

# Разработка LLS- симулятора сети связи ВСЖМ на основе технологии 802.11ax

**С.Л.Портной**, д.т.н., проф. Московского института электроники и математики им. А.Н.Тихонова НИУ ВШЭ, научный консультант ООО "РадиоГигабит" / sportnoy@hse.ru,

**С.Е.Никитин**, ст. преподаватель МИЭМ НИУ ВШЭ, младший инженер-исследователь ООО "РадиоГигабит" / snikitin@hse.ru,

**Н.С.Клюев**, студент НИУ ВШЭ, стажер ООО "РадиоГигабит" / nsklyuev@edu.hse.ru,

**Г.Д.Антошкин**, студент НИУ ВШЭ, стажер ООО "РадиоГигабит" / gdantoshkin@edu.hse.ru,

**Ш.Р.Сахаутдинов**, студент НИУ ВШЭ, стажер ООО "РадиоГигабит" / shrsakhautdinov@edu.hse.ru

УДК 621.391, DOI: 10.22184/2070-8963.2024.122.6.62.68

Скорость движения составов на высокоскоростных железнодорожных магистралях (ВСЖМ) не позволяет использовать классические сети беспроводной железнодорожной связи, требуется проектирование, моделирование и реализация систем связи нового поколения. Одним из оптимальных решений в этой области является создание железнодорожных сетей беспроводной связи на основе использования технологии radioEthernet в составе сетей типа Trackside Network (TSN). В статье описаны разработка и реализация программной модели LLS (link-level simulator) сети железнодорожной беспроводной связи на основе технологии radioEthernet 802.11ax.

## Введение

С увеличением спроса на высокоскоростные железнодорожные магистрали обеспечение производительности в реальном времени становится ключевым вопросом в области сетей железнодорожной беспроводной связи. Традиционные технологии обеспечения связи "поезд – земля" (например, технология второго поколения GSM-R) не соответствуют требованию высокой производительности сети при больших скоростях движения состава.

Одним из ведущих направлений создания современных систем связи на ВСЖМ и на классических железнодорожных маршрутах является развертывание сетей класса

Trackside Network, использующих технологию radioEthernet (Wi-Fi). Несмотря на изначально ограниченную применимость технологии radioEthernet в сценариях установления связи с движущимися объектами, эта технология остается предпочтительной для сетей TSN [1] по нескольким причинам: высокая достигаемая пропускная способность сети из-за использования широкого нелицензируемого диапазона частот, open-source-подход при разработке технологии, большое число изготовителей оборудования и взаимная совместимость решений многих вендоров.

При этом Wi-Fi подвержена влиянию значительного количества помех, вызываемых преимущественно



**Рис.1.** Структура пакета передачи данных HE MU PPDU

затуханием сигнала с удалением поезда от базовых станций (БС) и частотным сдвигом, возникающим вследствие эффекта Доплера и вносящим большое количество помех в модуляцию OFDM (OFDMA), классическую для технологии Wi-Fi. В связи с этим перед реализацией сетей TSN необходимо проведение комплексного моделирования работы сети в различных сценариях (скорость состава, количество составов на одном участке пути и проч.). Общий подход к моделированию работы сетей железнодорожной связи был рассмотрен в предыдущей работе авторов [2].

В данной статье рассматриваются разработка и реализация программной модели LLS (link-level simulator) сети железнодорожной беспроводной связи на основе технологии radioEthernet 802.11ax.

## Обзор структуры передатчика в стандарте 802.11ax

Согласно стандарту IEEE 802.11ax [3] передатчик типа НЕ (High-Efficiency) включает в себя ряд технических и информационных полей, применяющихся в различных комбинациях при генерации передаваемого сигнала. Стандарт предполагает возможность передачи данных с использованием четырех типов пакетов PPDU (Physical Layer Protocol Data Unit): HE SU PPDU, HE MU PPDU, HE ER SU PPDU и HE TB PPDU. Модель передатчика была разработана для моделирования передачи HE MU PPDU (High-Efficiency Multi-User PPDU) с учетом возможности одновременного присутствия на одном участке пути двух составов.

Структура HE MU PPDU представлена на рис.1.

Основную сложность при моделировании передатчика HE MU PPDU представляет OFDMA-модуляция, которая является расширением модуляции OFDM до совместного использования доступной полосы пропускания несколькими пользователями. Для корректного разделения доступного частотного диапазона в модели необходимо учитывать схему RU allocation, показывающую распределение доступной полосы пропускания между пользователями и подробно описанную в стандарте [3].

Так, для схемы с нулевым индексом каждый подканал шириной 20 МГц разбивается на девять сегментов

по 26 поднесущих с данными в каждой с выделением одного сегмента на одного пользователя. Принцип разбиения полосы пропускания на подканалы, распределения по ним RU и определения количества RU выделяемых на пользователя приведены в [1] в нижней части табл.27–26.

