

АНОТАЦІЯ

Мирончук О.Ю. Методи двоетапного оцінювання параметрів багатопроменевого каналу в системах зв'язку з технологією OFDM. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктор філософії з галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача розробки методів двоетапного оцінювання параметрів багатопроменевого каналу в системах зв'язку з технологією OFDM на базі пілотних підносійних, використовуючи відомі статистичні характеристики каналу. Розроблені методи дозволяють підвищити точність оцінювання частотної характеристики каналу і зменшити ймовірність виникнення помилки під час прийому переданої інформації.

В першому розділі показана актуальність задачі оцінювання частотної характеристики каналу, спотворення якої обумовлені багатопроменевим розповсюдженням сигналів і ефектом Доплера. Розглянуто принципи формування OFDM символів і їх структуру. Виконано огляд схем розміщення пілотних сигналів у структурі OFDM символів та особливостей їх застосування. Розглянуто методи оцінювання частотної характеристики каналу на підносійних з пілотними сигналами та методи інтерполяції значень частотної характеристики на підносійні з даними. Проведено порівняльний аналіз розглянутих методів на модельному прикладі шляхом статистичного моделювання. Результати моделювання показали, що актуальною являється задача розробки методів оцінювання параметрів багатопроменевих каналів з великим часом затримки та значним впливом ефекту Доплера. Виконано постановку задачі дослідження.

В другому розділі розроблено двоетапний метод оцінювання частотної характеристики каналу по поточному прийнятому OFDM символу. На першому етапі значення частотної характеристики фільтруються на пілотних підносійних та екстраполюються на інформаційні підносійні за допомогою алгоритму калманівської фільтрації у прямому і зворотньому напрямках по відношенню до вектора спостережень. На другому етапі виконується об'єднання параметрів апостеріорних розподілів на кожній підносійній. Розроблено двоетапний метод оцінювання частотної характеристики каналу з використанням оцінок із попередніх прийнятих OFDM символів. На першому етапі значення частотної характеристики фільтруються на пілотних підносійних та екстраполюються на інформаційні підносійні за допомогою алгоритму калманівської фільтрації у прямому, зворотньому та в часовому напрямках. На другому етапі виконується об'єднання параметрів апостеріорних розподілів на кожній підносійній. За допомогою статистичного моделювання проведено порівняльний аналіз розроблених методів з відомими.

В третьому розділі розроблено двоетапний метод сумісного оцінювання інформаційних символів і частотної характеристики каналу по поточному прийнятому OFDM символу. На першому етапі виконується рекурентний розрахунок параметрів апостеріорних розподілів значень частотної характеристики та апостеріорних ймовірностей інформаційних символів в прямому і зворотньому напрямках по відношенню до вектора спостережень. На другому етапі виконується об'єднання параметрів апостеріорних розподілів та уточнення апостеріорних ймовірностей на кожній підносійній. Розроблено двоетапний метод сумісного оцінювання інформаційних символів і частотної характеристики каналу з використанням оцінок із попередніх прийнятих OFDM символів. На першому етапі виконується рекурентний розрахунок параметрів апостеріорних розподілів значень частотної характеристики та апостеріорних ймовірностей інформаційних символів в прямому, зворотньому та в часовому напрямках на кожній

підносійній. На другому етапі виконується об'єднання параметрів апостеріорних розподілів та уточнення апостеріорних ймовірностей на кожній підносійній. За допомогою статистичного моделювання проведено порівняльний аналіз розроблених методів з відомими.

В четвертому розділі виконано аналіз ймовірнісних характеристик систем зв'язку з використанням розроблених методів. Також проведено розрахунок обчислювальних затрат для реалізації розроблених методів та порівняно з обчислювальними затратами для реалізації відомих. На основі результатів моделювань і виконаних розрахунків зроблено висновки про ефективність розроблених методів і можливість їх застосування на практиці.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Вперше розроблено метод двоетапного сумісного оцінювання інформаційних символів і ЧХ багатопробієвих каналів в системах зв'язку на базі технології OFDM. На першому етапі виконується сумісне оцінювання інформаційних символів і ЧХ з двох сторін вектора спостережень поточного OFDM символу. На другому етапі виконується об'єднання апостеріорних розподілів і уточнення апостеріорних ймовірностей на кожній із підносійних, які отримані в результаті оцінки на першому етапі.

2. Вперше розроблено метод двоетапного оцінювання ЧХ багатопробієвих каналів в системах зв'язку на базі технології OFDM. Для функціонування розробленого алгоритму необхідно, як і для відомого метода MMSE, знання статистичних властивостей каналу зв'язку. На першому етапі виконується оцінювання ЧХ з двох сторін вектора спостережень поточного OFDM символу. На другому етапі виконується об'єднання апостеріорних розподілів на кожній із підносійних, які отримані в результаті оцінки на першому етапі.

