CC BY 4.0

Научная статья УДК 621.396.712 https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-2-20-31 EDN:LQOXKV

О требуемой точности временной синхронизации оборудования при DRM-приеме

[©] Олег Андреевич Гуминский [⊠], guminskii.oa@sut.ru [©] Юрий Алексеевич Ковалгин, kowalgin@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. В настоящее время в России и в мире идет активный переход от аналоговых к цифровым технологиям. Этот процесс в полной мере относится и к радиовещанию. В России разрешено экспериментальное цифровое радиовещания в диапазоне ОВЧ в трех форматах: DRM, DAB, PABИC. Однако решения Правительства о выборе одного из них в качестве национального стандарта пока нет, что объясняется в первую очередь недостаточной полнотой сведений, необходимых для производства и эксплуатации оборудования, относящего в первую очередь к системе DRM, единственной системе цифрового радиовещания, рекомендованной ITU-R для применения во всех полосах частот, выделенных для наземного радиовещания. Данная работа восполняет этот пробел в части, относящейся к разработке приемного оборудования.

Цель работы: оценка требуемой точности момента старта прямого дискретного преобразования Фурье относительно начала полезной части OFDM-символов, при котором сигнал ошибки для системы DRM при работе в режиме устойчивости Е не превышает значений, требуемых стандартом и рекомендацией ITU-R BS.1660-8 (06/2019).

Методы. В качестве основы для проведения данных исследований выбрана имитационная модель приемопередающего тракта системы DRM для режима устойчивости Е. Она дополнена блоками, позволяющими для разных видов модуляции и уровней защиты изменять в приемнике временной сдвиг между моментом старта прямого дискретного преобразования Фурье и началом полезной части OFDM-символа, а также при каждом значении временно́го сдвига оценивать качество принимаемого DRM-приемником сигнала.

Результаты. Критериями оценки качества принимаемого OFDM-сигнала выбраны коэффициент модуляционных ошибок и вероятность появления битовых ошибок. Показано, что для сохранения условий комфортного приема максимально допустимое временное рассогласование между моментами старта прямого дискретного преобразования Фурье и началом полезной части OFDM-символа при модуляции поднесущих частот QAM-4 не должно превышать значений 1,8–2,3 мкс; при модуляции QAM-16 – эта величина должна быть не более 0,8–1,3 мкс. Разброс полученных значений определяется уровнем защиты PL. Основное влияние на требуемую точность временной синхронизации DRM-приемника при работе в режиме устойчивости E оказывает порядок модуляции QAM и существенно меньшее влияние – уровень защиты PL в области, где вероятность появления битовых ошибок не превышает значение 10⁻⁴. При BER ≤ 10⁻⁴ влиянием выбранного уровня защиты PL можно пренебречь. Полученные результаты являются новыми для системы DRM при работе в режиме устойчивости E (диапазон OBЧ).

Теоретическая / практическая значимость. Предложен метод оценки допустимого временно́го рассогласования OFDM-сигнала при DRM-приеме. Учет полученных результатов необходим для разработки блока временно́й синхронизации приемников цифрового радиовещания стандарта DRM.

Ключевые слова: цифровое радиовещание, DRM, временная синхронизация

Ссылка для цитирования: Гуминский О.А., Ковалгин Ю.А. О требуемой точности временной синхронизации оборудования при DRM-приеме // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 2. С. 20–31. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-2-20-31. EDN:LQOXKV Original research https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-2-20-31 EDN:LQOXKV

On the Required Accuracy of Equipment Time-Synchronization at DRM Reception

^{ID} Oleg A. Guminsky [⊠], guminskii.oa@sut.ru ID Yuri A. Kovalgin, kowalgin@sut.ru

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Abstract

Relevance. Currently in Russia and in the world there is an active transition from analog to digital technologies. This process is also fully applicable to radio broadcasting. In Russia, experimental digital radio broadcasting (DRB) is authorized in the VHF band in three formats: DRM, DAB, and RAVIS. However, the Government has not yet decided to choose one of these formats as the national standard, which is explained primarily by the insufficient completeness of the information required for the production and operation of equipment related primarily to the DRM system, the only DRB system recommended by ITU-R for being used in all frequency bands allocated for terrestrial radio broadcasting. This paper fills this gap as it relates to the development of receiving equipment.

Purpose of this work: estimation of the required accuracy of the start moment of the direct discrete Fourier transform with respect to the beginning of the useful part of the OFDM symbols, where the error signal for the DRM system, while operating in the E stability mode, does not exceed the values required by the ITU-R standard and recommendation BS.1660-8 (06/2019).

Methods. As a basis to execute this research, the simulation model of the DRM system transceiver path for the stability mode *E*, was chosen. It is supplemented with modules that allow, for different types of modulation and protection levels, to change the time shift in the receiver between the start of the direct discrete Fourier transform and the beginning of the useful part of the OFDM-symbol, as well as to evaluate, at each value of the time shift, quality of the signal received by the DRM-receiver.

Results. The modulation error rate (MER) and bit error rate (BER) were chosen as the criteria for evaluating the quality of the received OFDM signal. It is shown that, in order to maintain conditions of a comfortable reception, the maximum allowable time mismatch between the start of the direct discrete Fourier transform and the beginning of the useful part of the OFDM-symbol, at modulation of subcarrier frequencies QAM-4, should not exceed 1,8 - 2,3 μ s; at modulation QAM-16 this value should not exceed 0,8-1,3 μ s. The range of values obtained is determined by the protection level PL. The main impact on the required accuracy of time synchronization of a DRM-receiver, while operating in the stability mode E, has the order of modulation QAM; significantly less influence has the level of protection PL if the probability of bit errors does not exceed 10⁻⁴. For BER≤10⁻⁴, the influence of the chosen level of protection PL can be neglected. The obtained results are new for the DRM system while operating in the E stability mode (VHF band). Theoretical / Practical significance. The method of estimation of the acceptable time mismatch of OFDM-signal at DRM-receivers.

