

І.М. Марченко, магістрант

К.С. Дорошенко, аспір.

Національний технічний університет України «КПІ»

РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ СТАБІЛІЗАТОРА СИГНАЛУ ДЛЯ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З OFDM-МОДУЛЯЦІЄЮ

Стрімке зростання кількості бездротового телекомунікаційного обладнання та його користувачів призвело до нагальної необхідності економії ресурсів середовища передачі даних. Таким чином, розробка систем, які за умови максимального ущільнення лінії зв'язку підтримують високу якість інформаційного каналу та виважену технічну швидкість передачі даних, стає нагальною необхідною з економічної точки зору.

Постановка проблеми. Системи телекомунікаційного обладнання, що використовуються для побудови бездротових засобів прийому та передачі дискретних голосових даних по аналоговому каналу, у здебільшого випадків функціонують в агресивному для даного діапазону частот середовищі. Мається на увазі, що для діапазону вільного використання за WLAN-стандартом з фокусуванням на HIPERLAN/2 стандарт (що на фізичному рівні в основному збігається із IEEE802.11a стандартом) [1], будь-яка фізична неоднорідність каналу з великою густиною речовини обумовлює виникнення нелінійних спотворень.

За умови високих вимог до достовірності передачі використання неспеціалізованого технічного забезпечення для вказаного вище типу СПД не задовольняє, тому виникає необхідність системи стабілізації, що враховує параметри нелінійності каналу великого ступеня.

Щоб забезпечити процес розробки даного пристрою, необхідно в першу чергу проаналізувати та змоделювати стандартну структуру зазначеної системи, а також обумовлений характер впливу завад у каналі, тобто треба забезпечити:

- виконання помірковано максимального ущільнення каналів лінії зв'язку;
- можливість дослідження ступеня впливу зовнішніх спотворень середовища;
- реалізовувати механізми, що дозволяють компенсувати вплив завад при різному ступені нелінійності каналу;
- менший рівень питомих витрат в розрахунку на один канал.

Аналіз досліджень. В роботі [2] викладено методику отримання рівнянь, що характеризують функціонування окремих блоків телекомунікаційних систем, а в роботі [3] розглядаються питання щодо визначення і оцінки параметрів систем зв'язку та їх сигналів.

На сьогоднішній день існує велика кількість методів ущільнення каналів з огляду на той факт, що необхідно забезпечити найвищий ступінь ущільнення в бездротовій лінії зв'язку, з ряду методик було вибрано модуляцію з ортогональним частотно-розподіленим мультиплексуванням – OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing). На практиці сигнал OFDM отримується шляхом використання швидкого перетворення Фур'є. Перетворення Фур'є переводить часову функцію $x(t)$ в частотну функцію $X(f)$

через інтегральне співвідношення $X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-j2\pi ft) dt$; швидке перетворення Фур'є – це алго-

ритм обчислення дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) за кількість дій, яка менша, ніж $O(N^2)$, що необхідно для прямого (за формулою) обчислення ДПФ (де N – кількість несучих в каналі, що аналізується функцією O – загальноновживаний метод визначення кількості кроків алгоритму). Таке перетворення виконується за $O(N(p_1 + \dots + p_n))$ дій при $N = p_1 p_2 \dots p_n$, зокрема при $N = 2^n$ буде потрібно $O(N \log(N))$ дій. ДПФ

перетворює ряд чисел a_0, \dots, a_{n-1} , в ряд чисел b_0, \dots, b_{n-1} , такий, що $b_i = \sum_{j=0}^{n-1} a_j \varepsilon^{ij}$, де $\varepsilon^n = 1$ і $\varepsilon^k \neq 1$ при $0 <$

$k < n$. Алгоритм швидкого перетворення може застосовуватись для будь-яких комутативних асоціативних кілець з одиницею, насамперед цей алгоритм застосовують для поля комплексних чисел (з $\varepsilon = e^{2\pi i/n}$) та для кілець відрахувань.

