

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ БИТОВЫХ ОШИБОК OFDM-СИГНАЛОВ В ПОДВОДНОМ АКУСТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

К.А. Балахонов
Н.Ю. Артюшин
В.В. Чудников
Р.М. Дябиров

balakhonoff@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследованы зависимости вероятности битовых ошибок при передаче OFDM-сигналов в подводном акустическом канале путем имитационного моделирования. Модель канала представляет собой суперпозицию многократно принимаемых копий переданного OFDM-сигнала, при этом каждая копия имеет собственные задержку, амплитуду и временной масштабный коэффициент. Последний параметр отличает подводный акустический канал от радиоканала, в котором эффект Доплера моделируется сдвигом частоты. В качестве факторов, влияющих на вероятность битовой ошибки, рассмотрены параметры распределений временной задержки, масштабного коэффициента, мощности, а также число бит на символ при условии точной временной и частотной синхронизаций с наиболее мощным лучом. Отдельно рассмотрено влияние остаточной ошибки временной и частотной синхронизаций

Ключевые слова

Подводные системы связи, гидроакустический канал, мультиплексирование, ортогональное частотное разделение каналов, коэффициент битовой ошибки (BER)

Поступила в редакцию 23.06.2017
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. В последнее время технологию OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* — ортогональное частотное мультиплексирование каналов) все чаще применяют для передачи информации в подводном акустическом канале. Особенно важное свойство технологии OFDM заключается в том, что она позволяет избежать влияния межсимвольной интерференции, возникающей в многолучевом канале при условии высокой скорости передачи. Это достигается за счет введения защитного интервала между OFDM-символами, большего по длительности, чем время когерентности канала, что не позволяет символам с различных путей распространения накладываться.

Подводный акустический канал существенно отличается от радиоканала. Во-первых, малый диапазон доступных частот в связи с затуханием на более высоких частотах приводит к существенной широкополосности сигнала при эффективном использовании доступного диапазона. Во-вторых, разброс задержек и доплеровских сдвигов существенно больше, чем в радиоканале [1]. Так, задержки могут достигать десятков и сотен миллисекунд в глубоководном кана-

ле. Эффект Доплера при условии низких скоростей распространения сигнала (≈ 1500 м/с) значителен, что не позволяет моделировать его влияние сдвигом по частоте, как это часто делается для радиоканала, здесь необходимо учитывать масштабирование сигнала по времени и, соответственно, по частоте [2]. Кроме того, на каждом пути распространения следует предусматривать не только относящееся к нему значение задержки, но и доплеровский масштаб, что часто не учитывается в работах по передаче сигналов в подводном акустическом канале.

Подводные акустические каналы обычно рассматриваются отдельно от различных беспроводных радиоканалов вследствие их особых характеристик, таких как большая зависимость от температуры, множество путей распространения и широкополосная природа.

Чрезвычайно низкая скорость распространения звука в морской воде — важный фактор, отличающий этот случай от электромагнитного распространения. Скорость звука в воде зависит от свойств воды — температуры, солености и давления.

При распространении волновая энергия может преобразовываться в другие формы и поглощаться ввиду неидеальности материалов при прохождении волн через них.

Акустическая волна может достичь какой-либо точки множеством путей. На мелководье, где расстояние передачи больше, чем расстояние до дна, волны многократно отражаются от дна и от поверхности воды до момента получения приемником. Для глубоководных применений можно пренебречь влиянием отражения от поверхностей воды и дна. Однако вследствие различной скорости распространения волн в пространстве все равно могут возникнуть существенные многолучевые явления [3, 4].

Малая скорость распространения акустических волн и значительные многолучевые явления вызывают очень большой разброс задержек распространения.

Изменения во времени — одна из самых больших проблем акустических каналов. Различные изменения характеристик канала во времени появляются в результате нестабильности среды, вызванной движением передатчика и платформы, волнами как подвижными отражателями, возникающими при ветре, множеством путей распространения. Например, прямой путь без отражений может быть очень стабильным, в то время как пути, осуществляющие отражение от поверхности воды, могут изменяться в связи с движением поверхностных волн. Эти факторы приводят к значительному эффекту Доплера [5].

