

20. Kureychik V.V., Polupanova E.E. Evolyutsionnaya optimizatsiya na osnove algoritma kolonii pchel [Evolutionary optimization based on the bee colony algorithm], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 12 (101), pp. 41-46.
21. Pham D.T., Castellani M. The Bees Algorithm – Modelling Foraging Behaviour to Solve Continuous Optimization Problems, *Proc. ImechE, Part C*, 2009, 223 (12), pp. 2919-2938.
22. Weiss M.A. Data Structures and Algorithm Analysis in C++. Boston: Pearson Education, 2014, 656 p.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

Курейчик Владимир Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: vkur@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой.

Халенков Александр Юрьевич – e-mail: van-de-cristo@yandex.ru; тел.: +79289652190; кафедра САПР.

Kureichik Vladimir Victorovich – Southern Federal University; e-mail: vkur@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the Department of Computer Aided Design; dr. of eng. sc.; professor; head of department.

Khalenkov Alexander Jurevich – e-mail: van-de-cristo@yandex.ru; phone: +79289652190; the Department of Computer Aided Design.

УДК 621.397.13

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-107-117

С.Н. Мелешкин, И.Б. Силес

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ С ПОВОРОТОМ СИГНАЛЬНОГО СОЗВЕЗДИЯ В СТАНДАРТЕ DTMB НА БАЗЕ SIMULINK МОДЕЛИ В СРЕДЕ MATLAB

Рассматриваются модифицированные алгоритмы с поворотом сигнального созвездия примененные в стандарте цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания принятом на Кубе. По сравнению с использованием созвездий без поворота, эти алгоритмы дают значительное увеличение производительности системы в сложных условиях приема, с промышленными помехами и низким соотношением сигнала к шуму. В данной работе проведен анализ влияния угла и направления поворота сигнального созвездия на устойчивость системы цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания. Основной целью данной работы является анализ влияния угла и направления поворота сигнального созвездия на устойчивость системы цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания. Для исследования была разработана собственная архитектура системы цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания, принятая на Кубе, реализованная в Simulink в среде Matlab. Указанная Simulink модель позволяет проводить анализ зависимости коэффициента битовых ошибок от значения белого гауссовского шума для различных конфигураций системы. В исследованиях широко применяется модель аддитивного белого гауссовского шума, который подмешивается к сформированному сигналу. Предложенные модификации позволяют вести прием цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания в каналах без замираний при равных значениях коэффициента битовых ошибок для всех анализируемых случаев. При этом, для получения существенного выигрыша от поворота созвездия, порядка семи децибел, квадратурные и синфазные компоненты предлагается передавать на разных поднесущих и в разные моменты времени. В схеме с поворотом сигнального созвездия, квадратурную компоненту нужно передавать не на той же самой поднесущей, а с задержкой и на другой поднесущей. Тогда из одной квадратурной амплитудной модуляции получается фактически две амплитудные двоичные модуляции в синфазной и квадратурной проекции, которые передаются на независимых поднесущих, и поражаются помехами по-разному, что обеспечивает надежность демодуляции при более низких значениях соотношения сигнала к шуму и воздействию промышленных помех. Недостатком алгоритма является недостаточное противодействие зашумлению гауссовским шумом.

Цифровое наземное телевизионное мультимедийное вещание; Matlab; Simulink; сигнальные созвездия; аддитивный белый гауссовский шум; коэффициент битовых ошибок; модуляция; кодирование.

S.N. Meleshkin, I.B. Siles

**STUDY OF MODIFIED ALGORITHMS WITH SIGNAL CONSTELLATION
ROTATION IN DTMB STANDARD ON THE BASIS OF SIMULINK MODEL
IN MATLAB ENVIRONMENT**

This paper discusses modified algorithms with signal constellation rotation applied in the digital terrestrial television multimedia broadcasting standard adopted in Cuba. Compared to using constellations without rotation, these algorithms give a significant increase in system performance under challenging reception conditions, with industrial interference and low signal-to-noise ratio. This paper analyzes the effect of the angle and direction of rotation of the signal constellation on the stability of the digital terrestrial television multimedia broadcasting system. The main purpose of this paper is to analyze the effect of the angle and direction of rotation of the signal constellation on the stability of the digital terrestrial television multimedia broadcasting system. For the study, a proprietary architecture of digital terrestrial television multimedia broadcasting system adopted in Cuba was developed, implemented in Simulink in Matlab environment. This Simulink model allows analyzing the dependence of the bit error rate on the value of white Gaussian noise for different system configurations. The model of additive white Gaussian noise, which is mixed with the generated signal, is widely used in the research. The proposed modifications allow the reception of digital terrestrial television multimedia broadcasting in fade-free channels with equal values of the bit error rate for all cases analyzed. In this case, in order to obtain a significant gain from constellation rotation, in the order of seven decibels, it is proposed to transmit the quadrature and in-phase components on different subcarriers and at different moments of time. In the scheme with signal constellation rotation, the quadrature component should be transmitted not on the same subcarrier, but with a delay and on a different subcarrier. Then from one quadrature amplitude modulation is actually two amplitude binary modulation in-phase and quadrature projection, which are transmitted on independent subcarriers, and affected by interference differently, which provides reliable demodulation at lower values of the signal-to-noise ratio and the impact of industrial noise. A disadvantage of the algorithm is that it does not sufficiently counteract Gaussian noise.

Digital terrestrial television multimedia broadcasting; Matlab; Simulink; signal constellations; additive white Gaussian noise; bit error rate; modulation; coding.

