

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ SDR-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЗАДАЧ СЕТЕВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ: ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО БЛОКА MIB

*Г.А. Фокин, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, grihafokin@gmail.com;*

*К.Е. Рютин, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ryutin.sut@gmail.com.*

**УДК 621.396.969**

**Аннотация.** Объектом настоящего исследования является SDR-демонстратор технологии позиционирования в сети LTE, разработанный для апробации новых технических решений по повышению точности определения местоположения устройств UE в существующих сетях 4G LTE и в перспективных сетях 5G NR. Результатом настоящего исследования является реализация и экспериментальная апробация формирователя блока MIB стандарта LTE.

**Ключевые слова:** 4G; LTE; SDR; MIB; PBCH; позиционирование.

### SOFTWARE-DEFINED RADIO NETWORK POSITIONING TECHNOLOGY DESIGN: MIB TRANSCEIVER DEVELOPMENT

*Grigoriy Fokin, Doctor of Science, professor, St. Petersburg state university of telecommunications n/a prof. M.A. Bonch-Bruevich;*

*Konstantin Ryutin, St. Petersburg state university of telecommunications n/a prof. M.A. Bonch-Bruevich.*

**Annotation.** The object of this research is a software-defined radio (SDR) LTE network positioning technology prototype design for testing new technical solutions to improve the accuracy of UE location estimation in existing LTE and emerging 5G NR networks. The contribution of this research is MIB software realization and its experimental validation in laboratory conditions.

**Keywords:** 4G; LTE; SDR; MIB; PBCH; positioning.

#### Введение

В области позиционирования пользовательских устройств UE (*User Equipment*) большую роль играет не только точность, но и доступность услуги определения местоположения (ОМП). Позиционирование с использованием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС, *GNSS – Global Navigation Satellite System*) обеспечивает приемлемую точность во многих сценариях [1-2]. Однако, устойчивый прием сигналов ГНСС в неблагоприятных погодных условиях и в плотной городской застройке в условиях отсутствия прямой видимости *NLOS (Non-Line Of Sight)* зачастую невозможен.

В последние годы высокую актуальность и востребованность приобрел метод сетевого позиционирования UE с использованием инфраструктуры базовых станций *eNB (Evolved NodeB)* сотовых сетей подвижной радиосвязи *LTE (Long-Term Evolution)*. Описание данного метода нашло отражение в ряде работ отечественных [1-3] и зарубежных авторов [4-6]. Анализ данных работ позволяет выделить отдельное направление исследований, а именно, использование технологий программно-конфигурируемого радио *SDR (Software-Defined Radio)* и

модельно-ориентированного проектирования для решения задач сетевого позиционирования.

На данный момент уже существует прототип (демонстратор) [7] программно-аппаратной реализации передатчика и приемника системы позиционирования в сети *LTE*, представляющий собой прототипы базовой станции *eNB* и пользовательского устройства *UE*, соответственно. Настоящая статья является продолжением серии работ, посвященных описанию и экспериментальной апробации разработанного *SDR*-демонстратора.

Для выполнения первичных измерений существующий демонстратор реализует передачу и прием таких сигналов, как сигналы синхронизации (*PSS* – *Primary Synchronization Signal* и *SSS* – *Secondary Synchronization Signal*), а также опорных сигналов (*CRS* – *Cell-Specific Reference Signal* и *PRS* – *Positioning Reference Signal*).

В текущей реализации демонстратора для приема перечисленных выше сигналов и сбора первичных измерений необходимо вручную выставлять и контролировать параметры нисходящего канала связи *DL* на стороне приемника (*UE*). Для снятия данного ограничения и перехода к автоматической настройке параметров нисходящего канала связи *DL* между прототипами *eNB* и *UE* необходима программная реализация и верификация процедур передачи главного информационного блока *MIB* (*Master Information Block*) вместе с другими необходимыми предварительными процедурами приемного радиointерфейса.

### Процедуры приема и обработки опорных сигналов стандарта *LTE*

Анализ методов приема опорных сигналов стандарта *LTE* для сетевого позиционирования имеет своим результатом обоснование структуры устройства и последовательность соответствующих этапов и процедур обработки. Рисунок 1 иллюстрирует укрупненную структуру *SDR* приемника опорных сигналов *LTE* для задач позиционирования «на лету» [8].

