

УДК 621.396

Н.А. Лобанов
Томск, Россия**АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАННЫХ ПО ПОДНЕСУЩИМ
ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ OFDM СИГНАЛА***N.A. Lobanov*
Tomsk, Russia**ALLOCATION ALGORITHM FOR DATA SUBCARRIERS FOR WIRELESS
COMMUNICATION SYSTEMS BASED ON OFDM SIGNAL**

Предложен алгоритм адаптивного распределения мощности и индекса модуляции по поднесущим. Приведены результаты математического моделирования данного алгоритма в условиях релейского частотно-селективного канала распространения. Произведено сравнение с алгоритмом Yu и случаем использования равномерного распределения мощности и индекса модуляции по поднесущим. Показана теоретическая эффективность использования предложенного алгоритма при его применении в системе связи WIMAX стандарта IEEE 802.16.

АДАПТИВНАЯ МОДУЛЯЦИЯ. АДАПТИВНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ. OFDM (ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING). СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ. БИТОВАЯ ВЕРОЯТНОСТЬ ОШИБКИ.

We present an adaptive bit loading algorithm for orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems. Present algorithm use a blockwise allocation of modulation and power levels to the subcarriers with puncturing of «weak» subcarriers. The simulation results show the effectiveness of this algorithm for the case of random multipath Rayleigh channel.

ADAPTIVE MODULATION. ADAPTIVE POWER. OFDM. BIT RATE. BIT ERROR RATE (BER).

В системах связи 3G, 4G и цифрового телевидения (DVB) наиболее распространенной технологией передачи данных является мультиплексирование (уплотнение) с ортогональным частотным разделением (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) [1]. Суть данной технологии состоит в том, чтобы разделять имеющуюся полосу частот на множество ортогональных подканалов (поднесущих). Формирование ортогональных поднесущих достигается за счет применения алгоритмов преобразования Фурье. Системы связи, основанные на применении данной технологии, эффективны при функционировании в условиях многолучевого распространения с частотно-селективными замираниями.

Примерами систем передачи с ортогональными поднесущими служат системы связи семейства WIMAX (IEEE 802.16) [2]. Стандарт, описываю-

щий данные системы, предполагает равномерное распределение мощности, а также одинаковый индекс модуляции на каждой информационной поднесущей для одного абонента. Однако такой подход не является оптимальным с точки зрения достижимой скорости передачи данных при условии ограниченной излучаемой мощности. Выражение для пропускной способности неидеального линейного фильтрового канала с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ) принадлежит Шеннону (1949 г.), а фундаментальная интерпретация этого результата сводится к тому, что мощность сигнала должна быть велика, когда канальное отношение сигнал/шум (ОСШ) велико, и она должна быть мала, когда ОСШ мало [3].

В системах, использующих OFDM, благодаря ортогональности поднесущих возможно изменять не только мощность по поднесущим, но и индекс

модуляции на каждой поднесущей. Таким образом, можно увеличивать скорость передачи, уменьшать передаваемую мощность и битовую вероятность ошибки (Bit Error Rate – BER). Алгоритмы адаптивного распределения мощности и индекса модуляции по поднесущим называются *алгоритмами битлоадинга*. Почти все алгоритмы битлоадинга предполагают точное знание канала передачи и исключают наличие межсимвольной интерференции.

В данной статье рассматриваются алгоритмы, направленные на увеличение скорости передачи, и предложена модификация. Наиболее известные алгоритмы, представленные в литературе, это алгоритм Hughes–Hartogs [4] и алгоритм Yu [5]. В соответствии с алгоритмом Hughes–Hartogs управление индексом модуляции и передаваемой мощностью производится на каждой поднесущей. Однако это требует большого количества служебной информации, передаваемой по обратному каналу связи, и больших вычислительных мощностей для его реализации. Также недостатком данного алгоритма является то, что он рассчитан только на квадратурную QAM модуляцию. В работе Yu предложен алгоритм, предполагающий равномерное распределение передаваемой мощности по поднесущим, что в значительной степени сокращает количество требуемой служебной информации. Суть алгоритма состоит в том, чтобы не использовать поднесущие с заведомо плохим отношением сигнал/шум, т. е. не тратить передаваемую мощность на данные поднесущие, а высвободившуюся мощность распределять по используемым поднесущим. В работе [6] проведено сравнение алгоритмов Hughes–Hartogs и Yu и показано, что для работы алгоритма Yu требуются значительно меньшие вычислительные ресурсы для достижения схожих результатов. Тем не менее данный алгоритм также требует передачи служебной информации по обратному каналу связи об индексе модуляции на каждой поднесущей, что усложняет его техническую реализацию. Следовательно, встает задача разработки эффективного алгоритма адаптивного распределения мощности и скорости передачи для систем связи, требующего небольшого количества информации, передаваемой по обратному каналу связи.

