

УДК 621.391

В.П. Лисечко<sup>1</sup>, О.А. Реутов<sup>1</sup>, Г.М. Качуровський<sup>2</sup><sup>1</sup>Українська державна академія залізничного транспорту<sup>2</sup>ТОВ "Київстар GSM", Харків

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОЛІТОНОВИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ

У статті вирішується задача визначення напрямків збільшення швидкості передачі даних в системах синхронної цифрової ієрархії передачі SDH по волоконно-оптичним лініям зв'язку за допомогою солітонової мережі зв'язку. Здійснено аналіз фізичних умов розповсюдження сигналів.

**Ключові слова:** солітонові мережі зв'язку, синхронна цифрова ієрархія, SDH, плезіохронна цифрова ієрархія, PDH, пропускна здатність, солітоновий ефект.

### Вступ

**Постановка проблеми.** У сучасному світі, більшість людей не представляють життя без глобальної мережі «Інтернет» і цифрового телебачення, зараз здійснюється впровадження мережі «Інтернет» для абонентів, що підключені до залізничних мереж зв'язку, а в майбутньому планується впровадження новітніх технологій зв'язку для забезпечення швидкісного руху поїздів, це потребує збільшення швидкості передачі даних від STM-4 до STM більшого рівня, тому що вже зараз спостерігається недостача трафіку для забезпечення необхідного резервування та нормального функціонування мережі зв'язку. Гонка передових провайдерів приводить до здешевлення даної послуги, що призводить до зросту споживчої спроможності абонентів, з кожним удень зростає потреба у високих швидкостях передачі даних у мережах зв'язку на більшій відстані, а також виникає необхідність постійно її збільшувати. Однією з перспективних технологій високошвидкісного й наддалекого зв'язку вважається передача даних за допомогою солітонів.

**Аналіз літератури.** У закордонній і вітчизняній літературі [1 – 5] розглядаються принципи солітонів, їх фізичні властивості та можливість застосування властивостей солітонної передачі даних на мережах волоконно-оптичних лініях зв'язку.

**Мета статті.** Метою статті є аналіз принципів побудови сучасних мереж зв'язку з тимчасовим поділом каналів: опис SDH, PDH мереж зв'язку. Дослідження фізичних властивостей і принципів функціонування солітонових мереж зв'язку. На основі проведеного аналізу робимо висновки.

### Основний матеріал

Ієрархії PDH і SDH взаємодіють через процедури мультиплексування й демультиплексування потоків PDH у системі SDH. Основною відмінністю системи SDH від системи PDH є перехід на новий принцип мультиплексування. Система PDH використовує принцип плезіохронного (або майже синхронного) мультиплексування, наприклад, чотирьох потоків E1 (2048 кбит/с) в один потік E2 (8448 кбит/с) виробляється процедура вирівнювання так-

тових частот прихожих сигналів методом стаффіну. У результаті при демультиплексуванні необхідно робити покроковий процес відновлення вихідних каналів. Наприклад, у вторинних мережах цифрових телефонних лініях зв'язку, найпоширеніш використання потоку E1. При передачі цього потоку по мережі PDH у тракці E3 необхідно спочатку провести покрокове мультиплексування E1 - E2 - E3, а потім - покрокове демультиплексування E3-E2-E1 у пункті виділення каналу E1 це дуже незручно та дорого. Ці проблеми було вирішено в системах зв'язку SDH.

У системі SDH виробляється синхронне мультиплексування/демультиплексування, що дозволяє організувати безпосередній доступ до каналів PDH, які передаються в мережі SDH. Це досить важливе й просте нововведення в технології привело до того, що в цілому технологія мультиплексування в мережі SDH набагато складніше, ніж технологія в мережі PDH, підсилювалися вимоги по синхронізації й параметрах якості середовища передачі й системи передачі, а також збільшилася кількість параметрів, істотних для роботи мережі. Як наслідок, методи експлуатації й технологія вимірів SDH набагато складніше аналогічних для PDH. Швидкості технології SDH постійно зростають тому необхідно впроваджувати новітні системи передачі інформації, наприклад таких як «Солітонні мережі передачі інформації».

Солітон – це особливий вид світлового імпульсу, що при поширенні в певному середовищі, і зокрема – оптичному волокні, зберігає свою форму.

