

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМ СВЯЗИ СТАНДАРТА 5G С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТАРИЯ 5G TOOLBOX ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА MATLAB

инж. Кисельников А.Е.; инж. Усс М.О.; инж., к.т.н. Шидловский Д.Ю.

Центр инженерных технологий и моделирования «Экспонента»

В настоящее время многие ведущие производители оборудования для телекоммуникационных систем ведут активную разработку прототипов устройств, отвечающих требованиям стандарта 5G. Данный доклад посвящен обзору инструментария для исследования и прототипирования физического подуровня данного стандарта в среде MATLAB. В докладе через призму инструментария 5G Toolbox от MATLAB будут рассмотрены вопросы, касающиеся новых механизмов формирования радиосигналов, нововведений данного стандарта в области формирования частотно-временной ресурсной сетки, модели процедуры поиска соты и т.д.

Первоначально следует рассмотреть предпосылки и причины, которые привели к необходимости проведения исследований и разработки нового стандарта для систем мобильного радиодоступа. Во-первых, внедрение в широкий обиход новых стандартов разложения (развертки) видеоданных, таких как 4K UHD TV и 8K UHD TV [1], а также VR-систем и множества других контентно-нагруженных сервисов, привели к необходимости обеспечить высокоскоростной радиодоступ, способный поддерживать одновременную работу множества абонентов. Второй причиной послужило резкое увеличение количества IoT (Internet of Things), в результате требование к количеству абонентов, одновременное обслуживание которых необходимо поддерживать в пределах одного сектора базовой станции, резко возросло. Третьей причиной послужило начало коммерческого внедрения различных автоматизированных и беспилотных систем, в том числе и автомобилей, что привело к необходимости заложить в новый стандарт возможность организации высоконадежного низкоскоростного канала связи с минимальной задержкой прохождения сообщения, в частности для организации V2V-взаимодействия (Vehicle to Vehicle) или других критических применений, например, медицинского.

Перечисленные факторы привели к необходимости реализации стандарта связи пятого поколения следующих сценариев сетевого взаимодействия: eMMB (Enhanced Mobile Broadband) – сценарий высокоскоростного взаимодействия для передачи 3D (трехмерного) контента, UHD-видеоконтента и других высоконагруженных применений; URLLC (Ultra-Reliable and Low-Latency Connection) – сценарий организации высоконадежного соединения с минимальной задержкой для V2V, V2I (Vehicle to Infrastructure) и других критических применений; mMTC (Massive Machine-Type Connections) – сценарий, предназначенный для обеспечения подключения большого количества низкоскоростных устройств (маяков, датчиков и т.п.). Структурная диаграмма данных сценариев сетевого взаимодействия приведена на рис. 1.

В данном докладе основной акцент будет сделан на первый сценарий сетевого взаимодействия – eMMB; будут рассмотрены нововведения относительно предыдущего стандарта организации систем радиодоступа – LTE (Long-Term Evolution), позволившие многократно увеличить скорость передачи данных и энергетическую эффективность мобильной передачи информации, повысить спектральную эффективность и уменьшить

задержку в линии радиосвязи. Помимо прочего будут рассмотрены особенности моделирования и прототипирования устройств, соответствующих стандарту связи пятого поколения в среде моделирования MATLAB с использованием инструментария 5G Toolbox [2].

