

Обзорная статья

УДК 621.396.969

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-62-90>

Комплекс моделей позиционирования устройств в сетях шестого поколения. Часть 2. Обзор алгоритмов и оценка точности

 Григорий Алексеевич Фокин, fokin.ga@sut.ru

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

Аннотация

Актуальность. Настоящая работа является второй частью цикла, посвященного исследованию комплекса моделей позиционирования в сетях шестого поколения терагерцового диапазона, и решает задачи систематизации алгоритмов и оценки точности определения местоположения пользовательского устройства в зависимости от конфигурации и размерности антенной решетки на базовой станции.

Цель. В рамках обозначенной в первой части цикла научной проблемы поиска средств достижения дециметровой точности оценок координат, выполненный в настоящем исследовании анализ моделей оценки точности, обзор алгоритмов и путей их оптимизации, а также численный эксперимент служит цели обоснования используемой конфигурации и размерности антенной решетки на базовой станции.

Методом исследования является аналитический обзор состояния проблемы по актуальным научным публикациям, концептуальное моделирование, категориальный подход, экспертное комбинирование, сопоставительный анализ, формализация, математическое и имитационное моделирование.

Решение / результаты. Приводятся модели оценки точности позиционирования в сетях 6G терагерцового диапазона, формализуется взаимосвязь первичных измерений и оценок координат для многопозиционного и однопозиционного определения местоположения в ближней и дальней зоне. Выполняется обзор алгоритмов геометрического определения местоположения и позиционирования с обучением для случаев одноэтапной и двухэтапной обработки; анализируется специфика реализации алгоритмов одновременного отслеживания и построения карты. Приводится анализ особенностей оптимизации алгоритмов в режимах оффлайн и онлайн. Средствами имитационного моделирования выполняется оценка точности для сценария территориального распределения с прямой видимостью с идеальной синхронизацией.

Новизна. Средствами имитационного моделирования научно обосновано достижение дециметровой точности оценок координат и ориентации в 1° в терагерцовом диапазоне для модели дальней зоны при использовании полосы 1 ГГц и составного массива антенной решетки из более чем полутысячи элементов.

Теоретическая значимость заключается в установлении зависимости точности оценок координат и ориентации устройства от конфигурации и размерности антенной решетки на базовой станции.

Практическая значимость разработанной имитационной модели заключается в численном обосновании пределов точности позиционирования устройства в сетях шестого поколения в зависимости от используемой на базовой станции антенной решетки для заданного сценария.

Ключевые слова: позиционирование, ориентация, терагерцовый диапазон, сети 6G, составной массив антенной решетки, точность оценки координат и ориентации, нижняя граница Крамера – Рао, информационная матрица Фишера

Источник финансирования: научная статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1023031600087-9-2.2.4;2.2.5;2.2.6;1.2.1;2.2.3 в ЕГИСУ НИОКТР.

Ссылка для цитирования: Фокин Г.А. Комплекс моделей позиционирования устройств в сетях шестого поколения. Часть 2. Обзор алгоритмов и оценка точности // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 5. С. 50–78. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-62-90. EDN:DUMKWF

Review research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-62-90>

A Set of Models for Device Positioning in Sixth Generation Networks. Part 2. Review of Algorithms and Accuracy Assessment

 Grigoriy A. Fokin, fokin.ga@sut.ru

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

Annotation

Relevance. This work is the second part of a series devoted to the study of a set of positioning models in sixth-generation terahertz networks and solves the problems of systematizing algorithms and assessing the accuracy of determining the location of a user device depending on the configuration and size of the antenna array at the base station.

Purpose. Within the framework of the scientific problem of searching for means of achieving decimeter accuracy of coordinate estimates, outlined in the first part of the cycle, the analysis of accuracy assessment models, a review of algorithms and ways of their optimization, as well as a numerical experiment, performed in this study serve the purpose of justifying the configuration and dimensions of the antenna array used at the base station.

The research method is an analytical review of the state of the problem based on current scientific publications, conceptual modeling, categorical approach, expert combination, comparative analysis, formalization, mathematical and simulation modeling.

Solution / results. The paper presents models for assessing the accuracy of positioning in 6G terahertz networks, formalizes the relationship between primary measurements and coordinate estimates for multi-position and single-position positioning in the near and far zones. It provides an overview of algorithms for geometric positioning and positioning with training for cases of one-stage and two-stage processing; analyzes the specifics of implementing algorithms for simultaneous tracking and map construction. It provides an analysis of the features of optimizing algorithms in offline and online modes. Simulation modeling is used to assess the accuracy for a scenario of territorial distribution with direct visibility and ideal synchronization.

Novelty. Using simulation modeling tools, the achievement of decimeter accuracy of coordinate and orientation estimates of 1° in the terahertz range for a far-field model using a 1 GHz band and a composite antenna array of more than half a thousand elements has been scientifically substantiated.

The theoretical significance lies in establishing the dependence of the accuracy of coordinate and orientation estimates of the device on the configuration and dimensions of the antenna array at the base station.

The practical significance of the developed simulation model lies in the numerical justification of the limits of device positioning accuracy in sixth-generation networks depending on the antenna array used at the base station for a given scenario.

Keywords: positioning, orientation, terahertz range, 6G networks, composite antenna array, coordinate and orientation estimation accuracy, Cramer – Rao lower bound, Fisher information matrix

For citation: Fokin G.A. A Set of Models for Device Positioning in Sixth Generation Networks. Part 2. Review of Algorithms and Accuracy Assessment. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(5):50–78. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-5-62-90. EDN:DUMKWF

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа продолжает цикл [1], посвященный исследованию комплекса моделей позиционирования устройств в сетях шестого поколения терагерцового диапазона. Условия работы

технологий позиционирования устройств в сетях шестого поколения имеют географическую протяженность в единицы-десятки метров и ограничены, преимущественно, сценариями внутри помещений. Материал исследования организован

далее следующим образом. В разделе 2 приводятся модели оценки точности позиционирования в сетях 6G. В разделе 3 выполняется обзор известных алгоритмов позиционирования применительно к сетям терагерцового диапазона, включая алгоритмы геометрического определения местоположения и алгоритмы позиционирования с обучением. В разделе 4 приводится анализ особенностей оптимизации алгоритмов и систем сетевого позиционирования в режимах оффлайн и онлайн. Материал разделов 2–4 основан на научно-методическом обзоре [2] и многолетнем авторском заделе в области сетевого позиционирования. В разделе 5 средствами имитационного моделирования выполняется оценка точности позиционирования для заданного сценария территориального распределения. Выводы и направления дальнейших исследований сформулированы в заключении.

2. МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В СЕТЯХ 6G

В настоящем разделе выполняется формализация взаимосвязи первичных дальномерных (ДМ) и угломерных (УМ) измерений с точностью оценок координат и ориентации; приводится порядок вычисления нижней границы Крамера – Рао (НГКР) погрешности оценки координат и ориентации пользовательского устройства (UE, *аббр. от англ. User Equipment*).

2.1. Взаимосвязь первичных измерений и оценок координат

Формализуем взаимосвязь первичных измерений с искомой оценкой координат и ориентации UE. Для сбора первичных измерений могут использоваться различные опорные или пилотные сигналы. Порядок их сбора в текущий момент времени, помимо прочих факторов, определяется также информацией о предыдущем состоянии UE; например, для сбора первичных УМ измерений передавать или принимать опорные сигналы базовой станции gNB целесообразно в том диапазоне азимутов и углов места, в котором ранее уже было установлено направленное соединение с UE. При отсутствии информации о предыдущем состоянии UE, например, при начальном установлении направленного соединения, происходит выравнивание лучей, и обычно используется передача / прием случайных опорных сигналов или опорных сигналов из кодовой книги предварительно заданных направлений в достаточно широком диапазоне азимутов и углов места. При наличии информации о предыдущем состоянии UE, например, при продолжении ведения радиосвязи в уже установленном направленном соединении, выравнивание лучей может уточняться вместе с передачей / приемом опорных сигналов в

гораздо более узком диапазоне пространства азимутов и углов места [1].

Допустим, при g -й передаче передается вектор символов $\mathbf{x}^{(g)}$, а измерение выполняется по наблюдаемому принятому вектору символов $\mathbf{y}^{(g)}$. Для антенной решетки (АР) из составных массивов (AOSA, *аббр. от англ. Array of Sub Array*) матрицы углов диаграммообразования (ДО) $\Phi_B^{(g)}$, $\Phi_U^{(g)}$ выбираются для каждой g -й передачи / приема; для базовой станции матрица Φ_B' образуется из N_B векторов: $\Phi_B' = [\Phi_1'; \dots; \Phi_{N_B}']$, где N_B – число аналоговых радиочастотных модулей (RFC, *аббр. от англ. Radio Frequency Chain*) в АР базовой станции; а для UE матрица Φ_U' образуется из N_U векторов: $\Phi_U' = [\Phi_1'; \dots; \Phi_{N_U}']$, где N_U – число аналоговых RFC в АР устройства UE [2].

Матрицы Φ_B' и Φ_U' определяют эквивалентный коэффициент АР составного подмассива (SA, *аббр. от англ. Sub Array*), сформированного из N'_Q антенных элементов, $Q \in \{B, U\}$, который характеризует усиление $\mathcal{A}_Q(\tilde{\Phi}, \Phi')$ в направлении прихода / ухода $\tilde{\Phi}$ в локальной системе координат (СК) при ДО в SA для луча, ориентированного в направлении максимального излучения Φ' [1].

Из совокупности $g = 1, \dots, G$ передач по $k = 1, \dots, K$ поднесущим сигнала с ортогональным частотным мультиплексированием (OFDM, *аббр. от англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) в результате объединения символов по $\mathbf{y}^{(g)}$ принятым векторам получим комплексный вектор наблюдения $\hat{\mathbf{Y}}$ размерности $\hat{\mathbf{Y}} \in \mathbb{C}^{GKN_B \times 1}$. Этот вектор образует набор исходных данных для сбора и обработки первичных ДМ и УМ измерений.

Введем вектор параметров состояний $\mathbf{s}$ и вектор параметров измерений $\boldsymbol{\gamma}$. Первый содержит результаты оценки координат и ориентации UE, а также информацию о канале, например, коэффициенты передачи многолучевых компонент (МЛК), местоположение рассеивателей SP (*аббр. от англ. Specular Points*) и т. д. Параметры вектора состояний $\mathbf{s}$ можно разделить на параметры UE, и остальные параметры.

Параметры UE представляют интерес для решения задач позиционирования и образуют составной вектор $\mathbf{s}_U$, а остальные параметры состояния образуют составной вектор $\mathbf{s}_N$, так, что справедливо выражение [2]:

$$\mathbf{s}_U \cup \mathbf{s}_N = \mathbf{s}. \quad (1)$$

Вектор измерений $\boldsymbol{\gamma}$ содержит параметры первичных измерений времени TOA (*аббр. от англ. Time of Arrival*) и угла прихода / ухода AOA / AOD (*аббр. от англ. Angle of Arrival / Departure*) сигнала, которые можно извлечь из комплексного вектора наблюдения $\hat{\mathbf{Y}}$.

Формализованные определения векторов состояний $\mathbf{s}$ и измерений $\mathbf{y}$ зависят от моделей и методов позиционирования и будут детализированы далее для трех различных сценариев определения местоположения (ОМП) в сетях 6G.

Сценарий 1. Многопозиционная оценка координат с участием нескольких базовых станций в традиционном для подвижной связи (CRF, *аббр. от англ. Conventional Radio Frequency*) диапазоне ультракоротких волн (УКВ) до 30 ГГц, включающем дециметровые (ДМВ) и сантиметровые (СМВ) волны. В первой части исследования [1] на рисунке 1 приведены 8 сценариев многопозиционной оценки координат.