При посиленні солітона через рівні відстані, теоретично він може поширюватися як завгодно далеко. Це пов'язане з тим, що показник переломлення середовища, у якій поширюється солітон, має невелику добавку, що квадратично залежить від потужності сигналу. При малих потужностях сигналу цією добавкою можна знехтувати. Однак при поширенні солітона, що представляє собою хвильовий пакет великої потужності, нелінійні явища й хроматична дисперсія за певних розумів можуть компенсувати зміни форми солітона. При цьому солітон має виняткову стабільність параметрів поширення й стійкістю до зовнішніх збурень. Незважаючи на ті, що дальність поширення солітонів і обмежена зага-

санням сигналу у волокні, ця технологія може успішно застосовуватися для передачі сигналів великої потужності на більшій відстані.

Тимчасові ефекти самовпливу (самоствиску) оптичних імпульсів обумовлені нелінійною добавкою до показника переломлення:

$$\delta_n = \bar{n} \cdot I_{\text{еф}}, \quad (1)$$

де  $\bar{n}_2$  – коефіцієнт нелінійності (у кварцевих світловодах,  $\bar{n}_2 = 3,2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{Вт}$ );  $I_{\text{еф}}$  – ефективне значення інтенсивності визначається відношенням пікової потужності імпульсу  $P_0$  до ефективності площі моди  $S_{\text{еф}}$ ,

$$I_{\text{еф}} = P_0 / S_{\text{еф}}. \quad (2)$$

При поширенні імпульсу на відстань  $z$  його вершина здобуває додатковий фазовий набіг:

$$\delta_\varphi = k \cdot \bar{n}_2 \cdot I_{\text{еф}}^z, \quad (3)$$

де  $k$  – хвильове число, отже, добавка до несучої частоти, що залежить від часу та складає:

$$\delta_\omega = \partial(\delta\varphi) / \partial t, \quad (4)$$

У результаті фазової само модуляції наростає несуча частота від фронту імпульсу до його хвоста, тобто відбувається частотна модуляція. Для швидкості частотної модуляції  $\alpha_{\varphi z} = \partial(\delta\omega) / \partial t$  справедлива оцінка:

$$\alpha_{\varphi z} \approx k \cdot \bar{n}_2 \cdot I_{\text{еф}}^z / 2 \cdot \tau_0^2, \quad (5)$$

де  $\tau_0$  – тривалість імпульсу.

Інший конкуруючий процес – дисперсійне розпливання імпульсу виникає у наслідку дисперсії групової швидкості, що характеризується величиною:

$$k_z = \partial^2 k / \partial \omega^2. \quad (6)$$

Спектрально-обмежений імпульс здобуває частотну модуляцію, швидкість якої  $\alpha_\partial$  залежить від пройденної відстані  $z$ :

$$\alpha_\partial = 2 \cdot z \cdot k_z^{-1} / (z^2 + L_\partial^2), \quad (7)$$

де  $L_\partial = \tau_0^2 / |k_z|$  – дисперсійна довжина. У спектральному діапазоні, що відповідає аномальній дисперсії групової швидкості ( $k_z < 0$ ,  $\lambda > 1,3 \text{ мкм}$ ), частота імпульсу зменшується від фронту імпульсу до хвоста. Із умови балансу конкуруючих процесів  $\alpha_\partial + \alpha_{\varphi z} = 0$  при проходженні імпульсом відстані  $z \ll L_\partial$  можна оцінити критичну потужність, при якій формуються солітони:

$$P_{\text{кр}} = k_z \cdot S_{\text{еф}} / (k \cdot \bar{n}_2 \cdot \tau_0^2), \quad (8)$$

Основою для адекватного математичного опису процесів формування й взаємодії пікосекундного діапазону тривалості є нелінійне рівняння Шрьодінгера, котрому задовольняє комплексна амплітуда поля  $q(\xi, \tau)$ , що обгинає солітоновий імпульс та має вигляд:

$$q = \text{sech}(\tau) \exp(-i\xi/2), \quad (9)$$

де  $\xi$  – відстань, нормована на дисперсійну довжину  $L_\partial$ ;  $i$  – групова швидкість;  $\tau$  – час, що біжить, нормований на початкову тривалість імпульсу:

$$\tau = (t - z/u) / \tau_0^2, \quad (10)$$

Нелінійне рівняння Шрьодінгера належить до класу інтегровальних нелінійних рівнянь і вирішується зворотнім завданням методу розсіювання. Якщо потужність спектрально – обмеженого імпульсу перевищує критичну, то його асимптотичне поведіння визначається солітоною складовою, амплітуда несолітоновій частини рішення убуває.