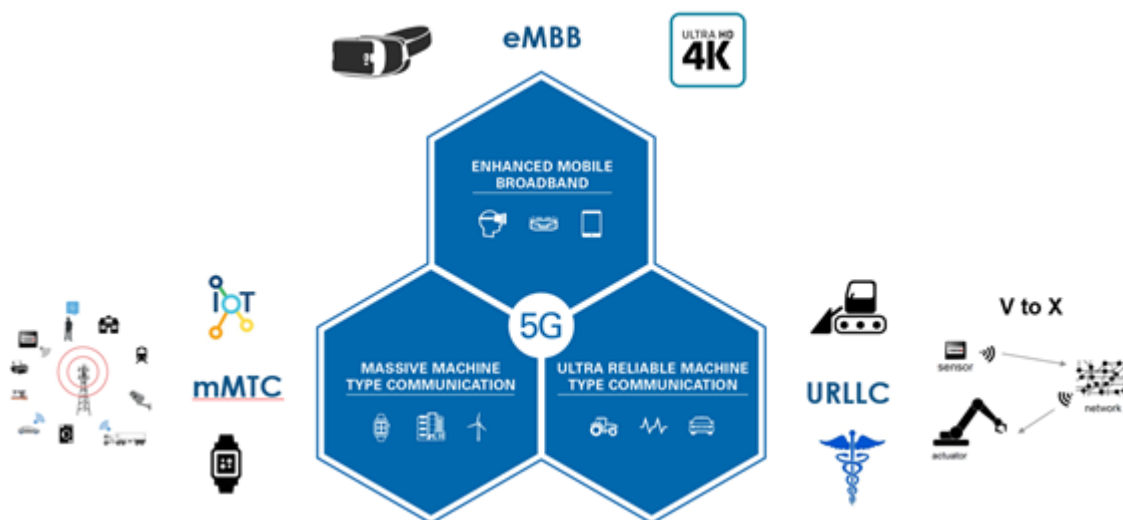


Рисунок 1. Диаграмма, иллюстрирующая ключевые сценарии сетевого взаимодействия в стандарте мобильной связи 5G.

Основные характеристики, заложенные в стандарт радиointерфейса 5G New Radio, приведены в таблице 1. Эти данные затрагивают наиболее важные показатели, которые обеспечивают реализацию приведенных ранее сценариев сетевого взаимодействия.

Таблица 1. Основные характеристики стандарта мобильной связи пятого поколения.

Ключевые параметры стандарта 5G	
Задержка в радиointерфейсе	до 1 мс
Задержка «точка-точка» (от пользовательского устройства до ядра сети)	до 10 мс
Плотность подключений	100x по сравнению с текущей версией стандарта (4G LTE)
Пропускная способность к площади покрытия	1 (Тбит/с)/км <sup>2</sup>
Спектральная эффективность на один сектор	10 (бит/с)/Гц/сектор
Пиковая скорость передачи в нисходящей линии связи	10 Гбит/с
Энергетическая эффективность	улучшение до 90% по сравнению с текущей версией стандарта (4G LTE)

Рассмотрим основные этапы реализации и внедрения данного стандарта, которые опубликованы на сайте основной ведущей организации по его разработке – 3GPP. С 2010 по 2015 год производились исследования, велись построения первых прототипов и тестирования различных наработок в данной области. С 2016 по 2018 год велась работа по стандартизации, и в августе 2018 года вышел 15 релиз (Technical Report), который и определил стандарт связи пятого поколения. Спустя три месяца после его выхода появился инструментарий 5G Toolbox в среде MATLAB. В настоящее время происходит подготовка

дополненного и уточненного 16 релиза, а затем с 2021 года планируется начать коммерческое внедрение данного стандарта. Диаграмма, иллюстрирующая разработку и выход стандарта 5G относительно стандарта LTE, приведена на рис. 2. Нужно отметить, что, несмотря на разработку новых стандартов, поддержка стандартов предыдущего поколения не прекращается.

