

УДК 621.396.621.5

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2025-13-1-14-22>

EDN: XYAPHF

## SDR-анализатор сигналов стандарта LTE с панорамным модулем сканирования на основе методов машинного обучения

Цап В. В., Фокин Г. А. ✉

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*В статье рассматривается применимость моделей и методов машинного обучения при спектральном зондировании для повышения скорости сканирования и анализа сигналов стандарта LTE. Описывается порядок работы программного модуля сканирования сигналов стандарта LTE по алгоритму спектрального зондирования в широком диапазоне частот. Методом исследования является натурный эксперимент с использованием плат программно-конфигурируемого радио. Результатом сканирования и анализа является обнаружение сигналов базовых станций стандарта LTE, работающих на передачу в заданном районе. Эффективность обнаружения базовых станций оценивается посредством классификации участков спектра методами машинного обучения. Практическая значимость: объединение программного модуля панорамного сканирования в широком диапазоне и программного модуля анализа в информационной полосе частот позволяет существенно сократить время обнаружения базовых станций стандарта LTE в заданном районе.*

**Ключевые слова:** спектральное зондирование, стандарт LTE, программно-конфигурируемое радио, машинное обучение

### Введение

В настоящее время активно развиваются технологии мобильной связи, в частности сети стандартов LTE (аббр. от англ. Long-Term Evolution) и NR (аббр. от англ. New Radio) [1]. Эти технологии обеспечивают высокоскоростную передачу данных, низкие задержки и повышенную надежность связи, что открывает новые возможности для различных приложений, включая Интернет вещей, беспилотные транспортные средства и системы промышленной автоматизации.

Параллельно ведутся исследования в области динамического управления доступом к радиочастотному спектру в рамках концепции когнитивного радио [2, 3], которая позволяет интеллектуально распределять радиочастотный ресурс между различными пользователями и системами, минимизируя помехи и повышая эффективность использования частот.

---

#### Библиографическая ссылка на статью:

Цап В. В., Фокин Г. А. SDR-анализатор сигналов стандарта LTE с панорамным модулем сканирования на основе методов машинного обучения // Информационные технологии и телекоммуникации. 2025. Т. 13. № 1. С. 14–22. DOI: 10.31854/2307-1303-2025-13-1-14-22. EDN: XYAPHF

#### Reference for citation:

Tsap V., Fokin G. SDR-Based LTE Signal Analyzer with Panoramic Scanning Module Based on Machine Learning Methods // Telecom IT. 2025. Vol. 13. Iss. 1. PP. 14–22 (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2025-13-1-14-22. EDN: XYAPHF

Кроме того, значительное внимание уделяется разработке систем навигации, определяющих местоположение пользователя без применения глобальных навигационных спутниковых систем [4], таких как GPS или ГЛОНАСС. В частности, исследуются методы позиционирования на основе сигналов базовых станций (БС) сотовой связи, которые могут использоваться в условиях слабого покрытия спутниковыми сигналами.

В данной работе рассматривается обучение нейронных сетей [5–8] для решения задач позиционирования в сетях LTE [9, 10].

### Анализ сигналов стандарта LTE

Определение местоположения пользователя можно осуществлять по сигналам БС сотовой связи, усредняя их координаты по уровню мощности принятых сигналов [11]. При запросе местоположения БС разработанный ранее в [12] анализатор обращается к открытым базам данных со сведениями, полученными после чтения системной информации, которую БС передают в широкополосных каналах [12]. Из блоков SIB1 (*аббр. от англ. System Information Block Type 1*) ([https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136300\\_136399/136331](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136331)) анализатор извлекает идентификатор БС и другие параметры, определяющие ее принадлежность к стране, оператору связи и региону местоположения.

Недостатком разработанного ранее анализатора [12] является распознавание параметров сигналов стандарта LTE исключительно при известной несущей частоте. Для поиска и обнаружения излучающих в данном районе БС при заранее не известных их несущих частотах необходим механизм, позволяющий оперативно их определить. Это можно сделать с помощью панорамного модуля сканирования в широкой полосе частот. Для повышения скорости работы модуля сканирования в настоящей работе предлагается использовать методы и средства машинного обучения [3–8].

Наличие модуля автоматического определения несущих частот в широком диапазоне частот позволяет оперативно обнаружить несколько БС стандарта LTE, работающих в настоящее время в заданном районе. После их обнаружения можно путем усреднения мощности принимаемого сигнала грубо определить местоположение анализатора.

