

Комплексное исследование точности позиционирования устройств в сетях LTE в условиях прямой видимости

Х. К. Хыя[✉], Г. А. Фокин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

[✉] khya.khk@sut.ru

Аннотация

Введение. Активное развитие технологий подвижной радиосвязи 5G и Beyond 5G не снижает актуальности и востребованности исследований точности позиционирования в повсеместно развернутых сетях 4G LTE. В настоящей статье представлены оригинальные результаты комплексного исследования точности позиционирования устройств в сетях LTE в условиях прямой видимости.

Цель работы. Научное обоснование возможности достижения точности оценок координат пользовательского устройства (user equipment – UE) менее одного метра при надлежащем выборе параметров опорных сигналов позиционирования (positioning reference signal – PRS) и конфигурации сети радиодоступа LTE.

Материалы и методы. Выполнена оценка пределов точности первичных измерений времени прихода сигнала (TOA) в отдельной радиолинии между базовой станцией (eNB) и UE по опорным сигналам позиционирования PRS методами математического и имитационного моделирования, включая вычисление нижней границы Крамера–Рао для первичных измерений TOA, исследованы алгоритмы оценки TOA методом максимального правдоподобия и оценки Фитца. Показаны пределы точности оценок координат при вторичной обработке первичных измерений TOA методом наблюдаемой разности времен прихода сигналов (OTDOA).

Результаты. Установлено, что увеличение полосы пропускания PRS приводит к снижению среднеквадратичной ошибки (RMSE) позиционирования. При использовании 6 ресурсных блоков точность позиционирования менее 1 м достигается в скоординированной сети. В нескоординированных сетях влияние межсотовых помех значительно ухудшает точность, особенно вблизи eNB, где RMSE может достигать 100 м.

Заключение. Проведенное исследование подтверждает возможность достижения дециметровой точности позиционирования UE в сетях LTE в условиях прямой видимости eNB. Полученные результаты имеют практическую значимость для оптимизации параметров сети и могут служить основой для дальнейших исследований.

Ключевые слова: LTE, OTDOA, позиционирование, PRS, НГКР, SINR, SNR

Для цитирования: Хыя Х. К., Фокин Г. А. Комплексное исследование точности позиционирования устройств в сетях LTE в условиях прямой видимости // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 1. С. 55–75.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-1-55-75

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 27.04.2025; принята к публикации после рецензирования 25.07.2025; опубликована онлайн 27.02.2026



Integrated Study of Device Positioning Accuracy in LTE Networks under Line-of-Sight Conditions

Huy C. Hua[✉], Grigoriy A. Fokin

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University
of Telecommunications, St Petersburg, Russia

✉ khya.khk@sut.ru

Abstract

Introduction. The rapid development of 5G and Beyond 5G mobile radio technologies does not diminish the importance of research into the accuracy of positioning in widely deployed 4G LTE networks. This paper presents the original results of an integrated study into the accuracy of device positioning in LTE networks under line-of-sight (LOS) conditions.

Aim. To substantiate the possibility of achieving an accuracy of user equipment (UE) coordinates of less than one meter with the proper selection of PRS signal parameters and LTE radio access network configuration.

Materials and methods. The accuracy limits of primary time-of-arrival (TOA) measurements in a separate radio link between a base station (eNB) and a UE using PRS positioning reference signals were assessed using mathematical modeling and simulation methods, including calculating the Cramer-Rao lower bound for primary TOA measurements. The maximum-likelihood and Fitz-likelihood TOA estimation algorithms were investigated. The accuracy limits of coordinate estimates are demonstrated during secondary processing of primary TOA measurements using the observed time difference of arrival (OTDOA) method.

Results. An increase in the PRS signal bandwidth was established to lead to a decrease in the root mean square error (RMSE) of positioning. When using six resource blocks, positioning accuracy of less than 1 m in a coordinated network is achieved. In uncoordinated networks, the effect of intercell interference significantly degrades accuracy, in the vicinity of base stations in particular, where RMSE can reach 100 m.

Conclusion. The study confirms the feasibility of achieving decimeter-level UE positioning accuracy in LTE networks under line-of-sight conditions with the eNB. The results obtained have practical implications for network optimization and can serve as a basis for further research.

Keywords: LTE, OTDOA, Positioning, PRS, ИГКР, SINR, SNR

For citation: Hua H. C., Fokin G. A. Integrated Study of Device Positioning Accuracy in LTE Networks under Line-of-Sight Conditions. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 1, pp. 55–75.
doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-1-55-75

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 27.04.2025; accepted 25.07.2025; published online 27.02.2026

Введение. В современных сетях беспроводных коммуникаций LTE применяется комплекс методов и средств позиционирования, включающий:

– глобальную навигационную спутниковую систему (ГНСС, Global Navigation Satellite System – GNSS);

– систему ГНСС с ассистированием (Assisted GNSS – A-GNSS), в которой информация о бортовых эфемеридах и альманахах передается по наземным сетям сотовой связи для сокращения времени оценки координат при первоначальном включении [1];

– улучшенное определение местоположения (ОМП) по принадлежности к соте E-CID (Enhanced Cell ID);

– метод наблюдаемой разности времен прихода сигналов (Observed Time Difference of Arrival – OTDOA), являющийся основным для сетей LTE [2, 3].

Метод A-GNSS в городских условиях и внутри помещений, где отсутствует прямая видимость (Line of Sight – LOS) спутников, зачастую характеризуется низкой точностью ОМП [4], что

вынуждает использовать технологию E-CID в качестве дополнительного решения. Однако ее точность зачастую недостаточна для реализации высокоточного позиционирования пользовательских устройств (User Equipment – UE) [3, 5].

В связи с этим метод OTDOA остается одним из наиболее перспективных для обеспечения точности определения координат в сетях LTE [6, 7]. Точность позиционирования указанным методом в условиях LOS в радиолиниях между базовой станцией (E-UTRAN node B – eNB) и UE зависит от следующего комплекса факторов:

- точности первичных измерений времени прихода сигналов (Time of Arrival – TOA) [8, 9];
- геометрического фактора снижения точности (Geometric Dilution of Precision – GDOP), определяемого расположением eNB сети радиодоступа E-UTRAN [10];
- отношения сигнал/шум (Signal to Noise Ratio – SNR) в радиолиниях между eNB и UE [11, 12];
- отношения сигнал/(шум+помеха) (Signal to Interference Plus Noise Ratio – SINR) в радиолиниях между eNB и UE [13, 14];
- применяемого алгоритма обработки первичных измерений [15];
- применяемого алгоритма вторичной обработки и оценки координат [3];
- точности синхронизации eNB [13, 16].

В настоящей статье выполнены оценка нижней границы Крамера–Рао (НГКР, Cramer–Rao Lower Bound – CRLB) [17] для точности первичных измерений TOA, а также оценка НГКР точности вторичной обработки с результирующей оценкой координат [18]. В результате получена оценка точности позиционирования в сетях LTE в условиях LOS с учетом первых четырех перечисленных факторов.

Теоретическая часть. Метод OTDOA, указанный в стандарте LTE как процедура пози-

онирования в нисходящем канале, основан на оценке UE разности TOA в этом канале от нескольких eNB [19]. Поскольку местоположение eNB для UE изначально неизвестно, протокол позиционирования (LTE Positioning Protocol – LPP) передает измерения UE на сервер местоположения (Evolved Serving Mobile Location Center – E-SMLC) [20]. На основе измерений UE сервер E-SMLC вычисляет его координаты с использованием методов трилатерации, после чего информация о местоположении передается обратно пользователю UE [18–20]. Помимо координат UE могут быть предоставлены вспомогательные данные для выполнения первичных измерений. Основное внимание в настоящей статье сосредоточено на оценке точности позиционирования по опорным сигналам позиционирования (Positioning Reference Signal – PRS) стандарта LTE.

На физическом уровне стандарт LTE использует технологию ортогонального частотно-мультиплексирования (OFDM) [19]. Весь канальный ресурс разбивается на ресурсные блоки (Resource Blocks – RB). Один RB охватывает полосу 180 кГц, в которой равномерно расположены 12 поднесущих, а также одного временного слота, содержащего 6 или 7 символов OFDM общей длительностью 0.5 мс [18–20]. В табл. 1 представлены параметры физических RB, определенных в стандарте 3GPP TS 36.104 [21]. Количество RB определяется шириной полосы частот стандарта LTE. Остальные параметры необходимы для учета активных опорных поднесущих при оценке мощности переданного сигнала.

Параметры сигналов синхронизации полностью известны, поэтому данные сигналы могут использоваться для измерения расстояния. К ним относятся первичный сигнал син-

Табл. 1. Параметры физических ресурсных блоков

Tab. 1. Physical resource block parameters

Ширина полосы частот (\bar{B}), МГц	Занимаемая полоса (B), МГц	Количество RB (N_{RB})	Размерность БПФ (N_{FFT})	Количество поднесущих	Частота дискретизации (F_s), МГц
1.4	1.08	6	128	72	1.92
3.0	2.70	15	256	180	3.84
5.0	4.50	25	512	300	7.68
10.0	9.00	50	1024	600	15.36
15.0	13.50	75	1536	900	30.72
20.0	18.00	100	2048	1200	30.72

хронизации (Primary Synchronization Signal – PSS), основанный на последовательности Задова–Чу (Zadoff–Chu – ZC) [18], и вторичный сигнал синхронизации (Secondary Synchronization Signal – SSS), использующий m -последовательность длиной 31. PSS и SSS передаются на 62 поднесущих, расположенных симметрично относительно центральной поднесущей [18]*. Эти сигналы используются для поиска соты UE и начальной синхронизации с ближайшей eNB [19].

Следует отметить, что в сетях стандарта LTE передача опорных сигналов и данных на всех частотах ведется одновременно. Это приводит к тому, что сигнал eNB обслуживающей соты, принимаемый UE, интерферирует с сигналами eNB соседних сот. В результате межсотовой интерференции возникают внутрисистемные помехи, известные как проблема (эффект) ближней-дальней зоны. Суть этой известной в сетях подвижной связи проблемы при работе eNB на одинаковых частотах заключается в том, что опорный сигнал, принимаемый UE от близкорасположенной eNB, по уровню значительно превосходит опорные сигналы других eNB, расположенных дальше. Указанное обстоятельство существенно затрудняет одновременный прием сигналов удаленных eNB, в то время как для задач сетевого позиционирования UE на плоскости необходим одновременный прием опорных сигналов не менее трех eNB.

Для решения этой проблемы в девятом релизе LTE введены PRS, предназначенные исключительно для целей ОМП. Эти опорные сигналы передаются разными eNB в шести различных ресурсных элементах, поэтому ортогональны в частотно-временной области. Ортогонализация шести сигналов PRS позволяет минимизировать эффект ближней-дальней зоны и, таким образом, повысить точность первичных дальномерных измерений [16, 19]. Важно подчеркнуть, что сигнал PRS не только распределяется по поднесущим одного OFDM-символа, но рассредоточен во времени и по частоте на основе использования псевдослучай-

* Поскольку PSS и SSS занимают одни и те же поднесущие частоты, далее они рассмотрены как единый сигнал синхронизации SS.

ных последовательностей, основанных на последовательности Голда длиной 31 [15].

Нижняя граница Крамера–Рао. НГКР определяет нижнюю границу дисперсии оценки неизвестного параметра, выражая ее через информацию Фишера, и известна как метрика максимально достижимой точности несмещенного алгоритма оценки, работающего в условиях радиоканала, характеризуемого значением SNR [20].

