

УДК 681.84.087

Е.А. Шелковина, О.Г. Лебедев

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ МОДУЛЯЦИИ В СТАНДАРТАХ ЦИФРОВОГО РАДИОВЕЩАНИЯ

*В статье выполнен анализ систем цифрового радиовещания, которые в настоящее время нашли широкое применение. Исследованы методы цифровой модуляции, которые используются в рассматриваемых системах. Проведено сравнение энергетической и спектральной эффективности методов цифровой модуляции. В процессе математического моделирования выполнена оценка требуемой энергии для передачи информации с одинаковой вероятностью битовой ошибки для каждого вида модуляции. Обоснована целесообразность использования различных методов модуляции для определённых систем цифрового радиовещания.*

**Ключевые слова:** цифровое радиовещание, цифровая модуляция, радиочастотный спектр, энергетическая эффективность, спектральная эффективность, вероятность ошибки, полоса пропускания фильтра.

### Введение

Радиовещание, начавшее свое коммерческое существование в 20-х годах прошлого века, и по сей день остается самым востребованным источником информации. Исторически цифровые технологии в звуковом вещании впервые были использованы для передачи вещательных программ по наземным и спутниковым линиям связи, а к концу 1970-х гг. появилась возможность организации непосредственного спутникового радиовещания в цифровом формате в рамках радиовещательной спутниковой службы (РВСС). Вещание с искусственных спутников Земли (ИСЗ) можно было осуществлять в одном из диапазонов частот, наиболее используемые из которых: 3,4...4,2 ГГц и 11,7...12,5 ГГц [1].

Одним из наиболее привлекательных свойств цифровых методов передачи является то, что они более эффективны в условиях сильных помех и обеспечивают более рациональное использование радиочастотного ресурса. Высокая помехоустойчивость позволяет системам цифрового радиовещания (ЦРВ) либо превзойти по эффективности использование радиочастотного спектра (РЧС) системы аналогового радиовещания (на частотах выше 30 МГц), либо в полосах аналогового вещания обеспечить существенно более высокие стандарты качества услуги.

Преимущества цифровой реализации основаны также на том обстоятельстве, что цифровая техника переживает быстрые и впечатляющие темпы улучшения характеристик, существенное снижение стоимости и потребляемой мощности.

Объектом исследований является процесс модуляции в системах ЦРВ. Предметом исследования являются системы ЦРВ.

На сегодняшний день актуально использование следующих цифровых систем эфирного радиовещания:

- система наземного ЦРВ. Данные системы

подразделяются на системы, работающие в диапазонах очень высоких частот (ОВЧ), ультравысоких частот (УВЧ), и на частотах ниже 30 МГц;

- система прямого ЦРВ с функцией приема сигнала на бытовой радиоприемник;

- комбинированная система ЦРВ. В данном случае систему ЦРВ можно реализовать как смешанную (гибридную) наземно-спутниковую систему (НСС), в которой используется маломощная распределительная сеть для увеличения зоны обслуживания ИСЗ [2].

Более подробно в статье рассмотрим следующие системы ЦРВ: DRM (digital radio mondiale, всемирное цифровое радио); DAB (digital audio broadcasting, цифровое звуковое радиовещание); IBOC (In-band on-channel, метод передачи цифровых и аналоговых сигналов в общей полосе частот по общему каналу связи).

DRM радиовещание – набор технологий цифрового радиовещания, разработанных для вещания в диапазонах, используемых в настоящее время для вещания с амплитудной модуляцией, в частности, на коротких волнах. В DRM радиовещании преимущественно используется модуляция QAM-4, 16, 64 (quadrature amplitude modulation, квадратурная амплитудная модуляция), реже ASK (amplitude shift keying, амплитудная манипуляция).

Система цифрового звукового вещания DAB предназначена для наземного приема радиопередач. В DAB преимущественно используется QPSK (quadrature phase-shift keying, квадратурная фазовая модуляция) и QAM-4, 16, 64.

