

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИСКАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА КАЧЕСТВО СИГНАЛА ЭФИРНОЙ ЦИФРОВОЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ DVB

### Введение

Используемые в современных цифровых системах связи сигналы, как правило, имеют сложную структуру. Временная и спектральная форма представления сложных сигналов не позволяет оценить качество сформированного модулированного сигнала, определить степень изменения параметров сигнала, возникающих при прохождении РЧ тракта. Выявить такие изменения позволяет векторный анализ сигналов (Vector Signal Analysis, VSA). Векторный анализ позволяет использовать новые, более точные показатели качества связи (EVM и др.).

Величина векторной ошибки (error vector magnitude, EVM) является мерой различия между идеальным модулированным сигналом и реально переданным сигналом. Измерение EVM позволяет обнаружить различные нарушения в работе передатчика, в том числе просачивание несущей, IQ несоответствия, нелинейность, фазовый шум гетеродина и отклонение частоты от номинальной [1]. Требования к EVM уже является частью большинства стандартов беспроводной связи, таких как IEEE802.11a-1999 стандарт [2] и IEEE802.16e-2005 WiMAX стандарт [3].

Цель работы: проанализировать влияние искажающих факторов на модулированный сигнал и их воздействие на модуль вектора ошибки.

Для достижения указанной цели в статье решается следующая задача:

- Теоретический анализ влияния искажений на EVM
- Анализ влияния помех и искажений на EVM с помощью системы компьютерного моделирования MATLAB2014b.

### 1. Теоретический анализ влияния искажений на EVM

Максимальный объем передаваемой информации достигается при одновременном изменении амплитуды и фазы сигнала. Однако сгенерировать или декодировать такой сигнал непосредственно (с помощью амплитудного и фазового модуляторов) сложно. С этой целью на практике используется квадратурный модулятор, а сигнал задается в полярных координатах, образованных парой ортогональных векторов напряжений: синфазного с несущим колебанием I и сдвинутого на  $90^\circ$  Q. Такое представление позволяет рассматривать любую точку в полярных координатах в виде набора координат напряжений (I, Q), либо в виде вектора, определяемого амплитудой и фазой. Соответственно, реализованная и описанная таким образом модуляция называется векторной, а полярные координаты – диаграммой состояний. При этом погрешность векторной модуляции определяется отличием реальной траектории или положения точки, соответствующей заданной модуляции от идеальной. Для цифровой векторной модуляции наиболее распространенной величиной, описывающей погрешность модуляции, является модуль вектора ошибки EVM и ошибка модуляции MER.

На рис. 1 изображена иллюстрация сигнала ошибки с помощью векторной диаграммы, на которой показаны два вектора – опорный вектор,  $R(k)$ , и реальный измеренный вектор,  $Z(k)$ , который соответствует траектории принятого символа.

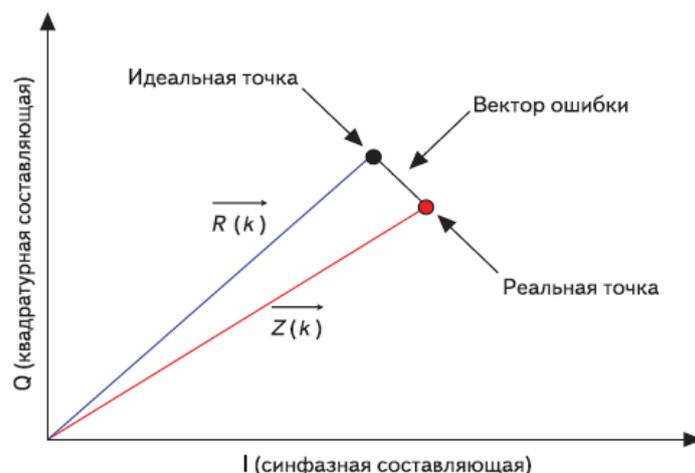


Рис. 1

Опорный вектор определяет координаты идеальной траектории символа при отсутствии ошибок. Разность между опорным вектором и вектором реально измеренного символа называется вектором ошибки. Модуль вектора ошибки представляет собой евклидово расстояние между координатами идеального и реально измеренного символов. В общем случае EVM усредняется по ансамблю траекторий символов и описывается выражением

$$EVM = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M |Z(k) - R(k)|^2}{\sum_{k=1}^M |R(k)|^2}}.$$