Введение. Преимущества цифрового телевидения перед традиционным аналоговым можно суммировать следующим образом [1–3]:

1. Более высокая частотная эффективность.
 2. Меньшее пороговое соотношение сигнал/шум.
 3. Лучшая защита от помех и замираний.
 4. Устойчивость к многолучевому приему и доплеровскому сдвигу.
 5. Отсутствие шумов на изображении.
 6. Мультиплексный метод передачи данных.
- Недостатки стандартов цифрового телевидения, использующих OFDM.
1. Большая задержка сигнала, обусловленная алгоритмами ЦОС.
 2. Высокие значения пик-фактора (PAPR).

Цифровые стандарты телевизионного вещания были приняты Международным союзом электросвязи (МСЭ) и коммерчески реализованы во многих странах и регионах мира. У этих стандартов уже появились новые версии; DVB-T предшествовал DVB-T2, DTMB предшествовал DTMB-A. В некоторых случаях наблюдается несовместимость с предыдущими версиями.

I. Постановка решаемой задачи. Стандарт DTMB основан на стандарте GB20600-2006 «Структура кадра, кодирование канала и модуляция для систем цифрового наземного телевидения» поддерживает скорость передачи данных полезной нагрузки от 4,813 Мбит/с до 32,486 Мбит/с. [5]. Этот стандарт поддерживает несколько коэффициентов FEC (0,4, 0,6, 0,8), чередование, тип несущей (мультинесущая и однонесущая), модуляцию (4QAM NR, 4QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM) и OFDM-заголовков (PN420, PN595, PN945) [1]. Тем не менее стандарт DTMB проигрывает стандарту DVB-T2 по требуемому соотношению сигнал/шум около 7 дБ, а также хуже противостоит промышленным помехам и имеет меньшую устойчивость сигнала в каналах с временными и частотно-селективными замираниями. В стандарте

DVB-T2 выигрыш достигается за счет использования вращающихся созвездий, в которых каждая I и Q компонента содержит достаточную информацию о передаваемом символе, в то время как I и Q каналы не являются независимыми друг от друга. Была поставлена задача создать модифицированные алгоритмы с поворотом сигнального созвездия, для применения в стандарте цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания, принятом на Кубе, для увеличения производительности системы в сложных условиях приема. Для проведения исследований была разработана собственная архитектура системы цифрового наземного телевизионного мультимедийного вещания, принятая на Кубе, реализованная в Simulink в среде Matlab. Ряд исследований показывает, что при использовании техники BICM-ID-SSD (системы кодовой модуляции с чередованием битов с итеративной демодуляцией и пространственным разнесением сигналов) [8], показанной на рис. 1, производительность системы в нескольких каналах с замираниями может быть существенно улучшена.

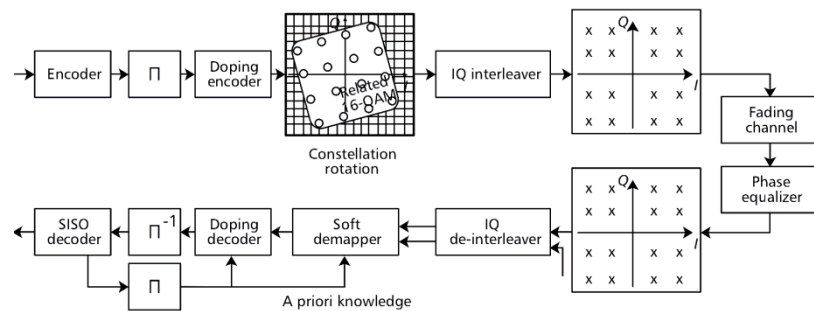


Рис. 1. Функциональная схема метода BICM-ID-SSD

Методика поворота созвездия, первоначально предложенная в [9] была широко изучена в литературе [10, 11]. В [9, 12, 13] она используется в каналах с глубокими частотными замираниями как метод улучшения порядка разнесения схем BICM (Кодированная модуляция с чередованием битов). На сайте [14–16] представлены исследования по применению этой техники в усовершенствованных кодерах с прямой коррекцией ошибок (FEC), таких как коды с низкой плотностью проверок на четность (LDPC). Как показано в [10], этот метод разнесения направлен на достижение избыточности информационных битов кодированной модуляции для улучшения характеристик приемника. Работы [17] основаны на поиске угла поворота, отличного от угла, определенного стандартом DVB T2. В [18] говорится о значении CR в одночастотных, многочастотных сетях и при включении методов агрегации каналов.

Известно, что для обнаружения обычного созвездия QAM (Квадратурная амплитудная модуляция) приемнику необходимы квадратурная (Q) и синфазная (I) составляющие каждой из принятых точек, чтобы определить, какая информация была передана. Это утверждение подтверждается тем, что оценка Q-компоненты не дает никакой информации о I-компоненте и наоборот; следовательно, обе компоненты, распространяющиеся по каналу на одной и той же несущей, испытывают одинаковые замирания.

Техника CR применяет вращение в комплексной плоскости к исходному созвездию, так что компоненты Q и I имеют достаточно информации, чтобы оценить, какой символ был передан.