Основним кроком алгоритму є зведення задачі N чисел до задачі для $p = N/q$ числам, де q — дільник N . Нехай ми вже вміємо розв'язувати задачу для N/q чисел. Застосуємо ПФ до набору $a_i, a_{q+1}, \dots, a_{q(p-1)+i}$ для $i = 0, 1, \dots, q-1$. Таким чином за $O(Np)$ дій розв'язати висхідну задачу можна таким чином: зазначи-

мо, що $b_i = \sum_{j=0}^{n-1} a_j \varepsilon^{ij} (\sum_{k=0}^{p-1} a_{kq+j} \varepsilon^{kjq})$. Вираз у дужках нам уже відомий – це $i \pmod{p}$ – число після ПФ j -тої групи. Таким чином, для розрахунку кожного b_i потрібно $O(q)$ дій, а для розрахунку всіх b_i — $O(Nq)$

дій, тобто менше, ніж $O(N^2)$.

Вказаний алгоритм, з причини великої ресурсоемності обчислень, значною мірою впливав на час обробки сигналу, тому не задовольняв умови побудови телекомунікаційних мереж, але використання сучасної мікропроцесорної техніки з великою швидкістю обробки даних надало можливість застосувати цей доробок.

Метою роботи є розробка та моделювання стабілізатора сигналу для системи передачі даних з OFDM-модуляцією.

Основна частина. OFDM-модулятор, що вибрано в нашій моделі, є цифровою схемою модуляції, яка використовує велику кількість суміжно розташованих ортогональних піднесучих. Кожна піднесуча модулюється за звичайною схемою модуляції (наприклад квадратурно-амплітудна модуляція) на низькій символній швидкості, зберігаючи при цьому загальну швидкість передачі даних, як і за звичайною схемою модуляції однієї несучої для тієї ж смуги пропускання. Стандартна схема модулятора була вибрана згідно з рекомендаціями [4].

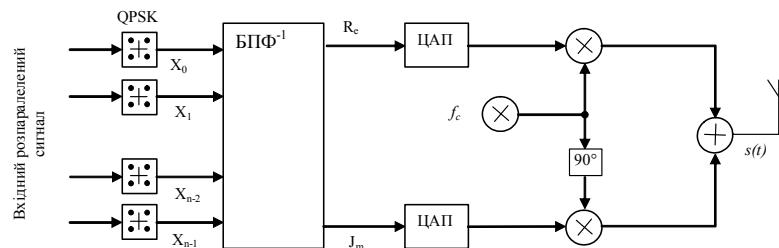


Рис. 1. Структурна схема системи каналу в частині процесу модуляції

Основною перевагою OFDM, порівняно зі схемою однієї несучої, є її здатність протистояти важким умовам у каналі. Наприклад боротися із загасанням в області ВЧ в мідних дротах великої протяжності, вузькосмуговими завадами та частотно вибірковою затуханням, які зумовлені багатопроменевим розповсюдженням. Стабілізація каналу спрощується внаслідок того, що OFDM сигнал може розглядатися не тільки як множина повільно модульованих вузькосмугових сигналів, а й як один швидко модульований широкосмуговий сигнал. Низька символна швидкість дає можливість використовувати захисний інтервал між символами, таким чином стає можливою компенсація часового розсіювання та «міжсимвольних» спотворень.

Ущільнення каналів у лінії зв'язку призводить до збільшення вірогідності спотворення сигналу за рахунок збільшення кількості інформації, що припадає на одиницю часу. Дане явище обумовлює необхідність чіткого аналізу множини спотворень, які обґрунтовуються природою середовища передачі сигналу.

Здебільшого дослідження бездротових фізичних ліній вказували на присутність постійно діючої хаотично розподіленої амплітудної завади, зумовленої фізичною неоднорідністю каналу, фазових впливів, що виникають внаслідок внутрішньої інтерференції в каналі та ін. Математичні моделі каналів для вищевказаних сигналів у декасантиметровому діапазоні хвиль умовно можна розділити на статичні та динамічні. До статичних відносять одномірні щільності ймовірностей коефіцієнтів передачі радіостанції, що відображають розподіл оминаючих сигналів і перешкод, а також їх рівні. Динамічні моделі описують тимчасову зміну параметрів сигналу і перешкод.