Сценарий 2. Однопозиционная оценка координат и ориентации в дальней зоне с участием одной базовой станции в диапазоне миллиметровых волн (ММВ) от 30 до 300 ГГц (10–1 мм) по прямому и отраженным лучам в условиях наличия (LOS, *аббр. от англ. Line of Sight*) и отсутствия (NLOS, *аббр. от англ. Non LOS*) прямой видимости в радиолинии «Базовая станция – Пользовательское устройство» (BS ↔ UE); в первой части исследования [1] на рисунке 2 показан сценарий однопозиционной оценки координат.

Сценарий 3. Однопозиционная оценка координат и ориентации в ближней зоне (NF, *аббр. от англ. Near Field*) с участием одной базовой станции и одной реконфигурируемой интеллектуальной поверхности (RIS, *аббр. от англ. Reconfigurable Intelligent Surface*) в диапазоне дециметровых (ДММВ) или терагерцовых волн (ТГц) 0,3–3 ТГц (1–0,1 мм) по прямому и отраженным лучам в условиях LOS и NLOS в радиолиниях BS ↔ UE, BS ↔ RIS, RIS ↔ UE.

Для сценария 2 в диапазоне ММВ будем полагать использование полностью цифрового ДО, когда каждый элемент AP непосредственно связан с RFC, т. е. оборудован своим аналоговым трактом: при приеме сигнал поступает с RFC на аналого-цифровой преобразователь, а при передаче сигнал поступает с цифроаналогового преобразователя на RFC. Для сценария 3 в терагерцовом диапазоне будем полагать использование гибридного аналого-цифрового ДО, когда символы данных в информационной полосе частот (baseband) сначала прекодируются цифровым прекодером, а затем поступают на аналоговую диаграммообразующую схему, реализованную на фазовращателях. AP при этом образована набором из AOSA, когда каждый аналоговый тракт RFC связан только с частью элементов всей AP, образующих SA [1].

2.1.1. Многопозиционная оценка координат

Позиционирование в традиционном для подвижной радиосвязи диапазоне УКВ до 30 ГГц, объединяющем метровые, дециметровые и санти-

метровые волны, осуществляется посредством нескольких стационарных базовых станций в радиолиниях UE → BS обычно при LOS ДМ, разностно-дальномерным (РДМ) или УМ методом; также возможна комбинация перечисленных методов. На UE обычно отсутствует AP, поэтому позиционирование включает только оценку координат без оценки ориентации UE.

Вектор состояния $\mathbf{s}$ и вектор измерений $\mathbf{y}$ можно представить выражениями [2]:

$$\mathbf{s}_U = [\mathbf{p}_U], \quad (2)$$

$$\mathbf{s} = [\mathbf{p}_U; \mathbf{p}; \boldsymbol{\xi}; B], \quad (3)$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{p}; \boldsymbol{\xi}; \boldsymbol{\tau}; \tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{BU}; B], \quad (4)$$

где вектора $\mathbf{p}$, $\boldsymbol{\xi}$ и $\boldsymbol{\tau}$ содержат, соответственно, амплитуды, фазы и задержки прихода сигнала в прямом и / или отраженных МЛК; например, вектор задержек прихода сигнала можно представить выражением $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1; \tau_2; \dots]$. При анализе канала «вверх» UE → BS вектор измеренных в локальной СК углов прихода AOA сигналов от UE на базовых станциях можно представить выражением $\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{BU} = [\tilde{\varphi}_1; \tilde{\varphi}_2; \dots]$.

Зная матрицу поворота $\mathbf{R}_B$ AP базовой станции [1], можно вычислить вектор измеренных углов прихода AOA в глобальной СК $\boldsymbol{\varphi}_{BU}$. В случае отсутствия каких-либо первичных измерений в заданный момент времени, например, вектора углов прихода AOA $\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_{BU}$, вектор $\mathbf{y}$ компонуется теми измерениями, которые удалось собрать, например, вектором задержек прихода TOA $\boldsymbol{\tau}$.

1.1.2. Однопозиционная оценка координат и ориентации в дальней зоне

В диапазоне ММВ однопозиционная оценка координат и ориентации рассматривается для модели дальней зоны с участием одной базовой станции по прямому и отраженным лучам в условиях LOS и NLOS в радиолинии BS ↔ UE. Оценка ориентации UE становится возможной за счет его оборудования AP. Разрешение МЛК в условиях NLOS обусловлено свойством разряженности канала диапазона ММВ, когда вследствие высоких потерь при распространении радиоволн (РРВ) различимыми на приеме оказываются обычно единичные однократно отраженные лучи, которые можно использовать для позиционирования. Данное обстоятельство позволяет реализовывать на практике одновременную локализацию и построение карты SLAM (*аббр. от англ. Simultaneous Localization and Mapping*) за счет прогнозирования расположения отражателей. Остальные параметры канала, включая комплексные коэффициенты (вектор амплитуд $\mathbf{p}$ и фаз $\boldsymbol{\xi}$) и сдвиг синхронизации B , также могут быть установлены в ходе первичной обработки.

Вектор состояния $\mathbf{s}$ и вектор измерений $\mathbf{y}$ можно представить выражениями [2]:

$$\mathbf{s}_U = [\mathbf{p}_U; \mathbf{o}_U], \quad (5)$$

$$\mathbf{s} = [\mathbf{p}_U; \mathbf{o}_U; \mathbf{p}; \mathbf{\xi}; \mathbf{p}_N; B], \quad (6)$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{p}; \mathbf{\xi}; \mathbf{t}; \tilde{\Phi}_{BU}; \tilde{\Phi}_{UB}; \tilde{\Phi}_{BN}; \tilde{\Phi}_{UN}], \quad (7)$$

где координаты $l = 1, \dots, L_N$ отражателей обозначаются $\mathbf{p}_N = [\mathbf{p}_1; \mathbf{p}_2; \dots; \mathbf{p}_{L_N}]$.

Вектор измеренного в локальной СК угла ухода AOD (азимут и угол места) сигнала от UE на базовую станцию в условиях LOS радиолоний UE $\rightarrow$ BS можно представить как $\tilde{\Phi}_{UB} = \tilde{\Phi}_{UB}^{(0)}$.

