

Андрій Олександрович Зінченко
Роман Миколайович Возняк

ВДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ СТАНУ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ ІЗ СЕЛЕКТИВНИМИ ЗАВМИРАННЯМИ ТА НАВМИСНИМИ ЗАВАДАМИ

Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Технологія ортогонального частотного мультиплексування з розділенням – OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) знаходить широке застосування у сучасних системах радіозв'язку [1–4]. Ідея OFDM полягає в тому, що потік переданих даних розподіляється по множені частотних підканалів і передача ведеться паралельно на всіх цих підканалах. В таких системах досягається висока швидкість передачі за рахунок одночасної передачі даних по всіх підканалах, а швидкість передачі в окремому підканалі може бути і невисокою. Однією з переваг даної технології вважається відносно висока стійкість стосовно частотно-селективних завмирань і зосереджених завад. Це дозволяє розглядати можливості застосування технології OFDM у військових системах радіозв'язку, які діють в умовах активного радіоелектронного подавлення.

Одним з основних завдань при проектуванні OFDM-систем зв'язку є вибір придатного алгоритму оцінювання частотної передаточної характеристики каналу. Оцінювання каналу – одна з найбільш важливих задач, що необхідно вирішувати при компенсації спотворень внаслідок неідеальності каналу та для точного виконання перетворень при передачі та прийманні в системах ортогонального частотного мультиплексування [5, 6]. Дослідження в цій області відображені в ряді робіт, наприклад [7–9]. Розповсюдженим методом оцінки є використання частини піднесучих із заздалегідь відомими параметрами у якості пілот-сигналів, рівномірно розташованих в частотно-часовій структурі OFDM-сигналу (далі будемо називати їх пілот-несучими) [2].

Пілотні сигнали – це фіксовані псевдовипадкові послідовності з точно відомими значеннями фаз та амплітуд сигналів. Призначення пілотних сигналів – синхронізація та оцінка параметрів каналу передачі.

Точність оцінки передаточної характеристики каналу зв'язку значно погіршується при впливі на OFDM-сигнал навмисних завад. Так, якщо шумова

завада в частині смуги (ШЗЧС) потрапляє у смугу пілот-несучої виникає помилка оцінювання характеристики каналу на інтервалі інтерполяції, що використовує інформацію даної піднесучої [10]. Після оцінки стану каналу методом найменших квадратів на символі OFDM, отримані значення передаточної характеристики каналу на пілот-несучих будуть відрізнятися одне від одного, в залежності від наявності завади в їх смугах [5, 10]. Це дозволяє виявити і виключити подавлені завадами пілот-несучі. Таким чином, при подальшому застосуванні лінійної інтерполяції можна зменшити вплив завад на оцінювання каналу.

Формулювання мети статті. Виклад основного матеріалу

Метою роботи є вдосконалення методу оцінки передаточної характеристики каналу зв'язку для виключення впливу зосереджених за спектром завад на процес оцінювання.

Метод повинен забезпечувати мінімум середньоквадратичного відхилення оцінки передаточної характеристики від дійсного значення:

$$\bar{\varepsilon} = \left\langle \sum_{k=1}^n |H(k) - \hat{H}(k)|^2 \right\rangle \rightarrow \min,$$

де $H(k)$ – відліки значень передаточної характеристики каналу,

$\hat{H}(k)$ – оцінки цих відліків.

Припустимо, що міжсимвольна та міжканальна інтерференція відсутні, тоді сигнал на k -й піднесучій після дискретного перетворення Фур'є може бути представлений так:

$$Z(k) = X(k)H(k) + V_3(k) + V_0(k),$$

$$k = 0, 1, \dots, K-1,$$

де $X(k)$ – відліки сигналу, що передається;

$V_3(k)$ – шумова завада в частині смуги з нульовим середнім, дисперсією σ_3^2 та рівномірним розподілом спектральної щільності потужності [10–12];

$V_0(k)$ – білий гаусівський шум з дисперсією σ_0^2 ;

K – кількість піднесучих.

