

Метод определения координат и секторных параметров базовых станций сетей подвижной радиосвязи четвертого поколения для задач позиционирования мобильных устройств

А.С. Дюбов, М.А. Руфов, П.С. Петров

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

Аннотация: Представлен воспроизводимый метод автономного определения координат площадок базовых станций сетей подвижной радиосвязи четвертого поколения и параметров их секторов, основанный исключительно на полевых наблюдениях модема без использования временной задержки и методов оценки углов прихода сигнала. Подход сочетает робастное выделение информативного «ядра» измерений, взвешенную минимизацию расстояний и агрегирование на уровне площадки, обеспечивая устойчивые оценки в условиях городской застройки. Экспериментальная проверка в реальной сцене демонстрирует значимое снижение ошибки локализации по сравнению с базовыми центроидными и медианными методами, что подтверждает практическую применимость предложенного решения.

Ключевые слова: сети подвижной радиосвязи четвертого поколения, позиционирование, локализация, базовая станция, координата площадки, мощность сигнала, угловое распределение, секторизация, оптимизация, полевые наблюдения, геометрическая медиана, метод минимизации, радиосигнал.

Введение

Для приложений Интернета вещей, телематики и персонального трекинга требуется надёжное позиционирование при отсутствии или деградации спутниковой навигации; в условиях развития гибридных сетей связи, критически важной становится достоверная идентификация сетевого окружения как основы методов пространственной локализации.

В настоящее время основой сотовой инфраструктуры являются сети подвижной радиосвязи четвертого поколения, обозначаемые в международной технической литературе термином Long Term Evolution (LTE). Данные сети характеризуются наибольшей распространённостью и структурной стабильностью: технологии второго поколения вытеснены из большинства сценариев передачи данных, а сети пятого поколения пока не обеспечивают сопоставимого охвата. Это позволяет рассматривать

инфраструктуру LTE как практическую основу для реализации радионавигационных и позиционных решений, не опирающихся на спутниковые навигационные системы. Практически реализуемой альтернативой спутниковому позиционированию в таких условиях служат сервисы позиционирования на основе данных сетевого окружения (Location-Based Services, LBS) [1].

Эти сервисы опираются на общедоступные каталоги площадок базовых станций, которые на практике оказываются неполными, запаздывают при модернизации, неоднородны по точности привязки и часто ограничены лицензионно; для регулярной эксплуатации требуется автономная база, автоматически актуализируемая по собственным полевым данным [2-4].

Целью работы является разработка и верификация инженерного метода автоматического определения координат площадок LTE и базовых угловых параметров их секторов по данным полевых наблюдений, собранных с использованием серийно выпускаемого встраиваемого сотового модема. В качестве исходных данных предлагаемого алгоритма используются геопозиция приёмника и стандартные параметры сот, характеризующие уровень и качество принимаемого сигнала, а также идентификаторы сетевых элементов, с последующим сопоставлением результатов на уровне площадки.

В практике сотовых сетей известны методы позиционирования, основанные на специальных сетевых признаках, таких как Timing Advance – параметр временной синхронизации передачи, Time of Arrival / Time Difference of Arrival (ToA/TDoA) – методы оценки времени и разности времени прихода сигнала, а также Angle of Arrival (AoA) – метод определения угла прихода радиосигнала [5]. Указанные подходы основаны на измерении временных или угловых характеристик радиосигнала и потенциально позволяют повысить точность локализации. Однако их реализация требует специализированной сетевой поддержки и

измерительного оборудования, а также доступа к параметрам, которые, как правило, недоступны на серийно выпускаемых встраиваемых сотовых модемах. В связи с этим в настоящей работе рассматривается альтернативный подход, не опирающийся на данные признаки. Это определяет практическую направленность предлагаемого метода и его применимость в реальных условиях эксплуатации.

Научно-технический вклад состоит в воспроизводимом конвейере квазилинейной сложности, сочетающем устойчивую минимизацию суммы расстояний, угловую декорреляцию и агрегирование по площадке, а также в оценке оси и эффективной ширины сектора из углового распределения наблюдений для их прямого применения и создания сервиса позиционирования.

