

УДК 621.391

Обнаружение и идентификация базовых станций сетей сотовой связи 5G

Манелис В. Б., Козьмин В. А., Сладких В. А.

Постановка задачи: последние годы ознаменовались появлением и активным внедрением систем сотовой связи пятого поколения 5G. Необходимость выявления несанкционированно работающих базовых станций (БС), решения вопросов электромагнитной совместимости, проверки соблюдения частотно-территориального плана требует для операторов и служб радиоконтроля инструментов анализа сигналов БС 5G. **Целью работы** является разработка комплекса процедур приема и обработки сигналов, необходимого для обнаружения и идентификации БС 5G при осуществлении радиоконтроля. **Новизна:** новизной представленного общего комплекса процедур приема и обработки сигналов базовых станций, является учет специфики и особенностей сигнально-кодовых конструкций, характерных именно для стандарта радиосвязи 5G, в частности, особенностей приема широкополосного канала, контрольного канала и выделения системных идентификаторов из сообщения совместного канала. **Результат:** разработанный комплекс процедур приема и обработки сигнала БС позволяет выполнить обнаружение и идентификацию всех обнаруженных БС 5G и предназначен для реализации в цифровом радиоприемном устройстве с полосой одновременного анализа от 27 до 202 МГц. На его основе построен российский анализатор сигналов 5G. **Практическая значимость:** анализатор может быть использован для планирования систем 5G на этапах развертывания и ввода в эксплуатацию, анализа зон покрытия, а также для радиоконтроля существующих сетей 5G с целью проверки параметров передатчиков и соответствия частотно-территориальному плану.

Ключевые слова: 5G, базовая станция, анализатор сигнала, идентификационные параметры, синхроблок, широкополосный канал, контрольный канал, SIB1.

Введение

В последние десятилетия происходит интенсивное развитие технологий сотовых систем связи, связанное с необходимостью повышения скорости передачи данных и предоставлением пользователям новых сервисов высокого качества. На смену системам второго поколения GSM (Global System for Mobile Communications), IS-95 (Interim Standard 95) пришли широкополосные системы третьего (UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), cdma2000 (Code Division Multiple Access)) и четвертого (LTE (Long-Term Evolution)) поколений. Они ориентированы в первую очередь на пакетную передачу данных, что позволило предоставить абонентам такие новые услуги, как высокоскоростной Интернет, видеоконференции, мобильное телевидение и др. Несколько лет назад (2018-2019 г.) закончена разработка стандарта пятого поколения сотовой связи (5G). Эти системы обладают большой гибкостью и вариативностью в плане ис-

Библиографическая ссылка на статью:

Манелис В. Б., Козьмин В. А., Сладких В. А. Обнаружение и идентификация базовых станций сетей сотовой связи 5G // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 3. С. 152-178. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-3-152-178

Reference for citation:

Manelis V. B., Kozmin V. A., Sladkikh V. A. Detection and identification of base stations of 5G cellular networks. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 3, pp. 152-178 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-3-152-178

пользуемых значений несущей, ширины полосы и параметров передаваемого сигнала. Системы 5G могут использовать две частотные области: FR1 (Frequency Range) – от 410 до 7125 МГц и FR2 – от 24250 до 52600 МГц. Широкая полоса сигнала (до 100 МГц – для FR1 и до 400 МГц – для FR2) позволяет обеспечить более высокую скорость передачи данных и пропускную способность системы. Малая длина пакета обуславливает низкую задержку при передаче сигнала. Основные предполагаемые области применения – связь между машинными устройствами, управление беспилотными транспортными средствами, интернет вещей.

В настоящее время во многих странах мира, в том числе в России началось развертывание высокоскоростных сетей на основе стандарта 5G [1-6]. Для планирования и эксплуатации этих сетей, проверки соответствия требований к параметрам передатчиков, анализа зон покрытия, проверки соблюдения частотно-территориального плана необходимо регулярно проводить анализ параметров радиосигналов базовых станций (БС) 5G.

В [7-13] были описаны российские анализаторы сигналов базовых станций сетей GSM, IS-95, cdma2000, UMTS, LTE.

Существующие анализаторы сигналов сетей 5G можно разделить на два класса. К первому классу анализаторов можно отнести портативные спектроанализаторы, обладающие небольшим функционалом анализа сигналов БС 5G. Среди них можно выделить сканеры китайской компании Transcom Instruments [14], приемники компании PCTEL [15], российский анализатор БС 5G VIAVI CellAdvisor 5G CA5000 [16]. Данные анализаторы позиционируются как устройства для тестирования работы БС 5G на этапах развертывания и оптимизации сетей, поиска и устранения неисправностей, построения карты электромагнитной доступности БС. Однако эти анализаторы не обеспечивают прием идентификационных параметров БС системного уровня, а некоторые из них не имеют возможности автоматического поиска сигналов БС 5G в частотной области. Поэтому анализаторы первого класса не могут использоваться для решения задач радиоконтроля.

Ко второму классу относятся полнофункциональные анализаторы спектра и сигналов от ведущих мировых производителей радиоаппаратуры, в частности, портативные сканирующие анализаторы TSMA6 и TSME6 компании Rohde&Schwarz [17], FieldFox Handheld Analyzer N9917B компании Keysight [18]. Данные анализаторы обеспечивают быстрый цифровой спектральный анализ и опциональное определение параметров радиосигналов различных стандартов, в том числе 5G. Эти анализаторы зарубежного производства имеют высокую стоимость и, кроме того, их свободное приобретение для российских потребителей не всегда возможно.

Несмотря на большое разнообразие существующих анализаторов сетей 5G, различающихся по техническим характеристикам и функциональным возможностям, описание принципов их работы, единого комплекса процедур, необходимого для обнаружения и идентификации сигналов БС 5G, особенностей приема и обработки сигналов 5G в научно-технической литературе отсутствует. Существующие публикации в области приема сигналов стандарта 5G посвяще-

ны частным вопросам: начальному поиску и частотно-временной синхронизации [19-24], приему широкополосного канала [25], исследованию характеристик полярного кодирования [26], оптимизации пропускной способности многопользовательского MU-MIMO (Multi User Multiple Input Multiple Output) [27, 28] и др.

Область разработки алгоритмов приема сигналов 5G является конкурентной, поэтому в данной статье представлена разработанная общая процедура обработки сигнала БС 5G в виде блок-схем и кратких пояснений без подробного математического описания. Для удобства восприятия статья дополнена описанием особенностей структуры сигнала БС 5G, а также примерами обнаружения и приема реального сигнала БС 5G.

1. Основные понятия 5G

Область сотовой связи и телекоммуникаций, в том числе мобильной связи нового поколения 5G, является узкоспециализированной, поэтому в таблице 1 представлен перечень основных терминов и определений, используемых в стандарте 5G [1-6]. Более подробное разъяснение терминов приведено в тексте статьи.

Таблица 1 – Определения, обозначения и сокращения

Термин	Определение
FR1, FR2	Frequency Range – диапазон несущих частот 5G. Система 5G может использовать две частотные области: FR1 – от 410 до 7125 МГц, FR2 – от 24250 до 52600 МГц
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access – технология ортогонального частотного мультиплексирования
Частотно-временная ячейка	Структурная единица технологии OFDM, представляющая собой одну поднесущую одного OFDM символа
Ресурсный блок	Группа ячеек из 12 смежных поднесущих частот
FDD	Frequency Division Duplex – режим частотного разделения каналов
TDD	Time Division Duplex – режим временного разделения каналов
PSS	Primary Synchronization Signal – сигнал первичной синхронизации
SSS	Secondary Synchronization Signal – сигнал вторичной синхронизации
PBCH	Physical Broadcast Channel – широкополосный канал
PDCCH	Physical Downlink Control Channel – контрольный канал
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel – совместный канал
DM-RS	Demodulation reference signals – опорный сигнал для оценки частотного отклика канала при демодуляции и частотно-временной автоподстройке
SIB1	System Information Block 1 – системное сообщение, передающееся в широкополосном режиме и содержащее системные идентификаторы соты
Синхроблок	Блок сигнала синхронизации, в который на физическом уровне включены первичный и вторичный синхросигналы, а также широкополосный канал
Пакет синхроблоков	Группа из нескольких синхроблоков, каждый синхроблок может передаваться направленно в некотором угловом секторе
Паттерн синхроблока	Параметр, определяющий связь между номером синхроблока в пакете и номером символа фрейма, с которого начинается синхроблок
SCS	Subcarrier Spacing – расстояние между поднесущими

MIB	Master Information Block – сообщение широковещательного канала
REG	Resource Element Group – ресурсный блок на интервале одного OFDM-символа
Rate matching	Согласование скоростей потоков
CORESET0	Частотно-временной блок, в котором расположено сообщение контрольного канала
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying – квадратурная фазовая манипуляция
AL	Aggregation level – уровень агрегации, определяющий количество элементов контрольного канала
REG бандл	Группа из 6 REG
Опорные ячейки	OFDM-ячейки, используемые для оценки частотного отклика канала при демодуляции, а также для частотно-временной автоподстройки
Polar code	Полярный код – линейный корректирующий код, основанный на явлении поляризации канала, используется в каналах PBCH и PDCCCH
CRC	Cyclic redundancy check – циклический избыточный код, используемый для проверки целостности принятых данных
Мягкие решения	Значения символов на входе декодера квантуются на некоторое число уровней либо принимают весь диапазон промежуточных значений
Жесткие решения	Каждому действительному значению символа сопоставляется 0 или 1

2. Особенности технологии и структура сигнала 5G

Основой технологии 5G систем является OFDMA. Передаваемый базовой станцией поток данных разделяется на несколько низкоскоростных потоков, которые передаются на различных ортогональных поднесущих. Это позволяет использовать очень широкую полосу сигнала и, соответственно, получать высокую скорость передачи данных, не уменьшая длительности символов и сохраняя межсимвольную помеху на приемлемо низком уровне.