CR не дает заметного улучшения, если I и Q несут одинаковые потери в затухающем канале, для преодоления этой трудности можно использовать так называемую Q-задержку. [18]. После вращения между компонентами I и Q выполняется процесс чередования, чтобы передать их на разных поднесущих и в разные моменты времени. На рис. 2 показан внешний вид оригинального созвездия (синие точки) и созвездия CR (красные точки). Показаны два примера: созвездие 16-QAM (а и b) и созвездие 64-QAM (с и d). Для CR число проекций на каждую ось равно M, в то время как если не используется обычный

m-QAM, число проекций равно $\sqrt{M}$. Поскольку DVB-T2 использует кодирование Грея, I и Q компоненты обычного созвездия могут быть отображены как два независимых М-РАМ (*M-арная импульсная амплитудная модуляция*), [19]. На рис. 1 показано, что при использовании RC, получаются два связанных М-РАМ.

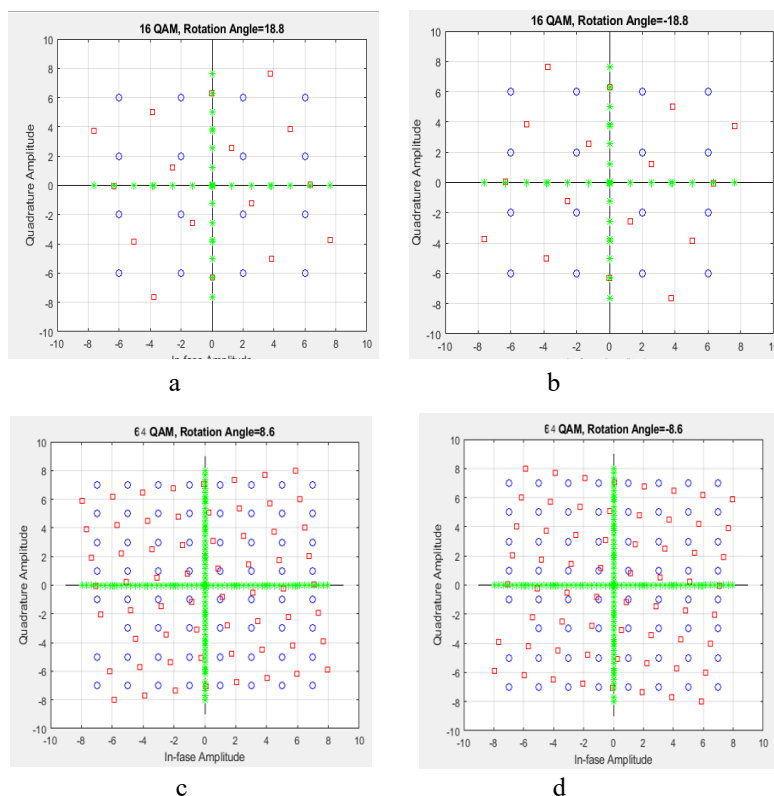


Рис. 2. Классическое и повернутое созвездие для 16-QAM (a, b) и 64-QAM (c, d)

II. Модель системы. Общая блок-схема сквозной системы DTMB показана на рис. 3. В настоящем исследовании преследуются две основные цели:

1. Представить полученные результаты с теоретическими значениями, рекомендованными в [5] для каждого из анализируемых MODCOD.
2. Сравнить со значениями, которые могут быть предложены для того же MODCOD с учетом включения вращающихся созвездий.

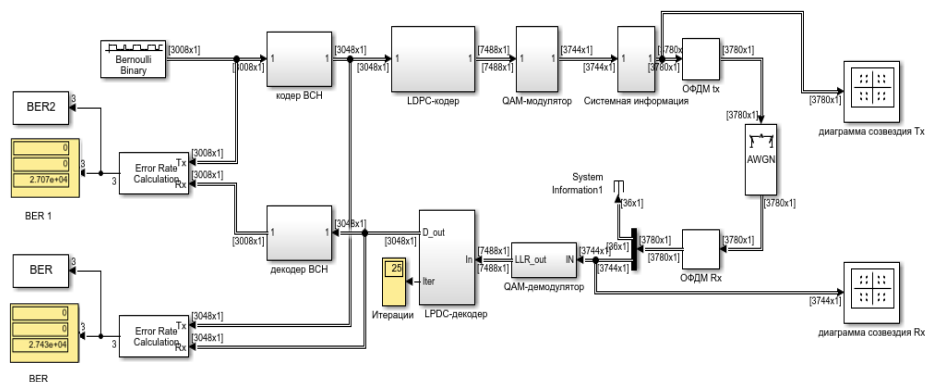


Рис. 3. Общая архитектура системы DTMB, реализованная в Matlab/Simulink

Интересно получить модель стандарта в Matlab Simulink, учитывая, что версии Matlab доступны исключительно с моделями типа (DVB-S.2 и DVB-T). Аналогичные работы по изучению стандартов в Simulink можно найти в литературе, например. [20, 21]. Кроме того, необходимо проследить за поведением этого стандарта в новых эволюционных моделях DTT в связи с анализом поведения SNR для различных конфигураций. Модель гауссовского шума (AWGN) широко применяется в исследованиях [17, 19, 22], поскольку она отличается низкой вычислительной сложностью и при этом достаточно точна для форматов модуляции с высокой кардинальностью.

AWGN – это просто шум, который влияет на передаваемый сигнал при прохождении через канал, когда он не связан с замираниями. Канал AWGN представлен:

$$r(t) = n(t) + s(t), \quad (1)$$

где $n(t)$ – AWGN, а $s(t)$ – передаваемый сигнал. Значения AWGN в любой момент времени идентично распределены и статистически независимы друг от друга. BER зависит от метода модуляции, SNR и скорости передачи данных.