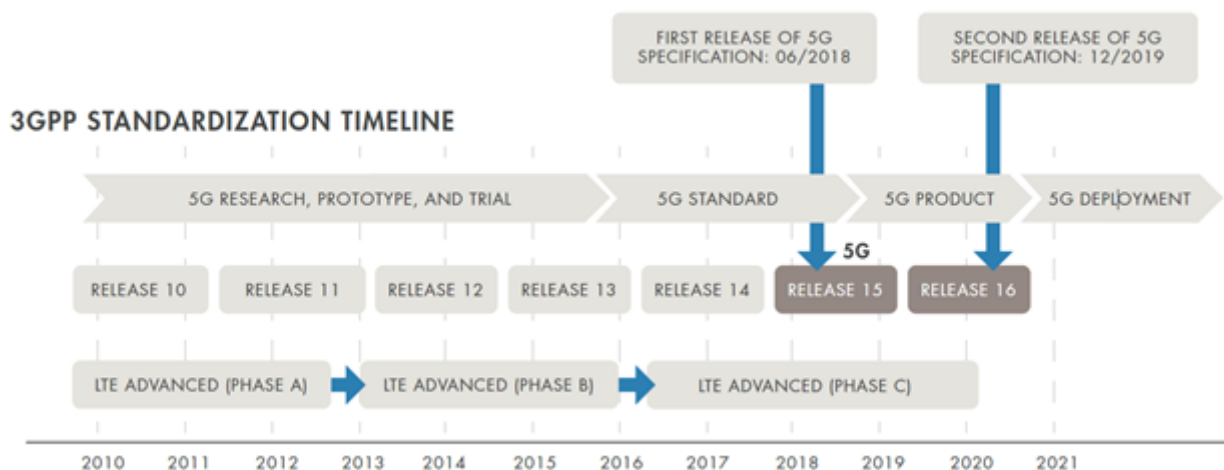


Рисунок 2. Временная диаграмма развития стандартов 4 и 5 поколений.

Спецификации, определяющие данный стандарт, и работа организации 3GPP [3], которая является его основным разработчиком, организованы следующим образом. Спецификации и соответственно разрабатывающие их инженерные подразделения разделены на три основные группы технических спецификаций (TSG – Technical Specification Groups), которые отвечают за сеть радиодоступа (RAN – Radio Access Network), службы и системные аспекты (SA – Service and System Aspects), ядро сети и терминальные приложения (CN – Core Network and Terminals). Каждая из групп технических спецификаций поделена на шесть рабочих групп (WG – Work Group), отвечающих за один из подуровней системы, которую описывает TSG. Физический подуровень 5G New Radio описывается спецификациями TSG RAN WG-1 и, в частности, TS 38.201, где приведено его общее описание и ссылки спецификации, описывающие каждую из подсистем физического уровня более подробно. Диаграмма, иллюстрирующая взаимосвязь спецификаций и положение физического уровня в стеке протоколов представлена на рис. 3.

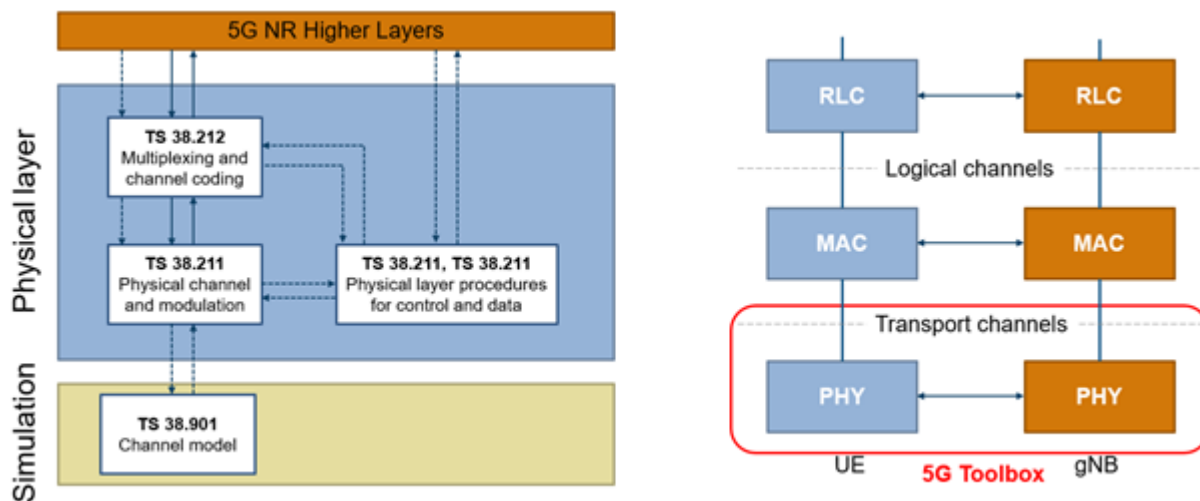


Рисунок 3. Взаимодействие подсистем физического уровня и иллюстрация его размещения в стеке протоколов радиосети.