Важливим класом рішень, що обчислюються аналітично, нелінійного рівняння Шрьодінгера є  $N$ -солітонові імпульси, що відповідають початковим умовам виду:

$$q(0, \tau) = N \text{sech} \tau, \quad (11)$$

де  $N$  – ціле число. Вони являють собою нелінійну суперпозицію  $N$  рухомих з однаковою швидкістю солітонів з амплітудами:

$$q_m = (2m - 1), \quad (12)$$

де  $m = 1, 2, \dots, N$ .

Важливі особливості  $N$ -солітонових імпульсів полягають у тому, що їхнє поширення починається із самоствиску (рис. 1), а модуль комплексної амплітуди періодичний по  $\xi$  за періодом  $\pi/2$ .

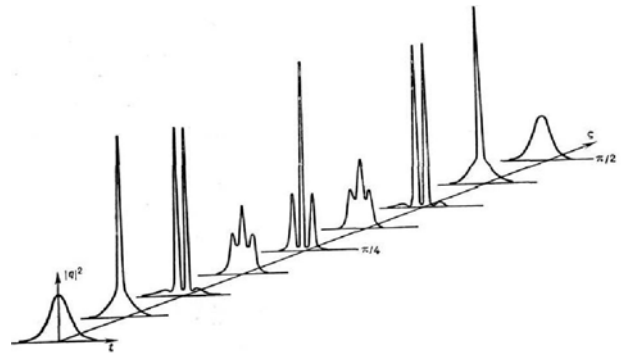


Рис. 1. Самоствиск  $N$ -солітонового імпульсу при нерезонансному самовпливові у волоконному світловоді ( $N = 4$ )

Закономірності формування й поширення односолітонових і  $N$ -солітонових імпульсів були підтвержені експериментами Л. Молленауера (L. Mollenauer), Р. Х. Столена (R. H. Stolen) і В. Гордона (W. Gordon). У цих досвідах за допомогою ретельно сформованих пікосекундних імпульсів лазера, що накачується синхронно, на центрах фарбування (1,5 мкм; повна тривалість імпульсу по напіввисоті 7 пкс/Вт) удалося спостерігати односолітонові й  $N$ -Солітонові імпульси для  $N/4$ . Успішні експерименти із солітонами стимулювали їхнє застосування у волоконно-оптичних лініях зв'язку для надшвидкісної передачі інформації, у техніку формування імпульсів фемтосекундної тривалості, у спектроскопії швидкіснопротікаючих процесів і привели до створення солітонових лазерів.

Теоретично й експериментально досліджений вплив різних факторів, що обурюють (оптичні втрати, дисперсія вищих порядків, інерційність нелінійного відгуку, збурювання форми вхідного імпульсу й параметрів світловода) поширення піко і фемтосекундних солітонів і на їхню взаємодію. Показано можливість компенсації оптичних втрат за рахунок комбінації посилення, що дозволяє реалізувати передачу солітонів на відстані до 50 км.

Поширення потужних когерентних імпульсів світла в резонансно-поглинаючих середовищах також супроводжується солітоновими ефектами. Якщо тривалість імпульсу  $t_0$  істотно менше часів релаксації  $T_1$  і загасання вільної поляризації  $T_2$ , то в результаті поглинання протягом 1-ої половини імпульсу й наступного посилення протягом 2-ої половини імпульсу формується стаціонарний хвильовий пакет, що проникає в середовище на відстань, що істотно перевищує довжину лінійного поглинання. Математичний опис цього процесу ґрунтується на системі рівнянь Максвелла - Блоха. Для спектральне обмежених імпульсів основне значення має площа:

$$S(t, z) = \chi \int_{-\infty}^t A(t', z) dt', \quad (13)$$

де  $\chi = 2 \cdot d / \hbar$ ,  $d$  – дипольний момент резонансного переходу;  $\hbar$  – постійна Планка;  $S = 2\pi$  – імпульси із площею що обгинають.

