

Исследование методов эквалайзирования для систем связи с использованием OFDM-сигналов

Р.Р. Абенов, А.С. Вершинин, Е.П. Ворошилин, Е.В. Рогожников

Разработаны рекомендации по выбору метода оценки передаточной функции канала распространения радиоволн (РРВ) по пилотным поднесущим. Выбраны расстояния между пилотными поднесущими, при которых для типовых моделей канала РРВ будет сохраняться высокая скорость передачи данных. Смоделирован процесс оценки передаточной функции канала РРВ по пилотным поднесущим. Посчитана вероятность битовой ошибки для каждого из предложенных методов.

Ключевые слова: оценка канала, эквалайзирование, методы интерполяции, вероятность битовой ошибки.

1. Введение

Цель работы: провести сравнение различных методов оценки передаточной функции канала РРВ, получить зависимости среднеквадратичных ошибок оценивания передаточной функции и вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при различных расположениях пилотных поднесущих.

Применение: оценка канала по пилотным поднесущим применяется в таких современных системах беспроводной связи, как WiMAX и LTE.

В наше время активно развиваются мобильные сети четвёртого поколения. В таких сетях для оценки канала распространения радиоволн используются методы, основанные на использовании пилот-сигналов, известных в передатчике и приёмнике. Технология использования пилот-сигналов предполагает разбиение информационного сигнала на элементы [1], в состав которых входит от одного до нескольких пилот-сигналов, обеспечивающих нужную точность оценки передаточной функции. После формирования всех оценок эквалайзер устраняет искажения, вызванные каналом, в простейшем случае путём деления принятого сигнала на оценку передаточной функции канала РРВ.

Алгоритмы оценки передаточной функции

Наиболее часто в современных системах связи, использующих для оценки канала пилотные поднесущие, реализуются следующие методы оценки передаточной функции:

Оценка по одному пилоту. Фазовые и амплитудные искажения информационных поднесущих в пределах одного элемента оцениваются по одному пилотному сигналу:

$$\hat{H} = P,$$

где $\hat{H}$ – поднесущие с данными, P – пилотные поднесущие.

Алгоритм усреднения. Данный алгоритм использует среднее значение пилотных поднесущих для оценки передаточной функции:

$$\hat{H} = (P_1 + P_2 + \dots + P_N) / N.$$

Этот алгоритм является самым простым методом оценки канала РРВ и используется в системах WiMAX [1]. Он эффективно уменьшает влияние шума и является подходящим для случая медленных замираний уровня сигнала при прохождении канала РРВ.

Линейная интерполяция. Другой широко используемый алгоритм – линейной интерполяции [2]. $\hat{H}_i$ вычисляется путём одномерной линейной интерполяции.

$$k_i = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}, \quad b_i = y_0 - kx_0,$$

$$\hat{H}_i = k_i x + b_i.$$

Интерполяция параболой. Этот метод использует три пилотные поднесущие и сводится к нахождению коэффициентов параболы, проходящей через них [2]. Коэффициенты параболы соответственно равны:

$$a_i = \frac{y_3 - \frac{x_3(y_2 - y_1) + x_2y_1 - x_1y_2}{x_2 - x_1}}{x_3(x_3 - x_1 - x_2) + x_1x_2},$$

$$b_i = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} - a_i(x_1 + x_2),$$

$$c_i = \frac{x_2y_1 - x_1y_2}{x_2 - x_1} + a_ix_1x_2,$$

$$\hat{H}_i = a_ix^2 + b_ix + c_i.$$

Интерполяция SPLINE. Этот алгоритм интерполирует значение функции, используя кубические сплайны. Кубическим интерполяционным сплайном, соответствующим данной функции $f(x)$ и данным узлам x_i , называется функция $S(x)$, удовлетворяющая следующим условиям[2]:

1. На каждом сегменте $[x_{i-1}, x_i]$, $i = 1, 2, \dots, N$ функция $\hat{H}(x)$ является полиномом третьей степени.
2. Функция $\hat{H}(x)$ и её первая и вторая производные непрерывны на отрезке $[a, b]$.
3. $\hat{H}(x) = f(x_i), i = 0, 1, \dots, N$.