3. Вперше розроблено двоетапні методи оцінювання ЧХ каналу та сумісного оцінювання інформаційних символів і ЧХ, які враховують спостереження отримані на попередніх OFDM символах. При цьому на

першому етапі виконується оцінювання як по поточному символу з двох сторін вектора спостережень, так і вздовж кожної із підносійних по спостереженнях з попередніх символів. На другому етапі, аналогічним чином, виконується об'єднання апостеріорних розподілів, які отримані на першому етапі.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Розроблені методи двоетапного оцінювання ЧХ каналу і сумісного оцінювання інформаційних символів та ЧХ каналу не потребують виконання класичних методів інтерполяції, що робить їх більш ефективними у порівнянні з MMSE методом, особливо в каналах з великим часом затримки сигналу. Зокрема, в каналі з максимальною затримкою 100 мкс при кількості підносійних в OFDM символі рівній 1024, серед яких кожна четверта відведена для пілотних сигналів, розроблені методи оцінювання по поточному прийнятому OFDM символу забезпечують енергетичний вигреш до 5 дБ, в порівнянні з методом MMSE. Застосування розроблених методів з урахуванням оцінок із попередніх прийнятих OFDM символів дозволяє отримати додатковий енергетичний вигреш до 2 дБ. Збільшення кількості підносійних з пілотними сигналами у структурі OFDM символу підвищує енергетичний вигреш.

2. Обчислювальні затрати на реалізацію розроблених методів двоетапного оцінювання ЧХ по поточному прийнятому символу та з урахуванням оцінок із попередніх прийнятих OFDM символів на 2 порядки менші у порівнянні з обчислювальними затратами на реалізацію методу MMSE. Розроблені методи двоетапного сумісного оцінювання інформаційних символів і ЧХ по поточному прийнятому символу та з урахуванням оцінок із попередніх прийнятих OFDM символів потребують на порядок менше обчислювальних затрат у порівнянні з методом MMSE.

3. Розроблені методи двоетапного сумісного оцінювання інформаційних символів і ЧХ по поточному прийнятому символу та з

урахуванням оцінок із попередніх прийнятих OFDM символів, на відміну від методів LS, MMSE та розроблених методів двоетапного оцінювання ЧХ каналу, не потребують подальшого прийняття рішень стосовно переданих інформаційних символів, оскільки це виконується безпосередньо під час виконання розроблених методів двоетапного сумісного оцінювання інформаційних символів і ЧХ каналу.

Результати наукових досліджень можуть бути використані при розробці перспективних і модернізації існуючих приймачів сигналів в системах зв'язку з OFDM технологією для покращення їх ймовірнісних характеристик при роботі з багатопроблемними каналами із великими затримками. Основні теоретичні положення використовуються в навчальному процесі в дисципліні «Теорія передавання інформації».

Ключові слова: OFDM, цифровий зв'язок, безпроводний канал зв'язку, багатопроблемне поширення сигналів, ефект Доплера, оцінка параметрів каналу, частотна характеристика, кореляційна функція, авторегресійна модель, фільтр Калмана, фільтрація, об'єднання оцінок, інтерполяція, апостеріорна щільність ймовірності.

SUMMARY

Myronchuk O. Methods of two-stage estimation of multipath channel parameters in communication systems with OFDM technology. - Qualification manuscript.

PhD thesis in the field of knowledge 17 Electronic and Telecommunications in specialty 172 Telecommunications and Radio Engineering. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2020.

An actual scientific problem of developing of methods of two stage estimation of multipath channel parameters in communication systems with OFDM technology that uses known channel statistical parameters has been solved. The developed methods allow to increase the accuracy of channel frequency response estimation and to reduce the probability of error during the receiving of transmitted information.

The first section shows the relevance of the problem of estimating the channel frequency response distortion, which is caused to multipath propagation of the signal and the Doppler effect. The principles of OFDM symbol formation and their structure was considered. An overview of pilot signal placement schemes in the structure of OFDM symbols and features of their application has been performed. Methods of channel frequency response estimation on subcarriers with pilot signals and methods of interpolation of frequency response values on subcarriers with data were considered. The comparative analysis of the considered methods on a model example by statistical modeling was carried out. The simulation results showed that the problem of developing methods for estimating the parameters of multipath channels with a long delay time and a significant influence of the Doppler effect is urgent. The research problem was formulated.