Для оценки НГКР формализуем комплексный OFDM-сигнал в основной (информационной) полосе частот (baseband signal) $x(t)$. На интервале одного OFDM-символа сигнал может быть представлен выражением [20]

$$x_n(t) = \sqrt{\frac{2C}{N}} \sum_{n=0}^{N-1} d_n p_n e^{j \frac{2\pi n t}{N}}, \quad (1)$$

где C – мощность несущей переданного сигнала; N – общее число поднесущих; $n = 0, \dots, N-1$ – индекс поднесущей внутри одного OFDM-символа (нумерация согласно 3GPP TS 36.211 [24]); d_n – опорный символ, передаваемый на n -й поднесущей; p_n – относительная мощность опорного символа d_n ,

удовлетворяющая условию $\sum_{n=0}^{N-1} p_n^2 = N$, что

обеспечивает ограничение на мощность несущей переданного сигнала C .

Период OFDM-символа $T_s = 1/F_{sc}$ определяется разносом поднесущих F_{sc} . Представление (1) позволяет проводить анализ OFDM-сигналов для оценки точности первичных измерений в зависимости от ширины полосы и распределения поднесущих.

Поскольку сигнал OFDM в (1) полностью известен, НГКР оценки погрешности временной задержки $\hat{\tau}$ (Time Delay Estimation – TDE) истинного времени прихода этого сигнала τ по опорным сигналам LTE получена из общего определения, приведенного в [22]:

$$\text{var}(\hat{\tau}) \geq \text{CRLB}(\tau) = \frac{1}{\frac{E_s}{N_0/2} \bar{F}^2},$$

где $E_s = CT_s$ – энергия символа переданного

сигнала; N_0 – спектральная плотность мощности шума; \bar{F} – среднеквадратическая ширина полосы OFDM-сигнала по Габору.

Отношение сигнал/шум $\text{SNR} = (C/B)/N_0$ характеризует отношение спектральной плотности мощности сигнала (C/B) к спектральной плотности мощности шума (B) – ширина полосы сигнала).

Квадрат среднеквадратической ширины полосы OFDM-сигнала по Габору определяется следующим образом [20]:

$$\bar{F}^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (2\pi f)^2 |X(f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df},$$

где $X(f)$ – представление OFDM-сигнала в частотной области, полученное прямым преобразованием Фурье сигнала $x_n(t)$.

При допущении о прямоугольной форме спектральной плотности мощности квадрат среднеквадратической ширины полосы может быть приближенно определен как [20]

$$\begin{aligned} \bar{F}^2 &= \frac{\frac{1}{N} \sum_{n \in \eta_a} (2\pi n F_{sc}) |X(n F_{sc})|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n \in \eta_a} |X(n F_{sc})|^2} = \\ &= 4\pi^2 \frac{F_{sc}}{N} \sum_{n \in \eta_a} p_n^2 n^2, \end{aligned}$$

где η_a – подмножество индексов активных опорных поднесущих $N_a \leq N$.

Таким образом, без учета наличия циклического префикса НГКР погрешности оценки временной задержки τ , основанная на опорных сигналах LTE (и в целом для любого OFDM-сигнала в пределах одного символа), определяется выражением [20]

$$\text{CRLB}(\tau) = \frac{T_s^2}{8\pi^2 \text{SNR} \sum_{n \in \eta_a} p_n^2 n^2}. \quad (2)$$

Сумма квадратов индексов поднесущих определена по выражению [23]

$$\sum_{n=0}^m n^2 = \frac{m(m+1)(2m+1)}{6}.$$

Согласно 3GPP TS 36.211 [24], распределение опорных поднесущих в сигнале LTE определяется множеством

$$\eta_{SS} = \{-31, -30, \dots, -2, -1, 1, 2, \dots, 30, 31\}$$

для сигналов синхронизации SS и

$$\eta_{RS} = \{-6(\lambda_{RS} + 1), \lambda_{RS} + 1\} + \theta_{RS}$$

для опорных сигналов соты (Cell Specific Reference Signals – CRS) и позиционирования PRS*, где $\lambda_{RS} = [0, 1, 2, \dots, N_{RB} - 1]$ – вектор индексов; θ_{RS} – фаза опорного сигнала.

Нумерация индексов поднесущих для опорных сигналов SS выполняется относительно центральной (нулевой) поднесущей, на которой опорные сигналы не передаются. Границы номеров поднесущих в пределах ± 31 определены стандартом 3GPP TS 36.211 [24], согласно которому сигналы SS передаются на 62 поднесущих, расположенных симметрично относительно центральной поднесущей. Количество RB N_{RB} стандартизировано 3GPP TS 36.104 [21] и представлено в табл. 1. Вектор λ_{RS} введен для учета индексов поднесущих опорных сигналов RS при имитационном моделировании [18].

С учетом определения множества N_{SS} сумма квадратов индексов поднесущих сигналов синхронизации равна:

$$\sum_{n \in \eta_{SS}} n^2 = 2 \sum_{n=0}^{31} n^2 = 20\,832.$$

С учетом определения множества N_{RS} сумма квадратов индексов поднесущих опорных сигналов равна:

$$\begin{aligned} \sum_{n \in \eta_{RS}} n^2 &= \\ &= \sum_{\lambda_{RS}=0}^{N_{RB}-1} [-6(\lambda_{RS} + 1)]^2 + \sum_{\lambda_{RS}=0}^{N_{RB}-1} (6\lambda_{RS} + 1)^2 = \\ &= N_{RB} (24N_{RB}^2 + 6N_{RB} + 7). \end{aligned}$$

* Опорные сигналы соты CRS и опорные сигналы позиционирования PRS передаются на одних и тех же частотах. Поэтому далее они рассматриваются как опорный единый сигнал RS.

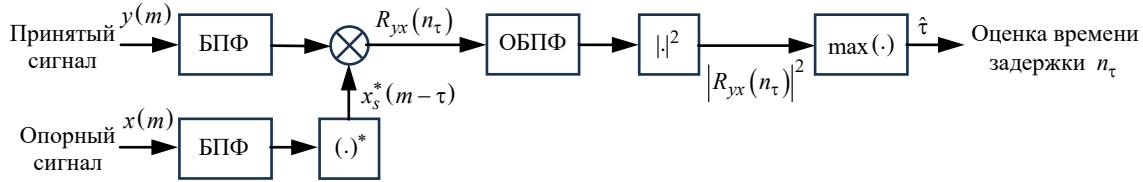


Рис. 1. Реализация корреляции на приемнике с использованием БПФ

Fig. 1. Implementing correlation at the receiver using FFT

Полученные выражения далее использованы в (2) для оценки НГКР и построения графиков зависимости среднеквадратической ошибки (Root Mean Square Error – RMSE) от отношения мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума C/N_0 .

После определения нижней границы для временной синхронизации в LTE рассмотрим метод оценки максимального правдоподобия (Maximum Likelihood Estimation – MLE).

Метод максимального правдоподобия. Названный метод позволяет оценить точность первичных измерений дальности с использованием опорных сигналов LTE в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ).

При использовании в приемнике LTE частоты дискретизации $F_s = N_{\text{FFT}}/T_s$, определяемой T_s и N_{FFT} (см. табл. 1), модель baseband-сигнала $x_n(t)$ в дискретном времени имеет вид: $x(m) = x_n(m/F_s)$. Тогда принятый сигнал в дискретном времени определяется выражением [20]

$$y(m) = x(m, n_\tau) + \omega(m),$$

где $n_\tau = \tau F_s$ – временная задержка в единицах дискретного времени; $\omega(m)$ – выборка шума.

Метод MLE основан на корреляции принятого сигнала $y(m)$ с циклически сдвинутой и сопряженной версией $x_s^*(m)$ опорного сигнала $x(m)$, который предполагается периодическим (т. е. круговая корреляция). Максимальное значение взаимно-корреляционной функции (ВКФ) этих сигналов определяется как

$$R_{yx}(n_\tau) = \sum_{m=0}^{N-1} y(m)x_s^*(m - n_\tau). \quad (3)$$

Оценка задержки $\hat{\tau}$ во временных единицах определяется следующим образом [15]:

$$\hat{\tau} = \frac{1}{F_s} \arg \max \left\{ |R_{yx}(n_\tau)|^2 \right\}. \quad (4)$$

Рассмотренная операция эквивалентна работе согласованного фильтра, а сам метод MLE может быть эффективно реализован с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ), как показано на рис. 1 [25].

При наличии опорного сигнала метод MLE базируется на максимизации корреляционных функций между принятым сигналом и всеми переданными опорными сигналами.

Согласно (4) оценка MLE получается посредством определения временной задержки, при которой ВКФ (3) достигает максимума (корреляционного пика). Рассмотрим только переданный сигнал, определив автокорреляционную функцию (АКФ) дискретного сигнала $x(m)$:

$$R_{xx}(\tau) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m)x_s^*(m - n_\tau). \quad (5)$$

На рис. 2, полученном на основе (5) в среде MATLAB, представлены АКФ $R_{xx}(n_\tau)$ сигналов синхронизации и опорных сигналов при различных конфигурациях полосы пропускания в LTE*.

На основании рис. 2 получены оценки модуля расстояния по АКФ опорных сигналов в зависимости от количества RB, представленные в табл. 2.

Алгоритм оценки Фитца. Метод MLE широко применяется для частотно-временной синхронизации (двумерного поиска ошибок по временной задержке и несущей частоте) в прием-

* Для интерпретации результатов в метрической системе временной сдвиг n_τ пересчитан в расстояние по формуле $\Delta l = cn_\tau/F_s$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

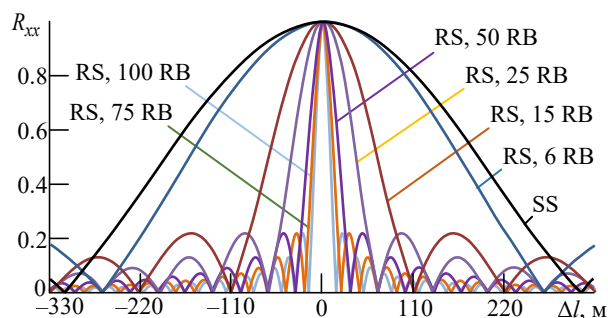


Рис. 2. АКФ сигналов синхронизации и опорных сигналов для одного OFDM-символа

Fig. 2. ACF of synchronization signals and reference signals for one OFDM symbol

Табл. 2. Разрешение модуля оценки расстояния по опорным сигналам в различных конфигурациях

Tab. 2. Resolution of the reference distance estimation in different configurations

N_{RB}	Разрешение расстояния, м
6	270.3
15	109.9
25	66.2
50	33.2
75	22.2
100	16.6

никах GNSS [15]. Практическая реализация метода MLE сталкивается с двумя основными проблемами. Во-первых, это высокая вычислительная сложность для широкодоступного приемника. Поскольку шаг поиска по задержке определен периодом дискретизации, для повышения точности может потребоваться передискретизация, что существенно усложнит реализацию приемника. Во-вторых, метод MLE требует полного знания формы принимаемого сигнала, что применимо при анализе опорных сигналов; однако его нельзя напрямую применять при приеме неизвестных заранее символов данных.

В силу этих ограничений для оценки времени прихода по опорным сигналам стандарта LTE вместо метода MLE на практике целесообразно использовать более практичный алгоритм оценки временной задержки. Традиционно в OFDM-системах грубая синхронизация по времени выполняется с использованием слепых методов [26], а точная синхронизация – с помощью замкнутых контуров автоподстройки [27, 28]. Однако для точной синхронизации также можно применять методы с открытым контуром автоподстройки, что будет показано далее.