Таким образом, параметр EVM является мерой отношения вектора ошибки к опорному вектору. В совершенной системе, в которой отсутствуют шумы и нелинейности, способные внести искажения в сигнал, измеренный и опорный векторы совпадают и EVM равен нулю. Измерения модуля вектора ошибки проводят по пиковому

$$EVM_{peak} = \sqrt{\frac{e_k}{P_{max}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

и среднему значению

$$EVM_{RMS} = \sqrt{\frac{e_k}{P_{avg}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $e_k = (I_k - I_k)^2 + (Q_k - Q_k)^2$ ;  $I_k$  – идеальная синфазная составляющая измерения  $k$ -го символа;  $I_k$  — полученная синфазная составляющая измерения  $k$ -го символа;  $Q_k$  – полученная квадратурная составляющая измерения  $k$ -го символа;  $Q_k$  – идеальная квадратурная составляющая измерения  $k$ -го символа;  $P_{avg}$  – значение средней мощности созвездия;  $P_{max}$  – значение пиковой мощности созвездия.

Ошибка модуляции MER – это ошибка, характеризующая, отклонение реального символа от местоположения символа идеального на векторной диаграмме. Величина MER соответствует размеру кластера (скопления) вокруг заданных точек на точечной диаграмме. Большое значение MER будет указывать на меньший размер кластеров. Параметр MER представляет собой отношение средней мощности энергии передаваемого сигнала к средней мощности ошибки.

MER вычисляется по формуле

$$MER = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{\sum_{n=1}^N (I_k^2 + Q_k^2)}{\sum_{n=1}^N [e_k]} \right), \quad (3)$$

это величина, обратная EVM и выраженная в децибелах. В плане информативности MER для цифрового сигнала схож с отношением сигнал/шум для аналогового. При увеличении MER до величины, при которой точки попадают на границы ячейки или за них, BER резко возрастает. Далее, когда BER превысит способность FEC корректировать ошибки, произойдет сбой передачи.

## 2. Анализ влияния помех и искажений на EVM с помощью системы компьютерного моделирования MATLAB2014b

Результаты расчета значений EVM в зависимости от отношения сигнал/шум на примере сигнала стандарта DVB-T2 с модуляцией 8-PSK и скоростью кодирования 3/5 приведены в таблице.

Отношение сигнал/шум	EVM			
	RMS, %	RMS, dB	Peak, %	Peak, dB
5	35,065	-9,103	36,335	-8,793
10	23,399	-12,616	32,382	-9,794
20	13,926	-17,261	17,261	-15,259
30	2,459	-32,185	3,112	-30,14
40	1	-40	1,27	-37,922
50	0,279	-51,097	0,379	-48,42
60	0,197	-54	0,253	-51,949

Наиболее эффективным инструментом для поиска причин ухудшения и сбоев сигнала является звездная (конstellационная) диаграмма. Она дает представление о характере отклонения символов от расчетной позиции и, соответственно, о причинах этого отклонения.

Для обнаружения различных нарушений в работе передатчика непосредственно по изображению звездных диаграмм сигнала, в данной работе предлагается использовать программный продукт ImageJ – программу, предназначенную для анализа и обработки изображений. Звездная диаграмма стабильного (уровень 55 дБмкВ) сигнала (рис. 2, а) и обработанное изображение диаграммы в программе ImageJ, плагин Plot, уровень Gray Value – 98 усл. ед. (рис. 2, б) представлены на рис. 2.