При моделюванні каналів зв'язку можливі два суттєво різні підходи – структурно-фізичний і феноменологічний [5]. Перший з них передбачає вивчення реальних перетворень переданого сигналу і механізму створення перешкод у середовищі поширення з урахуванням його фізичних властивостей і відображення структури цих перетворень з необхідною точністю в моделі. До моделей цього типу належать, наприклад, опис лінійної передачі за допомогою телеграфних рівнянь, просторово-часових радіоканалів – на основі рівнянь Максвелла тощо.

Феноменологічний підхід базується на представленні каналу «чорним ящиком», внутрішня структура якого не розглядається, і вимагає підбору моделі лише за ознакою необхідного наближення, які спостерігаються на виході сигналів при заданих сигналах на вході. При описі безперервного каналу, організованого в діапазоні 5189, 5200, ..., 5320 та 5500, 5520, ..., 5700 МГц [5], було б досить важко врахувати всі реальні перетворення електромагнітного поля в антенах та вільному просторі.

Замість цього, такий канал в основному розглядають як деякий нелінійний складений елемент з певною передатною функцією або імпульсною перехідною характеристикою, тобто вдаються до феноменологічної моделі. В нашому випадку канал було змодельовано з параметрами амплітудної та фазової нелінійності, які відображені на рис. 2.

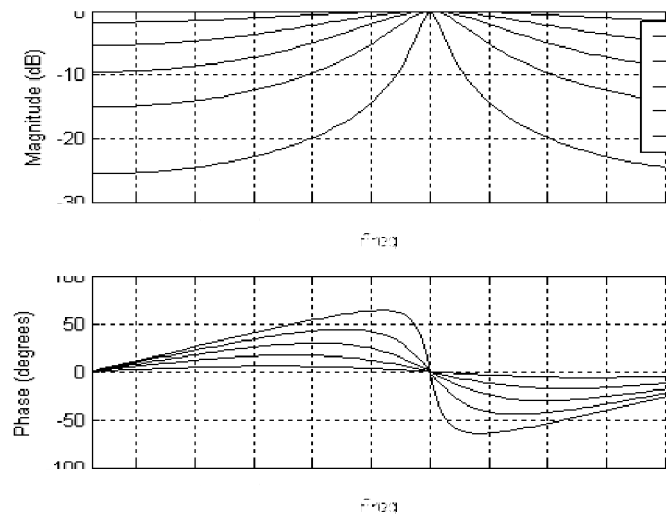


Рис. 2. Характеристики нелінійної ланки, що вибрано як моделі електромагнітного поля в антенах та вільному просторі

Таким чином, з урахуванням всіх вищезгаданих пунктів отримуємо структуру системи, що досліджується.

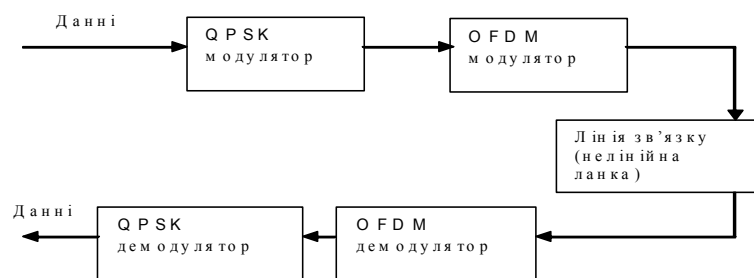


Рис. 3. Структурна схема системи передачі даних з ортогональним частотно-розподіленим мультиплексуванням та урахуванням спотворень в лінії зв'язку

Закономірно як додаткове технічне забезпечення вибрати такий клас обладнання, яке б забезпечувало належний рівень компенсації впливу даного виду завад. Основними методиками, що можливі при розв'язанні задачі стабілізації, – отримання інформації щодо степеня спотворення каналу – в даному випадку є застосування пілот-сигналів та еталонного фрейму в рамках реалізації стабілізатора сигналу-“еквалайзера” (equalizer).

