

Раздел I. Связь, навигация и радиолокация

УДК 681.1

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-6-18

В.П. Федосов, Д.С. Джамил, С.В. Кучерявенко

ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ В КАНАЛЕ 3D WIMAX НА ОСНОВЕ SISO-OFDM И MIMO-OFDM

Рассматривается инфраструктура беспроводной мобильной связи с использованием Advanced-WiMAX. Проведен сравнительный анализ пропускной способности мобильных систем для 3D SISO на основе 3D MIMO-модели канала для крупного массива городской застройки. В настоящее время существует заинтересованность в исследовании MIMO и SISO обработки данных при проектировании мобильных систем для работы в трехмерной модели с учетом азимута, так как оценка плоскости высоты для производительности MIMO и SISO систем в 3D-модели канала не требуется. Моделирование битового уровня выполняется для канала в WiMAX, работающего на частоте 2,5 ГГц. Результаты указывают на точность модели 3D-канала, также показана оценка производительности системы 3D-канала. Прогнозируемая высокая пропускная способность для 3D-канала получена при небольших изменениях в параметрах SISO-обработки и низким параметрам пространственной корреляции для случая MIMO. Были проанализировано поведение системы при различных скоростях передвижения мобильных пользователей, эффект сдвига Доплера, несколько путей распространения и затухание сигнала на расстоянии и с увеличением частоты. Измеряется время проведения моделирования при многосекционной модуляции для систем SISO и MIMO. Выявлено отрицательное влияние на помехозащищенность увеличение количества пространственных потоков. Выявлено влияние на помехозащищенность увеличение количества антенн на передатчиках и приемниках.

Система «один вход – один выход» (Single Input Single Output – SISO); система «множественный вход – множественный выход» (Multiple Input – Multiple Output – MIMO); вероятность битовых ошибок (Bit Error Rate – BER); мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM); совместимость для микроволнового доступа (Worldwide Interoperability for Microwave Access – WiMAX); многопутность.

V.P. Fedosov, J.S. Jameel, S.V. Kucheryavenko

TRANSMITTING DATA IN 3D WIMAX CHANNEL BASED ON SISO-OFDM AND MIMO-OFDM

This paper considers infrastructure to wireless mobile communications using Advanced-WiMAX. In this paper, the productivity performance throughput experienced the mobile users is compared in the cases of 3D SISO and 3D MIMO-channel models within a large urban cell. Recently, there has been substantial work and interest to expand MIMO and SISO-processing by taking into consideration in the design the elevation plane in addition to the azimuth dimension, Since the evaluation of elevation MIMO and SISO performance in 3D-channel design is needed. Bit-level simulation is performed for the channel in WiMAX operating at 2.5 GHz. The results indicate the accuracy of the 3D channel model, and the correct estimation of the 3D channel is showed. The difference in higher predicted capacity for the 3D channel model has resulted in the small-scale parameters for the SISO-case and the lower spatial correlation parameters for the MIMO-case. Different mobility speeds, the effect of the Doppler shift, several paths and the signal attenuation at a distance and with increasing frequency has been carried out in this study. Simula-

tion runtimes are measured concerning the multi-section modulation types for both systems SISO and MIMO. Noise immunity is adversely affected by an increase in the number of spatial streams. The noise immunity is also affected by the increase in the number of antennas at the transmitters and receivers.

Single Input Single Output (SISO); Multiple Input; Multiple Output (MIMO); Bit Error Rate (BER); Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); WiMAX; multipath.

Введение. В беспроводной связи информация может передаваться из одной точки в другую без каких-либо проводных или электрических каналов [1]. Быстрое увеличение числа мобильных пользователей в настоящее время приводит к возникновению общей для человечества проблемы: как можно увеличить скорость передачи данных пользователей [2, 3]. В последние годы мобильной связи уделяется большое внимание из-за растущей потребности в новых приложениях [4]. Мобильные каналы демонстрируют действительно сложные характеристики распространения, такие как высокое затухание, чрезвычайно быстрое замирание из-за скрытых узлов, что приводит к большим потерям пакетов и большим доплеровским разбросам. Повышение пропускной способности и эффективности такой связи представляет значительный интерес как для сообщества исследователей беспроводных сетей, для пользователей и производителей систем мобильной связи [5].

В настоящее время существуют различные группы стандартизации, работающие над определением стандартов для беспроводных приложений: WAVE – беспроводной доступ в автомобильной среде (стандарт IEEE 1609), DSRC – выделенная связь на короткие расстояния (IEEE 802.11p) и Wi-Fi – беспроводная точка доступа (стандарт IEEE 802.11n) – это некоторые из технологий среднего радиуса действия в пределах сотни метров, в которых имеются проблемы в передаче данных в условиях вне прямой видимости распространения [6, 7]. Для развития этого диапазона можно использовать сотовые технологии, такие как WiMAX. WiMAX направлен на сокращение задержек, повышение гибкости спектра, быстрое развертывание и снижение затрат для операторов и конечных пользователей [6, 8]. WiMAX устойчив к мобильным каналам с высоким доплеровским замиранием благодаря своей усовершенствованной схеме оценки 2D-канала на основе пилот-сигнала во временной и частотной области [9].

В развертываниях макросоты для систем 3GPP WiMAX базовая станция (BS) использует массив антенн с кросс-поляризацией, которые линейно разделены по азимуту. Однако типичные антенны BS обычно не состоят из небольшого количества азимутальных антенн [10]. Однако они представляют собой комбинацию многих логических антенных элементов в вертикальном направлении для каждой антенны с логическим азимутом. В последнее время проявился значительный интерес к расширению усиления множественного входа-множественного выхода (MIMO) из азимутального направления в направлении возвышения, поскольку исследования трехмерной природы сотовой среды распространения показали, что существует потенциально важный угловой разброс по высоте на соте базовой станции [11, 12].

