

ПРИСТРОЇ ТА СИСТЕМИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ, РАДІОЛОКАЦІЇ, РАДІОНАВІГАЦІЇ

УДК 681.3

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНО ДОПУСТИМОЇ ДАЛЬНОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИМИ ЛІНІЯМИ ЗВ'ЯЗКУ

Власенко А.О.

Зважаючи на те, що в сучасному світі кількість інформації, яка потребує передавання, безперервно зростає, існуючі телекомунікаційні системи мають забезпечувати її якісну передачу на великих швидкостях та протяжних відстанях. До таких, зокрема, належить волоконно-оптична технологія.

Слід відзначити, що в лінійному режимі розповсюдження електромагнітних хвиль тільки загасання та дисперсія у оптоволоконних лініях, обмежують можливості систем зв'язку за швидкістю та відстанню передавання інформації. При чому (за умов гранично ефективного використання можливостей системи) збільшення величини одного з цих показників неминує призводить до необхідності зменшувати значення другого. Так, наприклад, зростання швидкості вимагатиме зниження відстані передачі інформації (при незмінності решти параметрів). Тому метою даної роботи є дослідження обмежень, які дисперсія та загасання накладають на швидкість функціонування систем зв'язку. У роботі запропоновано спосіб визначення максимальної відстані передавання за заданої швидкості (адже остання попередньо задається визначеною технологією роботи) без потреби підсилення чи відновлення імпульсів, тобто довжини підсилювальної та регенераційної ділянок, відповідно.

На перший погляд, дане питання може здатися вже достатньо докладно розглянутим, адже над ним в свій час працювала велика кількість як зарубіжних, так і вітчизняних науковців: Агравал, Стерлінг, Фріман, Гроднев, Андрушко та ін. [1-5]. При цьому слід зазначити, що стрімкий прогрес у технологіях виробництва нових видів джерел випромінення та, власне, волоконно-оптичних ліній суттєво підвищив потенційні можливості систем передавання інформації; що в свою чергу, потребує детального якісного та кількісного аналізу. Необхідним також стає визначення доцільності застосування систем передачі з тими чи іншими параметрами в мережах зв'язку, в залежності від їх масштабів та призначення.

Цінність даної роботи полягає в тому, що її результати, отримані в ході наукового аналізу, мають і прикладне значення та можуть бути застосовані в процесі проектування реальних систем зв'язку.

Загасання та дисперсія як явища, що обмежують дальність передачі інформації

Саме загасання та дисперсія призводять до того, що передаваний на заданій швидкості сигнал може бути правильно прийнятим лише на певній обмеженій відстані. Якщо, навпаки, зафіксувати довжину лінії, то справна робота системи із заданою вірогідністю помилки буде можлива лише на певному, обмеженому зверху, діапазоні швидкостей. Власне кажучи, окремо загасання визначає лише допустиму відстань передачі; дисперсія ж обмежує і швидкість, і відстань, а точніше, ємність лінії зв'язку, яка є результатом добутку цих двох параметрів.

В такому випадку, доречніше обмеження, накладені загасанням і дисперсією, оцінювати окремо для заданих параметрів функціонування системи; і наприкінці обирати найжорсткіші з них.

Для повноти розуміння подальшого матеріалу, слід уточнити, в чому конкретно полягає негативний вплив загасання та дисперсії на передавання інформації. Як і в будь-якому середовищі розповсюдження сигналів, у волоконно-оптичних лініях загасання призводить до зменшення переданої потужності. А відтак, при зменшенні її нижче певного порогового значення, на приймальній стороні відтворення надісланого сигналу стане неможливим. Розрізняють [3]:

- власні внутрішні втрати, викликані поглинанням сигналу певних довжин хвиль у кремнії, завдяки його молекулярній структурі;
- втрати у домішках оптоволокна;
- релеєвське розсіювання, зумовлене флуктуаціями миттєвої густини та концентрації молекул за рахунок недосконалості внутрішньої структури волокна;
- втрати через макро- та мікрОВигини.