В стандарте 802.11ax описаны 12 схем модуляции и кодирования (mcs), использующие различные виды созвездий модуляции и скорости кодирования. Всего в стандарте приведены 56 вариаций деления mcs в зависимости от ширины полосы пропускания (табл.27–55 – 27–111 [3]), однако они отличаются преимущественно комбинациями типа созвездия модуляции и скорости кодирования.

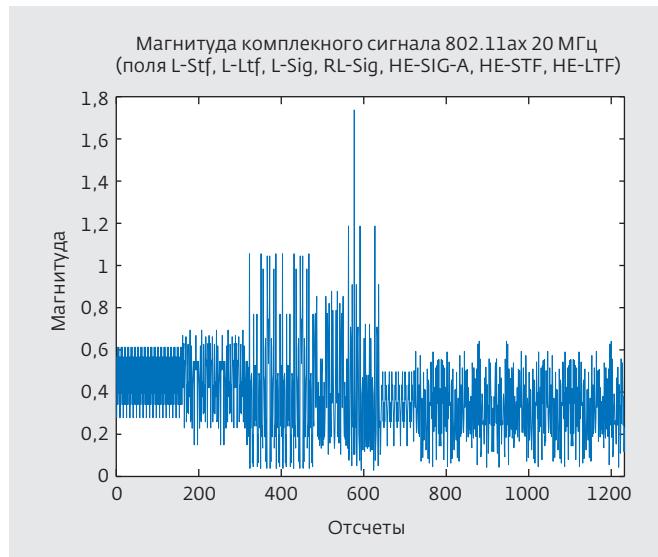
В ходе работы над моделированием передатчика была реализована программная генерация полей HE MU PPDU (см. рис.2).

## Обзор алгоритмов кодирования и декодирования информации с помощью BCC и LDPC кодов

В стандарте [3] предусмотрено использование кодов BCC (Block Convolutional Code) и LDPC (Low-Density Parity-Check) для реализации помехоустойчивого кодирования со скоростями 1/2, 2/3, 5/6, 3/4.

Кодирование BCC выполняется с помощью семи регистров и генеративных полиномов (1011011) и (1111001) в двоичной системе счисления. Это дает закодированную последовательность со скоростью кода 1/2. Для получения других скоростей кода выполняется процедура выкашивания битов. Декодирование последовательности выполняется после обратного выкашивания (если скорость кода не равна 1/2) с помощью алгоритма Витерби с soft (мягким) или hard (жестким) решением.

Кодирование битовой последовательности с помощью LDPC-кодов происходит за счет умножения исходной последовательности на порождающую матрицу G. Декодирование осуществляется путем применения алгоритма SPA (sum-product algorithm) к битовой последовательности. Выбор данного алгоритма основывается на данных, полученных в ходе исследования и сравнении эффективности алгоритмов декодирования SPA, min-sum и bit-flipping, результаты которого приведены в [4].



**Рис.2.** Пример генерации обучающих и информационных полей

## Подход к моделированию

Моделирование установления соединения "поезд – земля" в рамках LLS 802.11ax осуществляется в три этапа:

1. Программная генерация передаваемого сигнала согласно [3];
2. Моделирование внесения помехи в сгенерированный сигнал при прохождении через канал;
3. Программные демодуляция и декодирование принятого сигнала.

Общая детализированная блок-схема LLS приведена на рис.3.

## Обзор реализованных моделей канала беспроводной связи и эквалайзера

В ходе проведения работы в дополнение к модели стандартного канала с АБГШ (аддитивным белым гауссовским шумом) были реализованы и протестированы модели канала с доплеровским сдвигом, а также модели 3GPP HST Single Tap и SFN.

Для канала с доплеровским сдвигом частотный сдвиг передаваемого сигнала осуществляется после OFDM-модуляции по формуле:

$$tx_{CFO}(t) = tx(t) \cdot \exp(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{CFO} \cdot t), \quad (1)$$

где вектор временных отсчетов  $t$  определяется как

$$t = \frac{[0:N-1]}{fs} \quad fs = \Delta_{F,HE} \cdot N_{fft} \quad (2)$$

где  $f_{CFO}$  – значение доплеровского частотного сдвига;

$N$  – число отсчетов  $tx_{CFO}(t)$ ;

$\Delta_{F,HE}$  – разнос поднесущих;

$N_{fft}$  – число поднесущих в OFDM-модуляции.

Для канала с доплеровским сдвигом также была реализована функция эквалайзера с "идеальным" знанием канала при равном доплеровском сдвиге для всех поднесущих по центральной точке окна Фурье (середине каждого OFDM-символа).

$$tx_{EQ}(t) = \sum_{i=1}^{(N/N_m + N_{CP})} [tx_{CFO}(t_i) \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{CFO} \cdot t_{mid_i}) + tx_{CFO}(ai)], \quad (3)$$

где вектор временных отсчетов  $t$  определяется согласно выражению (2).