Алгоритм

Алгоритм предназначен для автономной оценки координат площадок базовых станций стандарта LTE и основных параметров их секторов на основе полевых наблюдений без использования параметров временной синхронизации и методов оценки углов прихода сигнала. На вход алгоритма подаются временные ряды измерений, включающие координаты приёмника, параметры уровня и качества принимаемого радиосигнала, а также идентификаторы соты и базовой станции. Координаты задаются в глобальной системе WGS-84.

В качестве радиотехнических параметров используются мощность и качество принятого опорного сигнала. Параметр Reference Signal Received Quality (RSRQ) отражает качество принимаемого сигнала и учитывает влияние помех и загрузки сети. Параметр Reference Signal Received Power (RSRP) используется как относительная мера удалённости приёмника от базовой станции. Предполагается, что шкала RSRP на используемом оборудовании является порядковой и монотонной.

Помимо радиотехнических параметров в обработке используются сетевые идентификаторы, по которым каждое наблюдение соотносится с определённой сотой и соответствующей базовой станцией. Идентификатор соты (Evolved Cell Identity – ECI) и идентификатор базовой станции (eNodeB) применяются для агрегирования наблюдений на уровне физического объекта сети. Физический идентификатор соты (Physical Cell Identity – PCI) используется для различения соседних сот в радиоэфире, а номер радиоканала (Evolved Absolute Radio Frequency Channel Number – EARFCN) задаёт рабочий частотный диапазон.

Предобработка включает приведение времени к всемирному координированному времени (UTC), проверку логической согласованности полей и удаление заведомо некорректных записей, а также редукцию данных к минимально необходимому набору признаков.

Для каждой соты формируется подмножество наблюдений «ядра», содержащее такты с верхним уровнем приёма по квантильному порогу RSRP.

Пусть s_i — исходный уровень RSRP, а $Q_{1-q}(s)$ — квантиль порядка $(1 - q)$; индикатор «ядра» задаётся выражением:

$$I_q = \{ i: s_i \geq Q_{1-q}(\{s\}) \}, \quad q \in [0,55; 0,60] \quad (1)$$

Отбор по формуле 1 ослабляет вклад дальних и экранированных наблюдений, оставляя представительную фронтальную область приёма, наиболее информативную для геометрической локализации.

Геометрическая устойчивость «ядра» контролируется по угловому охвату в локальной декартовой системе координат. Предварительный центр $c^{(0)}$ вычисляется как геометрическая медиана [6] по «ядру» итерационным методом Вайсфельда, после чего определяется диапазон азимутов относительно $c^{(0)}$. При угловом охвате ниже минимального порога оценка для соответствующей соты не выполняется.

Для снижения автокорреляции соседних точек применяется пространственное прореживание: наблюдение сохраняется, если его расстояние до ближайшей уже выбранной точки превышает порог, который повышается с расстоянием от $c^{(0)}$. Эта процедура предотвращает доминирование скученных участков траектории и выравнивает угловую представленность данных.

Окончательная оценка центра соты c^* формулируется как задача минимизации взвешенной суммы евклидовых расстояний до нормированных наблюдений x_i . Используется мультипликативная система весов, учитывающая уровень сигнала, угловую репрезентативность и радиальную удалённость:

$$c = \arg \min_{u \in \mathbb{R}^2} \sum_{i \in J_q} w_i \|x_i - u\|_2, \quad w_i = w_i^{(yp)} w_i^{(yr)} w_i^{(p)} \quad (2)$$

Вес по уровню задаётся нормировкой:

$$\tilde{s}_i = \frac{s_i - \min_{J_q} s}{\max_{J_q} s - \min_{J_q} s} \in [0,1], \quad w_i^{(yp)} = 1 + \alpha \tilde{s}_i, \quad (3)$$