Дисперсія – це розсіяння у часі спектральних або модових складових оптичного сигналу [4]. Дисперсія призводить до збільшення тривалості сигналу при проходженні волоконно-оптичним кабелем. В свою чергу, тривалість бітового інтервалу, в якому передається імпульс, визначає швидкість передачі інформації. Розширення імпульсу в часовій області вимагає збільшення бітових інтервалів, що також призводить до зменшення швидкості. Альтернативним рішенням цієї проблеми також є скорочення довжини лінії до такої величини, на якій вплив дисперсії буде менш значним.

Переходячи від теоретичних положень до конкретного визначення можливостей передавання інформації на задану відстань, слід розуміти, що кожна окрема волоконно-оптична лінія має власні параметри роботи, тому спочатку розглянемо загальні залежності, на основі яких можливо провести аналіз; і вже після цього, в якості прикладу, виконати чисельний розрахунок для заданих умов функціонування ліній зв'язку.

Аналіз впливу загасання на відстань передавання

Найбільш загальною формулою для визначення втрат є:

$$p = \alpha \cdot l, \quad (1)$$

де p – загасання сигналу, [дБ]; α – коефіцієнт загасання, [дБ/км]; l – відстань передавання інформації, [км].

Цілком логічно, що втрати не мають перевищити енергетичний потенціал лінії, який зазвичай складає близько 35...40 дБ.

Відтак максимальна відстань передавання становить:

$$l = \frac{E}{\alpha}, \quad (2)$$

Слід врахувати те, що окрім погонного загасання, існують і додаткові втрати: при вводі та виводі випромінення, зварювання і т.п.

Відтак, враховуючи те, що кількість місць зварювання будівельних довжин: $N_{\text{звар}} = \frac{l_{\text{пд}}}{l_{\text{бд}}} - 1$, максимальна відстань передавання задовольняє наступній нерівності:

$$l_{\text{пд}} \leq \frac{E - \alpha_{\text{ввід}} - \alpha_{\text{вивід}} - \left(\frac{l_{\text{пд}}}{l_{\text{бд}}} - 1\right) \alpha_{\text{звар}}}{\alpha_{\text{загас}}}$$

де $l_{\text{пд}}$ – довжина ділянки підсилення; $\alpha_{\text{ввід}}, \alpha_{\text{вивід}}$ – загасання при вводі та виводі випромінення; $l_{\text{бд}}$ – величина будівельної довжини; $\alpha_{\text{звар}}$ – загасання при зварюванні будівельних довжин; $\alpha_{\text{загас}}$ – коефіцієнт загасання.

Отже:

$$l_{\text{пд}} \leq \frac{E - \alpha_{\text{ввід}} - \alpha_{\text{вивід}} + \alpha_{\text{звар}}}{\alpha_{\text{загас}} + \frac{\alpha_{\text{звар}}}{l_{\text{бд}}}} \quad (3)$$

Остання формула докладніша, але потребує додаткової інформації щодо пристроїв вводу і виводу випромінення, зварювального апарату та конкретної довжини будівельного відрізка кабелю. Ці дані визначаються конкретною реалізацією системи передачі. Тому розв'яжемо задачу знаходження допустимої відстані передавання за формулою (2). Так, для лінії з погонним загасанням 0,3 дБ/км (робоча довжина хвилі 1,55 мкм) та необхідним енергетичним потенціалом в 35 дБ (обрано жорсткіші умови), довжина ретрансляційної ділянки складатиме 116 км.

Аналіз впливу дисперсії на відстань передавання

Дисперсія є більш складним явищем, порівняно із загасанням. Відповідно, і визначають її більша кількість параметрів: довжина хвилі, початкова форма імпульсу, наявність чи відсутність частотної модуляції та чисельне значення її індексу. І, звісно, тип волокна, адже сучасні волоконно-оптичні кабелі мають різні залежності показника заломлення від довжини хвилі,

який, в свою чергу, визначає коефіцієнт дисперсії.

Отже, дещо деталізуємо розгляд впливу дисперсії на передавання інформації волоконно-оптичними лініями зв'язку.