Для розв'язання задачі оцінювання каналу в

OFDM-системах під впливом ШЗЧС Р пілот-несучих рівномірно розташовуються в сигналі $X(k)$. Сигнал на передачі для k -ї піднесучої запишемо:

$$X(k) = \begin{cases} X_{pL} : \text{пілотні несучі,} & \text{де } l = 0; \\ X_{pL+1} : \text{інформац. несучі,} & \text{де } l = 1, \dots, L-1, \end{cases}$$

де L – інтервал інтерполяції (відстань між сусідніми пілот-несучими).

Для оцінки каналу на pL -й пілот-несучій використовується метод найменших квадратів:

$$\hat{H}_{pL} = \frac{Z_{pL}}{X_{pL}}, \quad p = 0, 1, \dots, P-1,$$

де Z_{pL} і X_{pL} – прийняті і передані символи на pL -й пілот-несучій, відповідно. Нехай для зручності аналізу $X_{pL} = 1$, тоді \hat{H}_{pL} , в залежності від наявності ШЗЧС в спектрі пілот-несучої, можна представити наступним чином:

$$\begin{aligned} \hat{H}_{pL}^j &= H_{pL} + B_{3pL} + B_{0pL}, \\ \text{пілот - несучі, вражені завадою;} \\ \hat{H}_{pL} &= H_{pL} + B_{0pL}, \\ \text{пілот - несучі без завад,} \end{aligned} \quad (1)$$

де B_{3pL} і B_{0pL} – значення потужності завади та шуму у смузі pL -ї пілот-несучої, відповідно.

Операція інтерполяції необхідна, щоб оцінити передаточну характеристику каналу для інформаційних піднесучих за результатами оцінок на пілот-несучих. Оцінка каналу для $(pL+1)$ -ї піднесучої за допомогою лінійної інтерполяції розглядається в [9]:

$$\hat{H}_{pL+1} = \frac{L-1}{L} \hat{H}_{pL} + \frac{1}{L} \hat{H}_{(p+1)L}, \quad l = 1, 2, \dots, L-1. \quad (2)$$

Відмітимо, що інформація про стан каналу для інформаційних піднесучих, розташованих справа від $(P-1)L$ -ї пілот-несучої, визначається наступним виразом: $\hat{H}_{(P-1)L+1} = \hat{H}_{(P-1)L}$; тобто, відповідає оцінці, отриманій останньою справа пілот-несучою.

Припустимо, що стан каналу протягом двох OFDM-символів не змінюється. Тоді різницю між двома послідовними OFDM-символами на пілот-несучих в виразі (1), яку позначимо Δ_{pL}^j (при дії завад) та Δ_{pL} (при відсутності завад), можна розрахувати так:

$$\begin{aligned} \Delta_{pL}^j &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \hat{H}_{pL}^j(m+1) - \hat{H}_{pL}^j(m) \right\} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \left[B_{3pL}(m+1) - B_{3pL}(m) \right] + \left[B_{0pL}(m+1) - B_{0pL}(m) \right] \right\}; \quad (3) \\ \Delta_{pL} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \hat{H}_{pL}(m+1) - \hat{H}_{pL}(m) \right\} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \left[B_{0pL}(m+1) - B_{0pL}(m) \right] \right\}, \quad (4) \end{aligned}$$

де m – номер символу OFDM.

Далі, шляхом усереднення цих оцінок за певною кількістю прийнятих OFDM-символів, ми можемо отримати різниці між ШЗЧС та шумом. Повторюючи цей процес, різницю для кожної пілот-несучої $\Phi_{\hat{H}_{pL}}$, можна виразити:

$$\Delta_{\hat{H}_{pL}} = \begin{cases} \text{var}[\Delta_{pL}^j] = \sigma_3^2 + \sigma_0^2, \\ \text{var}[\Delta_{pL}] = \sigma_0^2, \end{cases} \quad (5)$$

де $\text{var}[\Delta_{pL}^j] = \sigma_3^2 + \sigma_0^2$ – подавлені пілот-несучі,

$\text{var}[\Delta_{pL}] = \sigma_0^2$ – не подавлені пілот-несучі.