2. Моделирование

Сравнение методов оценки передаточной функции канала РРВ было проведено путём численного моделирования в среде Matlab. Используемые для оценки канала пилотные поднесущие располагались с шагом 40, 60 и 80 кГц. Каждым методом формировалась оценка передаточной функции канала, затем она сравнивалась с истинной и рассчитывалась среднеквадратичная ошибка оценивания. Количество реализаций равнялось 15000, число поднесущих – 480. Расстояние между поднесущими равнялось 10 кГц. Для расчёта вероятности битовой ошибки использовался OFDM-сигнал с двумя индексами модуляции: QAM-4 и QAM-16.

Для исследования были выбраны три модели канала [3]:

Канал №1 – Расширенная модель 3GPP радиоканала сотовых систем для обычного города;

Канал №2 – Расширенная модель 3GPP радиоканала сотовых систем для пешехода;

Канал №3 – Расширенная модель 3GPP радиоканала сотовых систем для транспортного средства.

Таблица 1 – Модели каналов распространения радиоволн

№ луча	Канал №1		Канал №2		Канал №3	
	Задержка, нс	Мощность, дБ	Задержка, нс	Мощность, дБ	Задержка, нс	Мощность, дБ
1	0	-1.0	0	0.0	0	0.0
2	50	-1.0	30	-1.0	30	-1.5
3	120	-1.0	70	-2.0	150	-1.4
4	200	0.0	90	-3.0	310	-3.6
5	230	0.0	110	-8.0	370	-0.6
6	500	0.0	190	-17.2	710	-9.1
7	1600	-3.0	410	-20.8	1090	-7.0
8	2300	-5.0			1730	-12.0
9	5000	-7.0			2510	-16.9

Пример реализации передаточной функции этих каналов изображены на рис. 1.