Вектор временных отсчетов  $i$ -го OFDM-символа определяется по формулам (4) и (5).

$$ti | ti = T, T \in N, i \cdot N_{CP} + (i-1) \cdot N_{fft} - 1 \leq T \leq i \cdot (N_{CP} + N_{fft}), \quad (4)$$

$$ai | ai = A, A \in N, (i-1) \cdot (N_{CP} + N_{fft}) + 1 \leq T \leq i \cdot N_{CP} + (i-1) \cdot N_{fft}. \quad (5)$$

Центральная точка окна Фурье определяется согласно:

$$t_{mid_i} = (N_{CP} + N_{fft}) * i - \frac{N_{fft}}{2}. \quad (6)$$

На рис.4 приведен пример сигнального созвездия после модуляции, внесения шума и частотного сдвига и эквалайзинга для QAM64.

Модель HST-SFN основана на предположении о неограниченном количестве базовых станций, расположенных вдоль трассы на расстоянии  $D_{min}$  от путей и  $D_s$  друг от друга (см. рис.5).

Местоположение  $k$ -той БС может быть вычислено по формуле:

$$x_k = k \cdot D_s + j \cdot D_{min}, \quad (7)$$

где  $k$  принимает значения от  $-\infty$  до  $+\infty$ .

Местоположение поезда определяется по выражению:

$$y = a + j \cdot 0 = v \cdot t + j \cdot 0, \quad (8)$$

где  $v$  – скорость состава.

Данное выражение учитывает предположение о прямолинейности пути следования состава.

Сигнал на состав приходит с ближайших  $N$  базовых станций, то есть влияние на соединение оказывают БС, соответствующие условию (9):