По-перше, наявність початкової частотної модуляції визначається типом модуляції випромінювання лазера. Якщо вона здійснюється безпосередньою внутрішньою модуляцією інтенсивності струму, то створений імпульс є частотно модульованим. Якщо ж виконується зовнішня модуляція – зміною амплітуди світла у пристрої, що знаходиться вже після лазера (при цьому струм лазера не змінюється і випромінювач працює в стаціонарному режимі), то частотної модуляції вдається уникнути. Але таке рішення на даний момент є досить дорогокоштуючим.

По-друге, слід уточнити, що більшість лазерів випромінюють імпульси гаусівської форми [1]:

$$U(z, T) = \frac{T_0^2}{T_0^2 - i\beta_2 z \cdot (1 + iM)} \cdot \exp \left[-\frac{T^2}{2(T_0^2 - i\beta_2 z \cdot (1 + iM))} \right], \quad (4)$$

де $U(z, T)$ – залежність нормованої амплітуди від відстані z [км] та часу T [пс] у системі координат, що рухається з груповою швидкістю v_g імпульсу:

$$T = t - \frac{z}{v_g} = t - \beta_1 z,$$

T_0 – початкова тривалість [пс], визначена напівшириною імпульсу за рівнем $1/e$ інтенсивності від максимальної; β_2 – коефіцієнт дисперсії групової швидкості, [пс²/км]. Параметр, що визначає уширення імпульсу у дисперсуючому середовищі та наявність компресії його тривалості; M – початковий параметр частотної модуляції, максимальний приріст (девіація) фази: $M = \Delta\omega \cdot T_0 \approx \varphi_{\text{дев}}$.

Для $z = 0$ імпульс матиме наступний вигляд (рис. 1):

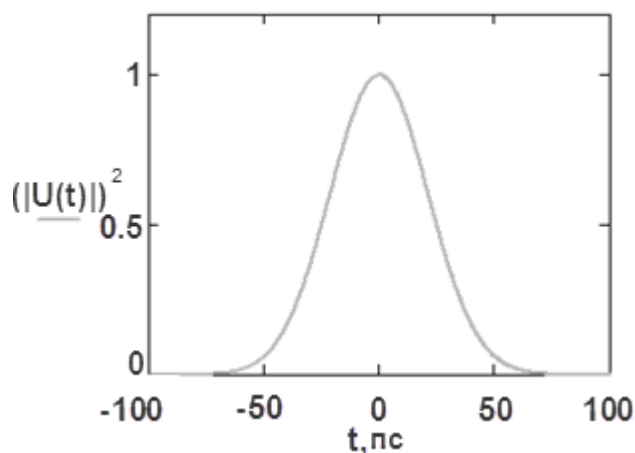


Рис.1. Нормований імпульс гаусівської форми

Коефіцієнт уширення такого імпульсу визначається формулою [1]:

$$k = \left[\left(1 + \frac{M\beta_2 z}{T_0^2} \right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

Але існують і більш прості (і як наслідок, дешевші) напівпровідникові лазери, які випромінюють імпульси супергаусівської форми, близької до прямокутної (рис. 2) [1].

$$U(0, T) = \exp \left[-\frac{1 + iM}{2} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2m} \right] \quad (6)$$

де m – параметр, що визначає ступінь крутизни фронту, в даному випадку $m \geq 20$.

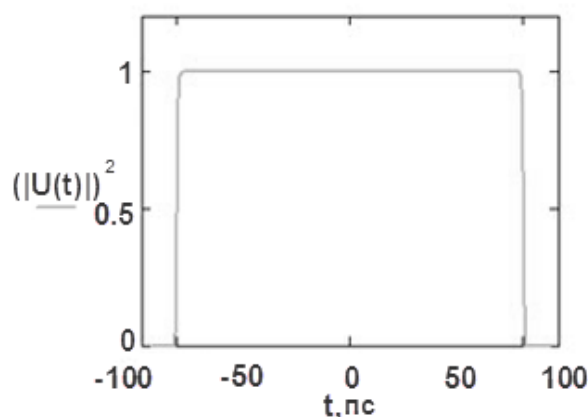


Рис.2. Нормований імпульс прямокутної форми

Коефіцієнт уширення прямокутного імпульсу знаходять за формулою [1]:

$$k = \left[1 + \frac{\Gamma\left(\frac{1}{2m}\right)}{\Gamma\left(\frac{3}{2m}\right)} \cdot \frac{M\beta_2 z}{T_0^2} + \frac{\Gamma\left(2 - \frac{1}{2m}\right)}{\Gamma\left(\frac{3}{2m}\right)} \cdot \frac{(1 + M^2) \cdot (m\beta_2 z)^2}{T_0^4} \right]^{1/2} \quad (7)$$

де Γ – гамма-функція.