Принятый OFDM-сигнал из совокупности поднесущих, умноженный на его комплексно-

сопряженную версию в отсутствие частотного и фазового смещений в частотной области, представляется выражением [20]

$$s(n) = F\{y(m)\}b_n^* = e^{j\frac{2\pi n n_\tau}{N}} + \Omega(n),$$

где n – индекс поднесущей; $b_n = d_n p_n$ – комплексный символ, передаваемый на n -й поднесущей; $\Omega(n)$ – компонент аддитивного шума в частотной области, полученный БПФ $\omega(n)$. Для оценки задержки n_τ во временной области на основе преобразования Фурье воспользуемся известным свойством временного сдвига этого преобразования:

$$F\{x(m \pm n_\tau)\} = X(n)e^{\pm j\frac{2\pi n n_\tau}{N}}.$$

Таким образом, задача оценки временного сдвига аналогична задаче оценки частоты, что позволяет использовать известные методы MLE для оценки частоты при определении временной задержки n_τ после выполнения БПФ.

В настоящей статье используется алгоритм оценки Фитца [20], поскольку он способен достигать НКГР даже при малом SNR.

Алгоритм оценки Фитца представляет собой приближенный метод MLE оценки частоты синусоиды в канале с АБГШ, при котором максимум достигается в периодограмме. Этот максимум можно оценить с помощью ненормализованной АКФ. Поскольку опорные символы в OFDM-сигнале распределены по всему спектру, для оценки максимума можно использовать лишь несколько отсчетов выходного сигнала БПФ. Поэтому практическая реализация алгоритма оценки Фитца требует предварительной модификации индексов суммирования.

Пусть модифицированная АКФ определяется как

$$R'_{xx}(l) = \sum_{n \in A_0} s(n)s^*(n-l),$$

где подмножество доступных поднесущих n для корреляционного сдвига l определяется как $A_0 = \{z \in N | z, (z-l) \in \eta_a\}$, что приводит к АКФ вида

$$R_{xx}(l) = e^{j\frac{2\pi n\tau l}{N}} + \omega''(l),$$

где $\omega''(l)$ – составляющая шума. Тогда оценка задержки $\hat{\tau}$ с использованием алгоритма Фитца для PRS стандарта LTE выражается как

$$\hat{\tau} = \frac{T_s}{2\pi} \frac{\sum_{m \in A_1} \arg\{R(m)\}}{\sum_{m \in A_1} m}, \quad (6)$$

где $A_1 = (A_2 \cup A_3) \cap A_4$ – подмножество значений корреляционного сдвига для распределения PRS, причем:

$$A_2 = \{z\} \{z \in N | z = 6i; i = 1, 2, \dots, N_a/2 - 1\};$$

$$A_3 = \{z\} \{z \in N | z = 6i + 1; i = 1, 2, \dots, N_a - 1\};$$

$$A_4 = \{z\} \{z \in N | z \leq M; M \leq N\}.$$

Значение M ограничивает количество сдвигов, например [19]:

$$\sum_{m \in A_1} m = \begin{cases} 6, & M = 6; \\ (3N_a^2 - 5N_a - 2)/2, & M = N/2; \\ N_a(15N_a - 14)/4 - 1, & M = N. \end{cases}$$

Далее полученное выражение подставляется в (6) и используется для оценки временной задержки $\hat{\tau}$.

Исследование оценки точности первичных дальномерных измерений. Оценить точность первичных дальномерных измерений TOA можно с помощью метрики RMSE, которая определяется по формуле [20]:

$$\text{RMSE} = \sqrt{E[(\hat{\tau} - \tau)^2]},$$

где $E[\cdot]$ – оператор математического ожидания; $\hat{\tau}$ – оценка временной задержки, вычисляемая по (4) или (6) в зависимости от используемого алгоритма; τ – истинное значение TOA. При дальнейшем построении графиков значения задержек прихода сигнала пересчитаны в дальномерные измерения расстояния с использованием скорости света.

В рассматриваемом случае оценки MLE и Фитца являются несмещенными, следовательно, для опорных сигналов LTE вычисляется только СКО при учете максимальной мощности передачи.

Согласно стандарту 3GPP TR 36.942 [29], максимальная мощность eNB составляет 43 дБм для полосы пропускания, не превышающей 5 МГц, и 46 дБм для полос 10, 15 и 20 МГц.

В представленном анализе промоделирована передача только опорных сигналов, поэтому рассмотрено равномерное распределение мощности eNB по всем активным поднесущим, как показано на рис. 3, где изображена нормиро-

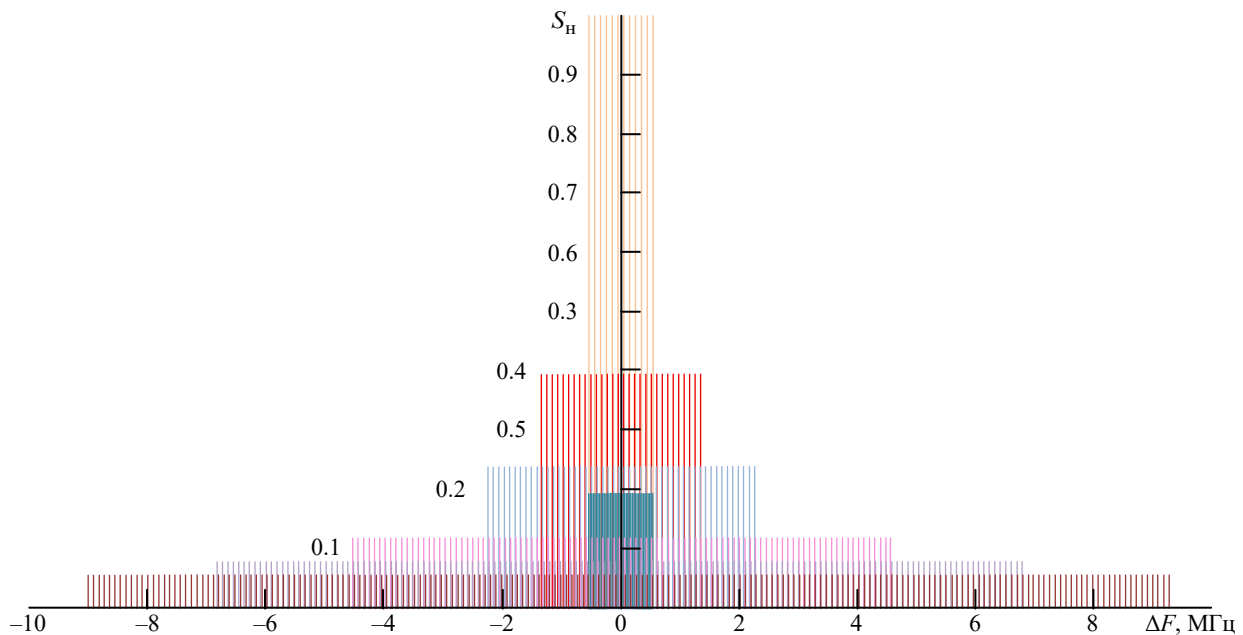


Рис. 3. Нормированная спектральная плотность мощности опорных сигналов

Fig. 3. Normalized power spectral density of reference signals

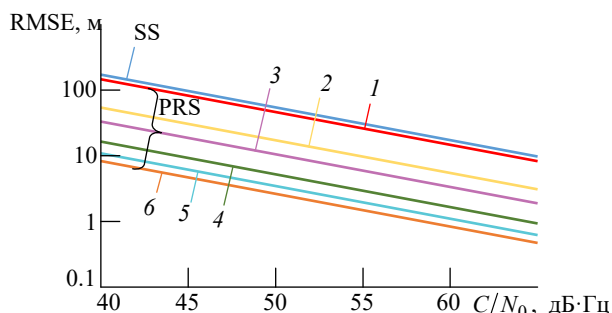


Рис. 4. Зависимость НГКР точности дальномерных измерений:
1 – $N_a = 12$, $B = 1.4$ МГц; 2 – $N_a = 30$, $B = 3$ МГц;
3 – $N_a = 50$, $B = 5$ МГц; 4 – $N_a = 100$, $B = 10$ МГц;
5 – $N_a = 150$, $B = 15$ МГц; 6 – $N_a = 200$, $B = 20$ МГц

Fig. 4. Dependence of the CRLB accuracy of TOA measurements:
1 – $N_a = 12$, $B = 1.4$ МГц; 2 – $N_a = 30$, $B = 3$ МГц;
3 – $N_a = 50$, $B = 5$ МГц; 4 – $N_a = 100$, $B = 10$ МГц;
5 – $N_a = 150$, $B = 15$ МГц; 6 – $N_a = 200$, $B = 20$ МГц

ванная спектральная плотность мощности опорных сигналов LTE S_H для каждой конфигурации полосы пропускания B^* .

На рис. 4 представлены зависимости НГКР погрешности первичных дальномерных измерений от значения C/N_0 для одного OFDM-символа; значение НГКР в метрах определено по формуле $RMSE = c\sqrt{CRLB(\tau)}$.

Анализ рис. 4 показывает, что увеличение C/N_0 приводит к снижению RMSE, что согласуется с теорией. Также видно, что использование сигналов PRS с увеличением ширины полосы значительно улучшает точность дальномерных измерений по сравнению с опорными сигналами син-

хронизации SS. При ширине полосы сигнала PRS 20 МГц достигается минимальная RMSE, что указывает на преимущество более широкополосных сигналов для задач оценки точности первичных дальномерных измерений. В частности, при отношении C/N_0 более 60 дБ·Гц теоретически достигается дециметровая точность первичных дальномерных измерений.

На рис. 5 показаны графики зависимостей RSME(SNR) для разных алгоритмов оценки первичных дальномерных измерений. RMSE вычислены по 10 000 реализациям Монте-Карло для согласованного фильтра (т. е. метода MLE) и адаптированного алгоритма оценки Фитца. Как видно из рис. 5, результаты оценки по алгоритму Фитца приближаются к результатам по методу MLE и достигают НГКР при увеличении числа сдвигов M вплоть до N . Кроме того, максимальная корреляционная задержка $M = N/2$ не является оптимальной в рассмотренном применении. Это связано с тем, что вследствие распределения опорных поднесущих значения АКФ $R_{xx}(l)$ для больших задержек корреляционного сдвига l вычисляются по очень малому числу пар, что снижает точность оценки.

Влияние межсотовых помех. Точность позиционирования в сетях LTE может значительно снижаться вследствие межсотовых помех, возникающих между eNB, работающими в одном частотном диапазоне. В настоящем разделе проанализировано влияние таких помех в трех типах

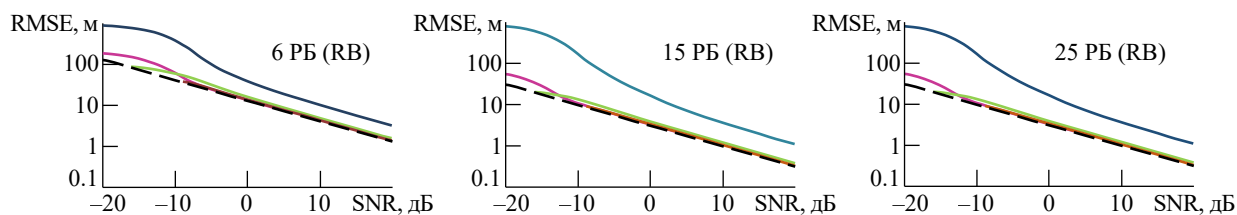


Рис. 5. RMSE алгоритмов оценки первичных дальномерных измерений: — алгоритм оценки Фитца, $M = 6$;
— алгоритм оценки Фитца, $M = N/2$; — алгоритм оценки Фитца, $M = N$; — метод MLE;
— — — НГКР для одного OFDM-символа

Fig. 5. RMSE of algorithms for evaluating primary ranging measurements: — Fitz's evaluation algorithm, $M = 6$;
— Fitz's evaluation algorithm, $M = N/2$; — Fitz' evaluation algorithm, $M = N$; — MLE method;
— — — CRLB for one OFDM-symbol

* На рис. 3 нормировка выполнена на мощность опорного сигнала, передаваемого в наиболее узкой полосе частот.