Keywords: digital broadcasting, DRM, time synchronization

For citation: Guminsky O.A., Kovalgin Yu.A. On the Required Accuracy of Equipment Time-Synchronization at DRM Reception. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(2):20–31. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-2-20-31. EDN:LQOXKV

Введение

Технология OFDM широко используется в радиои мобильной связи, включая и системы цифрового радиовещания, такие как DAB, DRM, IBOC HD-Radio, РАВИС, CDR. При передаче OFDM-сигнал претерпевает целый ряд изменений, что может приводить к появлению межсимвольной интерференции и интерференции между поднесущими частотами. *Межсимвольная интерференция* возникает в ситуациях, когда:

 – на приемник, помимо основного сигнала, приходят его отраженные копии на интервале времени, превышающем длительность защитного интервала OFDM-символа;

– имеет место смещение OFDM-символа по времени (STO, *аббр. от англ.* Symbol Time Offset); появляется при наличии временно́го рассогласования переданного и принимаемого OFDM-сигнала в случае, когда эта величина меньше длительности импульсного отклика радиоканала.

Интерференция между поднесущими частотами возникает, когда:

 приемник из-за наличия временно́го рассогласования с передатчиком не точно оценивает начало полезной части OFDM-символа при старте прямого дискретного преобразования Фурье (ДПФ), т. е. достоверно не знает, с какого дискретизированного отсчета начинается полезная часть OFDM-символа;

– имеет место смещение несущей частоты радиоканала (CFO, *аббр. от англ.* Carrier Frequency Offset); возникает при рассогласовании частот тактовых генераторов передатчика и приемника.

Окно прямого ДПФ может иметь несколько вариантов расположения внутри OFDM-символа (рисунок 1).



Рис. 1. Возможные варианты расположения окна прямого ДПФ относительно OFDM-символа, *СР* – защитный интервал OFDM-символа



Безопасная точка старта прямого ДПФ должна располагаться после прихода импульсного отклика радиоканала. Это необходимо для отсутствия межсимвольной интерференции. Допустимы некоторые неточности T_d в моменте старта прямого ДПФ [1], при которых принятый OFDM-сигнал будет еще свободен от межсимвольной интерференции. Это позволяет говорить о разработке алгоритма оценки величины временно́го рассогласования с приемлемой точностью.

Известно большое число работ, посвященных исследованию проблемы временной синхронизации OFDM-сигналов, среди которых, прежде всего, следует назвать такие работы, как [1–7]. Однако анализ их содержания показывает, что они носят общий характер, не учитывают особенностей структуры и характеристик OFDM-сигналов конкретных систем цифрового радиовещания, не предлагают для каждой из них наиболее эффективные (с учетом особенностей конкретного стандарта) решения.

Цель работы. Данная работа посвящена исследованию и оценке требуемой точности момента старта прямого ДПФ относительно начала полезной части OFDM-символов, при которой вероятность появления битовой ошибки (BER, аббр. от англ. Bit Error Ratio) для системы DRM не превышает значений, требуемых стандартом [8] и рекомендацией ITU-R BS.1660-8 (06/2019) [9].

Основные результаты

В качестве основы для проведения данных исследований была выбрана разработанная ранее в среде Matlab / Simulink имитационная модель приемопередающего тракта системы DRM для режима устойчивости Е, выполненная в полном соответствии с требованиями стандарта [8]. Ее укрупненная структура приведена на рисунке 2а, а в развернутом подробном виде с пояснениями в [10]. Она была дополнена блоками, позволяющими для разных видов модуляции и уровней защиты изменять в обе стороны в приемнике временной сдвиг т между моментом старта прямого ДПФ и началом полезной части OFDM-символа (рисунок 2b), а также при каждом значении временного сдвига т оценивать качество принимаемого DRM-приемником сигнала (рисунок 2с). На выходе канального кодера (см. рисунок 2b) стоят блоки формирования OFDM-символа, после них стоит блок Sample Shifter, отвечающий за сдвиг принимаемого сигнала относительно старта прямого ДПФ, затем – блок AWGN Channel для ввода в канал аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) и ОFDM-демодулятор.

Естественной величиной для оценки искажений OFDM-сигналов является мера отклонения точек сигнального созвездия поднесущих частот от своих истинных положений при каждом виде модуляции и уровне защиты [11–14]. С учетом этого критерием для оценки качества OFDM-сигнала изначально был выбран коэффициент модуляционных ошибок (MER, *аббр. от англ.* Modulation Error Ratio).

В документах Международного института телекоммуникационных стандартов (ETSI, *аббр. от англ.* European Telecommunications Standards Institute) величина MER [12] была впервые введена для оценки качества OFDM-сигнала, переданного передатчиком. В более поздней редакции [13] для сигналов DRM-передатчиков, работающих в диапазоне OBЧ (30–3000 МГц), было установлено, что ее значение должно быть не менее 21 дБ.



Рис. 2. Укрупненная схема имитационной модели для исследования требуемой точности временной синхронизации: а) укрупненный приемопередающий тракт системы DRM при работе в режиме устойчивости *E*; b) дополнительные блоки, необходимые для введения временно́го сдвига между моментом старта прямого ДПФ и началом полезной части OFDMсимвола (Sample Shifter) и аддитивного белого гауссовского шума (AWGN Channel); c) блоки для оценки коэффициента модуляционных ошибок (блок оценки MER (dB), принимающий на вход символы модуляции с блоков Tx/Rx MCS Cell) и вероятности появления битовых ошибок BER (блок Error Rate Calculation, принимающий поток бит с блоков Tx/Rx MSC)

