

Повышение помехоустойчивости OFDM-систем в каналах с замираниями

Л.И. Аверина, А.Ю. Лафицкий

Воронежский государственный университет
394018, Россия, г. Воронеж,
Университетская пл., 1

Аннотация – В работе предложен способ повышения помехоустойчивости OFDM-систем в многолучевых каналах связи. Предлагаемый способ состоит в применении фильтра Калмана для оценки и интерполяции частотной характеристики канала с использованием пилотных символов, расположенных по «блочной» схеме. Эффективность алгоритма исследована в двух различных каналах, рекомендованных стандартами GSM/EDGE для тестирования систем: типовом канале в условиях городской застройки и типовом канале для маленьких сот. Проведено сравнение характеристик предложенного алгоритма с другими известными методами. Рассмотрено влияние доплеровского сдвига на эффективность предложенного алгоритма. Проведено компьютерное моделирование для оценки зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум. Показано, что предложенный алгоритм обеспечивает меньшую вероятность битовой ошибки в медленно меняющихся каналах, но его эффективность уменьшается с ростом доплеровской частоты.

Ключевые слова – OFDM; помехоустойчивость; многолучевой канал; фильтр Калмана.

Введение

В большинстве встречающихся на практике радиоканалов условия распространения радиоволн со временем изменяются, что приводит к изменению во времени уровня сигнала в точке приема. Примером канала с многолучевым распространением и замираниями может служить тропосферный канал связи. В нем распространение вызывается переизлучением (рассеянием или отражением) волн неоднородностями в атмосфере. Сами же неоднородности непрерывно видоизменяются во времени, появляются и исчезают, что приводит к замираниям сигнала [1]. Другой пример – распространение радиоволн в мобильной связи. Радиоволны многократно отражаются от

наземных объектов (холмов, лесов, домов и т. д.), а движение приемника относительно передатчика приводит к изменению пути распространения сигнала [2]. Таким образом, повышение помехоустойчивости систем связи в многолучевых каналах связи является актуальной задачей.

В системах связи на основе OFDM-сигналов для оценки характеристики канала связи к передаваемой неизвестной информации добавляются известные на приемной стороне данные, так называемые пилот-символы. Они образуют решетку в частотно-временной области, которая может иметь структуру, в частности изображенную на рис. 1. Жирными точками обозначены пилот-символы, выколотыми – информационные символы, m – количество информационных символов между двумя пилотными символами. Такое расположение пилотов известно в литературе как «блочное»: характеристика канала оценивается для каждой поднесущей и интерполируется по времени. В настоящей работе предлагается использовать фильтр Калмана для оценки и интерполяции характеристики канала.

1. Фильтр Калмана для оценки характеристики канала связи

Фильтр Калмана основан на представлении линейной динамической системы в пространстве состояний и решает задачу оптимальной линейной фильтрации в рекурсивной форме. Рекурсивное решение позволяет обновлять оценку вектора со-

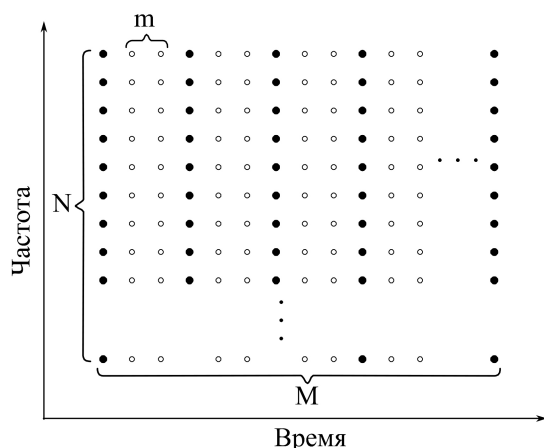


Рис. 1. Расположение пилот-сигналов
Fig. 1. Location of pilot signals

стояния, используя предыдущую оценку и новые данные, таким образом, нет необходимости хранить все наблюдаемые данные. Более того, алгоритм фильтрации Калмана вычислительно более эффективен, чем алгоритм, основанный на прямом пересчете оценки с использованием новых и всех предыдущих данных.

