

Калашников Константин Сергеевич

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛОВ С
ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ СИГНАЛОВ НА
ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(в технических системах)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук


Калашников К.С.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном
учреждении высшего профессионального образования
«Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана»

Научный руководитель: **Шахтарин Борис Ильич**, доктор технических наук, профессор кафедры автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Тихомиров Николай Михайлович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник
ОАО «Концерн «Созвездие»;

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2061642

Капашников К.С. Алгоритмы

-643

Чернояров Олег Вячеславович, доктор физико-математических наук, доцент кафедры радиотехнических приборов МЭИ (ТУ).

Ведущая организация: ОАО «Корпорация «Фазотрон-НИИР», г. Москва, Электрический пер., д.1.

Защита диссертации состоится 30 сентября 2014 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана» по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., д.10., ауд.613м. www.bmstu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан 25 июня 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.т.н., доц.

Муратов И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Диссертационная работа Калашникова Константина Сергеевича посвящена проблеме оценивания параметров каналов при приеме сигналов с ортогональным частотным разделением (в англоязычной литературе – Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Техника OFDM получила широкое распространение в современных стандартах цифровой связи и продолжает активно развиваться. Она позволяет добиваться высокой спектральной и энергетической эффективности, низкого уровня, или полного отсутствия межсимвольной интерференции, высокого качества передачи в условиях частотно селективных замираний при невысокой сложности реализации приемных трактов. Перспективным применением технологии OFDM являются системы связи для мобильных робототехнических систем, а также авиационной связи, в том числе, с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА).

Наряду с очевидными достоинствами, OFDM-системы обладают рядом существенных недостатков. Большое число используемых несущих приводит к увеличению пик-фактора сигнала, а требование сохранения ортогональности несущих накладывает жесткие ограничения на точность частотной синхронизации и приводит к увеличению чувствительности OFDM-систем к фазовым шумам опорных генераторов тактовой и несущей частот, доплеровскому рассеянию в канале.

Проблеме оценивания параметров канала в OFDM-системах посвящены работы как отечественных: Исмаилова А.В., Кукушкина Д.С., Иванова А.А., Крейнделина В.Б., Колесникова А.В., Маслова Е.Н, так и зарубежных: T. Roman, W. Chen, R. Zhang, Wu Z, H. Hijazi, L. Ros, исследователей. Однако, известные алгоритмы имеют потенциал совершенствования с точки зрения как увеличения точности оценивания, так и уменьшения вычислительной сложности и данная тема является актуальной.

Цель и задачи диссертации

Целью диссертационной работы является разработка эффективных алгоритмов оценивания параметров канала при приеме OFDM-сигналов.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие основные задачи:

1. Разработка математических моделей сигналов на выходе демодулятора цифровой системы передачи с ортогональным частотным разделением в условиях доплеровского рассеяния в канале.
2. Синтез алгоритмов оценивания параметров канала на основе теории оптимальной многомерной фильтрации.
3. Разработка методов адаптации синтезированных алгоритмов к статистическим характеристикам канала связи.
4. Исследование характеристик синтезированных алгоритмов с точки зрения точности оценивания и достоверности приема цифровых данных.

Научная новизна результатов

1. На основе теории дискретной многомерной фильтрации Калмана автором разработан алгоритм оценивания параметров канала по пилотным несущим с интерполяцией на информационные несущие, включающий оценку изменений частотной характеристики (ЧХ) в течение длительности OFDM-символа.
2. Предложен алгоритм оценивания матриц регрессии, на основе полиномиального разложения корреляционной функции ЧХ канала, позволяющий упростить синтез фильтра Калмана. Выделен полезный частный случай алгоритма, позволяющий использовать постоянное значение матриц регрессии на всем интервале наблюдения.
3. Предложен комбинированный метод оценивания матрицы дисперсии порождающего шума, основанный на ее масштабировании с коэффициентом, вычисляемым при помощи метода максимального правдоподобия.
4. Обоснован метод оценивания дисперсии шума и помех от межканальной интерференции (МКИ), обладающий малой вычислительной сложностью и

позволяющий получить эту искомую оценку без предварительной демодуляции сигнала.