Частотно-временной ресурс системы состоит из совокупности элементарных ячеек, каждая из которых представляет собой одну поднесущую одного OFDM символа. Ячейки объединяются в ресурсные блоки по 12 поднесущих в каждом. Передаваемые данные предназначены многим абонентам. Каждому абоненту динамично выделяется определенное количество ресурсных блоков в частотно-временной области сигнала. Передача информации различным абонентам выполняется в общем случае с различной скоростью (модуляцией и кодированием).

Стандарт 5G поддерживает пять различных вариантов $\mu = \overline{0,4}$ расстояния между поднесущими $\Delta f = 2^\mu \times 15$ кГц.

Сигнал БС 5G структурирован во времени по фреймам длительностью 10 мс. Каждый фрейм состоит из десяти субфреймов длительностью 1 мс. Фрейм также может быть представлен в виде двух одинаковых по длительности полужфреймов. Один фрейм состоит из $N_{slot}^{frame} = 2^\mu \times 10$ слотов. В таблице 2 приведены значения расстояния между поднесущими Δf , число слотов во фрейме N_{slot}^{frame} и длина одного символа T_s для разных значений μ .

Таблица 2 – Параметры сигнала в зависимости от μ

μ	Δf , кГц	N_{slot}^{frame}	T_s , мкс
0	15	10	66,7
1	30	20	33,3
2	60	40	16,6
3	120	80	8,33
4	240	160	4,17

В 5G возможны два типа защитного интервала (префикса) для OFDM символов: стандартный – для всех значений $\mu = 0, 1, 2$ и расширенный – только для $\mu = 3$. Для случая стандартного префикса число символов в слоте равно 14, для случая расширенного префикса – 12.

Стандарт 5G предусматривает два режима дуплекса: частотный (FDD – Frequency Division Duplex) и временной (TDD – Time Division Duplex). Для режима FDD все субфреймы используются для передачи как в прямом канале (от базовой станции к абонентским), так и в обратном канале (от абонентских станций к базовой) на разных несущих. Для режима TDD одни субфреймы фрейма используются для передачи сигнала в прямом канале, а другие – в обратном канале. Возможны 56 различных конфигураций фрейма, отличающихся числом субфреймов, выделенных прямому и обратному каналам, и их распределением во фрейме.

Каждая БС сети включает в общем случае несколько сот, осуществляющих независимую передачу и прием данных в рамках своего сектора. Сигналы различных сот сети передаются одновременно в одном спектральном диапазоне. Каждая сота характеризуется идентификатором физического уровня, от которого существенно зависят процедуры формирования сигнала, и системными идентификаторами.

Сигнал 5G соты включает совокупность различных физических каналов и сигналов:

- первичный синхросигнал PSS (Primary Synchronization Signal);
- вторичный синхросигнал SSS (Secondary Synchronization Signal);
- широкополосный канал PBCH (Physical Broadcast Channel);
- контрольный канал PDCCH (Physical Downlink Control Channel);
- совместный канал PDSCH (Physical Downlink Shared Channel);
- опорный сигнал DM-RS (Demodulation reference signal);

а также другие опорные сигналы, не используемые для обнаружения и идентификации.

Первичный синхросигнал служит для обнаружения сигнала 5G соты и вместе с вторичным синхросигналом определяет идентификатор соты физического уровня. Опорный сигнал DM-RS служит для оценки частотного отклика канала при демодуляции, а также для частотно-временной автоподстройки. Совместный канал служит для передачи различных сообщений и трафика. С точки зрения идентификации наиболее значимым является системное сооб-

щение SIB1 (System Information Block 1), содержащее системные идентификаторы соты. Контрольный канал определяет частотно-временное положение и параметры передаваемых данных различного типа, в том числе сообщения SIB1. Широковещательный канал определяет частотно-временное положение и параметры контрольного канала, соответствующего сообщению SIB1.

Первичный и вторичный синхросигналы, а также широковещательный канал на физическом уровне объединены в синхроблок. Синхроблок во временной области занимает 4 OFDM символа, а в частотной области 240 поднесущих. Структура синхроблока представлена на рис. 1. Серым фоном здесь обозначены частотно-временные области отсутствия сигнала.

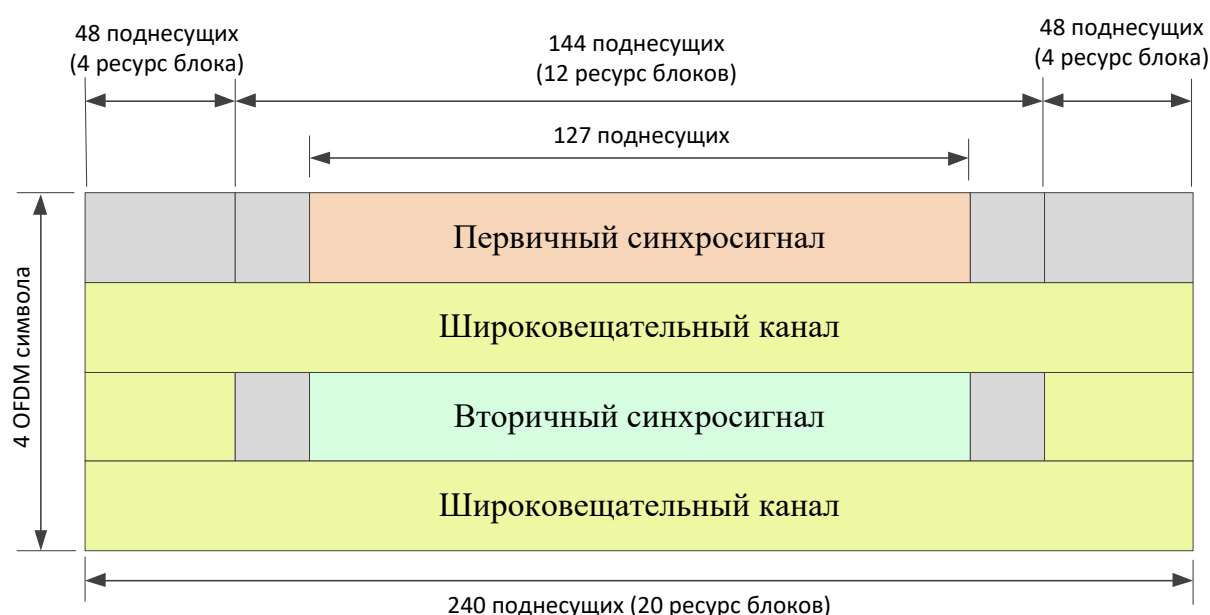


Рис. 1. Частотно-временная структура синхроблока

Для синхроблока в общем случае возможны следующие значения расстояния между поднесущими SCS (subcarrier spacing): для FR1 – $SCS_{SSB} = 15$ или 30 кГц, для FR2 – $SCS_{SSB} = 120$ или 240 кГц.

В 5G имеется специальная известная сетка частотных позиций центральной частоты синхроблоков. Расстояние между соседними частотными позициями сетки зависит от несущей f_0 и равно $1,2$ МГц, если $f_0 < 3$ ГГц; $1,44$ МГц, если $24,25$ ГГц $> f_0 > 3$ ГГц; $17,28$ МГц, если $f_0 > 24,25$ ГГц. Синхроблоки могут передаваться в нескольких частотных позициях рабочего частотного диапазона.

Возможна передача синхроблоков пакетами по несколько синхроблоков. В этом случае каждый синхроблок передается направленно в некотором угловом секторе с помощью антенной решетки. Использование направленной передачи увеличивает уровень сигнала на приемной антенне абонентской станции и снижает внутрисистемную помеху. Пакет синхроблоков передается на интервале полуфрейма (5 мс), по умолчанию период передачи пакета равен 2 фреймам (20 мс). Пример пакетов синхроблоков иллюстрируется на рис. 2.