Вектор измеренных в локальной СК углов прихода AOA сигналов от $l = 1, \dots, L_N$ отражателей N на базовую станцию в условиях NLOS радиолоний $N \rightarrow$ BS, образованных однократно отраженными МЛК, можно представить в следующем виде: $\tilde{\Phi}_{BN} = [\tilde{\Phi}_{BN}^{(1)}; \tilde{\Phi}_{BN}^{(2)}; \dots; \tilde{\Phi}_{BN}^{(L_N)}]$.

Вектор измеренных в локальной СК углов ухода AOD сигналов от UE на $l = 1, \dots, L_N$ отражателей N в условиях NLOS радиолоний UE $\rightarrow N$, образованных однократно отраженными МЛК, можно представить как $\tilde{\Phi}_{UN} = [\tilde{\Phi}_{UN}^{(1)}; \tilde{\Phi}_{UN}^{(2)}; \dots; \tilde{\Phi}_{UN}^{(L_N)}]$.

Вектор состояния $\mathbf{s}$ в (6) содержит все неизвестные параметры: координаты $\mathbf{p}_U$ и ориентацию $\mathbf{o}_U$ UE, параметры канала, включая вектор амплитуд $\mathbf{p}$ и вектор фаз $\mathbf{\xi}$ комплексных коэффициентов прямого и / или отраженных лучей, координаты отражателей и сдвиг синхронизации в условиях LOS радиолоний UE $\rightarrow$ BS. Для задач позиционирования непосредственный интерес представляет только вектор $\mathbf{s}_U$, включающий оценку координат $\mathbf{p}_U$ и ориентации $\mathbf{o}_U$ устройства UE.

Остальные параметры состояния образуют составной вектор $\mathbf{s}_N$ [2]:

$$\mathbf{s}_N = [\mathbf{p}; \mathbf{\xi}; \mathbf{p}_N; B]. \quad (8)$$

НГКР для параметров вектора $\mathbf{s}_U$ может быть найдена из эквивалентной информационной матрицы Фишера (EFIM, аббр. от англ. Equivalent Fisher Information Matrix).

2.1.3. Однопозиционная оценка координат и ориентации в ближней зоне

В терагерцовом диапазоне однопозиционная оценка координат и ориентации рассматривается для модели NF с участием одной базовой станции, а также с участием одной RIS по прямому и отраженным лучам в условиях LOS и NLOS в радиолониях BS $\leftrightarrow$ UE, BS $\leftrightarrow$ RIS, RIS $\leftrightarrow$ UE. Условия NF обусловлены меньшей длиной волны, повышенной по сравнению с диапазоном ММВ размерностью AP, а также меньшей дальностью радиосвязи вследствие более высоких потерь PPB. Учет эффекта NF

реализуется переходом от модели плоского фронта волны (PWM, аббр. от англ. Plane Wave Model) к модели сферического фронта волны (SWM, аббр. от англ. Spherical Wave Model).

Вектор состояния $\mathbf{s}$ и вектор измерений $\mathbf{y}$ можно представить выражениями [2]:

$$\mathbf{s}_U = [\mathbf{p}_U; \mathbf{o}_U], \quad (9)$$

$$\mathbf{s} = [\mathbf{p}_U; \mathbf{o}_U; \mathbf{p}; \mathbf{\xi}; \mathbf{p}_N; B], \quad (10)$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{p}; \mathbf{\xi}; \mathbf{t}; \Phi_{BU}; \Phi_{RU}; \Phi_{BN}; \Phi_{NU}; \mathbf{o}_U]. \quad (11)$$

Из сравнения (6 и 10) следует, что общее выражение вектора состояния $\mathbf{s}$ при позиционировании в диапазоне ММВ в дальней зоне и терагерцовом диапазоне в NF совпадают. Из сравнения (7 и 11) следует, что общее выражение вектора измерений $\mathbf{y}$ при позиционировании в диапазоне ММВ в дальней зоне и терагерцовом диапазоне в NF отличаются следующим образом: вектора углов AOA / AOD в локальной СК $\tilde{\Phi}$ в (7) заменяются на соответствующие вектора в глобальной СК Φ в (11); также в (11) включен вектор оценки ориентации UE $\mathbf{o}_U$. Вектора $\tilde{\Phi}_{UB}$, $\tilde{\Phi}_{UR}$, $\tilde{\Phi}_{UC}$ в принципе тоже можно было бы записать, однако получить непосредственные выражения для оценки их НГКР в условиях NF не представляется возможным. Это объясняется тем, что вычисление расстояний между антенными элементами для SWM зависит от глобальных координат, а не от углов прихода / ухода AOA / AOD в локальной СК, как следует из выражений для элементов $h_{L,bu}[k]$ b -й строки и u -го столбца канальной матрицы MIMO системы в условиях LOS $\mathbf{H}_L[k]$ [1], где отличие комплексных коэффициентов канала в SWM $h_{L,bu}^{SWM}[k]$ от PWM $h_{L,bu}^{PWM}[k]$ заключается в том, что принятые на различные антенные элементы сигналы имеют одинаковые амплитуды ρ_L , однако различные фазы ξ .

2.1.4. Одноэтапное позиционирование с непосредственной оптимизацией

При двухэтапном позиционировании на первом этапе выполняется оценка первичных дальномерных и / или УМ измерений, а на втором этапе извлекается оценка координат и ориентации в результате вторичной обработки TOA и / или AOA / AOD.

При одноэтапном позиционировании оценка координат и ориентации извлекается в результате непосредственной оптимизации целевой функции; при этом вектор измерений $\mathbf{y}_{\text{Direct}}$ равен вектору состояния $\mathbf{s}$ [3]:

$$\mathbf{y}_{\text{Direct}} = \mathbf{s}. \quad (12)$$

Следует отметить, что формализованные выше вектора состояния $\mathbf{s}$ и измерений $\mathbf{y}$ можно обобщить и включить дополнительные параметры для оценки, например, погрешности местоположения

и ориентации базовой станции и RIS, а также соответствующие сдвиги синхронизации. Однако для позиционирования эти дополнительные параметры не представляют непосредственного интереса и лишь увеличивают вычислительную сложность работы алгоритма локализации.