Метод використання пілот-сигналу полягає в тому, що на 80 піднесучих (в один момент часу) передаються 48 інформаційних символів, та 6 пілот-сигналів постійних у часі й спектрально розподілених по сигналу. У зв'язку з тим, що на приймальній стороні нам заздалегідь відомо, які значення повинні мати висхідні 6 “пілот”-сигналів, отримуємо можливість визначити інформацію про стан каналу, а саме: інтерполюючи значення 6 “пілот”-сигналів, є вірогідність отримати приблизну характеристику стану каналу зв'язку та компенсувати втрати основного сигналу за отриманим законом спотворення. Даний метод дозволяє швидко і з щільною періодичністю (кожен фрейм) відпрацьовувати помилки, що вносяться нелінійностями каналу зв'язку.

Таким чином, в середовищі моделювання Matlab за допомогою базових блоків модуля simulink було реалізовано зазначену структуру та отримано такі зображення спотворень за збільшенням пік-фактора перешкоди зверху вниз:

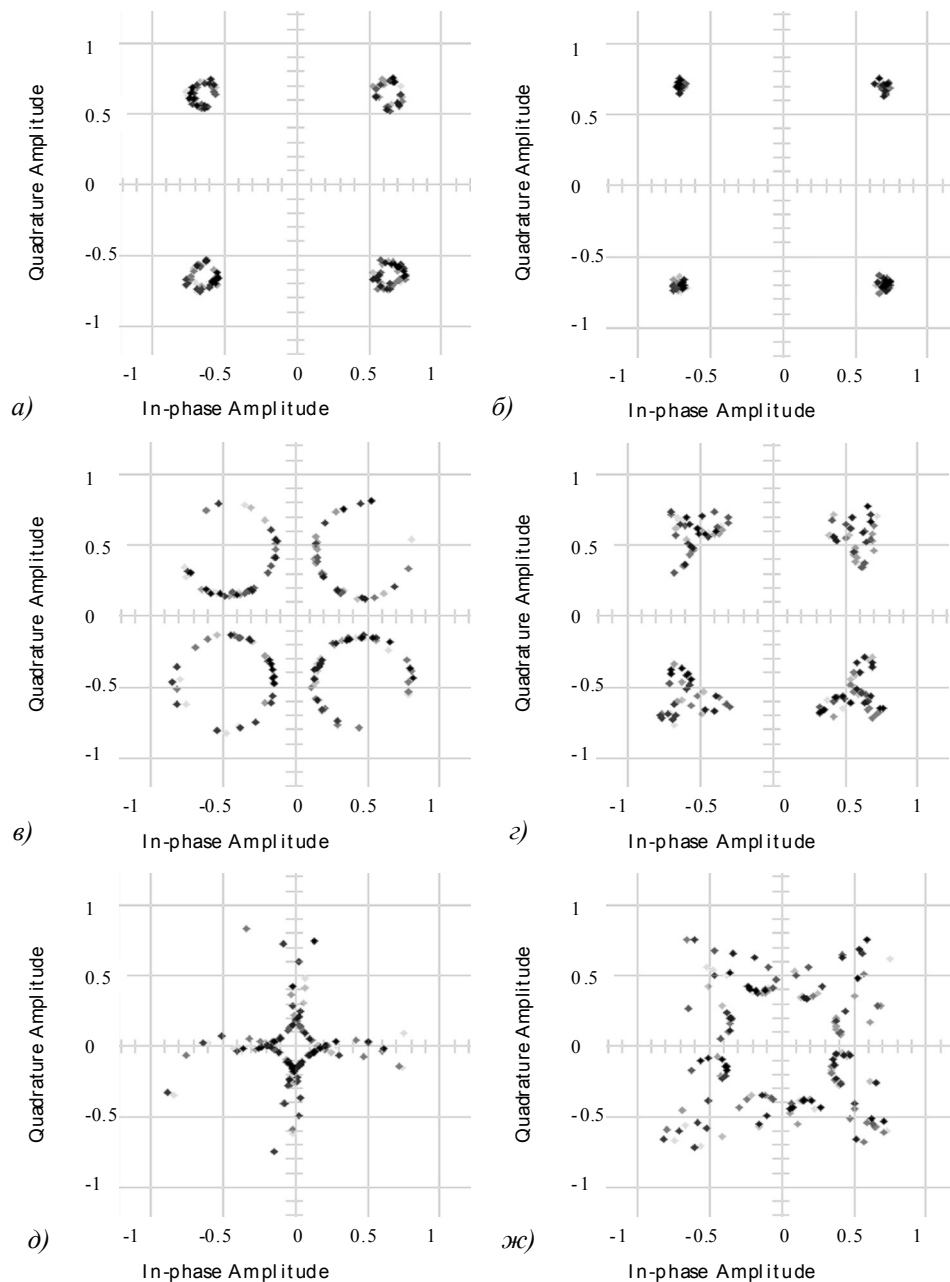


Рис. 4. Спотворення сузір'я QPSK-модульованих сигналів на комплексній площині: після лінії зв'язку (а, в, д) та групування по областях за допомогою методу пілот-сигналів (б, г, ж)