Для уменьшения времени работы анализатора необходимо сократить число рассматриваемых им каналов стандарта LTE, а именно уменьшить количество центральных частот, на которых производится поиск сигналов синхронизации. Для этого сначала требуется определить их положение в заданном диапазоне сканирования, что можно сделать при помощи бинаризации оси частот по уровню мощности принимаемых сигналов. Под бинаризацией понимают определение активных участков радиозфира с помощью сравнения мощности сигналов с заданным порогом. В одном диапазоне частот одновременно могут работать БС разных стандартов, поэтому требуется выделить только те участки спектра, в которых обнаружены работающие на передачу в настоящее время в заданном районе БС стандарта LTE. Одним из решений задачи бинаризации оси частот по

признаку занятости радиоэфира передающими БС LTE является применение методов спектрального зондирования.

Первым этапом работы анализатора сигналов стандарта LTE является панорамное сканирование широкого диапазона частот, зондирование и выделение участков спектра, в которых обнаружены каналы стандарта LTE, вычисление их центральных частот. Вторым этапом является запуск анализатора сигналов на несущих частотах, ближайших к найденным. Далее опишем алгоритм работы на первом этапе.

### Спектральное зондирование

Для определения стандартов, по которым работают передающие БС, воспользуемся моделями и методами семантической сегментации изображений [3–8], которая осуществляется с помощью остаточной сверточной нейронной сети глубиной 50 слоев, которой требуется предоставить изображения размером  $256 \times 256$  пикселей с глубиной цвета 8 бит. Изображения будем синтезировать из спектрограмм, полученных по записям сигналов в наборе частот в пределах заданного диапазона сканирования. Набор частот формируется таким образом, чтобы спектрограммы записей пересекались. При дальнейшей обработке записей их перекрытие позволяет компенсировать неравномерность амплитудно-частотной характеристики SDR-приемника (*аббр. от англ. Software Defined Radio – программно определяемое радио*). Поскольку распределение ресурсных блоков, в которые размещаются передачи физического нисходящего канала с разделением пользователей, может быть прерывистым или неравномерным вдоль ресурсной сетки канала, спектр канала на записи будет неоднородным. Поэтому при экспериментальной апробации производится несколько записей на одной частоте для последующего усреднения их спектрограмм. При частоте дискретизации 30,72 МГц шаг сканирования выбирается равным 1,92 МГц, длительность записи – 40 мс. Таким образом, размер одного пикселя изображения вдоль оси частот равен 120 кГц, а вдоль оси времени – 156,25 мкс.

Сверточная нейронная сеть (CNN, *аббр. от англ. Convolutional Neural Network*) обучается для распределения элементов изображений на два класса: «присутствие сигнала стандарта LTE» и «отсутствие сигнала стандарта LTE», что воспринимается как «Шум». Обучение производится с помощью набора сгенерированных в пакете расширения спектрограмм, на которых располагаются графические представления сигналов одного или нескольких измерительных каналов (RMC, *аббр. от англ. Reference Measurement Channel*) стандарта LTE со случайно выбранными параметрами, значения которых приведены в таблице 1.

Метриками эффективности работы CNN являются нормированная матрица несоответствий (nCM, *аббр. от англ. Normalized Confusion Matrix*) и степень пересечения (IoU, *аббр. от англ. Intersection of Union*). Для обученной CNN метрика nCM представлена в таблице 2; метрика IoU равна 96,3 %.

Результатом работы CNN является карта меток классов каждого пикселя изображения. Все карты меток накладываются друг на друга и усредняются в соответствии с положением их спектрограмм на оси частот.

Таблица 1 – Параметры сгенерированных сигналов LTE для обучения CNN

Параметр	Значение
Конфигурация канала RMC	R.2, R.6, R.8, R.9
Ширина канала, МГц	5, 10, 15, 20
Количество неиспользуемых транспортных блоков	0...3
Отношение сигнал / шум, дБ	5...40
Максимальный частотный сдвиг, кГц	3

Таблица 2 – nCM для обученной CNN

Класс	LTE	Шум
LTE, %	98,8	1,2
Шум, %	2,7	97,3

Для уменьшения влияния на результат работы модуля панорамного зондирования неправильных оценок принадлежности пикселей к определенному классу будем усреднять карты меток (рисунок 1б), полученные при анализе спектрограмм нескольких записей сигнала на одной частоте. Для уменьшения влияния ложных оценок CNN в свободных от каналов участках спектра будем взвешивать (рисунок 1в) карту меток нормированной спектрограммой диапазона сканирования (рисунок 1а).