In the second section the method of two-stage channel frequency response estimation using only currently received OFDM symbol has been developed. At the first stage, the values of the frequency response are filtered on the pilot subcarriers and extrapolated to the information subcarriers using the Kalman

filtering algorithm in the forward and backward directions relative to the observation vector. In the second stage, the combining of parameters of a posteriori distributions on each subcarrier is performed. The method of two-stage channel frequency response estimation using estimates from previously received OFDM symbols has been developed. At the first stage, the values of the frequency response are filtered on the pilot subcarriers and extrapolated to the information subcarriers using the Kalman filtering algorithm in the forward, backward and time directions. In the second stage, the combining of parameters of a posteriori distributions on each subcarrier is performed. Using the statistical modeling the comparative analysis of the developed methods with known ones was carried out.

In the third section the method of two-stage joint estimation of information symbol and channel frequency response using only currently received OFDM symbol has been developed. At the first stage, a recurrent calculation of the parameters of the a posteriori distributions of the values of the frequency response and the a posteriori probabilities of the information symbols in the forward and backward directions relative to the observation vector is performed. At the second stage the combining of parameters of a posteriori distributions and specification of a posteriori probabilities on each subcarrier is carried out. The method of two-stage joint estimation of information symbol and channel frequency response using estimates from previously received OFDM symbols has been developed. At the first stage, a recurrent calculation of the parameters of the a posteriori distributions of the values of the frequency response and the a posteriori probabilities of the information symbols in the forward, backward and time directions on each subcarrier is performed. At the second stage the combining of parameters of a posteriori distributions and specification of a posteriori probabilities on each subcarrier is carried out. Using the statistical modeling the comparative analysis of the developed methods with known ones was carried out.

In the fourth section the analysis of the probabilistic characteristics of communication systems using the developed methods was performed. The calculation of computational costs for the implementation of the developed

methods and comparison with the computational costs for the implementation of known methods was carried out. Based on the results of simulations and calculations, conclusions about the effectiveness of the developed methods and the possibility of their application in practice were made.

The scientific novelty of obtained results is as follows:

1. For the first time, a method of two-stage joint evaluation of information symbols and frequency response of multipath channels in communication systems based on OFDM technology has been developed. In the first stage, a joint estimation of the information symbols and the frequency response on both sides of the observation vector of the current OFDM symbol is performed. In the second stage, the a posteriori distributions are combined and the a posteriori probabilities on each of the subcarriers are refined, which are obtained as a result of the assessment in the first stage.

2. For the first time, a method of two-stage estimation of frequency characteristics of multipath channels in communication systems based on OFDM technology was developed. The operation of the developed algorithm requires, as for the known MMSE method, knowledge of the statistical properties of the communication channel. In the first stage, the frequency response is estimated on both sides of the observation vector of the current OFDM symbol. In the second stage, the a posteriori distributions on each of the subcarriers, which are obtained as a result of estimation in the first stage, are combined.

3. For the first time, two-stage methods of channel frequency response estimation and joint estimation of information symbols and frequency response have been developed, which take into account observations obtained on previous OFDM symbols. In this case, at the first stage, the estimation is performed both on the current symbol on both sides of the observation vector and along each of the subcarriers on the observations of the previous symbols. In the second stage, the combining of a posteriori distributions obtained in the first stage is similarly performed.

Practical importance of obtained results is as follows:

1. The developed methods of two-stage estimation of channel frequency response and joint estimation of information symbols and frequency response of the channel do not require classical interpolation methods, which makes them more efficient compared to MMSE method, especially in channels with long signal delay. In particular, in the channel with a maximum delay of 100 μ s with the number of subcarriers in the OFDM symbol equal to 1024, among which every fourth is allocated for pilot signals, the developed estimation methods for the currently received OFDM symbol provide energy gain of up to 5 dB, compared to MMSE. The application of the developed methods that take into account the estimates from the previously accepted OFDM symbols allows obtaining additional energy gain of up to 2 dB. Increasing the number of subcarriers in the OFDM symbol structure increases the energy gain.

2. The computational costs for the implementation of the developed methods of two-stage estimation of the frequency response on the currently received symbol and taking into account the estimates from the previously accepted OFDM symbols are 2 orders of magnitude lower than the computational costs for the MMSE method. The developed methods of two-stage joint estimation of information symbols and frequency response on the currently received symbol and taking into account estimates from previously accepted OFDM symbols require an order of magnitude less computational costs compared to the MMSE method.

3. Developed methods of two-stage joint estimation of information symbols and frequency response on the current received symbol and taking into account estimates from previously received OFDM symbols in contrast to LS, MMSE methods and developed methods of two-stage estimation of channel frequency response do not require further decisions on transmitted information symbols, as this is done directly during the implementation of the developed methods of two-stage joint estimation of information symbols and frequency response of the channel.