Як видно із зображених характеристик, метод має суттєві недоліки, зокрема при інтерполяції більшість даних обчислюються приблизно, що у випадку виникнення піків у діапазоні між пілот-сигналами призводить до спотворення форми модульованих піднесучих.

Припустивши, що нелінійність каналу постійна у часі та стрибкоподібно не змінюється, ми можемо аргументувати використання методу постійного фрейму. Метод полягає в тому, що до групи з 24-х фреймів додається 25-й – еталонний, заздалегідь розрахований, що слугуватиме індикатором різниці форм сигналів до і після каналу, для всіх піднесучих без винятку. Даний метод усуває вплив будь-якої симетричної нелінійності в каналі, а також відпрацьовує дію несиметричних перешкод. Модель зазначеної конфігурації СПД в пакеті Matlab виглядає таким чином (рис. 5).

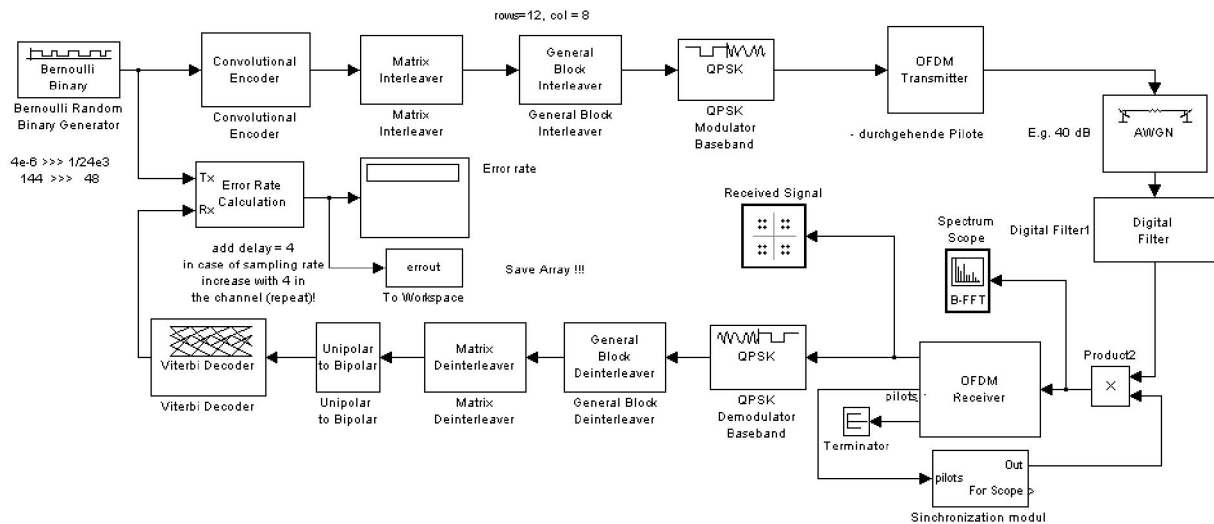


Рис. 5. Модель СПД зі стабілізаторами сигналу за методом пілот-сигналу та еталонного фрейму і OFDM модуляцією

За умови використання пілот-сигналів система лише частково компенсувала помилки каналу, в той час як методика застосування еталонного фрейму дозволила повністю «відпрацювати» спотворення, що виникали внаслідок сталой в часі нелінійності каналу. Характеристики подібні на ідеальний варіант (рис. 4, б) при максимальному ступені спотворення.