Чтобы точно оценить производительность методов MIMO в WiMAX, выполняется трехмерная модель канала, которая точно учитывает углы возвышения лучей. Реализованная модель канала 3D WiMAX проверена и хорошо согласуется со статистикой трассировщика лучей [6, 11]. Предположение о двумерном распространении не работает, когда в некоторых средах имеется значительный разброс в распределении углов места. В таких случаях оценка пропускной способности канала и производительности на уровне системы может привести к неточным результатам. Измеренные трехмерные диаграммы направленности антенн BS (базовой станции) и UE (пользовательского оборудования) макросоты используются при моделировании канала связи [6].

Моделирование 3D-беспроводного канала. Для точной оценки производительности систем MIMO в WiMAX разработана трехмерная модель канала, учитывающая углы возвышения лучей. Статистика, связанная с высотами, используется для расширения программной реализации существующих моделей каналов 3D WiMAX. Каналы связи между AP (точками доступа) и UE создаются с использованием общей схемы каналов 3GPP / WiMAX [13, 14]. Схема канала WiMAX – это стохастическая модель, которая требует двух уровней случайности для моделирования различных каналов AP-UE. Первые LSP (крупномасштабные параметры), такие как затухание в тени, коэффициент пропорциональности задержки, потери на трассе и угловой разброс, выбираются случайным образом из табличных функций распределения. Затем SSP (мелкомасштабные параметры), такие как направления прибытия и отправления, выбираются случайным образом в соответствии с табличными функциями распределения, мощностями кластеров, задержками кластеров. Третий уровень случайности также необходим для генерации нескольких реализаций каждого отдельного звена путем выбора различных фаз для разбросов [6]. В трехмерной модели канала реализовано распространение в плоскости азимута и возвышения на основе предсказаний от точки к точке от каждой точки доступа к каждому местоположению UE для каждой конкретной городской ячейки, что позволяет получить более надежную оценку пропускной способности канала и пространственной корреляции. и оценить производительность на системном уровне [6, 11].

Модели распространения каналов показаны на рис. 1 и 2. На рис. 1 анализируются пути распространения между мобильной и базовой станцией в плоскости XZ, где показаны отражения от здания и земли, а также показан прямой путь распространения сигнала. Рис. 2 показывает геометрическую модель в плоскости XY, которая учитывает отражения сигналов от здания и наземных объектов. В работе рассматривается многопутное распространение волн от зданий и от поверхности земли. Модель рассматривает систему связи большого радиуса действия и характеризуется наличием прямого пути LoS (прямой видимости) или отсутствием NLoS (отсутствие прямой видимости).

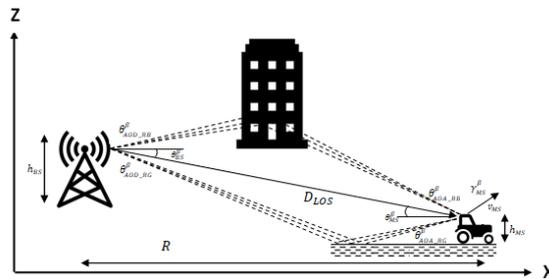


Рис. 1. Модель распространения канала в плоскости XZ

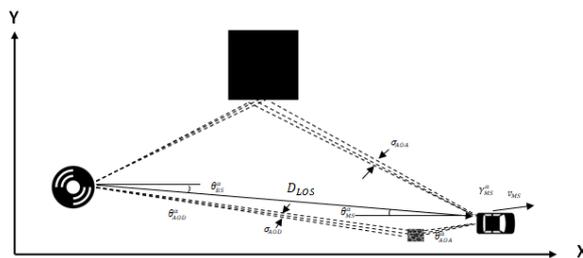


Рис. 2. Модель распространения канала в плоскости XY

Расположение передающей BS (базовой станции) и приемной MS (мобильной станции) задается большим значением высот h_{BS} , h_{MS} и горизонтальным расстоянием R . Расстояние по горизонтали учитывает положение базовой и мобильной станций на плоскости. На рис. 1 и 2 прямой путь характеризуется значением D_{LOS} , углы для азимутальной плоскости задаются значениями θ_{BS}^α и θ_{MS}^α , а углы для плоскости возвышения θ_{BS}^β и θ_{MS}^β , которые рассчитываются по известному расстоянию и высоте. Приемник может двигаться относительно передатчика, и это движение описывается вектором скорости v_{MS} , направление вектора скорости задается углами γ_{MS}^α и γ_{MS}^β . Углы излучения сигнала передающей антенны θ_{AOD}^α , θ_{AOD}^β (AoD, angle-of-departure) и θ_{AOA}^α , θ_{AOA}^β углы прихода на приемник (AoA, angle-of-arrival), характеризуются случайным значением, которое задается как смещение относительно основного пути. Разброс подпутьей относительно основного пути характеризуется значениями σ_{AOD} и σ_{AOA} , и для простоты считаются одинаковыми в обеих плоскостях.

В результате импульсная характеристика многопутного канала может быть описана следующим выражением [15]

$$h(t, \tau) = \sum_{n=1}^N a_n(t) \delta(\tau - \tau_n(t)), \quad (1)$$

где $a_n(t)$ – изменяющаяся во времени амплитуда n -го пути, $\tau_n(t)$ – изменяющаяся во времени задержка распространения сигнала для n -го пути, N – количество путей.