В литературе предложено множество вариантов применения фильтра Калмана к задаче оценки канала в OFDM-системах [3–5]. Применительно к дискретной линейной динамической системе алгоритм можно описать следующим образом. Запишем уравнение системы в пространстве состояний:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_{k+1,k} \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k, \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k. \quad (2)$$

В этих уравнениях вектор $\mathbf{x}_k$ – состояние системы, минимально необходимый набор параметров, позволяющий описать систему; индекс k – дискретное время. Матрица $\mathbf{F}_{k+1,k}$ – матрица перехода состояния $\mathbf{x}_k$ из времени k ко времени $k+1$. Вектор $\mathbf{w}_k$ – вектор шума процесса с равномерной плотностью мощности, нормальным распределением и корреляционной матрицей:

$$\langle \mathbf{w}_n \mathbf{w}_k^H \rangle = \begin{cases} \mathbf{Q}_k, & n = k; \\ \mathbf{0}, & n \neq k, \end{cases}$$

где верхний индекс H означает эрмитово сопряжение. Уравнение 1 представляет собой уравнение процесса и описывает изменение системы во времени. Уравнение 2 есть уравнение наблюдения, в нем вектор $\mathbf{y}_k$ – вектор наблюдения в момент времени k , а матрица $\mathbf{C}_k$ – матрица измерений. Вектор $\mathbf{v}_k$ – вектор шума измерений с равномерной плотностью мощности, нормальным распределением и корреляционной матрицей:

$$\langle \mathbf{v}_n \mathbf{v}_k^H \rangle = \begin{cases} \mathbf{R}_k, & n = k; \\ \mathbf{0}, & n \neq k, \end{cases}$$

при этом шум измерений не коррелирован с шумом процесса. С учетом введенных обозначений задачу фильтрации можно сформулировать следующим образом: используя все наблюдения $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_k$, найти для каждого $k \geq 1$ оценку состояния $\mathbf{x}_k$ с минимальной среднеквадратической ошибкой.

Алгоритм, решающий поставленную задачу, состоит из следующих шагов.

Для $k = 1, 2, \dots$ вычислить [6; 7]:

$$\tilde{\mathbf{x}}_k = \mathbf{F}_{k,k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1};$$

$$\tilde{\mathbf{P}}_k = \mathbf{F}_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{F}_{k,k-1}^H + \mathbf{Q}_{k-1};$$

$$\mathbf{G}_k = \tilde{\mathbf{P}}_k \mathbf{C}_k^H (\mathbf{C}_k \tilde{\mathbf{P}}_k \mathbf{C}_k^H + \mathbf{R}_k)^{-1};$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \tilde{\mathbf{x}}_k + \mathbf{G}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{C}_k \tilde{\mathbf{x}}_k);$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{G}_k \mathbf{C}_k) \tilde{\mathbf{P}}_k$$

Начальные значения при $k = 0$ можно выбрать: $\hat{\mathbf{x}}_0 = \langle \mathbf{x}_0 \rangle$, $\mathbf{P}_0 = \langle (\mathbf{x}_0 - \langle \mathbf{x}_0 \rangle)(\mathbf{x}_0 - \langle \mathbf{x}_0 \rangle)^H \rangle$. В алгоритме через $\tilde{\mathbf{x}}$ обозначена априорная оценка (экстраполяция) вектора состояния, $\hat{\mathbf{x}}$ – апостериорная оценка состояния, $\tilde{\mathbf{P}}_k = \langle (\mathbf{x}_k - \langle \tilde{\mathbf{x}}_k \rangle)(\mathbf{x}_k - \langle \tilde{\mathbf{x}}_k \rangle)^H \rangle$ – корреляционная матрица ошибки предсказания состояния, $\mathbf{P}_k = \langle (\mathbf{x}_k - \langle \hat{\mathbf{x}}_k \rangle)(\mathbf{x}_k - \langle \hat{\mathbf{x}}_k \rangle)^H \rangle$ – корреляционная матрица апостериорной ошибки оценки состояния.

Для применения алгоритма к оценке канала необходимо знать закон, по которому меняется канал. В работе использовалась модель канала, состоящая из дискретных лучей, каждый из которых замирает по закону Рэлея. При этом число лучей, их задержки, количество и средние значения огибающей не менялись во времени. Частоты Доплера всех лучей считались одинаковыми и относительно малыми: $T_{\text{sym}} f_d \sim 0,001$, где T_{sym} – длительность OFDM-символа, f_d – частота Доплера. Тогда искажения, вызванные межканальной интерференцией, малы, и ими можно пренебречь [8].