Рассмотрим основные нововведения стандарта 5G New Radio относительно стандарта предыдущего поколения: введение новых техник формирования сигнала, таких как F-OFDM; введение новых частотных диапазонов в районе миллиметровых волн; применение технологии massive MIMO, новой стратегии формирования частотно-временной ресурсной сетки с переменным интервалом разнесения поднесущих и переменной длительностью временного интервала, новых схем кодирования и модели радиоканала. На рис. 4 представлена антенна massive MIMO разработки Huawei, а также схема частотных диапазонов данного стандарта. Технология massive MIMO позволяет формировать узконаправленные лучи и организовывать высокоскоростной канал в нисходящей линии, направленный в заданную точку зоны покрытия базовой станции.

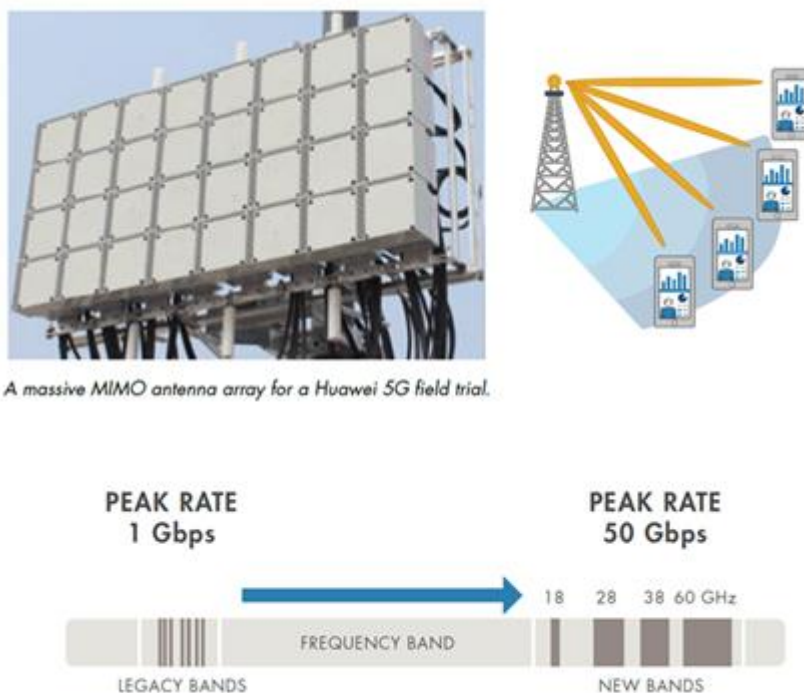


Рисунок 4. Взаимодействие подсистем физического уровня и иллюстрация его размещения в стеке протоколов радиосети.

Завершив краткий обзор стандарта, перейдем к рассмотрению функционала 5G Toolbox в среде моделирования MATLAB. В первую очередь это генерация сигналов 5G New Radio, в результате чего могут быть получены отсчеты сформированного сигнала на низкой частоте. Далее при помощи одной из SDR-платформ, таких как Xilinx Zynq & ADFMCOMM или ADALM-PLUTO, данный сигнал может быть перенесен на рабочую частоту и излучен в радиоэфир. В данном случае речь идет не только про F-OFDM-сигнал, но и непосредственно про полноценный сигнал нисходящей линии связи стандарта 5 поколения. Для начала рассмотрим возможности данного инструментария по генерации F-OFDM-сигналов.