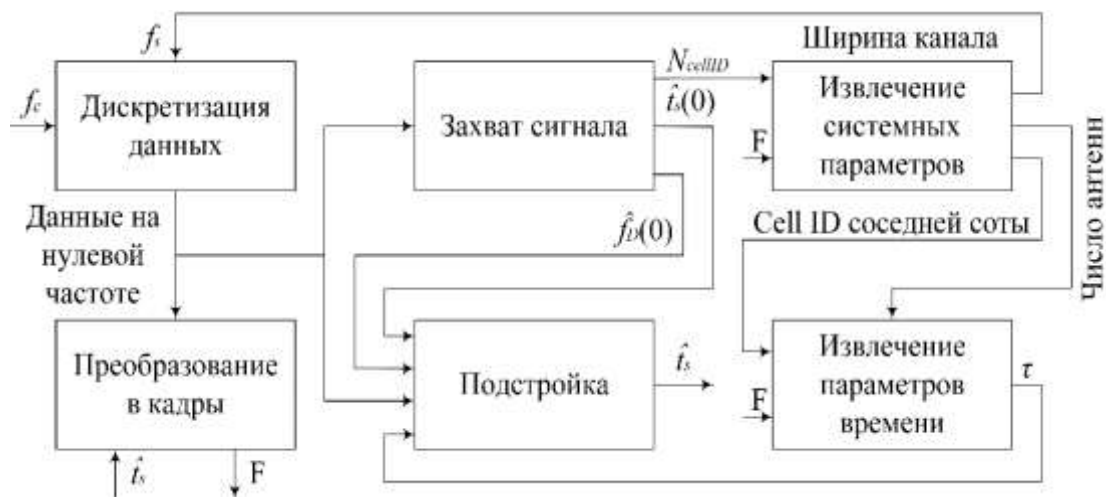


Рисунок 1

На первом этапе выполняется захват радиосигнала на несущей центральной частоте  $f_c$ , его перенос в область информационных частот (*baseband*) и дискретизация с частотой  $f_s$ . Захват включает грубую оценку времени прихода  $\hat{t}_s(0)$  и доплеровского сдвига частоты  $\hat{f}_D(0)$  для начальной кадровой синхронизации путем вычисления корреляционных функций принятого сигнала с локальными копиями опорных сигналов первичной *PSS* и вторичной *SSS* синхронизации. Также на первом этапе определяется идентификатор соты *Cell ID*.

На втором этапе производится преобразование выборок принятого *OFDM* сигнала в частотно-временную структуру кадра для последующего извлечения системных параметров из широковещательных каналов на физическом уровне *LTE*, включая ширину канала  $F$ .

На третьем этапе осуществляется уточнение захвата и извлечение параметров времени прихода *TOA*  $\tau$  по опорным сигналам *CRS*.

На четвертом этапе реализуются контуры подстройки для отслеживания кратковременных изменений времени прихода сигнала *TOA*  $\hat{t}_s$ .

Рассмотрим далее методы и процедуры обработки опорных сигналов на каждом из этапов.

### Захват и грубая подстройка

При первоначальном приеме радиосигнала *LTE* пользовательскому устройству *UE* необходимо, в первую очередь, осуществить грубую подстройку к излучаемым базовыми станциями *eNB* широковещательным каналам путем захвата сигналов первичной *PSS* и вторичной *SSS* синхронизации и грубой подстройки к ним [9]. С точки зрения дискретизированного *baseband*-сигнала на нулевой частоте, момент начала захвата может приходиться на произвольный интервал *OFDM* символа произвольного кадра стандарта *LTE*. Рисунок 2 иллюстрирует поток выборок принимаемого сигнала и произвольный момент начала захвата.

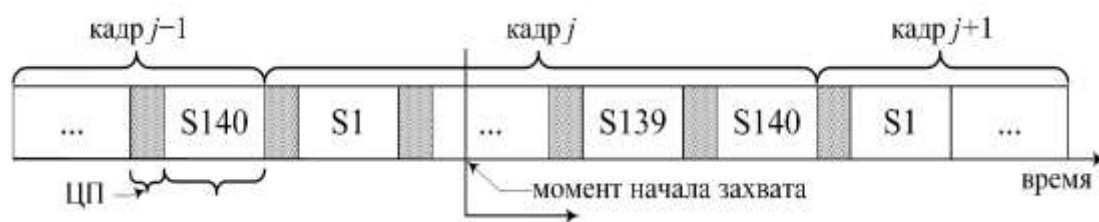


Рисунок 2

Для вхождения в режим приема *SDR* устройству необходимо предварительно установить начало *OFDM* символа с тем, чтобы исключить циклический префикс и затем вычислить быстрое преобразование Фурье (БПФ, *FFT – Fast Fourier Transform*) для преобразования последовательного потока выборок в структуру кадра стандарта *LTE* [10]. Для установления начала *OFDM* символа приемное устройство осуществляет поиск и обнаружение сигнала первичной синхронизации *PSS* в кадре. Используя ортогональные свойства последовательностей Задова-Чу, приемное устройство вычисляет корреляционную функцию принятого сигнала со всеми возможными локальными копиями последовательностей *PSS* согласно выражению [11]:

$$\mathcal{R}(m) = \sum_{n=0}^{N_f-1} r(n) s_{PSS}^*(n+m)_{N_f} = r(m) \odot_{N_f} s_{PSS}^*(-m)_{N_f}, \quad (1)$$

где:  $r(n)$  – принятый сигнал;  $s_{PSS}(n)$  – локально сгенерированная копия сигнала *PSS* во временном домене;  $N_f = T_f/T_s$  – длина кадра (в числе *OFDM* символов);  $(\cdot)^*$  – оператор комплексного сопряжения;  $(\cdot)_{N_f}$  – оператор циклического сдвига;  $\odot_N$  – оператор циклической свертки.