Преимущества технологии *OFDM* в подводном акустическом канале. Наибольшее распространение систем с ортогональным частотным разделением каналов (*OFDM*-систем) обусловлено возможностью замены многолучевого канала во временной области множеством параллельных каналов в частотной области, что позволяет существенно упростить конструкцию приемника. Эта особенность делает *OFDM*-системы очень привлекательными для использования в подводных акустических каналах [6]. *OFDM*-системы также помогают решить проблемы подводного акустического канала, связанные со сложной многолуче-

востью, так как хорошо справляются с помехами при мультиплексировании и позволяют подбирать индивидуальную модуляцию для каждой поднесущей частоты.

Имитационное моделирование OFDM-системы в программно-аппаратном комплексе. Рассмотрим влияние описанного выше многолучевого канала с большим разбросом задержек и доплеровских сдвигов с учетом дополнительных практических условий. Сигналы, приходящие по разным путям, могут отличаться по задержке, доплеровскому сдвигу и мощности. Кроме того, после синхронизации может оставаться задержка или доплеровское масштабирование при условии ошибок синхронизации. При моделировании будем полагать, что итоговая временная синхронизация настроена на сигнал с максимальной амплитудой и условно нулевой задержкой. Эффект Доплера для каждого пути распространения моделируется именно масштабированием по времени, что, разумеется, вызывает изменение в спектре, так как это обязательный элемент распространения сигнала в подводном акустическом канале.

Описание модели. Моделирование проведено в пакете математического моделирования *MATLAB*. Функциональная схема OFDM-системы, используемая в подводном акустическом канале, которая является основой модели, приведена на рис. 1.

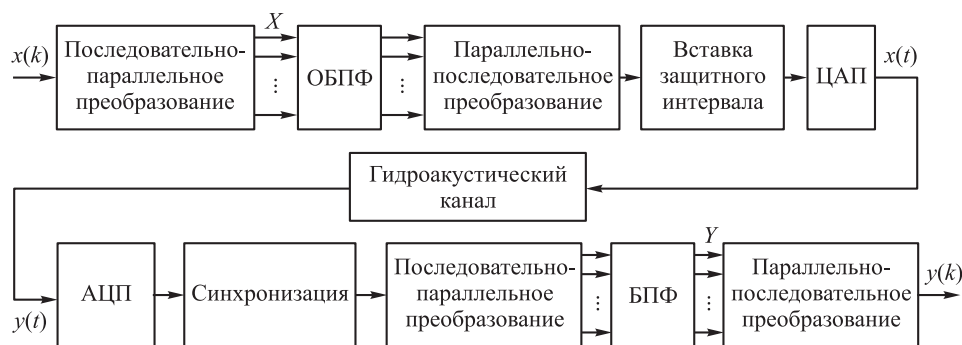


Рис. 1. Функциональная схема OFDM-системы в программно-аппаратном комплексе (ПАК)

Передаваемая последовательность символов данных $x[k]$ разбивается на потоки из N символов. Каждый поток из N последовательных символов преобразуется в блок из N параллельных символов. Полученные символы модулируют N соответствующих поднесущих частот. Выполняется обратное быстрое преобразование Фурье (ОБПФ) и объединение всех потоков символов в один. Для защиты от помех используют вставку защитного интервала. Проводится цифроаналоговое преобразование, и сигнал $x(t)$ передается через гидроакустический канал. На приемной стороне сигнал $y(t)$ поступает на АЦП. После получения цифрового сигнала осуществляется синхронизация по времени и частоте. Далее вновь выполняется разбиение данных на блоки, проводится быстрое преобразование Фурье (БПФ), и на выходе получаем последовательность символов данных $y[k]$.

Зависимость коэффициента битовой ошибки от средней задержки. Рассмотрим зависимость коэффициента битовой ошибки для различных значений задержек путей распространения. Такая зависимость представляет интерес при проектировании систем, работающих в подводном акустическом канале, так как одна из особенностей такого канала — большой разброс задержек сигналов, происходящих с разных путей распространения многолучевого канала. Поскольку зависимость должна изменяться от числа каналов, имитационное моделирование проводилось для различного числа путей распространения. Так, в работах [7–9] для оборудования, работающего на мелководье, проводится моделирование для четырех или пяти путей. Минимальное число путей распространения выбрано исходя из практически интересного случая с двумя путями распространения, когда сигнал с одного пути может сильно ухудшить прием с другого, имеющего немного более мощный сигнал. Максимальное число путей 13, что позволяет наглядно изобразить основную зависимость от числа путей, которая будет описана ниже. Значения задержек на путях распространения измеряются в дискретных отсчетах (индексах) цифровой последовательности для удобства применения результатов исследований при проектировании цифровых систем подводной акустической связи. По оси ординат располагается коэффициент битовой ошибки, означающий, какой объем информации принимается неверно, фактически, характеризующий качество связи. В виде формы распределения временных задержек используется экспоненциальное распределение [1] в интервале от 0 до максимального значения, которое откладывается по оси абсцисс. Параметры моделирования приведены ниже:

Число путей распространения.....	2, 3, 5, 8, 13
Задержка на основном пути	Скомпенсирована
Задержки на остальных путях	Экспоненциально распределены от 0 до максимального (изменяемого при моделировании) значения
Доплеровский сдвиг скорости	
на основном пути	Скомпенсирован
Остаточный доплеровский	
сдвиг скорости на остальных путях	Равномерно распределен
Амплитуда на основном пути	1,0
Амплитуды на остальных путях	Рэлеевское распределение со средним значением 0,1...0,9
Число бит на символ	2
Размерность БПФ	2048
Число полезных несущих частот	512
Частота дискретизации, Гц	44 100
Длительность OFDM-символа, мс	~46,4

Описанная выше зависимость, которая позволяет увидеть, что при увеличении числа путей примерно на 60 % коэффициент битовой ошибки увеличивается приблизительно в 2 раза, приведена на рис. 2, а. Отметим, что при больших значениях

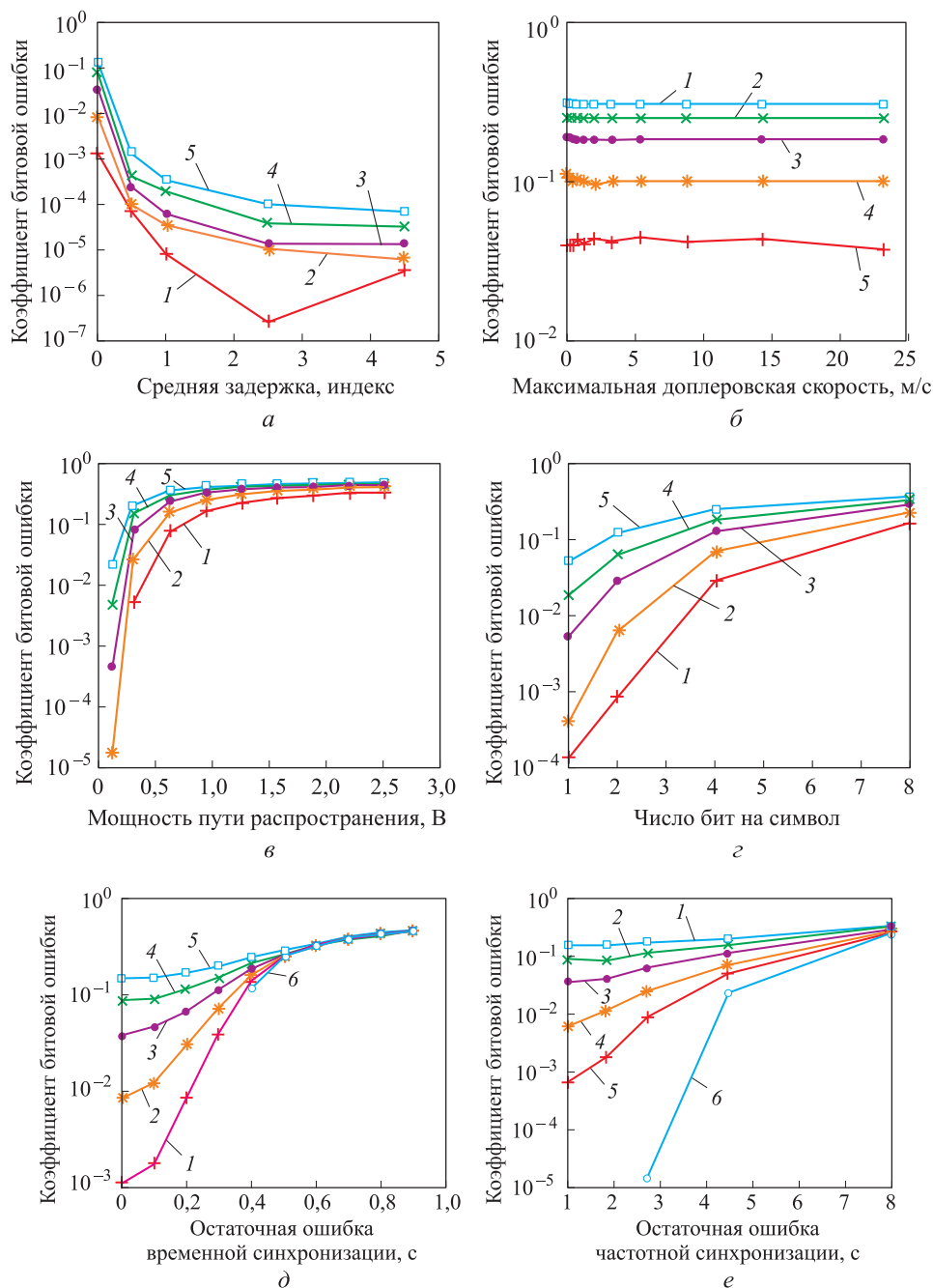


Рис. 2. Зависимости коэффициента битовой ошибки от максимальной средней задержки путей распространения (а), от доплеровских скоростей путей распространения (б), от мощностей путей распространения (в), от числа бит на символ (г), от остаточной ошибки временной синхронизации (д) и от остаточной ошибки частотной синхронизации (е) для числа путей 2 (1), 3 (2), 5 (3), 8 (4), 13 (5) и 1 (6)

задержек можно добиться наилучшего качества передачи данных. Это свидетельствует о том, что чем ближе расположены копии сигналов, тем сильнее они влияют на коэффициент битовой ошибки.

Зависимость коэффициента битовой ошибки от доплеровских скоростей путей распространения. Рассмотрим зависимость коэффициента битовой ошибки для нескольких значений доплеровских скоростей различных путей распространения. Следует отметить, что в работах по данной тематике, например [10, 11], доплеровский сдвиг принят одинаковым на каждом пути, а это могло бы быть дополнительным отличием моделирования от экспериментов. Доплеровский сдвиг на основном пути (с самым мощным сигналом) предполагается скомпенсированным, тогда распределение доплеровских скоростей остальных путей будет задаваться равномерным законом распределения. Параметры моделирования приведены ниже:

Число путей распространения	2, 3, 5, 8, 13