Проблема даного методу, з фізичної точки зору, полягає в тому, що:

1) при зміні характеру впливу нелінійності в каналі повинно пройти всі 24 фрейми, перш ніж стабілізатор відреагує на перешкоду. Щоб уникнути такого явища, достатньо за час роботи передавача та приймача не змінювати різко геометрію простору та антени, а при зміні обстановки провести налаштування заздалегідь;

2) метод застосування еталонного фрейму накладає додаткові витрати на каналні ресурси, тому виникає необхідність аналізу питомих витрат залежно від типу сервісної інформації, що додається до кожної наступної послідовності, сформованої з 24-х інформаційних фреймів.

Алгоритм обрахування оптимальної конфігурації еталонного фрейму за загальноприйнятою методикою границі Шеннона реалізовувався також ресурсами середовища Matlab:

- *res* – матриця всіх можливих варіантів заголовків (наповнення фреймів);
- *ifft Y = (X)* повертає дискретне перетворення Фур'є (DFT) від вектора X, обчислюється зі швидким перетворенням Фур'є (FFT) алгоритму. Якщо X – матриця, *ifft* повертає DFT у кожному стовпці матриці;
- *utmean = mean (yt)* – функція, що обчислює середні значення в кожній колонці заданого масиву, або відслідковує середні значення в послідовності входних сигналів протягом часу;
- *utrms = std (yt)*, якщо *yt* є матрицею, *std(yt)* повертає рядок, що містить вектор стандартних відхилень (девіацію) елементів кожного стовпчика X.
- *lmax = find (utmax == ziel)* знаходить порядковий номер рядка в матриці.

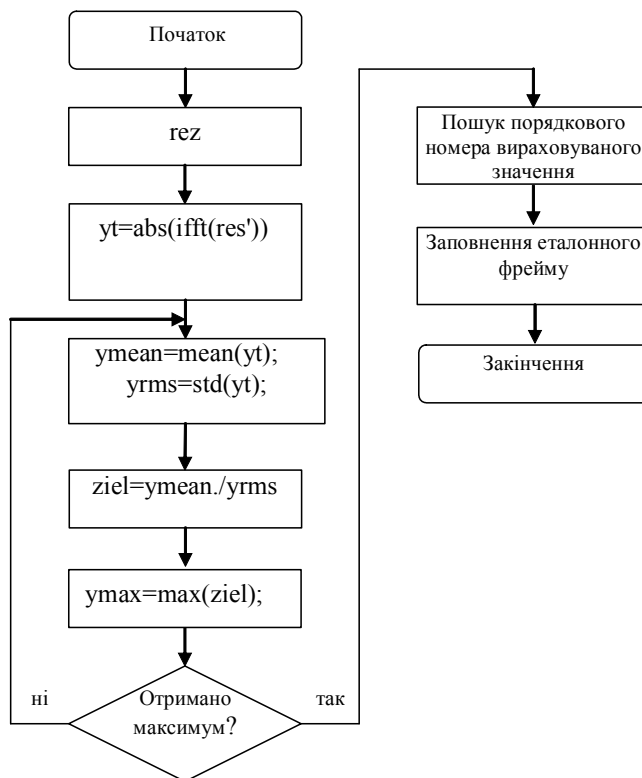


Рис. 6. Алгоритм пошуку еталонного фрейму

В результаті отримуємо заголовок фрейму максимально показовий із набору можливих оптимальних витрат на передачу сервісної інформації.