В работе применялась авторегрессионная (АР) модель второго порядка. Согласно выбранной модели, коэффициент передачи на каждой поднесущей OFDM-сигнала меняется следующим образом:

$$h_k = a_1^* h_{k-1} + a_2^* h_{k-2} + w_k,$$

где a_1, a_2 – параметры АР модели, w_k – отсчеты белого порождающего шума, k – временной индекс. Параметры модели и дисперсию порождающего шума можно найти, решив систему уравнений Юла – Уокера:

$$\begin{bmatrix} r_t(0) & r_t(1) \\ r_t^*(1) & r_t(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_t^*(1) \\ r_t^*(2) \end{bmatrix},$$

где $r_t(k)$ – отсчеты корреляционной функции фединга во времени, корреляционная функция задается согласно модели Джейкса и имеет вид $r_t(\Delta t) = J_0(2\pi f_d \Delta t)$. Выражение для дисперсии порождающего шума:

$$\sigma^2 = r_t(0) - [a_1 \quad a_2] \begin{bmatrix} r_t^*(1) \\ r_t^*(2) \end{bmatrix}.$$

Элементами вектора состояния были выбраны коэффициенты передачи на пилотных символах:

Таблица 1. Параметры сигнала в системе связи с OFDM
 Table 1. Signal parameters in an OFDM communication system

Вид модуляции	Параметры сетки пилот-сигналов	Число использованных поднесущих, N	Размерность БПФ, N_{fft}	Частота дискретизации, F_s
QAM-4, QAM-16	$m = 4$	36	64	10 МГц

Таблица 2. Типовой канал в условиях городской застройки
 Table 2. Typical channel in urban areas

Канал 1. Типовой канал в условиях городской застройки												
Номер луча	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Задержка, мкс	0	0,1	0,3	0,5	0,8	1,1	1,3	1,7	2,3	3,1	3,2	5
Средняя относительная мощность, дБ	-4	-3	0	-2,6	-3	-5	-7	-5	-6,5	-8,6	-11	-10

Таблица 3. Типовой канал для маленьких сот
 Table 3. Typical channel for small cells

Канал 2. Типовой канал для маленьких сот		
Номер луча	1	2
Задержка, мкс	0	0,4
Средняя относительная мощность, дБ	0	0

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} h_k \\ h_{k-1} \end{bmatrix}.$$

Матрица перехода $\mathbf{F}$ не зависит от времени и имеет вид

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} a_1^* & a_2^* \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Матрица шума процесса:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Наблюдаемой величиной являлись принятые пилотные символы, соответствующая матрица наблюдений будет иметь вид

$$\tilde{\mathbf{N}} = \begin{bmatrix} p_k & 0 \end{bmatrix},$$

где p_k – известный пилот-сигнал.

2. Результаты компьютерного моделирования

Для того чтобы сравнить различные алгоритмы эквализации для OFDM-систем в каналах с частотной селективностью и замираниями, было проведено компьютерное моделирование предложенного алгоритма, а также других известных алгоритмов: MMSE-алгоритма [9], алгоритма ZF с линейной (LINEAR на графиках) интерполяцией

и интерполяцией ближайшим значением (NEAREST на графиках). Дополнительно на графиках изображена кривая, соответствующая «идеальной» оценке канала с учетом МКИ. Оценка канала с использованием фильтра Калмана проводилась для каждой поднесущей отдельно. Отношение сигнал/шум и частота Доплера считались известными величинами. Остальные параметры системы связи приведены в таблице 1.

Сигнал с указанными параметрами был пропущен через два различных канала связи, рекомендованных стандартами GSM/EDGE для тестирования соответствующих систем. После прохождения канала на сигнал накладывался белый шум, затем сигнал эквализировался различными алгоритмами и демодулировался. Результатом моделирования являются кривые зависимости частоты появления ошибки на выходе демодулятора от отношения сигнал/шум. Параметры каналов сведены в таблицы 2 и 3.

Для работы в канале 1 длина циклического префикса выбрана $T_{cp} = 7/8 T_{sym}$, для выполнения условия отсутствия межсимвольной интерференции.

Для работы в канале 2 длина циклического префикса выбрана $T_{cp} = 1/8 T_{sym}$. Оба канала являются рэлеевскими, и имеют доплеровский спектр Джейкса.