сетей радиодоступа LTE с использованием сигналов PRS в канале с АБГШ. Анализ проведен для полностью синхронизированных eNB при отсутствии временных смещений между ними.

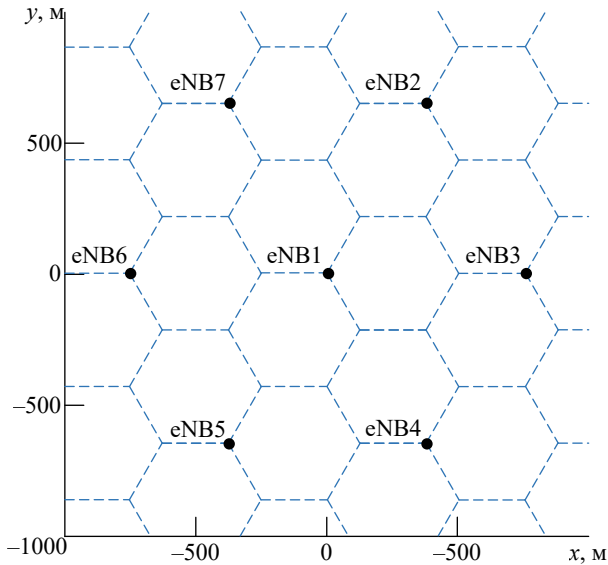


Рис. 6. Схема расположения eNB для моделирования
 Fig. 6. eNB layout for simulation

Исходные данные для исследования сценария. Исследованный сценарий LTE основан на типичной сотовой топологии сети радиодоступа. Про моделирована гексагональная структура из eNB с тремя секторами. Для антенн eNB принята ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ, равная 65° , расстояние между eNB составляет 750 м. Указанная топология соответствует рекомендациям по координированному развертыванию сети, изложенным в техническом отчете 3GPP TR 36.942 [29] (рис. 6).

Исследование сформированного сценария LTE реализовано в среде MATLAB. Основным параметром оценки явилось отношение сигнал/(шум + помеха) SINR, определяемое как отношение мощности полезного сигнала к суммарной мощности помех и шума:

$$\text{SINR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}} + P_{\text{interference}}},$$

где P_{signal} – мощность полезного сигнала; P_{noise} – мощность шума; $P_{\text{interference}}$ – мощность помех. Качество связи возрастает с увеличением SINR, поскольку возрастание мощности полезного сигнала над помехами и шумом указывает на снижение влияния последних.

Для расчета SINR учитывались характеристики передатчика, а также потери при распространении радиоволн (PPB), определенные в

Табл. 3. Параметры моделирования
 Tab. 3. Simulation parameters

Параметр	Значение
<i>Система</i>	
Несущая частота, ГГц	2
Ширина полосы частот, МГц	1.4; 3.0; 5.0; 10.0; 15.0; 20.0
Топология сот	Гексагональная
Расстояние между eNB, м	750
<i>Передатчик</i>	
Максимальная мощность eNB, дБм	43; 46
Ширина ДНА eNB по уровню -3 дБ, ...°	65
Усиление антенны eNB, дБи	15
<i>Приемник</i>	
Модель антенны UE, дБи	Всенаправленная, 0
Коэффициент шума UE, дБ	9
Плотность теплового шума, дБм/Гц	-174

соответствующих стандартах. Параметры моделирования представлены в табл. 3.

Передатчик. В соответствии с техническими рекомендациями 3GPP TR 36.942 [29], eNB имеет максимальную мощность передачи 43 дБм, усиление антенны составляет 15 дБи при передаче на несущей частоте 2 ГГц для ширины полосы частот не менее 5 МГц. Диаграмма направленности антенны (ДНА) eNB для каждого сектора в трехсекторных сотах определялась согласно 3GPP TR 36.942 [29] следующим выражением:

$$A(\theta) = -\min\left[12\left(\frac{\theta}{\theta_{3\text{дБ}}}\right)^2, A_{\text{min}}\right], \quad (7)$$

где $\theta \in [-180; 180]$ – угол между направлением на UE и главной осью сектора eNB; $\theta_{3\text{дБ}} = 65^\circ$ – ширина ДНА по уровню -3 дБ; $A_{\text{min}} = 20$ дБ – минимальное значение ослабления за пределами ширины ДНА. На рис. 7 представлен пример ДНА в горизонтальной плоскости для трехсекторных сот с указанными параметрами.

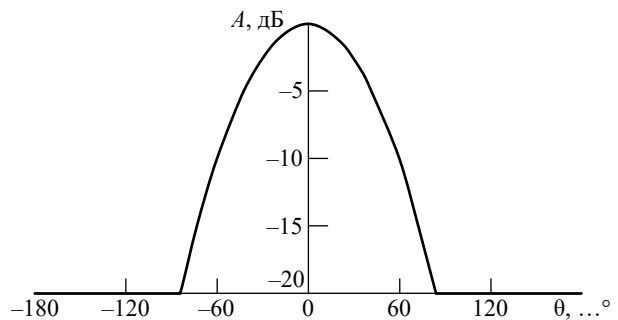


Рис. 7. Диаграмма направленности антенны для трехсекторных сот

Fig. 7. Antenna pattern for tree-sector cells

Потери при распространении радиоволн.

При несущей частоте 2 ГГц и высоте антенны eNB, расположенной на 15 м выше среднего уровня крыш, модель потерь РРВ согласно 3GPP TR 36.942 [29] определяется выражением

$$L = 128.1 + 37.6 \lg(R), \quad (8)$$

где L – потери РРВ, дБ; R – расстояние между eNB и UE, км. Для упрощения в (8) не учитывался эффект затенения. Расчетные значения потерь РРВ в форме тепловой карты для одного сектора соты и трехсекторной eNB на участке территории 2000×2000 м представлены на рис. 8, а и б соответственно. В каждой точке с шагом 5 м рассчитывались угол θ и расстояние R . Эти значения подставлялись в (7) и (8). Общие потери при РРВ в радиолинии между eNB и UE с учетом ДНА рассчитывались по формуле

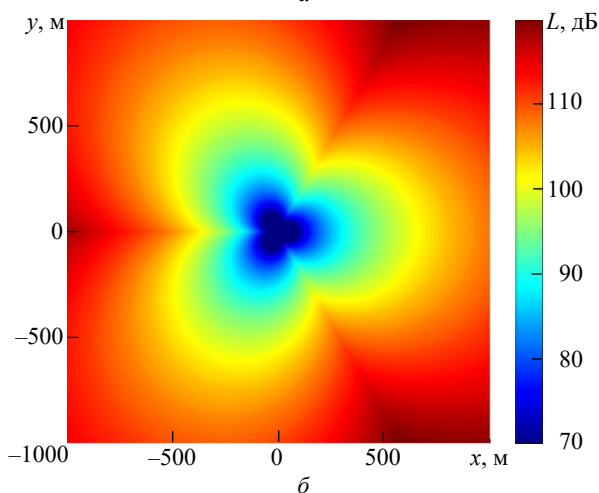
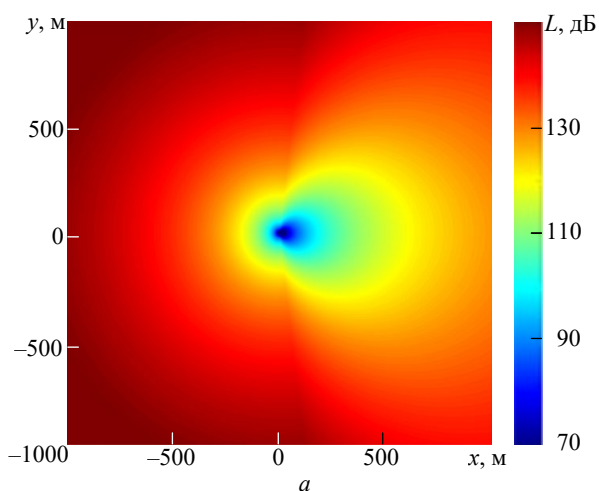


Рис. 8. Тепловая карта потерь РРВ:
а – для одного сектора соты; б – трехсекторной eNB

Fig. 8. Heat map of radio wave propagation losses:
а – for one cell sector; б – a three-sector eNB

$$L = 128.1 + 37.6 \lg(R) + \min \left[12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3\text{дБ}}} \right)^2, A_{\min} \right].$$

Полученные результаты сформировали матрицу значений $R^{401 \times 401}$, которая визуализирована в виде тепловой карты.

Вычисление SINR. Мощность сигнала на входе приемника UE, принятого от i -й eNB $P_{\text{rx}, i}$, выражается в соответствии с 3GPP TR 36.942 [29] следующим образом:

$$P_{\text{rx}, i} = P_{\text{tx}, i} - \max(L_i - G_{\text{tx}, i} - G_{\text{rx}, i}, \text{MCL}), \quad (9)$$

где $P_{\text{tx}, i}$ – мощность переданного i -й eNB сигнала; L_i – потери РРВ в радиолинии между i -й eNB и UE; $G_{\text{tx}, i}$ – коэффициент усиления антенны передатчика i -й eNB; $G_{\text{rx}, i}$ – коэффициент усиления антенны приемника UE; $\text{MCL} = 70$ дБ – минимально допустимые потери (Minimum Coupling Loss) РРВ для установления связи в радиолинии между i -й eNB и UE. Уровень шума приемника UE N_{rx} рассчитывается по формуле

$$N_{\text{rx}} = 10 \lg(k_B T_n B) + \text{NF} = N_0 + 10 \lg(B) + \text{NF}, \quad (10)$$

где $k_B = 1.3881 \cdot 10^{23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T_n – шумовая температура, К; NF – коэффициент шума UE; $N_0 = -174$ дБм/Гц – плотность теплового шума. В результате SINR вычисляется следующим образом:

$$\text{SINR} = \frac{P_{\text{rx}, i}}{\sum_{j \neq i} P_{\text{rx}, j} + N_{\text{rx}}}, \quad (11)$$

где $P_{\text{rx}, j}$ – мощность принятого UE сигнала от вызывающей помеху j -й eNB, отличной от обслуживающей i -й eNB.

Нескоординированная сеть. Помехи возникают из-за передачи данных на одной и той же частоте соседними eNB, что является следствием повтора частот, который используется в сотовых сетях для повышения спектральной эффективности. Однако принятый сигнал от соседних сот может быть значительно ослаблен мощным

сигналом обслуживающей соты, что приводит к известному эффекту ближней-дальней зоны.