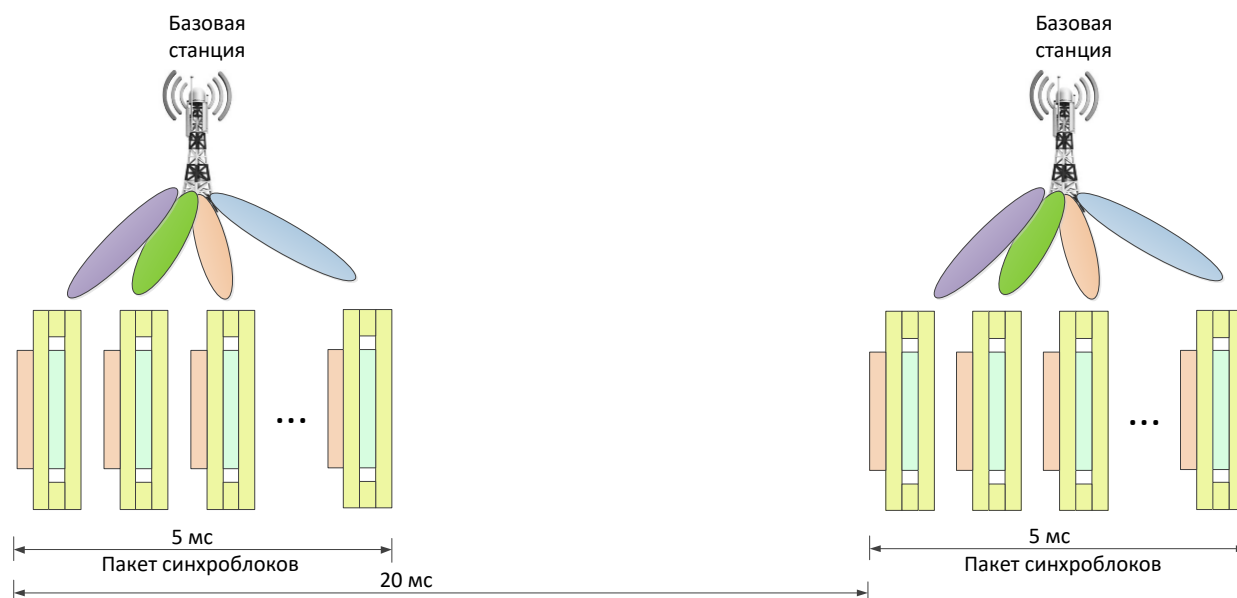


Рис. 2. Пример пакета синхроблоков

Каждая четвертая ячейка в области широковещательного канала – опорная ячейка DM-RS. Начальная поднесущая опорного сигнала зависит от идентификатора соты физического уровня. Значения символов опорных ячеек являются псевдослучайными и определяются идентификатором соты физического уровня, номером полуфрейма и номером синхроблока в пакете. Имеется 8 различных вариантов вектора значений опорных ячеек в зависимости от номера синхроблока в пакете.

В каждой из частотных областей FR1 и FR2 стандартом определены частотные диапазоны. Они имеют различную ширину и характеризуются видом дуплекса, значением SCS_{SSB} (одно или два возможных значения) и паттерном синхроблоков. Паттерн определяет связь между номером синхроблока в пакете и номером символа фрейма, с которого начинается синхроблок. Это позволяет после приема синхроблока выполнить фреймовую синхронизацию для дальнейшей обработки.

Рассмотрим более подробно те каналы и сигналы, прием которых необходим для решения задачи обнаружения и идентификации БС 5G.

2.1. Синхросигналы

Первичный и вторичный синхросигналы – псевдослучайные последовательности длиной 127 элементов с хорошими корреляционными свойствами. Идентификатор соты физического уровня имеет вид

$$N_{ID}^{cell} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)}. \quad (1)$$

Имеются три различные последовательности первичного синхросигнала. Используется та из них, которая соответствует второму параметру идентификатора соты физического уровня $N_{ID}^{(2)} = \{0, 1, 2\}$. Первый параметр идентификатора соты $N_{ID}^{(1)} = \{0, 335\}$ переносится вторичным синхросигналом.

2.2. Широковещательный канал

Сообщение широковещательного канала состоит из 32 бит и включает MIB (MasterInformationBlock). Биты сообщения указывают

- расстояние между поднесущими SCS контрольного канала и сообщения SIB1, которое в общем случае отличается от SCS_{SSB} ;
- положение частотно-временного блока CORESET0, в котором расположено сообщение контрольного канала с информацией о расположении и параметрах SIB1;
- параметр k_{SSB} , определяющий частотный сдвиг между начальной поднесущей синхроблока и ближайшим элементом сетки ресурс блоков;
- номер фрейма;
- номер полуфрейма;
- доступность соты для абонентских станций;
- номер синхроблока в пакете и др.

Этот битовый блок подвергается следующим процедурам для формирования широковещательного канала на физическом уровне:

- скремблирование, зависящее от идентификатора соты физического уровня, от максимального числа синхроблоков в пакете, а также от двух бит номера фрейма;
- добавление к скремблированным битам 24 проверочных бит, формируемых посредством соответствующего полинома;
- полярное (Polar) кодирование;
- согласование скоростей потоков, которое заключается в отбрасывании некоторых бит и перемежении оставшихся;
- второе скремблирование, зависящее от идентификатора соты физического уровня и от номера синхроблока в пакете;
- QPSK модуляция, при которой каждой последовательной паре бит ставится в соответствие комплексный QPSK символ;
- отображение символов модуляции на соответствующие частотно-временные ячейки синхроблока.

2.3. Контрольный канал

Контрольный канал, в котором содержатся параметры передачи сообщения SIB1, передается в некоторой части частотно-временного блока CORESET0. Этот блок может занимать от 1 до 3 OFDM символов.

Биты сообщения контрольного канала позволяют получить следующую информацию:

- положение сообщения SIB1 во временной области;
- скорость кодирования;
- схему отображения виртуальных ресурс блоков на физические ресурс блоки;
- параметр процедуры согласования скоростей потоков.

Положение сообщения SIB1 в частотной области, совпадает с частотной областью блока CORESET0. В SIB1 используется только один вид модуляции – QPSK.

Битовый блок контрольного канала подвергается следующим процедурам для формирования контрольного канала на физическом уровне:

- скремблирование, зависящее от идентификатора соты физического уровня;
- добавление к скремблированным битам 24 проверочных бит, формируемых посредством соответствующего полинома;
- скремблирование части проверочных бит в соответствии с идентификатором системной информации;
- полярное (Polar) кодирование;
- согласование скоростей потоков, которое заключается в отбрасывании некоторых бит и перемежению оставшихся;
- скремблирование, зависящее от идентификатора соты физического уровня;
- QPSK модуляция;
- отображение символов модуляции на соответствующие частотно-временные ячейки блока CORESET0.

Контрольный канал состоит из некоторого количества элементов контрольного канала. Это количество соответствует величине уровня агрегации Aggregation level (AL), которая может принимать одно из значений {4, 8, 16}. Чем больше величина AL, тем выше избыточность передачи и помехоустойчивость передачи контрольного канала.

Элемент контрольного канала состоит из 6 ресурс-элемент групп (REG). Одна REG – это 12 поднесущих (один ресурс блок) на интервале одного OFDM символа. Отображение элементов контрольного канала на ресурс-элемент группы осуществляется в терминах REG бан্ডлов. Каждый бан্ডл состоит из 6 REG. Отображение элементов контрольного канала на бан্ডлы осуществляется в соответствии с правилом блокового перемежения. Каждый бан্ডл (элемент контрольного канала) переносит 108 бит. Заметим, что контрольный канал занимает в общем случае только часть частотно-временного блока CORESET0.

Для оценки частотного отклика канала при приеме контрольного канала ячейки каждой четвертой поднесущей в CORESET0 – опорные ячейки DM-RS. Значения опорных ячеек определяются по псевдослучайному закону, зависящему от номера символа в слоте, номера слота во фрейме и от идентификатора физического уровня.

2.4. Сообщение SIB1 совместного канала

SIB1 – это основное сообщение системной информации, содержащее в общем случае множество информационных полей. Большинство из этих полей не являются обязательными, поэтому длина сообщения SIB1 может меняться в широких пределах. Максимальная длина SIB1 – 2976 бит. По умолчанию периодичность передачи сообщения SIB1 равна 20 мс.

Основные системные идентификаторы, всегда присутствующими в SIB1:

- количество сетей (PLMN – Public land mobile network), обслуживаемых данной сотой;
- идентификаторы сети – MCC (Mobile Country Code), MNC (Mobile Network Code);
- идентификатор соты – CellIdentity;
- идентификатор области отслеживания внутри сети к которой принадлежит сота – Tracking Area Code;
- идентификатор подобласти сети в области отслеживания – RAN-AreaCode;
- наличие/отсутствие резервирования соты оператором сети для внутреннего использования – cellReservedForOperatorUse.

Битовый блок SIB1 совместного канала подвергается следующим процедурам для формирования сообщения на физическом уровне:

- добавление к битам сообщения SIB1 16 проверочных бит, формируемых посредством соответствующего полинома;
- LDPC (Low-density parity-check code) кодирование, используется граф 2 (параметр кодера);
- согласование скоростей потоков;
- скремблирование, зависящее от идентификатора соты физического уровня;
- QPSK модуляция;
- формирование виртуальных ресурс блоков и их отображение на физические ресурс блоки.

Опорный сигнал DR-MS для SIB1 зависит от параметров, которые определяются в сообщениях широковещательного и контрольного каналов. Здесь особенностью опорного канала является то, что ячейки DM-RS имеются не в каждом OFDM символе блока. Значения символов опорных ячеек определяются, как и для контрольного канала, по псевдослучайному закону, зависящему от номера символа в слоте, номере слота во фрейме и от идентификатора физического уровня.

На рис. 3 приведен пример расположения описанных каналов в частотно-временной области.

3. Обнаружение и идентификация сигнала БС 5G

Исходной для работы анализатора является частотная область анализа (один из диапазонов стандарта, часть диапазона, несколько диапазонов). Эта частотная область может соответствовать известной полосе сигнала БС сети 5G.

Для решения задачи идентификации необходимо выполнить обнаружение и прием синхроблоков из сетки их возможных частотных позиций (обнаружение, прием синхросигналов, сообщения широковещательного канала), прием сообщения контрольного канала и прием сообщения SIB1.