Согласно [20] математически, M-QAM может быть записана как представлено в (2):

$$s_{kl}(t) = A_k \cos(2\pi f_c t + \theta_l), \quad (2)$$

где $k=1, 2, \dots, M_1$, $l=1, 2, \dots, M_2$,

где A_k – амплитуда сигнала, θ_l фаза сигнала, M_1 – число возможных амплитуд несущей, M_2 – число возможных фаз несущей, и f_c частота несущей. Комбинированная амплитудная и фазовая модуляция позволяет одновременно передавать $M_1 M_2$ битов на символ. Для двух цифровых сигналов (M-QAM), которые передаются путем изменения амплитуд двух несущих волн, коэффициент битовых ошибок определяется как:

$$BER = \frac{2}{m} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{m}}\right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{2mEb}{2(M-1)N}} \right) \sin \frac{\pi}{m}. \quad (3)$$

Для случая повернутых созвездий углы поворота принимаются равными углам, полученным по уравнению (4) и представленным в табл. 1. Однако в [19] представлены некоторые углы, которые являются более оптимальными.

$$\phi = \arctan(1/M^{1/2}) \quad (4)$$

$$\phi[\text{radianes}] = \arctan(1/M^{1/2}) * \pi/180. \quad (5)$$

Таблица 1

Углы поворота в стандарте DVB-T2

Углы/модуляции QAM	4QAM	16-QAM	64-QAM
Угол (градусы)	29.0	16.8	8.6
Угол (радианы)	0.506	0.293	0.150

III. Результаты моделирования. В данном исследовании моделирование включает в себя основные блоки обработки стандарта DTMB. Моделирование выполнено с использованием модели Simulink в Matlab. В основе моделирования лежит реализованная в Matlab симуляция DTMB с переменными параметрами (MODCOD: x-QAM, FEC).

На вход симуляции подается последовательность двоичного генератора случайных чисел с распределением Бернулли длиной 188 байт, которая эмулирует 188 байт транспортного потока (TS) после рассеивания энергии.

Первым шагом, независимо от проектирования равномерного созвездия или RC, является получение целевого значения SNR-target, для которого будет производиться проектирование.

Все моделирования были выполнены для порога $BER=10^{-3}$ и кодовых соотношений, предлагаемых стандартом DTMB для трех комбинаций FEC (0,4/0,6/0,8) в соответствии с [5].

На рис. 4 приведены значения SNR, полученные для определенных FEC (0,4, 0,6 и 0,8) и модуляций 4, 16 и 64 QAM, всего для этого эксперимента использовано 9 MODCOD. Мы выполнили распределение белого шума Гаусса для сигнала DTMB, генерируемого OFDM в различных методах MODCOM, чтобы показать представление вероятности битовой ошибки как функции отношения с/ш в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Значения MODCOD для различных режимов работы DTMB

Модулятор/демодулятор	m-QAM / FEC	Модулятор/демодулятор	m-QAM / FEC
MODCOD 1	4QAM / 0,4 FEC	MODCOD 6	16QAM/0,8
MODCOD 2	4 QAM / 0,6	MODCOD 7	64QAM/0,4
MODCOD 3	4QAM/0,8	MODCOD 8	64QAM/0,6
MODCOD 4	16 QAM /0,4	MODCOD 9	64QAM/0,8
MODCOD 5	16QAM /0,6		

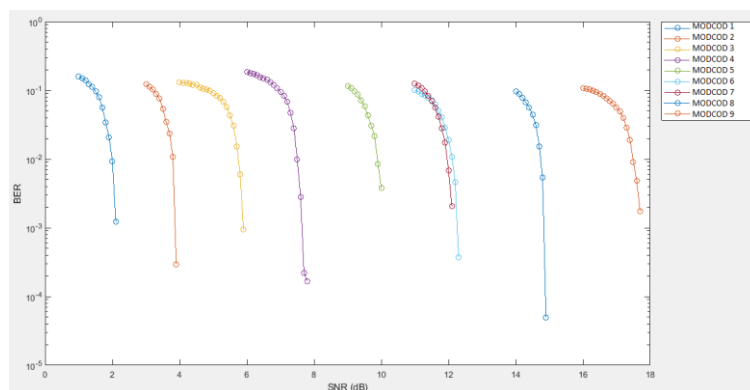
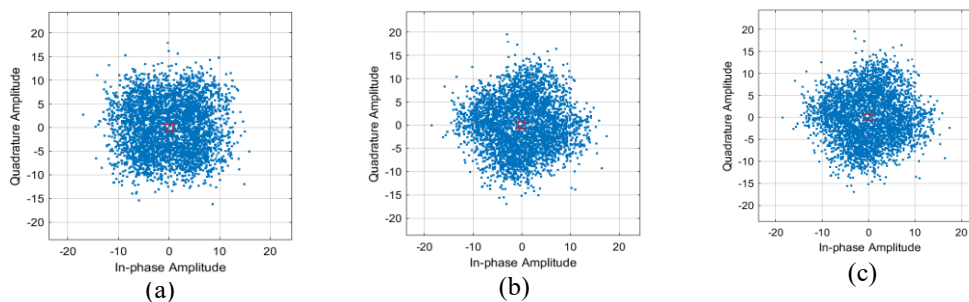