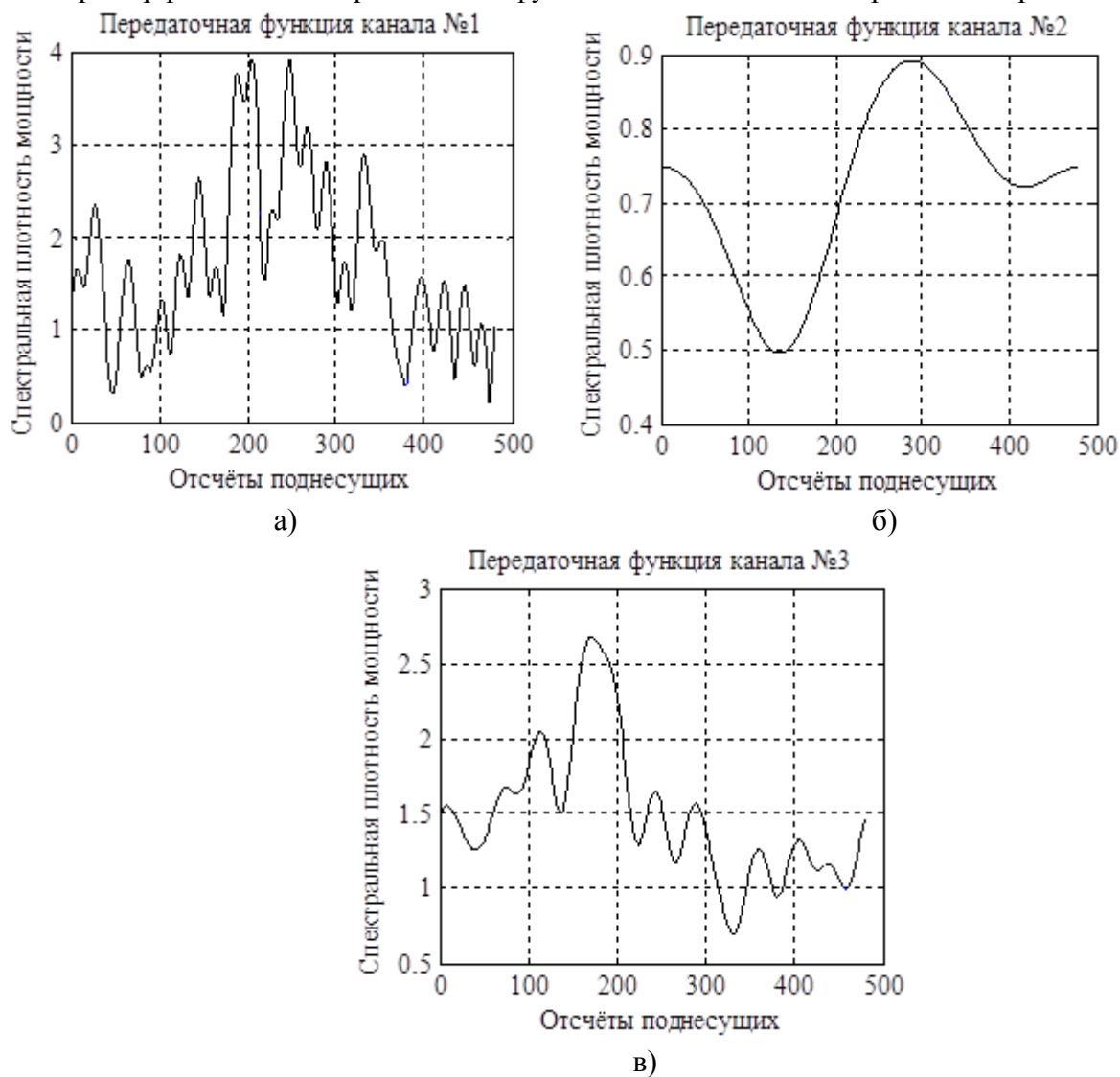


Рис. 1 Пример реализации передаточной функции каждого из каналов Таблицы 1.

На рис. 2 представлен пример оценки передаточной функции канала различными методами.



Рис. 2 Пример оценки передаточной функции канала различными методами

На рис. 3 изображены зависимости СКО оценки передаточной функции для моделей каналов распространения от отношения сигнал/шум при среднем значении разнесения между пилотными поднесущими (60 кГц).