Система IBOC, разработанная в США, предполагает работу, как в гибридном, так и в цифровом режиме. В гибридном режиме предполагается передача аналогового и цифрового сигнала одновременно. В IBOC преимущественно используется QAM-16, 64, BPSK (binary phase-shift keying, двоичная фазовая

манипуляция), MSK (minimum shift keying, частотная манипуляция с минимальным сдвигом), QPSK.

Таким образом, очевидно, что все перечисленные системы ЦРВ используют цифровую модуляцию в процессе формирования и обработки сигналов вещания. Поэтому актуальной задачей является анализ эффективности различных методов модуляции [3].

Известно, что при сравнительном анализе различных видов модуляции основными критериями являются параметры спектральной и энергетической эффективности. Энергетическая эффективность характеризует энергию, необходимую для передачи информации с заданной достоверностью (вероятностью ошибки). В этом случае одним из фундаментальных параметров выступает коэффициент ошибок BER (bit error rate). Спектральная эффективность характеризует полосу частот, необходимую для того, чтобы передавать информацию с определенной скоростью [4].

Практически во всех системах связи применяются фильтры, которые ограничивают спектр сигнала. Для амплитудных, фазовых и амплитудно-фазовых видов модуляции чаще всего применяют фильтры с амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) в виде приподнятого косинуса, для частотных – гауссов фильтр. В этой связи спектральная эффективность амплитудных, фазовых и амплитудно-фазовых видов модуляции одинакова и определяется полосой пропускания фильтра. При этом увеличение уровней модуляции увеличивает спектральную эффективность в  $n$  раз [5].

В статье *основной задачей* является сравнение различных видов цифровой модуляции по критерию энергетической и спектральной эффективности, что позволяет обосновать выбор оптимального метода модуляции. Последнее, в свою очередь, дает возможность повысить и улучшить результаты передачи информации.

## Анализ цифровых методов модуляции в ЦРВ

Вначале выполним сравнительный анализ по критерию энергетической эффективности.

**1. Оценка энергетической эффективности двухуровневых методов модуляции BPSK и MSK.** Для этого построим зависимости:

$$\text{BER} = f(E_b/N_0), \quad (1)$$

где BER – вероятность ошибки на бит;  $E_b$  – энергия, необходимая для передачи одного бита информации;  $N_0$  – спектральная плотность белого гауссовского шума (БГШ) в канале.

Вероятность ошибки на бит для указанных видов модуляции определяется следующим образом:

$$\text{BPSK} \quad \text{BER} = Q\left(\sqrt{2E_b/N_0}\right)$$

$$\text{MSK} \quad \text{BER} = Q\left(\sqrt{E_b/N_0}\right).$$

Полученные зависимости представлены на рис. 1 [6].

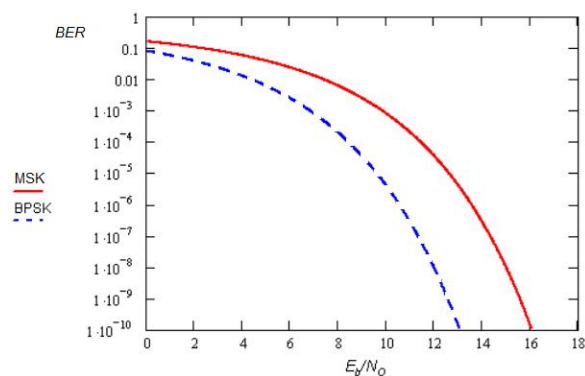


Рис. 1. Энергетическая эффективность модуляций MSK и BPSK

Анализ построенных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что при числе уровней до 4 включительно BPSK является энергетически более эффективным видом модуляции.

BER для BPSK и QPSK описываются одинаковыми зависимостями, QPSK имеет такую же энергетическую эффективность, как и BPSK, при этом QPSK в 2 раза спектрально эффективнее, чем BPSK. Значит, QPSK всегда существенно эффективнее, чем BPSK.