Так как решение о передаче данных во время сеанса позиционирования принимается оператором сети, использование PRS может оказаться неэффективным. В результате данные соседних сот создают помехи для PRS, приводя к нескоординированной работе сети из-за одновременного приема опорных сигналов позиционирования.

Исследование основано на использовании PRS в полосе 6 RB, что соответствует 12 опорным поднесущим, распределенным в полосе 1.08 МГц в пределах одного OFDM-символа. Этот сценарий учета помех LTE моделировался в среде MATLAB. Местоположения UE моделируются в области размером 2000×2000 м с шагом 5 м, что соответствует матрице позиций UE $R^{401 \times 401}$. Мощность сигнала на входе приемника UE в каждой точке рассчитывалась с использованием уравнения (9) для всех eNB. Уровень шума приемника UE N_{rx} определялся по уравнению (10). Значение SINR для канала АБПШ в сценарии нескоординированной сети вычислялось как отношение мощности сигнала на входе приемника UE от обслуживающей i -й eNB $P_{\text{rx}, i}$ к сумме мощностей сигналов от всех остальных eNB и уровня шума приемника UE N_{rx} (11). Полученные распределения SINR визуализированы в виде тепловых карт на рис. 9. Как показано на рис. 9, *а* (для eNB1) и *б* (для eNB2), вблизи соседних eNB наблюдается резкое снижение SINR, что демонстрирует влияние эффекта ближней-дальней зоны, создаваемой обслуживающей eNB.

Подавление интерференции. Для снижения влияния помех в сетях LTE разрабатываются методы координации межсотовых помех, направленные на повышение качества передачи данных, особенно в таких критических зонах покрытия, как границы сот.

Подавление интерференции основано на восстановлении сигнала от наиболее мощной (обслуживающей) eNB и его вычитании из принятого сигнала. Это позволяет выделить полезную суперпозицию сигналов от более слабых eNB. В этом случае SINR можно ап-

проксимировать следующим образом:

$$\text{SINR} = \frac{P_{\text{rx}, i}}{\sum_{\substack{j \neq i; \\ j \neq m}} P_{\text{rx}, j} + N_{\text{rx}}}, \quad (12)$$

где $P_{\text{rx}, m}$ – принятая мощность от самой сильной eNB. При полном подавлении интерференции SINR для eNB1 и eNB2 увеличивается по сравнению с нескоординированным сценарием без подавления (рис. 9, *в* и *г*).

Для оценки SINR при подавлении интерференции рассмотрена та же область, что и в предыдущем сценарии. Мощность сигнала на входе приемника UE рассчитана для всех eNB с использованием (9), при этом определяется m -я eNB с наибольшей мощностью $P_{\text{rx}, m}$, не являющаяся обслуживающей. SINR определено как отношение мощности сигнала от обслуживающей eNB к сумме мощностей сигналов от остальных eNB (за исключением обслуживающей и m -й eNB) и уровня шума приемника N_{rx} . Полученные значения SINR (рис. 9, *в* и *г*) показывают улучшение качества сигнала.

Метод подавления интерференции также применялся в задачах позиционирования [30], где было показано, что его использование повышает точность оценки местоположения. Однако ошибки при демодуляции сигнала от самой сильной eNB могут негативно повлиять на процесс подавления, а в некоторых случаях даже усилить интерференцию. Данный эффект можно минимизировать, если источником помех являются такие опорные сигналы, как PSS, SSS или CRS.

Скоординированная сеть. В общем случае скоординированная сеть характеризуется исключением одновременной передачи от нескольких eNB на одной и той же частоте или в одном и том же временном слоте [30]. Это позволяет существенно снизить уровень межсотовых помех. Стандарт LTE обеспечивает достаточную гибкость в настройке параметров передачи PRS, что делает возможным формирование скоординированной сети. В частности, отсутствие передачи данных в PRS-субкадре способствует минимизации помех. Хотя реализация указанной схемы снижает спектральную эффективность, предотвращение

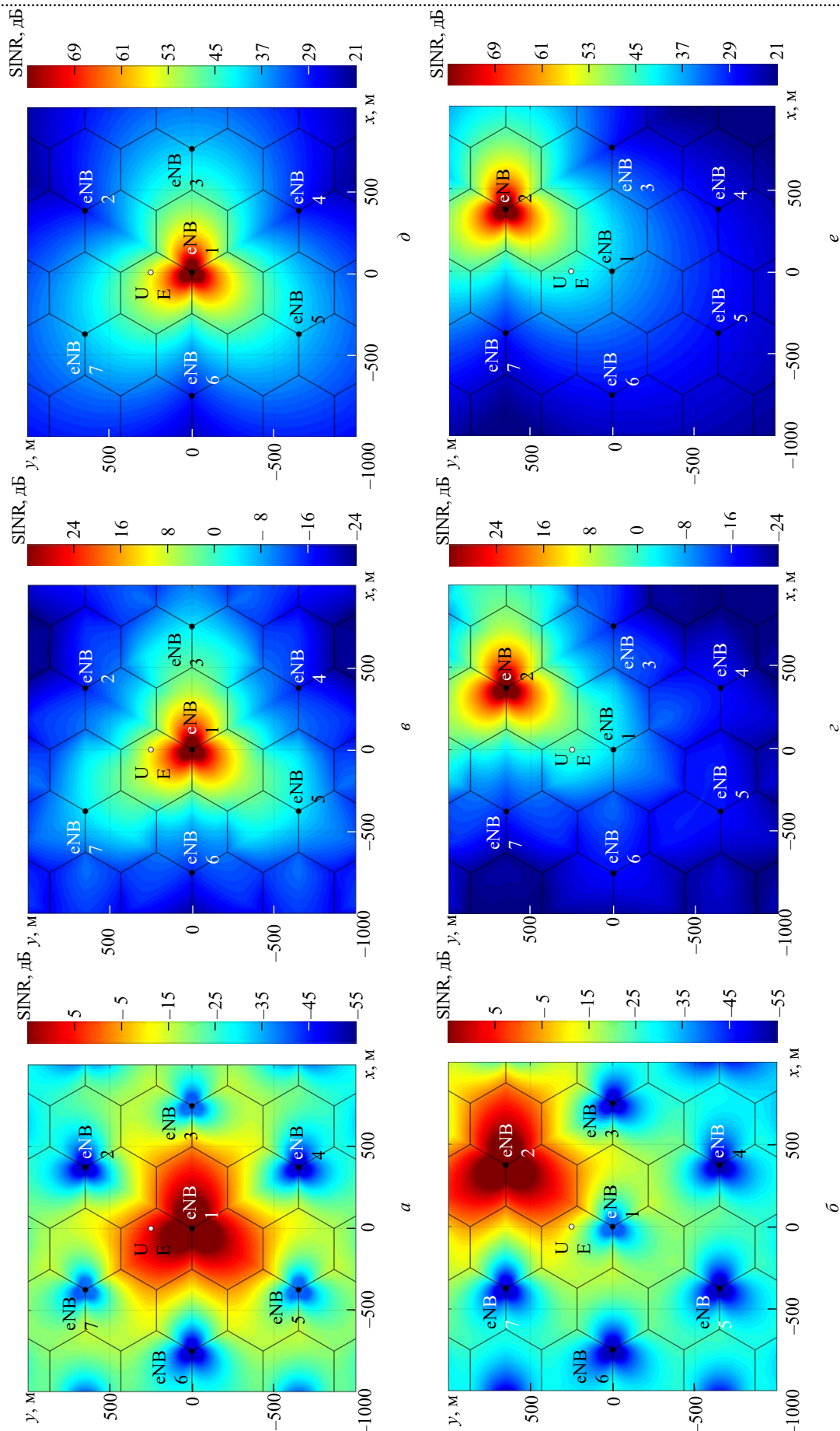


Рис. 9. Тепловая карта SINR в позициях источников eNB1 (а, в, д) и eNB2 (б, г, е) для сетей: а, б – нескоординированной сети; в, г – скоординированной сети с подавлением интерференции; д, е – скоординированной сети

Fig. 9. SINR heatmap in the positions of sources eNB1 (a, в, d) and eNB2(б, г, е) for networks: а, б – non-coordinated network; в, г – coordinated network with the interference cancellation; д, е – coordinated network

интерференции настолько эффективно, что SINR можно приближенно считать равным SNR:

$$\text{SINR} = \text{SNR} = P_{\text{rx}, i} / N_{\text{rx}}. \quad (13)$$

Моделирование выполнено в той же области исследования, что и в предыдущих сценариях. SINR вычислялось как отношение мощности сигнала от обслуживающей i -й eNB $P_{\text{rx}, i}$ к уровню шума приемника N_{rx} . Полученные значения SINR представлены в виде тепловых карт на рис. 9, δ , e . Как следует из них, в скоординированной сети помехи практически отсутствуют, что существенно улучшает качество принимаемого PRS.

В табл. 4 показаны результаты исследования SINR в различных сценариях с использованием PRS (6 RB) при расположении UE в позиции с координатами $x = 0$; $y = 250$.

Значения SINR, представленные на рис. 9 и в табл. 4, подтверждают теоретические предположения. При подавлении интерференции в скоординированной сети и особенно в скоординированной сети значения SINR существенно больше по сравнению с нескоординированной сетью.

Табл. 4. SINR для различных сетей при позиции UE $x = 0$; $y = 250$

Tab. 4. SINR for different networks at UE position where $x = 0$; $y = 250$

Исследуемая сеть	SINR, дБ
Нескоординированная сеть eNB1	7.7602
Нескоординированная сеть eNB2	-11.0994
Нескоординированная сеть eNB1 с подавлением интерференции	10.7895
Нескоординированная сеть eNB2 с подавлением интерференции	0.038
Скоординированная сеть eNB1	54.8952
Скоординированная сеть eNB2	44.1437

Влияние помех на точность позиционирования методом OTDOA. Рассмотрим влияние SINR в указанных сетях на точность вторичной обработки первичных измерений методом OTDOA и итоговую точность позиционирования UE.

В предположении, что помехи имеют гауссовский характер, оценка точности местоположения UE выполнена с использованием НГКР. Для этого рассмотрено K наиболее мощных eNB относительно положения \mathbf{x} . Их координаты заданы векторами $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)^T$, $i = 1, \dots, K$.

Расстояние между этими eNB и UE вычисляется по формуле

$$d_i = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2},$$

где $\|\cdot\|$ – евклидова норма вектора.

Метод OTDOA основан на измерении разностей расстояний между eNB. Для этого наиболее мощная eNB выбирается в качестве опорной станции. При отсутствии смещений часов eNB разности расстояний между eNB и UE можно выразить как $\mathbf{r} = \mathbf{r} + \mathbf{n}$, $\mathbf{n} \sim N(0, R)$, где $\mathbf{r} = d_i - d_j = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| - \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_j\|$ – вектор истинных разностей расстояний, а \mathbf{n} – вектор шума, предполагаемый как АБГШ с постоянной ковариационной матрицей R [10]:

$$R = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 + \sigma_2^2 & \sigma_1^2 & \dots & \sigma_1^2 \\ \sigma_1^2 & \sigma_1^2 + \sigma_3^2 & \dots & \sigma_1^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_1^2 & \sigma_1^2 & \dots & \sigma_1^2 + \sigma_K^2 \end{pmatrix},$$

где σ_i – стандартное отклонение, определяемое среднеквадратичной ошибкой RMSE временной задержки для сигнала, переданного от i -й NB.