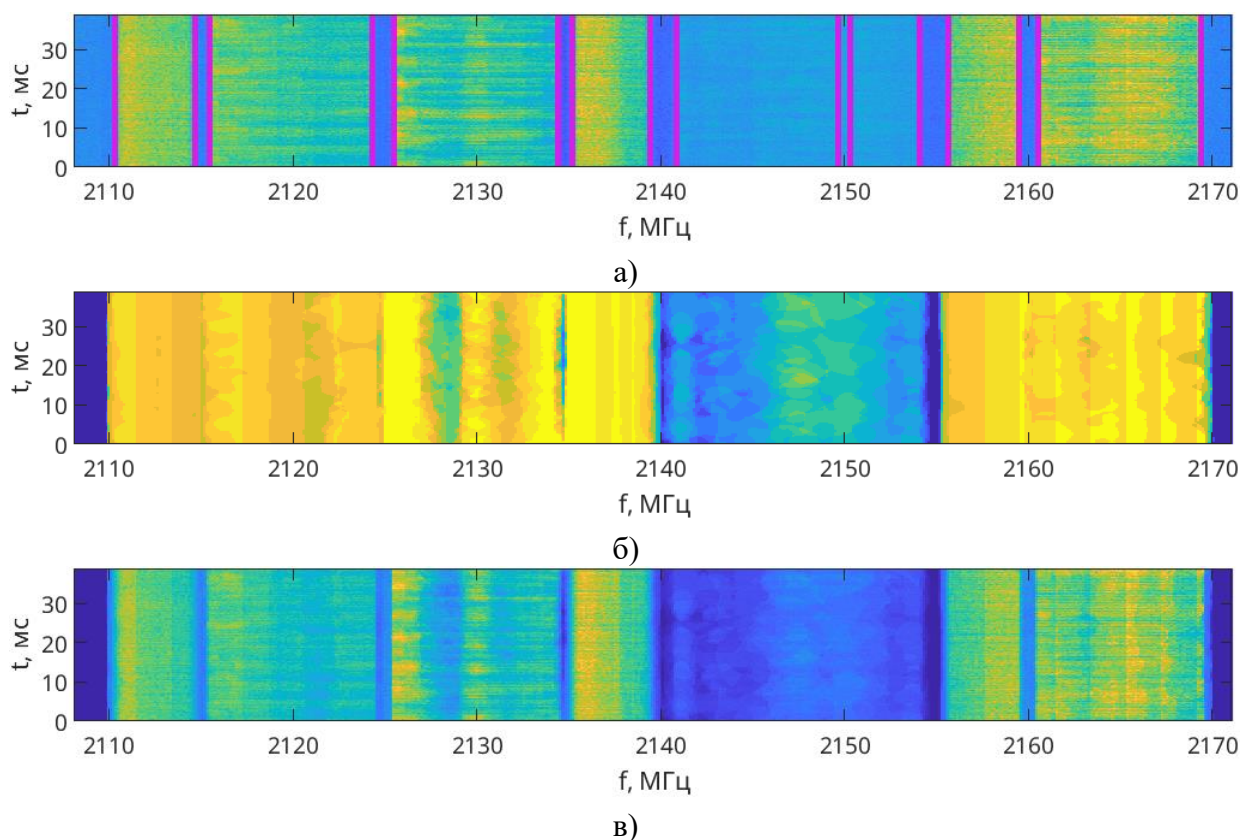


Рис. 1. Промежуточные результаты постобработки CNN: а) нормированная спектрограмма диапазона сканирования; б) карта меток классов элементов спектрограммы; в) карта меток, взвешенная нормированной спектрограммой

Из рисунка 1в видно, что после взвешивания карты меток на ней проявились промежутки между частотными каналами, границы которых, по информации из базы данных CellMapper (<https://www.cellmapper.net>), изображены на рисунке 1а фиолетовыми линиями. Также из рисунка 1в видно, что у карты меток, взвешенной нормированной спектрограммой, увеличился пик-фактор, позволяющий визуально повысить различимость соседних частотных каналов. В качестве негативного эффекта взвешивания можно выделить увеличение дисперсии границ частотных каналов, что графически отображается размытием границ каналов на рисунке 1в. По полученной после взвешивания карте меток (рисунок 2а) определяются центральные (несущие) частоты каналов передатчиков БС, работающих в заданном диапазоне частот.