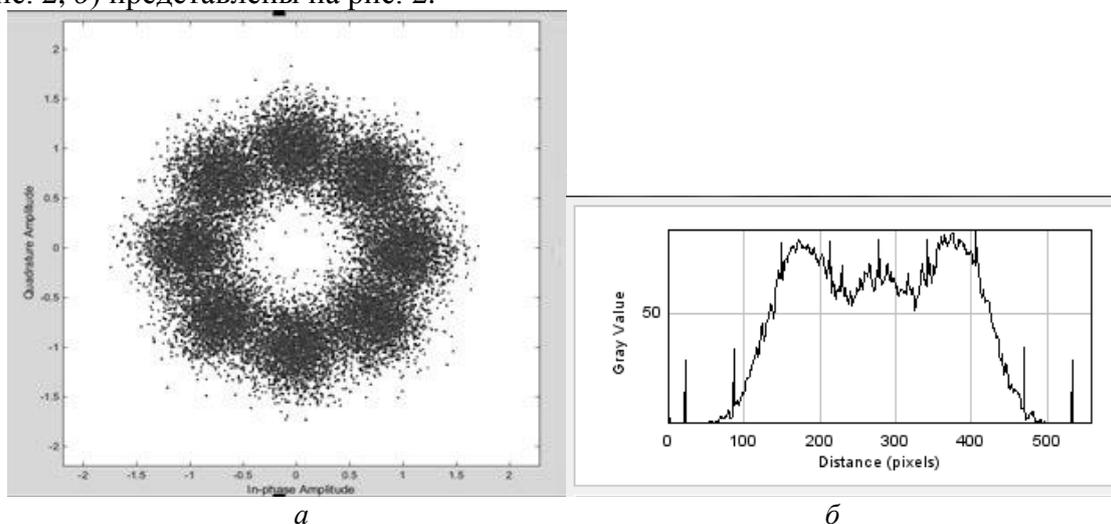


Рис. 2

В идеальном случае точки ложатся точно в середины клеток. В условиях воздействия шума точки получают некоторое смещение от ожидаемого положения (вектор ошибки). Если точка остается в пределах своей клетки, демодулятор принимает правильное решение, в противном случае символу присваивается значение соседней клетки, что приводит к появлению ошибки во входном потоке данных.

Конstellационная диаграмма сигнала с модуляцией 64-QAM и обработанное изображение диаграммы в программе ImageJ (плагин Plot) в идеальном случае, при отсутствии помех, приведена на рис. 3. На обработанном изображении диаграммы в программе ImageJ импульсы принимают треугольную форму, передние и задние фронты импульсов имеют равномерный характер без изрезанностей и всплесков. Средняя длительность импульса  $t_{cp} = 0.3625$  усл.ед.

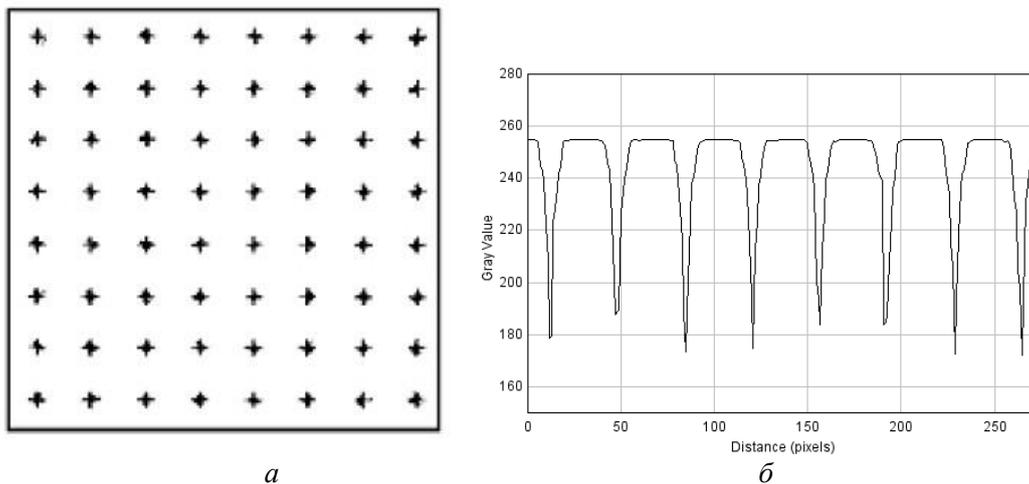


Рис. 3

Приведем типичные примеры искажений формы символов под воздействием разных факторов для сигнала с модуляцией 64-QAM.

Звездная диаграмма сигнала с низким отношением сигнал/шум и обработанное изображение диаграммы в программе ImageJ (плагин Plot) приведены на рис. 4. Добавление белого шума к входному сигналу приводит к «размазыванию» точки в пятно круглой формы. Наибольшая частота попадания точки – в центре клетки, к краю окружности она уменьшается. В этом случае все пятна имеют примерно одинаковый диаметр. При низком отношении сигнал/шум дальнейшая деградация сигнала приведет к полной потере картинки. Расплывчатый образ точки занимает практически всю ячейку.