Швидкість передавання інформації обернено пропорційна до тривалості бітового інтервалу, який, в свою чергу, знаходиться у прямій лінійній залежності від тривалості імпульсу. Коефіцієнт пропорційності при цьому визначається видом кодування. Так, наприклад, для коду RZ імпульс займає половину інтервалу. В такому випадку тривалість імпульсу та бітова швидкість пов'язані наступним виразом:

$$B = \frac{1}{2 \cdot T_0}, \quad (8)$$

де B – бітова швидкість.

Відштовхуючись від такого допущення, формулу (5) можна записати:

$$k(\beta_2, B, z) = [(1 + 4M \cdot \beta_2 \cdot z \cdot B^2) + (4\beta_2 \cdot z \cdot B^2)^2]^{1/2} \quad (9)$$

Визначимо вираз для функції відстані, яка є максимально допустимою за заданої швидкості передавання і позначимо її як $L(M, \beta_2, B, k)$:

$$L(M, \beta_2, B, k) = \begin{cases} -\frac{M - \sqrt{k^2(M^2 + 1) - 1}}{4\beta_2 \cdot B^2(M^2 + 1)}, \text{ якщо } \beta_2 > 0 \\ -\frac{M + \sqrt{k^2(M^2 + 1) - 1}}{4\beta_2 \cdot B^2(M^2 + 1)} \text{ інакше} \end{cases} \quad (10)$$

Аналогічно з (7) для прямокутного імпульсу вираз для дальності передавання інформації матиме вигляд:

$$L(M, \beta_2, B, k) = \begin{cases} \frac{\sqrt{M^2 \Gamma\left(\frac{0,5}{m}\right)^2 + \Gamma\left(\frac{-0,5}{m}\right) \Gamma\left(\frac{1,5}{m}\right) (M^2 + 1)(1 - k^2)(2m - 1) - M \Gamma\left(\frac{0,5}{m}\right)}{4\beta_2 \cdot m^2 \cdot B^2 \cdot \Gamma\left(\frac{5(4m - 1)}{m}\right) (M^2 + 1)}, \text{ якщо } \beta_2 > 0 \\ \frac{M \Gamma\left(\frac{0,5}{m}\right) + \sqrt{M^2 \Gamma\left(\frac{0,5}{m}\right)^2 + \Gamma\left(\frac{-0,5}{m}\right) \Gamma\left(\frac{1,5}{m}\right) (M^2 + 1)(1 - k^2)(2m - 1)}}{4\beta_2 \cdot m^2 \cdot B^2 \cdot \Gamma\left(\frac{5(4m - 1)}{m}\right) (M^2 + 1)} \text{ інакше} \end{cases} \quad (11)$$

Таким чином, знаючи такі конкретні параметри функціонування системи передачі, як довжина хвилі випромінювання (а відтак і значення коефіцієнта групової дисперсії), коефіцієнт загасання та енергетичний потенціал лінії, необхідна швидкість передавання інформації, допустимий коефіцієнт уширення імпульсу, форма випромінюваного сигналу і значення індексу частотної модуляції ($M=0$ якщо модуляція відсутня взагалі); обравши найменший з розв'язків сукупності рівнянь (2) і (10) або (2) і (11), можна визначити допустиму відстань передачі інформації.