Алгоритм битлоадинга

При разработке алгоритма битлоадинга, требующего минимального количества передаваемой служебной информации, следует учитывать структуру используемого символа. Представленные алгоритмы предполагают изменение индекса

модуляции на каждой поднесущей, однако это требует либо точной информации о влиянии канала на каждую поднесущую, либо использование сложного адаптивного эквалайзера, не всегда являющегося эффективным. В предлагаемом алгоритме предполагается разбивать символ на несколько одинаковых блоков, по n поднесущих в каждом. Например, в системе WIMAX пилотные поднесущие, по которым возможно произвести оценку канала, располагаются через каждые 25 информационных поднесущих. Следовательно, выбор модуляции следует делать на весь блок между пилотными поднесущими.

Идея предлагаемого алгоритма заключается в том, чтобы объединять соседние поднесущие по блокам из n поднесущих, выбирая на блок один индекс модуляции. Если на всем блоке заведомо плохое ОСШ, то отключать весь блок и высвободившуюся энергию распределять по оставшимся блокам с поднесущими. Выбор модуляции на поднесущей (блоке) и выбор отключаемых поднесущих (блоков) производится согласно алгоритму Yu. Пошаговое описание предложенного алгоритма приведено ниже.

1. Разбить символ на m блоков, где величина m выбирается из условий распространения и структуры используемого символа.

2. Вычислить значение коэффициента передачи H для каждого блока.

3. Отсортировать H_k так, чтобы $|H_1| \geq |H_2| \dots \geq |H_m|$.

4. Определить $l = m - 1$.

5. Вычислить $E_0 = P_{\text{Пср}}/k$, где E_0 – энергия на одну поднесущую; $P_{\text{Пср}}$ – имеющаяся в распоряжении средняя мощность передатчика; k – количество поднесущих.

6. Вычислить $E'_0 = \frac{E_0 \cdot m}{l}$.

7. Если $\sigma^2 / H_{l+1} \geq E_0 + \sigma^2 / H_l$, тогда $l = l - 1$ и перейти к шагу 6, в противном случае перейти к шагу 8, где σ^2 – дисперсия шума.

8. Вычислить общий индекс модуляции на каждый блок: $b_i = \text{round}(\log_2(1 + \frac{E'_0 \cdot H_l}{\sigma^2}))$, где $i = 1 \dots m$.

9. Установить количество бит b на каждую поднесущую в соответствии с $b_{1+(n-i) \dots n+(n-i)} = b_i$, где $i = 1 \dots m$, $n = 1 \dots k / m$.

Результаты моделирования

В ходе моделирования проведено сравнение стандартной системы, использующей равномерное распределение мощности и модуляцию QPSK, а также системы с адаптивным распределением,

Модели каналов для беспроводных систем связи

Модель											
Ped_A	Задержка, нс	0	110	190	410						
	Ослабление, дБ	0	-9,7	-19,2	-22,8						
Vech_B	Задержка, нс	0	300	8900	12900	17100	20000				
	Ослабление, дБ	-2,5	0	-12,8	-10,0	-25,2	-16,0				
Typ_U	Задержка, нс	0	217	512	514	517	674	882	1230	1287	1311
	Ослабление, дБ	-5,7	-7,6	-10,1	-10,2	-10,2	-11,5	-13,4	-16,3	-16,9	-17,1

использующей алгоритм Υu и предложенный модернизированный алгоритм с различной величиной разбиения на блоки. Для этого получены битовые вероятности ошибки (BER) и скорости передачи (бит/символ) при различных отношениях энергии поднесущей (E_s) к энергии шума (E_s/N_0) в условиях многолучевого распространения, где отношение E_s/N_0 вычисляется по следующей формуле:

$$E_s/N_0 \text{ (дБ)} = E_b/N_0 \text{ (дБ)} + 10 \log(k), \quad (1)$$

где k – количество информационных бит на символ; E_b – энергия, требуемая для передачи одного бита.