Для рассматриваемого 3D канала WiMAX импульсная характеристика будет иметь вид

$$h(t, \tau) = h^{LOS}(t, \tau) + h^{RB}(t, \tau) + h^{RG}(t, \tau), \quad (2)$$

где $h^{LOS}(t, \tau)$ – компонент, описывающий прямой путь; $h^{RB}(t, \tau)$ – компонент, описывающий отражение от здания; $h^{RG}(t, \tau)$ – компонент, описывающий отражение от поверхности земли.

Компоненты формулы (1) описывают все составляющие сигналов, приходящих на прямой путь и пути отражения. Каждый компонент, помимо прямого пути, содержит n отраженных сигналов. Количество отраженных сигналов зависит от расстояния и количества зданий городской ячейки между приемником и передатчиком. Ситуация усложняется, если мобильная станция начинает двигаться относительно базовой станции. Это приводит к добавлению доплеровского сдвига частоты к компонентам многолучевого распространения.

Математическое представление прямого пути записывается как высота прямой видимости $h_{s,u,n}^{RB}(t, \tau)$ [16, 17]

$$\begin{aligned} h_{s,u}^{LOS}(t, \tau) = & \sqrt{\frac{K}{K+1}} \cdot \sqrt{G_{BS}(\theta_{BS}^\alpha, \theta_{BS}^\beta)} \cdot \sqrt{G_{MS}(\theta_{MS}^\alpha, \theta_{MS}^\beta)} \cdot L_S(D_{LOS}) \cdot L_A(D_{LOS}) \cdot \\ & \delta(\tau - \tau_{LOS}) \exp(jkd_{BS}^1 \sin(\theta_{BS}^\alpha)) \exp(jkd_{BS}^2 \sin(\theta_{BS}^\beta)) \times \\ & \exp(jkd_{MS}^1 \sin(\theta_{MS}^\alpha)) \exp(jkd_{MS}^2 \sin(\theta_{MS}^\beta)) \times \\ & \exp(jK[v_{BS} \cos(\theta_{BS}^\alpha - \gamma_{BS}^\alpha) \cos(\theta_{BS}^\beta - \gamma_{BS}^\beta) + \\ & v_{MS} \cos(\theta_{MS}^\alpha - \gamma_{MS}^\alpha) \cos(\theta_{MS}^\beta - \gamma_{MS}^\beta)]t), \end{aligned} \quad (3)$$

где K – коэффициент Райса; s – количество антенных элементов базовой станции; u – количество антенных элементов мобильной станции; d_{BS}^1 – расстояние между элементами антенн базовой станции в горизонтальной плоскости; d_{BS}^2 – расстояние между элементами антенн базовой станции в вертикальной плоскости; d_{MS}^1 – рас-

стояние между элементами мобильной станции мобильной станции в горизонтальной плоскости; d_{MS}^2 – расстояние между элементами мобильной станции мобильной станции в вертикальной плоскости; $L_s(D)$ – потери при распространении волны [18]; $G_{BS}(\theta^\alpha, \theta^\beta)$ – коэффициент усиления передающей антенны в направлении отражателей; $G_{MS}(\theta_{MS}^\alpha, \theta_{MS}^\beta)$ – коэффициент усиления приемной антенны мобильной станции.

Компоненты, описывающие отражение от зданий и поверхности земли, могут быть представлены как [19, 20] $h^{RB}(t, \tau)$ – компонент, описывающий отражение от здания:

$$h_{s,u,n}^{RB}(t, \tau) = \sqrt{\frac{1}{K+1}} \cdot L_s(D_n) \cdot \frac{1}{\sqrt{M}} \cdot \sum_{m=1}^M \sqrt{\frac{G_{BS}(\theta_{AOD_{RB,n,m}}^\alpha, \theta_{AOD_{RB,n,m}}^\beta)}{G_{MS}(\theta_{AOA_{RB,n,m}}^\alpha, \theta_{AOA_{RB,n,m}}^\beta)}} \times \\ \xi_{n,m} \varphi_{n,m} \exp(jkd_{BS}^1 \sin(\theta_{AOD_{RB,n,m}}^\alpha)) \exp(jkd_{BS}^2 \sin(\theta_{AOD_{RB,n,m}}^\beta)) \times \\ \exp(jkd_{MS}^1 \sin(\theta_{AOA_{RB,n,m}}^\alpha)) \exp(jkd_{MS}^2 \sin(\theta_{AOA_{RB,n,m}}^\beta)) \times \\ \exp(jK[v_{BS} \cos(\theta_{AOD_{RB,n,m}}^\alpha - \gamma_{BS}^\alpha) \cos(\theta_{AOD_{RB,n,m}}^\beta - \gamma_{BS}^\beta) + \\ v_{MS} \cos(\theta_{AOA_{RB,n,m}}^\alpha - \gamma_{MS}^\alpha) \cos(\theta_{AOA_{RB,n,m}}^\beta - \gamma_{MS}^\beta)]t), \quad (4)$$