**2. Оценка энергетической эффективности 16-уровневых PSK, ASK и QAM. В соответствии с (1) построим зависимости для выбранных видов модуляции.**

Вероятность ошибки на бит для названных видов модуляции определяется следующим образом: M-PSK

$$\text{BER} = \frac{2}{\log_2 M} Q\left(\sqrt{\frac{2E_b \log_2 M}{N_0} \sin^2\left(\frac{\pi}{M}\right)}\right); \quad (2)$$

M-ASK

$$\text{BER} = \frac{2(M-1)}{M \log_2 M} Q\left(\sqrt{\frac{\log_2 M}{(M-1)^2} \frac{E_b}{N_0}}\right); \quad (3)$$

M-QAM

$$\text{BER} = \frac{2 \cdot P_0 - P_0}{\log_2 M}; \quad (4)$$

где  $M$  – число позиций для многопозиционных видов модуляции;  $P_0$  – мощность передатчика.

Графики данных видов модуляции представлены на рис. 2 [6].

Анализ представленных зависимостей позволяет сделать вывод, что амплитудная модуляция существенно (более 10 дБ при  $M=16$ ) уступает фазовой и амплитудно-фазовой, поэтому дальнейшее сравнение при  $M=64$  с ней не проводилось.

Амплитудные виды модуляции имеют невысокую энергетическую эффективность, так как средний уровень мощности существенно меньше максимального. Ошибка в амплитуде сигнала из-за нели-

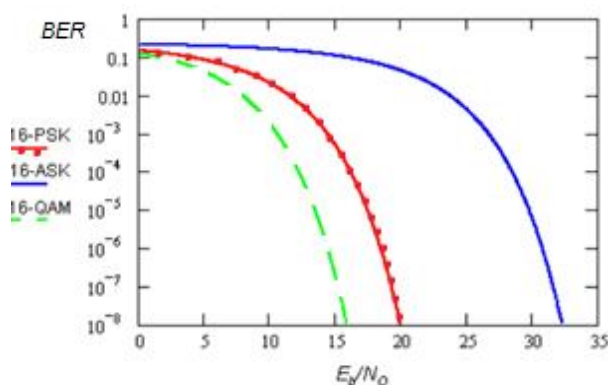


Рис. 2. Энергетическая эффективность модуляций 16-PSK, 16-ASK и 16-QAM

нейности усилителя приводит к символьной ошибке, т.к. значение символа определяется амплитудой сигнала. Влияние аддитивного шума или помехи непосредственно изменяет амплитуду сигнала, поэтому амплитудные виды модуляции не обладают высокой помехоустойчивостью. Достоинство амплитудных методов модуляции – простота реализации. Ввиду указанных недостатков амплитудные виды модуляции находят ограниченное применение.

### 3. Оценка энергетической эффективности 64-х уровней PSK и QAM.

Вероятность битовой ошибки для названных видов модуляции определяется соотношениями (2) и (4). Зависимости вероятности битовой ошибки в зависимости от отношения сигнал/шум для 64-PSK и 64-QAM представлены на рис. 3.

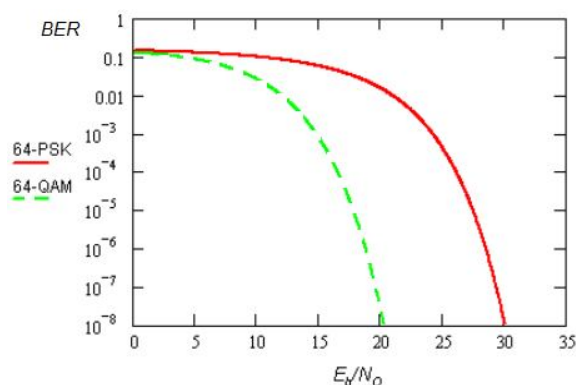


Рис. 3. Энергетическая эффективность модуляций 64-PSK и 64-QAM

Анализ зависимостей позволяет сделать вывод, что M-QAM превосходит по эффективности M-PSK. Причем энергетический выигрыш M-QAM увеличивается с ростом M. Например, для M=16 выигрыш составляет около 4 дБ, а при M=64 около 10 дБ. Физически это объясняется тем, что расстояние между соседними точками в сигнальном созвездии M-PSK меньше, чем M-QAM. Сигнальное созвездие M-PSK представляет собой окружность с равномерно распределенными на ней точками, а созвездие M-QAM – квадрат с равномерно распределенными по его площади точками. Чем больше расстояние между точ-

ками в созвездии, тем менее вероятна ошибка в детектировании соседнего символа.