Пусть  $R(k) = \text{FFT}\{r(n)\}$  и  $S_{PSS}(k) = \text{FFT}\{s_{PSS}(n)\}$ , тогда справедливо выражение:

$$\mathcal{R}(m) = \text{IFFT}\{R(k)S_{PSS}^*(k)\} \quad (2)$$

Идентификатор соты в пределах группы  $N_{ID}^{(2)}$  определяется по максимальному пику корреляционной функции  $\mathcal{R}(m)$ . Представленная выше корреляционная функция  $\mathcal{R}(m)$  на основе БПФ используется также и для обнаружения вторичного сигнала синхронизации  $SSS$ . Идентификатор группы сот  $N_{ID}^{(1)}$  также определяется по максимальному пику корреляционной функции  $\mathcal{R}(m)$ . После обнаружения первичного  $PSS$  и вторичного  $SSS$  сигналов синхронизации, пользовательское устройство  $UE$  может установить время начала кадра  $LTE$  и уникальный идентификатор соты  $Cell ID N_{ID}^{Cell}$  базовой станции  $eNB$ .

Рисунок 3 иллюстрирует структуру блока захвата и грубой подстройки.

Первичный сигнал синхронизации  $PSS$  передается два раза за время передачи кадра, поэтому после реализации процедуры захвата на интервале длительности кадра в 10 мс можно наблюдать два корреляционных пика. Последовательности  $PSS$ , излучаемые базовой станцией  $eNB$  в 0-м и 10-м слотах, идентичны, поэтому пользовательское устройство  $UE$  из полученных корреляционных пиков сможет извлечь лишь моменты начала  $OFDM$  символов, но не их номера. Каждый опорный сигнал стандарта  $LTE$  передается на специально выделенных ему поднесущих и  $OFDM$  символах в частотно-временном домене кадра, поэтому пользовательскому устройству  $UE$  недостаточно знать только начало  $OFDM$  символа. Для установления номеров  $OFDM$  символов в каждом принимаемом кадре пользовательское устройство  $UE$  запускает вычисление корреляционной функции во временном домене для вторичных сигналов синхронизации  $SSS$ . Последовательность вторичного сигнала синхронизации формируется с учетом номера слота [7], поэтому после вычисления корреляционного пика для  $SSS$  на интервале передачи кадра  $UE$  сможет установить номер  $OFDM$  символа в слоте.

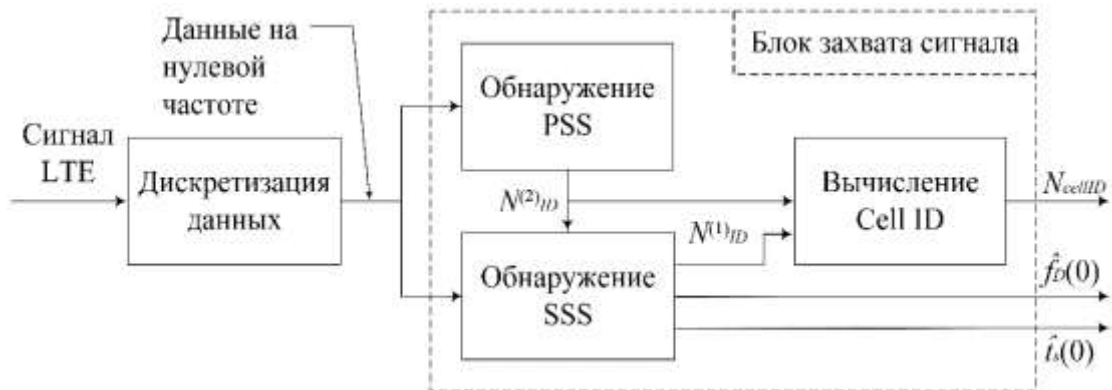


Рисунок 3

Опорные сигналы  $PSS$  и  $SSS$  занимают примерно 1 МГц полосы, поэтому при вычислении корреляционных функций полученные в результате корреляционные пики могут достаточно грубо идентифицировать границы кадра  $LTE$  в условиях многолучевого РРВ. Смещенную оценку временных границ кадра  $LTE$ , установленную по опорным сигналам синхронизации  $PSS$  и  $SSS$ , можно уточнить по опорным сигналам  $CRS$ , которые занимают значительно более широкую полосу частот. Для обработки сигналов  $CRS$  «на лету» пользовательскому устройству  $UE$  необходимо знать занимаемую принимаемым сигналом  $LTE$  полосу частот. Однако пользовательскому устройству  $UE$ , не являющемуся абонентом данной сети  $LTE$ , полоса частот, используемая данным

оператором изначально неизвестна. Поэтому *UE* сначала работает на прием в предположении, что используется минимальная полоса частот 1,4 МГц, осуществляет захват сигналов *PSS* и *SSS*, вычисляет *Cell ID*. Далее *UE* выполняет преобразование принятых выборок *OFDM* сигнала в частотно-временную структуру кадра для извлечения системных параметров из широковещательных каналов на физическом уровне *LTE*, в том числе, занимаемой принимаемым сигналом *LTE* полосы частот. После извлечения полосы частот *UE* осуществляется уточнение параметров времени прихода уже по опорным сигналам *CRS*.

