УДК 621

О.О. ОРЯБІНСЬКА
Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ ПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ В СИСТЕМАХ З OFDM

Анотація. Проаналізовані сучасні методи підстроювання частоти в системах з OFDM з метою виявлення оптимального методу за точністю.

Ключевые слова: многолучевой радиоканал, OFDM, эталонные поднесущие

O.O. ORYABINSKA
Odessa National Academy of Telecommunication named after A.S. Popov

COMPARATIVE ANALYSIS OF ALGORITHMS FREQUENCY CONTROL IN A SYSTEM WITH OFDM

Abstract. The current methods of frequency tuning in OFDM systems in order to identify the optimal method for accuracy.

Keywords: multipath channel, OFDM, reference subcarriers

Стан проблеми. Відомо [4], що системи з OFDM характеризуються високою чутливістю до фазової нестабільності несівної. Остання може бути викликана нестаціонарністю фазової характеристики каналу, що обумовлена допплерівським розсіювання, фазовими флуктуаціями коливань опорних генераторів в передавальних і приймальних пристроях та фазовим шумом. Як наслідок, суттєво знижується завадостійкість системи передавання. Особливо гостро проблема постає в каналах з сигналами з багатопозиційними видами модуляції.

Найбільш поширені два підходи до боротьби з фазовими флуктуаціями в каналах з OFDMA. За першого з них корекція фази несівної здійснюється у приймальному обладнанні й ґрунтується на передачі службових сигналів в спеціально зарезервованих для цієї мети частотних пілотних підканалах. Другий, менш розроблений підхід, ґрунтується на використанні безпосередньо інформаційних сигналів частотних підканалів – у приймальному обладнанні в кожному частотному підканалі здійснюється попередня оцінка точок сигнального сузір'я з подальшим усередненням обчислених оцінок фазової неузгодженості.

Метою роботи є проведення порівняльного аналізу існуючих ефективних алгоритмів корекції фази несівної сигналів з ортогональним частотним і просторовим поділом, які дозволяють підвищити завадостійкість цифрових систем передачі в умовах комбінованих адитивних і фазових впливів.

Алгоритм корекції фази на основі еквівалентного фазового детектора

Еквівалентний фазовий детектор складається з N паралельних однакових ланок, в кожній з яких діє адитивний шум [1]. Операцію усереднення виходів усіх ланок при достатньому числі підканалів, можна замінити операцією обчислення математичного сподівання випадкового процесу, для якого усі підканали створюють ансамбль реалізацій. В цьому випадку характеристика ФД буде нелінійною функцією, вид якої визначатися статистичними характеристиками адитивного шуму [3]:

$$F(x)=\sum_{i=-\infty}^{\infty}\left[\int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}}\left(y\frac{1}{2\pi\sigma^2}exp\left(-\frac{sin^2\left(y-x-i\frac{2\pi}{N}\right)}{2\sigma^2}\right)*\right.\right.$$
$$\left.\left.*\left(\int_0^{\infty}Vexp\left(-\frac{\left(V-\cos\left(y-x-i\frac{2\pi}{N}\right)\right)^2}{2\sigma^2}\right)dV\right)dy\right] \quad (1)$$

На рис.1 приведена характеристика ФД для різних значень дисперсії шуму (приведений один період), яка розрахована за формулою (1). Видно, що з ростом дисперсії характеристика змінюється від пилкоподібної до синусоїдальної. Це пояснюється тим, що з ростом дисперсії шуму збільшується ймовірність виходу фазової похибки на сусідній період характеристики.