Основным отличием данного способа формирования сигналов от классического ортогонального частотного разделения является то, что поднесущие сигнала разбиваются на поддиапазоны, и к каждому из поддиапазонов применяется фильтрация. Возможность применения данной техники формирования сигнала обеспечивает гибкость частотно-временной ресурсной сетки стандарта пятого поколения. На рис. 5 приводятся диаграммы, иллюстрирующие принцип формирования F-OFDM-сигнала и сравнение амплитудного спектра сигналов F-OFDM и OFDM с одинаковым количеством поднесущих.

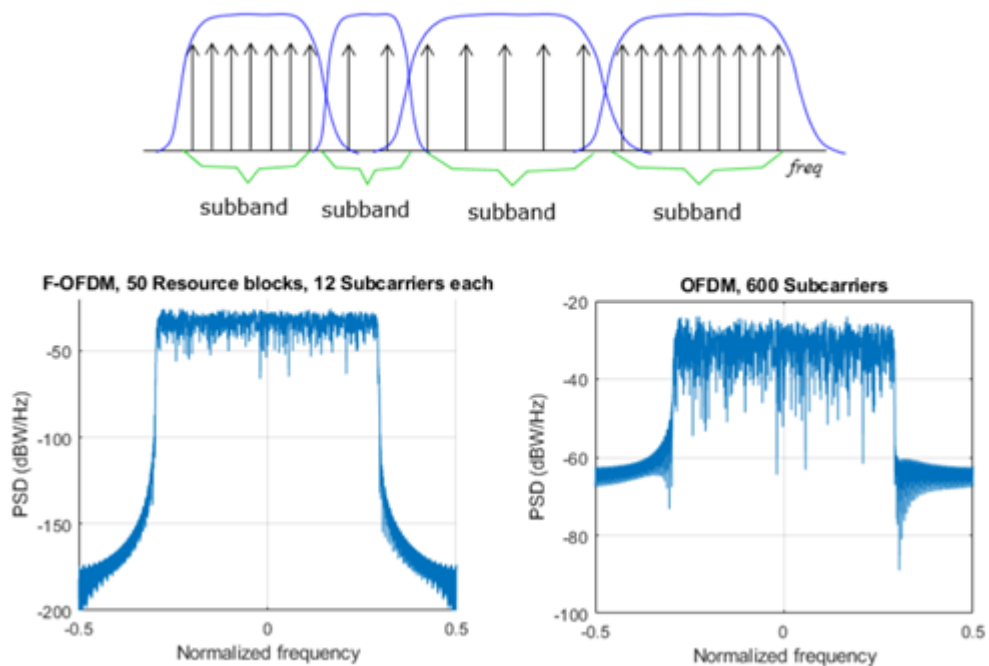


Рисунок 5. Принцип формирования и амплитудные спектры сигналов F-OFDM и OFDM.

Отметим также, что в среде MATLAB-Simulink можно создать адаптированную для генерации HDL-кода модель, реализующую данный способ формирования, и построить прототип данной системы. Примеры модели и прототипа данной системы приведены на рис. 6.