### Извлечение системных параметров

После захвата и грубой подстройки пользовательскому устройству *UE* необходимо установить ряд параметров сигналов, излучаемых базовыми станциями *eNB* сети *LTE* данного оператора. Рисунок 4 иллюстрирует структуру блока извлечения системных параметров. Для решения задач сетевого позиционирования интерес представляют параметры ширины полосы частот, число передающих антенн и идентификаторы сот *Cell ID* соседних базовых станций. Эти параметры пользовательское устройство *UE* может извлечь из блоков системной информации *MIB* и *SIB* (*System Information Block*), которые транслируются в физическом вещательном канале *PBCH* (*Physical Broadcast Channel*) и физическом разделяемом канале «вниз» *PDSCH* (*Physical Downlink Shared Channel*) соответственно.



Рисунок 4

### Декодирование блока *MIB*

Для использования в задачах сетевого позиционирования более широкополосных по сравнению с *PSS* и *SSS* опорных сигналов *CRS* пользовательскому устройству *UE* необходимо определить ширину полосы частот принимаемого из радиоэфира «на лету» сигнала *LTE*. Параметр ширины полосы частот вместе с числом передающих антенн содержится в блоке *MIB*, который декодируется *UE* в первую очередь. Чтобы осуществить передачу *MIB* в сети *LTE* необходимо закодировать данный блок системной информации в каналах всех трех уровней: логическом (*BCCH*), транспортном (*BCH* – *Broadcast Channel*) и физическом (*PBCH*).

Кодирование *MIB* в логическом канале *BCCH* представляет собой формирование информационного пакета данных. Сообщение *MIB* должно состоять ровно из 24-х бит. Более длинные сообщения усекаются до 24-х бит, а более короткие сообщения дополняются нулями до нужной длины.

Пакет *MIB* состоит из следующих полей [12]:

а) Первые три бита отвечают за ширину полосы нисходящего канала связи  $DL$ , представляют собой двоичное число от 000 до 101, что соответствует множеству полос {6, 15, 25, 50, 75, 100} (в количестве ресурсных блоков); если используется нестандартная ширина полосы (не принадлежит указанному множеству) в первые три бита сообщения  $MIB$  устанавливаются единицы.

б) Следующий бит отвечает за длительность физического канала  $PHICH$  (*Physical channel HybridARQ Indicator Channel*) для передачи  $HARQ ACK/NACK$  в ответ на передачу информации по восходящей линии связи; может быть нормальным или расширенным, соответственно, 0 или 1.

в) Следующие два бита отвечают за групповой множитель  $HICH$  (*HybridARQ Indicator Channel*); задается как двоичное число от 00 до 11, что соответствует множителям 1/6, 1/2, 1, или 2.

г) Далее идут восемь бит, кодирующие системный номер кадра  $SFN$ ; несмотря на то, что согласно спецификации, номер кадра может принимать значения от 0 до 1023 (10 бит), стоит отметить, что внутри  $MIB$  системный номер кадра хранится, как разделенный на 4 и округленный вниз до ближайшего целого.

д) Следующие 10 бит являются зарезервированными и равны нулю.

На первом этапе выполняется проверка циклическим избыточным кодом  $CRC$  (*Cyclic Redundancy Code*) длины  $L = 16$  с использованием полинома  $g_{CRC}(D) = D^{16} + D^{12} + D^5 + 1$ . Число передающих антенн не транслируется непосредственно в блоке  $MIB$  из 24 бит; вместо этого данный параметр содержится в маске  $CRC$ ; маска представляет собой последовательность, которая используется для скремблирования битов  $CRC$ , добавляемых к блоку  $MIB$ . В зависимости от набора передающих антенн маска  $CRC$  состоит из: а) всех нулей для одной передающей антенны; б) всех единиц для двух передающих антенн; в) чередования нулей и единиц [0,1,0,1, ..., 0,1] для четырех передающих антенн. Для установления числа передающих антенн из принятого сигнала «на лету» пользовательское устройство  $UE$  выполняет слепой поиск по всем вариантам набора передающих антенн. Затем, путем сравнения локально сгенерированных последовательностей  $CRC$ , скремблированных маской  $CRC$  с принятой последовательностью  $CRC$ , устанавливается число передающих антенн.

На втором этапе выполняется канальное кодирование с использованием сверточного кодера с длиной ограничения 7 и скоростью кодирования 1/3 (рисунок 5). Кодер инициализируется последними шестью информационными битами входного потока.