Припустимо $\sigma_3^2 \gg \sigma_0^2$. Рішення про різницю Λ можна прийняти наступним чином:

$$\begin{aligned} \Lambda_p &= \Delta_{\hat{H}_{pL}} - \min_p \Delta_{\hat{H}_{pL}} \approx \\ &\approx \begin{cases} \sigma_3^2, & \text{де ШЗЧС присутня;} \\ 0, & \text{де ШЗЧС відсутня.} \end{cases} \quad (6) \end{aligned}$$

Цю різницю потрібно порівняти з порогом η щоб визначити наявність завади у прийнятих OFDM-символах. Значення порогу можна задати в діапазоні від 0 до σ_3^2 ; для зручності прийняття рішення встановимо його на рівні усередненої різниці по всіх пілот-несучих:

$$\eta = \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} \Delta_{\hat{H}_{pL}}. \quad (7)$$

Відповідно, якщо $\Lambda \gg \eta$, приймається рішення про наявність завади в прийнятому OFDM-символі. В даному випадку пілот-несучі з максимальними різницями виключаються. Якщо $\Lambda \leq \eta$, приймається рішення про відсутність завади.

Алгоритм, який реалізує запропонований удосконалений метод оцінки, складається з наступних етапів (рис. 1).

1. Передача чергового OFDM-символу (блок 1, m – номер символу в послідовності).

2. Обчислення за формулами (3) – (6) різниць для кожної пілот-несучої шляхом усереднення різниці між двома послідовними OFDM-символами (при цьому, точність оцінки зростає, якщо усереднення проводиться по більшій кількості прийнятих символів, але, в той же час, підвищується обчислювальна складність) (блок 5).

3. Винесення рішення про різницю шляхом віднімання максимальної та мінімальної різниць з наступним порівнянням з пороговим значенням η , яке розраховується за формулою (7) (блоки 2 та 6).

4. Визначення ширини смуги завади Δf_z . Якщо при оцінці попереднього $(m-1)$ -го символу були виявлені пілот-несучі, для яких $\Lambda_p \gg \eta$, то необхідно визначити, яку ширину спектра займає завада (або на яку частину спектра сигналу розповсюджується вплив глибокого завмирання). Для цього в наступному OFDM-символі передається тестова послідовність на інформаційних піднесучих, що лежать на інтервалах інтерполяції справа та зліва від

подавленої пілот-несучої pL : $(p-1)L+1 \dots pL+1$ (блоки 3, 4). Критерієм оцінки інформаційних піднесучих, в даному випадку є коефіцієнт помилкового приймання на біт P_b .

5. Пілот-несучі для яких $\Lambda \gg \eta$ не враховуються при інтерполяції (блок 7). Якщо

$\Lambda \leq \eta$, то пілот-несучі при інтерполяції не виключаються.

6. Лінійна інтерполяція та оцінки ПХ каналу за формулою (2) в даний момент часу (при передачі m -го символу) (блок 8).

7. Якщо передавання даних не закінчено (блок 9), процедура повторюється.