Fig. 2. Enlarged Scheme of the Simulation Model to Study the Required Accuracy of Temporal Synchronization: a) Enlarged Transceiver Path of the DRM System When Operating in the E Stability Mode; b) Additional Blocks Required to Introduce a Time Shift between the Start of the Direct Discrete Fourier Transform (DFT) and the Beginning of the Useful Part of the OFDM Symbol (Sample Shifter) and Additive White Gaussian Noise (AWGN Channel); c) Blocks for Estimation of Modulation Error Rate, MER (dB), Estimation Block, Receiving Modulation Symbols from Tx/Rx MCS Cell Blocks as Input) and Bit Error Rate BER (Error Rate Calculation Block, Receiving Bit Stream from Tx/Rx MSC Blocks)

В отличие от изложенного выше измерения, связанные с оценкой качества OFDM-сигнала, выполнялись в имитационной модели не на выходе ее передающей части, а в DRM-приемнике перед декодером. В нашем случае, где речь идет о *величине коэффициента модуляционных ошибок,* измеренных в приемнике, используется для его обозначения аббревиатура RMER (от слова «receive»). Кроме того,

для чистоты эксперимента было принято, что при DRM-приеме имеет место только временной сдвиг момента старта прямого ДПФ относительно начала полезной (информационной) части OFDM-символов, т. е. отсутствуют искажения, вызванные сдвигом несущей частоты, потерями в радиоканале, многолучевостью, а также рассогласованием периодов дискретизации цифроаналогового преобразования при преобразовании цифрового сигнала в аналоговый в передающем тракте и аналого-цифрового преобразования – в DRM-приемнике.

Исследования проводились в два этапа:

1) АБГШ в радиоканале отсутствовал (идеальные условия приема) при разных значениях т;

2) оценивалось влияние АБГШ в радиоканале на изменение условий приема при наличии временно́го сдвига т между моментами старта прямого ДПФ и началом полезной части OFDM-символа (см. рисунок 1).

Напомним также, что RMER - это отношение средней мощности полезного (эталонного) сигнала *P*_с к средней мощности сигнала ошибки *P*_{ош} за интервал наблюдения Т, выраженное в дБ [11–14]. Можно сказать, что это аналог параметра отношение сигнал / шум (SNR, аббр. от англ. Signal-to-Noise Ratio) для OFDM-сигналов. При этом, если положения точек переданных сигнальных созвездий поднесущих частот оцениваются на DRM-передатчике, то для его обозначения используется аббревиатура MER, а при его оценке после их восстановления в аббревиатура DRM-приемнике использована RMER. Значения MER и RMER совпадают, когда имеют место идеальные условия для передающего и приемного трактов системы DRM.

В [15] предложено аппроксимирующее выражение, позволяющее по известному значению RMER вычислить соответствующее ему по мощности отношение SNR:

SNR =
$$a + a_1(RMER) + a_2(RMER)^2 + a_3(RMER)^3 +, (дБ).$$
 (1)

Значения коэффициентов аппроксимирующего полинома зависят от вида модуляции и равны значениям, указанным в таблице 1, где: σ – среднеквадратическое отклонение; *D* – диапазон возможных значений SNR, в пределах которого расчетные значения, найденные по выражению 1, соответствуют экспериментальным данным.

ТАБЛИЦА 1. Значения коэффициентов аппроксимирующего полинома [15]

TABLE 1. Valu	ues of the	Approximating	Polynomial	Coefficients	[15]
---------------	------------	---------------	------------	--------------	------

Модуляция	a_0	<i>a</i> ₁	<i>a</i> ₂	<i>a</i> ₃	σ, дБ	<i>D</i> , дБ
QAM-4	-2,672	1,518	-0,023	0	0,02	0-7
QAM-16	5,559	-2,959	0,455	-0,014	0,1	0-15

Заметим (рисунок 3), что выражение 1 дает достоверные результаты для модуляции QAM-4 при значениях SNR, лежащих в интервале от 0 до 7 дБ с величиной среднеквадратического отклонения, не превышающей 0,02 дБ; при модуляции QAM-16 эти значения – в интервале 0–15 дБ, при $\sigma \leq 0,1$ дБ и при отсутствии помехоустойчивого кодирования.



Fig. 3. Dependences of the RMER, dB, on the SNR, at $\tau = 0 \mu s$

Красная прямая линия (см. рисунок 3) - значения RMER для модуляции QAM-4 без учета помехоустойчивого кодирования (результат расчета по (1). Верхняя прямая линия – значения RMER для модуляции QAM-4 при уровне защиты PL1 (скорость кода R = 0,333) для системы DRM при работе в режиме устойчивости Е с помехоустойчивым (канальным) кодированием (экспериментальные данные, полученные в работе). Канальное кодирование, примененное в системе DRM, обеспечивает существенно более низкое значение SNR, необходимое для комфортного прослушивания. Например, при модуляции QAM-4 и уровне защиты PL1 величина RMER составляет 1,84 и 3,91 дБ при SNR = 0 дБ и, соответственно, 6,9 и 10,75 дБ при SNR = 6,8 дБ, т. е. увеличивается за счет канального кодирования на 2,07 дБ при SNR = 0 дБ и на 3,85 дБ при SNR = 6,8 дБ и, как следствие, при канальном кодировании требуется меньшее значение SNR для комфортного прослушивания. Иначе говоря, если при модуляции QAM-4 и уровне защиты PL1 минимальное значение RMER составляет 6 дБ, то канальное кодирование обеспечивает получение данного значения уже при SNR = 2,13 дБ. Из рисунка 3 следует, что, если величина SNR = 2,71 дБ, то требуемое для комфортного прослушивания значение RMER должно составлять не менее 6,6 дБ. Это хорошо согласуется с экспериментальными данными (рисунок 4, верхняя прямая линия), где требуемое минимальное значение RMER составляет ~ 6,5 дБ. Здесь модуляция поднесущих частот QAM-4, скорость кода *R* = 0,333.