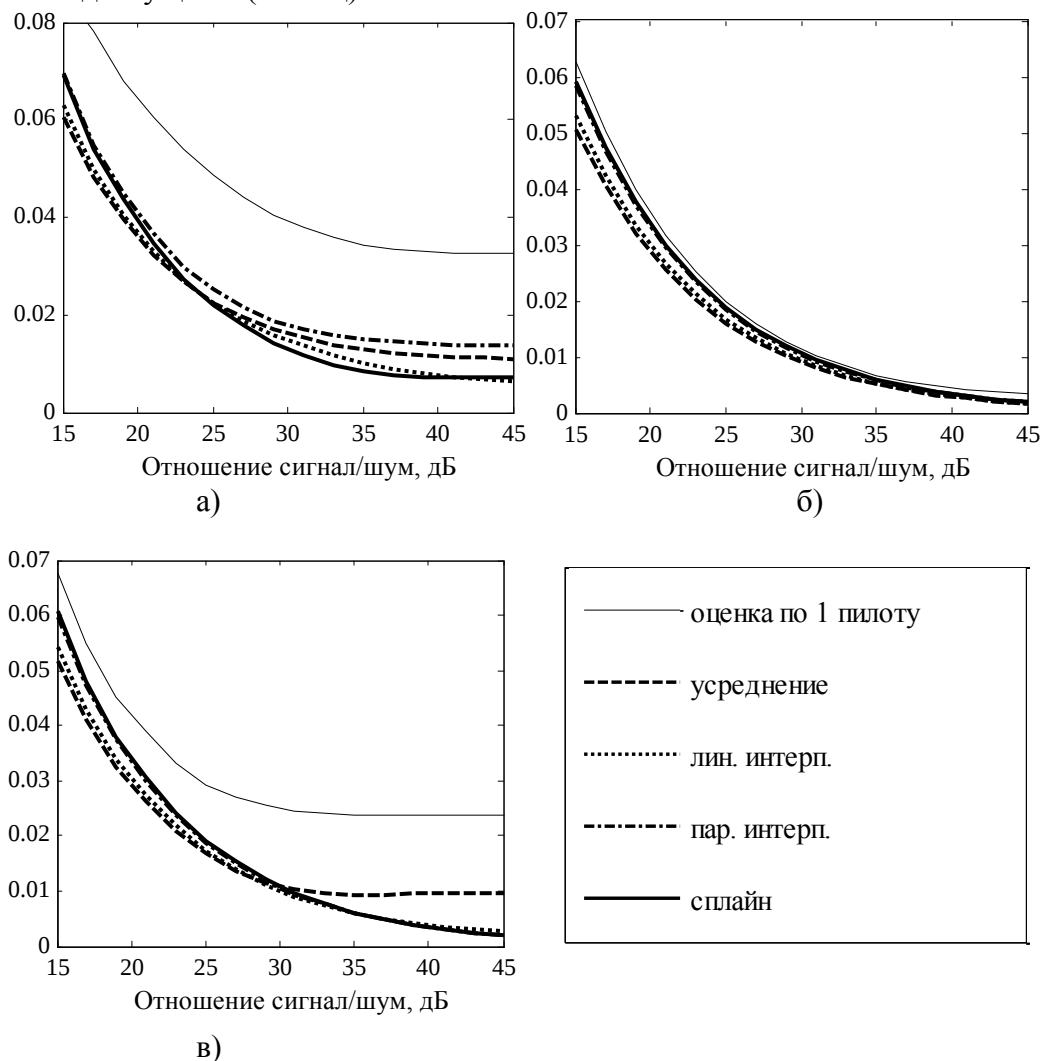
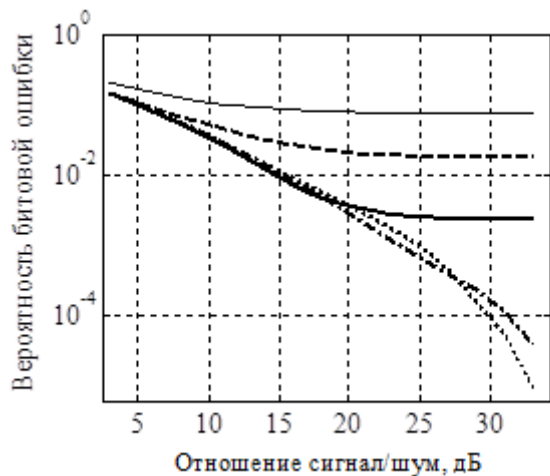
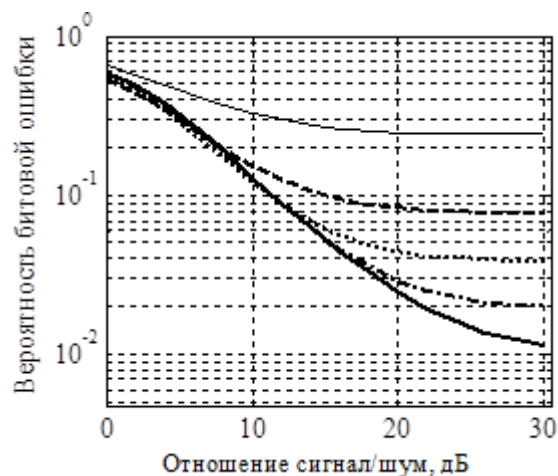


Рис. 3 СКО оценки передаточной функции, нормированные к среднему значению передаточной функции канала: а) канал №1, б) канал №2, в) канал №3

На следующем рисунке изображены результаты расчета вероятности битовой ошибки для каждого из каналов при двух индексах модуляции: QAM-4 и QAM-16.