Практическая ценность

1. Получен алгоритм оценивания параметров канала по пилотным несущим с интерполяцией на информационные несущие, включающий оценку изменений ЧХ в течение длительности OFDM-символа. Данный алгоритм позволяет существенно повысить достоверность передачи данных в системах телекоммуникаций и связи, использующих OFDM-сигналы.

2. Разработанный алгоритм оценивания дисперсии шума в канале распространения и помехи от МКИ, может быть использован при проектировании схем синхронизации и демодуляции.

3. Разработаны прикладные методики расчета основных статистических характеристик сигналов и систем передачи и приема.

4. Создан программно-аппаратный стенд для экспериментального исследования систем цифровой связи с использованием OFDM, позволивший подтвердить схемотехническую реализуемость разработанных алгоритмов и оценить влияние различных факторов, неучтенных при имитационном моделировании.

5. На основе имитационных моделей систем передачи сигналов с ортогональным частотным разделением, включающих оценку и компенсацию амплитудно-фазовых искажений в канале, разработано прикладное программное обеспечение для стенда.

6. Сформулированы предложения по повышению помехоустойчивости и пропускной способности систем мобильной наземной и авиационной связи на основе сигналов с OFDM, в том числе систем связи с мобильными роботами и БПЛА.

Апробация результатов

Результаты диссертации прошли апробацию на:

1. Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва 2009-2014 гг.);

2. Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы инфокоммуникационных технологий» (Москва 2013-2014 гг.).

Внедрение результатов работы:

1. Результаты диссертации внедрены в ОКР ООО «НПП «Цифровые решения», что подтверждено актом о внедрении.

2. Результаты диссертации использованы в НИОКР ОАО «Концерн «Созвездие», что подтверждено актом о внедрении.

3. Результаты диссертации использованы в учебном процессе на кафедре автономных информационных и управляющих систем МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждено актом об использовании.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем составляет 146 страниц, включающих 18 страниц приложения, 38 иллюстраций, 2 таблицы и список литературы из 74 наименований.

Положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм оценивания параметров канала по пилотным несущим с интерполяцией на информационные несущие, включающий оценку изменений ЧХ в течение длительности OFDM-символа.

2. Алгоритм оценки матриц регрессии, используемых при синтезе ФК, на основе полиномиального разложения корреляционной функции ЧХ канала, в том числе частный случай его использования в условиях медленных замираний, позволяющий отказаться от оценивания матриц регрессии.

3. Комбинированный метод адаптации матрицы дисперсии порождающего шума, основанный на масштабировании оценки, полученной для наихудших условий приема, с коэффициентом, вычисляемым при помощи метода максимального правдоподобия.

4. Алгоритм оценивания дисперсии шума и помехи от МКИ на основе оценивания доплеровского спектра канала по пилотным несущим.

5. Методика и результаты исследования чувствительности системы к ошибкам при функционировании алгоритмов адаптации на основе модели, построенной с помощью программного пакета MATLAB.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты работы получены Калашниковым К.С. самостоятельно и изложены в 7 статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 8 докладах международных конференций и двух патентах РФ на изобретения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и ее практическая значимость, сформулированы цель и задачи исследования, дан критический анализ работ в области синтеза и анализа систем оценивания параметров канала распространения при приеме сигналов с OFDM.

В первой главе рассмотрена модель канала связи, модель системы связи с OFDM, проведен анализ влияния МКИ, вызванной замираниями в канале, на помехоустойчивость приема.

Вектор комплексных амплитуд поднесущих m -ого принимаемого OFDM-символа представлен в виде

$$\mathbf{x}_r(m) = \mathbf{H}(m)\mathbf{x}_t(m) + \mathbf{n}(m), \quad (1)$$

$$[\mathbf{H}(m)]_{k,l} = A(m, k, l) \frac{1}{N_\phi} \sum_{i=0}^{N_\phi-1} H(m, l, i) \exp\left(-j \frac{2\pi(k-l)i}{N_\phi}\right)$$

где $\mathbf{x}_t(m)$ – вектор комплексных амплитуд передаваемых поднесущих, $\mathbf{n}(m)$ – вектор дискретных отсчетов аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) с дисперсией $\sigma_{\text{ш}}^2$, $H(m, l, i)$ – комплексная передаточная функция канала на частоте l -й поднесущей в момент времени, соответствующий i -му отсчету m -го символа во временной области, а N_ϕ – размер используемого ДПФ. Как $[]_{i,j}$ обозначен j -й элемент i -й строки матрицы.