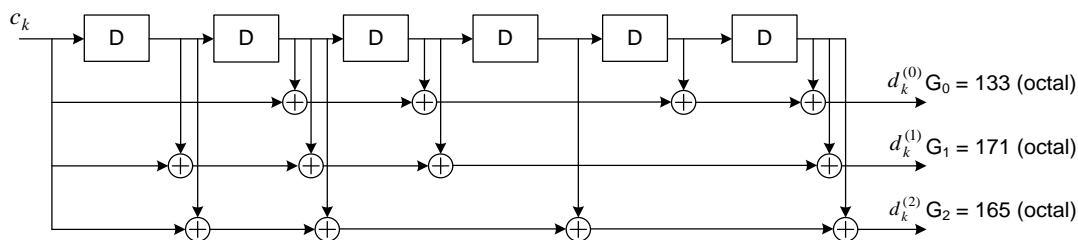


Рисунок 5

Для декодирования канального кода в принятом блоке  $MIB$  используется метод, показанный на

рисунок 6 [13]: сначала принятая последовательность повторяется один раз; затем расширенная последовательность декодируется декодером Витерби; в

завершении средняя часть декодированной последовательности подвергается операции циклического сдвига.

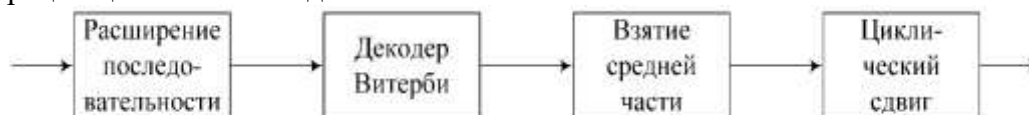


Рисунок 6

Далее на третьем этапе закодированные сверточным кодером биты проходят процедуру согласования скоростей (

рисунок 7). На этапе согласования скоростей закодированные данные сначала перемежаются, после чего потоки результатов перемежения повторяются для получения массива длиной 1920 бит [14].

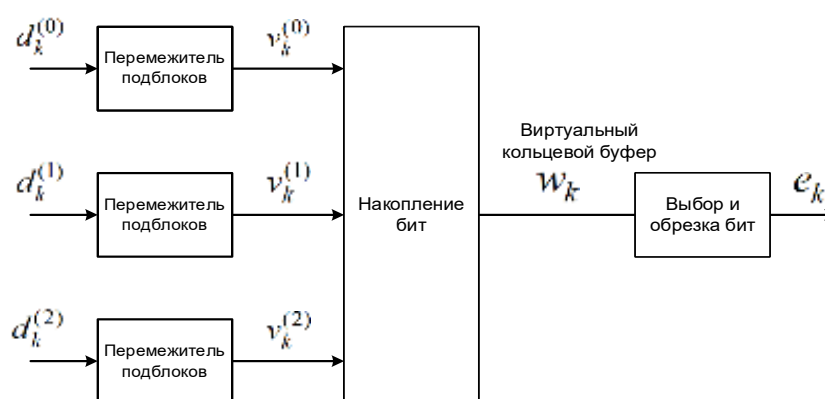


Рисунок 7

На четвертом этапе после согласования скоростей выполняется скремблирование потока псевдослучайной последовательностью, которая инициализируется идентификатором соты *Cell ID*; в результате получается уникальный сигнал для обнаружения всех базовых станций *eNB*.

На пятом этапе над последовательностью из 1920 битов производится квадратурная фазовая манипуляция *QPSK* (*Quadrature Phase Shift Keying*), результатом которой являются 960 комплексных модуляционных символов.

Данные символы на шестом этапе отображаются на различные слои для реализации разнесенной передачи.

После отображения на слои на седьмом этапе выполняется пространственно-временное кодирование *STC* (*Space-Time Coding*), которое служит для компенсации замираний при многолучевом *PPV*.

В заключении, на восьмом этапе комплексные символы отображаются на предварительно выделенные для передачи блока *MIB* поднесущие [14]. Блок *MIB* кодируется и передается на четырех последовательных символах во втором слоте кадра; данные блока *MIB* не занимают ресурсные элементы, выделенные для передачи опорных сигналов.

Рисунок 8 иллюстрирует процедуры кодирования блока *MIB* согласно [15].