НГКР вычисляется по следующему выражению: $\text{CRLB}(\mathbf{x}) = (D^T R^{-1} D)^{-1}$, где

$$D = \begin{pmatrix} \frac{x - x_1}{d_1} - \frac{x - x_2}{d_2} & \frac{y - y_1}{d_1} - \frac{y - y_2}{d_2} \\ \frac{x - x_1}{d_1} - \frac{x - x_3}{d_3} & \frac{y - y_1}{d_1} - \frac{y - y_3}{d_3} \\ \dots & \dots \\ \frac{x - x_1}{d_1} - \frac{x - x_K}{d_K} & \frac{y - y_1}{d_1} - \frac{y - y_K}{d_K} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Ошибка оценки точности позиционирования UE относительно истинного местоположения \mathbf{x} (в метрах) вычисляется как

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\mathbf{x}} &= \sqrt{\text{trace}[\text{CRLB}(\mathbf{x})]} = \\ &= \sqrt{\text{trace}[(D^T R^{-1} D)^{-1}]}. \end{aligned} \quad (15)$$

Тогда геометрический фактор Q выражается следующим образом:

$$Q = (D^T D)^{-1}.$$

Из (15) GDOP определяется по формуле

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{trace}(\mathcal{Q})} \quad (16)$$

и показывает, во сколько раз уменьшается точность оценки координат UE по сравнению с погрешностью первичных разностно-дальномерных измерений.

Для оценки влияния помех на точность позиционирования UE методом OTDOA проведено моделирование, представленное далее. В среде MATLAB фиксировались системные параметры (см. табл. 3) и конфигурация территориального распределения eNB, представленная на рис. 6. Затем задавалась координатная сетка местоположений UE с шагом 5 м. Для каждой eNB вычислялось значение SINR по формулам (11), (12) или (13) в зависимости от рассматри-

ваемого сценария, и на основании этого для метода OTDOA выбирались 5 eNB с максимальным значением SINR. После этого для каждой из выбранных eNB рассчитывались НГКР оценки временной задержки $\text{CRLB}(\tau)$ по формуле (14), используемые для определения стандартного отклонения σ_i в матрице ковариаций R . Итоговая ошибка оценки точности позиционирования UE (в метрах) определялась по формуле (15). Полученное значение позволило количественно оценить влияние межсотовых помех на точность позиционирования методом OTDOA в сетях LTE. Результаты исследования представлены на рис. 10 и 11.

Погрешности позиционирования для случая скоординированной сети также можно получить при более широких полосах пропускания, чем

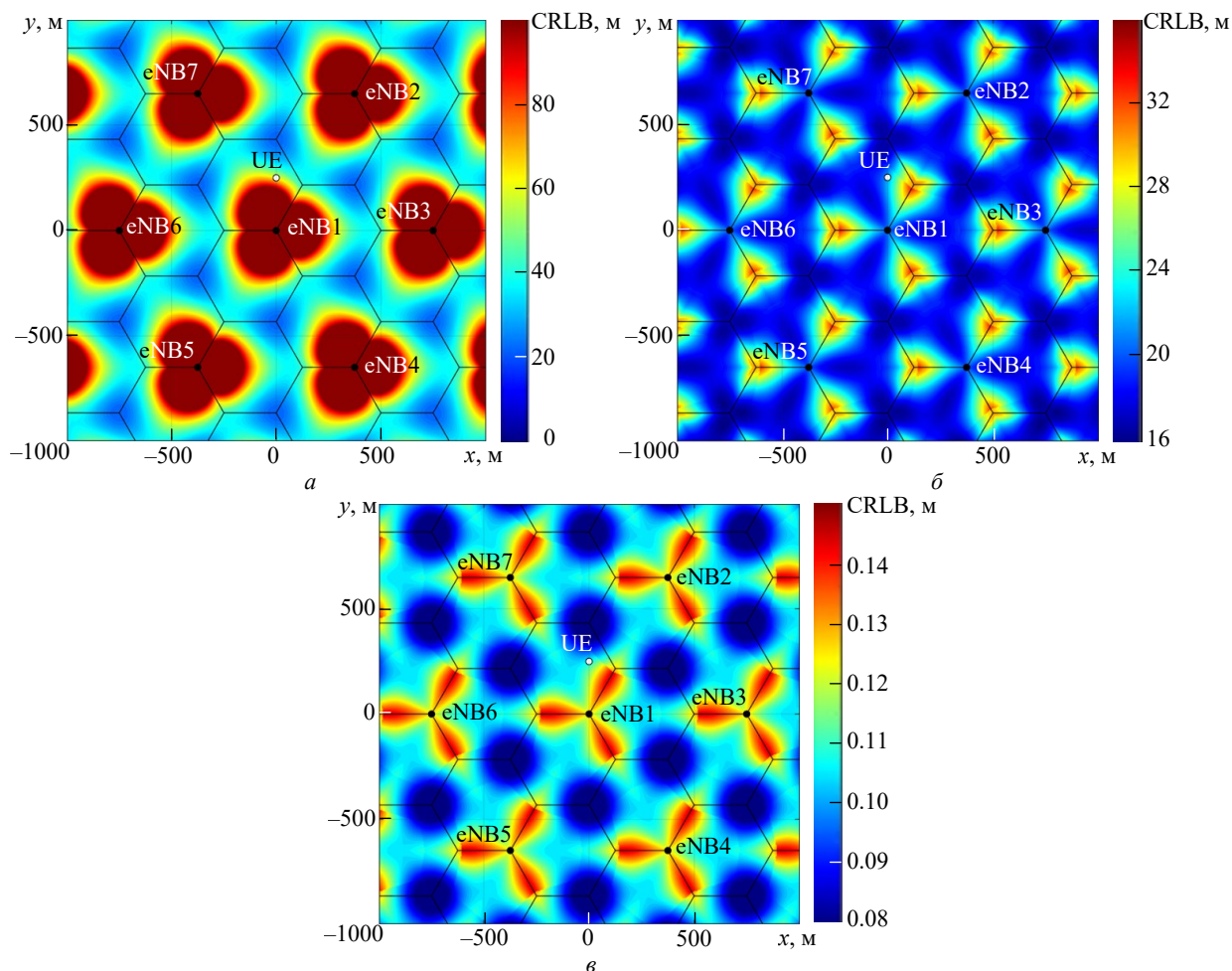


Рис. 10. Тепловые карты НГКР различных сетей при полосе пропускания 1.4 МГц, полученные методом OTDOA: a – нескоординированная сеть; b – нескоординированная сеть с подавлением интерференции; v – скоординированная сеть

Fig. 10. Heat maps of the CRLB of various networks with a bandwidth of 1.4 MHz, obtained using the OTDOA method: a – non-coordinated network; b – non-coordinated network with interference cancellation; v – coordinated network

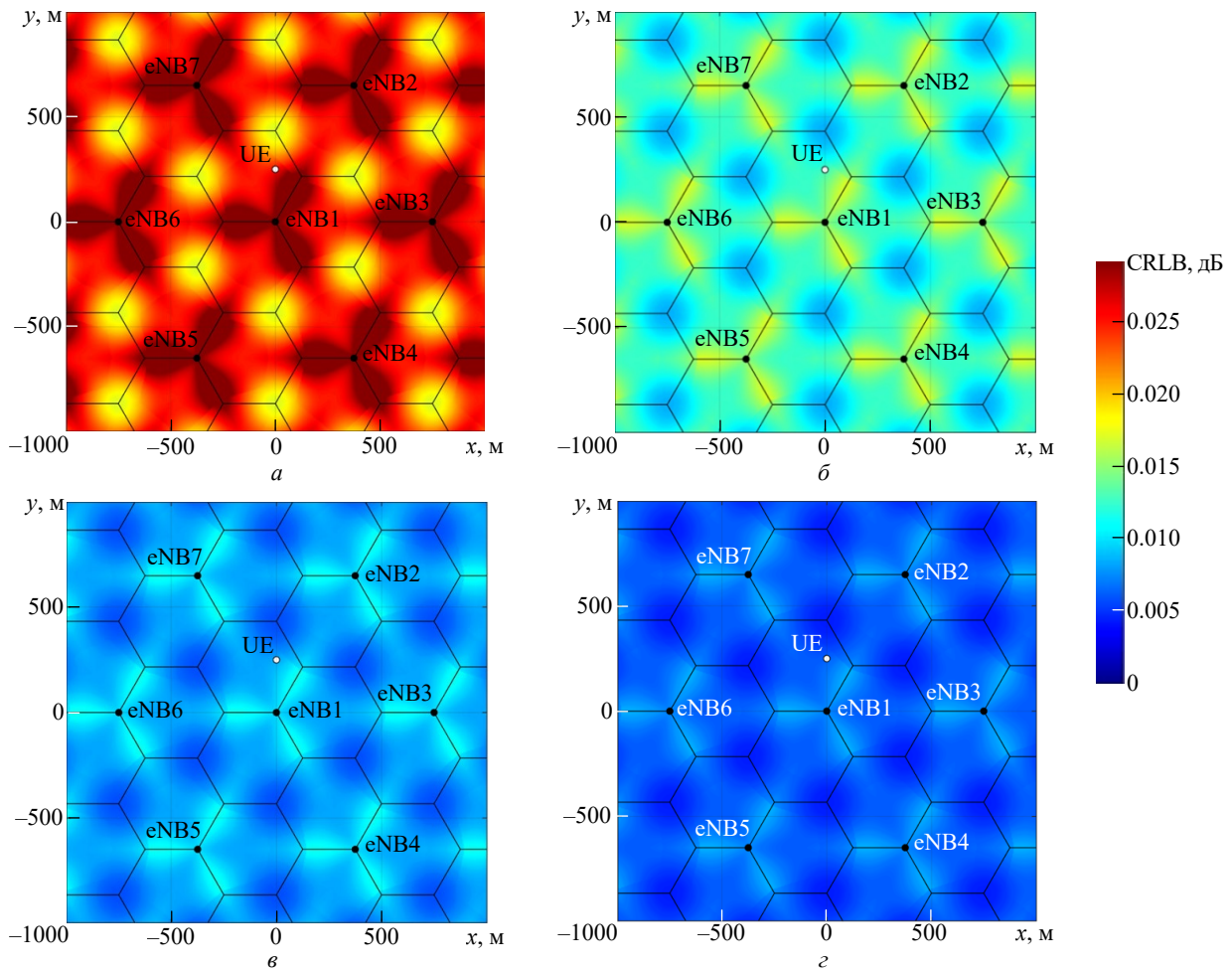


Рис. 11. Тепловая карта НГКР скоординированной сети, определенной методом OTDOA при полосе пропускания: $a - 5$ МГц; $b - 10$ МГц; $v - 15$ МГц; $z - 20$ МГц

Fig. 11. Heat map of the CRLB coordinated network, defined by the OTDOA method with a bandwidth of: $a - 5$ MHz; $b - 10$ MHz; $v - 15$ MHz; $z - 20$ MHz

1.4 МГц. Результаты, полученные с использованием PRS для полос пропускания 5, 10, 15 и 20 МГц, приведены на рис. 11. Анализ рис. 11 показывает, что увеличение полосы пропускания приводит к снижению ошибок оценки точности позиционирования, что, в свою очередь, способствует повышению точности ОМП. За счет увеличения полосы пропускания при отсутствии помех и при условии отсутствия влияния многолучевого распространения достигается погрешность позиционирования порядка единиц сантиметров. Следует отметить ограничения, при которых получены результаты моделирования:

- идеальная синхронизация между eNB;
- передача с максимальной мощностью;
- идеальная техника подавления помех.