В случаях, когда точный учет МКИ при обработке сигнала затруднен выражение (1) записывается в виде

$$\mathbf{x}_r(m) = \mathbf{H}(m)\mathbf{x}_t(m) + \mathbf{n}(m) + \mathbf{n}_n(m)$$

При этом в матрице $\mathbf{H}(m)$ все элементы, кроме диагональных, считаются равными нулю, а влияние МКИ – эквивалентным аддитивной помехе $\mathbf{n}_n(m)$, взаимно независимой с $\mathbf{H}(m)$, дисперсия которой вычисляется как

$$\sigma_n^2 \approx 1 - E\{A^2(m, l, l)\}.$$

Показано, что ПРВ распределения помехи от МКИ не является гауссовой, но может быть описана взвешенной суммой гауссовских распределений. Для оценки вероятности битовых ошибок (BER) при приеме без компенсации МКИ можно применить формулы, используемые для каналов с гауссовским шумом без МКИ, подставляя в них суммарную дисперсию $\sigma^2 = \sigma_{\text{ш}}^2 + \sigma_n^2$.

Во второй главе выполнен синтез алгоритма оценивания параметров канала по пилотным несущим, проведена оценка улучшения помехоустойчивости приема при его применении.

Для описания временных изменений ЧХ канала в течение символа использовано полиномиальное разложение вида

$$\begin{aligned} \mathbf{h}(m, l) &= \mathbf{S}_n \mathbf{a}_n(m, l) + \mathbf{e}_n(m, l); \mathbf{h}(m, l) = [H(m, l, 0), \dots, H(m, l, N_\Phi - 1)]^T; \\ \mathbf{a}_n(m, l) &= [a_n(m, l, 0), \dots, a_n(m, l, N_n - 1)]^T; \mathbf{e}_n(m, l) = [e_n(m, l, 0), \dots, e_n(m, l, N_\Phi - 1)]^T; \\ \mathbf{a}_n(m, l) &= \mathbf{S}_n^T \mathbf{h}(m, l) \end{aligned}$$

Здесь матрица $\mathbf{S}_n$ получена путем ортогонализации и нормировки матрицы

$$\mathbf{S}_n = \begin{bmatrix} s_n(0, 0) & \cdots & s_n(N_n - 1, 0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_n(0, N_\Phi - 1) & \cdots & s_n(N_n - 1, N_\Phi - 1) \end{bmatrix}; s_n(p, i) = i^p.$$

Авторегрессионная (АР) модель изменения параметров канала записана в виде

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}_n(nd_t, l) \\ \mathbf{a}_n(nd_t - 1, l) \\ \vdots \\ \mathbf{a}_n(nd_t - d_t + 1, l) \end{bmatrix} = \sum_{p=1}^{N_p} \mathbf{C}_p \mathbf{a}_n((n-p)d_t, l, 0) + \mathbf{g}(n, l),$$

где N_p – порядок модели, $\mathbf{g}(n, l)$ – вектор дискретных отсчетов порождающего шума, $E\{\mathbf{g}(n, l)\mathbf{g}^H(n, l)\} = \mathbf{R}_g \delta_{m,n}$, $\delta_{m,n}$ – символ Кронекера, а $(\cdot)^H$ – операция эрмитова транспонирования, d_t – расстояние по времени между наблюдаемыми символами. Матрицы регрессии $\mathbf{C}_p$ и матрица дисперсии порождающего шума $\mathbf{R}_w$ вычисляются путем решения системы уравнений Юла–Уокера.

Вектор состояния системы записан в виде

$$\mathbf{y}(m, l) = [\mathbf{a}_n^T(m, l), \mathbf{a}_n^T(m - p, l), \dots, \mathbf{a}_n^T(m - N_p d_t + 1, l)]^T,$$

а его временные изменения:

$$\mathbf{y}(m, l) = \Phi \mathbf{y}(m - 1) + \mathbf{W}(m),$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{C}}_1 & \bar{\mathbf{C}}_2 & \dots & \bar{\mathbf{C}}_{N_p-1} & \bar{\mathbf{C}}_{N_p} \\ \mathbf{I}_{N_p d_t} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_{N_p d_t} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{I}_{N_p d_t} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{C}}_p = [\mathbf{C}_p \quad \mathbf{0}_{N_p d_t \times N_p d_t - 1}],$$

$$\mathbf{W}(m, l) = \begin{bmatrix} \mathbf{g}(m, l) \\ \mathbf{0}_{(N_p-1)N_p \times 1} \end{bmatrix}.$$

где $\mathbf{0}_{m \times n}$ – нулевая матрица размером $m \times n$, $\mathbf{I}_n$ – единичная матрица размером n .