Результаты моделирования приведены на рис. 1–3.

В качестве каналов передачи были выбраны три модели многолучевых каналов с частотно-селективными замиряниями. Это модели Pedestrian-A (Ped_A), Vehicular-B, рекомендованные Международным союзом электросвязи (International Telecommunication Union – ITU) и WIMAX форумом [7], и модель Typical_Urban (Typ_U) консорциума 3GPP [8]. Импульсные характеристики каналов распространения радиоволн приведены в таблице.

Каждая точка на графиках, характеризующих результаты моделирования, получена путем усреднения по ансамблю из тысячи различных реализаций импульсных характеристик. В качестве передаваемого сигнала использовалась последовательность из пяти OFDM символов, 256 поднесущих в каждом, из которых 192 – информационных. Для устранения межсимвольной интерференции

циклический префикс составлял 1/2 символа. Полоса частот, занимаемая сигналом, 10 МГц. Доступные модуляции: BPSK, QPSK, QAM-16, QAM-64. Следует заметить, что в условиях моделирования оценка канала производилась не только по восьми пилотам, расположенным в символе, но и по каждой поднесущей. Значение H для каждого блока вычислялось методом усреднения.

Из рисунков 1–3 следует, что система бит-лоадинга, использующая алгоритм Υu , более эффективна на сложных каналах. Так, при достижении одинаковой скорости передачи и использовании алгоритма Υu , вероятность битовой ошибки уменьшается от 3 дБ (канал Pedestrian-A) до 8 дБ (канал COAST_395 Typical_Urban) по сравнению с использованием постоянной QPSK модуляции. Моделирование также показывает, что уменьшение количества блоков разбиения сильнее сказывается на более сложных каналах. При одинаковом отношении $E_b/N_0 = 10$ дБ и канале Pedestrian-A при разбиении на восемь блоков скорость передачи падает на 25 бит/символ, а вероятность битовой ошибки остается прежней. При моделировании канала Typical_Urban и тех же параметрах скорость падет на 125 бит/символ и вероятность битовой ошибки увеличивается на 4 дБ. Однако даже при разбиении всего на четыре блока происходит увеличение скорости передачи при одинаковой вероятности битовой ошибки по сравнению с QPSK модуляцией при каналах с малой многолучевостью. При сложных каналах, таких, как Typical_Urban, разбиение на малое количество блоков малоэффективно.