$h^{RG}(t, \tau)$ – компонент, описывающий отражение от поверхности земли:

$$h_{s,u,n}^{RG}(t, \tau) = \sqrt{\frac{1}{K+1}} \cdot L_s(D_n) \cdot \frac{1}{\sqrt{M}} \cdot \sum_{m=1}^M \sqrt{\frac{G_{BS}(\theta_{AOD_{RG,n,m}}^\alpha, \theta_{AOD_{RG,n,m}}^\beta)}{G_{MS}(\theta_{AOA_{RG,n,m}}^\alpha, \theta_{AOA_{RG,n,m}}^\beta)}} \times \\ \xi_{n,m} \varphi_{n,m} \exp(jkd_{BS}^1 \sin(\theta_{AOD_{RG,n,m}}^\alpha)) \exp(jkd_{BS}^2 \sin(\theta_{AOD_{RG,n,m}}^\beta)) \times \\ \exp(jkd_{MS}^1 \sin(\theta_{AOA_{RG,n,m}}^\alpha)) \exp(jkd_{MS}^2 \sin(\theta_{AOA_{RG,n,m}}^\beta)) \times \\ \exp(jK[v_{BS} \cos(\theta_{AOD_{RG,n,m}}^\alpha - \gamma_{BS}^\alpha) \cos(\theta_{AOD_{RG,n,m}}^\beta - \gamma_{BS}^\beta) + \\ v_{MS} \cos(\theta_{AOA_{RG,n,m}}^\alpha - \gamma_{MS}^\alpha) \cos(\theta_{AOA_{RG,n,m}}^\beta - \gamma_{MS}^\beta)]t). \quad (5)$$

где $\xi_{n,m}$ – амплитуда сигнала от макроотражателей, $\varphi_{n,m}$ – фаза сигнала от макроотражателей.

Поскольку в модели местоположение локальных объектов назначается случайным образом между передатчиком и приемником, время распространения сигнала рассчитывается на основе сгенерированного местоположения базовой станции, мобильной станции и абонентов со случайными координатами.

Результаты моделирования. Для каждой пары передающей и приемной антенн выбрана несущая частота 2,5 ГГц и полоса пропускания 20 МГц, что обеспечивает умеренное затухание сигнала для выбранного диапазона беспроводной связи. Расстояние и высота расположения базовой и мобильной станций выбираются из предполагаемой работы системы связи в зоне с высотой застройки до 100 м и дальностью застроенного массива около 25 км. Предполагается, что базовая станция неподвижна и занимает фиксированное положение, в то время как мобильная станция движется с определенной постоянной скоростью. Исходные данные для моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры моделирования канала

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Несущая частота (f)	2,5 ГГц	G_{BS}	1
f_n	20 МГц	G_{MS}	1
h_{BS}	50 м	V_{BS}	0 м / с
h_{MS}	5 м.	V_{MS}	30 км / с
R	4,5 км	LoS	да
№ подпути (M)	20	Скорость (с)	$3 \cdot 10^8$ м/с
Количество BS (N_{TX})	1	d_{BS}	0 м
Количество MS (N_{RX})	1	d_{MS}	0 м
температура погоды (t)	16 ° с	σ_{AoD}	5°
Количество путей (N)	7	σ_{AoA}	35°

В модели учитываются все узлы системы SISO-OFDM. Моделирование позволяет анализировать работу отдельных узлов системы при заданных параметрах; в результате мы получаем вероятностные характеристики, которые зависят от нескольких случайных параметров для каждого эксперимента. К основным вероятностным характеристикам системы относится вероятность ошибки в битах, которая рассчитывается как отношение количества ошибочно принятых битов к общему количеству для данного отношения сигнал/помеха (SNR) [21–25].

$$BER = \frac{N_{erro}}{N_{total}}, \quad (6)$$

где N_{erro} – количество ошибочно принятых битов, N_{total} – общее количество принятых битов.

Чтобы оценить эффективность разработанных алгоритмов для системы SISO-OFDM, необходимо провести несколько экспериментов.

1. Построить вероятностные характеристики рассматриваемых систем BER для различных типов модуляции.
2. Построить вероятностные характеристик систем SISO-OFDM и MIMO-OFDM.
3. Построить зависимость BER, используя бесшумное кодирование.

При моделировании предполагается, что канал является стационарным в течение одного кадра символа OFDM, как пилотного, так и информационного (для следующего кадра вычисления повторяются). Параметры канала будут аналогичны тем, которые используются при моделировании характеристик канала (табл. 1). Параметры сигнала OFDM будут соответствовать значениям, представленным в табл. 2, в которой количество поднесущих, равное 1024, выбрано с шириной полосы сигнала 2,5 ГГц. Результирующая длительность всего кадра символов OFDM составит 0,41 мкс, а длительность циклического префикса будет выбрана равной 1/4 длительности сигнала, что позволит избежать межсимвольных помех, согласно полученной максимальной задержке сигнала в канале при моделировании.

Таблица 2

Параметры OFDM сигнала

Параметр	Значение
Общее количество поднесущих	1024
Продолжительность защитного интервала	1/4
Несущая частота	2,5 ГГц
Пропускная способность	20 МГц
Продолжительность символа OFDM	0,41 мкс
Количество пилот-сигналов	150

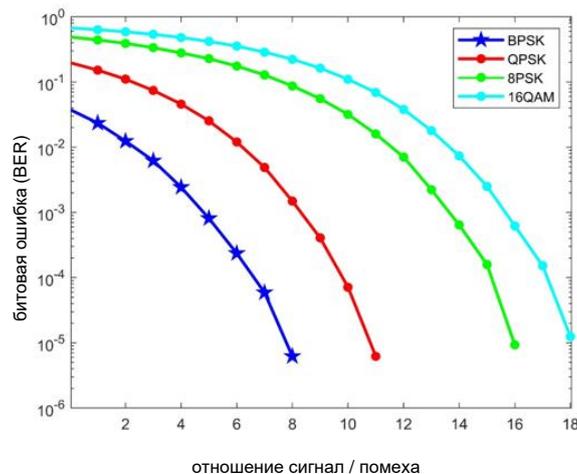


Рис. 3. Вероятность системной битовой ошибки SISO-OFDM для различных типов модуляции в зависимости от отношений сигнал/помеха в дБ

В качестве исходных данных для моделирования используются данные табл. 1 и табл. 2. Построим зависимость вероятности BER от SNR для различных типов модуляции для системы SISO-OFDM (рис. 3). Этот рисунок наглядно демонстрирует, как влияет увеличение скорости передачи на вероятность битовой ошибки в зависимости от помеховой среды и типа модуляции: с увеличением отношения сигнал/помеха наименьшую ошибку дает применение модуляции BPSK, а наибольшая ошибка BER выявляется при использовании модуляции 16QAM.