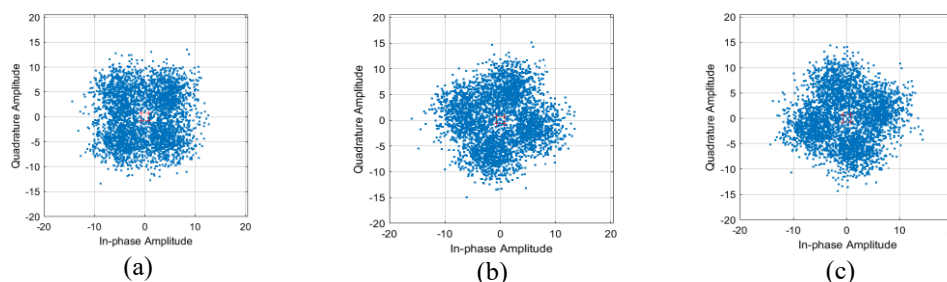
Рис. 4. Зависимость BER от SNR для различных MODCOD стандарта DTMB

С учетом чередования модуляций представлены результаты для различных MODCOD для получения SNR_{min} и BER_{max} . Для моделирования в 2 секунды варьируется значение (SNR) и получаются диаграммы созвездий, рис. 5.

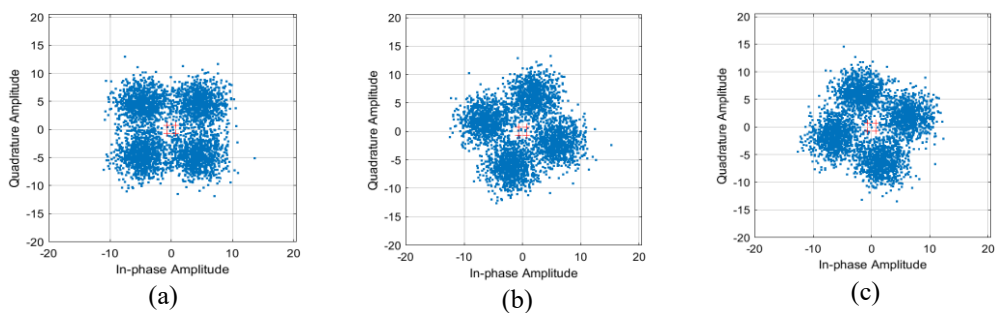
MODCOD (4QAM и FEC 0,4), SNR=2,3 дБ, расстояние = 9
Фаза = 0 рад (а), фаза = 0,506 рад (б), фаза = - 0,506 рад (с)



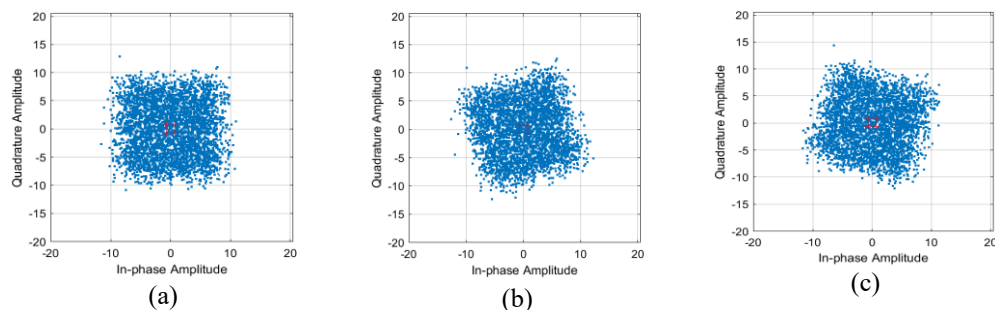
MODCOD (4QAM и FEC 0,6), SNR=4,3 дБ, расстояние = 9
Фаза = 0 рад (а), фаза = 0,506 рад, (б) фаза = - 0,506 рад (с)



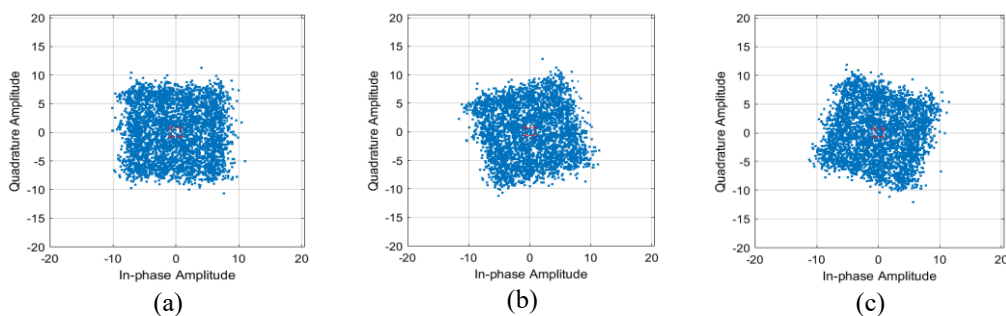
MODCOD (4QAM и FEC 0,8), SNR = 6,2 дБ, расстояние = 9
Фаза = 0 рад (a), фаза = 0,506 рад (b), фаза = - 0,506 рад (c)