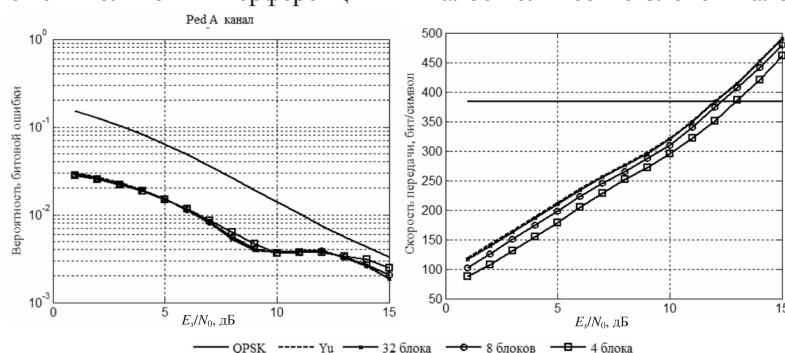


Рис. 1. BER и скорость передачи для канала Pedestrian-A

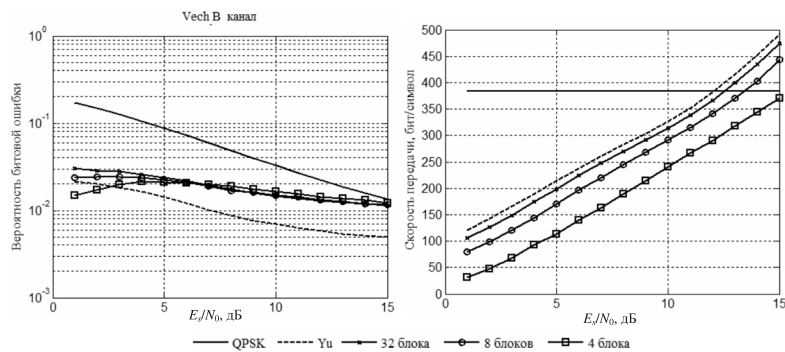


Рис. 2. BER и скорость передачи для канала Vehicular-B

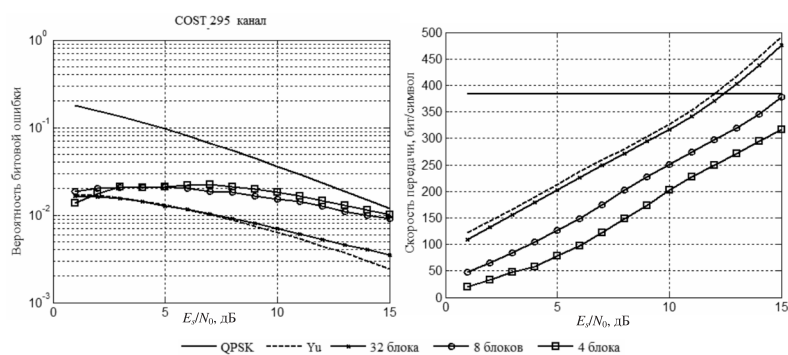


Рис. 3. BER и скорость передачи для канала Typical_Urban

Таким образом, в статье показано, что

- применение адаптивного метода битлоадинга, основанного на алгоритме Yu, позволяет значительно увеличивать скорость передачи с достижением BER, соизмеримым или даже меньшим, чем при использовании одного индекса модуляции;
- предложенный алгоритм с разбиением символа на блоки также имеет выигрыш по сравнению со случаем использования одного индекса модуляции, даже при малом количестве блоков разбиения, однако уступает алгоритму Yu, причем различия существенны на сложных каналах.

Однако за счет объединения по блокам требуется меньшее количество информации, передаваемой по служебному каналу связи;

- в условиях многолучевого канала с быстрыми частотно-селективными замираниями для достижения высокой скорости передачи данных при низком значении вероятности битовой ошибки необходимо увеличивать количество разбиваемых блоков;
- предложенный алгоритм битлоадинга может быть использован для увеличения скорости передачи данных в системах связи на базе стандарта IEEE 802.16.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li, Y. Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications [Text] / Y. Li, G. Stuber. –NY: Springer, 2006. –308 p.
2. IEEE Std. 802.16. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html> (Дата обращения 10.08.2012)
3. Проакис, Д. Цифровая связь [Текст] / Д. Проакис; Пер. с англ.; Под ред. Д.Д. Кловского. –М.: Радио и связь, 2000. –800 с.
4. Hughes-Hartogs, D. Ensemble modem structure for imperfect transmission media: Патент 4679227 US, МПК H04M 11/00. [Text] / D. Hughes-Hartogs, M. Hill // № 736200; заявл. 20.05.1985; опублик. 7.06.1987. –19 p.
5. Yu, W. On constant power water-filling [Text] / W. Yu, J. Cioffi // IEEE International Conf. on Communications. –2001. –Vol. 6. –P. 1665–1669.
6. Асеña, М. Power and Bit Allocation for Multicarrier Modulation in Multi-User Environments [Электронный ресурс] / М. Асеña. –Режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.62.6164&rep=rep1&type=pdf> (Дата обращения 18.01.2013)
7. ITU-R Recommendation M.1225. Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000 [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1225-0-199702-I!!PDF-E.pdf (Дата обращения 07.08.2012)
8. 3GPP TR 25.943. Universal Mobile Telecommunications System (Release 6) [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/125900_125999/125943/06.00.00_60/tr_125943v060000p.pdf (Дата обращения 07.08.2012)