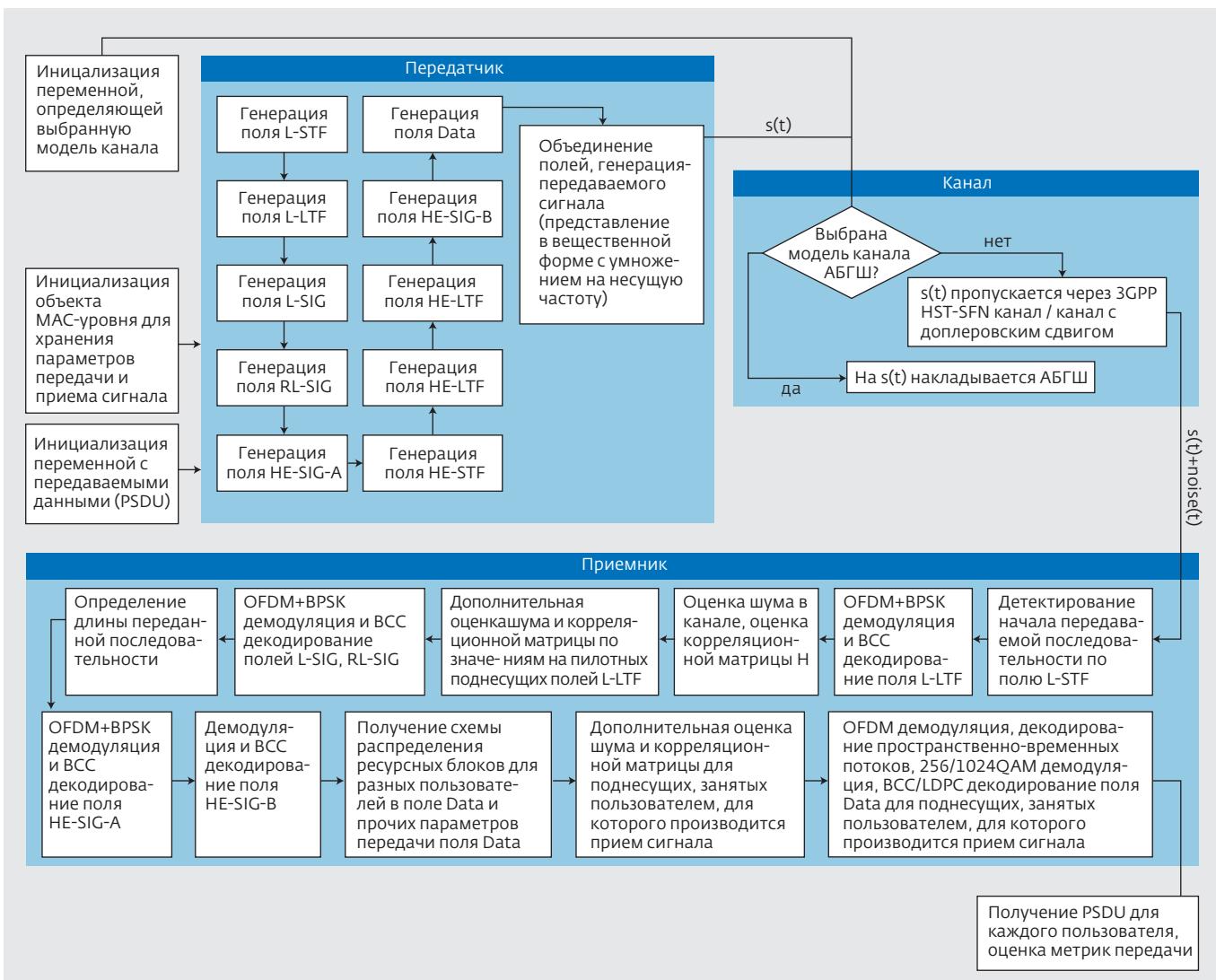


Рис.3. Блок-схема LLS 802.11ax

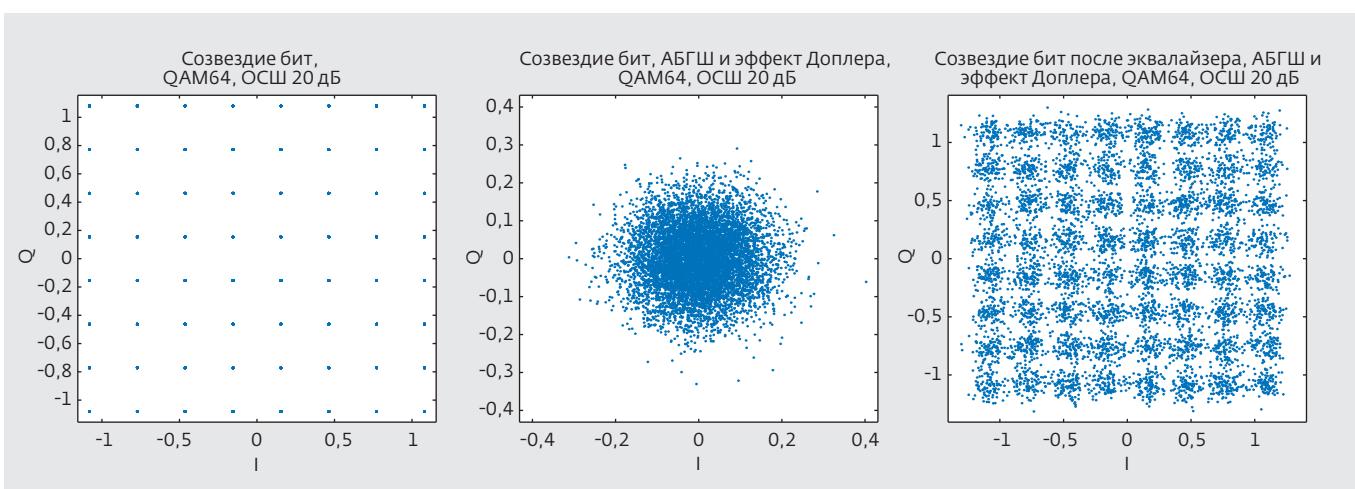


Рис.4. Сигнальное созвездие после модуляции, внесения шума и частотного сдвига и эквалайзинга, QAM64

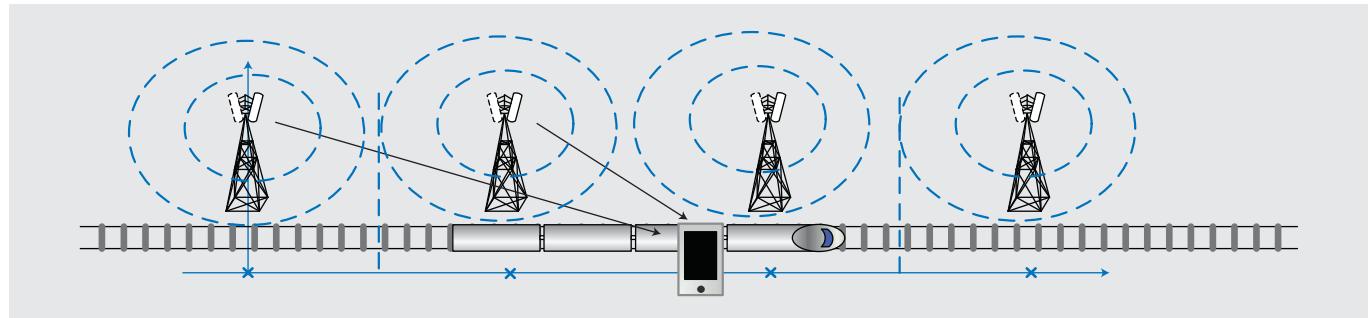


Рис.5. Предположения модели HST-SFN [5]

$$k \cdot D_s - N/2 \cdot D_s \leq a \leq k \cdot D_s + N/2 \cdot D_s. \quad (9)$$

Общее количество приходящих МЛК задается количеством БС, передающих сигнал на состав в каждый момент времени. Таким образом, модель не позволяет оценить непосредственно многолучевое распространение сигнала, сводя его оценку к вычислению суммы сигналов, пришедших с нескольких базовых станций. Это предположение позволяет значительно снизить вычислительную мощность, требующуюся для расчета характеристик канала.