Рис. 4. Зависимости RMER, дБ, при наличии в радиоканале АБГШ от величины SNR, дБ, для разных значений временно́го сдвига т окна прямого ДПФ относительно начала полезной части OFDM-символа



Конечно, даже при выполнении изложенных выше условий на величину RMER могут влиять как способ передачи (OFDM-передача или передача на одной несущей частоте), виды модуляции и помехоустойчивого кодирования, возможно, другие факторы. Данное исследование не имеет своей целью оценку влияния каждого из них на величину RMER. Это предмет отдельного исследования.

Результаты оценки RMER, полученные при выполнении первого этапа исследований, приведены на рисунке 5.



Рис. 5. Зависимости RMER, дБ, от временно́го сдвига т между моментом старта прямого ДПФ и началом полезной части OFDM-символа при модуляции поднесущих частот QAM-4 и QAM-16, разных уровнях помехозащищенности PL0–PL3 и отсутствии в радиоканале АБГШ, помех и многолучевости

Fig. 5. Dependence of RMER, dB, on the Time Shift τ between the Start of the Direct DFT and the Beginning of the Useful Part of the OFDM-Symbol at QAM-4 and QAM-16 Modulation of Subcarriers Frequencies and Different Protection Levels PL0-PL3 in the Absence of AWGN, Interference and Multipath in the Radio Channel

На рисунке 5 оценено влияние временно́го сдвига т между моментами старта прямого ДПФ и

началом полезной части OFDM-символа на величину RMER для всех видов модуляции и уровней защиты при отсутствии в радиоканале АБГШ, помех и многолучевости. Величина RMER не зависит от порядка модуляции QAM поднесущих частот и уровня защиты OFDM-сигнала при отсутствии гауссовского шума, помех и многолучевости в радиоканале. Результат очевиден, ибо это идеальные условия приема, когда наличие канального кодирования не влияет на получаемые результаты. С появлением временного сдвига т мощность сигнала ошибки растет и тем значительнее, чем больше т, что приводит к резкому уменьшению величины RMER. Отметим, что для величины RMER в стандарте на систему DRM не задано пороговое значение, при котором нарушается условие комфортного приема. С этой точки зрения полезен такой критерий, как вероятность появления BER. Для условий комфортного DRM-приема – BER ≤ 10⁻⁴ [9].

Заметим, что погрешность при измерении значений RMER и BER существенно зависит от числа обработанных OFDM-символов [15]: например, для подсчета BER с вероятностью не хуже 10⁻³ требуется обработка не менее 10⁴ битов испытательного сигнала, для измерения BER с вероятностью не хуже 10⁻⁶ требуется обработка уже не менее 10⁷ битов. В рассматриваемом случае при моделировании испытательный сигнал содержал 10⁶ битов.

На рисунке ба приведена полученная экспериментальным путем зависимость RMER от величины временно́го сдвига т для модуляции QAM-4 и уровня защиты PL1 (скорость кода R = 0,333). На рисунке бс дана экспериментальная зависимость вероятности появления BER также для QAM-4 и R == 0,333 от величины временно́го сдвига т. На рисунке бе показан вид сигнальных созвездий для трех значений т (1, 2 и 3 мкс). Все эти данные получены при отсутствии в радиоканале АБГШ, помех и многолучевости. На рисунке 6 (справа) приведены аналогичные данные, но для модуляции QAM-16 и уровне защиты PL2 (скорость кода R = 0,5).

На рисунке 7 даны аналогичные сведения для разных видов модуляции и уровней защиты, которые возможны при работе системы DRM в режиме устойчивости *E*.

Параметрами каждой кривой на рисунках 6, 7 являются порядок модуляции QAM поднесущих частот OFDM-сигнала и уровень защиты PL.

Полученные для идеальных условий приема результаты позволяют сделать следующие выводы при работе системы DRM в режиме устойчивости *E*.

Во-первых, ошибка в оценке момента начала полезной части OFDM-символа при выполнении прямого ДПФ приводит для каждого выбранного вида модуляции (QAM-4, QAM-16) и уровня защиты (PL0–PL3) к росту BER (см. рисунки 6с, 6d и 7), ибо

сопровождается увеличением сигнала ошибки и, как следствие, ухудшением условий приема и сокращением радиуса зоны покрытия из-за порогового эффекта, свойственного системе DRM. Это явление проявляется тем значительнее, чем больше величина временно́го сдвига τ окна прямого ДПФ от его идеального положения, когда τ = 0 (см. рисунок 1).



 Рис. 6. Влияние временно́го сдвига т между началом полезной части OFDM-символа и моментом старта прямого ДПФ на значение RMER, дБ, (a, b), на вероятность появления BER (c, d) и на вид сигнального созвездия (e, f) [19]

 Fig. 6. Effect of the Time Shift τ between the Beginning of the Useful Part of the OFDM-Symbol and the Start of the Direct DFT on the Value

of RMER, dB, (a, b), on the Probability of BER (c, d), and on the Type of Signal Constellation (e, f) [19]



Рис. 7. Зависимости вероятности появления BER от временно́го сдвига т между началом полезной части OFDM-символа и моментом старта прямого ДПФ

Fig. 7. Dependences of the Probability of BER on the Time Shift τ between the Beginning of the Useful Part of the OFDM-Symbol and the Moment of the Start of the Direct DFT

Во-вторых, наличие временного сдвига т, вызванное неточностью временной синхронизации приемника, приводит к искажению (повороту) сигнальных созвездий поднесущих частот (см. рисунки бе и бf) и, следовательно, к дополнительному увеличению уровня шума при DRM-приеме. Это явление проявляется тем значительнее, чем больше число позиций вектора поднесущих частот при модуляции QAM. В-третьих, величина BER (см. рисунок 7), в отличие от RMER, является не только функцией временно́го сдвига т, но зависит также от вида модуляции и в меньшей степени – от уровня защиты. С уменьшением BER зависимость от уровня защиты уменьшается и при величине BER ≤ 10⁻⁴ становится незначительной, при этом существенным влияющим на эту величину фактором остается порядок модуляции QAM.