Задержка на основном пути	Скомпенсирована
Задержки на остальных путях	Экспоненциально распределены от 1 до 400 дискретных отсчетов
Доплеровский сдвиг скорости	
на основном пути	Скомпенсирован
Остаточный доплеровский сдвиг скорости	
на остальных путях	Равномерно распределен от 0 м/с до максимального (изменяемого при моделировании) значения
Амплитуда на основном пути	1,0
Амплитуды на остальных путях	Рэлеевское распределение со средним значением 0,1...0,9
Число бит на символ	2
Размерность БПФ	2048
Число полезных несущих частот	512
Частота дискретизации, Гц	44 100
Длительность OFDM-символа, мс	~46,4

Существенная зависимость от СКО скоростей по разным путям распространения отсутствует, т. е. при условии обеспечения точной частотной синхронизации по самому мощному сигналу (основной путь) доплеровский сдвиг на остальных путях распространения не имеет значения (рис. 2, б). Другими словами, даже на больших скоростях движения приемника и передатчика и при наличии отражений с любых сторон коэффициент битовой ошибки будет неизменен. Однако отсутствуют данные о том, что для разных методов обнаружения временной и частотной синхронизаций наличие различных доплеровских сдвигов на путях распространения не имеет значения.

Зависимость коэффициента битовой ошибки от средней мощности. Рассмотрим передачу OFDM-сигналов по нескольким путям и оценим влияние мощности сигналов на неосновных путях на ошибки передачи. Для того чтобы

описать остальные пути распространения относительно основного, будем использовать дискретное типовое рэлеевское распределение мощностей [12]. Параметры моделирования приведены ниже:

Число путей распространения	1, 2, 3, 5, 8, 13
Задержка на основном пути	Скомпенсирована
Задержки на остальных путях	Экспоненциально распределены от 1 до 400 дискретных отсчетов
Доплеровский сдвиг скорости на основном пути	Скомпенсирован
Остаточный доплеровский сдвиг скорости на остальных путях	Равномерно распределен
Амплитуда на основном пути	1,0
Амплитуды на остальных путях	Рэлеевское распределение со средним значением 0,1...0,9
Число бит на символ	2
Размерность БПФ	2048
Число полезных несущих частот	512
Частота дискретизации, Гц	44 100
Длительность OFDM-символа, мс	~46,4