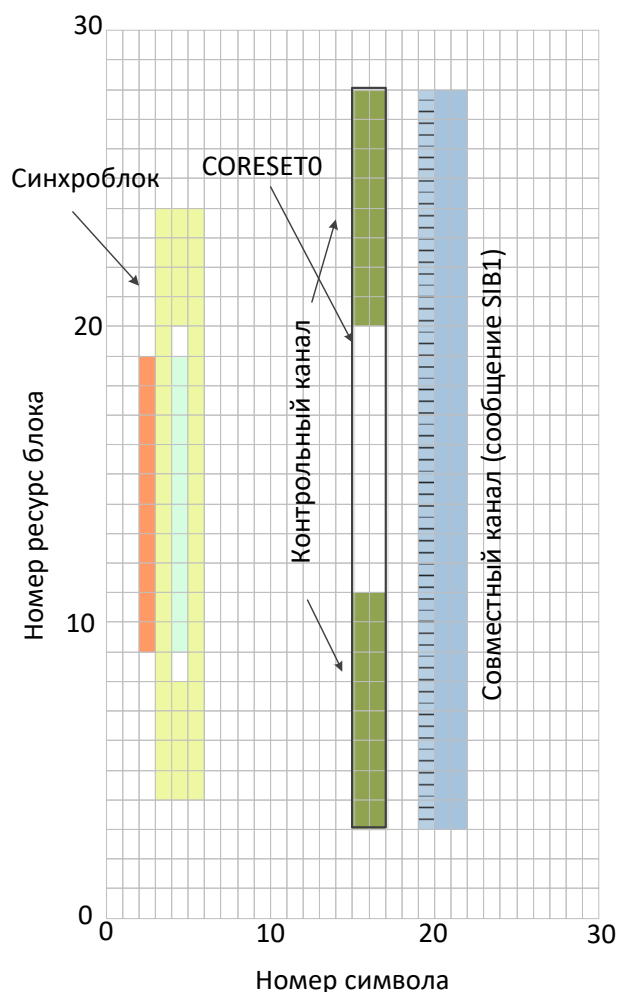


Рис. 3. Пример расположения каналов в частотно-временной области

Полоса $\Delta F^{(SSB)}$, необходимая для обнаружения и приема синхроблока, равна $\Delta F^{(SSB)} = 3,6$ МГц при $SCS_{SSB} = 15$ кГц (FR1), $\Delta F^{(SSB)} = 7,2$ МГц при $SCS_{SSB} = 30$ кГц (FR1), $\Delta F^{(SSB)} = 28,8$ МГц при $SCS_{SSB} = 120$ кГц (FR2), $\Delta F^{(SSB)} = 57,6$ МГц при $SCS_{SSB} = 240$ кГц (FR2).

Полоса ΔF , гарантирующая возможность приема, кроме того, контрольного канала и сообщения SIB1, равна $\Delta F = 27,36$ МГц для FR1 или $\Delta F = 201,6$ МГц для FR2.

3.1. Обнаружение синхроблоков и прием широкополосного канала

Общая схема обнаружения и приема синхроблоков представлена на рис. 4. Кратко опишем необходимые процедуры.

Сначала по частотной области анализа определяются возможные частотные позиции синхроблоков, их SCS_{SSB} и паттерн в передаваемом пакете SSB блоков. В зависимости от диапазона возможно одно или два возможных значения SCS_{SSB} .

Выполняется фильтрация входного сигнала до полосы синхросигнала $\Delta F^{(SSB)}$ МГц. Если возможны два значения SCS , необходимо формировать два потока отсчетов с соответствующими параметрами $\Delta F^{(SSB)}$.



Рис. 4. Схема обнаружения синхроблоков и приема широковещательного канала

Для обнаружения синхроблока формируются выходы трех корреляторов, согласованные с первичным синхросигналом для разных значений параметра $N_{ID}^{(2)}$ на априорном интервале двух фреймов 20 мс. Если максимальное значение выходного сигнала коррелятора превышает порог, сигнал соты 5G полагается предварительно обнаруженным. При этом временное положение максимума является возможным моментом прихода первичного синхросигнала с соответствующим параметром идентификатора соты физического уровня $N_{ID}^{(2)}$. Если

максимальное значение выходных сигналов всех корреляторов не превышает порог, принимается решение об отсутствии синхроблока в анализируемой частотной позиции. Пример выходных сигналов корреляторов приведен на рис. 5.

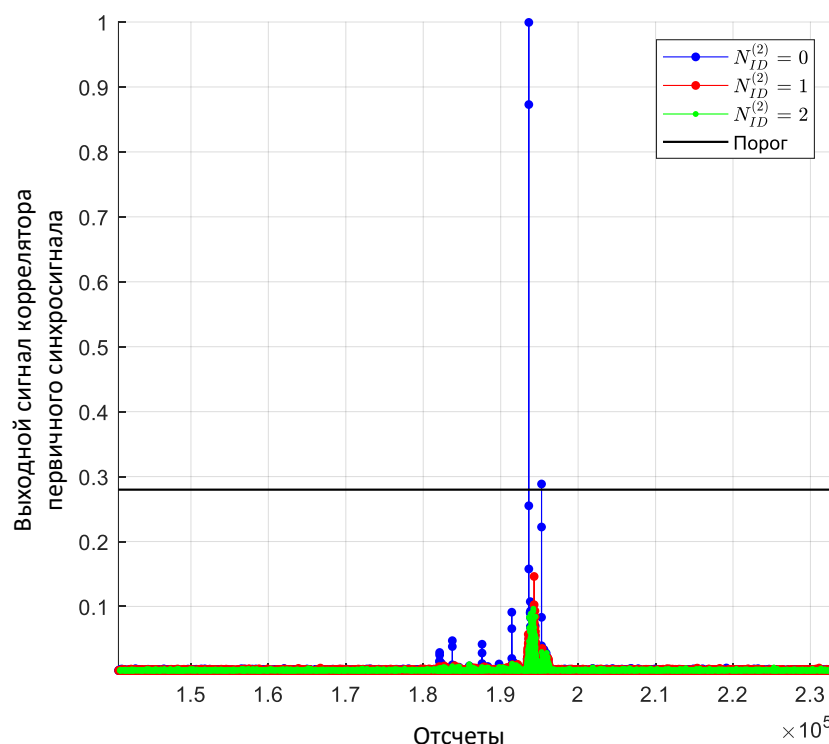


Рис. 5. Выходные сигналы корреляторов первичного синхросигнала

Далее определяется оценка фазового сдвига между одинаковыми частями OFDM символов синхроблока. На основе этой величины рассчитывается и компенсируется частотная расстройка.

Для определения первого параметра идентификатора соты физического уровня $N_{ID}^{(1)}$ выполняются следующие процедуры. Для каждого OFDM символа синхроблока выполняется ДПФ длиной 256 над соответствующей полезной частью символа. По нулевому символу SSB блока (где передается первичный синхросигнал) формируется оценка канала для 127 центральных поднесущих спектра. По результату ДПФ второго символа синхроблока (где передается вторичный синхросигнал) и полученной оценки канала формируется решающая функция двух вспомогательных параметров, однозначно связанных с величиной $N_{ID}^{(1)}$. Положение максимума решающей функции по этим параметрам определяет оценку первого параметра $N_{ID}^{(1)}$ идентификатора соты физического уровня. Пример выходного сигнала вторичного синхросигнала приведен на рис. 6.

После получения идентификатора соты физического уровня (1), выделяются опорные ячейки канала DM-RS синхроблока.

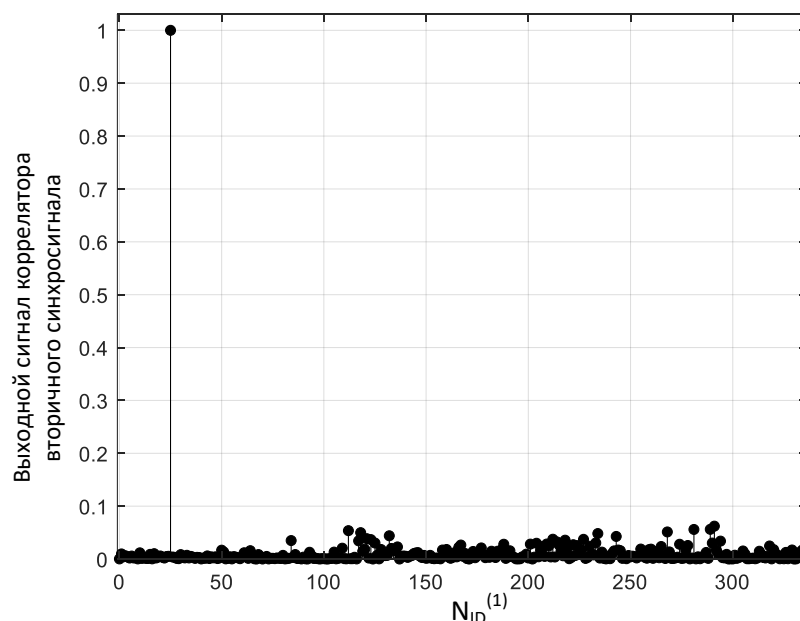


Рис. 6. Выходной сигнал коррелятора вторичного синхросигнала

Оценка используемого опорного сигнала (одного из восьми) производится по минимуму решающей функции, которая основана на плавном изменении частотного отклика канала от частоты. Данный эвристический алгоритм показал высокую эффективность, включая работу в многолучевых каналах и при низких отношениях сигнал-шум. Пример решающей функции опорного сигнала приведен на рис. 7.