Уравнение наблюдения записано в виде:

$$z(m) = \mathbf{D} \mathbf{y}(m) + n_\Sigma(m),$$

где $\mathbf{D}$ – вектор-строка с первым элементом, равным комплексной амплитуде наблюдаемой несущей, и прочими элементами, равными нулю, $n_\Sigma(m)$ – суммарная помеха от МКИ и АБГШ с дисперсией σ^2 . В случае оценивания только по пилотным несущим можно считать, что наблюдается последовательность $x_r(m, k)/x_t(m, k)$, первый элемент вектора $\mathbf{D}$ равен

единице, а дисперсия шума наблюдения равна $\sigma^2 / x_{\text{оп}}^2$, где $x_{\text{оп}}$ – амплитуда пилотных сигналов.

Для оценки качества работы алгоритма введена мера

$$\varepsilon_p = 10 \lg \left(E \left[\left| \hat{a}_n(n, l, p) - a_n(n, l, p) \right|^2 \right] / E \left[\left\| \mathbf{h}(m, l) \right\|^2 \right] \right) \text{ дБ},$$

имеющую смысл нормированного среднего квадрата ошибки оценивания p -й компоненты разложения вектора $\mathbf{h}(m, l)$.

Показано (см. Рис. 1), что ошибка оценивания компоненты $a_n(n, l, 1)$, отвечающей за оценку МКИ более, чем на 20 дБ, меньше ошибки оценивания среднего значения $a_n(n, l, 0)$, поэтому при оценке вероятности битовых ошибок ее можно не учитывать.

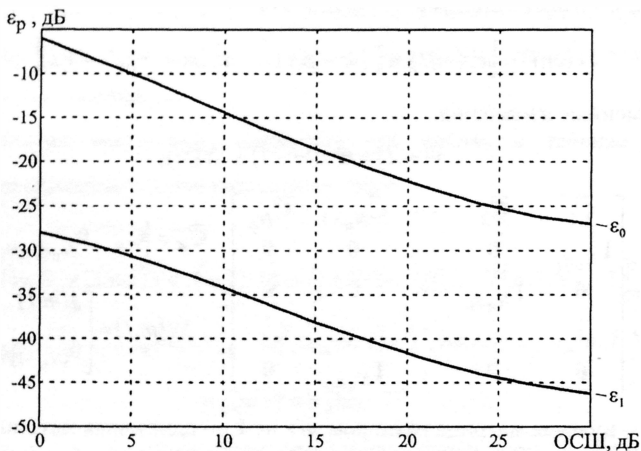


Рис. 1. Относительная дисперсия ошибки оценивания в зависимости от ОСШ

В третьей главе разработаны методы адаптации синтезированного алгоритма к статистическим характеристикам канала.

Для вычисления коэффициентов регрессии предложено оценить коэффициенты разложения корреляционной функции $R_h(t)$ полиномиальный ряд

$$R_h(\Delta t) = \sum_{p=0}^{N_{\text{апр}}} r_{\text{апр}}(p) \Delta t^{2p} + e_{\text{апр}}(\Delta t),$$

где $e_{\text{апр}}(\Delta t)$ – ошибка полиномиальной аппроксимации при ограничении $(N_{\text{апр}} + 1)$ -м членом ряда. Полученную оценку подставляется в систему уравнений Юла-Уокера для вычисления матриц C_p .