где $\alpha > 0$ обеспечивает умеренный приоритет записей с высоким уровнем. Угловой вес в формуле 2 нормализует избыточные направления и определяется через оценку угловой плотности $\rho(\varphi)$, вычисляемой по гистограмме с шагом $\Delta\varphi$ на $[-\pi, \pi)$:

$$w_i^{(yr)} = (\rho(\varphi_i) + \varepsilon)^{-\gamma} \quad (4)$$

Радиальный вес в формуле 2 сглаживает вклад удалённых наблюдений:

$$w_i^{(p)} = \left(1 + \frac{r_i}{r_{\text{эКВ}}}\right)^{-\beta}, \quad r_i = \|x_i - c^{(0)}\|_2 \quad (5)$$

Минимизация решается итерациями Вайсфельда с переоценкой весов; при положительных весах и невырожденной конфигурации наблюдений достигается сходимость к стационарной точке.

Координата площадки базовой станции извлекается агрегированием центров её секторов [7]. Пусть c_j — устойчивые центры секторов, полученные по формуле 2, а W_j — их надёжности, пропорциональные количеству и качеству наблюдений. Координата площадки s определяется как решение задачи минимизации суммы взвешенных расстояний:

$$s = \arg \min_{u \in \mathbb{R}^2} \sum_j W_j \|c_j - u\|_2, \quad (6)$$

что повышает устойчивость оценки за счёт согласования независимых секторов одного физического объекта.

Параметры сектора оцениваются по угловому распределению «ядра». Ось сектора μ вычисляется как круговое среднее с весами w_i :

$$\mu = \text{atan2} \left(\sum_i w_i \sin \varphi_i, \sum_i w_i \cos \varphi_i \right) \quad (7)$$

Эффективная ширина сектора $BW_{\text{эф}}$ определяется через квантиль распределения модулей минимальных угловых расстояний $\delta(\varphi_i, \mu) \in [0, \pi]$, где $\delta(\varphi, \mu) = \arccos(\cos(\varphi - \mu))$:

$$BW_{\text{эф}} = 2, Q_p(\delta(\varphi_i, \mu)), \quad p \in [0,70; ,0,75], \quad 40^\circ \leq BW_{\text{эф}} \leq 120^\circ. \quad (8)$$

Такая параметризация согласуется с практикой секторизации сот в городских условиях и достаточна для построения геометрической аппроксимации зоны обслуживания [8].

Вычислительная сложность конвейера является квазилинейной по числу наблюдений. Выбор «ядра» по квантилю реализуем за линейное время алгоритмами выбора порядка; построение угловой гистограммы и расчёт весов требуют один проход по данным; одна итерация метода Вайсфельда имеет линейную стоимость. Параллелизм по идентификаторам соты и площадки достигается естественным разбиением по ключам ECI и eNB. Алгоритм не опирается на матричные инверсии и устойчив к умеренным выбросам, что упрощает реализацию на обычном центральном процессоре.

Достоинства подхода заключаются в робастной постановке задачи локализации через минимизацию взвешенной суммы расстояний, в подавлении угловой избыточности за счёт весов, в независимости от специальных сетевых параметров и в устойчивом агрегировании по площадке. Такая конструкция обеспечивает стабильные оценки при типичных искажениях полевых данных и масштабируется на большие массивы наблюдений за счёт квазилинейной сложности.

Ограничения метода связаны с наблюдательной геометрией и допущениями по шкале измерений. При недостаточном угловом охвате задача становится слабо идентифицируемой, что приводит к снижению доли успешно оценённых сот. Порядковая трактовка RSRP исключает использование абсолютных уровней, поэтому конфигурации с выраженной межустройственной систематикой требуют дополнительной нормировки [9]. В сценах с интенсивными отражениями и мультипутём приближение локальной плоскости и однопиковая модель углового распределения дают консервативные оценки ширины сектора. Метод не использует задержки и фазовые признаки, поэтому в плотно застроенных районах возможны смещения в сторону доминирующих направлений приёма [10].