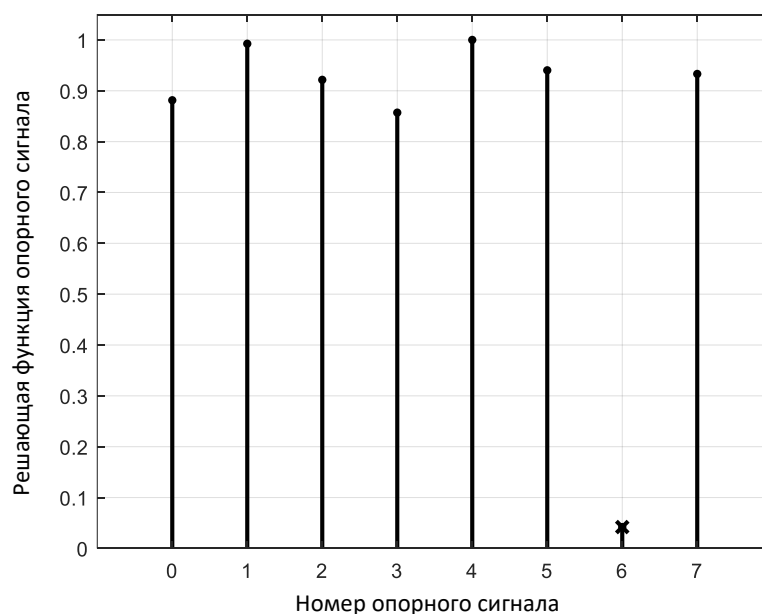


Рис. 7. Решающая функция определения опорного сигнала

Номер используемого опорного сигнала определяет номер синхроблока в периодически передаваемом пакете. Эти биты далее будут использованы в процедуре дескремблирования и ряда других процедур.

В синхроблоке имеется 4 блока символов широковещательного канала. Оценка канала для каждого блока выполняется независимо по опорным ячейкам соответствующего блока. На первом этапе для каждого массива значений опорных ячеек выполняется их сглаживание, необходимое для повышения помехоустойчивости в условиях низких отношений сигнал-шум. По сглаженным значениям опорных ячеек проводится интерполяция для получения оценки канала для информационных ячеек синхроблока.

По результатам ДПФ информационных ячеек широковещательного канала и оценки канала этих ячеек получаются мягкие решения символов и бит этих символов. В результате получается массив мягких решений информационных бит SSB блока длиной 864. Пример мягких оценок символов широковещательного канала приведен на рис. 8. Рис. 5-8 получены при обработке сигнала БС 5G, записанного в одном крупном европейском городе.

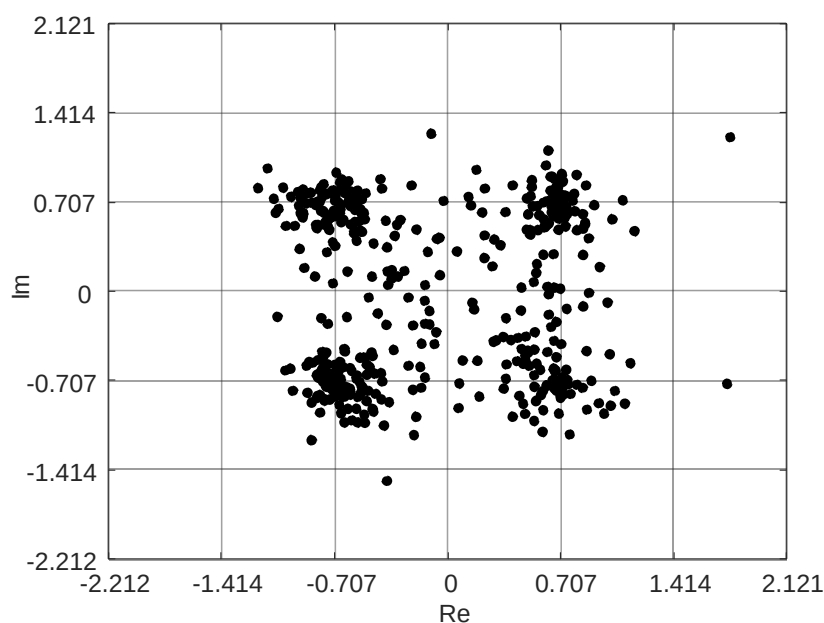


Рис. 8. Пример оценок символов широковещательного канала

Данный массив подвергается дескремблированию, определяемому величиной N_{ID}^{cell} и номером синхроблока в пакете, найденном при оценке используемого опорного сигнала.

Дескремблированный массив 864 мягких решений бит поступает на вход процедуры согласования скоростей. Выполняется отбрасывание 352 мягких решений, объединение оставшихся в подблоки и их деперемежение. На выходе получается 512 мягких решений, которые поступают на Polar декодер.

На выходе Polar декодера формируются жесткие решения 56 бит широковещательного канала. В этой процедуре непосредственно декодированию предшествует деперемежение мягких решений бит.

По первым 32 битам с выхода декодера формируются 24 проверочных бит в соответствии с известным полиномом. Далее сформированные и принятые проверочные биты сравниваются. Если все соответствующие биты совпадают, принимается решение о безошибочном приеме сообщения широковещательного канала. В этом случае первые 32 бита – информационные биты сообщения. Если какие-либо соответствующие биты не совпадают, сообщение принято с ошибкой.

Полученный информационный блок подвергается дескремблированию и деперемежанию. В результате получается массив 32 информационных бит широковещательного канала, первые 23 которого представляют собой биты сообщения MIB.

Заметим, что если параметр k_{SSB} сообщения MIB превышает величину 23 (FR1) или 11 (FR2), связанные с анализируемым синхроблоком контрольный канал и SIB1 в сигнале соты 5G не передаются.

После успешного приема сообщения широковещательного канала для последующей обработки устанавливается фреймовая синхронизация. Начало фрейма выражается через номер полуфрейма и номер символа в полуфрейме, с которого начинается синхроблок. Номер полуфрейма получен в сообщении широковещательного канала. Номер символа в полуфрейме определяется по паттерну синхроблока. Этот паттерн зависит от частотного диапазона и определяет зависимость номера символа в полуфрейме от номера синхроблока в пакете, полученного ранее.

3.2. Прием контрольного канала

Общая блок-схема приема сообщения контрольного канала приведена на рис. 9.

Сначала локализуется частотно-временной блок CORESET0, в котором расположен контрольный канал.

Необходимые параметры для локализации следующие:

- SCS_{SSB} (расстояние между поднесущими синхроблока);
- SCS (расстояние между поднесущими контрольного канала и SIB1), получено из сообщения широковещательного канала;
- 8 бит параметра сообщения широковещательного канала $pdccch-ConfigSIB1$;
- номер синхроблока в пакете;
- минимально необходимая полоса абонентской станции (больше 10 МГц или нет);
- младший бит параметра k_{SSB} сообщения широковещательного канала.



Рис. 9. Схема приема контрольного канала

Возможные сочетания параметров SCS_{SSB} и SCS в 5G представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Варианты сочетания параметров SCS_{SSB} и SCS

FR1	SCS_{SSB} , кГц	15	15	30	30
	SCS , кГц	15	30	15	30
FR2	SCS_{SSB} , кГц	120	120	240	240
	SCS , кГц	60	120	60	120

В частотном диапазоне n79 (4,4-5,0 ГГц) минимально необходимая полоса абонентской станции 40 МГц, для остальных диапазонов FR1 – 5 МГц или 10 МГц.

4 старших бита и 4 младших бита параметра `pdccch-ConfigSIB1` формируют два десятичных числа из диапазона $\{0...15\}$.

На основании перечисленных величин с помощью таблично-формульного алгоритма стандарта определяются параметры, локализирующие блок `CORESET0` в частотно-временной области:

- минимальная поднесущая;
- число ресурс блоков;
- число символов;
- номер начального символа в слоте;
- номер слота во фрейме;
- номер фрейма.

Первые два параметра определяют положение блока в частотной области, остальные четыре – во временной области.

Для приема контрольного канала и `SIB1` необходима обработка входного сигнала с более высокой частотой дискретизации, чем для приема синхроблока. Поэтому, сначала выполняется уточнение временного отсчета начала первичного синхросигнала (и связанных с ним начала фреймов и положения OFDM символов).

После ДПФ OFDM символов контрольного канала, выделяем частотно временной блок `CORESET0`. Ячейки контрольного канала расположены в бандах с номерами, определяемыми алгоритмом блокового перемежения.

Поскольку величина уровня агрегации `AL` априори неизвестна, процедуры:

- выделение ячеек опорного канала;
- оценка канала информационных ячеек;
- демодуляция;
- согласование скоростей;
- polar декодирование;
- проверка CRC;

выполняются в цикле для различных значений `AL`: 4, 8, 16. Если для какого-либо значения `AL` проверочные биты совпадают, цикл прекращается, а соответствующий массив принятых информационных бит определяет сообщение контрольного канала.

Далее находятся размеры блоков упомянутых процедур для различных значений `AL`. Размер `E` блока мягких решений бит, поступающего в блок согласования скоростей равен $108 \times AL$. Размер `K` блока бит с выхода декодера не зависит от `AL` и определяется числом ресурс блоков в `CORESET0`. Длина блока мягких решений бит, поступающего на Polar декодер, равна 2^n , где величина `n` рассчитывается в зависимости от значений `E` и `K`.