Різницеве рівняння, що описує систему підстроювання, матиме вигляд [3]:

$$x_{n+1}=x_n+\alpha_n-F(x_n), \quad (2)$$

де змінна α характеризує закон зміни частоти

$$\alpha_{n+1}\equiv\psi_n-\psi_{n-1} \quad (3)$$

та має густину ймовірності з дисперсією σ_α^2

$$P(\alpha)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\alpha^2}}exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma_\alpha^2}\right). \quad (4)$$

В цьому випадку рівняння (4) описує простий марківський ланцюг першого порядку, для якого можна виписати рівняння Колмогорова-Чепмена для густини ймовірності фазової помилки $P_n(x_n)$ виду [2]:

$$P_{n+1}(x_{n+1}) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \int_{-\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{4}} P\left(x_{n+1} + i\frac{\pi}{4} \middle| x_n\right) P_n(x_n) dx, \quad (5)$$

де $P\left(x_{n+1} + i\frac{\pi}{4} \middle| x_n\right)$ умовна густина ймовірності, що має вид

$$P\left(x_{n+1} + i\frac{\pi}{4} \middle| x_n\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\alpha^2}} exp\left(-\frac{(x_{n+1} - x_n + F(x))^2}{2\sigma_\alpha^2}\right). \quad (6)$$

Операція підсумовування в (5) пов'язана зі згорткою нескінченного фазового простору в кінцевий інтервал $\left[-\frac{\pi}{4}; \frac{\pi}{4}\right]$. Через швидку збіжність ряду можна обмежитись кінцевим числом доданків.

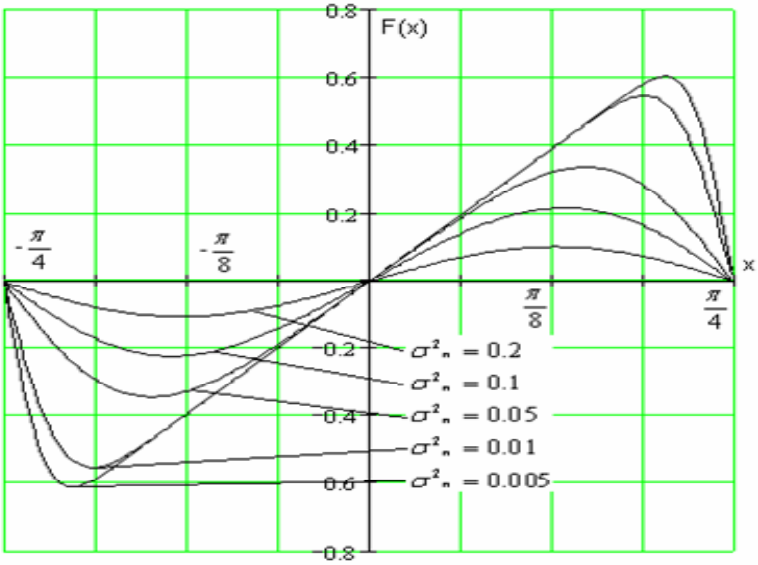

Рис. 1. Характеристика ФД для різних значень дисперсії шуму

Алгоритм корекції фази на основі апарату багатовимірної фільтрації Калмана

Схема відновлення фази опорного коливання зі зворотним зв'язком є по суті системою фазової синхронізації з багатоканальним фазовим детектором, що складається з сукупності вирішальних пристроїв в кожному підканалі усереднювача, що обчислює середнє по усіх каналах значення оцінки фазового розузгодження.

Оптимальна система корекції фази для OFDM сигналів з використанням інформаційних каналів. У основу покладений метод Большакова-Рєпіна, застосовний на асимптотичному випадку повільних змін відстежуваного параметра і полягаючий в апріорному введенні нелінійного фазового дискримінатора і синтезі лінійного фільтру Калмана [4].