Таким чином, було досліджено роботу стабілізуючих алгоритмів для широкого набору перешкод та визначено основні недоліки вибраних методик (табл. 1):

Таблиця 1

Результати порівняльного аналізу

Тип системи	Показники						
	Загальний час знаходження символу в каналі	Складність схемного виконання	Низький ступінь нелінійності (пряма видимість)	Середній ступінь нелінійності	Високий рівень спотворень	Час до дефектування нелінійності	Отримання повної матриці спотворень
Без стабілізатора	однаковий	+	+	-	-	не відпрацьовує	-
Із стабілізатором, що використовує пілот-сигнали	однаковий	+	+	-	-	+	-
Із стабілізатором, що використовує еталонний фрейм	однаковий	-	+	+	+	-	+

Висновки. В результаті слід зазначити, що розроблена в пакеті Matlab модель системи з OFDM-модуляцією та різними типами стабілізаторів сигналу дозволила без втрат швидкості виконувати максимальне ущільнення каналів лінії зв'язку, досліджувати механізми, що утримують ймовірність помилки на заданому рівні при існуючому спотворенні інформаційного каналу, визначити рівень питомих витрат в розрахунку на один заголовок фрейму та ін. Метод з ЕФ забезпечує вищий рівень захисту від спотворень, ніж інші досліджувані за умови однакових умов спотворення інформаційного каналу. Для компенсації недоліків еквалайзера з ЕФ, визначених протягом моделювання, можливе часткове комбінування схемних рішень.

Отримані результати можуть бути використані за відправну точку для реалізації OFDM-системи бездротової передачі цифрових голосових сигналів як можливої альтернативи для односмугових систем,

розповсюджених на сьогоднішній день.

Автори статті висловлюють свою вдячність професору Joachim Kunze за керівництво в роботі над проектом, та доценту Полтораку Вадиму Петровичу за оцінку та рекомендації при написанні даної статті.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Richard van Nee, Ramjee Prasad* Ofdm for wireless multimedia communications – Boston, London.: Artech House Publishers, 2000. – 765 с.
2. *Глоба Л.С.* Математичні основи побудови інформаційно-телекомунікаційних систем. – К.: Політехніка, 2003. – 276 с.
3. *Проксис Дж.* Цифровая связь – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
4. *Жураковский Ю.П.* Передача информации в ГАП: Учеб. пособ. для студ. вузов по спец. «Автоматика и управление в технических системах». – К.: Вища школа, 1991. – 216 с.
5. *Кловский Д.Д., Конторович В.Я., Широков С.М.* Модели непрерывных каналов связи на основе стохастических дифференциальных уравнений / Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
6. *ETSI TS 101 475 V1.2.2 (2001-02)* Broadband Radio Access Networks (BRAN): HIPERLAN Type 2: Physical (PHY) Layer.

МАРЧЕНКО Ігор Михайлович – магістрант кафедри автоматички та управління в технічних системах Національного технічного університету України "КПІ".

Наукові інтереси:

- цифрові системи передачі даних;
- математичне моделювання.

ДОРОШЕНКО Катерина Сергіївна — аспірант кафедри автоматички та управління в технічних системах Національного технічного університету України "КПІ".

Наукові інтереси:

- системи та мережі передачі даних;
- геоінформаційні системи.

Подано 15.11.2008

Марченко І.М., Дорошенко К.С. Розробка та моделювання стабілізатора сигналу для системи передачі даних з OFDM-модуляцією

Марченко И.М., Дорошенко К.С. Разработка и моделирование стабилизатора сигнала для системы передачи данных с OFDM-модуляцией

Marchenko I., Doroshenko K. Design and simulation of signal equalizer for data transmission systems with OFDM-modulation

УДК 621.391.037.372

Разработка и моделирование стабилизатора сигнала для системы передачи данных с OFDM-модуляцией / И.М. Марченко, К.С. Дорошенко

Рассмотрено возможность использования методов стабилизации сигналов в системе передачи данных с OFDM модуляцией. Разработана модель оборудования и среды распространения сигналов, для СПД с OFDM в пакете MatLab. Смоделированы исследуемые эквалайзеры. Обнаружено преимущества и недостатки решений. Приведены результаты исследований.

УДК 621.391.037.372

Design and simulation of signal equalizer for data transmission systems with OFDM modulation / I.Marchenko, K.Doroshenko

Consider use of the signal equalizer, in the data transmission system with OFDM modulation. The model of equipment and channel for the DTS with OFDM (as a package of MatLab) was designed. Different types of equalizers were simulated. Advantages and disadvantages of solutions were discovered. A result was shown.