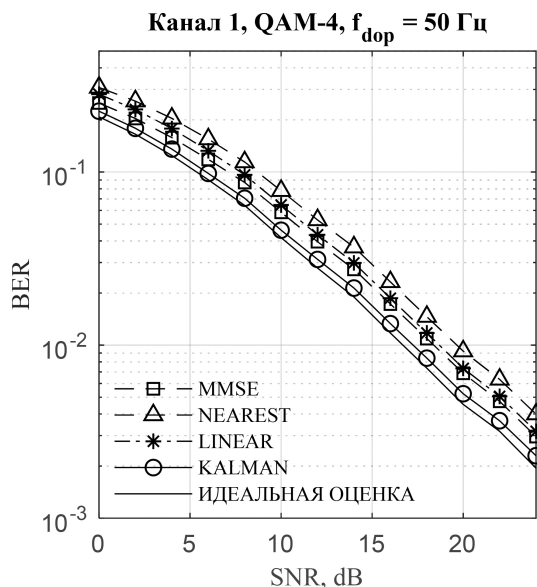


Рис. 2. Кривая помехоустойчивости, канал 1, QAM-4, $f_{\text{dop}} = 50$ Гц
 Fig. 2. Noise immunity curve, Channel 1, QAM-4, $f_{\text{dop}} = 50$ Hz

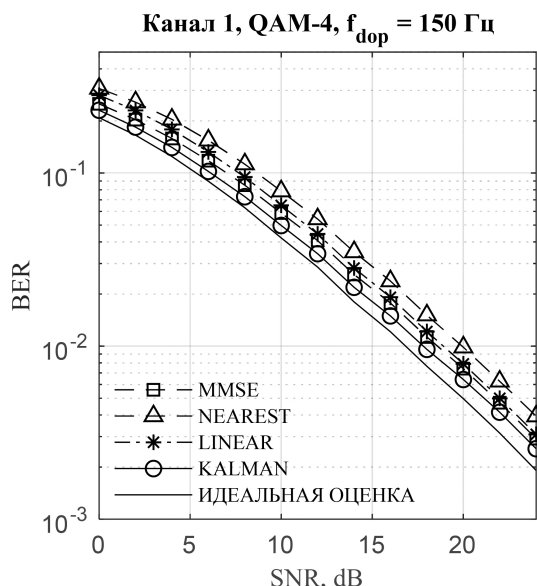


Рис. 3. Кривая помехоустойчивости, канал 1, QAM-4, $f_{\text{dop}} = 150$ Гц
 Fig. 3. Noise immunity curve, Channel 1, QAM-4, $f_{\text{dop}} = 150$ Hz

На рис. 2–4 приведены кривые, полученные для системы с модуляцией QAM-4 в канале 1 и частотами Доплера 50, 150 и 450 Гц соответственно. Из анализа кривых видно, что с увеличением частоты Доплеровского сдвига с 50 до 150 Гц рабочее отношение сигнал/шум по вероятности ошибки 0,01 для фильтра Калмана ухудшается с 17,3 до 17,8 дБ, при этом ухудшение для других алгоритмов составило 0,2–0,3 дБ. При увеличении частоты Доплера до 450 Гц рабочее ОСШ фильтра Калмана увеличивается еще на 1,4 дБ. Ухудшение для других алгоритмов составило 0,1–0,3 дБ.

В канале 2 с повышением частоты фединга практически ничего не поменялось. Так как одна

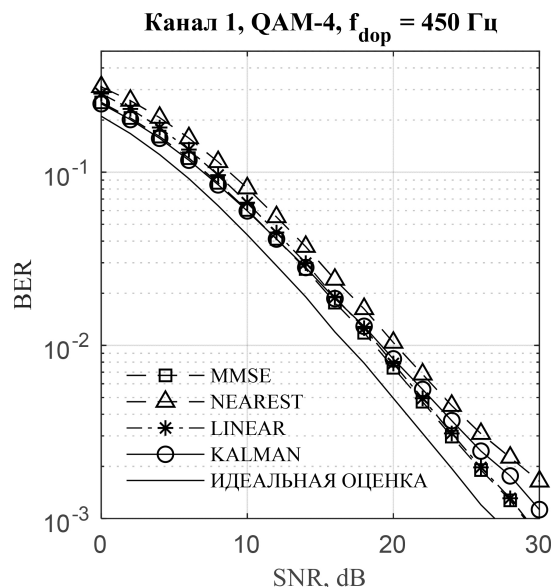


Рис. 4. Кривая помехоустойчивости, канал 1, QAM-4, $f_{\text{dop}} = 450$ Гц
 Fig. 4. Noise immunity curve, Channel 1, QAM-4, $f_{\text{dop}} = 450$ Hz

реализация сигнала и шума обрабатывалась разными алгоритмами, можно сделать вывод, что эффективность алгоритма Калмана с повышением частоты ухудшилась: в первом случае разница в помехоустойчивости по сравнению с идеальной оценкой канала составляла 0,5 дБ, а во втором – 0,7, тогда как MMSE-алгоритм не демонстрирует такого эффекта. Соответствующие кривые изображены на рис. 5 и 6.