У нашому випадку фазовий детектор є багатовимірним тобто являє собою сукупність детекторів з пилкоподібною характеристикою у кожному з підканалів. Такий варіант фазового детектора припускає, що на вхід системи корекції фази поступає сигнал у вигляді вектору, розміром рівним кількості використовуваних підканалів. Вектор вхідної дії є сумішшю оцінюваного сигналу однакового для усіх елементів вектору і незалежного для усіх підканалів АБГШ. Для застосування теорії оптимальної фільтрації Калмана вхідний сигнал повинен задовольняти двом умовам:

По-перше, оцінюваний параметр повинен описуватися за допомогою формувального рівняння [4]:

$$\psi_n = \Phi\psi_{n-1} + G\xi_n, \quad (7)$$

де ψ_n – вектор стану системи, ξ_n випадкова послідовність гауса з нульовим середнім і коваріаційною матрицею Q, Φ – перехідна матриця, G – матриця збурень

По-друге, різницеве векторне рівняння спостереження має бути у виді [4]:

$$\begin{cases} \overrightarrow{z_n} = H\overrightarrow{\psi_n} + \overrightarrow{\xi_n} \\ \left(\overrightarrow{\xi_i}\,\overrightarrow{\xi_j}^T\right) = \begin{cases} R, i = j, \\ 0, i \neq j \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

де z – вектор на вході системи, ψ_n – білий гаусів шум з нульовим середнім і коваріаційною матрицею R, H – матриця спостережень. Рівняння оптимального коректора фази в цьому випадку матиме вигляд [4]:

$$\overline{x_n} = \Phi\overline{\psi_{n-1}} + k_n\left[z_n - H\Phi\overline{\psi_{n-1}}\right], \quad (9)$$

де $\overline{\overline{\psi_0}}$ початкова апріорна оцінка вектору стану, k_n – коефіцієнт підсилення, що визначається:

$$k_n = P_n^* H^T [H P_n^* H^T + R]^{-1}, \quad (10)$$

$$P_n^* = \Phi P_n \Phi^T + GQG^T, \quad (11)$$

$$P_n = [I - k_n H] P_n^*. \quad (12)$$

Оскільки як модель фазового шуму прийнятий білий частотний шум, однаковий в усіх підканалах, коефіцієнти в рівнянні формувального фільтру мають вигляд:

$$\Phi = I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 1 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & 1 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdot & 0 \\ 1 & 0 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & 0 & \cdot & 0 \end{bmatrix}, \quad Q = \sigma_\psi^2 I, \quad (13)$$

де σ_ψ^2 – дисперсія фазового шуму.

Припустимо, що попередня оцінка переданих символів виконана, або для аналізу вибрані пілотні піднесучі. В цьому випадку рівняння спостереження (8) набуде вигляду (14) [4]:

$$\overline{z_n} = H\overline{\psi_n} + \overline{\xi_n}, \text{ де } R = \sigma_n^2 I, \; H = I, \quad (14)$$

де σ_n^2 – АБГШ з урахуванням міжканальної інтерференції.

Алгоритм оцінювання з урахуванням відповідних перетворень набуде вигляду [4]:

$$\overline{\overline{\psi_n}} = \overline{\overline{\psi_{n-1}}} + k_n \left[\overline{z_n} - \overline{\overline{\psi_{n-1}}}\right], \quad (15)$$

$$k_n = P_n^* [P_n^* + \sigma_n^2 I]^{-1}, \quad (16)$$

$$P_n^* = P_{n-1} + \sigma_\psi^2 GG^T, \quad (17)$$

$$P_n = (1 - k_n) I P_n^*. \quad (18)$$

На рис. 2 наведено порівняння залежності дисперсії фазової помилки для алгоритму корекції фази на основі апарату багатовимірної фільтрації Калмана і алгоритму корекції фази на основі еквівалентного фазового детектору, в основі роботи якого лежить усереднювання оцінок по усіх підканалах. Якісно характер графіку справедливий для широкого діапазону потужностей вхідних сигналів. Видно, що перший алгоритм має істотний виграш для малого числа пілотних піднесучих. Це особливо актуально для деяких стандартів, наприклад, стандарту IEEE802.11a, приписуючого використання чотирьох пілотних піднесучих. Обидва алгоритми характеризуються зниженням величини фазової помилки зі збільшенням числа підканалів. Очевидно, цей факт пов'язаний зі збільшенням об'єму статистики, використовуваної при ухваленні рішення про величину фазової помилки, при збільшенні числа піднесучих. З цього можна зробити висновок про перевагу методик компенсації групової фазової помилки, що використовують у своїй роботі усі піднесучі, а не тільки пілотні.