Рисунок 8

### Декодирование блока *SIB*

Пользовательское устройство при захвате сигнала *LTE* производит установление идентификаторов сот  $Cell ID N_{ID}^{cell}$  доступных базовых станций *eNB*, излучаемые радиосигналы которых имеют наибольшую мощность при приеме *UE*. Для одновременного приема нескольких сигналов *eNB* пользовательское устройство может осуществлять перебор по всем  $N_{ID}^{cell}$ , вычисляя корреляцию по всем опорным сигналам *PSS*, определяя идентификатор соты в пределах группы  $N_{ID}^{(2)} \in \{0,1,2\}$  и по всем опорным сигналам *SSS*, определяя идентификатор группы  $N_{ID}^{(2)} \in \{0, \dots, 167\}$ . Однако данный подход ограничивает число *eNB* одним оператором, сигналы которых *UE* может использовать для позиционирования при одновременном приеме в одном диапазоне частот данного оператора. Другим подходом является извлечение информации об идентификаторах  $N_{ID}^{cell}$  соседних *eNB* из блока *SIB*, транслируемого основной базовой станцией. Базовые станции других операторов излучают свои опорные сигналы в других диапазонах частот, поэтому данный подход, использующий *SIB*, может использоваться для извлечения идентификаторов  $N_{ID}^{cell}$  соседних базовых станций других операторов. Зная идентификаторы *eNB* и их координаты, *UE* может решить задачу определения своего местоположения.

Блок *SIB* содержит следующую информацию: а) базовой станции *eNB*, к которой подключено *UE*; б) соседних базовых станций *eNB* данного оператора, работающих как в данном диапазоне частот, так и в других диапазонах частот; в) в соседних сотах других сетей, например, *UMTS* и *GSM*; г) другую информацию. Блок *SIB* имеет 17 различных форматов от *SIB1* до *SIB17*, которые передаются по разным расписаниям. *SIB1*, передаваемый в субкадре 5 каждого четного кадра, содержит информацию о расписании остальных блоков *SIB*. Данная информация может быть использована для извлечения расписания передачи блока *SIB4*, в котором содержатся сведения об идентификаторах  $N_{ID}^{cell}$  соседних сот базовых станций, работающих в данном диапазоне частот. Для декодирования *SIB1* пользовательское *UE* проходит через несколько этапов. На каждом этапе *UE* необходимо декодировать физический канал для извлечения параметра, который требуется для выполнения следующих этапов.



Рисунок 9



Рисунок 9 иллюстрирует последовательность процедур обработки в физических каналах «вниз» *DL* стандарта *LTE*. Несмотря на общую последовательность процедур обработки в *DL*, для каждого физического канала «вниз» отдельные процедуры обработки отличаются.

Демодуляция *PCFICH* и декодирование *CFI*. При демодуляции физического канала управления индикатора формата *PCFICH* (*Physical Control Format Indicator Channel*) пользовательское устройство *UE*, в первую очередь, извлекает индикатор формата *CFI* (*Control Format Indicator*). Индикатор *CFI* показывает, сколько ресурсных элементов *RE* отводится на физический канал управления «вниз» *PDCCH* (*Physical Downlink Control Channel*); *CFI* может принимать значения 1, 2 или 3. Для декодирования *CFI* пользовательское устройство сначала обнаруживает в кадре *LTE* 16 ресурсных элементов канала *PCFICH*. Затем *UE* выполняет процедуры в обратном порядке по сравнению с последовательностью на

рисунок 9. Результатом декодирования является последовательность из 32 бит. Последовательность, которая может принимать один из трех возможных вариантов, отображается на значение *CFI*.

При использовании канала 1,4 МГц *PDCCH* может занимать от 2 до 4 *OFDM* символов; в остальных случаях (3 МГц, 5 МГц, 10 МГц, 15 МГц и 20 МГц) – от 1 до 3 *OFDM* символов. Размер *PDCCH* канала является динамической величиной и зависит от количества активных соединений. Канал *PCFICH* занимает 16 ресурсных элементов в первом символе каждого подкадра. Эти 16 элементов разбиваются на четыре группы по четыре элемента. Положение групп зависит от ширины канала и физического идентификатора сектора *PCI* (*Physical Cell Identity*). Для передачи *PCFICH* канала используется *QPSK* модуляция, таким образом, в 16 ресурсных элементах можно передать 32 бита. В этих 32-х битах передается *CFI*, который описывает размер *PDCCH* канала в текущем субкадре. Для 1,4 МГц к передаваемому значению *UE* прибавляет единицу; для остальных случаев используется значение, которое передавалось [16].

Демодуляция *PDCCH* и декодирование *DCI*. Зная индикатор *CFI*, пользовательское устройство *UE* может идентифицировать ресурсные элементы *RE* канала *PDCCH* и демодулировать их, получив в результате блок битов *DCI* (*Downlink Control Information*) о канале управления «вниз». Упаковка этих бит может осуществляться в различных форматах на стороне *eNB* и не сообщается *UE*. Для распаковки блока битов *DCI* пользовательское устройство выполняет слепой поиск по всем различным форматам. При этом *UE* проверяет прикрепленные *CRC* биты, и если эти биты скремблированы с помощью определенной последовательности, то этот *DCI* предназначен для данного *UE* и содержит информацию о том, где именно передаются его данные в физическом разделяемом канале «вниз» *PDSCH* (*Physical Downlink Shared Channel*).