Результаты моделирования с использованием модуляции более высокого порядка, QAM-16, для канала 1 демонстрируют те же закономерности, что и для модуляции QAM-4. С повышением частоты фединга рабочее ОСШ для системы с алгоритмом Калмана уменьшается на 0,7 дБ, тогда как для остальных алгоритмов этот показатель практически не изменился.

Для модуляции QAM-16 в канале 2 с повышением частоты Доплера эффективность фильтра Калмана относительно алгоритма, использующего идеальную оценку, как и в системе с модуляцией QAM-4, уменьшилась. Так, разница в рабочем отношении сигнал/шум между этими методами увеличилась с 0,5 до 1,4 дБ, а относительно MMSE-алгоритма уменьшилась с 0,3 до 0,1 дБ.

В таблице 4 собраны полученные результаты моделирования систем связи. В нее внесены значения рабочих отношений сигнал/шум по уровню вероятности ошибки 0,01 для частот Доплера 50/150/450 Гц в канале 1 с модуляцией QAM-4 и 50/150 Гц во всех остальных случаях.

В таблице 5 собраны дополнительные сведения о параметрах компьютерного моделирования.

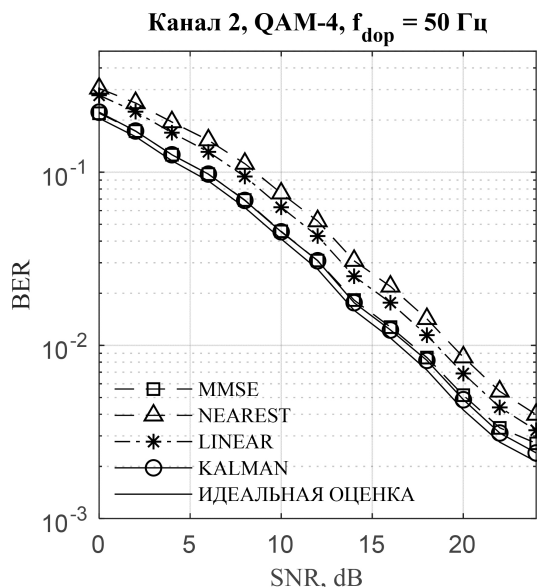


Рис. 5. Кривая помехоустойчивости, канал 2, QAM-4, $f_{\text{доп}} = 50$ Гц
Fig. 5. Noise immunity curve, Channel 2, QAM-4, $f_{\text{доп}} = 50$ Hz

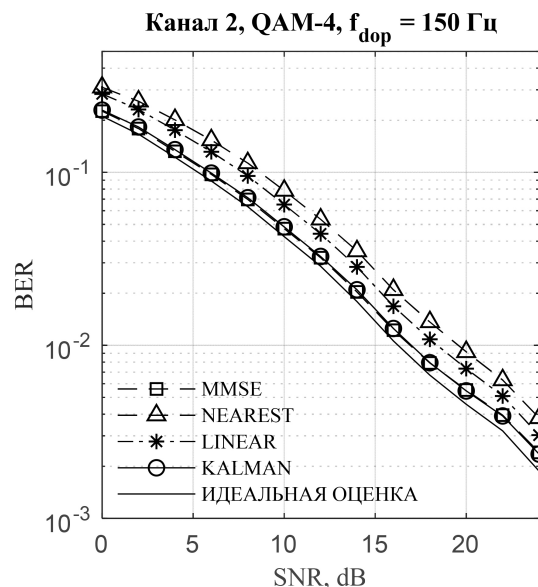


Рис. 6. Кривая помехоустойчивости, канал 2, QAM-4, $f_{\text{доп}} = 150$ Гц
Fig. 6. Noise immunity curve, Channel 2, QAM-4, $f_{\text{доп}} = 150$ Hz