2.2. Оценка точности позиционирования по метрике НГКР

2.2.1. Понятие нижней границы Крамера – Рао

Для задач позиционирования UE непосредственный интерес представляет его точность оценок координат и ориентации. Точность оценки координат или погрешность позиционирования обычно измеряют среднеквадратической ошибкой (MSE, аббр. от англ. Mean Squared Error) или корнем из среднеквадратической ошибки (RMSE, аббр. от англ. Root Mean Squared Error).

Метрика RMSE представляет собой евклидово расстояние $d(\mathbf{p}_U, \hat{\mathbf{p}}_U)$ между истинным местоположением $\mathbf{p}_U = [x_U, y_U, z_U]^T$ и оценкой координат UE $\hat{\mathbf{p}}_U = [\hat{x}_U, \hat{y}_U, \hat{z}_U]^T$:

$$\begin{aligned} \text{RMSE}_p &= d(\mathbf{p}_U, \hat{\mathbf{p}}_U) = \\ &= \sqrt{(x_U - \hat{x}_U)^2 + (y_U - \hat{y}_U)^2 + (z_U - \hat{z}_U)^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Точность оценки ориентации или погрешность поворота UE определяется евклидовым расстоянием $d(\mathbf{o}_U, \hat{\mathbf{o}}_U)$ между истинной ориентацией UE $\mathbf{o}_U = [\alpha_U, \beta_U, \gamma_U]^T$ и оценкой ориентации UE $\hat{\mathbf{o}}_U = [\hat{\alpha}_U, \hat{\beta}_U, \hat{\gamma}_U]^T$:

$$\begin{aligned} \text{RMSE}_o &= d(\mathbf{o}_U, \hat{\mathbf{o}}_U) = \\ &= \sqrt{(\alpha_U - \hat{\alpha}_U)^2 + (\beta_U - \hat{\beta}_U)^2 + (\gamma_U - \hat{\gamma}_U)^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Погрешности оценки координат и ориентации зависят от уровня шума первичных измерений. Теоретические пределы точности геометрических методов позиционирования характеризуются метрикой нижней границы погрешности оценки координат (РЕВ, аббр. от англ. Position Error Bound) и метрикой нижней границы погрешности оценки ориентации (ОЕВ, аббр. от англ. Orientation Error Bound) [2]. Данные метрики извлекаются из НГКР и служат ориентиром для оценки эффективности работы различных алгоритмов позиционирования. Порядок вычисления НГКР для импульсных сигналов в домене времени подробно описан в [4, 5]. Анализ сигналов OFDM в домене частоты можно проводить аналогичным образом [2]. В диапазонах УКВ и ММВ обычно анализируются baseband-сигналы после понижающего преобразования частоты и оцифровки, из которых затем извлекаются первичные ДМ и УМ измерения. Спецификой позиционирования в терагерцовом диапазоне является то, что первичные измерения предпочтительнее извлекать непосредственно из ра-

диосигнала на несущей радиочастоте вследствие низкой энергетики радиоимпульсов ДММВ.

Далее выполняется формализация порядка оценки точности позиционирования на плоскости 2D и в пространстве 3D для сигналов OFDM на основе модели, описанной в [1]. Порядок оценки точности позиционирования на плоскости 2D в условиях LOS и NLOS для канала вниз BS → UE ранее был формализован в [6, 7]. Порядок оценки точности позиционирования в пространстве 3D для каналов «вниз» BS → UE и «вверх» UE → BS описан в [8–10]. Модели и методы позиционирования с использованием RIS [11–17] на сегодняшний день все еще находятся в стадии становления, однако уже показывают широкие возможности повышения точности оценок координат и ориентации. Использование влияния эффекта NF на позиционирование устройств исследовано в [18] и показало, как новые проблемы учета кривизны фронта волны при моделировании, так и новые возможности в части повышения точности ОК на малых расстояниях. При исследовании и разработке вопросов ОМП устройств в сетях 6G терагерцового диапазона учет новых факторов использования RIS, а также учет кривизны фронта волны и эффекта NF в радиопереносах BS ↔ UE, BS ↔ RIS, RIS ↔ UE является необходимостью. Помимо этого, новые модели и методы сетевого позиционирования должны также учитывать и организацию сверхбольшого числа элементов AP в AOSA на базовой станции. Далее приводится порядок оценки точности позиционирования по метрике НГКР, учитывающий перечисленные выше новые факторы, согласно [2].

2.2.2. Определение НГКР погрешности оценок координат и ориентации

Допустим, вектор принятого сигнала на k -й поднесущей ($k = 1, \dots, K$) при g -й ($g = 1, \dots, G$) передаче символа OFDM для модели канала цифровой MIMO системы в дальней зоне определяется выражением [1]:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}^{(g)}[k] &= \sqrt{P} \mathbf{H}[k] \mathbf{x}^{(g)}[k] + \mathbf{n}^{(g)}[k] = \\ &= \boldsymbol{\mu}^{(g)}[k] + \mathbf{n}^{(g)}[k], \end{aligned} \quad (15)$$

где P – средняя мощность переданного сигнала; $\boldsymbol{\mu}^{(g)}[k] \in \mathbb{C}^{N_B \times 1}$ – вектор принятого сигнала без учета вектора выборок аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) $\mathbf{n}^{(g)}[k] \in \mathbb{C}^{N_B \times 1}$; комплексные выборки $\mathbf{n}^{(g)}[k]$ имеют нормальное распределение $\mathcal{CN}(0, \sigma_n^2)$ с нулевым средним и дисперсией σ_n^2 ; вектор переданного сигнала $\mathbf{x}^{(g)}[k] \in \mathbb{C}^{N_U \times 1}$ выбирается при ограничении $\|\mathbf{x}^{(g)}[k]\|^2 = 1$; $\mathbf{H}[k]$ – канальная матрица k -й поднесущей.

При заданной модели принятого сигнала (15) и учете всех первичных измерений в векторе пара-

метров состояния канала $\mathbf{s}$ потенциальная точность оценок координат и ориентации по метрике НГКР одинакова как для одноэтапного, так и для двухэтапного позиционирования [3]. НГКР может быть вычислена не только для погрешности оценок $\hat{\mathbf{p}}_U$ и $\hat{\mathbf{o}}_U$, входящих в состав вектора состояния $\mathbf{s}_U$, но и для погрешности оценок первичных измерений, входящих в состав вектора измерений $\mathbf{y}$.