Помехозащищенность канала и типы цифровой модуляции, представленные в эксперименте, можно увидеть, если мы рассмотрим совокупность сигналов после демодуляции сигналов в приемнике. На рис. 4 и 5 показаны сигнальные созвездия принятых сигналов после демодуляции одного символа OFDM при отношении сигнал/помеха 6 дБ и 14 дБ соответственно. Из рисунков видно, что для одного и того же отношения сигнал/помеха вероятность правильного распознавания символа в созвездии увеличивается с уменьшением возможных значений длины вектора на комплексной плоскости созвездия. При отношении сигнал/помеха 6 дБ для схем модуляции BPSK и QPSK вероятность ошибки, если она не равна нулю, очень мала, в то время как для 8-PSK и 16-QAM вероятность ошибки высока, и демодуляция информации невозможна. При отношении сигнал/помеха 14 дБ для BPSK и QPSK ошибка BER близка к нулю, а для 8-PSK и 16-QAM ошибка BER значительно уменьшается, и становится возможной демодуляция принятых данных.

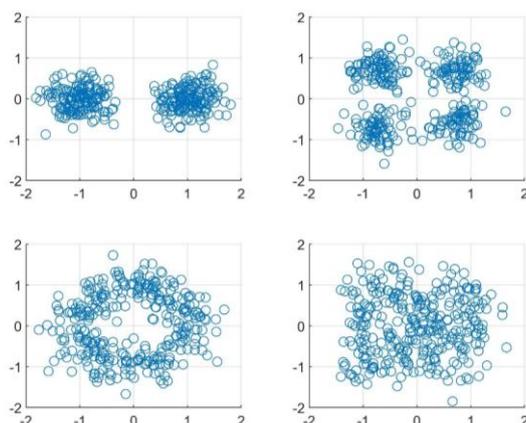


Рис. 4. Сигнальное созвездие при отношении сигнал/помеха 6 дБ

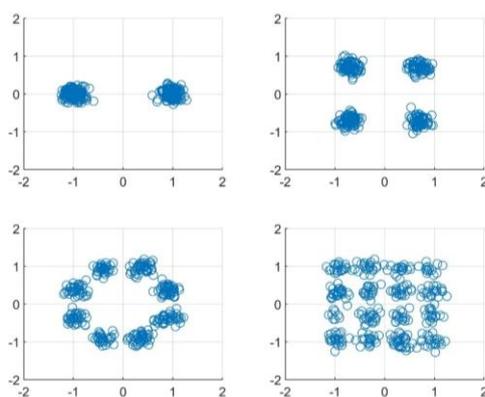


Рис. 5. Сигнальное созвездие с отношением сигнал/помеха 14 дБ

Таблица 3

Вероятность ошибки системы SISO для рассматриваемых модуляций при отношении сигнал/помеха 6 дБ и 10 дБ

Тип модуляции	BER	
	отношение сигнал/помеха 6 дБ	отношение сигнал/помеха 10 дБ
BPSK	$5,4 \cdot 10^{-4}$	0
QPSK	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-5}$
8-PSK	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$
16-QAM	$4,2 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$

В табл. 3 показано, что вероятность ошибки для BPSK и 16-QAM отличается не более чем на 3 порядка с отношением сигнал/помеха 6 дБ, а скорость передачи данных на поднесущих, использующих эти типы модуляции, отличается всего в 4 раза. Это позволяет сделать вывод о том, что система SISO-OFDM чувствительна к выбранному закону модуляции поднесущей, и увеличение скорости передачи за счет использования многосекционных типов модуляции приводит к значительному уве-

личению битовой ошибки. Для систем MIMO (два канала) ситуация несколько иная, поскольку графики вероятности BER при увеличении отношения сигнал/помеха уменьшаются быстрее, чем ошибки для SISO-системы. В табл. 4 показаны вероятности битовых ошибок при отношении сигнал/помеха 10 дБ и 20 дБ.

Таблица 4

Вероятность ошибки системы MIMO для рассматриваемых модуляций при отношении сигнал/помеха 10 дБ и 20 дБ

Тип модуляции	BER	
	отношение сигнал/помеха 10 дБ	отношение сигнал/помеха 20 дБ
BPSK	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-5}$
QPSK	$9,9 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$
8-PSK	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$
16-QAM	$4,4 \cdot 10^{-1}$	$7,0 \cdot 10^{-2}$

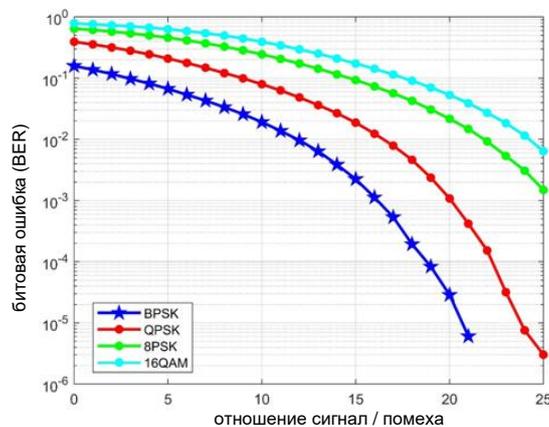


Рис. 6. Вероятность битовой ошибки системы MIMO-OFDM для различных типов модуляции в зависимости от отношений сигнал/помеха в дБ

Сопоставление рис. 3 и 6 позволяет сделать вывод, что увеличение количества пространственных потоков отрицательно скажется на помехозащищенности. Поэтому требуется рассмотреть, как увеличение количества передающих и приемных антенн MIMO повлияет на помехоустойчивость системы мобильной связи. В этом случае рассматриваются только системы с одинаковым количеством антенн на обоих концах беспроводной системы.