В-четвертых, для сохранения условий комфортного приема BER ≤ 10⁻⁴ допустимое значение временно́го сдвига т должно быть не более 2,7 мкс (модуляция QAM-4) и не более 1 мкс (QAM-16), вместе с тем величина RMER не должна быть менее 6 дБ (см. рисунок 6а) при модуляции QAM-4 и 15,3 дБ (см. рисунок 6b) при модуляции QAM-16 для всех уровней защиты. Это пороговые значения RMER, необходимые для комфортного приема при отсутствии в радиоканале АБГШ, помех и многолучевости.

На втором этапе оценивалось влияние АБГШ в радиоканале на вероятность появления BER при наличии временно́го сдвига т окна прямого ДПФ относительно начала полезной части OFDM-символа (рисунки 8 и 9).



Рис. 8. Влияние SNR, дБ, при наличии в радиоканале АБГШ на вероятность появления BER для разных значений временно́го сдвига т, мкс (модуляция поднесущих частот QAM-4): а) уровень защиты PL0; b) уровень защиты PL1, [19] Fig. 8. The Effect of SNR, dB, in the Presence of AWGN in The Radio Channel, on the Probability of BER Occurrence for Different Values

of the Time Shift τ , μ s (QAM-4 Subcarrier Frequency Modulation): a) Protection Level PL0; b) Protection Level PL1, [19]



Рис. 9. Влияние SNR, дБ, при наличии в радиоканале АБГШ на вероятность появления ВЕR для разных значений временно́го сдвига т, мкс, окна прямого ДПФ относительно начала полезной части OFDM-символа для модуляции QAM-16, уровень защиты PL2 [19]

Fig. 9. Effect of SNR, dB, in the Presence of AWGN in the Radio Channel, on the BER for Different Values of the Time Shift τ , µs, of the Direct DFT Window Relative to the Beginning of the Useful Part of the OFDM Symbol for QAM-16 Modulation, Protection Level PL2 [19]

Видно, что с увеличением временно́го сдвига т при одном и том же значении SNR вероятность появления BER возрастает (см. рисунок 8а). Однако, несмотря на наличие значительных флюктуаций, аппроксимирующие зависимости для каждого значения т имеют практически вид отрезков прямых линий с одинаковым наклоном. Зависимости, представленные на рисунках 8b и 9, подтверждают, что наличие временно́го рассогласования т приводит к росту вероятности появления BER и к уменьшению RMER (см. рисунок 4) за счет вызванного этим явлением дополнительного ухудшения SNR при приеме.

Основное влияние на требуемую точность временно́й синхронизации DRM-приемника оказывает порядок модуляции QAM и существенно меньшее влияние – уровень защиты PL в области, где вероятность появления BER не превышает значение 10⁻⁴. При BER ≤ 10⁻⁴ влиянием выбранно́го уровня защиты PL можно пренебречь (см. рисунок 7).

Покажем, что форма экспериментальных кривых, представленных на рисунке 9, подтверждается теорией. Величина RMER по определению равна:

$$RMER = 10 \lg(\frac{P_C}{P_{OUU}}),$$

где P_c – средняя мощность полезного сигнала за интервал измерения *T*; P_{out} – средняя мощность сигнала ошибки также за интервал *T* при наличии в радиоканале АБГШ и временно́го сдвига т между моментами старта прямого ДПФ и началом полезной части OFDM-символа:

$$P_{\rm out} = \frac{P_c}{10^{RMER/10}},$$

и

где:

$$RMER_1 = 10 \lg \left(\frac{P_c}{P_{OIII_1}}\right), P_{OIII_1} = \frac{P_c}{10^{RMER_1/10}},$$

 $RMER_2 = 10 \lg \left(\frac{P_c}{P_{0III_2}}\right), P_{0III_2} = \frac{P_c}{10^{RMER_2/10}},$

где $RMER_1$ и $P_{0ш_1}$ – RMER и средняя мощность сигнала ошибки при наличии в радиоканале АБГШ и отсутствии временно́го сдвига между моментами старта прямого ДПФ и началом полезной части OFDM-сигнала ($\tau = 0$); $RMER_2$ и $P_{0ш_2}$ – RMER и средняя мощность сигнала ошибки при отсутствии в радиоканале АБГШ и наличии временно́го сдвига ($\tau \neq 0$) между моментами старта прямого ДПФ и началом полезной части OFDM-символа.

Источники шумов $P_{0ш_1}$ и $P_{0ш_2}$ имеют разную природу появления, по этой причине их можно считать статистически независимыми случайными величинами, если это так, то справедливо выражение:

$$P_{0\amalg} = P_{0\amalg_1} + P_{0\amalg_2},$$

и RMER при наличии АБГШ в радиоканале при τ ≠ 0 может быть найден по выражению:

$$RMER = 10 \lg \left(\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{10} \frac{RMER_1}{10} + \frac{1}{10} \frac{RMER_2}{10}}} \right).$$
(2)

Результаты измерений, приведенные на рисунках 4 (синяя линия) и 5, позволяют оценить влияние АБГШ в радиоканале на величину RMER при разных значениях временно́го сдвига $\tau \neq 0$. Полученные расчетным путем данные представлены на рисунке 9 для модуляции QAM-4 и уровне защиты PL1. Параметром каждой кривой здесь является значение временно́го сдвига т (верхняя кривая для $\tau = 0$ мкс; вторая кривая сверху – $\tau = 1$ мкс; третья кривая сверху – $\tau = 2$ мкс; четвертая кривая сверху – $\tau = 2,5$ мкс; пятая кривая сверху – $\tau = 3$ мкс).



