного каналу зв'язку:

- 1 — оптичні системи передавальних трактів кожного каналу з автоматичним керуванням;
- 2 — оптичні системи приймальних трактів з автоматичним керуванням; 3 — мультиплексори/тракти об'єднання оптичного сигналу; 4 — лазерні джерела випромінювання оптичного сигналу;
- 5 — надчутливі фотоприймачі (APD/*p-i-n*); 6 — блок модуляції лазерного джерела; 7 — блок підсилення прийнятих сигналів з фотоприймачів; 8 — блок дешифрації і фільтрації від фонових шумів;
- 9 — система автоматичного керування оптичним каналом (мікро-ЕОМ1); 10 — система обробки сигналу (мікроЕОМ2); 11 — інтерфейс зв'язку з зовнішньою інформаційною мережею

Як правило, розповсюджені відкриті системи жорстко закріплюються відносно оптичного каналу (променя) з мінімальним відхиленням, і для адаптації до погодних умов використовують керування потужністю випромінювання лазера, що потребує роботи системи в режимі з запасом потужності передачі. При погіршенні характеристик передачі середовища оптична потужність збільшується, тим самим підтримуючи необхідний поріг сприйняття на фотоприймачі. До того якщо така система розрахована на підтримку зв'язку на далекі відстані ($> 5\text{ км}$) при погіршенні умов передачі відповідне збільшення оптичної потужності в кожному каналі, що компенсує втрати. Іншим підходом для компенсації втрат є відкриті канали побудовані на базі технології з використанням DFB або DBR лазерів — джерел зі змінюваною довжиною хвилі, що дозволяє робити перехід з одного вікна прозорості атмосфери в інше. Але використання DFB або DBR лазерів вимагає виготовлення спеціалізованих дорогих лазерних джерел. На практиці переваги при побудові АОЛЗ надаються звичайним методам керування потужністю випромінювання, так як він є більш простим і надійним у порівнянні з технологією DFB/DBR.

З метою покращення властивостей сигналу що передається та зменшення ширини спектру, що спричиняє збільшення швидкості передачі та зменшення потужності передавача, дані можна піддавати лінійному трьохпозиційному кодуванню в кожному каналі окремо. Цей алгоритм відомий під назвою MLT-3 (Multi-Level Transition). Трьохпозиційний код має 3 логічних рівня: -1 , 0 і $+1$, втрата будь-якого з них супроводжується підтримкою двох останніх — при передачі нуля потенціал сигналу не міняється, а при передачі одиниці сигнал інвертується. Єдина відмінність полягає в тому, що рівень потенціалу, що представляє одиницю, залежить не від одного, а від двох попередніх значень потенціалів, що представляють одиницю. Так, три послідовній передачі одиниці завжди передаються трьома різними потенціалами (-1 , 0 , $+1$), при цьому не важливо, чи знаходились між цими одиницями нулі чи ні. Логічні рівні можуть бути подані діапазоном випромінюваних лазером потужностей. Наприклад $+1$ — (20 — 15 мВт), 0 — (15 — 5 мВт) та -1 (5 — 0 мВт). Даний метод зменшує імовірність похибки передачі до 10^{-14} .

Для встановлення швидкісного та надійного оптичного обміну даними на далекі відстані необхідним виявилась побудова універсального мультиканального відкритого оптичного каналу, який дозволив би максимально покращити і зробити набагато надійнішою передачу інформації, а також був пристосований для роботи в різних погодних умовах, в тому числі з мінливою атмосферою та у важкодоступних місцях.

ВИСНОВКИ

Створення такої мультиканальної системи передачі інформації для сучасних інформаційних мереж забезпечує більш якісний зв'язок, який значно менше залежить від негативних факторів, що є принциповим при забезпеченні високого рівня захисту і завадостійкості. За рахунок багатоканальності можливим є збільшення величини інтегрального коефіцієнта пропускання атмосфери із одночасним зменшенням коефіцієнта виникнення похибки. Крім цього, для такої системи зв'язку більш ефективною є можливість шифрації інформації в кожному каналі окремо із неможливістю відтворення її сторонніми особами в окремому каналі. Для цього використовуються спеціальні методи кодування (наприклад блочний код [2]) та інші.

Ще одним перспективним шляхом збільшення завадозахищеності в мультиканальній системі є використання сучасних методів модуляції і кодування інформації, зокрема трьохпозиційне кодування [2].

Запропоновані підходи створення мультиканальної системи атмосферного відкритого зв'язку мають перспективи у використанні у сучасних мережах в якості заміни провідникових комунікацій.

Сучасні виробники обладнання для атмосферних відкритих оптичних каналів зв'язку не повністю використовують можливості адаптації таких систем до погіршення метеорологічних умов та забезпечення високої якості передачі даних. Використання запропонованих підходів оптимізації керування оптичною потужністю в каналі зв'язку та мультиканальності шляхом використання WDM ущільнення дозволить істотно підвищити характеристики передачі сигналу даних, що гарантує надійний та високошвидкісний оптичний зв'язок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гауер Дж. Оптические системы связи : пер. с англ. — М. : Радио и связь, 1989. — 504 с.
2. Техника оптической связи: Фотоприемники : [пер.с англ.У. Тсанга]. — М. : Мир,1988. — 526 с.
3. Справочник по инфракрасной технике : [Под. ред. У. О. Вульфа, Г. А. Цисиса, в 4-х томах]. — т1.
4. Кулик Т. К. Методика сравнительной оценки работоспособности лазерных линий связи / Т. К. Кулик, Д. В. Прохоров // Технология и средства связи. — 2000. — № 6. — С. 8—10.
5. Клоков А. В. Беспроводная оптическая связь. Мифы и реальность / А. В. Клоков // Технология и средства связи. — 2000. — № 6. — С. 12—16.

6. Медвед Д. Б. Влияние погодных условий на беспроводную оптическую связь / Д. Б. Медвед // Вестник связи. — 2001. — № 4. — С. 154—167.
7. Зуев В. Е. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере в условиях помех / В. Е. Зуев. — М. : Советское радио, 1977. — 435 с.
8. Шереметьев А. Г. Лазерная связь / А. Г. Шереметьев, Р. Г. Толпарев. — М. : Связь, 1974. — 342 с.

Надійшла до редакції 10.12.2014 р.

КОЖЕМ'ЯКО В. П. — д. т. н., професор, академік АІНУ, завідувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

МАЛІНОВСЬКИЙ В. І. — к. т. н., доцент, науковий співробітник кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

КЛЕПШКОВСЬКИЙ А. В. — к. т. н., асистент кафедри біологічної фізики та медичної інформатики, Буковинський державний медичний університет, м. Чернівці, Україна.

НЕЗДОРОВІН В. П. — к. х. н., доцент, доцент кафедри хімічної технології, Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна.

ЯРОСЛАВСЬКИЙ Я. І. — здобувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

КУЗЬМЕНКО Л. В. — студентка 4-го курсу кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.