Мощность сигнала с  $k$ -той БС, нормализованная относительно общей получаемой мощности, задается формулой:

$$P_k = -20 \lg (|y - x_k|) - 10 \lg \left[ \sum_{i \in \{i | i \cdot D_s - 2 \cdot D_s \leq a < i \cdot D_s + 2 \cdot D_s\}} \frac{1}{|y - x_i|^2} \right] \quad (10)$$

при  $k \cdot D_s - 2 \cdot D_s \leq a \leq k \cdot D_s + 2 \cdot D_s$ .

Доплеровский сдвиг сигнала, приходящего на абонентское устройство в поезде с  $k$ -той БС, определяется по формуле:

$$F_{(D,k)} = f_c \cdot \text{real} \left[ -v \cdot \frac{y - x_k}{|y - x_k| \cdot C} \right] \quad (11)$$

при  $k \cdot D_s - 2 \cdot D_s \leq a < k \cdot D_s + 2 \cdot D_s$ .

Относительная задержка получения сигнала с  $k$ -той БС определяется выражением:

$$T_k = \frac{|y - x_k|}{C} \quad (12)$$

при  $k \cdot D_s - 2 \cdot D_s \leq a < k \cdot D_s + 2 \cdot D_s$ .

## Текущие результаты

На момент написания данной статьи были реализованы и отложены:

- модель передатчика;
- модели каналов АБГШ, канала с эффектом Доплера;
- некоторые блоки приемника (OFDM-демодуляция, декодеры LDPC и ВСС, демодуляция BPSK/QPSK/QAM).

Исходя из реализованных блоков LLS были проведены симуляции для следующих сценариев:

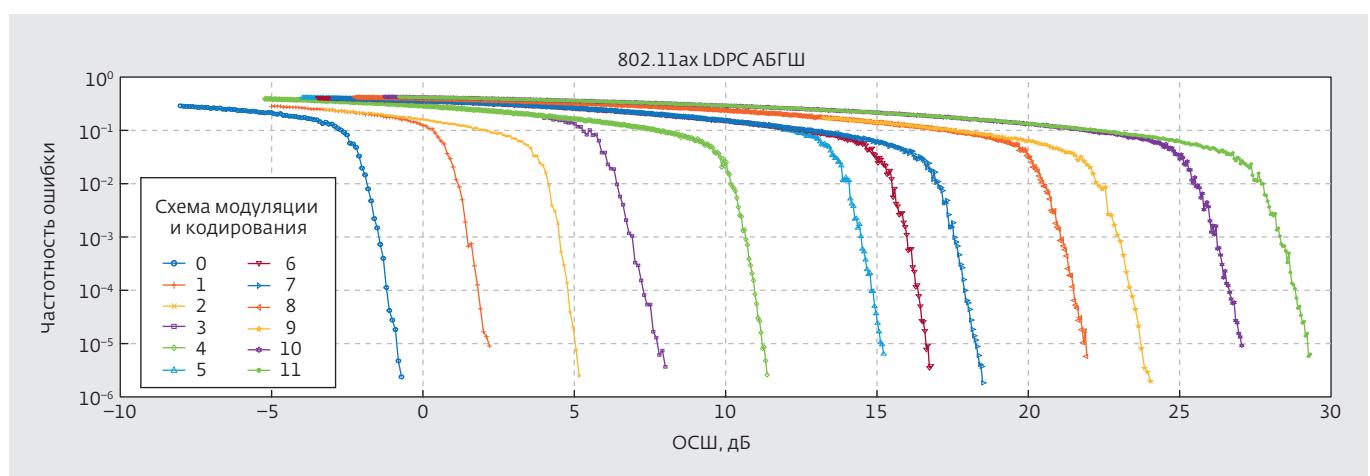


Рис.6. LDPC FEC + BPSK/QPSK/QAM в канале с АБГШ

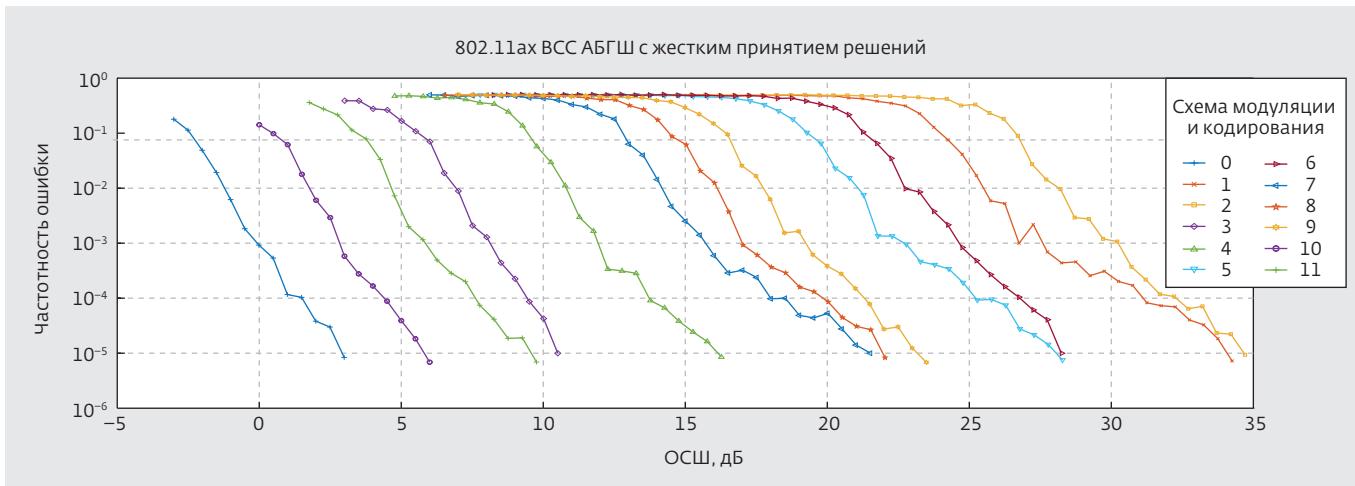


Рис.7. BCC FEC + BPSK/QPSK/QAM в канале с АБГШ, soft-декодирование

1. LDPC FEC + BPSK/QPSK/QAM (демодуляция по алгоритму аппроксимации) в АБГШ канале (см. рис.6);
2. BCC FEC + BPSK/QPSK/QAM (демодуляция по алгоритму аппроксимации) в АБГШ канале (см. рис.7 и 8);
3. LDPC+constellation+OFDM BER (демодуляция BPSK/QPSK/QAM по алгоритму аппроксимации) vs SNR в канале с АБГШ и Доплеровским сдвигом частоты (на рис.9 показан пример для QAM16 и QAM64);
4. BCC+constellation+OFDM BER (демодуляция BPSK/QPSK/QAM по алгоритму аппроксимации) vs SNR в канале с АБГШ и Доплеровским сдвигом частоты (на рис.10 показан пример для QAM16 и QAM64).

## Заключение

Продемонстрированы результаты моделирования работы системы связи TSN на основе стандарта

IEEE 802.11ax в контексте применения на высокоскоростных железнодорожных магистралях для каналов с АБГШ и доплеровским сдвигом частоты. Дальнейшая работа над LLS-симулятором предполагает проведение симуляций в каналах модели 3GPP HST и более сложных моделях каналов, расширение модели до использования всех блоков передатчика и приемника.

Результаты моделирования могут быть использованы при разработке реальной сети связи для ВСЖМ.

## Благодарности

Работа проведена в рамках выполнения проекта ООО "РадиоГигабит". Авторы выражают признательность Трушанину Алексею Юрьевичу за оказанную помощь в выполнении исследований.