Рис. 10. Зависимости RMER, дБ, от SNR, дБ, при наличии в радиоканале АБГШ для разных значений временно́го сдвига т между моментами старта прямого ДПФ и началом полезной части OFDM-символа

Fig. 10. Dependences of RMER, dB, on SNR, dB, in the Presence of AWGN in the Radio Channel for Different Values of the Time Shift τ between the Moments of the Start of the Direct DFT and the Beginning of the Useful Part of the OFDM-Symbol

Заметим, что при идеальном временно́м согласовании ($\tau = 0$) и отсутствии АБГШ в радиоканале RMER равен бесконечности (см. рисунок 4), если не учитывать шумы оборудования. При наличии временно́го сдвига ($\tau \neq 0$) или (и) АБГШ в радиоканале средняя мощность сигнала ошибки уже не будет равна нулю. Увеличение τ сопровождается ростом сигнала ошибки и, соответственно, уменьшением величины RMER (см. рисунок 5). Этот вывод подтверждается данными измерений (см. рисунок 4) и расчетов (см. рисунок 10).

Предположим, что в радиоканале присутствует АБГШ и отношение сигнал / шум равно *SNR*_{min} при выбранных значениях порядка модуляции QAM и скорости кода, а уменьшение этого отношения до величины порогового значения (*SNR*_n), при котором прием сигнала становится невозможным, происходит за счет появляющегося временно́го сдвига т, тогда выражение (2) преобразуется к следующему виду:

$$SNR_{\pi} = 10 \lg(\frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{1}{10} + \frac{1}{10}})$$

$$\mu SNR_{\pi} = SNR_{\min} - 1.$$
(3)

Выражение (3) позволяет рассчитать значение $RMER_2$ и затем, используя зависимость на рисунке 5, найти соответствующее ему значение максимально допустимого временно́го сдвига $\tau_{\text{доп}}$.

В системе DRM уменьшение SNR в радиоканале относительно его минимального значения (SNR_{min}) на 1 дБ приводит к тому, что прием DRM-сигнала оказывается невозможным [16–18]. Ранее для системы DRM при работе в режиме устойчивости *E* в условиях стационарного приема *Fx* были измерены минимальные значения *SNR*min (таблица 2, второй столбец), при которых еще сохраняется комфортный прием, т. е. вероятность появления BER, как того требует стандарт, не превышает 10⁻⁴ [8, 9].

ТАБЛИЦА 2. Максимально допустимое значение временно́го сдвига (т_{доп}) между моментами старта прямого ДПФ и началом полезной части OFDM-символов для разных значений порядка модуляции QAM и уровня помехозащищенности PL требуемое для условий комфортного приема при наличии в радиоканале АБГШ

TABLE 2. Maximum Permitted Value of the Time Shift (τ_{AON}) between the Start of the Direct DFT and the Beginning of the Useful Part of OFDM-Symbols for Different Values of the Modulation Order QAM and Protection Level PL, Required for Conditions of Comfortable Reception in the Presence of AWGN in the Radio Channel

Модуляция/ Скорость кода/ Уровень защиты	<i>SNR</i> _{min,} дБ	SNR _{п,} дБ	<i>RMER</i> 2, дБ	т _{доп} , МКС
QAM-4/0,250/PL0	2,27	1,27	8,2	2,3
QAM-4/0,333/PL1	2,71	1,71	8,6	2,2
QAM-4/0,4/PL2	2,93	1,93	8,8	2,1
QAM-4/0,5/PL3	4,09	3,09	10	1,8
QAM-16/0,330/PL0	7,64	6,64	13,5	1,3
QAM-16/0,411/PL1	9,22	8,22	15,1	1,0
QAM-16/0,500/PL2	10,24	9,24	16,1	0,9
QAM-16/0,411/PL1	11,40	10,40	17,3	0,8

Значения *SNR*_{min} и зависимости RMER (см. рисунки 4 (синяя кривая) и 5), полученные экспериментальным путем, позволяют найти максимально допустимое значение временно́го сдвига т_{доп}, при котором вероятность появления BER не превысит требуемое стандартом значение 10⁻⁴. Результаты этих вычислений приведены в таблице 2 и на рисунке 11, где по оси ординат отложены значения т_{доп}, мкс, а по оси абсцисс – требуемое стандартом значение *SNR*_{min} для системы DRM. И наконец, используя пилотные поднесущие частоты и метод билинейной интерполяции, были скомпенсированы вызванные временным сдвигом изменения амплитуды и фазы для информацион-



Рис. 11. Максимально допустимое значение временно́го сдвига между моментами старта прямого ДПФ и началом полезной части OFDM-символов при наличии в радиоканале АБГШ: левая верхняя линия получена для модуляции QAM-4; правая нижняя линия – для QAM-16

Fig. 11. Maximum Permitted Value of Time Shift between the Moments of the Start of the Direct DFT and the Beginning of the Useful Part of OFDM-Symbols in the Presence of AWGN in the Radio Channel: the Left Upper Line is Obtained for QAM-4 Modulation, the Right Lower Line is Obtained for QAM-16 Modulation

Компенсация искажений (см. рисунок 12) по амплитуде и фазе для информационных поднесущих частот позволяет сохранить высокое значение RMER при значительно большем значении т. Видно, что когда старт прямого ДПФ происходит раньше начала полезной (информационной) части OFDMсимвола, компенсация оказывается более эффективной. В худшем случае, когда момент старта прямого ДПФ берется позже начала полезной части OFDM-символа при модуляции QAM-4 и уровне защиты PL0, допустимое значение временно́го сдвига должно быть не более 190 мкс, при модуляции QAM-16 – не более 25 мкс. Эти результаты также подтверждают необходимость точной временно́й синхронизации при приеме OFDM-сигнала.

Заключение

Во-первых, сохранение условий комфортного приема сигнала стандарта DRM невозможно без точной временной синхронизации приемного оборудования. При модуляции поднесущих частот QAM-4 временной сдвиг т между моментами старта прямого ДПФ и началом полезной части OFDMсимвола не должен превышать 1,8–2,3 мкс. При моных поднесущих частот при приеме. Зависимости RMER от временно́го сдвига для данного случая при отсутствии в радиоканале АБГШ, помех и многолучевости представлены на рисунке 12.