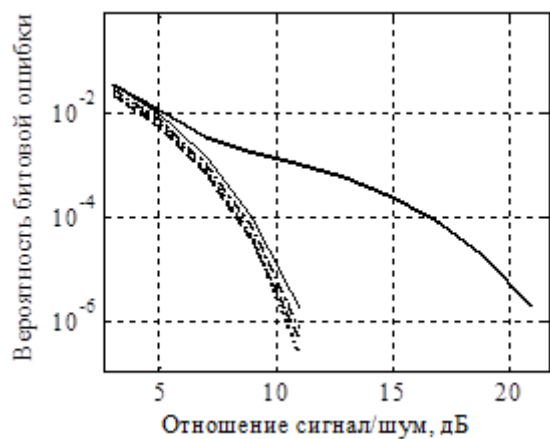


QAM-4

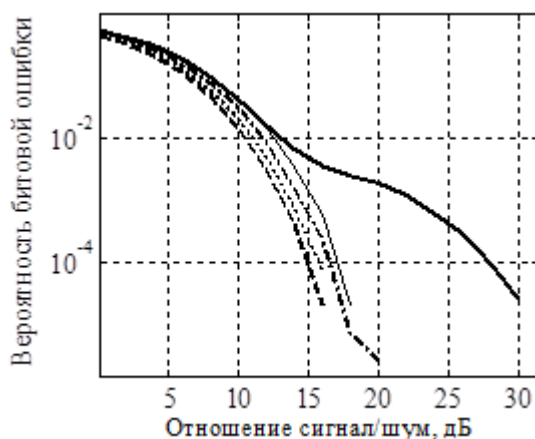


QAM-16

а)

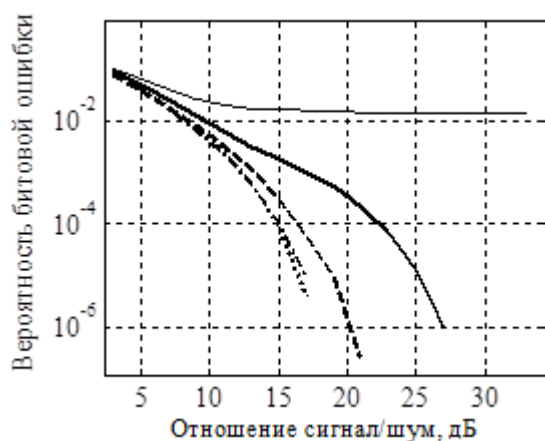


QAM-4

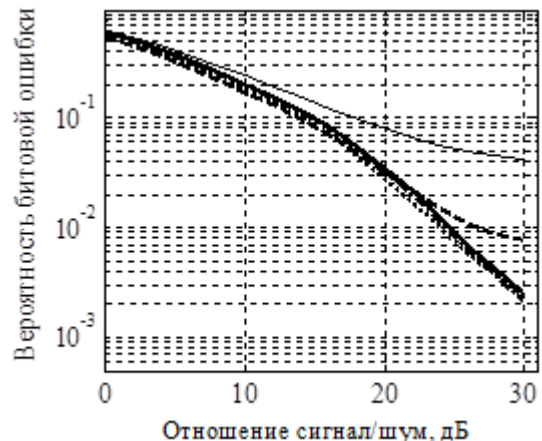


QAM-16

б)



QAM-4



QAM-16

в)

— по 1 пилоту ---- усреднение лин. интерп. - - - - пар. интерп. — сплайн

Рис. 4 Вероятность битовой ошибки с различным разнесением пилотных поднесущих: а) канал №1, б) канал №2, в) канал №3

3. Анализ полученных результатов

Из рисунка 3 следует, что при низких отношениях сигнал/шум наименьшую ошибку оценивания обеспечивает метод усреднения. При повышении отношения сигнал/шум точность оценки методом усреднения повышается, но медленнее, чем точность оценки методом интерполяции. Если шаг расположения пилотных поднесущих относительно небольшой, метод усреднения целесообразно использовать до отношений сигнал/шум 30 дБ. При отношении сигнал/шум выше 30 дБ следует выбирать метод интерполяции кубическим сплайном. В случае шага пилотных поднесущих, равного 60 кГц, интерполяцию выгодно использовать уже при отношении сигнал/шум 25 дБ.