Таблица 4. Результаты компьютерного эксперимента
Table 4. Results of computer experiment

Системы	Рабочее отношение сигнал/шум, дБ			
	QAM4		QAM16	
	Канал 1	Канал 2	Канал 1	Канал 2
KALMAN	17,3/17,8/19,2	17/17	23,3/24	23,3/23,8
MMSE	18,4/18,6/18,7	17,2/17	24,3/24,4	23,6/23,9
LINEAR	18,7/18,9/19	18,5/18,5	24,6/24,6	24,4/24,8
NEAR	19,6/19,9/20,2	19,4/19,5	25,5/25,6	25,1/25,6
Идеальная оценка	16,7/16,8/16,8	16,5/16,3	22,6/22,7	22,8/22,4

Таблица 5. Параметры компьютерного моделирования
Table 5. Computer simulation parameters

	Канал 1	Канал 2
Доплеровский сдвиг, Гц	50 (0,0006), 150 (0,0018), 450 (0,0054)	50 (0,00036) 150 (0,0011)
Время когерентности канала, мс	3,59 (50 Гц), 1,19 (150 Гц), 0,4 (450 Гц)	3,59 (50 Гц), 1,19 (150 Гц)
Время моделирования для фиксированного ОСШ, с	1,42	0,85
Количество бит для расчета BER	6800000	6800000

В графе «Доплеровский сдвиг» даны два значения, соответствующие абсолютному значению сдвига в герцах и относительному, вычисляемого как произведение длительности символа на частоту сдвига. Так как для работы в канале 1 необходим больший циклический префикс, то длительность символа увеличивалась соответственно, поэтому одному абсолютному значению доплеровского сдвига соответствуют разные относи-

тельные величины для канала 1 и канала 2. Время когерентности канала указано для различных частот Доплера и рассчитывается как продолжительность корреляционной функции фединга по уровню 0,707.

Заключение

Предложенный алгоритм Калмана показал лучшие из всех рассмотренных алгоритмов результаты

в каналах с медленными замираниями – при относительной частоте Доплера $\sim 0,0004$ помехоустойчивость приема уменьшалась не более чем на 0,7 дБ относительно случая, когда характеристика канала точно известна. Более того, алгоритм пересчитыва-

ет характеристику канала на каждом новом символе, что позволяет отказаться от деления принятого сигнала на кадры. Основными недостатками алгоритма являются его чувствительность к федингу и игнорирование частотной корреляции в канале.

Список литературы

1. Дальняя тропосферная радиосвязь / И.А. Гусятинский [и др.]. М.: Связь, 1968. 248 с.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / пер. с англ. Изд. 2-е, исп. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
3. Chen W., Ruifeng Z. Kalman-filter channel estimator for OFDM systems in time and frequency-selective fading environment // 2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 2004. Vol. 4. P. 377–380. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2004.1326842>
4. Hijazi H., Ros L. OFDM high speed channel complex gains estimation using Kalman filter and QR-detector // 2008 IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems. 2008. P. 26–30. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISWCS.2008.4726011>
5. Enescu M., Roman T., Herdin M. Kalman-based estimation of measured channels in mobile MIMO-OFDM system // 2004 12th European Signal Processing Conference. 2004. P. 1865–1868.
6. Diniz P.S.R. Adaptive Filtering. Algorithms and Practical Implementation. Fourth edition. New York: Springer, 2013. 652 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4106-9>
7. Kalman Filtering and Neural Networks / ed. by S. Haykin. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001. 284 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471221546>
8. Li Y., Cimini L.J. Interchannel interference of OFDM in mobile radio channels // Globecom '00 – IEEE. Global Telecommunications Conference. 2000. Vol. 2. P. 706–710. DOI: <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2000.891231>
9. Аверина Л.И., Лафичский А.Ю. Повышение скорости передачи данных в каналах с замираниями // Теория и техника радиосвязи. 2019. № 4. С. 5–10.