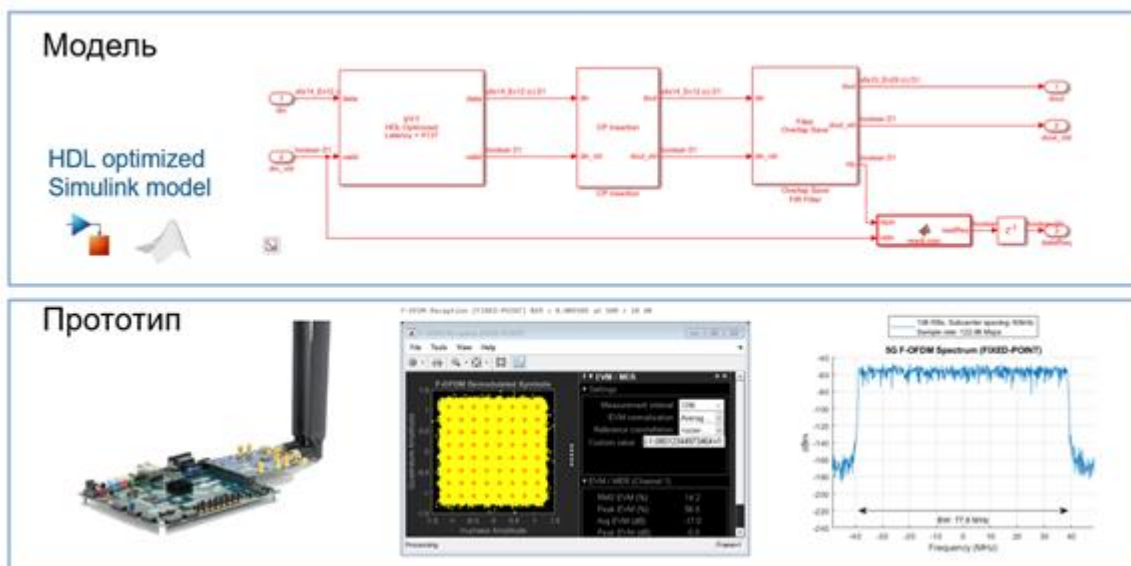


Рисунок 6. Модель, адаптированная для генерации HDL-кода, и прототип, построенный на ее базе.

Далее перейдем к рассмотрению частотно-временной ресурсной сетки стандарта 5 поколения и рассмотрим вопросы генерации сигналов, сформированных в соответствии с построением физического канала нисходящей линии связи. Структура частотно-временной ресурсной сетки приведена на рис. 7.

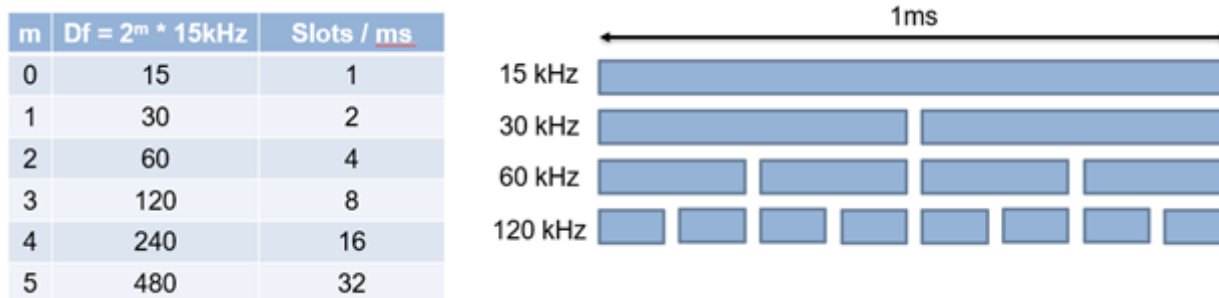


Рисунок 7. Принципы формирования частотно-временной ресурсной сетки стандарта 5 поколения.

В отличие от стандарта связи 4G LTE, где интервал разнесения поднесущих был фиксированным и составлял 15 кГц, в 5G интервал разнесения определяется формулой:

$$\Delta F = 2^m \cdot 15\text{Гц}$$

При увеличении интервала частотного разнесения уменьшается величина временного слота в кратное количество раз, данное нововведение позволяет организовать более гибкую структуру множественного радиодоступа большого количества абонентов. MATLAB 5G Toolbox позволяет формировать полноценный сигнал физического подуровня стандарта New Radio, включающий в себя физические каналы PDSCH (Physical Downlink Shared Channel – физический канал данных нисходящей линии связи), PDCCH (Physical Downlink Control Channel – физический канал управления и контроля), PDBCH (Physical Downlink Broadcast Channel – широковещательный канал, содержащий в себе основную информацию о параметрах работы физического канала данной базовой станции), а также опорные сигналы и последовательности PSS (Primary Synchronization Sequence), SSS (Secondary Synchronization Sequence), и нововведение стандарта 5G – опорный сигнал для демодуляции

DM-RS (Demodulation Reference Signal). Графическое представление сигнала 5G NR, сформированного при помощи 5G Toolbox представлено на рис. 8.