Анализ результатов моделирования для канала №1 показал, что при высоком отношении сигнал/шум лучшим алгоритмом оценки передаточной функции является интерполяция сплайном. При низких значениях отношения сигнал/шум результаты моделирования различных алгоритмов отличаются менее, чем на один процент.

Анализ результатов моделирования для канала №2 показал очевидное преимущество метода усреднения. Для всех практически значимых отношений сигнал/шум он демонстрирует наименьшую СКО оценивания передаточной функции и лучшую вероятность битовой ошибки. Однако при высоких отношениях сигнал/шум точность оценки передаточной функции канала всех остальных методов увеличивается, и разница между СКО оценки передаточной функции не превышает 0.2%.

Анализ результатов моделирования для канала №3 показал, что при минимальном шаге расположения пилотных поднесущих и отношениях сигнал/шум менее 35 дБ метод усреднения обеспечивает минимальные среднеквадратичные ошибки оценивания. При бóльших отношениях сигнал/шум целесообразно использовать метод интерполяции сплайном или линейной интерполяции. При увеличенном шаге расположения пилотных поднесущих интерполяцию сплайном удобно использовать уже при 27 – 30 дБ отношения сигнал/шум.

4. Вывод

Результаты численного моделирования показали, что для различных типов каналов РРВ целесообразно использовать разные методы оценивания передаточной функции. Рекомендации по использованию исследуемых методов для разработчиков сетей связи четвёртого поколения сведены в табл. 2.

Таблица 2. Рекомендации по выбору параметров системы связи для каждого типа канала

№ канала	Рекомендуемое расстояние между пилотами, кГц	Рекомендуемый алгоритм в пределах отношения сигнал/шум 0 – 30 дБ	Рекомендуемый алгоритм в пределах отношения сигнал/шум 30 – 50 дБ
Канал №1	40	Алгоритм усреднения	Интерполяция сплайном
Канал №2	80	Алгоритм усреднения	Алгоритм усреднения
Канал №3	60	Алгоритм усреднения	Интерполяция сплайном

Литература

1. Channel Estimation & Equalization for WiMAX. Application notes 434. ALTERA corporation, version 1.1. 2007.
2. Ханова А.А. Интерполяция функций/ Методическое пособие для студентов Института информационных технологий и коммуникаций. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2001. – 27 с.
3. Fundamentals of WiMax: understanding broadband wireless networking/ Jtffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Ria Muyaamed. 2007.

Статья поступила в редакцию 06.11.2012

Абенов Ренат Рамазанович

аспирант каф. телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа, тел.: 89138847477,
эл. почта: abenov.rr@gmail.com

Вершинин Александр Сергеевич

аспирант каф. телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа, тел.: 89138049464,
эл. почта: vershkov@sibmail.com

Ворошилин Евгений Павлович

кандидат технических наук, заведующий каф. телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа, тел., факс: (3822) 413-398 (раб.), эл. почта: vep@tor.tusur.ru

Рогожников Евгений Васильевич

аспирант каф. телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа, тел.: 89234814095,
эл. почта: udzhon@sibmail.com

Research of equalization methods for the communication systems using OFDM signals

Abenov R.R., Rogozhnikov E.V., Vershinin A.S., Voroshilin E.P.

Recommendations on the choice of estimation method of the channel propagation transfer function on the pilot subcarriers are developed. Distance between the pilot subcarriers, which for typical propagation channel models will maintain a high data rate, is chosen. Estimation process of channel transfer function on the pilot subcarriers is simulated. Bit error rate for each of the suggested methods is estimated.

Keywords: channel estimation, equalization, methods of interpolation, bit error rate.