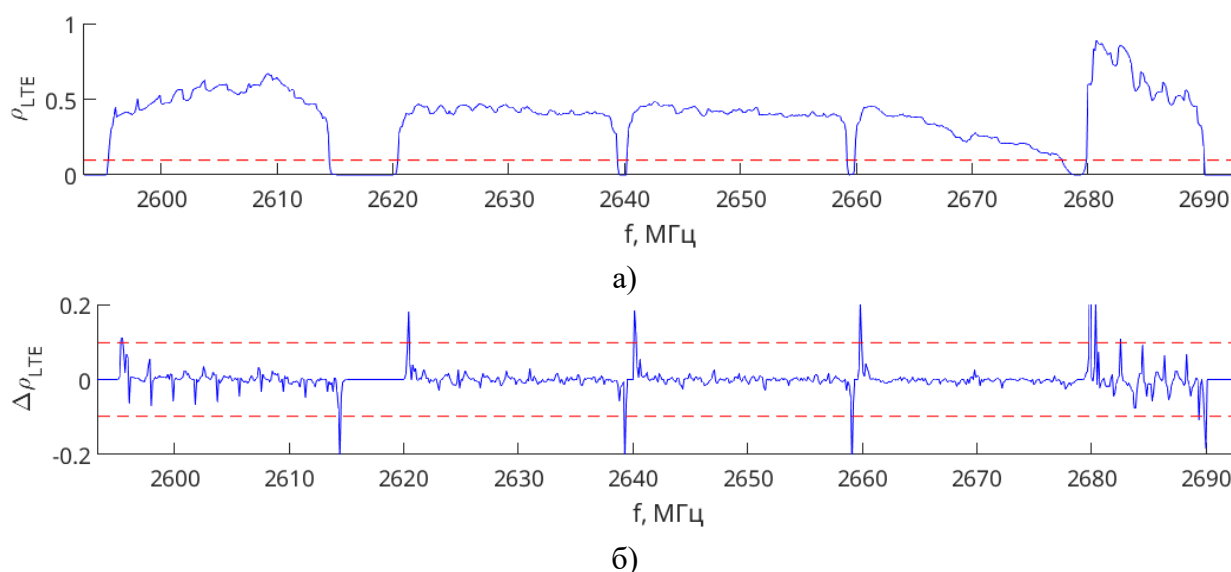


Рис. 2. Промежуточные результаты бинаризации: а) усредненная по времени карта меток; б) дифференциал карты меток вдоль оси частот

Процедура определения центральных частот включает следующие операции. Сначала находится положение границ частотных каналов распознанных сигналов на бинаризованной карте меток (рисунки 1в, 2а). Бинаризация производится на основе глобального порога, вычисленного по методу Оцу [13]; при этом в качестве изображения используется дифференциал карты меток вдоль оси частот (рисунок 2б). Таким образом, фактором, влияющим на вычисление порогового значения, является скорость изменения вероятности присутствия канала стандарта LTE: чем выше и уже пик на рисунке 2б, тем с большей вероятностью на заданной частоте находится граница канала. Для повышения вероятности распознавания канала, работающего в режиме прерывистой передачи, используется признак пика на рисунке 2б.

Повторно продифференцировав бинаризованную карту меток, можно найти положения верхних и нижних границ частотных каналов. Исключив из набора границы частотных каналов, не имеющие пары, и найдя среднее арифметическое каждой пары граничных частот, вычисляются центральные частоты каналов стандарта LTE. Поскольку их минимальная ширина составляет

1,4 МГц, каналы с шириной полосы частот менее 1 МГц из дальнейшего рассмотрения исключаются.

По завершении спектрального зондирования имеем в распоряжении набор оценок центральных частот каналов стандарта LTE (красные линии на рисунке 3), при этом информация об их ширине необязательна, поскольку передается в основном блоке системной информации.