Демодуляция *PDSCH* и декодирование *SIB*. Проанализированный индикатор *DCI* обеспечивает *UE* конфигурацию соответствующих ресурсных элементов *RE* физического разделяемого канала «вниз» *PDSCH*, который содержит *SIB*. Биты блока *SIB* декодируются с использованием декодера *ASN.1* (*Abstract Syntax Notation One*), который извлекает системную информацию, передаваемую базовой станцией *eNB* в блоке *SIB*.

Рассмотрев основные процедуры приема и обработки опорных сигналов, включая кодирование блока *MIB*, рассмотрим далее порядок их верификации посредством лабораторных испытаний.

## Лабораторные испытания

Лабораторный стенд (

рисунок 10) состоит из:

1. Средства объективного контроля, а именно – векторного анализатора сигналов *Agilent 89600 Vector Signal Analyzer*.
2. ПК с предустановленным СПО *Agilent 89600 Vector Signal Analyzer* [17] для работы с данным анализатором. Анализатор подключен к этому ПК по интерфейсу *FireWire*.
3. Ноутбука с предустановленным СПО *MATLAB*, на котором запущены скрипты формирователя рассматриваемых сигналов.
4. Передающей *SDR*-платы *Ettus USRP B210* [18], подключенной к ноутбуку, в СПО которого формируются сигналы.
5. Коаксиального кабеля (1 м), соединяющего передающий антенный порт *SDR*-платы с входным портом анализатора.



Рисунок 10

Лабораторные испытания заключались в анализе ресурсной сетки *OFDM*-сигнала на предмет наличия в ней сформированного канала *PBCH*, а также в контроле правильности декодирования пакета *MIB* при различных заранее заданных параметрах полей этого пакета.

Также, для формирования сигналов синхронизации и опорных сигналов, был задан идентификатор соты *Cell ID*, равный 9. Идентификатор соты  $N_{ID}^{cell} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)}$  однозначно определяется числом  $N_{ID}^{(1)}$  в диапазоне от 0 до 167, которое определяет идентификатор группы сот, и числом  $N_{ID}^{(2)}$ , находящимся в пределах от 0 до 2 и определяющим идентификатор соты в пределах группы.

Вместе со всем перечисленным была задана нормальная длина циклического префикса.

В рамках испытаний проводилось произвольное изменение полей пакета *MIB* с последующим контролем декодированной информации в программе, работающей с векторным анализатором сигналов *Agilent 89600 Vector Signal Analyzer*. Окно данной программы целиком показано на рисунок 11.

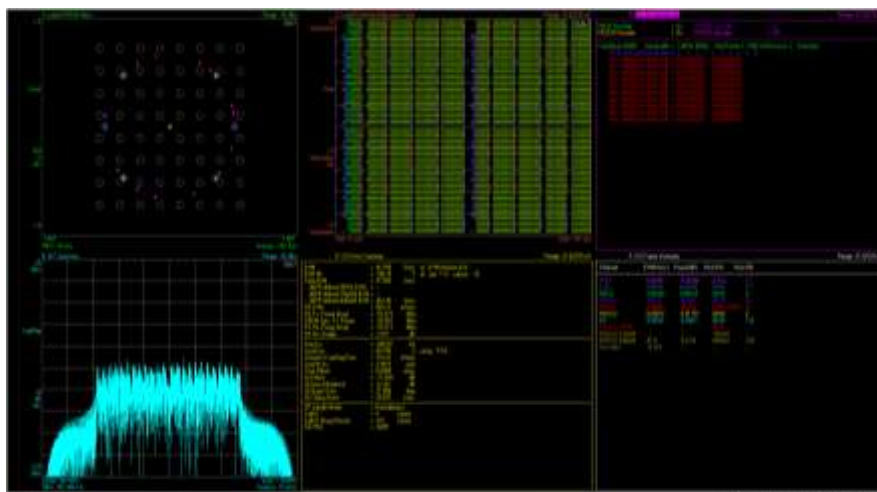


Рисунок 11

В качестве примера проверки корректности работы формирователя на скриншотах ниже (

рисунок 12 и

рисунок 13) представлена часть окна программы *Agilent 89600 Vector Signal Analyzer*, в которой показана декодируемая информация из канала *PBCH*. В ходе лабораторных испытаний производилось изменение такого параметра, как длительность *PHICH* с расширенной (*Extended*) на нормальную (*Normal*), также производилось изменение группового множителя *HICH* с 2 на 1.