Эксперимент

Экспериментальная верификация метода выполнена на собственных журналах полевых наблюдений городской среды Санкт-Петербурга (район проспекта Большевиков — улицы Дыбенко). Сбор данных осуществлялся в процессе движения приёмника на велосипеде со скоростью 12–15 км/ч; усреднённый пространственный шаг фиксации измерений составлял около 5 м. Аппаратный комплекс для регистрации полевых данных был реализован на базе энергоэффективного микроконтроллера STM32L431 и серийно выпускаемого встраиваемого LTE-модуля SimCom A7670E, подключённого к многополосной гибкой антенне с печатной излучающей структурой.

В точках маршрута фиксировались координаты приёмника, которые использовались для пространственной привязки всех последующих измерений. Одновременно с координатами регистрировались параметры видимых сот сети LTE, включая идентификатор соты, физический идентификатор сектора, рабочую частоту, а также уровень и качество принимаемого сигнала. Таким образом, каждая запись отражает положение приёмника в пространстве и набор радиосигналов, наблюдаемых в данный момент времени.

В результате был сформирован журнал измерений, представляющий собой набор записей, каждая из которых соответствует отдельному моменту времени и содержит координаты приёмника и параметры одной или нескольких сот. Данный журнал использовался в качестве исходных данных для дальнейшей обработки. Совокупный объём экспериментальных данных составил 13 167 записей наблюдений LTE (рисунок 1).