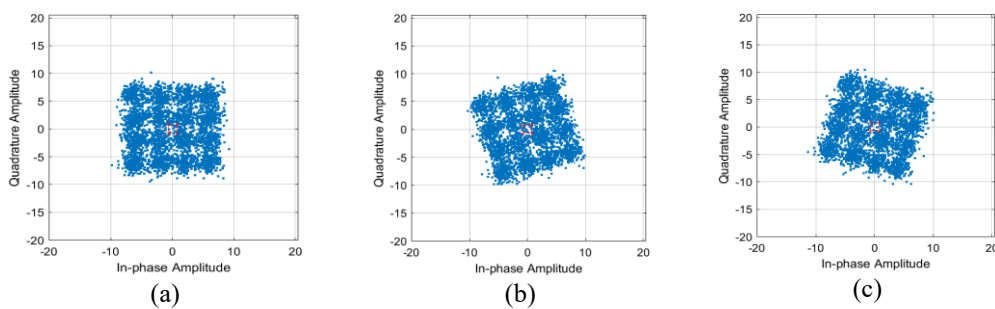
MODCOD (16QAM и FEC 0,4), SNR = 8 дБ, расстояние = 4
Фаза = 0 рад (a), фаза = 0,293 рад (b), фаза = - 0,293 рад (c)



MODCOD (16QAM и FEC 0,6), SNR=10,3 дБ, расстояние = 4
Фаза = 0 рад (a), фаза = 0,293 рад (b), фаза = - 0,293 рад (c)

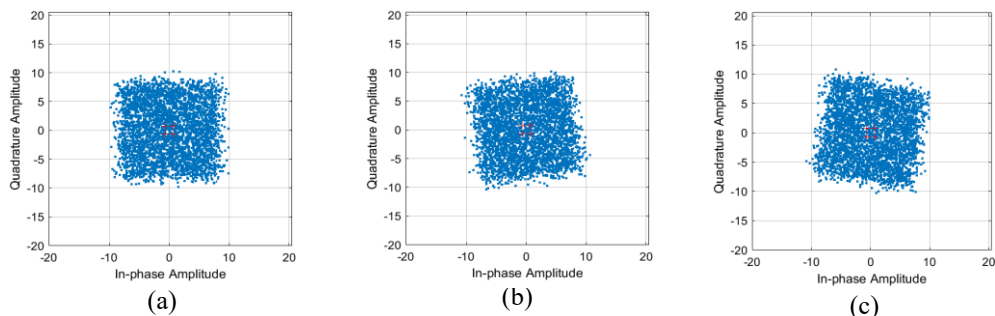


MODCOD (16QAM и FEC 0,8), SNR=12.5 дБ, расстояние = 4
Фаза = 0 рад (a), фаза = 0,293 рад (b), фаза = - 0,293 рад (c)



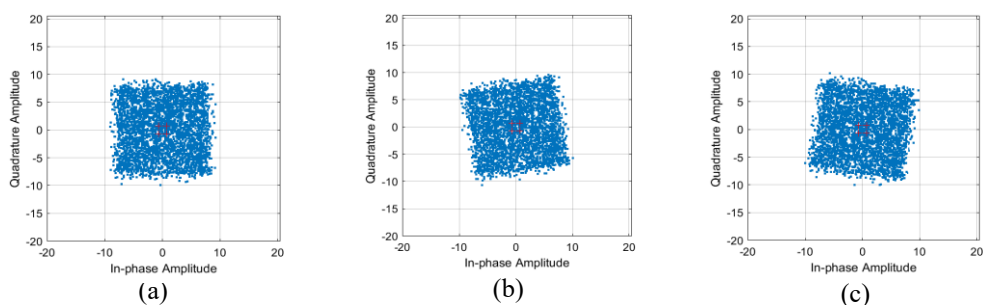
MODCOD (64QAM и FEC 0,4), SNR=12,5 дБ, расстояние = 2

Фаза = 0 рад (а), фаза = 0,150 рад (б), фаза = -0,150 рад (с)



MODCOD (64QAM и FEC 0,6), SNR= 15,2 дБ

Фаза = 0 рад (а), фаза = 0,150 рад (б), фаза = -0,150 рад (с)



MODCOD (64QAM и FEC 0,8), SNR=18 дБ

Фаза = 0 рад (а), фаза = 0,150 рад (б), фаза = -0,150 рад (с)

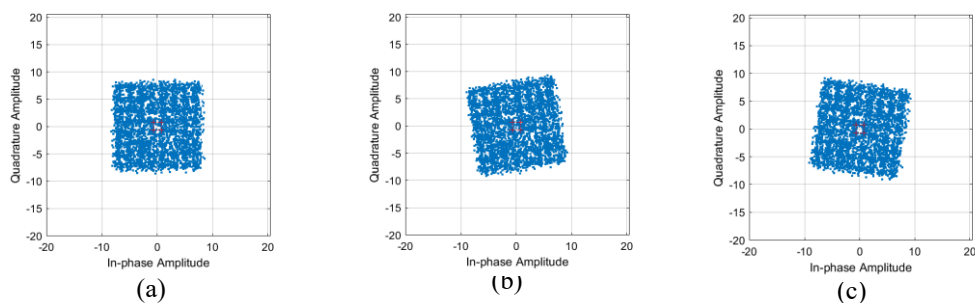


Рис. 5. Представление созвездий для различных MODCOD и SNR-target

Согласно полученным результатам, использование RC не дает существенного выигрыша в SNR для стандарта DTMB для SNR-target ни в одном из используемых созвездий, независимо от их скорости кодирования.

Установлено, что использование вращающегося созвездия в DTMB не дает ни потерь, ни выигрышей в производительности при гауссовском шуме в канале.