Обобщенное выражение для НГКР вектора состояния $\mathbf{s}$ можно представить следующим выражением:

$$\text{CRB} \triangleq [\mathbf{I}(\mathbf{s})]^{-1} = [\mathbf{J}_S^T \mathbf{I}(\mathbf{y}) \mathbf{J}_S]^{-1}, \quad (16)$$

где $\mathbf{I}(\mathbf{s})$ – информационная матрица Фишера (FIM, аббр. от англ. Fisher Information Matrix) вектора состояния $\mathbf{s}$; $\mathbf{I}(\mathbf{y})$ – FIM вектора первичных измерений $\mathbf{y}$, определяемая в [2] как:

$$\mathbf{I}(\mathbf{y}) = \frac{2}{\sigma^2} \sum_g \sum_k \Re \left\{ \left(\frac{\partial \mu^{(g)}[k]}{\partial \mathbf{y}} \right)^H \left(\frac{\partial \mu^{(g)}[k]}{\partial \mathbf{y}} \right) \right\}; \quad (17)$$

$\mathbf{J}_S$ – матрица Якоби, или матрица частных производных функций $\mathbf{y}$ в точках $\mathbf{s}$, определяемая как:

$$\mathbf{J}_S \triangleq \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{s}}. \quad (18)$$

НГКР дает нижнюю границу для дисперсии оценки неизвестного параметра, выражая ее через FIM, поэтому из CRB в (16) **Ошибка! Источник ссылки не найден.** далее можем записать формулы для вычисления пределов РЕВ и ориентации ОЕВ [2]:

$$\text{РЕВ} = \sqrt{\text{tr}([\text{CRB}]_{1:3,1:3})}, \quad (19)$$

$$\text{ОЕВ} = \sqrt{\text{tr}([\text{CRB}]_{4:6,4:6})}, \quad (20)$$

где $\text{tr}\{\cdot\}$ – след матрицы; операция $\text{tr}([\text{CRB}]_{1:3,1:3})$ означает выбор составной матрицы из первых трех верхних строк (с 1 по 3) и трех левых столбцов (с 1 по 3) исходной матрицы CRB; $\text{tr}([\text{CRB}]_{4:6,4:6})$ означает выбор составной матрицы из трех нижних строк (с 4 по 6) и трех правых столбцов (с 4 по 6) матрицы CRB.

2.2.3. Определение эквивалентной информационной матрицы Фишера

FIM вектора состояния $\mathbf{I}(\mathbf{s})$ содержит информацию обо всех параметрах канала, как показано в выражениях (3, 6, 10). Каждый элемент FIM $\mathbf{I}(\mathbf{s})$ обозначается как $\mathbf{I}(\mathbf{s})_{i,j} = I(\mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j)$ и может быть вычислен по формулам (16–18); $i, j \leq \text{length}(\mathbf{s})$, где $\text{length}\{\cdot\}$ – оператор вычисления размера вектора. Если для позиционирования нужны только параметры оценки координат $\mathbf{p}_U$ и ориентации $\mathbf{o}_U$, т. е. интерес представляет лишь вектор $\mathbf{s}_U$, вместо полной FIM вычисляется EFIM.

Для этого структура исходной FIM вектора состояния $\mathbf{I}(\mathbf{s})$ преобразуется в блочную диагональную форму согласно выражению [2]:

$$\mathbf{I}(\mathbf{s}) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}(\mathbf{s}_U) & \mathbf{I}(\mathbf{s}_U, \mathbf{s}_N) \\ \mathbf{I}(\mathbf{s}_U, \mathbf{s}_N)^T & \mathbf{I}(\mathbf{s}_N) \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где вектор состояния $\mathbf{s}_U$ содержит параметры UE, представляющие интерес для задач позиционирования, а вектор $\mathbf{s}_N$ – остальные параметры состояния из совокупного вектора $\mathbf{s} = \mathbf{s}_U \cup \mathbf{s}_N$ в (1); подразделение на векторы $\mathbf{s}_U$ и $\mathbf{s}_N$ подробно описано в [8].

EFIM вектора состояния $\mathbf{s}_U$ можно представить в виде выражения [2]:

$$\mathbf{I}^E(\mathbf{s}_U) = \mathbf{I}(\mathbf{s}_U) - \mathbf{I}(\mathbf{s}_U, \mathbf{s}_N) \mathbf{I}(\mathbf{s}_N)^{-1} \mathbf{I}(\mathbf{s}_U, \mathbf{s}_N)^T, \quad (22)$$

где элемент $\mathbf{I}(\mathbf{s}_U, \mathbf{s}_N)_{i,j} = I(\mathbf{s}_{U,i}, \mathbf{s}_{N,j})$, $i \leq \text{length}(\mathbf{s}_U)$, $j \leq \text{length}(\mathbf{s}_N)$; РЕВ и ОЕВ вычисляются из CRB по формулам (19 и 20), соответственно.

2.2.4. Нижняя граница Крамера – Рао погрешности оценки ориентации в дальней зоне

Вычисление ОЕВ по формулам (16–20) не позволяет извлечь искомую оценку в пространстве 3D в условиях дальней зоны, так как ориентация $\mathbf{o}_U$ в векторе состояния (6) не извлекается из первичных УМ измерений, собранных на приемной базовой станции и содержащихся в векторе измерений (7). В то же время пределы ОЕВ устройства можно оценить с использованием ограниченной НГКР из вектора углов ухода $\text{AOD } \tilde{\mathbf{\theta}} = [\tilde{\varphi}_{UB}; \tilde{\varphi}_{UR}; \tilde{\varphi}_{UN}]$, измеренных на передающем UE. Установлено, что неизвестный вектор $\boldsymbol{\eta} \in \mathbb{R}^{N_\eta \times 1}$, располагающийся на поверхности функции неопределенности $\mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}) = 0$, определяется $0 \leq K_\eta \leq N_\eta$ ограничениями.