Таким образом, при ограниченной полосе и  $M \leq 4$  наиболее эффективной является модуляция QPSK, а при  $M > 4$  – QAM.

### 4. Оценка энергетической эффективности 16-QAM и 64-QAM.

В соответствии с (4) построим зависимости для этих видов модуляции (см. рис. 4).

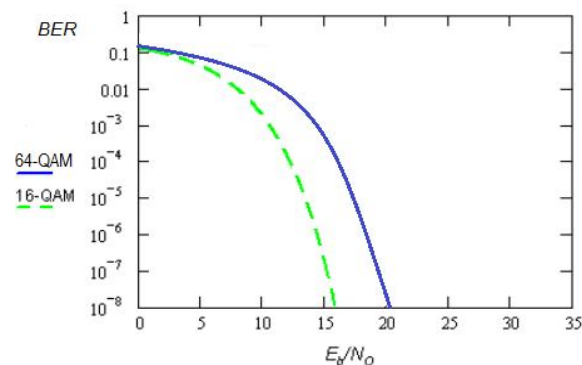


Рис. 4. Энергетическая эффективность модуляций 16-QAM и 64-QAM

Сравнивая данные зависимости, можно сделать вывод о том, что 64-QAM уступает 16-QAM примерно на 4 дБ. Следовательно, с увеличением позиционности модуляции вероятность битовой ошибки увеличивается. Однако на практике используются большие значения M, вплоть до 1024-QAM. Такие виды модуляции позволяют достичь исключительно высокой спектральной эффективности. Но, так как информация кодируется, в том числе амплитудой и изменения амплитуды велики, то QAM предъявляет высокие требования к линейности усилителя мощности и его динамическому диапазону, особенно для больших M.

Выполним сравнительный анализ по критерию спектральной эффективности.

Определим спектральную эффективность следующим образом [6]:

$$n_s = R/B_w \quad (5)$$

где R – скорость передачи,  $B_w$  – требуемая полоса частот. Поскольку в ЦРВ наиболее часто используется модуляция M-QAM и M-PSK, то оценим спектральную эффективность для этих видов модуляции. Результаты оценки представлены на рис. 5 [6].

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что фазовая манипуляция проигрывает по спектральной эффективности квадратурной амплитудной манипуляции. Так как в цифровых системах связи очень важно эффективное использование спектра, то появляется необходимость использования видов манипуляции все больших порядков.

Необходимо отметить, что использование столь высоких порядков манипуляции ограничивается, в первую очередь, нелинейностью аналоговых трактов современных систем связи, искажениями, вносимыми средой распространения сигнала, и параметрами систем синхронизации приемника.

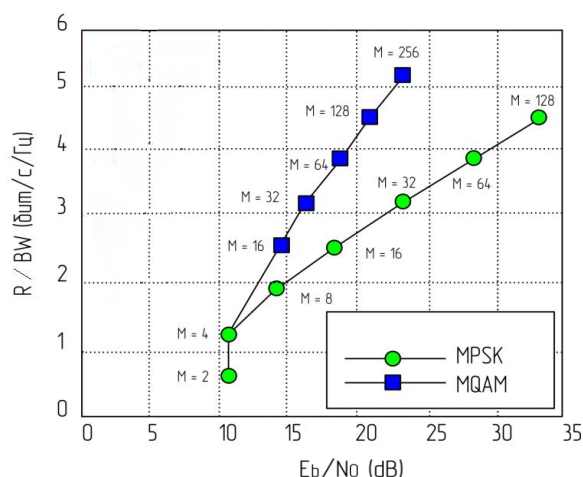


Рис. 5. Спектральная эффективность модуляций М-QAM и М-PSK

## Выводы

Основными критериями эффективности различных видов модуляции являются критерии спектральной и энергетической эффективности. Энергетическая эффективность характеризует энергию, которую необходимо затратить для передачи информации с заданной достоверностью (вероятностью ошибки). Спектральная эффективность характеризует полосу частот, необходимую для того, чтобы передавать информацию с определенной скоростью. Кроме данных критериев, виды модуляции сравниваются по устойчивости к различным типам помех и искажений и сложности аппаратной реализации [7].