Заметим, что при формировании блока мягких решений контрольного канала для `AL > 4` нет необходимости формировать все $E = 108 \times AL$ величин. Первая половина этого блока уже найдена для предыдущего меньшего значения `AL`.

Выделение ячеек опорного канала, оценку канала информационных ячеек и демодуляцию выполняется независимо для каждого блока бандла аналогично

этим процедурам для широковещательного канала. Мягкие решения бит всех AL бандлов объединяются в массив мягких решений бит контрольного канала.

В процедуре дескремблирования используется псевдослучайная последовательность, которая инициализируется величиной N_{ID}^{cell} .

В процедуре согласования скоростей потоков выполняется деперемеживание входного блока мягких решений и вставка необходимого количества нулевых мягких решений. На выходе имеются N мягких решений, которые поступают на Polar декодер.

На выходе Polar декодера формируется блок жестких решений контрольного канала длиной $K = A + 24$, A – число информационных бит, зависящее от числа ресурса блоков, 24 – число проверочных бит.

Проверка CRC заключается в следующем. Формируется вспомогательный массив, по битам которого формируем 24 проверочных бита в соответствии с известным полиномом. Часть полученных проверочных бит дескремблируется в соответствии с шестнадцатиразрядным идентификатором системной информации. Полученные в результате биты сравниваются с принятыми проверочными битами. Если все соответствующие биты совпадают, принимается решение о безошибочном приеме сообщения контрольного канала и из информационных бит сообщения выделяем параметры контрольного канала. Если какие-либо соответствующие биты не совпадают, сообщение принято с ошибкой. В этом случае переходим к следующему значению AL .

На рис. 10 приведен пример оценок символов успешно принятого сообщения контрольного канала при уровне агрегации 16 и отношении сигнал-шум 2 дБ.

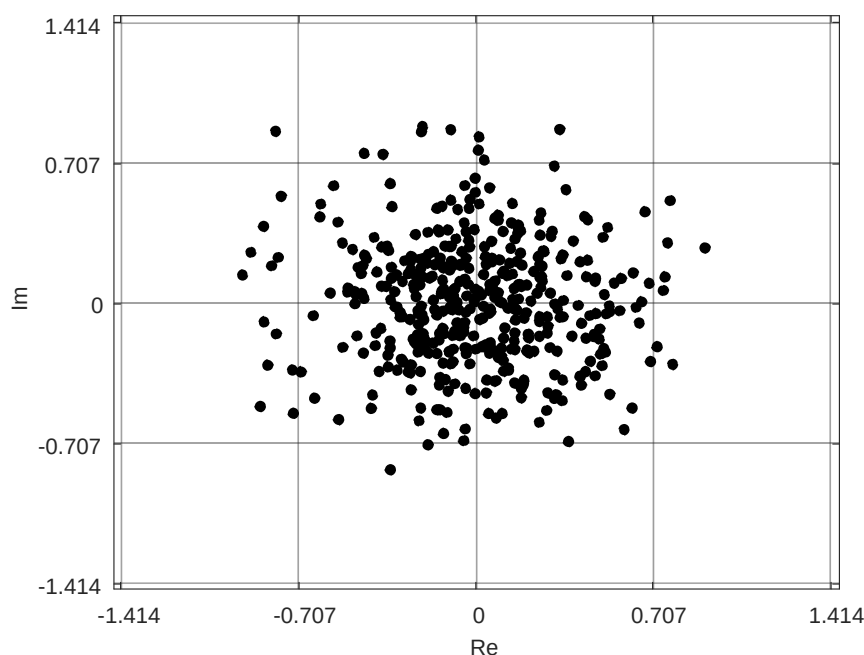


Рис. 10. Пример оценок символов контрольного канала

3.3. Прием сообщения SIB1 совместного канала

Схема приема сообщения SIB1 представлена на рис. 11.

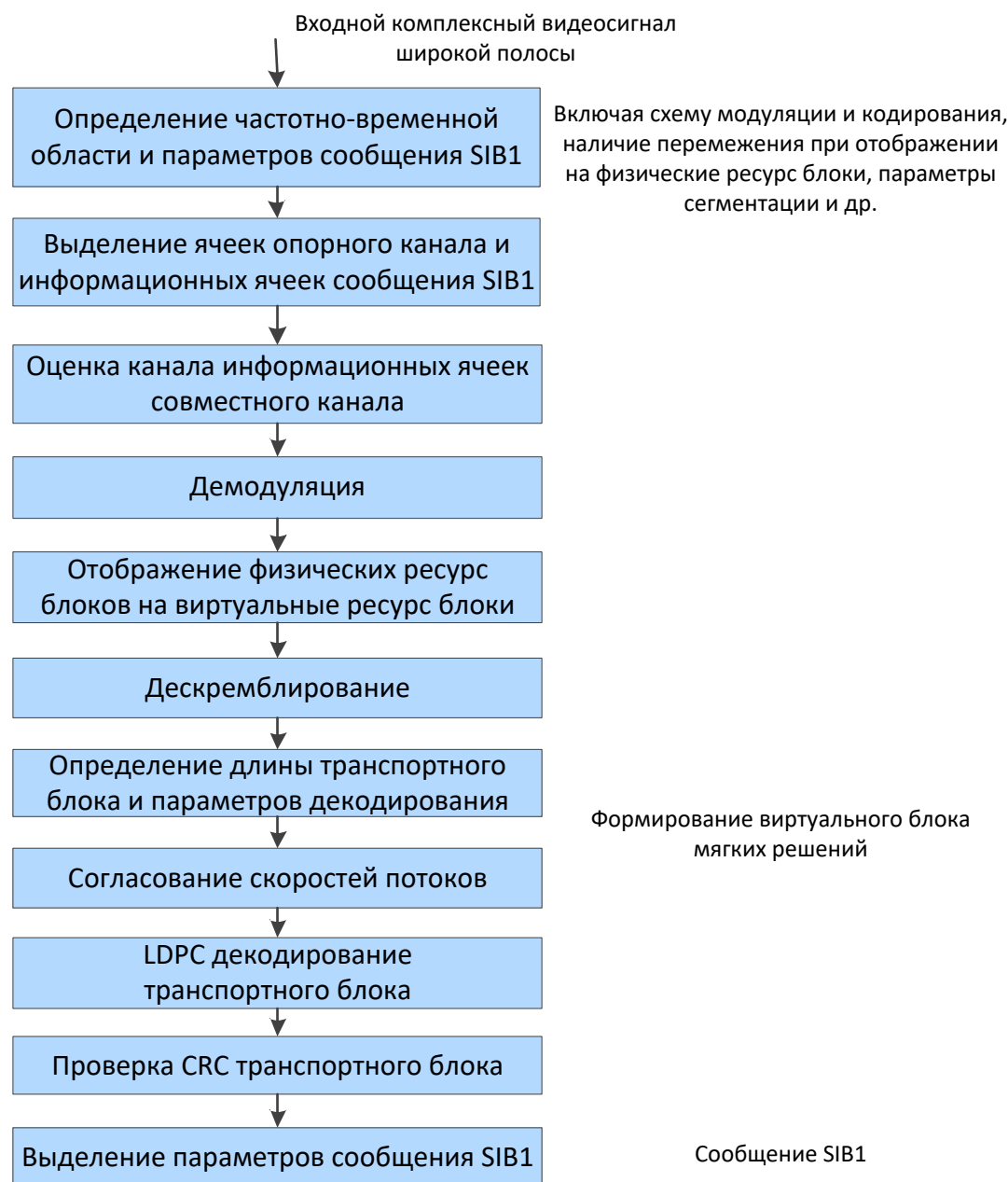


Рис. 11. Схема приема сообщения SIB1 совместного канала

Как следует из содержания соответствующего поля сообщения контрольного канала, частотная область для SIB1 (минимальная поднесущая и число ресурс блоков) та же, что и для CORESET0 контрольного канала.

Для локализации SIB1 во временной области используется соответствующий параметр сообщения контрольного канала, а также таблицы стандарта, которые определяются некоторыми вспомогательными параметрами контрольного канала. В результате определяется номер слота, номер в слоте начального символа SIB1 и количество последовательных OFDM символов SIB1. Эти величины однозначно определяют положение сообщения SIB1 во временной области.

Скорость кодирования в SIB1 определяется из пятибитного параметра схемы модуляции и кодирования сообщения контрольного канала с помощью соответствующей таблицы стандарта.

Из параметров контрольного канала и таблиц стандарта определяется положение ячеек опорного канала DR-MS. В отличие от рассмотренных каналов здесь опорные ячейки присутствуют не в каждом OFDM символе сообщения SIB 1. В тех символах, где опорные ячейки присутствуют, они следуют через одну поднесущую (в четных номерах поднесущих).

Все ячейки частотно-временного блока, выделенного для SIB1, за исключением ячеек DMRS, являются информационными ячейками. Оценка канала для них производится в 2 этапа: сначала выполняется интерполяция по опорным символам в частотной области, а затем, если имеется более одного OFDM символа с опорными ячейками, то выполняется интерполяция во временной области.

Мягкие решения символов информационных ячеек и бит формируются аналогично широкополосному и контрольному каналам.