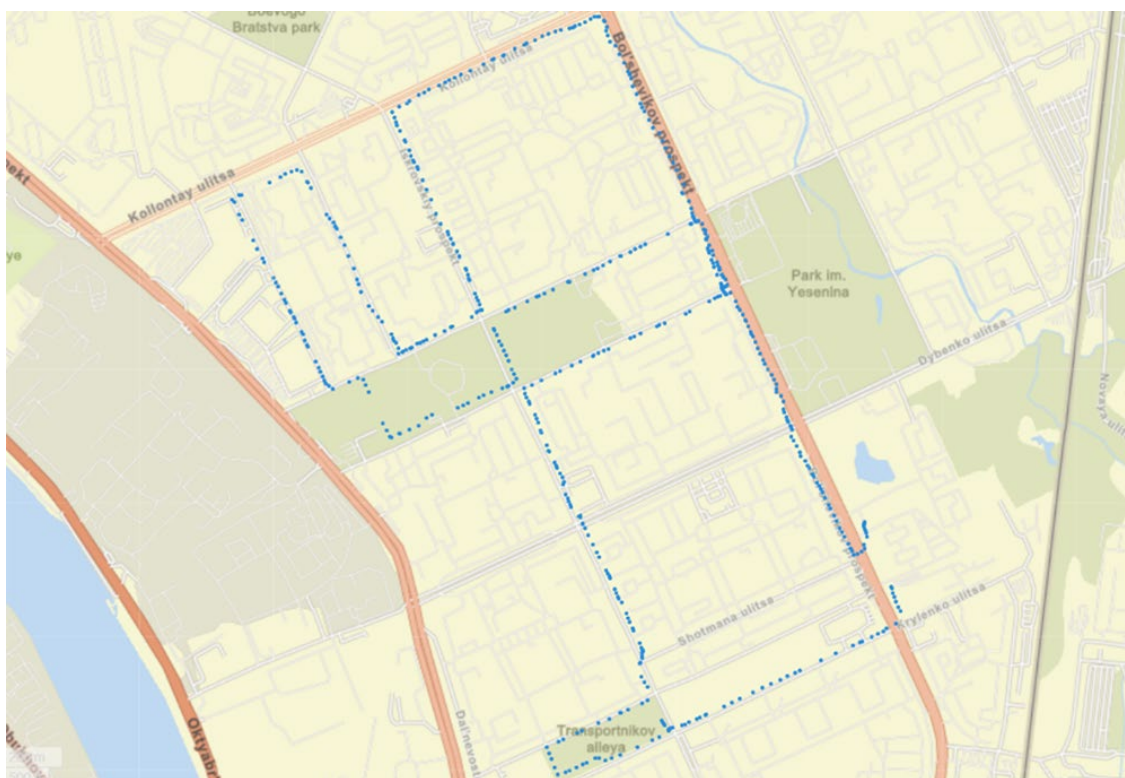


Рис. 1. – Траектория движения приёмника и точки полевых измерений

На первом этапе обработки, в соответствии с общей логикой алгоритма, выполнялась очистка и предварительная подготовка данных. Из журнала удалялись некорректные и неполные записи, включая пропуски координат, ошибочные идентификаторы, дубли и очевидные артефакты измерений. После этого данные группировались по отдельным сотам, в результате чего для каждой соты формировался собственный набор наблюдений. Это позволило анализировать каждую соту независимо.

На следующем этапе для каждой соты выполнялся отбор информативных наблюдений. Из общего набора точек использовались только измерения, соответствующие относительно высокому уровню принимаемого сигнала, то есть принадлежащие верхней части распределения RSRP. Такой отбор позволяет снизить влияние удалённых, экранированных и отражённых сигналов, характерных для городской застройки, и сохранить преимущественно те точки, которые с наибольшей вероятностью расположены вблизи реального положения базовой станции. Сформированное таким образом подмножество наблюдений далее использовалось для последующих этапов оценки координат.

После отбора информативных наблюдений выполнялась проверка их пространственной и угловой представленности. Анализировалось, обеспечивают ли выбранные точки достаточное разнообразие по направлениям и не сосредоточены ли они преимущественно в одной области или вдоль одного направления движения, например вдоль одной улицы. Если набор наблюдений оказывался слишком однообразным и не обеспечивал необходимого пространственного охвата, соответствующая сота исключалась из дальнейшего анализа, поскольку в таком случае устойчивое определение её положения было невозможно.

Далее выполнялась геометрическая обработка данных, направленная на выравнивание плотности наблюдений. Если приёмник в течение

продолжительного времени находился в одном и том же месте или двигался по близкой траектории, соответствующие измерения частично удалялись. Такая процедура позволяла предотвратить чрезмерное влияние локально сгруппированных точек на результат и обеспечить более равномерное представление наблюдений в пространстве.

На основе отобранных и предварительно обработанных наблюдений выполнялся расчёт координаты сектора базовой станции. Положение сектора определялось как точка, которая в среднем находится на наименьшем расстоянии от всех выбранных наблюдений. При этом больший вклад в итоговую оценку вносили измерения с более высоким уровнем принимаемого сигнала, а также наблюдения, обеспечивающие более равномерное покрытие по направлениям и расположенные ближе к предполагаемому центру. Такой подход позволяет получить устойчивую оценку положения сектора в условиях неравномерного распределения данных.

На заключительном этапе координаты, полученные для отдельных секторов одной базовой станции, объединялись в единую оценку координаты физической площадки. Такое агрегирование позволяет согласовать независимые результаты, полученные по разным секторам, и повысить устойчивость итоговой оценки положения базовой станции в целом.

Дополнительно по угловому распределению наблюдений с наибольшим уровнем принимаемого сигнала определялись ориентация сектора и примерная ширина его зоны обслуживания. Эти параметры оценивались на основе направлений, из которых сигналы поступали наиболее устойчиво, и использовались для геометрической интерпретации структуры секторного покрытия базовой станции. Полученные таким образом оценки использовались для последующего анализа точности локализации и сравнения с базовыми методами.

Оценка точности проводилась по евклидову смещению оценки площадки относительно эталона с последующим вычислением квантилей распределения ошибок p_{50} , p_{75} , p_{90} и среднего значения. Информация об эталонных вышках собиралась вручную с использованием внешних баз данных LBS и документов, с последующей визуальной полевой проверкой координат на карте.

Результаты рассматриваемого алгоритма показаны на рисунке 2, где красными кругами обозначены локализованные базовые станции, а чёрными отрезками – вычисленные направления их сигнальных секторов.