$$A = 2(\chi\tau_0)^{-1} \operatorname{sech}(t/\tau_0), \quad (14)$$

Групова швидкість поширення імпульсу  $u$  менше швидкості світла. Характерний час затримки  $t_3$  імпульсу на відстані  $L$  пропорційно коефіцієнт лінійного поглинання  $\delta$ :

$$t_3 = L(u^{-1} - c^{-1}) \quad (15)$$

Якщо площа вихідного імпульсу перевищує  $2\pi$  в  $N$  раз, то в процесі поширення він розбивається на послідовність  $N$  імпульсів з різною тривалістю, амплітудами й швидкостями (рис. 2).

Солітонові ефекти проявляються при взаємодії хвильових пакетів з різними несучими частотами в середовищах із квадратичною нелінійністю. У цьому випадку стаціонарний імпульс формується в результаті балансу процесів енергообміну й розстроювання групових швидкостей. Теоретично показана можливість

формування солітону, при змушеному комбінуванні розсіюванні світла і в процесі змушеного розсіювання Мандельштама – Брилюєна, однак експериментально вони не спостерігалися через ряд твердих вимог на параметри випромінювання й середовища.

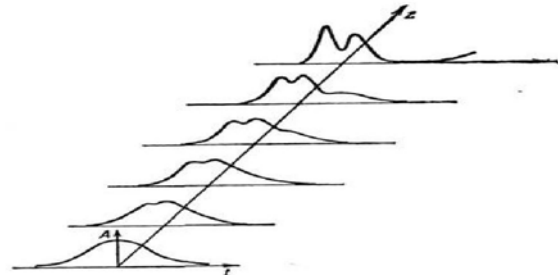


Рис. 2. Розбивка імпульсу на три імпульси при резонансному самовпливові

## Висновки

Технологія SDH є найбільш розповсюдженою технологією передачі даних, вона дозволяє задовольнити передачу різноманітних стандартів передачі даних (PDH, Ethernet, та ін.) у межах глобальної єдиної мережі, що дозволяє передавати необхідну інформацію на різні відстані та забезпечувати необхідний рівень резервування даних, що є важливим на залізничному транспорті, де якісний зв'язок це безпека пасажирів та вантажів. Але постійне зростання швидкості передачі даних потребує впровадження солітонних мереж зв'язку, що теоретично дозволяють передавати інформацію зі швидкістю до STM-4096, що неминуче в майбутньому.

## Список літератури

1. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики / И.Р. Шен. – М.: Наука, 1989. – 474 с.
2. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-Оптические сети / Р.Р. Убайдуллаев. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 267 с.
3. Агравал М. Нелинейная волоконная оптика / М. Агравал. – М.: МИИР, 1996. – 104 с.
4. Енциклопедія "Сучасне природознавство", 2001? *Магістрпресс*, Т7. – С. 188 [Нелінійні хвилі й солітони].
5. Фіз. енциклопедія, 1994, Т. 4. – С. 571 [Солітони].

Надійшла до редколегії 10.03.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Альошин, Українська державна академія залізничного транспорту, Харків.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОЛИТОНОВЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

В.П. Лысечко, А.А. Реутов, Г.Н. Качуровский

В статье решается задача определения направлений повышения скорости передачи данных в системах передачи синхронной цифровой иерархии SDH по волоконно-оптическим линиям связи посредством применения солитонных сетей связи. Осуществлен анализ физических условий распространения сигналов.

**Ключевые слова:** солитонные сети связи, синхронная цифровая иерархия, SDH, плезихронная цифровая иерархия, PDH, пропускная способность, солитонный эффект.

## PROBING OF PRINCIPLES OF PERFORMANCE SOLITON OF TRANSMISSION NETWORKS

V.P. Lysechko, A.A. Reutov, G.M. Kachurovsky

The problem is solved of determination of directions of boosting of bit rate in transmission systems of the synchronous digital hierarchy SDH on fiber-optic links of communication by means of application soliton transmission networks in article. The analysis of physical propagation conditions of signals is carried out.

**Keywords:** soliton transmission networks, the synchronous numeral hierarchy, SDH, digital-pleisochronous hierarchy, PDH, transmission capacity, soliton effect.