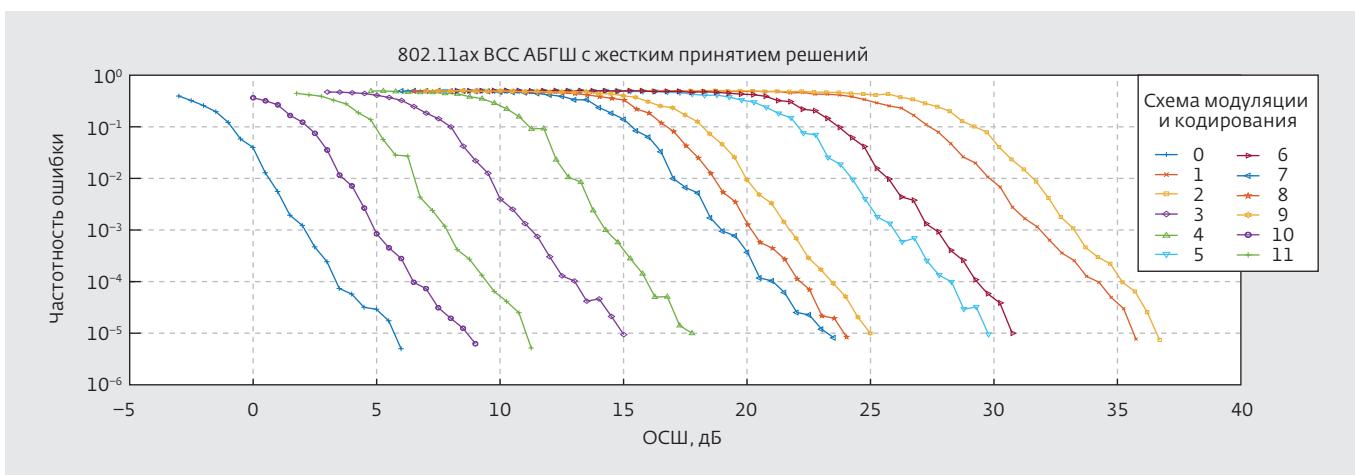


Рис.8. BCC FEC + BPSK/QPSK/QAM в канале с АБГШ, hard-декодирование

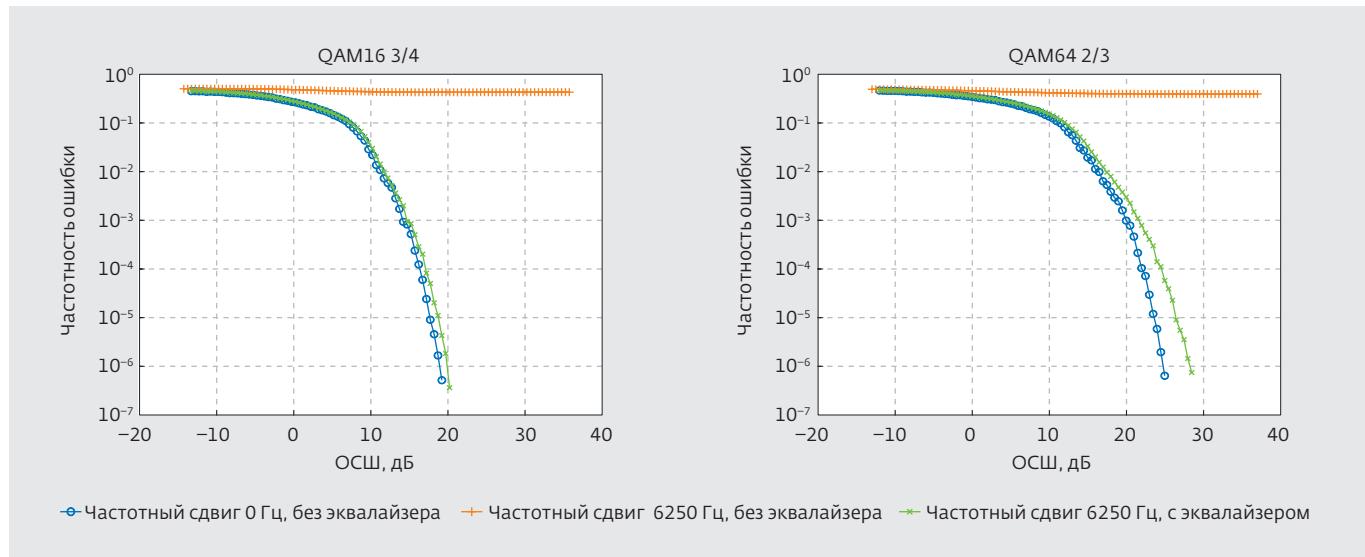


Рис.9. LDPC+constellation+OFDM в канале с частотным сдвигом, QAM16 и QAM64, скорости кодирования 3/4 и 2/3