Согласно зависимости, приведенной на рис. 2, в, начиная со значения средней амплитуды примерно 0,5, коэффициент битовой ошибки очень быстро снижается до значений, близких к 10^{-4} , и наоборот, наличие составляющих, соизмеримых по амплитуде с амплитудой на основном пути, оставляет коэффициент битовой ошибки очень высоким ($\approx 10\%$). Зависимость имеет экспоненциальный вид.

Зависимость коэффициента битовой ошибки от числа бит на символ. Рассмотрим зависимость коэффициента битовой ошибки от числа бит на символ передаваемого сообщения. Параметры моделирования приведены ниже:

Число путей распространения	2, 3, 5, 8, 13
Задержка на основном пути	Скомпенсирована
Задержки на остальных путях	Экспоненциально распределены от 1 до 400 дискретных отсчетов
Доплеровский сдвиг скорости на основном пути	Скомпенсирован
Остаточный доплеровский сдвиг скорости на остальных путях	Равномерно распределен
Амплитуда на основном пути	1,0
Амплитуды на остальных путях	Рэлеевское распределение со средним значением 0,1...0,9
Число бит на символ	1, 2, 4, 8
Размерность БПФ	2048
Число полезных несущих частот	512
Частота дискретизации, Гц	44 100
Длительность OFDM-символа, мс	~46,4

Начиная примерно с 4 бит на символ, зависимость коэффициента битовой ошибки от числа бит ослабляется (рис. 2, з). Чем больше путей распространения, тем слабее будет зависимость.

Зависимость коэффициента битовой ошибки от остаточной ошибки временной синхронизации. Рассмотрим зависимость коэффициента битовой ошибки от остаточной ошибки временной синхронизации. Параметры моделирования приведены ниже:

Число путей распространения	1, 2, 3, 5, 8, 13
Задержка на основном пути	Меняется от 0 до 0,9 дискретного отсчета
Задержки на остальных путях	Экспоненциально распределены от 1 до 400 дискретных отсчетов
Доплеровский сдвиг скорости на основном пути	Скомпенсирован
Остаточный доплеровский сдвиг скорости на остальных путях	Равномерно распределен
Амплитуда на основном пути	1,0
Амплитуды на остальных путях	Рэлеевское распределение со средним значением 0,1...0,9
Число бит на символ	2
Размерность БПФ	2048
Число полезных несущих частот	512
Частота дискретизации, Гц	44 100
Длительность OFDM-символа, мс	~46,4

Ошибка временной синхронизации в интервале 0...1 дискретного отсчета достигает почти предельного значения битовой ошибки 0,5 (рис. 2, д). Это означает, что при использовании приемника с частотой дискретизации незначительно выше верхней частоты сигнала необходимо применять методы передискретизации для более точной синхронизации, описанные в работах [1, 13–15], либо алгоритмы компенсации влияния канала [16], иначе это может привести к существенному ухудшению характеристик. Так, даже при точной синхронизации (до дискретного отсчета) моменты дискретизации аналогового сигнала в приемнике не будут совпадать с моментами дискретизации в передатчике. Причем наиболее ярко выражен этот эффект при меньшем числе путей.

Зависимость коэффициента битовой ошибки от остаточной ошибки частотной синхронизации. Существует несколько методов компенсации доплеровского сдвига, которые подробно описаны в работах [1, 16, 18], при этом важен вопрос о влиянии остаточной ошибки частотной синхронизации на работу приемника. Рассмотрим зависимость коэффициента битовой ошибки от остаточной ошибки частотной синхронизации. Параметры моделирования приведены ниже:

Число путей распространения	2, 3, 5, 8, 13
Задержка на основном пути	Скомпенсирована

Задержки на остальных путях	Экспоненциально распределены от 1 до 400 дискретных отсчетов
Доплеровский сдвиг скорости на основном пути, м/с	0...0,9
Остаточный доплеровский сдвиг скорости на остальных путях	Равномерно распределен
Амплитуда на основном пути	1,0
Амплитуды на остальных путях	Рэлеевское распределение со средним значением 0,1...0,9
Число бит на символ	2
Размерность БПФ	2048
Число полезных несущих частот	512
Частота дискретизации, Гц	44 100
Длительность OFDM-символа, мс	~46,4

Согласно зависимости, приведенной на рис. 2, *e*, чем меньше путей распространения, тем сильнее влияет некомпенсированный доплеровский сдвиг. При значениях некомпенсированной доплеровской скорости 0...0,1 м/с можно наблюдать слабую зависимость битовой ошибки. Частотную синхронизацию необходимо выполнять максимально точно для получения малых значений коэффициента битовой ошибки.