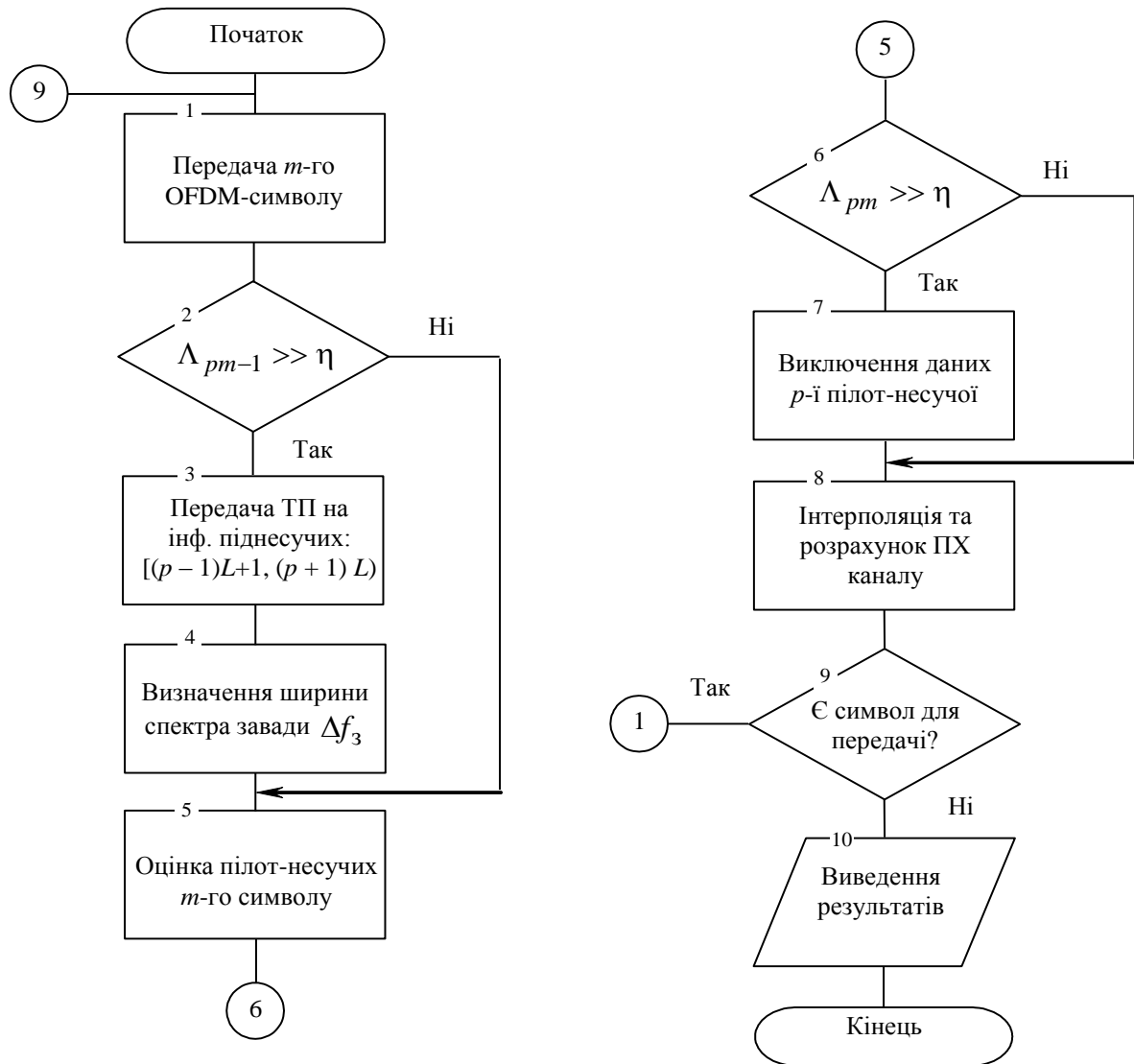


Рис. 1. Схема алгоритму реалізації вдосконаленого методу оцінки передаточної характеристики каналу зв'язку

Слід зазначити, що, якщо кількість виявлених під впливом завад пілот-несучих більше однієї, і вони розташовані поряд $(pL, (p+1)L, \dots, (p+i)L)$, ймовірно, смуга частот між даними пілот-несучими перекрита широкосмуговою завадою в частині смуги. Для перевірки цього припущення необхідно в наступному OFDM-символі передати тестовий сигнал на усіх інформаційних піднесучих, що розташовані на інтервалі $(p-1)L+1 \dots (p+i)L+1$ (блоки 2, 3).

Для проведення оцінки ефективності розробленої методики було розроблено імітаційну

модель в середовищі програмування Matlab (Simulink).