Влияние многолучевых каналов и замираний будет рассмотрено в дальнейших исследованиях.

Для расчета геометрического фактора снижения точности GDOP позиционирования UE методом OTDOA применен следующий подход. Аналогично предыдущим сценариям местоположения UE моделировались в области размером 2000×2000 м с шагом 5 м, что соответствует матрице позиций UE $R^{401 \times 401}$. В каждой точке UE выбирались 5 eNB с наибольшими значениями SINR в скоординированной сети. После этого определялись расстояния между каждой из выбранных eNB и UE на основе их координат. Значение GDOP рассчитывались по (16). Полученные результаты GDOP представлены на рис. 12.

В табл. 5 показаны результаты моделирования НГКР и GDOP различных сетей при расположении UE в позиции с координатами $x = 0$; $y = 250$. Полученное значение GDOP составило 0.8241.

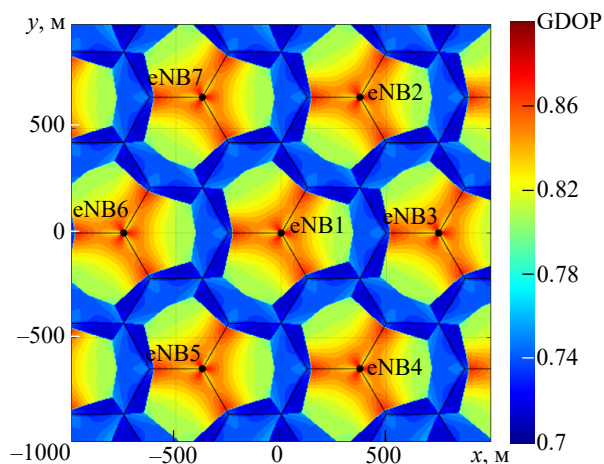


Рис. 12. Тепловая карта GDOP

Fig. 12. Heat map of GDOP

Табл. 5. НГКР для различных сетей при позиции UE $x = 0$; $y = 250$

Tab. 5. CRLB for different networks at UE position where $x = 0$; $y = 250$

Исследуемая сеть	НГКР, м
Нескоординированная сеть 1.4 МГц	62.8698
Нескоординированная сеть 1.4 МГц с подавлением интерференции	21.821
Скоординированная сеть 1.4 МГц	0.1071
Скоординированная сеть 5 МГц	0.0262
Скоординированная сеть 10 МГц	0.0131
Скоординированная сеть 15 МГц	0.0088
Скоординированная сеть 20 МГц	0.0066

В нескоординированной сети ошибки оценки точности позиционирования превышают 100 м вблизи eNB из-за эффекта ближней-дальней зоны. На границах сот взаимная интерференция между eNB ниже, что позволяет достигать ошибок оценки точности позиционирования в диапазоне от 20 до 40 м, как видно из рис. 10, а. При условии идеального подавления интерференции SINR, полученное для eNB1 (см. рис. 9, в), приводит к заметному улучшению точности позиционирования, что представлено на рис. 10, б значениями от 10 до 40 м. Наконец при использовании скоординированной сети, где интерференция практически отсутствует и SINR почти равно SNR, результирующая ошибка позиционирования составляет менее 1 м (см. рис. 10, в). При значениях SNR 57.5 и 46.1 дБ в центре и на краю соты для BS1 соответствующее C/N_0 состав-

ляет 117.5 и 106.2 дБ·Гц для полосы PRS 6-RB (1.02 МГц). Таким образом, ошибки позиционирования составляют менее 1 м, что свидетельствует о максимально достижимой точности ОМП UE по PRS при использовании 6 RB для одного символа.

Выводы. В статье проведен анализ достижимой точности позиционирования опорного сигнала позиционирования (PRS) в системах LTE с использованием метода максимального правдоподобия. Это позволило оценить потенциал данной технологии в качестве дополнительной системы к GNSS. Для оценки точности первичных измерений в качестве эталона использовалась НГКР, на основе которой был рассчитан RMSE как для метода максимального правдоподобия (согласованного фильтра), так и для алгоритма оценки Фитца. Оба подхода продемонстрировали сопоставимые результаты даже при низком уровне SNR.

В дальнейшем исследовании сценарий LTE дополнительно проанализирован с учетом межсотовых помех. Рассмотрены 3 типа сетей: нескоординированная, нескоординированная с подавлением интерференции и скоординированная. Погрешность определения местоположения рассчитывалась с использованием НГКР для метода позиционирования OTDOA. Результаты показали, что при наличии только помехового канала скоординированные сети LTE могут обеспечивать точность позиционирования менее 1 м.

В настоящем исследовании анализ проводился в условиях LOS, что наложило определенные ограничения на полученные результаты. В реальных условиях эксплуатации систем LTE для позиционирования распространение сигналов часто происходит в среде с затенением и многолучевостью (Non-Line-of-Sight – NLOS), что может существенно повлиять на точность определения местоположения. В дальнейшем планируется провести оценку точности позиционирования в системах LTE с учетом дополнительных эффектов распространения, таких, как затенение и многолучевость. Это позволит получить более точное описание характеристик системы в реальных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications / ed. by E. D. Kaplan, C. J. Hegarty (eds.). 3rd ed. Norwood, Massachusetts: Artech House, 2017. 1066 p.
2. Survey of Cellular Mobile Radio Localization Methods: from 1G to 5G / J. A. del Peral-Rosado, R. Raulefs, J. A. López-Salcedo, G. Seco-Granados //

- IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. Vol. 20, № 2. P. 1124–1148.
doi: 10.1109/COMST.2017.2785181
3. Zekavat R., Buehrer R. M. Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019. 1376 p.
4. Фокин Г. А. Сетевое позиционирование 5G и вероятностные модели оценки его точности // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14, № 12. С. 4–17.
doi: 10.36724/2072-8735-2020-14-12-4-17
5. Fischer S. 5G NR Positioning // 5G and Beyond / ed. by X. Lin, N. Lee. Berlin/Heidelberg: Springer, 2021. P. 429–483.
doi: 10.1007/978-3-030-58197-8_15
6. 5G PRS-Based Sensing: A Sensing Reference Signal Approach for Joint Sensing and Communication System / Z. Wei, Y. Wang, L. Ma, S. Yang, Z. Feng, C. Pan // IEEE Trans. on Vehicular Technology. 2022. Vol. 72, iss. 3. P. 3250–3263.
doi: 10.1109/TVT.2022.3215159
7. Performance Evaluation of 5G-NR Positioning Accuracy Using Time Difference of Arrival Method / I. Mürsepp, M. Kulmar, O. Elgarhy, M. M. Alam, T. Chen, S. Horsmanheimo // IEEE Intern. Mediterranean Conf. on Communications and Networking (MeditCom), Athens, Greece, 07–10 Sept. 2021. IEEE, 2021. P. 494–499.
doi: 10.1109/MeditCom49071.2021.9647652
8. Luan D. Fundamental Performance Limits on Time of Arrival Estimation Accuracy with 5G Radio Access. 2017. 49 p. URL: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1182120/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 12.12.2025).
9. Gadka P., Sadowski J., Stefanski J. Detection of the First Component of the Received LTE Signal in the OTDOA Method // Wireless Communications and Mobile Computing. 2019. P. 1–12.
doi: 10.1155/2019/2708684
10. Фокин Г. А. Модель поиска топологии локальной дальномерной системы позиционирования 5G по заданному геометрическому фактору // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. Т. 44, № 4. С. 27–38.
11. Fokin G. TDOA Measurement Processing for Positioning in Non-Line-of-Sight Conditions // IEEE Intern. Black Sea Conf. on Communications and Networking (BlackSeaCom), Batumi, Georgia, 04–07 June 2018. IEEE, 2018. 5 p.
doi: 10.1109/BlackSeaCom.2018.8433623
12. Alhafid A., Younis S. Observed Time Difference of Arrival Based Position Estimation for LTE Systems: Simulation Framework and Performance Evaluation // Eastern-European J. of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 3, iss. 9. P. 20–28.
doi: 10.15587/1729-4061.2020.201382
13. Enhanced Time of Arrival Estimation and Quantization for Positioning in LTE Networks / H. Rydén, A. A. Zaidi, S. Modarres, F. Gunnarsson, I. Siomina // IEEE 27th Annual Intern. Symp. on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Valencia, Spain, 04–08 Sept. 2016. IEEE, 2016. 6 p.
doi: 10.1109/PIMRC.2016.7794634
14. Wang P., Morton Y. J. Impact Analysis of Inter-cell Interference in Cellular Networks for Navigation Applications // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 2022. Vol. 59, iss. 1. P. 685–694.
doi: 10.1109/TAES.2022.3186970
15. Position Accuracy of Joint Time-Delay and Channel Estimators in LTE Networks / J. A. Del Peral-Rosado, J. A. López-Salcedo, F. Zanier, G. Seco-Granados // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 25185–25199.
doi: 10.1109/ACCESS.2018.2827921
16. Performance Analysis of PRS-Based Synchronization Algorithms for LTE Positioning Applications / M. Panchetti, C. Carbonelli, M. Horvat, M. Luise // 10th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC), Dresden, Germany, 20–21 March 2013. IEEE, 2013. 6 p.
doi: 10.1109/WPNC.2013.6533292
17. Catovic A., Sahinoglu Z. The Cramer-Rao Bounds of Hybrid TOA/RSS and TDOA/RSS Location Estimation Schemes // IEEE Comm. Lett. 2004. Vol. 8, iss. 10. P. 626–628.
doi: 10.1109/LCOMM.2004.835319
18. Achievable Localization Accuracy of the Positioning Reference Signal of 3GPP LTE / J. A. Del Peral-Rosado, J. A. López-Salcedo, G. Seco-Granados, F. Zanier, M. Crisci // Intern. Conf. on Localization and GNSS, Starnberg, Germany, 25–27 June 2012. IEEE, 2012. 6 p.
doi: 10.1109/ICL-GNSS.2012.6253127
19. Фокин Г. А., Волгушев Д. Б. Использование SDR-технологии для задач сетевого позиционирования. Модели приема и обработки опорных сигналов LTE // Вестн. СибГУТИ. 2022. Т. 16, № 3. С. 62–83.
doi: 10.55648/1998-6920-2022-16-3-62-83
20. Del Peral-Rosado J. A. Evaluation of the LTE Positioning Capabilities in Realistic Navigation Channels. Ph.D. Dissertation. Universitat Autònoma de Barcelona, 2014. 164 p. URL: https://ddd.uab.cat/pub/tesis/2014/hdl_10803_283523/jadpr1de1.pdf (дата обращения: 12.12.2025).
21. 3GPP TS 36.104. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Basestation (BS) Radio Transmission and Reception. Rel. 9. V9.13.0. 98 p. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136104/09.13.00_60/ts_136104v091300p.pdf (дата обращения: 12.12.2025).
22. Kay S. M. Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993. 595 p.
23. Пойа Д. Математика и правдоподобные рассуждения. М.: Наука, 1975. 464 с.
24. 3GPP TS 36.211. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Physical Channels and Modulation. Rel. 9. V9.1.0. March 2010. 76 p. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/09.01.00_60/ts_136211v090100p.pdf (дата обращения: 12.12.2025).