Вычисление коэффициентов $r_{\text{апр}}(p)$ выполнено по коррелограмме наблюдаемого сигнала $\mathbf{r}_z$, которая находится в рекурсивной форме

$$\hat{\mathbf{r}}_z(n) = [\hat{r}_z(0) - \alpha\sigma^2, \hat{r}_z(1), \dots, \hat{r}_z(K)]^T; K \geq N_{\text{апр}};$$

$$\hat{r}_z(n, k) = \frac{1}{N_{\text{п}}(K - k + 1)} \sum_{l=n-K+k}^n \mathbf{z}(l) \mathbf{z}^H(l - k); \tilde{\mathbf{r}}_z(n) = \lambda \tilde{\mathbf{r}}_z(n - 1) + (1 - \lambda) \hat{\mathbf{r}}_z(n);$$

где $\tilde{\mathbf{r}}_z$ – коррелограмма, подвергнутая экспоненциальному сглаживанию.

Предложенная оценка коэффициентов разложения, оптимальная в смысле минимума среднего квадрата ошибки имеет вид $\hat{\mathbf{r}}_{\text{апр}} = \mathbf{M}_{\text{апр}}^+ \hat{\mathbf{r}}_z$, где $\mathbf{r}_{\text{апр}} = [r_{\text{апр}}(0), \dots, r_{\text{апр}}(N_{\text{апр}})]$, элементы матрицы $\mathbf{M}_{\text{апр}}$ равны

$$[\mathbf{M}_{\text{апр}}]_{k,p} = \mathbf{s}_0^H \mathbf{R}_{\text{апр}}(k, p) \mathbf{s}_0, [\mathbf{R}_{\text{апр}}(k, p)]_{i,j} = r_{\text{апр}}(p) [kT_s + (i - j)t_d]^{2p},$$

$\mathbf{s}_0$ – первый столбец матрицы $\mathbf{S}_n$, а $\mathbf{M}_{\text{апр}}^+$ – матрица, псевдообратная к $\mathbf{M}_{\text{апр}}$

Предложен комбинированный метод оценивания матрицы дисперсии порождающего шума на основе метода максимального правдоподобия и масштабирования. На этапе инициализации алгоритма вычисляется оценка матрицы $\mathbf{R}_w$ из предположения наихудших условий распространения: отсутствие прямой видимости между передатчиком и приемником и значение f_d , наибольшее из ожидаемых. После нормировки на первый диагональный элемент эта оценка обозначается как $\bar{\mathbf{R}}_w$. В качестве оценки матрицы дисперсии порождающего шума масштабированную матрицу $\bar{\mathbf{R}}_w$, причем коэффициент масштабирования вычисляется по алгоритму максимального правдоподобия.

$$\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{w}}(n+1) = \hat{\sigma}_{\mathbf{w}}^2(n+1)\bar{\mathbf{R}}_{\mathbf{w}}, \quad \hat{\sigma}_{\mathbf{w}}^2(n+1) = \lambda \hat{\sigma}_{\mathbf{w}}^2(n) + (1-\lambda)\mathbf{D}\hat{\mathbf{V}}(n+1)\mathbf{D}^H,$$

$$\hat{\mathbf{V}}(n+1) = \frac{1}{N_{\text{оп}}} [\hat{\mathbf{Y}}(n) - \hat{\Phi}(n+1)\hat{\mathbf{Y}}(n-1)] [\hat{\mathbf{Y}}(n) - \hat{\Phi}(n+1)\hat{\mathbf{Y}}(n-1)]^H.$$

Показано, что ошибка задания матрицы $\bar{\mathbf{R}}_{\mathbf{w}}$ слабо влияет на точность оценивания.

Предложен алгоритм оценки дисперсии помехи, основанный на спектральном оценивании случайного процесса $A(m, l, l)$ с использованием пилотных несущих сигнала. Эта оценка имеет вид

$$\hat{\sigma}^2(m, L/2, l) = \frac{1}{E_w L} \left| \sum_{i=0}^{L-1} w(i) \frac{x_r(mL + d_i, l)}{x_t(mL + d_i, l)} (-1)^i \right|^2, \quad E_w = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} w^2(i),$$

где $w(i)$ – весовые множители используемого окна, m и L – номер окна и его длина, комплексные амплитуды передаваемых пилотных сигналов $x_t(mL + d_i, l)$ известны.