Результати моделювання показують, що точність оцінки стану каналу зв'язку із селективними завмираннями при використанні розробленого методу підвищується в середньому на 15-20 % для діапазону зміни відношення сигнал/завада від 0 до 10 дБ. При невеликій потужності завади (відношення сигнал/завада близько 12 дБ і більше) метод виграшу у точності оцінки уже не дає. Крім того, підвищення точності оцінки передаточної характеристики каналу

дозволяє зменшити ймовірність помилкового приймання на символ. Наприклад, для зміни відношення сигнал/шум в діапазоні від 15 до 30 дБ – в 1,2-2,25 разів для відношення сигнал/завада 0 дБ і в 1,01-1,25 разів для відношення сигнал/завада 10 дБ.

Література

1. **Голдсмит А.** Беспроводные коммуникации / А. Голдсмит. – М.: Техносфера, 2011 – 904 с.
2. **Вишневский В.М.** Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
3. **Григорьев В.А.** Сети и системы радиодоступа / В.А. Григорьев, О.И. Лагутенко, Ю.А. Распаев – М.: Око-Трендз, 2005. – 384 с.
4. **Волков Л.Н.** Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики / Л.Н. Волков, М.С. Немировский, Ю.С. Шинаков // Учебное пособие. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392 с.
5. **Коричнев Л.П.** Статистический контроль каналов связи / Л.П. Коричнев, В.Д. Королев – М.: Радио и связь, 1989. – 240 с.
6. **Міночкін Д. А.** Метод контролю стану каналу зв'язку із селективними завмираннями / Д.А. Міночкін, І.В. Борисов // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2006. – Вип. 3. – С. 66–71.
7. **OFDM channel estimation by singular value decomposition** / [O. Edfors, M. Sandell, J. J. van de Beek and oth.] // IEEE

Висновки

Таким чином, запропонований вдосконалений метод оцінки стану каналу зв'язку при передачі OFDM-сигналів при впливі шумових завад в частині смуги має більш високу ефективність порівняно з відомими методами.

Trans. Commun. – 1998. – Vol. 46. – № 7. – P. 931–939.
8. **Li Y.** Robust channel estimation for OFDM systems with rapid dispersive fading channels / Y. Li, L. J. Cimini Jr., N. R. Sollenberger // IEEE Trans. Commun. – 1998. – Vol. 46. – P. 902–915.
9. **Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems** / S. Coleri, M. Ergen, A. Puri, A. Bahai // IEEE Trans. Broadcast. – 2002. – Vol. 48. – № 3. – P. 223–229.
10. **Patel C. S.** Analysis of OFDM/MC-CDMA under imperfect channel estimation and jamming / C. S. Patel, G. L. Stuber, T. G. Pratt // Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. – Mar. 2004. – Vol. 2. – P. 954–958.
11. **Борисов В. И.** Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.
12. **Tan J.** Multicarrier spread spectrum system with constant envelope: Antijamming, jamming estimation, multiuser access / J. Tan, G. L. Stuber // IEEE Trans. Wireless Commun. – 2005. – Vol. 4. – № 4. – P. 1527–1538.

В статье предложен усовершенствованный метод контроля состояния канала связи с селективными затуханиями и преднамеренными помехами, суть которого состоит в количественной оценке передаточной характеристики многолучевого канала с использованием алгоритма определения подавленных шумовыми помехами на участке полосы пилот-несущих с дальнейшим исключением их влияния на получение конечной оценки передаточной характеристики.

Ключевые слова: система радиосвязи, преднамеренные помехи, передаточная характеристика.

The paper proposed an improved method of monitoring the communication channel with selective fading and deliberate hindrances, the essence of which is to quantify the transfer characteristics of the multipath channel with suppressed noise detection algorithm hindrances in the strip pilot bearing followed except their influence to obtain a final evaluation the transfer characteristics.

Key words: radio system, intentional interference, transmission characteristics.