References

1. Gusiatskiy I.A. et al. *Long Distance Tropospheric Radio*. Moscow: Svyaz', 1968, 248 p. (In Russ.)
2. Sklyar B. *Digital Communication. Theoretical Foundations and Practical Application*. Transl. from English, 2nd ed., corrected. Moscow: Vil'yams, 2003, 1104 p. (In Russ.)
3. Chen W., Ruifeng Z. Kalman-filter channel estimator for OFDM systems in time and frequency-selective fading environment. *2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2004, vol. 4, pp. 377–380. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2004.1326842>
4. Hijazi H., Ros L. OFDM high speed channel complex gains estimation using Kalman filter and QR-detector. *2008 IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems*, 2008, pp. 26–30. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISWCS.2008.4726011>
5. Enescu M., Roman T., Herdin M. Kalman-based estimation of measured channels in mobile MIMO-OFDM system. *2004 12th European Signal Processing Conference*, 2004, pp. 1865–1868.
6. Diniz P.S.R. *Adaptive Filtering. Algorithms and Practical Implementation*. 4th edition. New York: Springer, 2013, 652 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4106-9>
7. *Kalman Filtering and Neural Networks*. Ed. by S. Haykin. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001, 284 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471221546>
8. Li Y., Cimini L.J. Interchannel interference of OFDM in mobile radio channels. *Globecom '00 – IEEE. Global Telecommunications Conference*, 2000, vol. 2, pp. 706–710. DOI: <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2000.891231>
9. Averina L.I., Lafitskiy A.Yu. Increasing the Data Rate in Fading Links. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2019, no. 4, pp. 5–10. (In Russ.)

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2022, vol. 25, no. 4, pp. 39–45

DOI 10.18469/1810-3189.2022.25.4.39-45

Received 24 May 2022
 Accepted 27 June 2022

Increasing of bit error rate performance for OFDM systems over fading channels

Larisa I. Averina, Alexandr Yu. Lafitskiy

Voronezh State University
1, Universitetskaya Square,
Voronezh, 394018, Russia

Abstract – A method for increasing performance of OFDM systems in multipath channels is proposed. The proposed method uses Kalman filter based channel estimator with block type pilot structure. Performance of the proposed method has been demonstrated for GSCM/EDGE channel models, typical for urban area and very small cells. The characteristics of the proposed algorithm are compared with other well-known methods. The impact of Doppler spread is considered. A computer simulation has been carried out to evaluate the required signal-to-noise ratio in case of fixed bit error probability. It is shown, that proposed method leads to lower bit error ratio for slow fading case, but its performance degrades with increasing Doppler frequency.

Keywords – OFDM; robustness; multipath channel; Kalman filter.

Информация об авторах

Аверина Лариса Ивановна, доктор физико-математических наук, профессор Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: исследование и компенсация нелинейных искажений сигналов в приемо-передающих устройствах, алгоритмы цифровой обработки сигналов в многоканальных системах связи.

E-mail: averina@phys.vsu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5908-5032>

Лафицкий Александр Юрьевич, аспирант Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: алгоритмы цифровой обработки сигналов в одноканальных и многоканальных системах связи.

E-mail: unexepcted@yandex.ru

Information about the Authors

Larisa I. Averina, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor of the Voronezh State University, Voronezh, Russia.

Research interests: nonlinear signal distortion in transceivers, digital signal processing for multichannel communication systems.

E-mail: averina@phys.vsu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5908-5032>

Alexandr Yu. Lafickiy, postgraduate student of the Voronezh State University, Voronezh, Russia.

Research interests: digital signal processing algorithms for single and multichannel communication systems.

E-mail: unexepcted@yandex.ru

Неганов, В.А.

Теория и применение устройств СВЧ: учебн. пособие для вузов / В.А. Неганов, Г.П. Яровой; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радио и связь, 2006. – 720 с.



ISBN 5-256-01812-4

УДК 621.396.67

ББК 32.840

Н 41

В учебном пособии рассматриваются методы проектирования и конструктивной реализации устройств СВЧ: линий передачи различных видов, резонаторов, согласующих и трансформирующих устройств, фильтров, фазовращателей, аттенюаторов, тройниковых соединений, направленных ответвителей, различных мостовых соединений, ферритовых устройств (вентилей, циркуляторов, фазовращателей) и СВЧ-устройств на полупроводниковых диодах (умножителей, смесителей, переключателей, выключателей). Приводятся примеры применения устройств СВЧ в радиосвязи, радиолокации, измерительной аппаратуре и т. д. В книгу вошел оригинальный материал, полученный авторами. Учебное пособие может использоваться как справочник по устройствам СВЧ.

Для специалистов в области теории и техники СВЧ, преподавателей вузов, докторантов, аспирантов, студентов старших курсов радиотехнического и радиофизического профиля.