Результаты, представленные на рис. 6, подтверждают, что, хотя BER на уровне 10^{-3} не был достигнут, получены очень близкие значения SNR. Однако, для получения существенного выигрыша от поворота созвездия, порядка 7 дБ, компоненты I и Q нужно передавать на разных поднесущих и в разные моменты времени. При ротированной схеме Q-компонент нужно передавать не на той же самой поднесущей (ячейке), а с задержкой и на другой поднесущей в другой ячейке (рис. 6. и 7). Тогда из одной QAM получается

фактически две ASK-модуляции (Amplitude Shift Keying) в I и Q-направлениях, которые передаются на независимых поднесущих, и поражаются помехами по-разному, что обеспечивает надежность демодуляции при более низких значениях SNR [6].

Кроме того, в табл. 3 приведены результаты для значений BER, полученных для SNR-target, и для значений целевого SNR, уменьшенных от 1 до 3 дБ. Понятно, что, например, для MODCOD 3 с SNR-target = 6,2 дБ, расчеты были выполнены для значений между 3,3 и 6,3 дБ для различных вероятностей битовых ошибок.



Рис. 6. Сопоставление, поворот и задержка Q

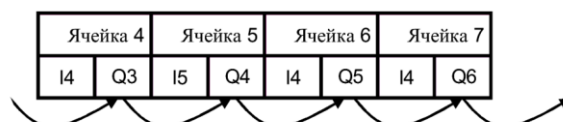


Рис. 7. Циклическая задержка Q между соседними ячейками

Таблица 3

Представление результатов моделирования системы DTMB в условиях AWGN с CR и без CR для 4QAM, 16 QAM и 64 QAM

Модулятор/ Демодулятор	SNR- target	BER для (SNR-target)	BER для (SNR-target- 1dB)	BER для (SNR-target- 2dB)	BER для (SNR-target- 3dB)
MODCOC 1	2.3	0.01441	0.1084	0.2247	0.261
		10^{-3}	0.1084	0.2247	0.261
MODCOC 2	4.3	10^{-3}	0.1015	0.176	0.2254
			0.1217	0.2182	0.2586
MODCOC 3	6.2	10^{-3}	0.04422	0.115	0.1599
			0.04555	0.114	0.1504
MODCOC 4	8	10^{-3}	0.1021	0.1922	0.2447
			0.1048	0.1905	0.2503
MODCOC 5	10.3	10^{-3}	0.08378	0.1676	0.2136
			0.08341	0.1672	0.2152
MODCOC 6	12.5	10^{-3}	0.0668	0.1211	0.142
			0.1177	0.1365	0.1559
MODCOC 7	12.5	10^{-3}	0.1310	0.1734	0.2193
			0.101	0.1718	0.2217
MODCOC 8	5.2	10^{-3}	0.8929	0.1543	0.1927
			0.0942	0.1572	0.1867
MODCOC 9	18	10^{-3}	0.07548	0.114	0.1308
			0.07746	0.119	0.1316

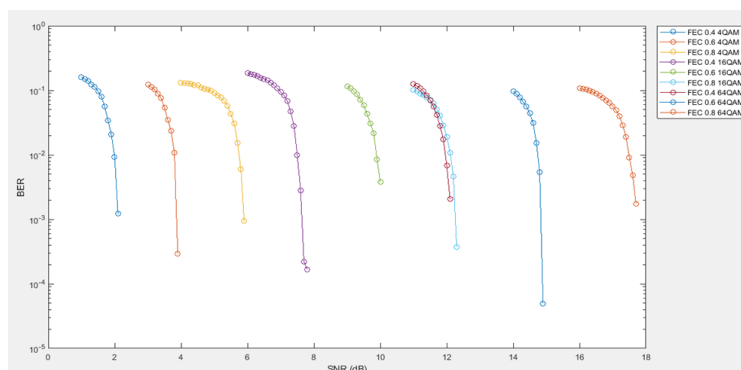


Рис. 8. Зависимость BER от SNR для различных MODCOD стандарта DTMB после включения вращающихся созвездий

В табл. 3, для каждого из определенных MODCOD значения, полученные для положительных фаз, показаны в верхней строке, а для отрицательных – в нижней. Для MODCOD 1 значения BER для фазы и противофазы равны. В ряде случаев положительные фазы работают лучше, чем отрицательные. Значения BER, полученные для MODCOD 3, 6 и 9, лучше, чем для 1, 4 и 7, и это является функцией использования более избыточного FEC; это не относится к MODCOD 6 с отрицательной фазой.

Закключение. В результате проведенных экспериментов, и теоретических изысканий было установлено, что угол, полученный при моделировании для RC, совпадает с углом, который приводит к выравниванию проекций на оси. В моделировании было реализовано использование техники пространственного разнесения сигнала в стандарте DTMB. Показаны результаты для 9 конфигураций MODCOD, повернутых на шесть различных углов. Предложенные модификации позволяют принимать сигнал DTMB в каналах без замираний при равных значениях BER для всех анализируемых случаев. Также, для получения существенного выигрыша от поворота созвездия, порядка 7 Дб, компоненты I и Q предложено передавать на разных поднесущих и в разные моменты времени. Таким образом при схеме с поворотом сигнального созвездия, Q-компоненту предложено передавать не на той же самой поднесущей, а с задержкой и на другой поднесущей. Тогда из одной QAM фактически получается две ASK-модуляции в I и Q-проекции, которые передаются на независимых поднесущих, и поэтому поражаются помехами по-разному. Это обеспечивает надежность демодуляции при более низких значениях SNR и воздействии промышленных помех.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ITU-R, Handbook on Digital Terrestrial Television Broadcasting Networks and Systems Implementation, 2016.
2. Song J., Yang Z., and Wang J., Eds. Digital Terrestrial Television Broadcasting: Technology and System. Hoboken, NJ, 2015.
3. OECD, Digital Terrestrial Television Broadcasting in the VHF/UHF Bands: DTTB Handbook. Paris. 2013. Available at: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/pub-800c9499-en>.
4. ETSI EN 300 744, European Standard, 2008, 9. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300700_300799/300744/01.06.01_40/en_300744v010601o.pdf.
5. Chinese standards GB 20600-2006. Available at: <https://www.chinesestandard.net/Related.aspx/GB20600-2006>.
6. Walter Fischer. Digital Video and Audio Broadcasting Technology A Practical Engineering Guide. Third Ed. Springer Heidelberg Dordrecht London New York. 2010, 828 p.
7. ETSI EN 302 755, European Standard, 2012, 4. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302700_302799/302755/01.03.01_60/en_302755v010301p.pdf.
8. Dai L., Wang Z., and Yang Z. Next-generation digital television terrestrial broadcasting systems: Key technologies and research trends, *IEEE Commun. Mag.*, Jun. 2012, Vol. 50, No. 6, pp. 150-158. DOI: 10.1109/MCOM.2012.6211500.