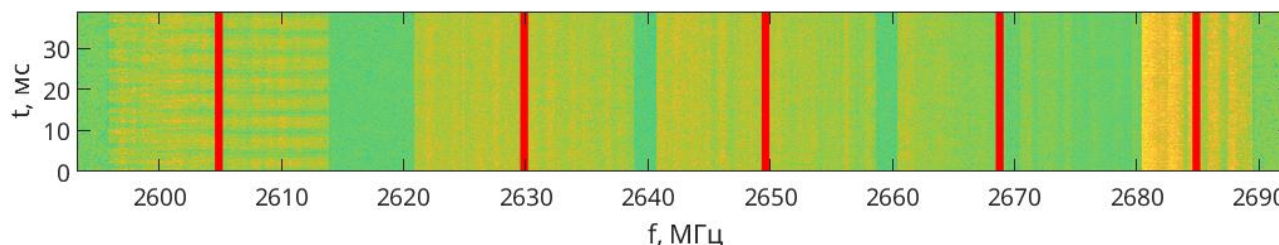


Рис. 3. Спектрограмма диапазона сканирования

CNN имеет свойство уменьшать вероятность принадлежности пикселя к классу «LTE» на верхних частотах канала, что можно продемонстрировать на примере сигнала с центральной частотой 2670 МГц (рисунок 2а). Следствием этого является то, что граница канала и, соответственно, оценка его центральной частоты, оказываются смещены. Для компенсации этого эффекта будем запускать анализатор сигналов на ближайших трех несущих частотах LTE, расположенных ниже и выше вычисленной частоты, или, другими словами, будем искать несущие частоты в пределах от  $-350$  до  $350$  кГц от вычисленной частоты, поскольку расстояние между каналами равно 100 кГц [14].

В стандарте LTE определено множество диапазонов частот, за каждым из которых закреплен тип дуплекса, действующий во всех каналах, находящихся в его пределах [14]. Некоторые из диапазонов частот пересекаются, например 25 и 36, тем самым позволяя выбирать тип дуплекса. От типа дуплекса зависит расположение сигналов синхронизации в ресурсной сетке канала ([https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136200\\_136299/136211](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211)). Поскольку заранее не известно, к какому диапазону частот принадлежит канал, будем производить синхронизацию согласно всем возможным для выбранной частоты типам дуплекса. Позже номер диапазона частот можно будет явно определить из поля freqBandIndicator блока SIB1.

### Экспериментальные результаты

В настоящем исследовании выполнена экспериментальная оценка эффективности применения CNN для спектрального зондирования с целью повышения скорости сканирования и анализа сигналов стандарта LTE. Эффективность применения CNN оценивается следующими параметрами (таблица 3): 1) коэффициент ложных срабатываний; 2) точность вычисления несущих частот каналов LTE, выраженная среднеквадратическим отклонением (СКО) оценок частот от действительных; 3) дисперсия границ классов, выраженная шириной полосы частот между областями, явно определенными как «LTE» и «Шум».



Таблица 3 – Оценка эффективности применения CNN

Параметр	Значение
Коэффициент ложных срабатываний, %	1,95
СКО оценок частот, пикселей	3,6
Дисперсия границ классов, пикселей	2,15

Описанный в данной работе метод спектрального зондирования в задачах панорамного сканирования позволяет добиться следующего практического эффекта. Во-первых, он не зависит от количества истинных каналов стандарта LTE внутри заданного диапазона панорамного сканирования, так как работает с изображениями. Во-вторых, описанный метод спектрального зондирования уменьшает количество рассматриваемых анализатором несущих частот стандарта LTE в  $N = \frac{\Delta F / 100 \text{ кГц}}{\Delta F / \Delta F_{LTE} k n}$  раз, где  $\Delta F$  – ширина диапазона сканирования,  $\Delta F_{LTE}$  – ширина каналов стандарта LTE,  $k$  – количество ложных срабатываний CNN,  $n$  – количество анализируемых несущих частот. Например:  $N = 2,29$  при ширине диапазона сканирования 100 МГц, заполненного каналами стандарта LTE шириной 1,4 МГц с учетом количества ложных срабатываний CNN, указанных в таблице 3, и шести анализируемых несущих частотах.

## Выводы

В результате проведенного исследования была обучена нейронная сеть для применения к задачам обнаружения сигналов стандарта LTE при панорамном сканировании посредством поиска и определения несущих частот. При аппаратной реализации описанного алгоритма есть возможность ускорить анализ сигналов и сократить время, требующееся для обнаружения БС стандарта LTE, работающих на передачу в заданном районе.