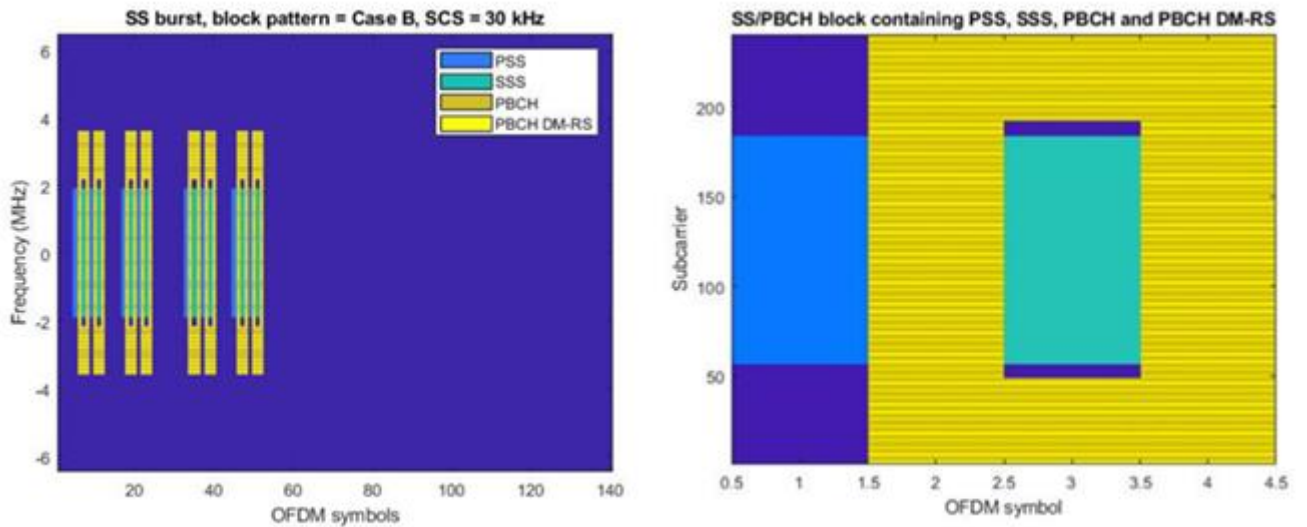


Рисунок 8. Пример генерации сигнала стандарта 5G New Radio при помощи MATLAB.

Стоит отметить, что отсчеты комплексной огибающей данного сигнала по-прежнему доступны и могут быть использованы для физического воспроизводства данного сигнала при помощи SDR-приставок.

Далее кратко рассмотрим один из опорных проектов, представленных в 5G Toolbox, реализующий процедуру поиска соты и выделения MIB (Master Information Block) информации из ее сигнала. Данный опорный проект разделен на приемную и передающую части. Рассмотрим первую, ее блок-схема приведена на рис. 9.



Рисунок 9. Блок-схема передающей части опорного проекта, реализующего входение в синхронизм.

Формируется синхронизационная посылка, затем сигнал проходит через модель антенны и модель канала связи, далее происходит наложение АБГШ (аддитивного белого Гауссовского шума). Затем в работу вступает приемник, который работает со сформированным сигналом «вслепую», то есть в модели ему не передается никакой дополнительной информации, кроме отсчетов сформированного сигнала. Рассмотрим его работу более подробно на блок-схеме, представленной на рис. 10.