25. Wang P., Morton Y. J. Performance Comparison of Time-of-Arrival Estimation Techniques for LTE Signals in Realistic Multipath Propagation Channels // Navigation: J. of the Institute of Navigation. 2020. Vol. 67, iss. 4. P. 691–712.
doi: 10.1002/navi.395

26. Van de Beek J. J., Sandell M., Borjesson P. O. ML Estimation of Time and Frequency Offset in OFDM Systems // IEEE Trans. on Signal Processing. 1997. Vol. 45, iss. 7. P. 1800–1805.
doi: 10.1109/78.599949

27. Wang P., Morton Y. J. Multipath Estimating Delay Lock Loop for LTE Signal TOA Estimation in Indoor and Urban Environments // IEEE Trans. on Wireless Communications. 2020. Vol. 19, iss. 8. P. 5518–5530.
doi: 10.1109/TWC.2020.2994037

28. Structure and Performance Analysis of Fusion Positioning System with a Single 5G Station and a Single GNSS Satellite / C. Guo, S. Qi, W. Guo, C. Deng, J. Liu // Geo-spatial Information Science. 2023. Vol. 26, iss. 1. P. 94–106.
doi: 10.1080/10095020.2022.2144481

29. 3GPP TS 36.942. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Radio Frequency (RF) System Scenarios. Rel. 9. V9.3.0. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/136900_136999/136942/09.03.00_60/tr_136942v090300p.pdf (дата обращения: 12.12.2025).

30. Comprehensive Review on Coordinated Multi-Point Operation for LTE-A / F. Qamar, K. B. Dimiyati, M. N. Hindia, K. A. B. Noordin, A. M. Al-Samman // Computer Networks. 2017. Vol. 123. P. 19–37.
doi: 10.1016/j.comnet.2017.05.003

Информация об авторах

Хья Хю Кхонг – специалист по направлению "Специальные радиотехнические системы" (2024, Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации), аспирант кафедры беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – радиоизмерения; радиотехнические навигационные системы и устройства.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, пр. Большевиков, д. 22, к. 1, Санкт-Петербург, 193232, Россия
E-mail: khya.khk@sut.ru
<https://orcid.org/0009-0008-0659-8126>

Фокин Григорий Алексеевич – доктор технических наук (2021), доцент, заведующий кафедрой беспроводных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Автор более 300 научных работ. Сфера научных интересов – сети радиодоступа 4G, 5G, 6G; радиотехнические навигационные системы и устройства.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, пр. Большевиков, д. 22, к. 1, Санкт-Петербург, 193232, Россия
E-mail: fokin.ga@sut.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5358-1895>

References

1. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications. Ed. by E. D. Kaplan, C. J. Hegarty. 3rd ed. Norwood, Massachusetts, Artech House, 2017, 1066 p.

2. Del Peral-Rosado J. A., Raulefs R., López-Salcedo J. A., Seco-Granados G. Survey of Cellular Mobile Radio Localization Methods: from 1G to 5G. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018, vol. 20, no. 2, pp. 1124–1148.
doi: 10.1109/COMST.2017.2785181

3. Zekavat R., Buehrer R. M. Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2019, 1376 p.

4. Fokin G. A. 5G Network Positioning and Statistic Models for Its Accuracy Evaluation. T-Comm. 2020, vol. 14, no.12, pp. 4–17. (In Russ.)
doi: 10.36724/2072-8735-2020-14-12-4-17

5. Fischer S. 5G NR Positioning. 5G and Beyond. Ed. by X. Lin, N. Lee. Berlin/Heidelberg, Springer, 2021, pp. 429–483.
doi: 10.1007/978-3-030-58197-8_15

6. Wei Z., Wang Y., Ma L., Yang S., Feng Z., Pan C. 5G PRS-Based Sensing: A Sensing Reference Signal

Approach for Joint Sensing and Communication System. IEEE Trans. on Vehicular Technology. 2022, vol. 72, iss. 3, pp. 3250–3263.
doi: 10.1109/TVT.2022.3215159

7. Määrsepp I., Kulmar M., Elgarhy O., Alam M. M., Chen T., Horsmanheimo S. Performance Evaluation of 5G-NR Positioning Accuracy Using Time Difference of Arrival Method. IEEE Intern. Mediterranean Conf. on Communications and Networking (MeditCom), Athens, Greece, 07–10 Sept. 2021. IEEE, 2021, pp. 494–499.
doi: 10.1109/MeditCom49071.2021.9647652

8. Luan D. Fundamental Performance Limits on Time of Arrival Estimation Accuracy with 5G Radio Access. 2017. 49 p. Available at: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1182120/FULLTEXT01.pdf> (accessed: 12.12.2025).

9. Gadka P., Sadowski J., Stefanski J. Detection of the First Component of the Received LTE Signal in the OTDOA Method. Wireless Communications and Mobile Computing. 2019, pp. 1–12.
doi: 10.1155/2019/2708684

10. Fokin G. A. Search Model for Topology of Local Range-Measuring System in 5G Positioning as Per Pre-Set Geometric Factor. *Radio Engineering and Telecommunication System*. 2021, vol. 44, no. 4, pp. 27–38. (In Russ.)
11. Fokin G. TDOA Measurement Processing for Positioning in Non-Line-of-Sight Conditions. *IEEE Intern. Black Sea Conf. on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, Batumi, Georgia, 04–07 June 2018. IEEE, 2018, 5 p.
doi: 10.1109/BlackSeaCom.2018.8433623
12. Alhafid A., Younis S. Observed Time Difference of Arrival Based Position Estimation for LTE Systems: Simulation Framework and Performance Evaluation. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*. 2020, vol. 3, iss. 9, pp. 20–28.
doi: 10.15587/1729-4061.2020.201382
13. Rydén H., Zaidi A. A., Modarres S., Gunnarsson F., Siomina I. Enhanced Time of Arrival Estimation and Quantization for Positioning in LTE Networks. *IEEE 27th Annual Intern. Symp. on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Valencia, Spain, 04–08 Sept. 2016. IEEE, 2016, 6 p.
doi: 10.1109/PIMRC.2016.7794634
14. Wang P., Morton Y. J. Impact Analysis of Intercell Interference in Cellular Networks for Navigation Applications. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*. 2022, vol. 59, iss. 1, pp. 685–694.
doi: 10.1109/TAES.2022.3186970
15. Del Peral-Rosado J. A., López-Salcedo J. A., Zanier F., Seco-Granados G. Position Accuracy of Joint Time-Delay and Channel Estimators in LTE Networks. *IEEE Access*. 2018, vol. 6, pp. 25185–25199.
doi: 10.1109/ACCESS.2018.2827921
16. Panchetti M., Carbonelli C., Horvat M., Luise M. Performance Analysis of PRS-Based Synchronization Algorithms for LTE Positioning Applications. *10th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC)*, Dresden, Germany, 20–21 March 2013. IEEE, 2013, 6 p.
doi: 10.1109/WPNC.2013.6533292
17. Catovic A., Sahinoglu Z. The Cramer-Rao Bounds of Hybrid TOA/RSS and TDOA/RSS Location Estimation Schemes. *IEEE Comm. Lett.* 2004, vol. 8, iss. 10, pp. 626–628.
doi: 10.1109/LCOMM.2004.835319
18. Del Peral-Rosado J. A., López-Salcedo J. A., Seco-Granados G., Zanier F., Crisci M. Achievable Localization Accuracy of the Positioning Reference Signal of 3GPP LTE. *Intern. Conf. on Localization and GNSS*, Starnberg, Germany, 25–27 June 2012. IEEE, 2012, 6 p.
doi: 10.1109/ICL-GNSS.2012.6253127
19. Fokin G. A., Volgushev D. B. Development of SDR-Based Network Positioning Technology. *LTE Reference Signals Reception and Processing Models. The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*. 2022, vol. 16, no. 3, pp. 62–83. (In Russ.)
doi: 10.55648/1998-6920-2022-16-3-62-83
20. Del Peral-Rosado J. A. Evaluation of the LTE Positioning Capabilities in Realistic Navigation Channels. Ph.D. Dissertation. *Universitat Autònoma de Barcelona*, 2014. 164 p. Available at: https://ddd.uab.cat/pub/tesis/2014/hdl_10803_283523/jadpr1de1.pdf (accessed: 12.12.2025).
21. 3GPP TS 36.104. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Basestation (BS) Radio Transmission and Reception. Rel. 9. V9.13.0. 98 p. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136104/09.13.00_60/ts_136104v091300p.pdf (accessed: 12.12.2025).
22. Kay S. M. *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 1993, 595 p.
23. Poia D. *Matematika i pravdopodobnye rassuzhdeniya* [Mathematics and Plausible Reasoning]. Moscow, Nauka, 1975, 464 p. (In Russ.)
24. 3GPP TS 36.211. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Physical Channels and Modulation. Rel. 9. V9.1.0. March 2010. 76 p. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/09.01.00_60/ts_136211v090100p.pdf (accessed: 12.12.2025).
25. Wang P., Morton Y. J. Performance Comparison of Time-of-Arrival Estimation Techniques for LTE Signals in Realistic Multipath Propagation Channels. *Navigation: J. of the Institute of Navigation*. 2020, vol. 67, iss. 4, pp. 691–712.
doi: 10.1002/navi.395
26. Van de Beek J. J., Sandell M., Borjesson P. O. ML Estimation of Time and Frequency Offset in OFDM Systems. *IEEE Trans. on Signal Processing*. 1997, vol. 45, iss. 7, pp. 1800–1805.
doi: 10.1109/78.599949
27. Wang P., Morton Y. J. Multipath Estimating Delay Lock Loop for LTE Signal TOA Estimation in Indoor and Urban Environments. *IEEE Trans. on Wireless Communications*. 2020, vol. 19, iss. 8, pp. 5518–5530.
doi: 10.1109/TWC.2020.2994037
28. Guo C., Qi S., Guo W., Deng C., Liu J. Structure and Performance Analysis of Fusion Positioning System with a Single 5G Station and a Single GNSS Satellite. *Geo-spatial Information Science*. 2023, vol. 26, iss. 1, pp. 94–106.
doi: 10.1080/10095020.2022.2144481
29. 3GPP TS 36.942. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Radio Frequency (RF) System Scenarios. Rel. 9. V9.3.0. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/136900_136999/136942/09.03.00_60/tr_136942v090300p.pdf (accessed: 12.12.2025).
30. Qamar F., Dimiyati K. B., Hindia M. N., Noordin K. A. B., Al-Samman A. M. Comprehensive Review on Coordinated Multi-Point Operation for LTE-A. *Computer Networks*. 2017, vol. 123, pp. 19–37.
doi: 10.1016/j.comnet.2017.05.003

Information about the authors

Huy Cuong Hua, Specialist in Special radio engineering systems (2024, Military Academy of Field Anti-Aircraft Defense), Postgraduate student of the Department of Wireless Technologies and Systems of the Bonch-Bruevich St Petersburg State University of Telecommunications. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: radio measurements; radio-engineering navigational systems and devices.

Address: Bonch-Bruevich St Petersburg State University of Telecommunications, 22, Bolshhevikov Ave., St Petersburg 193232, Russia

E-mail: khya.khk@sut.ru

<https://orcid.org/0009-0008-0659-8126>

Grigoriy A. Fokin, Dr Sci. (Eng.) (2021), Associate Professor, Head of the Department of Wireless Technologies and Systems of the Bonch-Bruevich St Petersburg State University of Telecommunications. The author of more than 300 scientific publications. Area of expertise: radio access networks 4G, 5G, 6G; radio-engineering navigational systems and devices.

Address: Bonch-Bruevich St Petersburg State University of Telecommunications, 22, Bolshhevikov Ave., St Petersburg 193232, Russia

E-mail: fokin.ga@sut.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5358-1895>