Показано, что в качестве весовых множителей следует использовать окно Чебышева, а после усреднения по всем несущим и M окнам, если пренебречь смещением в результате влияния сигнала и считать отсчеты $n(m, l)$ гауссовскими случайными величинами (что действительно только при отсутствии МКИ), полученная оценка представляет собой случайную величину, распределенную по закону хи-квадрат с $2MN_p$ степенями свободы. Математическое ожидание оценки равно σ^2 , а дисперсия – $\sigma^4 / (MN_p)$.

В четвертой главе для оценки влияния ошибок оценивания матриц регрессии и дисперсии порождающего шума, а также дисперсии шума была разработана модель OFDM-системы передачи данных в программном пакете Matlab. Исследовано влияние различных параметров алгоритма на его устойчивость и точность оценивания. Создан программно-аппаратный стенд для экспериментального исследования систем цифровой связи с использованием OFDM-сигналов.

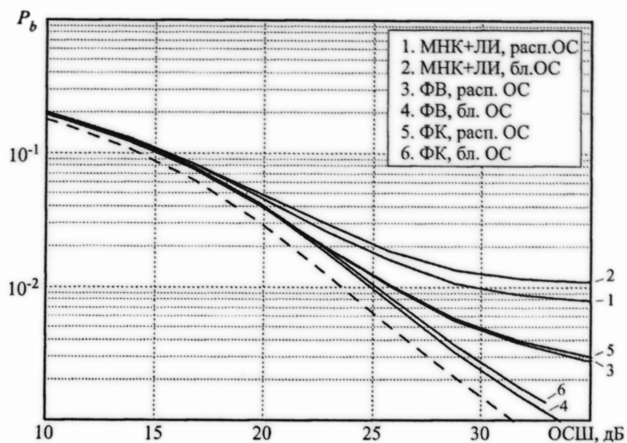


Рис. 2. Экспериментальные (штриховой линией) оценки вероятности ошибки в системах связи с БПЛА при модуляции КАМ64

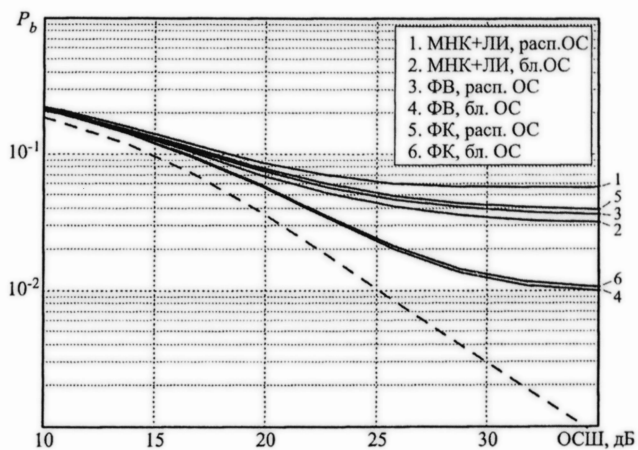


Рис. 3. Экспериментальные (штриховой линией) оценки вероятности ошибки в системах авиационной связи при модуляции КАМ64

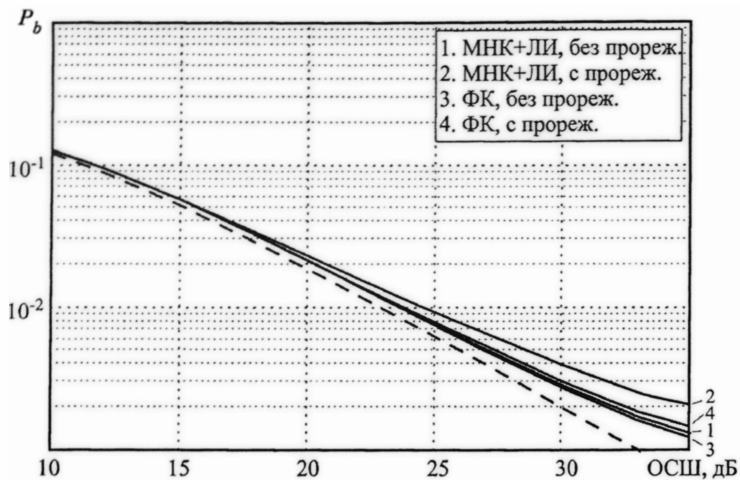


Рис. 4. Экспериментальные (штриховой линией) оценки вероятности ошибки в системах связи с мобильными роботами при модуляции КАМ64

Выполнена оценка помехоустойчивости приема OFDM-сигнала системой, использующей предложенные алгоритмы, при распространении сигнала по каналам с различными параметрами многолучевого профиля, шириной и формой доплеровского спектра, характеризующими основные сценарии распространения сигнала. При этом рассмотрено применение типовой распределенной и блочной схем размещения опорных сигналов. Полученные в результате моделирования оценки вероятностей битовых ошибок для систем связи с мобильными робототехническими комплексами а также для систем авиационной связи представлены на Рис. 2-4.