Перейдемо до більш конкретного розгляду систем передавання інформації. Зважаючи на допущення про те, що функціонування системи відбувається на довжині хвилі мінімальних втрат 1,55 мкм, для стандартного волокна коефіцієнт групової дисперсії $\beta_2 = -20$ пс²/км. В цьому випадку необхідна швидкість передавання становить 10 Гбіт/с, система допускає максимальне уширення імпульсу на 20%, тобто $k=1,2$. З урахуванням виразу (8), заданій бітовій швидкості відповідає тривалість імпульсу $T_0 = 50$ пс.

Наступним етапом є розрахунок допустимої довжини передавання інформації для різних типів джерел. Якщо лазер випромінює імпульси гаусівської форми без частотної модуляції, то за даних умов допустима відстань передавання інформації з виразу (10) становить 82,916 км; а якщо прямокутної, то – 6,749 км. У випадку, коли частотна модуляція все ж присутня, окремо слід визначитись із чисельним значенням її індексу. Дослідивши функцію (10) на екстремум, визначаємо, що максимум відстані за-

безпечується при $M=0,833$ і становить 150 км (рис. 3). Таке суттєве збільшення дальності передавання інформації пояснюється ефектом компресії імпульсу [1].

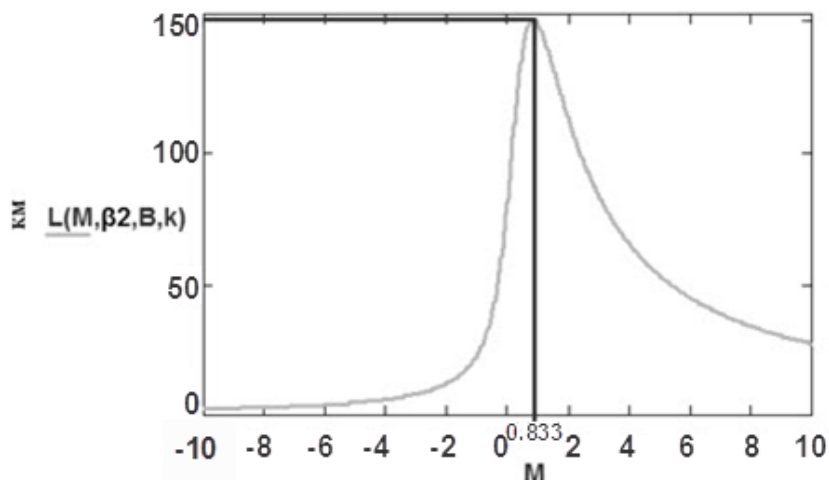


Рис.3. Обмеження дисперсією відстані передавання зі швидкістю 10 Гбіт/с для випадку частотномодульованого гаусівського імпульсу

Для імпульсів прямокутної форми максимум відстані відповідає значенню $M=0,182$ (з виразу (11)) і дорівнює 6,863 км (рис. 4). Остання величина значно менша за випадок гаусівського імпульсу. Дане явище пов'язано з тим, що прямокутний імпульс за рахунок крутіших фронтів має ширший спектр і швидше розпливається в часовій області. Але забезпечення вказаних величин індексів частотної модуляції не завжди є легкою задачею. Зазвичай, він має значення $M=-5\dots-6$. При $M=-5$, допустима відстань передавання суттєво скорочується: 5 км для гаусівського і 1 км для прямокутного імпульсів.

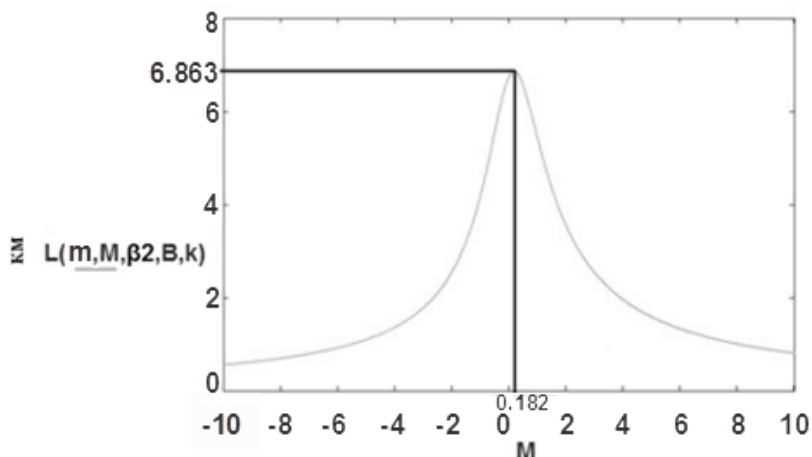


Рис. 4. Обмеження дисперсією відстані передавання зі швидкістю 10 Гбіт/с для випадку частотномодульованого прямокутного імпульсу