Результаты моделирования. Методами имитационного моделирования получены различные зависимости коэффициента битовой ошибки от характеристик приема, а также характеристик канала для передачи OFDM-сигналов в подводном акустическом канале. При этом учтена отличительная особенность, состоящая в наличии различных доплеровских сдвигов на разных путях распространения. Установлено, что на коэффициент битовой ошибки негативно влияет наличие близких по задержке, но отличающихся по доплеровскому сдвигу путей, при этом от распределения доплеровских сдвигов на путях распространения коэффициент битовой ошибки существенно не зависит. Еще один важный результат подразумевает, что даже минимальная ошибка при синхронизации по времени (меньше одного дискретного отсчета) и по частоте приводит к существенному увеличению коэффициента битовой ошибки.

Заключение. Полученные результаты могут быть применены при проектировании систем подводной акустической связи. Следует отметить, что при моделировании была использована модель канала с различными доплеровскими масштабными коэффициентами на путях распространения, что приближает результаты моделирования к реальным условиям и отличает настоящую работу от других работ, так как исследователи часто опускают эту деталь. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку эффективных по значению СКО и по требуемым вычислительным ресурсам алгоритмов синхронизации для OFDM-сигналов в подводном акустическом канале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhou S., Wang Z. *OFDM for underwater acoustic communications*. Wiley, 2014. 410 p.
2. Шахтарин Б.И., Федотов А.А., Балахонов К.А., Калашиников К.С. Применение сигналов с ортогонально частотным разделением в гидроакустическом канале // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 5. С. 30–43. DOI: 10.18698/0236-3933-2015-5-30-43
3. Chen S., Tong C., Liu J. Research on computer simulation about underwater acoustic communication channel // *Modern Electronics Technique*. 2008. No. 8. P. 88–89.
4. Deng H., Liu Y., Cai H. Time-varying UWA channel with Rayleigh distribution // *Technical Acoustics*. 2009. Vol. 28. No. 2. P. 109–112.
5. Thottappilly A. *OFDM for underwater acoustic communication*. M.S. Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2011. 145 p.
6. Stojanovic M. *Acoustic (underwater) communications* // J.G. Proakis, ed. *Encyclopedia of telecommunications*. John Wiley and Sons, 2003. 3074 p.
7. *Underwater acoustic networking techniques* / R. Otnes, A. Asterjadhi, P. Casari, M. Goetz, et al. Springer, 2012. 83 p.
8. Domingo M.C. Overview of channel models for underwater wireless communication networks // *Physical Communication*. 2008. Vol. 1. Iss. 3. P. 163–182. DOI: 10.1016/j.phycom.2008.09.001
9. Zielinski A., Yoon Y.-H., Wu L. Performance analysis of digital acoustic communication in a shallow water channel // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1995. Vol. 20. No. 4. P. 293–299.
10. *Non-uniform Doppler compensation for zero-padded OFDM over fast-varying underwater acoustic channels* / B. Li, S. Zhou, M. Stojanovic, L. Freitag, P. Willett // *OCEANS 2007–Europe*. 2007. P. 1–6.
11. Шахтарин Б.И., Балахонов К.А., Федотов А.А., Калашиников К.С. Алгоритмы синхронизации OFDM-сигналов в системах акустической подводной связи // *Автоматизация. Современные технологии*. 2016. № 8. С. 25–30.
12. Kumar P., Trivedi V.K., Kumar P. Recent trends in multicarrier underwater acoustic communications // *IEEE Underwater Technology (UT)*. 2015. P. 1–8. DOI: 10.1109/UT.2015.7108313
13. Do D.H., Nguyen Q.K., Ha D.V., Duc N.V. A time synchronization method for OFDM-based underwater acoustic communication // *Int. Conf. on Advanced Technologies for Communications (ATC)*. 2016. P. 131–134. DOI: 10.1109/ATC.2016.7764760
14. Schmidl T.M., Cox D.C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM // *IEEE Transactions on Communications*. 1997. Vol. 45. No. 12. P. 1613–1621. DOI: 10.1109/26.650240
15. Khan A.M., Jeoti V., Zakariya M.A., Ur Rehman M.Z. Robust symbol timing synchronization for OFDM systems using PN sequence // *International Journal of Information and Electronics Engineering*. 2014. Vol. 4. No. 3. P. 230–233. DOI: 10.7763/IJIEE.2014.V4.439
16. Андрианов И.М. Повышение спектральной эффективности систем связи с ортогональным частотным уплотнением в каналах со случайными параметрами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2010. № 4. С. 70–77.
17. Aval Y., Stojanovic M. Differentially coherent multichannel detection of acoustic OFDM signals // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2014. Vol. 40. No. 2. P. 251–268. DOI: 10.1109/JOE.2014.2328411
18. Wang Z., Zhou S., Giannakis G., Berger C., Huang J. Frequency-domain oversampling for zero-padded OFDM in underwater acoustic communications // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2012. Vol. 37. No. 1. P. 14–24. DOI: 10.1109/JOE.2011.2174070