Заключение. В статье представлена разработанная 3D-модель канала WiMAX для беспроводных систем передачи данных с использованием модуляции SISO и MIMO (два канала) на основе изображений распространения канала 3GPP при наличии нескольких трактов, влияние эффекта Доплера (в результате движения мобильной станции), ослабление сигнала на расстоянии с различными настройками частоты, влияние характеристик приемной и передающей антенны. В результате моделирования проверена работоспособность 3D-модели системы связи и можно сделать вывод, что системы SISO-OFDM и MIMO-OFDM чувствительны к выбранному типу модуляции и количеству передающих и приемных антенн. При числе антенн в передатчике и приемнике, равном 2, пропускная способ-

ность для MIMO-системы возрастает в 2 раза, возрастает также в 2 раза мощность сигнала в антенне передатчика, но увеличивается дисперсия шумов в приемнике и тоже в два раза. Следующим шагом в исследовании 3D-модели будет применение адаптации мобильной и базовой систем радиосвязи [26], обеспечивающих пространственную фильтрацию для выбора пути распространения сигнала по максимальному отношению сигнал/помеха, что, однако, сопровождается усложнением антенных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Sarangi A.K., and Datta A.* Capacity Comparison of SISO, SIMO, MISO & MIMO Systems // Book Capacity Comparison of SISO, SIMO, MISO & MIMO Systems (IEEE, 2018, edn.). – P. 798-801.
2. *Mondal B., Thomas T.A., Visotsky E., Vook F.W., Ghosh A., Nam Y.-H., Li Y., Zhang J., Zhang M., and Luo Q.* 3D channel model in 3GPP // IEEE Communications Magazine. – 2015. – Vol. 53 (3). – P. 16-23
3. *Fedosov V., Legin A., Lomakina A.* Adaptive algorithm based on antenna arrays for radio communication systems // Serbian Journal of Electrical Engineering. – 2017. – Vol. 14, No. 3. – P. 301-312.
4. *Fernández-Caramés T.M., González-López M., Escudero C.J., and Castedo L.* Performance evaluation of multiple-antenna IEEE 802.11 p transceivers using an FPGA-based MIMO vehicular channel emulator // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2012. – 2012 (1). – P. 215.
5. *Fedosov V., Legin A., Lomakina A.* Adaptive algorithm for data transmission in wireless channels based on MIMO-OFDM technique // Conference Proceedings - 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2017. – 2017. – P. 218-221.
6. *Thota J., Almesaeed R., Doufexi A., Armour S., and Nix A.R.* Infrastructure to Vehicle Throughput Performance in LTE-A Using 2D and 3D 3GPP/ITU Channel Models // Book Infrastructure to Vehicle Throughput Performance in LTE-A Using 2D and 3D 3GPP/ITU Channel Models (IEEE, 2015, edn.). – P. 1-5.
7. *Javadi M., Habib S., and Hannan M.*: Survey on inter-vehicle communication applications // Current trends and challenges // Information Technology Journal. – 2013. – No. 12 (2). – P. 243-250.
8. *Федосов В.П., Ковтун Д.Г., Легин А.А., Ломакина А.В.* Исследование модели OFDM-сигнала с малым уровнем внеполосного излучения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 11 (172). – С. 6-16.
9. *Fedosov V., Lomakina A., Legin A., and Voronin V.* Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels // Book Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels (International Society for Optics and Photonics, 2016, edn.). – P. 98720G.
10. *Федосов В.П., Легин А.А., Ломакина А.В.* Алгоритмы, основанные на технологии MIMO-OFDM, для реализации цифрового гидроакустического канала связи // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 148-158.
11. *Almesaeed R., Ameen A.S., Doufexi A., Dahnoun N., and Nix A.R.* A comparison study of 2D and 3D ITU channel model // Book A comparison study of 2D and 3D ITU channel model (IEEE, 2013, edn.). – P. 1-7.
12. *Thomas T.A., Vook F.W., Mellios E., Hilton G.S., Nix A.R., and Visotsky E.* 3D extension of the 3GPP/ITU channel model // Book 3D extension of the 3GPP/ITU channel model (IEEE, 2013, edn.). – P. 1-5.
13. *Series M.*: Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced // Report ITU. – 2009. – Vol. 638. – P. 1-72.
14. *Isa A.A.M., Othman M., Johal M., Isa M., Zin M., Haron N., Zakaria Z., and Ibrahim M.* Enhanced location estimation with a single base station in WiMAX network // Book Enhanced location estimation with a single base station in WiMAX network (IEEE, 2014, edn.). – P. 1-6.

15. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., and Kang C.G. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB // John Wiley & Sons. – 2010.
16. Fedosov V., Lomakina A., Legin A., and Voronin V. Three-dimensional model of hydro acoustic channel for research MIMO systems // Book Three-dimensional model of hydro acoustic channel for research MIMO systems (International Society for Optics and Photonics, 2017, edn.). – P. 101860W.
17. Ademaj F., Taranetz M., and Rupp M. 3GPP 3D MIMO channel model: A holistic implementation guideline for open source simulation tools // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2016. – 2016, (1). – P. 55.
18. Khan M.W., Zhou Y., and Xu G. Modeling of acoustic propagation channel in underwater wireless sensor networks // Book Modeling of acoustic propagation channel in underwater wireless sensor networks (IEEE, 2014, edn.). – P. 586-590.
19. Zajic A.G. Statistical modeling of MIMO mobile-to-mobile underwater channels // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2011. – Vol. 60 (4). – P. 1337-1351
20. Zhang L., Liu J., Liu K., and Zhou Y. On the 3D beamforming and proactive cell shaping with 3GPP 3D channel model // Book on the 3D beamforming and proactive cell shaping with 3GPP 3D channel model (IEEE, 2014, edn.). – P. 688-693.
21. Федосов В.П., Муравицкий Н.С. Адаптивная приемная антенная решетка для обработки пространственно-временных сигналов в MIMO-системе беспроводной передачи данных // Антенны. – 2011. – № 8 (171). – С. 35-43.
22. Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A., Voronin V.V. Three-dimensional model of hydro acoustic channel for research MIMO systems // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 9. Сер. "Ocean Sensing and Monitoring IX" 2017. – С. 101860W.
23. Kucheryavenko A., Fedosov V. Model of multicomponent micro-Doppler signal in environment MATLAB // MATEC Web of Conferences. – 2017. – P. 05008.
24. Рыжов В.П., Федосов В.П. Многопользовательское пространственно-временное кодирование и декодирование в системе связи на основе антенных решеток // Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ-2003: Тр. Международной научной конференции. – 2003. – С. 271-275.
25. Ahmadi S. Mobile WiMAX: A systems approach to understanding IEEE 802.16 m radio access technology. – Academic Press, 2010.
26. Fedosov V., Legin A. Wireless Data Transmission in Underwater Hydroacoustic Environment Based on MIMO-OFDM System and Application Adaptive Algorithm at the Receiver Side // Serbian journal of electrical engineering. – February 2019. – Vol. 16, No. 1. – P. 71-83.

REFERENCE

1. Sarangi A.K., and Datta A. Capacity Comparison of SISO, SIMO, MISO & MIMO Systems, *Book Capacity Comparison of SISO, SIMO, MISO & MIMO Systems (IEEE, 2018, edn.)*, pp. 798-801.
2. Mondal B., Thomas T.A., Visotsky E., Vook F.W., Ghosh A., Nam Y.-H., Li Y., Zhang J., Zhang M., and Luo Q. 3D channel model in 3GPP, *IEEE Communications Magazine*, 2015, Vol. 53 (3), pp. 16-23
3. Fedosov V., Legin A., Lomakina A. Adaptive algorithm based on antenna arrays for radio communication systems, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 301-312.
4. Fernández-Caramés T.M., González-López M., Escudero C.J., and Castedo L. Performance evaluation of multiple-antenna IEEE 802.11 p transceivers using an FPGA-based MIMO vehicular channel emulator, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012, 2012 (1), pp. 215.
5. Fedosov V., Legin A., Lomakina A. Adaptive algorithm for data transmission in wireless channels based on MIMO-OFDM technique, *Conference Proceedings - 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2017*, 2017, pp. 218-221.
6. Thota J., Almesaeed R., Doufexi A., Armour S., and Nix A.R. Infrastructure to Vehicle Throughput Performance in LTE-A Using 2D and 3D 3GPP/ITU Channel Models, *Book Infrastructure to Vehicle Throughput Performance in LTE-A Using 2D and 3D 3GPP/ITU Channel Models (IEEE, 2015, edn.)*, pp. 1-5.