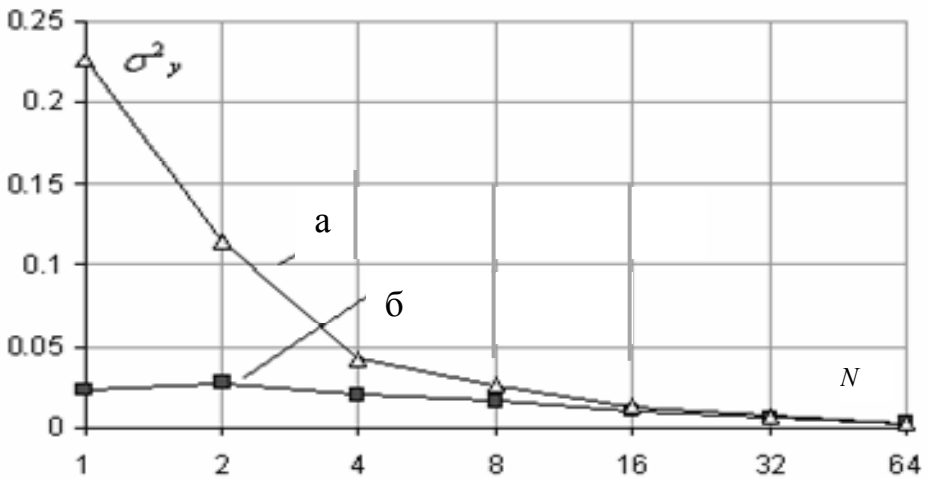

Рис. 2. Залежність дисперсії фазової похибки від кількості піднесівних: а) алгоритм корекції фази на основі еквівалентного фазового детектора; б) алгоритм корекції фази на основі апарату багатовимірної фільтрації Калмана

Ітераційний алгоритм спільної демодуляції і фільтрації комплексного множника каналу зв'язку

Спільний ітераційний алгоритм демодуляції і фільтрації комплексних множників піднесучих сигналу OFDM, заснований на використанні енергії як пілот-символів, так і інформаційних символів.

Кожна ітерація складається з двох кроків [5]. На першому кроці реалізується алгоритм фільтрації комплексних множників піднесівних. При фільтрації комплексних множників піднесучих передбачається,

що на n-1-ій ітерації отримані м'які оцінки інформаційних символів. В результаті роботи алгоритму фільтрації маємо оцінки комплексних множників піднесучих. На другому кроці n-й ітерації реалізується алгоритм м'якої демодуляції. При демодуляції використовуються отримані на першому кроці оцінки. В результаті роботи алгоритму м'якої демодуляції отримуємо м'які оцінки інформаційних символів. Далі процес повторюється. В якості алгоритму фільтрації комплексних множників піднесучих тут використовується алгоритм (15).

Алгоритм спільної ітераційної демодуляції і фільтрації параметрів каналу зв'язку з використанням пілот-символів і інформаційних символів, дозволяє забезпечити однакову завадостійкість (при E_b/N_0=18 дБ) в порівнянні з алгоритмом, що використовує тільки пілот-символи [5]. Проте при цьому щільність розташування пілот-символів на частотно-часовій площині у разі використання ітераційного алгоритму виявляється не 50 %, а всього 8 % [5].

Висновки

Якщо порівнювати алгоритм корекції фази на основі апарату багатовимірної фільтрації Калмана і алгоритм корекції фази на основі еквівалентного фазового детектору, в основі роботи якого лежить усереднювання оцінок по усіх підканалах то за наявності невеликої кількості пілотних піднесучих перший алгоритм має істотний виграш.

Обидва алгоритми характеризуються зниженням величини фазової помилки зі збільшенням числа підканалів. З цього можна зробити висновок про перевагу методик компенсації групової фазової помилки, що використовують у своїй роботі усі піднесучі, а не тільки пілотні.