Якщо ж мова ведеться про необхідність збільшення відстані передавання інформації, з точки зору боротьби з дисперсією, то замість звичайних ліній більш перспективно використовувати волокна із від'ємною дисперсією [6] (йдеться про знак дисперсійного параметру; коефіцієнт групової дисперсії, навпаки, має додатні значення). Дана особливість зазначених ліній дозволяє проявитись ефекту компресії імпульсів і збільшити допустиму відстань передавання без застосування дорогих лазерів із зовнішньою модуляцією. Для волокна, наведеного як приклад у [6], величина коефіцієнта дисперсії на довжині хвилі 1,55 мкм становить 5,739 пс²/км. В цьому випадку, допустима відстань передавання збільшується до 184,912 км для гаусівських імпульсів та до 5,525 км для прямокутних імпульсів.

Подібні волокна є ще дещо малопоширеними. Більш широкого вжитку отримали лінії зі зміщеною дисперсією, у яких точка найменшої дисперсії суміщена з довжиною хвилі мінімальних втрат. Особливої уваги заслуговують волокна із ненульовою зміщеною дисперсією. Мінімальне значення дисперсійного параметра для таких волокон складає 0,8 пс/нм·км [7], що відповідає величині коефіцієнта дисперсії -1,02 пс²/км [1]. Це дозволяє отримати допустиму відстань передачі: 97,714 км і 21,665 км для імпульсів гаусівської та прямокутної форм, відповідно; що дає суттєвий вииграш у порівнянні зі стандартним волокном.

Порівняння відносного впливу загасання та дисперсії на дальність передавання

Отримані вище дані приведені у табл. 1,2, в яких підкресленням позначено фактор, що обмежує відстань передавання в конкретному випадку.

Таблиця 1

Система передачі	Обмеження за дисперсією, км	Обмеження за загасанням, км
Зовнішня модуляція, стандартне волокно	<u>82,916</u>	116
Внутрішня модуляція, оптимальне значення індексу, стандартне волокно	150	<u>116</u>
Внутрішня модуляція, типове значення індексу, стандартне волокно	<u>5</u>	116
Внутрішня модуляція, типове значення індексу, волокно із від'ємною дисперсією	184,912	<u>116</u>
Внутрішня модуляція, типове значення індексу, волокно зі зміщеною дисперсією	<u>97,714</u>	116

Проведені обчислення показують, що в сучасних системах, які мають забезпечувати високі швидкості передавання, допустима відстань передавання навіть для одномодових волокон в більшості випадків визначається дисперсією, а не загасанням [4]. Виключення становлять лише такі перспективні напрямки, як застосування волокон із від'ємною дисперсією та використання лазерів із оптимальним індексом частотної модуляції при випромінненні імпульсів гаусівської форми.

Таблиця 2

Система передачі	Обмеження за дисперсією, км	Обмеження за загасанням, км
Зовнішня модуляція, стандартне волокно	<u>6,749</u>	116
Внутрішня модуляція, оптимальне значення індексу, стандартне волокно	<u>6,863</u>	116
Внутрішня модуляція, типове значення індексу, стандартне волокно	<u>1</u>	116
Внутрішня модуляція, типове значення індексу, волокно із від'ємною дисперсією	<u>5,525</u>	116
Внутрішня модуляція, типове значення індексу, волокно зі зміщеною дисперсією	<u>21,665</u>	116

Отримані дані дозволяють зробити висновок про те, що використання імпульсів прямокутної форми значно обмежує відстань передавання інформації. При цьому слід зазначити, що дані напівпровідникові лазери є дешевшими у порівнянні з тими, що випромінюють імпульси гаусівської форми; і тому в мережах, які не потребують великих дальностей передачі, більш доцільним є застосування саме таких джерел.