Рис. 12. Зависимости RMER, дБ, от величины временно́го сдвига при компенсации искажений для информационных поднесущих частот при разных видах модуляции QAM и уровнях защиты PL при отсутствии в радиоканале шума, помех и многолучевости

Fig. 12. Dependences of RMER, dB, on the Magnitude of the Time Shift during Distortion Compensation for Information Subcarriers with Different Types of QAM Modulation and PL Protection Levels in the Absence of Noise, Interference and Multipath in the Radio Channel

дуляции QAM-16 – эта величина должна быть не более 0,8–1,3 мкс. Разброс полученных значений определяется выбранным уровнем защиты PL.

При компенсации искажений информационных поднесущих частот эти требования становятся менее жесткими: не более 190 мкс при модуляции QAM-4 и не более 25 мкс при модуляции QAM-16 при условии, что значения SNR соответствуют требованиям стандарта на систему DRM.

Во-вторых, основное влияние на требуемую точность временной синхронизации DRM-приемника при работе в режиме устойчивости *E* оказывает порядок модуляции QAM и существенно меньшее влияние – уровень защиты PL в области, где вероятность появления BER не превышает 10⁻⁴. В случае, если BER ≤ 10⁻⁴, влиянием выбранного уровня защиты PL можно пренебречь.

В-третьих, появление т приводит к уменьшению радиуса зоны покрытия, тем значительнее, чем больше эта величина.

В-четвертых, результаты вычислений подтверждены данными измерений и должны быть учтены при разработке блока временной синхронизации DRM-приемника.

Список источников

1. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П. Технология OFDM: учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. 352 с.

2. Гуминский О.А., Мышьянов С.В. Разработка алгоритма синхронизации сигнала для радиоприемного устройства стандарта DRM mode // XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (АПИНО 2022, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 15–16 февраля 2022 г.). СПб.: СПбГУТ, 2022. С. 178–183. EDN:USFELI

3. Keller T., Hanzo L. Orthogonal frequency division multiplex synchronization techniques for wireless local area networks // Proceedings of the 7th International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Communications (PIMRC '96, Taipei, Taiwan, 18 October 1996). IEEE, 1996. PP. 963–967. DOI:10.1109/PIMRC.1996.568424

4. Sandell M., Van De Beek J.J., Borjesson P.O. Timing and frequency synchronization in OFDM systems using the cyclic prefix // Proceedings of the International Symposium on Synchronization (Essen, Germany, 14–15 December 1995). 1995. PP. 16–19.

5. Chevillat P.R., Maiwald D., Ungerboeck G. Rapid Training of a Voiceband Data-Modem Receiver Employing an Equalizer with Fractional-T Spaced Coefficients // IEEE Transactions on Communications. 1987. Vol. 35. Iss. 9. PP. 869–876. DOI:10.1109/TCOM.1987.1096887

6. Van de Beek J.J., Sandell M., Isaksson M., Borjesson P.O. Low-complex frame synchronization in OFDM systems // Proceedings of the 4th International Conference on Universal Personal Communications (ICUPS 95, Tokyo, Japan, 06–10 November 1995). IEEE, 1995. DOI:10.1109/ICUPC.1995.497156

7. Moose P.H. A Technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction // IEEE Transactions on Communications. 1994. Vol. 42. Iss. 10. PP. 2908–2914. IEEE,1994. DOI:10.1109/26.328961

8. ETSI ES 201 980 V2.2.1 (2005-10) V4.2.1 (2021-01). Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification.

9. Рекомендация МСЭ-R BS.1660-8 (06/2019). Техническая основа для планирования наземного цифрового звукового радиовещания в полосе ОВЧ. С. 33–49.

10. Гуминский О.А. Модель приёмо-передающего тракта системы цифрового радиовещания DRM+. URL: https://cloud.mail.ru/public/AxE9/9nJmYeYHv (дата обращения 24.03.2025)

11. Дубов М.А., Полянин Ю.В., Стоянов Д.Д., Брюханов Ю.А. Оценка вероятности битовой ошибки приема сигналов с квадратурной модуляцией неэталонными методами // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2012. Т. 2. № 2. С. 173–177. EDN:ZHJHRT

12. ETSI EN 302 245-1 V1.1.1 (2005-01). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for the Digital Radio Mondiale (DRM) broadcasting service; Part 1: Technical characteristics and test methods.

13. ETSI EN 302 245 V2.2.1 (2022-05). Transmitting equipment for the Digital Radio Mondiale (DRM) service; Harmonised Standard for access to radio spectrum.

14. Gu Q. RF System Design of Transceivers for Wireless Communications. Springer, 2005. 467 p.

15. Дубов М.А., Приоров А.Л. Методика неэталонной оценки отношения сигнал/шум и вероятности битовой ошибки для сигналов с квадратурной модуляцией // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 4. С. 37–43. EDN:PXXBYD 16. Ковалгин Ю.А. Цифровое радиовещание: системы и технологии. М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 580 с.

17. Соколов С.А., Мышьянов С.В., Ковалгин Ю.А. Исследование аналого-цифровой DRM/ ЧМ-зоны радиовещания в

полосе частот 87,5–108 МГц // Электросвязь. 2021. № 4. С. 23–29. DOI:10.34832/ELSV.2021.17.4.003. EDN:OBGGGA

18. Ковалгин Ю.А., Соколов С.А., Мышьянов С.В. и др. Построение опытной аналого-цифровой зоны радиовещания DRM+/УКВ ЧМ в диапазоне 87,5–108 МГц: отчет о НИР. Дигитон Системс, 2019. 223 с.