Ресурс блока SIB1 делится на бандлы длиной 2 ресурс блока. Различают физические и виртуальные бандлы. Если бит схемы отображения виртуальных ресурс блоков на физические ресурс блоки в сообщении контрольного канала равен нулю, перемежение отсутствует, и каждый физический бандл отображается на виртуальный бандл с тем же номером. Если этот бит равен 1, номера физических бандлов связаны с номерами виртуальных бандлов, на которые они отображаются, определенным законом блочного перемежения.

После перемежения бандлов формируется блок мягких решений информационных бит блока SIB1.

Этот блок подвергается дескремблированию, для чего используется псевдослучайная последовательность, иницируемая идентификатором соты физического уровня N_{ID}^{cell} .

Далее определяется размер транспортного блока (сообщение SIB1 и 16 бит CRC). Для этого определяется общее число ресурс элементов, выделенных для передачи транспортного блока SIB1, определяемое числом ресурс блоков SIB1 и количеством ячеек опорного канала. По этой величине и скорости кодирования с помощью таблицы стандарта находится размер транспортного блока. Количество бит на входе и выходе LDPC декодера, а также параметр декодера определяются размером транспортного блока.

Размер сообщения SIB1 не больше 3854 и скорость кодирования не выше 0,67. Поэтому для кодирования используется LDPC на основе графа 2.

Блок дескремблированных мягких решений информационных бит блока SIB1 поступает на блок согласования скоростей потоков, где выполняется его деперемежение и вставка необходимого количества нулевых мягких решений. Результирующий блок декодируется, в результате формируя жесткие решения бит транспортного блока.

Далее выполняется сравнение 16 сформированных и принятых проверочных бит. Если какие-либо соответствующие биты не совпадают, сообщение принято с ошибкой. Если все соответствующие биты совпадают, принимается

решение о безошибочном приеме транспортного блока SIB1. В результате получается битовый блок сообщения SIB1, из которого выделяются необходимые идентификаторы соты.

На рис. 12 приведен пример оценок символов успешно принятого сообщения SIB1 при скорости кодирования 16 и отношении сигнал-шум 6 дБ.

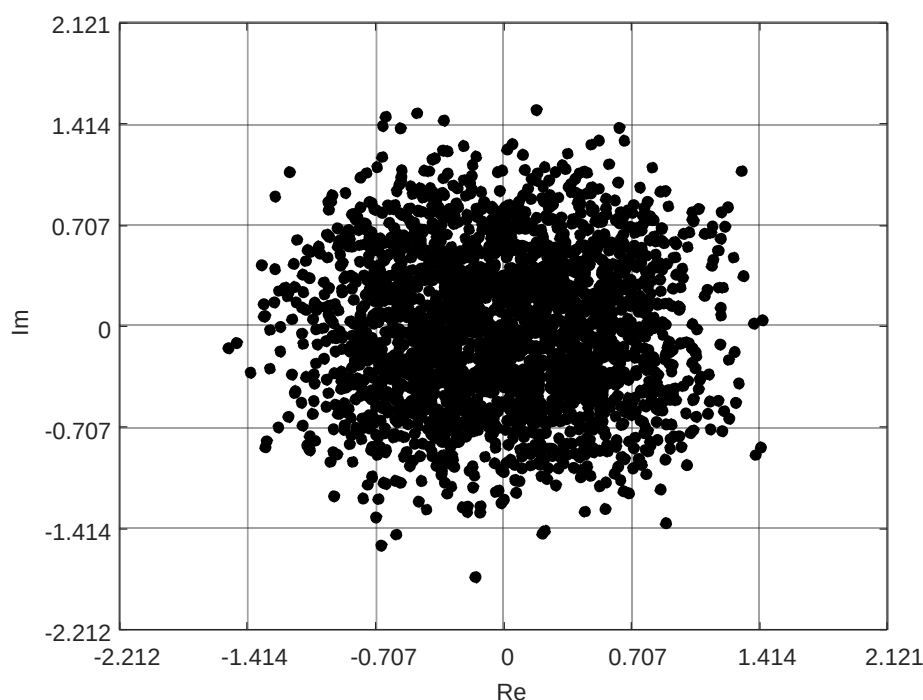


Рис. 12. Пример оценок символов контрольного канала

Заключение

В работе представлен разработанный комплекс процедур обнаружения, приема и идентификации сигнала БС 5G. Новизной этого комплекса процедур приема и обработки сигналов базовых станций, является учет специфики и особенностей сигнально-кодовых конструкций, характерных именно для стандарта радиосвязи 5G, в частности, особенностей приема широкополосного канала, контрольного канала и выделения системных идентификаторов из сообщения совместного канала.

Представленный комплекс процедур приема и выделения широкополосной служебной информации использован при построении российского анализатора сигналов БС 5G АО «ИРКОС». Анализатор построен на базе цифрового радиоприемного устройства «АРГАМАК-Д11». Работа анализатора успешно протестирована как на большом числе (более 100) смоделированных сигналов БС 5G (различные несущие, параметры передачи, частотные сдвиги, каналы распространения, отношения сигнал-шум), так и на реальных сигналах.

Анализатор может быть использован для планирования систем 5G на этапах развертывания и ввода в эксплуатацию, анализа зон покрытия, а также радиоконтроля существующих сетей 5G с целью проверки параметров передатчиков и соответствия частотно-территориальному плану.

Литература

1. 3GPP TS 38.201. 5G NR. Physical layer. General description. – 3GPP, 2018. – 13 с.
2. 3GPP TS 38.211. 5G NR. Physical channels and modulation. – 3GPP, 2018. – 97 с.
3. 3GPP TS 38.212. 5G NR. Multiplexing and channel coding. – 3GPP, 2018. – 100 с.
4. 3GPP TS 38.213. 5G NR. Physical layer procedures for control. – 3GPP, 2018. – 101 с.
5. 3GPP TS 38.214. 5G NR. Physical layer procedures for data. – 3GPP, 2018. – 98 с.
6. 3GPP TS 38.331. 5G NR. Radio Resource Control (RRC) protocol specification. – 3GPP, 2019. – 167 с.
7. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / под ред. А.М. Рембовского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 640 с.
8. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Автоматизированные системы радиоконтроля и их компоненты / под ред. А. М. Рембовского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2017. – 424 с.
9. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V. A., Smolskiy S. M. Radio Monitoring Automated Systems and Their Components. – Springer, 2018. – 467 p.
10. Ашихмин А. В., Каюков И. В., Козьмин В. А., Манелис В. Б. Анализатор базовых станций GSM сетей на базе панорамного измерительного приемника АРГАМАК-ИМ // Специальная техника. 2008. № 1. С. 31-39.
11. Ашихмин А. В., Каюков И. В., Козьмин В. А., Манелис В. Б. Анализатор базовых станций CDMA сетей // Специальная техника. 2008. № 3-4. С. 16-26.
12. Алексеев П. А., Ашихмин А. В., Каюков И. В., Козьмин В. А., Манелис В. Б. Анализатор сигналов базовых станций UMTS сетей // Спецтехника и связь. 2012. № 5-6. С. 57-68.
13. Алексеев П. А., Ашихмин А. В., Беспалов О. В., Каюков И. В., Козьмин В. А., Манелис В. Б. Анализатор сигналов базовых станций GSM, UMTS, LTE сетей сотовой связи // Спецтехника и связь. 2016. № 4. С. 50-59.
14. Product Catalog 2019 // TRANSCOM INSTRUMENTS [Электронный ресурс]. 13.05.2021. – URL: www.transcomwireless.com (дата обращения 13.05.2021).
15. HBflex Scanning Receiver. 5G and multi-technology network testing for mmWave and sub-6 GHz spectrum // Фирма PCTEL [Электронный ресурс]. 13.05.2021. – URL: www.pctel.com (дата обращения 13.05.2021).
16. CellAdvisor 5G // Компания VIAVI [Электронный ресурс]. 13.05.2021. – URL: www.viavisolutions.com (дата обращения 13.05.2021).
17. TSMx Drive and walk test scanner // Компания Rohde & Schwarz [Электронный ресурс]. 13.05.2021. – URL: www.rohde-schwarz.com/hk/product/tsmx-product (дата обращения 13.05.2021).

18. N9917B FieldFox Handheld Microwave Analyzer, 18 GHz // Компания Keysight Technologies [Электронный ресурс]. 13.05.2021. – URL: www.keysight.com/fi/en/product/N9917B (дата обращения 13.05.2021).
19. Jeon Y., Park H., Choi E. Synchronization and cell search procedure in 3GPP 5G NR systems // 2019 21st International Conference on Advanced Communication Technology. 2019. P. 475-478.
20. He Y., Gu Y., Bu S., Mao Z. Primary synchronization signal design for new radio technique in 5G communication system // Proceedings of the 10th EAI International Conference on Mobile Multimedia Communications. 2017. P. 265-269.
21. Lien S. Y., Shieh S. L., Huang Y., Su B., Hsu Y. L. 5G new radio: Waveform, frame structure, multiple access, and initial access // IEEE communications magazine. 2017. V. 55. № 6. P. 64-71.
22. Kryukov Y., Pokamestov D., Rogozhnikov E. Cell search and synchronization in 5G NR // ITM Web of Conferences. 2019. V. 30. doi: 10.1051/itmconf/20193004007.
23. Chen F., Li X., Zhang Y. Design and implementation of initial cell search in 5G NR systems // China Communications. 2020. V. 17. № 5. P. 38-49.
24. Bahadkar S., Kuchi K. Receiver Design for Physical Broadcast Channel in 5G NR // Diss. Indian institute of technology Hyderabad. 2019.
25. Kim I., Um J., Park S. Implementation of SDR-based 5G NR Cell Search Equipment // 2020 22nd International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). 2020. P. 350-353.
26. Trifonov P. Efficient design and decoding of polar codes // IEEE Transactions on Communications. 2012. V. 60. № 11. P. 3221-3227.
27. Zhang J., Zheng Z., Zhang Y., Xi J., Zhao X. 3D MIMO for 5G NR: Several observations from 32 to massive 256 antennas based on channel measurement // IEEE Communications Magazine. 2018. V. 56. № 3. P. 62-70.
28. Larsson E. G., Edfors O., Tufvesson F., Marzetta T. L. Massive MIMO for next generation wireless systems // IEEE communications magazine. 2014. V. 52. № 2. P. 186-195.