Висновки про практичне застосування отриманих даних

Отже, як впливає з наведених вище даних, з'ясування допустимої дальності передавання інформації, у лінійному режимі розповсюдження, який визначається дисперсією та загасанням сигналу, вимагає проведення обчислень для кожного окремого випадку. При чому не тільки з урахуванням характеристик самого волокна, а й джерел випромінювання і параметрів функціонування системи, таких як, наприклад, допустимий коефіцієнт уширення імпульсу.

Чисельний розрахунок конкретного прикладу показав, що для всіх систем передачі прямокутних імпульсів та для систем передачі гаусівських імпульсів за умови застосування лазерів з внутрішньою модуляцією за типових значень індексу $-5 \dots -6$ та стандартного волокна з великою вірогідністю можна стверджувати, що допустима відстань передавання буде визначатись саме дисперсійними обмеженнями.

Наведена модель може бути застосована як для обчислення допустимої відстані систем, параметри роботи яких вже визначені заздалегідь, так і для проведення їх оптимізації за критерієм максимуму дальності передачі, в системах, які тільки знаходяться на стадії розробки.

Література

1. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика: Пер. с англ. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
2. Стерлинг Дональд Дж. Техническое руководство по волоконной оптике: Пер. с англ. – М.: ЛОРИ, 1998. – 277 с.
3. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи: Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2003. – 590 с.
4. Горднев И. И. Оптические кабели: конструкции, характеристики, производство и применение. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 264 с.

5. Андрушко Л. М. Справочник по волоконно-оптическим линиям связи. – К.: Техника, 1988. – 239 с.
6. Krehlik P. Directly modulated lasers in negative dispersion fiber links. -Warsaw: Opto-Electronics Review 15, 2007. - p. 71-77.
7. Убайдулаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 267 с.

Власенко А.О. Визначення гранично допустимої дальності передавання інформації волоконно-оптичними лініями зв'язку. Наведено результати дослідження обмежуючого впливу дисперсії та загасання сигналу на допустиму відстань передавання інформації в залежності від параметрів функціонування волоконно-оптичної системи.
Ключові слова: дисперсія, загасання, гаусівський імпульс, супергаусівський імпульс.

Власенко А.А. Определение предельно допустимой дальности передачи информации в волоконно-оптических линиях связи. Приведены результаты исследования ограничивающего влияния дисперсии и затухания сигнала на допустимое расстояние передачи информации в зависимости от параметров функционирования волоконно-оптической системы.
Ключевые слова: дисперсия, затухание, гауссовский импульс, супергауссовский импульс.

Vlasenko A.O. The determination of ultimate data transmitting range of fiber-optic system. The results of research of limiting influence of dispersion and fading of signal on possible distance of data transmission depending on the fiber optic system functioning parameters are presented.
Key words: dispersion, fading, Gaussian pulse, Super-gaussian pulse.

УДК 621.376.4

ЗМЕНШЕННЯ ПІК ФАКТОРУ В КАНАЛАХ З OFDM ЗА ДОПОМОГОЮ МЕДІАННОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ І БЛОЧНОГО КОДУВАННЯ.

Білоконь О.В., Головін В.А.

Технологія OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) являється однією з перспективних в сучасних системах передачі даних. Вона є основною в стандарті 802.16d/e – WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) і визнана як пріоритетна у новому стандарті LTE (Long Term Evolution). Основна перевага – це робота в каналах зв'язку Райса, Релея. Ведуться розробки для використання OFDM в мобільних пристроях, але значний пік фактор(ПФ) вимагає лінійних підсилювачів потужності.

Загальний вигляд сигналу з OFDM:

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ a_k \cdot \cos \left[2 \cdot \pi \left(f_0 + \frac{k}{T} \right) t \right] + b_k \cdot \sin \left[2 \cdot \pi \left(f_0 + \frac{k}{T} \right) t \right] \right\}, \quad (1)$$

де T - тривалість тактового інтервалу; N - кількість носійних коливань;