9. Chindapol A. and Ritcey J.A. Design, analysis, and performance evaluation for BICM-ID with square QAM constellations in Rayleigh fading channels, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, May 2001, Vol. 19, No. 5, pp. 944-957. DOI: 10.1109/49.924878.
10. Gozalvez D., Gimenez J.J., Gomez-Barquero D., and Cardona N. Rotated Constellations for Improved Time and Frequency Diversity in DVB-NGH, *IEEE Transactions on Broadcasting*, Jun. 2013. DOI: 10.1109/TBC.2013.2252862.
11. Boutros J. and Viterbo E. Rotated multidimensional QAM constellations for Rayleigh fading channels, 2017, 9. Available at: <https://engit.monash.edu/profiles/wp-content/uploads/2017/09/itw96.pdf>.
12. Improving BICM Efficiency for DVB-T2 System using Rotated Constellations and Cyclic Q Delay, TRKU-08-02-2021-11416, Vol. 63, No. 02.
13. Suwansukho N. and Promwong S. Evaluation of Rotated Constellation in DVB-T2 Based on Measurement Data, in *2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, Luang Prabang, Laos: IEEE, Jul. 2019, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICEAST.2019.8802572.
14. Sun J., Liu H., and Ma X. Transmitting Extra Bits by Rotating Signal Constellations. Aug. 28, 2020. DOI: 10.48550/arxiv.2008.10818.
15. Honfoga A.C., Dossou M., and Moeyaert V. Low complexity demapping algorithms survey in DVB-T2: Rotated constellation case study, 2022, Vol. 6, No. 1.
16. Polak L. and Kratochvil T. Comparison of the non-rotated and rotated constellations used in DVB-T2 standard, *Proceedings of 22nd International Conference Radioelektronika. 2012, Apr. 2012*, pp. 1-4. Accessed: Dec. 18, 2023. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6207641>.
17. Regis C.D.M., Ferreira Mota M., Fernandes Lopes R., and Sampaio de Alencar M. Performance Analysis of a 64-QAM Rotated Constellation Subject to Rice Fading, in *SIMPOSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAC, 'OES, 2012*.
18. Planning aspects of DVB-T2 - EBU TECH3348 - May 2011.pdf. Dec. 17, 2023. Available at: https://tech.ebu.ch/docs/news/2012_01/wrcdocs/Planning%20aspects%20of%20DVB-T2%20-%20EBU%20TECH3348%20-%20May%202011.pdf.
19. Agani D., Honfoga A.-C., and Sotindjo P. Optimal M-QAM rotated constellation angle in DVB-T2, *2022 5th International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet)*, Marrakech, Morocco: IEEE, Dec. 2022, pp. 1-6. DOI: 10.1109/CommNet56067.2022.9993827.
20. Youssef T. and Abdelfattah E. Performance evaluation of different QAM techniques using Matlab/Simulink, *2013 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT)*, Farmingdale, NY, USA: IEEE, May 2013, pp. 1-5. DOI: 10.1109/LISAT.2013.6578237.
21. Sadinov S.M. Simulation study of M-ARY QAM modulation techniques using Matlab/Simulink, *2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, Opatija, Croatia: IEEE, May 2017, pp. 547-554. DOI: 10.23919/MIPRO.2017.7973486.
22. Shah S.M., Riyaz R., Wani T.M., Ashraf A., and Naz S.F. Optimal rotation angle for finite constellation over additive white Gaussian noise multiple access wiretap channel, *IET Commun.*, 2020, Vol. 14, No. 21, pp. 3845-3852. DOI: 10.1049/iet-com.2019.0244.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Кравченко.

Мелешкин Сергей Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: snmeleshkin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79287797415; кафедра встраиваемых и радиоприемных систем; к.т.н.; доцент.

Силес Ирина Бенигновна – Центральный университет Лас-Вильяс Марта Абреу; e-mail: irinass@uclv.edu.cu; г. Санта-Клара, Вилла-Клара, Куба; тел.: +5342281178; кафедра телекоммуникационных технологий; аспирант.

Meleshkin Sergey Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: snmeleshkin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79287797415; the Department of Embedded and Radio Receiving systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Siles Irina Benignovna – Central University of Las Villas Marta Abreu; e-mail: irinass@uclv.edu.cu; Santa Clara, Villa Clara, Cuba; phone: +5342281178; the Department of Telecommunication Technologies; graduate student.