На обработанном изображении диаграммы в программе ImageJ импульсы имеют треугольную форму, на передних и задних фронтах практически отсутствуют изрезанности и всплески. Средняя длительность импульса  $t_{cp} = 0.525$  усл.ед.

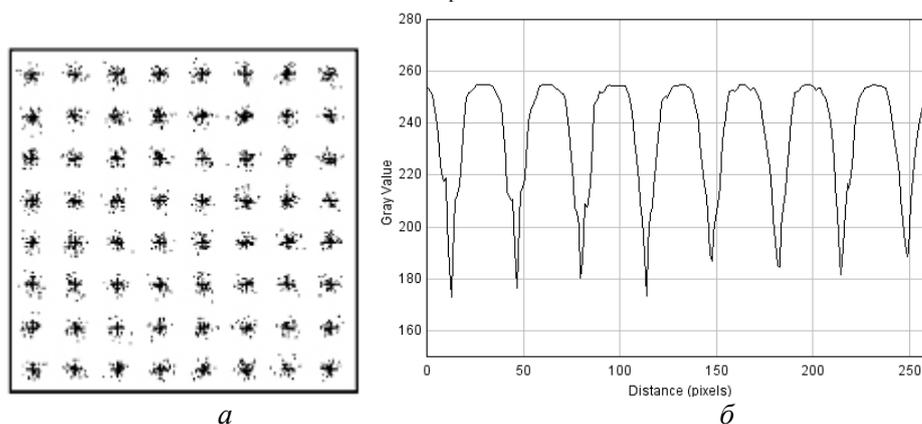


Рис. 4

По причине когерентного шума в каждой ячейке образуются концентрические картинки (рис. 5). Возникает интермодуляционная картина («шумы ингрессии»). На обработанном изображении диаграммы в программе ImageJ возникают импульсы треугольной формы, на передних и задних фронтах возникают изрезанности и всплески различной амплитуды. Средняя длительность импульса  $t_{cp} = 0.6125$  усл.ед.

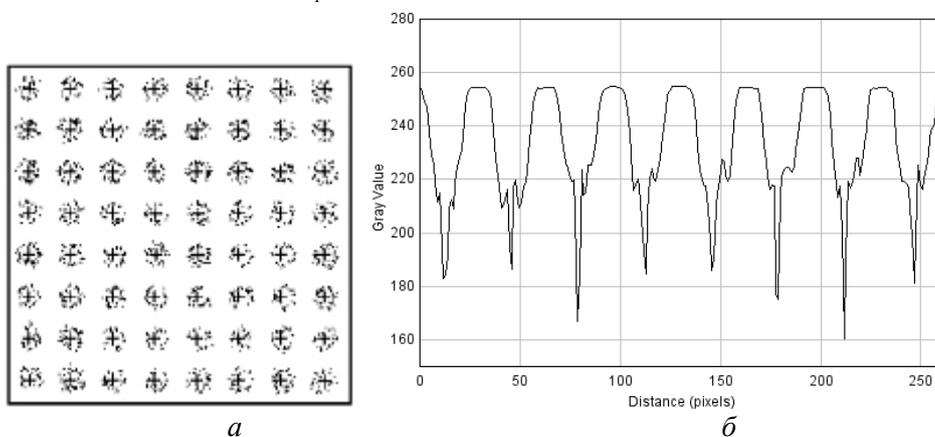


Рис. 5

Фазовый сдвиг возникает из-за остаточных радиочастотных помех, которые обычно являются проблемой головного оборудования. Точки в ячейках искажены таким образом что возникает визуальный эффект сферической симметрии относительно центра диаграммы (рис. 6). В результате вероятность возникновения ошибки при декодировании точек в углах констелляционной диаграммы резко увеличивается. Обработанное изображение диаграммы в программе ImageJ характеризуется импульсами с треугольной формой, в начале возрастания и спада импульсов возникают изрезанности и всплески малой амплитуды. Средняя длительность импульса  $t_{cp} = 0.4625$  усл.ед.