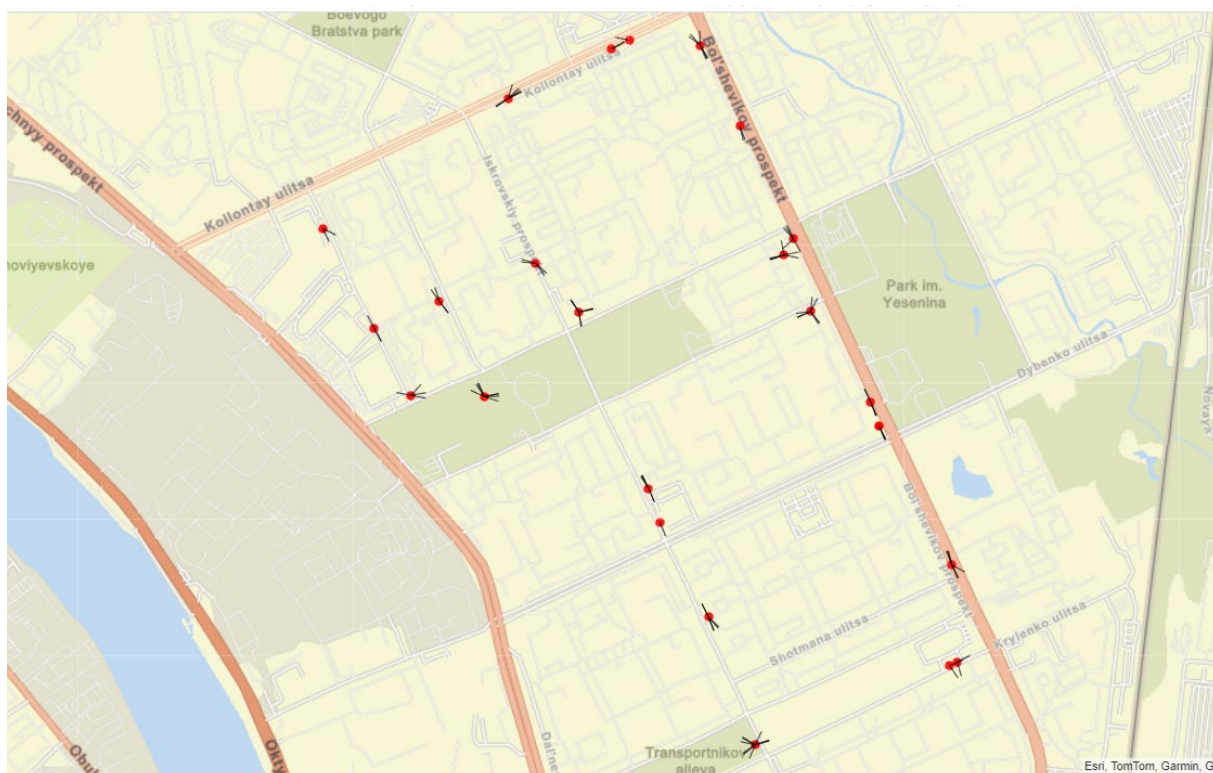


Рис. 2. – Карта с локализованными по рассматриваемому алгоритму базовыми станциями (красные круги) и определёнными направлениями секторов сот (чёрные отрезки)

Для корректности сопоставления базовые методы применялись на идентичном множестве наблюдений и с тем же правилом агрегирования до

уровня площадки. Рассматривались три базовых подхода: невзвешенный центроид, центроид с весами по нормированному уровню мощности принятого опорного сигнала (Reference Signal Received Power – RSRP) и геометрическая медиана. Основной метод задавался как в разделе «Алгоритм»; его параметризация в эксперименте не изменялась. В ходе анализа все полученные оценки были приведены к единой системе координат. На основе рассчитанных координат и определённых направлений секторов была построена итоговая карта размещения базовых станций в исследуемой городской локации.

Выводы

Эксперимент в городской сцене показал, что предложенный метод автономной локализации площадок LTE на основе полевых наблюдений обеспечивает статистически устойчивый выигрыш над простыми центроидными и робастными базовыми подходами.