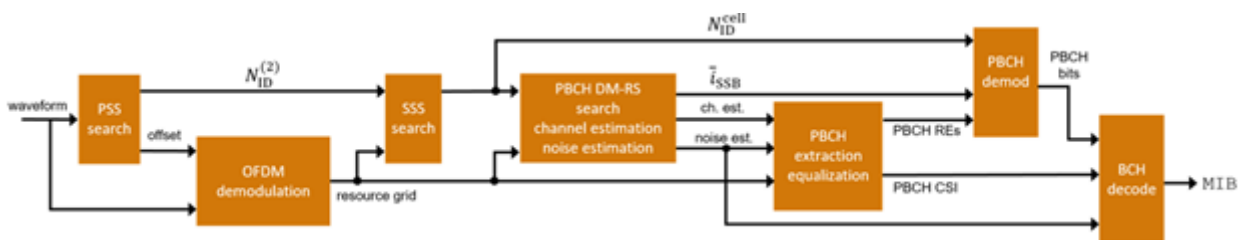


Рисунок 10. Блок-схема приемной части опорного проекта, реализующего входение в синхронизм.

Происходит выделение первичной синхронизационной последовательности, затем демодуляция сигнала OFDM и выделение вторичной синхронизационной последовательности. Далее на основе опорного сигнала DM-RS происходит распаковка, демодуляция и декодирование данных широкополосного канала.

Все функции, описывающие работу данной системы, не являются «черными ящиками», а представляют собой открытый исходный код на языке MATLAB, который может быть конвертирован в код HDL или C (ANSI std.) при помощи встроенных утилит среды, таких как HDL-coder или C-coder.

Помимо прочего 5G Toolbox содержит в себе опорный проект системной модели взаимодействия «точка-точка» (UE-gNb), который может использоваться как стенд для оценки принимаемых в ходе разработки устройств данного стандарта решений, так и эталонный образец для оценки выполнения требований стандарта. Графическая интерпретация данной модели приведена на рис. 11.

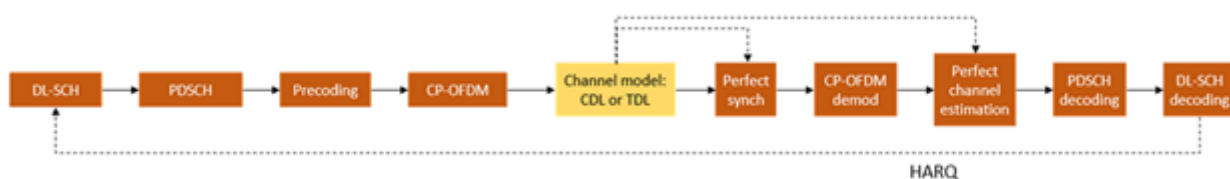


Рисунок 11. Блок-схема системной модели нисходящей линии связи.

**Заключение.** В докладе разобраны ключевые особенности и нововведения стандарта систем мобильного радиодоступа пятого поколения. Основная часть доклада посвящена особенностям организации множественного высокоскоростного доступа, в частности нисходящей линии связи. Рассмотрен инструментарий 5G Toolbox среды моделирования и разработки, а также основные аспекты его применения для разработки систем связи данного стандарта.



## Литература:

1. Стандарт телевидения сверхвысокой четкости BT.2020: Parameter values for ultra-high-definition television systems for production and international exchange program, ITU
2. Ссылка на 5G Toolbox: <https://www.mathworks.com/solutions/wireless-communications/5g.html>
3. Официальный сайт 3GPP: <http://www.3gpp.org/>

## COMMUNICATION SYSTEMS DEVELOPMENT USING MATLAB 5G TOOLBOX

eng. Kiselnikov A.E., eng. Uss M.O., eng., Ph.D. Shidlovsky D.Yu.

ETMC Exponenta,

Yaroslavl Demidov State University

Nowadays the most leading communication systems hardware vendors are conducting development of the equipment prototypes satisfying 5G communication standard requirements. This paper is devoted to reviewing the key features of this standard and the approaches of researching the signal processing techniques and development of the equipment prototypes using MATLAB 5G Toolbox.



### Контакты

**exponenta.ru**

E-mail: **info@exponenta.ru**

Тел.: +7 (495) 009 65 85

Адрес: **115088 г. Москва,**

**2-й Южнопортовый проезд, д. 31, стр. 4**

mathworks.com



© 2012 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See [www.mathworks.com/trademarks](http://www.mathworks.com/trademarks) for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.