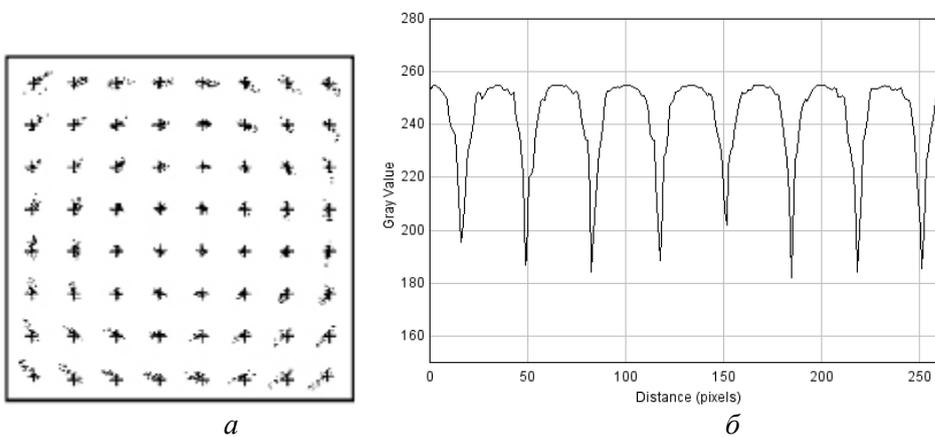


Рис. 6

Нелинейность амплитудной характеристики вызвана нелинейностью промежуточных и высокочастотных усилителей, фильтров, конвертеров и эквалайзеров (рис. 7). Точки сдвинуты относительно центра ячейки по осям I и Q пропорционально расстоянию ячейки от центра диаграммы. На обработанном изображении диаграммы импульсы принимают треугольную форму, при этом имеют разный характер вершины, от равномерного до изрезанного. Присутствуют всплески на фронтах импульсов. Средняя длительность импульса  $t_{cp} = 0.625$  усл.ед.

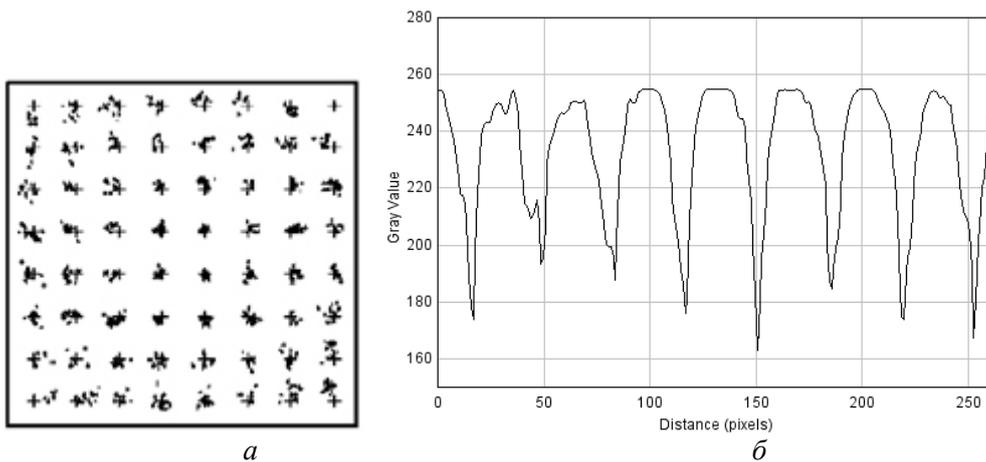


Рис. 7

IQ нестабильность связана с проблемами усилителей несущей частоты, фильтров и цифровых модуляторов головных станций (рис. 8). На обработанном изображении диаграммы в программе ImageJ возникают импульсы треугольной формы, на фронтах импульсов отсутствуют изрезанности и всплески. Средняя длительность импульса  $t_{cp} = 0.425$  усл.ед.