Применение предложенных алгоритмов позволило добиться результатов, близких к достижимым при применении оптимальных алгоритмов. В случае систем авиационной связи применение блочной схемы размещения опорных сигналов позволило в 4-8 раз уменьшить нижнюю границу вероятности ошибки (Рис. 2, Рис. 3) по сравнению с системами с распределенными опорными

сигналами, а также по сравнению с алгоритмами на основе линейной интерполяции. В случае систем связи с мобильными роботами применение предложенных алгоритмов позволило уменьшить требуемую плотность размещения опорных сигналов. В результате в системах, использующих предложенный алгоритм, в отличие от систем с алгоритмами на основе линейной интерполяции прореживание опорных сигналов не снижает достоверность приема данных (Рис. 4).

В заключении подведены итоги диссертации.

В приложении приведены исходные коды имитационной модели OFDM-системы, использованной при исследованиях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В итоге проведенных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные результаты:

1. На основе фильтра Калмана разработан алгоритм оценки параметров канала распространения OFDM-сигналов, использующий опорные частотные каналы и включающий оценку изменений ЧХ канала в течение символа. Получены оценки вероятности битовых ошибок на выходе демодулятора при его использовании. Алгоритм на основе фильтра Калмана позволяет добиться помехоустойчивости, близкой к достижимой при помощи фильтр Винера, при меньшей сложности аппаратной реализации и адаптации к характеристикам канала распространения сигнала.

2. Предложены алгоритмы адаптации параметров фильтра Калмана к статистическим характеристикам беспроводного канала связи: матриц регрессии – путем оценки коэффициентов полиномиального разложения КФ ЧХ канала, и матрицы дисперсии порождающего шума путем масштабирования ее оценки, полученной для наихудших ожидаемых условий приема. Алгоритмы позволяют добиться точности оценивания параметров канала, близкой к теоретически достижимой. Увеличение ОСШ, требуемого для достижения вероятности ошибок 10^{-3} не превосходит 0,5 дБ.

3. Выделен полезный частный случай алгоритма адаптации матриц регрессии при порядке авторегрессионной модели, равном трем и квадратичной аппроксимации КФ ЧХ канала. В этом случае система уравнений Юла-Уокера имеет единственное решение, независимое от оценки КФ ЧХ, что позволяет использовать единственное значение матриц регрессии на всем интервале наблюдения при малых значениях относительного доплеровского рассеяния до 0,06 в зависимости от параметров сигнала.

4. Предложен алгоритм оценивания дисперсии шума и помех от МКИ путем оценивания доплеровского спектра канала, который позволяет получить искомую оценку без предварительной демодуляции сигнала.

5. Результаты исследований с использованием имитационного моделирования в среде MATLAB, а также разработанного программно-аппаратного стенда подтвердили результаты, полученные аналитическим путем. Расхождение результатов не превосходит 10%.

6. Предложенные алгоритмы позволяют добиваться наибольшего выигрыша при применении в системах авиационной связи при типовых сценариях распространения сигнала. Снижение границы достижимой вероятности ошибки по сравнению с системами, использующими линейную интерполяцию, при этом может достигать 4-8 раз.

7. Применение блочного размещения опорных сигналов вместо распределенного позволяет дополнительно снизить вероятность ошибок в системах авиационной связи в 5-8 раз.

8. Применение разработанных алгоритмов в системах связи с мобильными роботами позволяет снизить плотность размещения опорных сигналов в 2-4 раза без снижения достоверности приема цифровых данных.

Основные результаты диссертации отражены в научных работах:

1. Калашников К.С., Шахтарин Б.И. Адаптивный фильтр Калмана для оценки параметров канала при приеме OFDM-сигналов // Радиотехника и электроника. 2014. Т.59. №4 . С.331-338. (0,5 п.л./0,25 п.л.)