19. Гуминский О.А., Ковалгин Ю.А. Исследование и оценка требуемой точности временной синхронизации приемного оборудования в системе цифрового радиовещания DRM mode E // XIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (АПИНО 2022, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 27–28 февраля 2024 г.). СПб.: СПбГУТ, 2024. С. 201–205. EDN:WDRCWV

References

1. Bakulin M.G., Kreindelin V.B., Shloma A.M., Shumov A.P. *OFDM Technology*. Moscow: Goriachaia liniia Telekom Publ.; 2016. 352 p. (in Russ.)

2. Guminskiy O., Myshyanov S. Development of a Signal Synchronization Algorithm for a DRM Mode E Radio Receiver. *Proceedings of the XIth International Conference on Infotelecommunications in Science and Education*, 15–16 February 2022, *St. Petersburg, Russian Federation.* St. Petersburg: Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2022. p.178–183. (in Russ.) EDN:USFELI

3. Keller T., Hanzo L. Orthogonal frequency division multiplex synchronization techniques for wireless local area networks. *Proceedings of the 7th International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Communications, PIMRC '96, 18 October 1996, Taipei, Taiwan.* IEEE; 1996. p.963–967. DOI:10.1109/PIMRC.1996.568424

4. Sandell M., Van De Beek J.J., Borjesson P.O. Timing and frequency synchronization in OFDM systems using the cyclic prefix. *Proceedings of the International Symposium on Synchronization*, *14–15 December 1995, Essen, Germany*. 1995. p.16–19.

5. Chevillat P.R., Maiwald D., Ungerboeck G. Rapid Training of a Voiceband Data-Modem Receiver Employing an Equalizer with Fractional-T Spaced Coefficients. *IEEE Transactions on Communications*. 1987;35(9):869–876. DOI:10.1109/TCOM.1987. 1096887

6. Van de Beek J.J., Sandell M., Isaksson M., Borjesson P.O. Low-complex frame synchronization in OFDM systems. *Proceedings of the 4th International Conference on Universal Personal Communications, ICUPS 95, 06–10 November 1995, Tokyo, Japan.* IEEE; 1995. DOI:10.1109/ICUPC.1995.497156

7. Moose P.H. A Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Frequency Offset Correction. *IEEE Transactions on Communications*. 1994;42(10):2908–2914. IEEE, 1994. DOI:10.1109/26.328961

8. ETSI ES 201 980 V2.2.1 (2005-10) V4.2.1 (2021-01). Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification. 184 p.

9. Rec. ITU-R BS.1660-8 (06/2019). *Technical basis for planning of terrestrial digital sound broadcasting in the VHF band*. June 2019. p.33–49.

10. Guminsky O.A. *The model of the receiving and transmitting path of the DRM+ digital radio broadcasting system*. (in Russ.) URL: https://cloud.mail.ru/public/AxE9/9nJmYeYHv [Accessed 24.03.2025]

11. Dubov M.A., Polyanin Yu.V., Stoyanov D.D., Bryukhanov Yu.A. Estimation of the probability of bit error in the reception of signals with quadrature modulation by non-reference methods. *Digital signal processing and its applications*. 2012;2(20): 173–177. (in Russ.) EDN:ZHJHRT

12. ETSI EN 302 245-1 V1.1.1. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for the Digital Radio Mondiale (DRM) broadcasting service; Part 1: Technical characteristics and test methods. January 2005.

13. ETSI EN 302 245 V2.2.1. Transmitting equipment for the Digital Radio Mondiale (DRM) service; Harmonised Standard for access to radio spectrum. May 2022.

14. Gu Q. RF System Design of Transceivers for Wireless Communications. Springer, 2005. 467 p.

15. Dubov M.A., Priorov A.L. Methodology for non-reference estimation of signal-to-noise ratio and bit error probability for signals with quadrature modulation. *Digital Signal Processing*. 2012;4:37–43. (in Russ.) EDN:PXXBYD

16. Kovalgin Yu.A. *Digital radio broadcasting: systems and technologies*. Moscow: Goriachaia liniia Telekom Publ.; 2021. 580 p. (in Russ.)

17. Sokolov S.A., Myshyanov S.V., Kovalgin Yu.A. Results of the DRM simulcast field trials in 87.5–108 MHz band. *Elektrosviaz*. 2021;4:23–29. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2021.17.4.003. EDN:OBGGGA

18. Kovalgin Yu.A., Sokolov S.A., Myshyanov S.V., et al. *Construction of an Experimental Analog-Digital DRM+/VHF FM Radio Broadcasting Zone in the 87.5–108 MHz Range: a Research Report*. Digiton Systems Publ.; 2019. 223 p. (in Russ.)

19. Guminsky O., Kovalgin Yu. Investigation and Evaluation of the Required Accuracy of Time Synchronization of Receiving Equipment in the E-Mode of the DRM Digital Radio Broadcasting System. *Proceedings of the XIIIth International Conference on Infotelecommunications in Science and Education*, 27–28 February 2024, St. Petersburg, Russian Federation. St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2024. p.201–205. (in Russ.) EDN:WDRCWV

Статья поступила в редакцию 31.01.2025; одобрена после рецензирования 21.02.2025; принята к публикации 14.03.2025.

The article was submitted 31.01.2025; approved after reviewing 21.02.2025; accepted for publication 14.03.2025.

Информация об авторах:

ГУМИНСКИЙ Олег Андреевич аспирант кафедры телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича bttps://orcid.org/0009-0007-3560-3898

КОВАЛГИН Юрий Алексеевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича bttps://orcid.org/0000-0002-6753-8062

Ковалгин Ю.А. является членом редакционного совета журнала «Труды учебных заведений связи» с 2016 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Kovalgin Yu.A. has been a member of the journal "Proceedings of Telecommunication Universities" Editorial Council since 2016, but has nothing to do with the decision to publish this article. The article has passed the review procedure accepted in the journal. The authors have not declared any other conflicts of interest.