7. Javadi M., Habib S., and Hannan M.: Survey on inter-vehicle communication applications, *Current trends and challenges, Information Technology Journal*, 2013, No. 12 (2), pp. 243-250.
8. Fedosov V.P., Kovtun D.G., Legin A.A., Lomakina A.V. Issledovanie modeli OFDM-signala s malym urovnem vnepolosnogo izlucheniya [Study of an OFDM signal model with a low level of out-of-band radiation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 11 (172), pp. 6-16.
9. Fedosov V., Lomakina A., Legin A., and Voronin V. Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels, *Book Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels (International Society for Optics and Photonics, 2016, edn.)*, pp. 98720G.
10. Fedosov V.P., Legin A.A., Lomakina A.V. Algoritmy, osnovannyye na tekhnologii MIMO-OFDM, dlya realizatsii tsifrovogo gidroakusticheskogo kanala svyazi [Algorithms based on the MIMO-OFDM technology for the implementation of a digital hydroacoustic communication channel], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 7 (168), pp. 148-158.
11. Almesaeed R., Ameen A.S., Doufexi A., Dahnoun N., and Nix A.R. A comparison study of 2D and 3D ITU channel model, *Book A comparison study of 2D and 3D ITU channel model (IEEE, 2013, edn.)*, pp. 1-7.
12. Thomas T.A., Vook F.W., Mellios E., Hilton G.S., Nix A.R., and Visotsky E. 3D extension of the 3GPP/ITU channel model, *Book 3D extension of the 3GPP/ITU channel model (IEEE, 2013, edn.)*, pp. 1-5.
13. Series M.: Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced, *Report ITU*, 2009, Vol. 638, pp. 1-72.
14. Isa A.A.M., Othman M., Johal M., Isa M., Zin M., Haron N., Zakaria Z., and Ibrahim M. Enhanced location estimation with a single base station in WiMAX network, *Book Enhanced location estimation with a single base station in WiMAX network (IEEE, 2014, edn.)*, pp. 1-6.
15. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., and Kang C.G. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB, *John Wiley & Sons*, 2010.
16. Fedosov V., Lomakina A., Legin A., and Voronin V. Three-dimensional model of hydro acoustic channel for research MIMO systems, *Book Three-dimensional model of hydro acoustic channel for research MIMO systems (International Society for Optics and Photonics, 2017, edn.)*, pp. 101860W.
17. Ademaj F., Taranetz M., and Rupp M. 3GPP 3D MIMO channel model: A holistic implementation guideline for open source simulation tools, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016, 2016, (1), pp. 55.
18. Khan M.W., Zhou Y., and Xu G. Modeling of acoustic propagation channel in underwater wireless sensor networks, *Book Modeling of acoustic propagation channel in underwater wireless sensor networks (IEEE, 2014, edn.)*, pp. 586-590.
19. Zajic A.G. Statistical modeling of MIMO mobile-to-mobile underwater channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, Vol. 60 (4), pp. 1337-1351.
20. Zhang L., Liu J., Liu K., and Zhou Y. On the 3D beamforming and proactive cell shaping with 3GPP 3D channel model, *Book on the 3D beamforming and proactive cell shaping with 3GPP 3D channel model (IEEE, 2014, edn.)*, pp. 688-693.
21. Fedosov V.P., Muravitskiy N.S. Adaptivnaya priemnaya antennaya reshetka dlya obrabotki prostranstvenno-vremennykh signalov v MIMO-sisteme besprovodnoy peredachi dannykh [Adaptive receiving antenna array for processing space-time signals in a MIMO-system for wireless data transmission], *Antenny* [Antenna], 2011, No. 8 (171), pp. 35-43.
22. Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A., Voronin V.V. Three-dimensional model of hydro acoustic channel for research MIMO systems, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 9. Ser. "Ocean Sensing and Monitoring IX" 2017*, pp. 101860W.
23. Kucheryavenko A., Fedosov V. Model of multicomponent micro-Doppler signal in environment MATLAB, *MATEC Web of Conferences* 2017, pp. 05008.
24. Ryzhov V.P., Fedosov V.P. Mnogopol'zovatel'skoe prostranstvenno-vremennoe kodirovanie i dekodirovanie v sisteme svyazi na osnove antennykh reshetok [Multi-user space-time coding and decoding in a communication system based on antenna arrays], *Izlučenje i rasseyaniye elektromagnitnykh voln IREMV-2003: Tr. Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Radiation and scattering of electromagnetic waves IREMV-2003: Proceedings of the International Scientific Conference], 2003, pp. 271-275.

25. *Ahmadi S.* Mobile WiMAX: A systems approach to understanding IEEE 802.16 m radio access technology. Academic Press, 2010.
26. *Fedosov V., Legin A.* Wireless Data Transmission in Underwater Hydroacoustic Environment Based on MIMO-OFDM System and Application Adaptive Algorithm at the Receiver Side, *Serbian journal of electrical engineering*, February 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 71-83.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Марчук.

Федосов Валентин Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: vpfedosov@sfedu.ru, 347928, г. Таганрог, ул. Некрасовский, 44; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; профессор.

Джалил Садун Джамил – e-mail: jaleel.s.jameel@gmail.com; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Кучерявенко Светлана Валентиновна – e-mail: svkucheryavenko@sfedu.ru, кафедра теоретических основ радиотехники; доцент.

Fedosov Valentin Petrovich – Southern Federal University; e-mail: vpfedosov@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371632; the department of theoretical foundations of radio engineering; professor.

Jaleel Sadoon Jameel – e-mail: jaleel.s.jameel@gmail.com; the department of theoretical foundations of radio engineering; postgraduate student.

Kucheryavenko Svetlana Valentinovna – e-mail: svkucheryavenko@sfedu.ru, the department of theoretical foundations of radio engineering; associate professor.

УДК 656.7, 681.88

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-18-30

Е.В. Волощенко, В.Ю. Волощенко

ВОЛНОГРАФ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГИДРОУСЛОВИЙ НА ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ

Рассмотрены физические принципы функционирования гидроакустического волнографа, являющегося средством для измерения гидроусловий на акватории летнего бассейна. Устройство включает в себя каналы как измерения параметров морского волнения в режиме волнографа методом «обращенного» эхолота, так и обработки доплеровской информации для поиска генерального направления распространения поверхностной ветровой волны за счет наклонного эхозондирования взволнованной границы раздела со стороны дна акватории. Отличительной особенностью волнографа использование донного приемоизлучающего антенного устройства оригинальной конструкции, позволяющего осуществлять одновременное функционирование обоих каналов, причем, на нескольких рабочих ультразвуковых сигналах за счет использования эффектов нелинейной акустики – самовоздействия и самодемодуляции. Например, вследствие эффекта самовоздействия спектр зондирующего сигнала с частотой f «обогащается» высшими гармоническими составляющими с частотами $2f, 3f, \dots, nf$, где n – номер гармоники, для которых ультразвуковые поля имеют особенности – угловая ширина основного лепестка характеристики направленности в режиме излучения для каждой последующей гармоники меньше, а уровень бокового поля – ниже. Устройство может обеспечивать регистрацию параметров морского волнения (направление бега волн, высота и длина волны, период волнения) в течение длительного времени с высокой точностью, надежностью и стабильностью, что делает его перспективным для использования в составе эталонных систем.

Гидроакустический волнограф; нелинейная акустика.