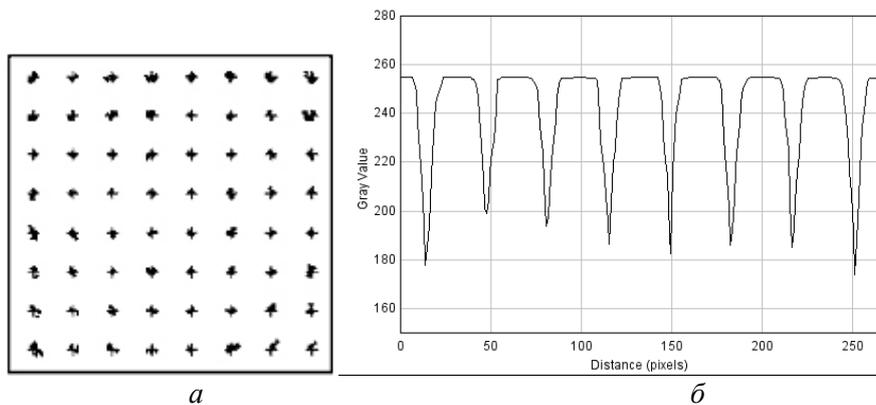


Рис. 8

Уход несущей является следствием дисбаланса в смесителе модулятора или наличия паразитного постоянного тока в системе передачи (рис. 9). Вся картинка сдвигается в одном направлении. На обработанном изображении импульсы принимают треугольную форму, всплески на фронтах импульсов отсутствуют. Средняя длительность импульса  $t_{cp} = 0.3875$  усл.ед.

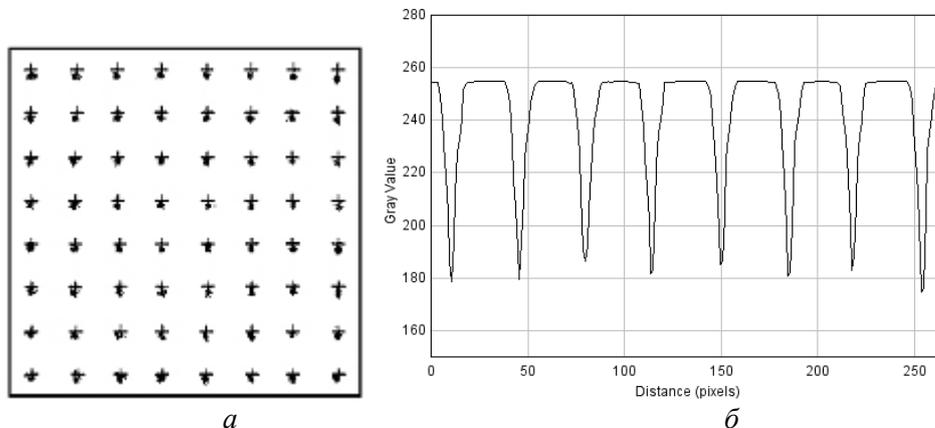


Рис. 9

## Заключение

Внешний вид значащих точек в ячейках констелляционной диаграммы позволяет визуально определить качество сигнала и может дать ключевую информацию о природе помехи при передаче телевизионного сигнала. В данной работе для анализа влияния искажающих факторов на качество сигнала эфирной цифровой телевизионной системы DVB предлагается использовать программный продукт ImageJ и проводить оценку искажающих факторов по обработанному изображению звездной диаграммы.

По результатам исследований сделали вывод, что определить наличие помех и неисправностей различного рода возможно по обработанному изображению звездной диаграммы в программе ImageJ. Было установлено, если средняя длительность импульса превышает допустимый порог  $t_{cp} = 0.525$  усл. ед., то число ошибок вектора велико, изображение не декодируется. Распределение интенсивности векторов модуляции становится более пологим, декодирование сигнала будет проходить с многочисленными ошибками.

Метод анализа EVM позволяет оценить качество цифрового радиопередатчика эфирной цифровой телевизионной системы DVB. Кроме того, при правильном применении измерение EVM позволяют идентифицировать вид искажений и изменения параметров сигнала, следовательно, анализ EVM представляет собой удобный инструмент для оптимизации сигнального тракта и предсказания динамических характеристик системы.

**Список литературы:** 1. *Садомовский, А. С.* Приемо-передающие радиоустройства и системы связи. Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 243 с. 2. *Феер, К.* Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра ; пер. с англ. ; под ред. В. И. Журавлева. – М. : Радио и связь, 2000. – 520 с. 3. *Волков, Л.Н., Немировский, М.С., Шинаков, Ю.С.* Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики : учеб. пособие. – М. : Эко-Трендз, 2005. – 392 с.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 11.07.2015*