Тогда ограниченную НГКР можно представить выражением [19]:

$$\mathbf{I}_{\text{const}}^{-1}(\boldsymbol{\eta}) = \mathbf{M}(\mathbf{M}^T \mathbf{I}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T, \quad (23)$$

где $\mathbf{I}(\boldsymbol{\eta})$ – EFIM вектора параметров $\boldsymbol{\eta}$ без ограничений; $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{N \times (N-K)}$ – ортонормированный базис для пространства градиентной матрицы $\partial \mathbf{f}(\boldsymbol{\eta}) / \partial \boldsymbol{\eta}^T$, удовлетворяющий условию $\mathbf{M}^T \mathbf{M} = \mathbf{I}_{N-K}$.

Для оценки ориентации в дальней зоне матрицу $\mathbf{M}$ можно представить как [20]:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -\mathbf{r}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{r}_2 \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} & -\mathbf{r}_3 & -\mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix}, \quad (24)$$

где $\mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}_2$ и $\mathbf{r}_3$ – соответственно первый, второй и третий столбцы матрицы поворота $\mathbf{R}$ [1]:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & c_\alpha s_\beta s_\gamma - c_\gamma s_\alpha & s_\alpha s_\gamma + c_\alpha c_\gamma s_\beta \\ c_\beta s_\alpha & c_\alpha c_\gamma + s_\alpha s_\beta s_\gamma & c_\gamma s_\alpha s_\beta - c_\alpha s_\gamma \\ -s_\beta & c_\beta s_\gamma & c_\beta c_\gamma \end{bmatrix}, \quad (25)$$

где использованы следующие обозначения:

$$c_\alpha = \cos(\alpha_Q), \quad s_\alpha = \sin(\alpha_Q), \quad (26)$$

$$c_\beta = \cos(\beta_Q), s_\beta = \sin(\beta_Q), \quad (27)$$

$$c_\gamma = \cos(\gamma_Q), s_\gamma = \sin(\gamma_Q). \quad (28)$$

Столбцы матрицы поворота $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$ и нулевой вектор $\mathbf{0}_{3 \times 1}$ можно представить выражениями:

$$\mathbf{r}_1 = [c_\alpha c_\beta, c_\beta s_\alpha, -s_\beta]^T, \quad (29)$$

$$\mathbf{r}_2 = [c_\alpha s_\beta s_\gamma - c_\gamma s_\alpha, c_\alpha c_\gamma + s_\alpha s_\beta s_\gamma, c_\beta s_\gamma]^T, \quad (30)$$

$$\mathbf{r}_3 = [s_\alpha s_\gamma + c_\alpha c_\gamma s_\beta, c_\gamma s_\alpha s_\beta - c_\alpha s_\gamma, c_\beta c_\gamma]^T, \quad (31)$$

$$\mathbf{0}_{3 \times 1} = [0, 0, 0]^T. \quad (32)$$

Сформировав составной вектор $\mathbf{r} = \text{vec}(\mathbf{R}) = [\mathbf{r}_1; \mathbf{r}_2; \mathbf{r}_3]$, запишем FIM вектора $\mathbf{I}(\mathbf{r})$ поворота через FIM вектора первичных измерений углов ухода AOD $\mathbf{I}(\tilde{\boldsymbol{\theta}})$ [2]:

$$\mathbf{I}(\mathbf{r}) = \left[\left(\frac{\partial \tilde{\boldsymbol{\theta}}}{\partial \mathbf{r}} \right)^T \mathbf{I}(\tilde{\boldsymbol{\theta}}) \left(\frac{\partial \tilde{\boldsymbol{\theta}}}{\partial \mathbf{r}} \right) \right]. \quad (33)$$

Тогда нижняя граница погрешности оценки ориентации ОЕВ равна [2]:

$$\text{ОЕВ} = \sqrt{\text{tr}([\mathbf{I}_{\text{constr}}(\boldsymbol{\eta})]^{-1})}. \quad (34)$$

Метрика ОЕВ в (34) вычисляется с использованием уточненной матрицы поворота $\|\mathbf{R} - \hat{\mathbf{R}}\|_F$ и отличается от (20) тем, что использует разностные углы Эйлера $\|\mathbf{o} - \hat{\mathbf{o}}\|$. Однако для характеристики точности ориентации могут использоваться обе формулы (20 и 34). Полученные выражения для вычисления пределов РЕВ и ОЕВ позволяют сравнивать эффективность различных алгоритмов позиционирования.

2.2.5. Нижняя граница Крамера – Рао погрешности оценок координат и ориентации в условиях наличия прямой видимости

Записать аналитическое выражение для оценки НГКР при условии учета LOS и всех отраженных NLOS лучей достаточно проблематично, однако можно формализовать РЕВ и ОЕВ в сценарии LOS для условий сбора первичных ДМ и УМ измерений в радиолинии UE → BS по единственному лучу LOS.

Для сценария позиционирования на плоскости 2D в условиях идеальной синхронизации ($B = 0$) такие оценки получены в [8, 9]:

$$\text{РЕВ}_{\text{LOS}} = \sqrt{\frac{N_0 W d^2}{N_B N_U G P \lambda^2} \left(\frac{c^2 \zeta_{\tau_{BU}}}{W^2} + \frac{d^2 \zeta_{\phi_{BU}}}{N_B^2} \right)}, \quad (35)$$

$$\text{ОЕВ}_{\text{LOS}} = \sqrt{\frac{N_0 W d^2}{N_B N_U G P \lambda^2} \left(\frac{\zeta_{\phi_{BU}}}{N_B^2} + \frac{\zeta_{\phi_{UB}}}{N_U^2} \right)}, \quad (36)$$

где компоненты $\zeta_{\tau_{BU}}, \zeta_{\phi_{BU}}$ и $\zeta_{\phi_{UB}}$ – составляющие погрешности первичных измерений времени TOA,

угла прихода AOA и угла ухода AOD сигнала по единственному лучу LOS в радиолинии UE → BS.