В статье выполнен анализ различных видов модуляции по критерию энергетической и спектральной эффективности. В результате выполненных расчетов можно сделать вывод, что с увеличением позиционности модуляции, вероятность битовой ошибки увеличивается. Таким образом, при увеличении спектральной эффективности энергетическая эффективность уменьшается. Но в то же время, увеличение позиций (уровней) модуляции (использова-

ние М-ASK, М-PSK и М-QAM) приводит к повышению спектральной эффективности в  $k = \log_2 M$  раз. Кроме того, при ограниченной полосе для  $M \leq 4$  наиболее эффективной является модуляция QPSK, а при  $M > 4$  – QAM.

Дальнейшие исследования будут ориентированы на выбор оптимальных методов цифровой модуляции сигналов, применяемых в системах цифрового радиовещания.

Полученные результаты могут быть полезны для внедрения цифрового радио в Украине, что позволит получить новое качество звучания.

## Список литературы

1. Крухмалёв В.В. Цифровые системы передачи: учеб. / В.В. Крухмалёв, В.Н. Гордиенко, А.Д. Моченов. – М.: Горячая Линия - Телеком, 2007. – 352 с.
2. Иванов А.Б. От сквозного контроля сети к контролю качества услуг / А.Б. Иванов, И.В. Соколов. – М.: Электросвязь, 2001. – 41 с.
3. European Broadcasting Union. A Digital Radio Mondiale™ (DRM™) Publication, 2nd edition. Geneva, August 2006.
4. RECOMMENDATION ITU-R BS.1114-6 Systems for terrestrial digital sound broadcasting to vehicular, portable and fixed receivers in the frequency range 30-3 000 MHz, 2007.
5. Broadcasting. Телевидение и радиовещание: учеб. / В.П. Дворкович, А.В. Дворкович, В.А. Иртыга, В.В. Тензина. – К.: Техника, 2005. – 56 с.
6. Методы модуляции сигнала в цифровых системах связи. [Электронный ресурс] / М. гос. ун-т им. Ломоносова, фак. радиофизики. – Режим доступа к ресурсу: [www/ URL: http://ru.scribd.com/doc/](http://ru.scribd.com/doc/) - 10.09.2008 г. – Загл. с экрана.
7. Математические основы теории телекоммуникационных систем: учеб. под. ред. В.В. Поповского. – Х.: СМІТ, 2006. – 564 с.

Поступила в редколлегию 2.09.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.В. Агеев, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЦИФРОВОЇ МОДУЛЯЦІЇ В СТАНДАРТАХ ЦИФРОВОГО РАДІОМОВЛЕННЯ

К.А. Шелковина, О.Г. Лебедев

У статті був виконаний аналіз систем цифрового радіомовлення, які в даний час знайшли широке застосування. Досліджено методи цифрової модуляції, які використовуються в розглянутих системах. Проведено порівняння енергетичної і спектральної ефективності методів цифрової модуляції. В процесі математичного моделювання виконана оцінка необхідної енергії для передачі інформації з однаковою ймовірністю бітової помилки для кожного виду модуляції. Обґрунтована доцільність використання різних методів модуляції для певних систем цифрового радіомовлення.

**Ключові слова:** цифрове радіомовлення, цифрова модуляція, радіочастотний спектр, енергетична ефективність, спектральна ефективність, ймовірність помилки, смуга пропускання фільтра.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF DIGITAL MODULATION IN DIGITAL BROADCASTING STANDARDS

K.A. Shelkovina, O.G. Lebedev

This article gives an analysis of digital broadcasting systems, which are currently found wide using. Investigated digital modulation techniques that are used in these systems. A comparison of the energy and spectral efficiency of digital modulation. In the process of mathematical modeling of estimated energy required for the transmission of information with the same probability of bit error for each type of modulation. Substantiated expediency of using different modulation techniques for certain digital broadcast systems.

**Keywords:** digital broadcasting, digital modulation, frequency spectrum, energy efficiency, spectral efficiency, the probability of error, the filter bandwidth.