## Литература

1. «Иртея» планирует поставлять отечественные базовые станции 5G на экспорт // ТАСС. 23.12.2024. URL: <https://tass.ru/ekonomika/22750391> (дата обращения 01.03.2025)
2. Rao A. L. N., Ramesh B., Manjunatha, Jain A., Alzubaidi L. H., et al. The Role of Cognitive Radio in Optimizing Spectrum Utilization // Proceedings of 13<sup>th</sup> International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT, 06–07 April 2024, Jabalpur, India). IEEE, 2024. PP. 176–182. DOI: 10.1109/CSNT60213.2024.10546073
3. Фокин Г. А. Обзор моделей спектрального зондирования сигналов LTE и NR // Первая миля. 2024. № 8 (124). С. 40–47. DOI: 10.22184/2070-8963.2024.124.8.40.47. EDN: XUXCHX
4. Фокин Г. А., Волгушев Д. Б., Рютин К. Е., Шеремет Н. В., Цап В. В. Прикладное использование технологий программно-конфигурируемого радио в системах связи и навигации. СПб.: СПбГУТ, 2025. 240 с. EDN: WIPENY

5. Арефьев А. С., Варыгин А. А., Фокин Г. А. Анализ структуры целевого сигнала NR и LTE на основе нейросетевого подхода и методов глубокого обучения // Информационные технологии и телекоммуникации. 2024. Т. 12. № 1. С. 16–28. DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-1-16-28. EDN: GEOTKR
6. Capture and Label NR and LTE Signals for AI Training // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/wireless-testbench/ug/capture-and-label-nr-and-lte-signals-for-ai-training.html> (accessed 31.03.2025)
7. Spectrum Sensing with Deep Learning to Identify 5G and LTE Signals // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/comm/ug/spectrum-sensing-with-deep-learning-to-identify-5g-and-lte-signals.html> (accessed 31.03.2025)
8. Identify LTE and NR Signals from Captured Data Using SDR and Deep Learning // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/wireless-testbench/ug/identify-lte-and-nr-signals-from-captured-data-using-sdr-and-deep-learning.html> (accessed 31.03.2025)
9. Фокин Г. А., Волгушев Д. Б. Использование SDR-технологии для задач сетевого позиционирования. Апробация приема и обработки опорных сигналов LTE // Вестник СибГУТИ. 2023. Т. 17. № 3. С. 23–33. DOI: 10.55648/1998-6920-2023-17-3-23-33. EDN: YOIQZO
10. КОНСУЛ ориентируется на местности // Коммерсантъ. 2021. № 76. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4793821> (дата обращения 05.03.2025).
11. Киреев А. В., Фокин Г. А. Оценка точности локального позиционирования мобильных устройств с помощью радиокарт и инерциальной навигационной системы // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 4. С. 54–62. EDN: YMIHOI
12. Цап В. В., Фокин Г. А. Разработка и апробация анализатора сигналов стандарта LTE средствами программно-конфигурируемого радио // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 2. С. 4. EDN: LPOWHF
13. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. Vol. 9. Iss. 1. PP. 62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076
14. ETSI TS 136 101 V18.7.0: User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception, 2024. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136100\\_136199/136101/](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136101/) (accessed 10.03.2025)

**Статья поступила 06 апреля 2025 г.**  
**Одобрена после рецензирования 29 апреля 2025 г.**  
**Принята к публикации 14 июля 2025 г.**



## Информация об авторах

Цап Всеволод Владимирович – студент 1-го курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Фокин Григорий Алексеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.  
E-mail: fokin.ga@sut.ru

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2025-13-1-14-22>  
EDN: XYAPHF

## SDR-Based LTE Signal Analyzer with Panoramic Scanning Module Based on Machine Learning Methods

V. Tsap, G. Fokin ✉

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

*The paper considers the applicability of machine learning models and methods in spectral probing to increase the speed of scanning and analyzing LTE signals. It describes the operating procedure of the software module for scanning LTE signals using the spectral probing algorithm in a wide frequency range. **Methods.** The research method is a full-scale experiment using software-defined radio boards. The result of scanning and analysis is the detection of signals from LTE base stations operating on transmission in a given area. The efficiency of detecting base stations is estimated by classifying spectrum range using machine learning methods. **Practical relevance.** The combination of a software module for panoramic scanning in a wide range and a software module for analyzing in the information frequency band allows to significantly reduce the detection time of LTE base stations in a given area.*

**Key words:** spectral probing, LTE standard, software-defined radio, machine learning

## Information about Authors

Tsap Vsevolod – a 1st Year Master's Student (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications)

Fokin Grigoriy – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Wireless Technologies and Systems (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: fokin.ga@sut.ru