Балахонов Кирилл Андреевич — аспирант кафедры «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Артюшин Никита Юрьевич — студент кафедры «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Чудников Валерий Владимирович — аспирант кафедры «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Дябиров Роман Маратович — аспирант кафедры «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Балахонов К.А., Артюшин Н.Ю., Чудников В.В., Дябиров Р.М. Исследование вероятности битовых ошибок OFDM-сигналов в подводном акустическом канале // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 3. С. 4–16.

DOI: 10.18698/0236-3933-2018-3-4-16

**INVESTIGATING BIT ERROR PROBABILITY FOR OFDM SIGNALS
IN AN UNDERWATER ACOUSTIC CHANNEL**

K.A. Balakhonov

balakhonoff@mail.ru

N.Yu. Artyushin

V.V. Chudnikov

R.M. Dyabirov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The purpose of the study was to investigate characteristics of bit error probability during transmission of Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) signals in an underwater acoustic channel by means of simulation techniques. The channel model is a superposition of OFDM signal copies received multiple times, each copy having its own delay, amplitude and timescale factor. This last parameter distinguishes underwater acoustic channels from radio channels, in which a frequency shift simulates the Doppler effect. The study considers the following factors affecting bit error probability: time delay, time scale factor and power distribution parameters, along with bits per symbol on condition that the time and frequency synchronisation with the most powerful beam is precise. The effect of residual error in time and frequency synchronisation is examined as well

Keywords

Underwater communication systems, underwater acoustic channel, multiplexing, orthogonal frequency-division multiplexing, bit error rate (BER)