Алгоритм спільної ітераційної демодуляції і фільтрації комплексного множника каналу зв'язку, не перевищує за точністю алгоритм корекції фази на основі апарату багатовимірної фільтрації Калмана, але дозволяє зменшити щільність розташування пілот-символів в системах безпровідного зв'язку з ортогональним частотним мультиплексуванням, що працюють в умовах руху абонентів і міської забудови, в 8 разів і тим самим підвищити спектральну ефективність таких систем в 1.8 рази без зниження завадостійкості.

Література

1. Казаков Л. Н. Компенсация фазовых флуктуаций в системе передачи MIMO-OFDM в условиях быстрых замираний / Л. Н. Казаков, Д. С. Кукушкин, А. В. Исмаилов // Труды 11-й Международной конференции и выставки «Цифровая обработка сигналов и её приложения» – ДСПА-09, Том 1, Москва, 2009, с. 52-55
2. Казаков Л. Н. Марковская модель системы коррекции фазы для технологии OFDM с QAM модуляцией / Л. Н. Казаков, Д. С. Кукушкин // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Сборник докладов 9–ой международной конференции 28-30 марта 2007 г. – М., 2007. – С. 35 – 38.
3. Александров А. С. Применение марковской модели для исследования системы восстановления фазы в канале OFDM / А. С. Александров, Д. С. Кукушкин, А. В. Шабанов // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Сборник докладов 7–ой международной конференции 16-18 марта 2005 г. – М., 2005. – С. 21-25.
4. Кукушкин Д. С. Синтез и оптимизация алгоритма коррекции фазы многомерных сигналов с ортогональным частотным разделением: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения – Москва, 2007 – 19 с.
5. Крейнделин В. Б. Разработка эффективных методов и алгоритмов обработки сигналов для высокоскоростных систем беспроводной связи: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций – Москва, 2009 – 33 с.

References

1. Kazakov L. N. Kompensatsiya fazovyih fluktuatsiy v sisteme peredachi MIMO-OFDM v usloviyah byistryih zamiraniy / L. N. Kazakov, D. S. Kukushkin, A. V. Ismailov // Trudyi 11-y Mezhdunarodnoy konfe-rentsii i vyistavki «Tsifrovaya obrabotka signalov i eYo prilozheniya» – DSPA-09, Tom 1, Moskva, 2009, pp. 52-55
2. Kazakov L. N. Markovskaya model sistemyi korrektsii fazyi dlya tehnologii OFDM s QAM modu-lyatsiey / L. N. Kazakov, D. S. Kukushkin // Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primenenie: Sbornik dokladov 9–oy mezhdunarodnoy konferentsii 28-30 marta 2007 g. – M., 2007. – pp. 35 – 38.
3. Aleksandrov A. S. Primenenie markovskoy modeli dlya issledovaniya sistemyi vosstanovleniya fazyi v kanale OFDM / A. S. Aleksandrov, D. S. Kukushkin, A. V. Shabanov // Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primenenie: Sbornik dokladov 7–oy mezhdunarodnoy konferentsii 16-18 marta 2005 g. – M., 2005. – pp. 21-25.
4. Kukushkin D. S. Sintez i optimizatsiya algoritma korrektsii fazyi mnogomernyih signalov s orto-gonalnyim chastotnyim razdeleniem: Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata teh-nicheskih nauk: spetsialnost 05.12.04 – Radiotehnika, v tom chisle sistemyi i ustroystva televideniya – Moskva, 2007 – 19 pp.
5. Kreyndelin V. B. Razrabotka effektivnyih metodov i algoritmov obrabotki signalov dlya vyiso-koskorostnyih sistem besprovodnoy svyazi: Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni doktora tehnicheskih nauk: Spetsialnost 05.12.13 – Sistemyi, seti i ustroystva telekommunikatsiy – Moskva, 2009 – 33 pp.

Рецензія/Peer review : 7.12.2014 р. Надрукована/Printed :29.12.2014 р.