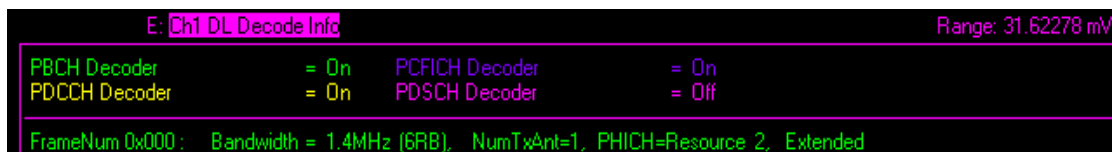


Рисунок 12

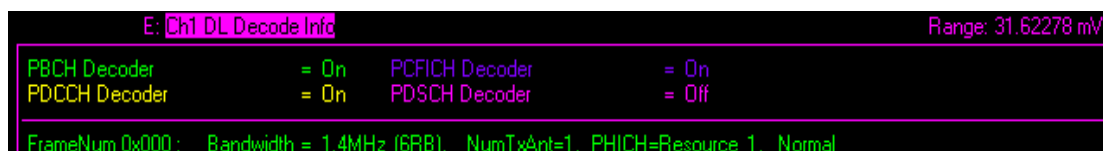


Рисунок 13

В той части окна программы, в которой указан идентификатор соты (рисунок 14), видно, что *Cell ID* равен 9. Это значение совпадает с установленным предварительно. Более того, видно, что совпадают  $N_{ID}^{(1)}$  и  $N_{ID}^{(2)}$ , равные 3 и 0, соответственно, которые однозначно соответствуют идентификатору соты 9. Также наблюдается корректное декодирование длины циклического префикса (*Normal*) и соответствие опорных сигналов позиционирования *PRS* стандартной спецификации *3GPP 36.211* [14].



Рисунок 14

Анализируя полученные результаты работы средств объективного контроля в ходе лабораторных испытаний, можно сделать вывод о корректности реализации процедур формирования широкополосного канала *PBCH*, в котором передаются пакеты *MIB*. Кроме того, можно сделать вывод о корректности формирования сигналов синхронизации (*PSS* и *SSS*) и опорных сигналов (*CRS* и *PRS*).

### **Заключение**

В результате данного исследования был реализован и апробирован формирователь главного информационного блока *MIB* стандарта *LTE*. Реализованный на *SDR*-демонстраторе формирователь блока *MIB* позволяет извлекать параметр ширины полосы пропускания и проводить дальнейшие испытания процедур приема опорных сигналов *CRS* макетом пользовательского устройства в полевых условиях. Направлением дальнейших исследований является реализация полученного кодера главного блока служебной информации *MIB* на ПЛИС, а также реализация декодера блоков *MIB* средствами СПО *MATLAB*.

### **Литература**

1. Фокин Г.А. Технологии сетевого позиционирования. Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2020. – 558 с.
2. Фокин Г.А. Технологии сетевого позиционирования 5G. Москва: Горячая Линия – Телеком, 2021. – 456 с.
3. Фокин Г.А. Комплекс моделей и методов позиционирования устройств в сетях пятого поколения. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.12.13. Санкт-Петербург, 2021. – 499 с.
4. Zekavat R., Buehrer R.M. Handbook of position location: Theory, practice and advances. John Wiley & Sons, 2019. – 1376 p.
5. Campos R. S., Lovisolo L. RF Positioning: Fundamentals, Applications, and Tools. Artech House, 2015. – 369 p.
6. Sand S., Dammann A., Mensing C. Positioning in Wireless Communications Systems. Wiley, 2014. – 276 p.
7. Фокин Г.А., Волгушев Д.Б., Харин В.Н. Использование SDR технологии для задач сетевого позиционирования. Формирование опорных сигналов LTE // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2022. – Т. 16. – № 5. – С. 28-47.
8. Kassas Z.M., Shamaei K., Khalife J. SDR for navigation with LTE signals. Patent US11187774B2. United States. University of California. Publication 30.11.2021.
9. Гельгор А.Л., Павленко И.И., Горлов А.И., Фокин Г.А., Попов Е.А., Лаврухин В.А., Сиверс М.А. Первичная синхронизация с базовыми станциями LTE // Электромагнитные волны и электронные системы, 2014. – Т. 19. – № 7. – С. 54-62.
10. Van de Beek J.J., Sandell M., Borjesson P.O. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems // IEEE Transactions on Signal Processing, 1997. – V. 45. – № 7. – P. 1800-1805.
11. Shamaei K. Exploiting Cellular Signals for Navigation: 4G to 5G. University of California, Irvine, 2020.
12. 3GPP TS 36.331 V17.1.0 (2022-03) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 17).
13. Wang Y.-P.E., Ramesh R. To bite or not to bite-a study of tail bits versus tail-biting // Proceedings of PIMRC '96 - 7th International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Communications, 1996. – V. 2. – P. 317-321.
14. 3GPP TS 36.211 V16.7.0 (2021-12). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 17).

15. 3GPP TS 36.212 V17.1.0 (2022-03). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding (Release 17).
16. Физический канал PCFICH. [Электронный ресурс]. URL: <http://anisimoff.org/lte/physical/pcfich.html> (Дата обращения 28.10.2022).
17. Agilent 89600 Vector Signal Analyzer. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.keysight.com/us/en/products/software/pathwave-test-software/89600-vsa-software.html> (Дата обращения 11.11.2022).
18. USRP B210 (Board Only). Ettus Research. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/> (Дата обращения 11.11.2022).