References

1. 3GPP TS 38.201. 5G NR. Physical layer. General description. 3GPP, 2018. 13 p.
2. 3GPP TS 38.211. 5G NR. Physical channels and modulation. 3GPP, 2018. 97 p.
3. 3GPP TS 38.212. 5G NR. Multiplexing and channel coding. 3GPP, 2018. 100 p.
4. 3GPP TS 38.213. 5G NR. Physical layer procedures for control. 3GPP, 2018. 101 p.
5. 3GPP TS 38.214. 5G NR. Physical layer procedures for data. 3GPP, 2018. 98 p.
6. 3GPP TS 38.331. 5G NR. Radio Resource Control (RRC) protocol specification. 3GPP, 2019. 167 p.

7. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V.A. *Radiomonitoring – zadachi, metody, sredstva* [Radio monitoring – tasks, methods, means]. Moscow, Hotline-Telecom, 2015. 640 p. (in Russian).
8. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V.A. *Avtomatizirovannyye sistemy radiokontrolya i ikh komponenty* [Automated radio monitoring systems and their components]. Moscow, Hotline-Telecom, 2017. 424 p. (in Russian).
9. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V. A., Smolskiy S. M. *Radio Monitoring Automated Systems and Their Components*. Springer, 2018. 467 p.
10. Ashikhmin A. V., Kayukov I. V., Kozmin V. A., Manelis V. B. Analizator bazovykh stantsiy GSM setey na baze panoramnogo izmeritel'nogo priyemnika ARGAMAK-IM [Analyzer of base stations of GSM networks based on panoramic measuring receiver ARGAMAK-IM]. *Spetsial'naya Tekhnika*, 2008, no. 1, pp. 31-39 (in Russian).
11. Ashikhmin A. V., Kayukov I. V., Kozmin V. A., Manelis V. B. Analizator bazovykh stantsiy CDMA setey [Analyzer of CDMA base stations networks]. *Spetsial'naya Tekhnika*, 2008, no. 3-4, pp. 16-26 (in Russian).
12. Alexeev P. A., Ashikhmin A. V., Kayukov I. V., Kozmin V. A., Manelis V. B. Analizator signalov bazovykh stantsiy UMTS setey [Signal analyzer of base stations of UMTS networks]. *Specialized Machinery and Communication*, 2012, no. 5-6, pp. 57-68 (in Russian).
13. Alexeev P. A., Ashikhmin A. V., Bespalov O. V., Kayukov I. V., Kozmin V. A., Manelis V. B. Analizator signalov bazovykh stantsiy GSM, UMTS, LTE setey sotovoy svyazi [Signal analyzer of base stations GSM, UMTS, LTE cellular networks]. *Specialized Machinery and Communication*, 2016, no. 4, pp. 50-59 (in Russian).
14. Product Catalog 2019. *Transcom Instruments*, 13 May 2021. Available at: www.transcomwireless.com (accessed 13 May 2021).
15. HBflex Scanning Receiver. 5G and multi-technology network testing for mmWave and sub-6 GHz spectrum. *HBflex*, 13 May 2021. Available at: www.pctel.com (accessed 13 May 2021).
16. CellAdvisor 5G. *Viavi Solutions*, 13 May 2021. Available at: viavisolutions.com (accessed 13 May 2021).
17. TSMx Drive and walk test scanner. *Rohde*, 13 May 2021. Available at: www.rohde-schwarz.com/hk/product/tsmx-product (accessed 13 May 2021).
18. N9917B FieldFox Handheld Microwave Analyzer, 18 GHz. *Keysight*, 13 May 2021. Available at: www.keysight.com/ru/en/product/N9917B (accessed 13 May 2021).
19. Jeon Y., Park H., Choi E. Synchronization and cell search procedure in 3GPP 5G NR systems. *2019 21st International Conference on Advanced Communication Technology*, 2019, pp. 475-478.
20. He Y., Gu Y., Bu S., Mao Z. Primary synchronization signal design for new radio technique in 5G communication system. *Proceedings of the 10th EAI International Conference on Mobile Multimedia Communications*, 2017, pp. 265-269.
21. Lien S. Y., Shieh S. L., Huang Y., Su B., Hsu Y. L. 5G new radio: Waveform, frame structure, multiple access, and initial access. *IEEE communications magazine*, 2017, vol. 55, no. 6, pp. 64-71.

22. Kryukov Y., Pokamestov D., Rogozhnikov E. Cell search and synchronization in 5G NR. *ITM Web of Conferences*, 2019, vol. 30.
23. Chen F., Li X., Zhang Y. Design and implementation of initial cell search in 5G NR systems. *China Communications*, 2020, vol. 17, no. 5, pp. 38-49.
24. Bahadkar S., Kuchi K. Receiver Design for Physical Broadcast Channel in 5G NR. *Diss. Indian institute of technology Hyderabad*, 2019.
25. Kim I., Um J., Park S. Implementation of SDR-based 5G NR Cell Search Equipment. *2020 22nd International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2020, pp. 350-353.
26. Trifonov P. Efficient design and decoding of polar codes. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, vol. 60, no. 11, pp. 3221-3227.
27. Zhang J., Zheng Z., Zhang Y., Xi J., Zhao X. 3D MIMO for 5G NR: Several observations from 32 to massive 256 antennas based on channel measurement. *IEEE Communications Magazine*, 2018, vol. 56, no. 3, pp. 62-70.
28. Larsson E. G., Edfors O., Tufvesson F., Marzetta T. L. Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE communications magazine*, 2014, vol. 52, no. 2, pp. 186-195.

Статья поступила 10 марта 2021 г.

Информация об авторах

Манелис Владимир Борисович – доктор технических наук. Ведущий научный сотрудник. АО «ИРКОС». Область научных интересов: системы связи, радиомониторинг, алгоритмы приема и обработки сигналов. E-mail: vbm@ircoc.vrn.ru

Козьмин Владимир Алексеевич – кандидат технических наук, доцент. Директор по научной работе. АО «ИРКОС». Область научных интересов: радиомониторинг, цифровая обработка сигналов. E-mail: kozminva@ircos.ru

Сладких Владимир Александрович – кандидат технических наук. Начальник научно-исследовательского сектора. АО «ИРКОС». Область научных интересов: радиомониторинг, цифровая обработка сигналов. E-mail: sladkihva@ircoc.vrn.ru

Адрес: 129626, г. Москва, а/я 30.

Detection and identification of base stations of 5G cellular networks

V. B. Manelis, V. A. Kozmin, V. A. Sladkikh

Problem statement: recent years have been marked by the emergence and active implementation of 5G cellular communication systems. The need to identify unauthorized base stations (BS), resolve electromagnetic compatibility issues, and verify compliance with the frequency-territorial plan requires operators and radio monitoring services to analyze 5G BS signals. **The aim of the work** is to develop a set of procedures for receiving and processing signals necessary for detecting and identifying a 5G BS during radio monitoring. **Novelty:** a general set of procedures for receiving and processing 5G BS signals, receiving a broadcast channel, a control channel, and extracting system identifiers from a shared channel message is presented. **Results:** the developed complex of procedures for receiving and processing the BS signal allows

for the detection and identification of all detected 5G BS and is intended for implementation in a digital radio receiver with a simultaneous analysis bandwidth from 27 to 202 MHz. A Russian 5G signal analyzer is built on its basis. **Practical relevance:** the analyzer can be used for planning 5G systems at the stages of deployment and commissioning, analysis of coverage areas, as well as for radio monitoring of existing 5G networks in order to check the parameters of transmitters and compliance with the frequency-territorial plan.

Keywords: 5G, base station, signal analyzer, identification parameters, sync block, broadcast channel, control channel, SIB1.

Information about Authors

Vladimir Borisovich Manelis – Dr. habil. of Engineering Sciences. Leading Researcher. JSC «IRCOS». Field of research: communication systems, radiomonitoring, algorithms for receiving and processing signals. E-mail: vldman@mail.ru

Vladimir Alexeevich Kozmin – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Director for Scientific Work. JSC «IRCOS». Field of research: radiomonitoring, digital signal processing. E-mail: kozminva@ircoc.vrn.ru

Vladimir Alexandrovich Sladkikh – Ph.D. of Engineering Sciences. Head of the Research Sector. JSC «IRCOS». Field of research: radiomonitoring, digital signal processing. E-mail: sladkihv@mail.ru

Address: 129626, Russia, Moscow, POB 30.