Таблица № 1

Ошибка локализации площадок: сводные квантили и среднее

Метод	p50	p75	p90	Среднее
Невзвешенный центроид	101,7 м	147,9 м	181,6 м	105,4 м
Центроид с весами по RSRP	88,5 м	135,1 м	160,4 м	99,6 м
Геометрическая медиана	72,4 м	108,2 м	133,1 м	81,1 м
Предлагаемый метод	60,8 м	89,7 м	115,2 м	70,3 м

При сопоставлении на уровне площадки получены характерные значения $p50 \approx 61$ м и $p90 \approx 115$ м; снижение $p90$ составляет 36,6% относительно невзвешенного центроида и 13,4 % относительно геометрической медианы при идентичных исходных данных. Инженерно это означает возможность регулярного автоматизированного обновления базы координат площадок без использования Timing Advance и углов прихода, с

квазилинейной вычислительной сложностью и естественным параллелизмом по идентификаторам соты и площадки. Предложенный метод локализации площадок LTE демонстрирует уровень, сопоставимый с современными лучшими решениями в классе методов, основанных исключительно на полевых журналах.

Полученные результаты подтверждают, что метод обеспечивает требуемый баланс точности, устойчивости и производственной применимости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, соглашение № 071-03-2025-005, "Прикладные научные исследования в области разработки методов мониторинга и идентификация типов трафика для эффективного использования сетевого ресурса в гибридных сетях связи" (регистрационный номер ПТНИ: 1024062100008-4).

Литература (References)

1. Brunello A., Dalla Torre A., Gallo P., Gubiani D., Montanari A., Saccomanno N. Crowdsourced reconstruction of cellular networks to serve outdoor positioning: modeling, validation and analysis. *Sensors*. 2023. T. 23. URL: doi.org/10.3390/s23010352.
2. Oligeri G., Sciancalepore S., Ibrahim O.A., Di Pietro R. GPS spoofing detection via crowd-sourced information for connected vehicles. *Computer Networks*. 2022. T. 216. URL: doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109230.
3. Raida V., Svoboda P., Lerch M., Rupp M. Crowdsensed performance benchmarking of mobile networks. *IEEE Access*. 2019. T. 7. pp. 154899-154911.
4. Capponi A., Fiandrino C., Kantarci B., Foschini L., Kliazovich D., Bouvry P. A survey on mobile crowdsensing systems: challenges, solutions, and

opportunities. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. T. 21. №3. pp. 2419-2465.

5. Ismail M.A., Roslee M., Nordin M.S., Hashim S.H.S., Razilan A.R.M. Analyzing the influence of timing advance (TA) and reference signal received power (RSRP) on LTE geolocation. 2024 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE). IEEE. 2024. pp. 377-380. URL: doi.org/10.1109/APACE62360.2024.10877347.

6. Acharya A., Sanghavi S., Dimakis A.G., Dhillon I.S. Geometric median matching for robust k-subset selection from noisy data. arXiv. 2025. URL: arxiv.org/abs/2504.00564.

7. Neidhardt E., Uzun A., Bareth U., K?pper A. Estimating locations and coverage areas of mobile network cells based on crowdsourced data. Proc. IFIP WMNC'2013. IEEE. 2013. pp. 1-8.

8. Elbasheir M., Saeed R., Edam S. EMF exposure reduction using weighted angle model for multi-technology sectorized BS. International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems. 2024. T. 15. №10. pp. 865-874.

9. Hollingsworth M., Zhang Y., Schumann T., Anderson C.R., Cotton M., Kim S., Ha S., Grunwald D. Repurposing cellular reference signals: accurate RSRP measurements with mobile phones. 2024 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN): Workshop on Signal Reuse for Spectrum Efficiency. IEEE. 2024. pp. 45-50. URL: doi.org/10.1109/DySPAN60163.2024.10632813.

10. Blanco A., Ludant N., Jimnez Mateo P., Shi Z., Wang Y., Widmer J. Performance evaluation of single base station ToA-AoA localization in an LTE testbed. 2019. pp. 1-6.

Дата поступления: 3.12.2025

Дата публикации: 6.01.2026