Received 23.06.2017

© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Zhou S., Wang Z. *OFDM for underwater acoustic communications*. Wiley, 2014. 410 p.
- [2] Shakhtarin B.I., Fedotov A.A., Balakhonov K.A., Kalashnikov K.S. The usage of OFDM-based signals in underwater acoustic channel. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2015, no. 5, pp. 30–43 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2015-5-30-43
- [3] Chen S., Tong C., Liu J. Research on computer simulation about underwater acoustic communication channel. *Modern Electronics Technique*, 2008, no. 8, pp. 88–89.
- [4] Deng H., Liu Y., Cai H. Time-varying UWA channel with Rayleigh distribution. *Technical Acoustics*, 2009, vol. 28, no. 2, pp. 109–112.
- [5] Thottappilly A. *OFDM for underwater acoustic communication*. M.S. Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2011. 145 p.
- [6] Stojanovic M. Acoustic (underwater) communications. J.G. Proakis, ed. In: *Encyclopedia of telecommunications*. John Wiley and Sons, 2003. 3074 p.
- [7] Otnes R., Asterjadhi A., Casari P., Goetz M., Husy T., Nissen I., Rim K., Walree P., Zorzi M. *Underwater acoustic networking techniques*. Springer, 2012. 83 p.
- [8] Domingo M.C. Overview of channel models for underwater wireless communication networks. *Physical Communication*, 2008, vol. 1, iss. 3, pp. 163–182. DOI: 10.1016/j.phycom.2008.09.001
- [9] Zielinski A., Yoon Y.-H., Wu L. Performance analysis of digital acoustic communication in a shallow water channel. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1995, vol. 20, no. 4, pp. 293–299.
- [10] Li B., Zhou S., Stojanovic M., Freitag L., Willett P. Non-uniform Doppler compensation for zero-padded OFDM over fast-varying underwater acoustic channels. *OCEANS 2007–Europe*, 2007, pp. 1–6.
- [11] Shakhtarin B.I., Balakhonov K.A., Fedotov A.A., Kalashnikov K.S. Algorithms for synchronizing OFDM-signals into acoustic underwater communications systems. *Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii*, 2016, no. 8, pp. 25–30 (in Russ.).
- [12] Kumar P., Trivedi V.K., Kumar P. Recent trends in multicarrier underwater acoustic communications. *IEEE Underwater Technology (UT)*, 2015, pp. 1–8. DOI: 10.1109/UT.2015.7108313
- [13] Do D.H., Nguyen Q.K., Ha D.V., Duc N.V. A time synchronization method for OFDM-based underwater acoustic communication. *Int. Conf. on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, 2016, pp. 131–134. DOI: 10.1109/ATC.2016.7764760
- [14] Schmidl T.M., Cox D.C. Robust frequency and timing synchronization for OFDM. *IEEE Transactions on Communications*, 1997, vol. 45, no. 12, pp. 1613–1621. DOI: 10.1109/26.650240
- [15] Khan A.M., Jeoti V., Zakariya M.A., Ur Rehman M.Z. Robust symbol timing synchronization for OFDM systems using PN sequence. *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 230–233. DOI: 10.7763/IJIEE.2014.V4.439
- [16] Andrianov I.M. Improvement of spectral efficiency of communication systems with orthogonal frequency division multiplex in channels with random parameters. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2010, no. 4, pp. 70–77 (in Russ.).
- [17] Aval Y., Stojanovic M. Differentially coherent multichannel detection of acoustic OFDM signals. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014, vol. 40, no. 2, pp. 251–268. DOI: 10.1109/JOE.2014.2328411

[18] Wang Z., Zhou S., Giannakis G., Berger C., Huang J. Frequency-domain oversampling for zero-padded OFDM in underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2012, vol. 37, no. 1, pp. 14–24. DOI: 10.1109/JOE.2011.2174070

Balakhonov K.A. — post-graduate student, Department of Autonomous Data Processing and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

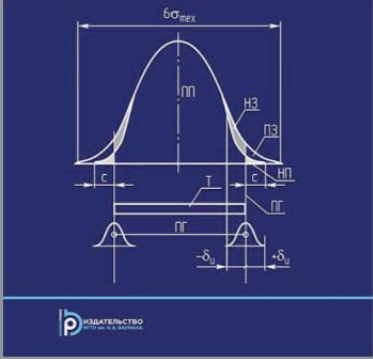
Artyushin N.Yu. — student, Department of Autonomous Data Processing and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Chudnikov V.V. — post-graduate student, Department of Autonomous Data Processing and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Dyabirov R.M. — post-graduate student, Department of Autonomous Data Processing and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Balakhonov K.A., Artyushin N.Yu., Chudnikov V.V., Dyabirov R.M. Investigating Bit Error Probability for OFDM Signals in an Underwater Acoustic Channel. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 3, pp. 4–16 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2018-3-4-16

<p>Ю.А. Кокорев, Ф.В. Звягин</p> <p>Способы расчета точностных характеристик деталей и узлов приборов</p>  <p>ИЗДАТЕЛЬСТВО МГТУ им. Н.Э. Баумана</p>	<p>В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебное пособие авторов Ю.А. Кокорев, Ф.В. Звягина</p> <p>«Способы расчета точностных характеристик деталей и узлов приборов»</p> <p>Изложены вопросы обоснования выбора точностных характеристики, рассмотрены возможные методы расчета на точность сложных и взаимосвязанных деталей и узлов. Приведены справочные материалы, необходимые для расчета на точность деталей и узлов приборных устройств с учетом их назначения, условий эксплуатации, требований к разработке, а также примеры расчетов приборных устройств различного назначения и рационального оформления конструкторской документации. Материалы подготовлены с учетом новых ГОСТов.</p> <p>По вопросам приобретения обращайтесь: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1 +7 (499) 263-60-45 press@bmstu.ru www.baumanpress.ru</p>
--	---