2. Калашников К.С., Шахтарин Б.И. Оценка и компенсация межканальной интерференции при приеме OFDM-сигналов // Радиотехника и электроника. 2013 . Т.58. №3. С.238-246. (0,5 п.л./0,25 п.л.)
3. Калашников К.С. Алгоритм оценки интерференционных искажений при приеме OFDM-сигналов в условиях многолучевых каналов с замираниями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение» 2011. №4. С.92-100. (0,625 п.л.)
4. Калашников К.С. Алгоритм компенсации межканальных помех при приеме OFDM-сигналов в условиях каналов с замираниями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012. №1. С.25-37. (0,75 п.л.)
5. Синтез алгоритма оценки и коррекции параметров канала при приеме OFDM - сигналов в стандарте DVB-T / Калашников К.С. [и др.] // Цифровая обработка сигналов. 2009. №1. С.37-41. (0,25 п.л./ 0,0625 п.л.)
6. Синтез алгоритмов частотной и временной синхронизации для приема OFDM-сигналов в стандарте DVB-T / Калашников К.С. [и др.] // Цифровая обработка сигналов. 2009. №1. С.42-47. (0,25 п.л./ 0,0625 п.л.)
7. Калашников К.С., Шахтарин Б.И. Синхронизация OFDM-сигналов во временной и частотной областях // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2011. №1. С.18-27. (0,5 п.л./0,25 п.л.)
8. Синтез алгоритмов синхронизации OFDM-сигналов в частотной области / Калашников К.С. [и др.] // Электросвязь. 2009. №11. С. 35-37 (0,3125 п.л./0,0625 п.л.)
9. Декодер сверточных кодов для DVB-T приемника: патент РФ № 2399157 / Бумагин А. В., Калашников К.С., Прудников А.А., Стешенко В.Б. Заявл. 28.10.2008. Оpubл. 10.09.2010. Бюл. № 25.
10. Устройство оценки и коррекции параметров канала для приема COFDM-сигналов: патент РФ № 2407198 / Бумагин А. В., Калашников К.С., Прудников А.А., Стешенко. Заявл. 28.10.2008. Оpubл. 20.12.2010. Бюл. № 35.

11. Калашников К.С., Шахтарин Б.И. Адаптивный фильтр Калмана для оценки параметров канала в OFDM-системах // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. сер. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М. 2014. Выпуск XVI-1. Т. 1. С.249-253. (0,25 п.л./ 0,125 п.л.)
12. Калашников К.С. Алгоритм оценки дисперсии шума и помех при приеме OFDM-сигналов // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. сер. «Цифровая обработка сигналов и ее применение» М. 2013. Выпуск XV-1. Т. 1. С. 234-238. (0,25 п.л.)
13. Калашников К.С., Шахтарин Б.И. Применение оптимальной линейной фильтрации для компенсации межканальной интерференции при приеме ofdm-сигналов // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. сер. «Научные конференции, посвященные дню радио». М. 2013. Выпуск LXVIII. С.97-101. (0,25 п.л./ 0,125 п.л.)
14. Калашников К.С. Метод борьбы с межканальной интерференцией при приеме OFDM-сигналов в условиях быстрых замираний в канале // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. сер. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М. 2012. Выпуск XIV-1. Т. 1. С.154-158. (0,25 п.л.)
15. Андрианов М.Н., Бумагин А.В., Калашников К.С. Способ оценки и компенсации интерференционных искажений при приеме OFDM-сигналов в многолучевых каналах с замираниями // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. сер. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М. 2011. Выпуск XIII-1. Т. 1. С.169-173. (0,25 п.л./0,125 п.л.)
16. Синтез и моделирование алгоритмов синхронизации тракта демодулятора телевизионного приемника, работающего в стандарте DVB-T / Калашников К.С. [и др.] // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. сер. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М. 2009. Выпуск XI-1. Т. 1. С.196-200. (0,25 п.л./0,0625 п.л.)
17. Программно-аппаратный стенд для макетирования системы на кристалле демодулятора цифрового телевизионного сигнала / Калашников К.С. [и др.] // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. сер. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». М. 2010. Выпуск XII-1. Т. 2. С. 554-558. (0,25 п.л./0,0625 п.л.)