The results of this thesis can be used in the development of promising and modernization of existing signal receivers in communication systems with OFDM technology to improve their probabilistic characteristics in the case of multipath channels with long delays. The main theoretical results of this thesis are used in the educational process in the discipline "Theory of information transfer" at the Radioengineering Faculty of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Keywords: OFDM, digital communication, wireless communication channel, multipath signal propagation, Doppler effect, estimation of channel parameters, frequency response, correlation function, autoregressive model, Kalman filter, filtering, combining of estimates, interpolation, a posteriori density probability.

**Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові
результати дисертації**

1. Мирончук О.Ю. Порівняння методів оцінки параметрів каналу зв'язку в OFDM системах / О.Ю. Мирончук, О.О. Шпилька // Вісник Інженерної академії України – 2018. – №2. – с. 20-26.
2. Мирончук А. Ю. Метод оцінювання частотної характеристики каналу в OFDM системах на основі фільтрації і екстраполяції пілот-сигналів / А.Ю. Мирончук, А.А. Шпилька, С.Я. Жук // Вестник НТУУ "КПИ". Серія Радіотехніка. Радиоаппаратостроение. – 2019. - №78. – С. 36-42. doi: 10.20535/RADAR.2019.78.36-42. **(WEB OF SCIENCE)**
3. Myronchuk O. Two-stage Channel Frequency Response Estimation in OFDM Systems / O. Myronchuk, O. Shpylka, S. Zhuk // Path of Science, Vol. 6, No. 2, pp. 1001-1007, – 2020. doi:http://dx.doi.org/10.22178/pos.55-1
4. Myronchuk O. Yu. Two-Stage Method for Joint Estimation of Information Symbols and Channel Frequency Response in OFDM Communication Systems / O. Yu. Myronchuk, A. A. Shpylka, S. Ya. Zhuk // Radioelectronics and Communications Systems. – 2020.- Vol. 63. – No. 8, pp. 418 - 429. **(SCOPUS)**

**Список публікацій здобувача, які засвідчують апробацію
матеріалів дисертації**

5. Мирончук О.Ю. Моделювання OFDM сигналів / О.Ю. Мирончук // Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті: матеріали 21-го міжнародного молодіжного форуму Том 2, Харків, 25-27 квітня 2017р. / ХНУРЕ. – Харків, 2017. – 204с., С. 135-136.
6. Мирончук О.Ю. Методи оцінки каналу в системах зв'язку з OFDM сигналами/ О.Ю. Мирончук, О.О. Шпилька // Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО: матеріали 10-ї науково-практичної конференції, Київ, 9-10 листопада 2017р. / ВІТІ. – Київ, 2017. – 283с., С. 166-167.

7. Myronchuk O., Shpylka O., Smolych D. Kalman filter for channel estimation in OFDM systems. The Eighth World Congress "Aviation in the XXI-st century" – "Safety in Aviation and Space Technologies", Kyiv, Ukraine, october 10-12, 2018. p 5.4.6-5.4.8
8. Мирончук О.Ю. Алгоритм Калмана для оцінки частотної характеристики каналу зв'язку в OFDM системах/ О.Ю. Мирончук, О.О. Шпилька // Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в операції Об'єднаних сил: матеріали 11-ї науково-практичної конференції, Київ, 8-9 листопада 2018р. / ВІПІ. – Київ, 2018. – 246с., С. 150-151.
9. Мирончук О.Ю. Модель Джейкса для спектральної густини потужності і Допплерівського спектру процесу завмирання / О.Ю. Мирончук, О.О. Шпилька // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи», Київ, 28-24 листопада 2019р. / НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». – 2019.
10. Мирончук О.Ю. Моделювання каналів зв'язку з заданими кореляційними властивостями/ О.Ю. Мирончук, О.О. Шпилька // Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в операції Об'єднаних сил, Київ, 14-15 листопада 2019р. / ВІПІ. – 2019.
11. Myronchuk O. Algorithm Of Channel Frequency Response Estimation In Orthogonal Frequency Division Multiplexing Systems Based On Kalman Filter / O. Myronchuk, O. Shpylka, S. Zhuk // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 31-34, doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235385. (SCOPUS)
12. Myronchuk O. Two-stage optimal algorithm of filtration the channel frequency response in OFDM systems. / Polit. Challenges Of Science Today. Air

Navigation. Electronics. Telecommunications: Abstracts of the XXth International conference of higher education students and young scientists, Kiev, 2020, p. 106.