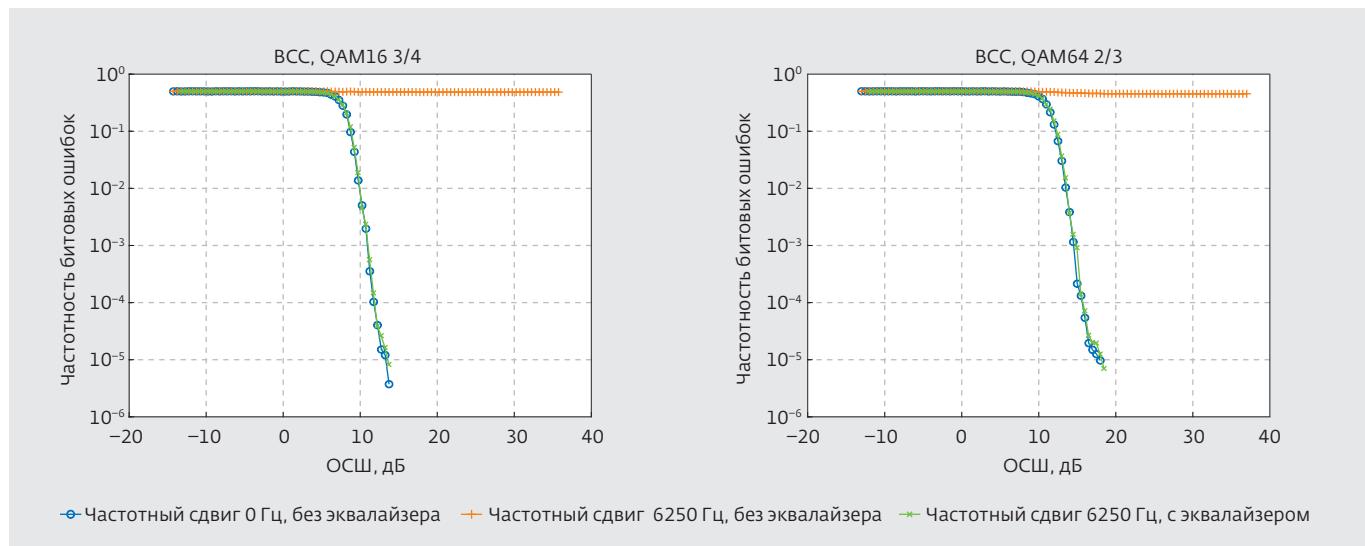


Рис.10. BCC +constellation+OFDM в канале с частотным сдвигом, QAM16 и QAM64, скорости кодирования 3/4 и 2/3

## ЛИТЕРАТУРА

1. Farooq J., Soler J. Radio communication for communications-based train control (CBTC): A tutorial and survey // IEEE Commun. Surveys Tut. 2017. Vol. 19. No. 3. PP. 1377–1402.
2. Portnoy S., Nikitin S., Minkovsky M., Klyuev N., Sakhautdinov S. Modelling approach to convergence trackside railway networks [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10617461> (дата обращения: 27.08.2024).
3. IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 1: Enhancements for High-Efficiency WLAN (Amendment to IEEE Std 802.11-2020). 2021.
4. Портной С.Л., Никитин С.Е., Волошин А.Д., Антошкин Г.Д. Обзор современных методов реализации помехоустойчивого кодирования в мобильной связи // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2024. № 1. С. 26–40.
5. PPTS 138 101-4. User Equipment (UE) radio transmission and reception. Part 4: Performance requirements. 2021.



# ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев,  
В.А. Коваль, Е.Е. Девяткин

## Развитие сетей мобильной связи от 5G Advanced к 6G: проекты, технологии, архитектура

Издание 2-е, дополненное

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2024. – 532 с.  
ISBN 978-5-94836-690-6

Цена 1960 руб.

Во втором издании книги рассмотрены перспективы эволюционного развития и стандартизации технологий мобильной связи пятого поколения 5G Advanced / IMT-2020 на пути к 6G/IMT-2030 международными организациями связи, представлены планы развития технологий 5G Advanced партнерским проектом 3GPP в релизах 17 и 18, проанализированы основные бизнес-модели услуг и индустриальные приложения в сетях 5G Advanced / IMT-2020, рассмотрены цепочки создания стоимости услуг 5G. Проведена оценка возможностей выделения частотных диапазонов для развития сетей 5G и 6G с учетом повестки дня ВКР-23, рассмотрены особенности построения и архитектура сети радиодоступа 5G RAN фазы 3 (релиз 17), виды сигналов, нумерология их формирования и частотные каналы, используемые в сетях радиодоступа 5G Advanced.

Показаны будущие изменения сценариев архитектуры и функций базовой сети 5G Core, технологии программно-определенных сетей SDN сети 5G и технологии виртуализации сетевых функций NFV, реализуемые в базовой сети 5G Core для управления и оркестрирования. Приведены технические и ЭМС-характеристики радиооборудования (базового и абонентского) сети радиодоступа 5G RAN для новой фазы эволюции технологий 5G Advanced. Рассмотрены вопросы построения сети синхронизации в 5G Advanced.

Рассмотрены возможности построения фрагмента сетей 5G и 6G на спутниках и высокоподнятых летающих платформах HAPS, железнодорожной сети FRMCS на базе 5G Advanced, их архитектура, использование алгоритмов и технологий искусственного интеллекта в сетевых элементах 5G Advanced.

Представлены видение и будущий облик мобильной связи поколения 6G/IMT-2030, его ключевые услуги, перспективы освоения 6G терагерцевого диапазона волн в интересах внедрения голограммической связи, виртуальной реальности, человекоцентрических приложений и Интернета вещей. Рассмотрены перспективы использования интеллектуальных реконфигурируемых поверхностей RIS в сетях мобильной связи 6G.

Для специалистов, студентов и магистрантов инфокоммуникационных специальностей университетов.

### Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91  
По факсу: (495) 956-33-46  
E-mail: knigi@technosphera.ru  
sales@technosphera.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ  
[www.technosphera.ru](http://www.technosphera.ru)