Одинаковый множитель под знаком корня показывает зависимость от отношения сигнал / шум (SNR, *аббр. от англ.* Signal to Noise Ratio) и содержит следующие параметры:

- мощность шума ($N_0 W$);
- показатель потерь PPB $(d/\lambda)^2$ в свободном пространстве в зависимости от расстояния d и длины волны λ ;
- число элементов AP на базовой станции N_B и UE N_U ;
- число передач G и мощность передачи P .

Анализ выражения (35) показывает, что РЕВ определяется погрешностью первичных измерений задержки TOA $\zeta_{\tau_{BU}}$ и угла прихода AOA $\zeta_{\phi_{BU}}$; снизить влияние погрешности первичных ДМ и УМ измерений на базовой станции можно за счет увеличения ширины полосы частот W и размерности AP базовой станции N_B . Анализ (36) показывает, что ОЕВ определяется погрешностью первичных измерений угла прихода AOA $\zeta_{\phi_{BU}}$ и ухода AOD $\zeta_{\phi_{UB}}$ сигнала; снизить влияние погрешности первичных УМ измерений на базовой станции и UE можно за счет увеличения размерности AP на базовой станции N_B и устройстве N_U .

3. ФОРМАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В СЕТЯХ 6G

В настоящем разделе приводится обзор геометрических алгоритмов позиционирования с одноэтапной и двухэтапной обработкой первичных измерений. При одноэтапном позиционировании (direct localization) оценка координат и ориентации получается в результате непосредственной оптимизации целевой функции первичных ДМ и УМ измерений. При двухэтапном позиционировании (multi-stage) оценка координат и ориентации получается в результате вторичной обработки времени TOA и угла прихода / ухода AOA / AOD сигнала: первичные измерения TOA и AOA / AOD задают линии (в 2D) или поверхностей (в 3D) положения, а их пересечение определяет искомую оценку координат и ориентации. Помимо геометрического, рассматриваются алгоритмы позиционирования на основе обучения, включая кооперативное позиционирование, отслеживание, а также способ одновременной локализации и построения карты SLAM. Рисунок 1 иллюстрирует укрупненные категории алгоритмов позиционирования и номер раздела, в котором выполняется их обзор.

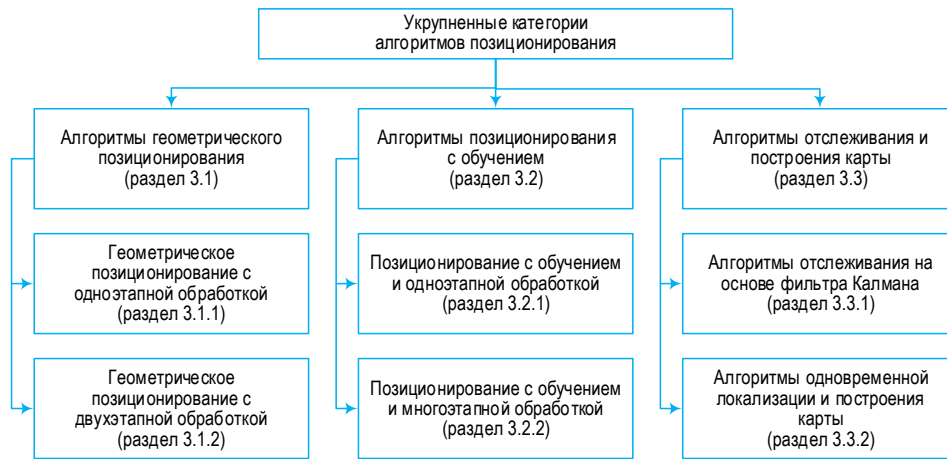


Рис. 1. Укрупненные категории алгоритмов позиционирования

Fig. 1. Enlarged Categories of Positioning Algorithms

3.1. Алгоритмы геометрического позиционирования в сетях 6G

3.1.1. Геометрическое позиционирование с одноэтапной обработкой

Алгоритмы геометрического позиционирования можно разделить на алгоритмы с одноэтапной и многоэтапной обработкой. В алгоритмах с одноэтапной обработкой вектор состояния $\mathbf{s}$ оценивается непосредственно из вектора принятого сигнала $\mathbf{y}^{(g)}[k]$ в (15), минуя этап обработки первичных измерений [3, 21]. Допустим, на приеме доступен вектор $\hat{\mathbf{y}} = \text{vec}(\mathbf{y}^{(g)}[k])$ оценки принятого сигнала по набору из $k = 1, \dots, K$ поднесущих и $g = 1, \dots, G$ передач, а информация о предыдущем состоянии и местоположении UE недоступна. Тогда алгоритм геометрического позиционирования с одноэтапной обработкой можно формализовать выражением максимизации следующей функции правдоподобия [2]:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{s}}_{\text{direct}} &= \arg \max_{\mathbf{s}} p(\hat{\mathbf{y}}|\mathbf{s}) = \arg \max_{\mathbf{s}} \ln(p(\hat{\mathbf{y}}|\mathbf{s})) = \\ &= \arg \min_{\mathbf{s}} [(\hat{\mathbf{y}} - \boldsymbol{\mu}(\mathbf{s}))^H \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{y}}}^{-1} (\hat{\mathbf{y}} - \boldsymbol{\mu}(\mathbf{s}))], \end{aligned} \quad (37)$$

где $\boldsymbol{\mu} = \text{vec}(\boldsymbol{\mu}^{(g)}[k])$ – вектор принятого сигнала без учета выборок АБГШ по набору из $k = 1, \dots, K$ поднесущих и $g = 1, \dots, G$ передач; $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{y}}}$ – ковариационная матрица вектора принятых сигналов $\hat{\mathbf{y}}$, которую можно исключить при условии независимых одинаково распределенных выборок АБГШ в (15) на различных элементах АР, поднесущих и передачах.

Обобщенный алгоритм геометрического позиционирования с одноэтапной обработкой (37) можно использовать как в сценарии квази-синхронных радиотрасс UE ↔ BS, когда синхронизированы только базовые станции, так и в асинхронном сценарии, когда синхронизация отсутствует как в радиотрассах UE ↔ BS, так и между

BS [2]. Однако вычислительная сложность оптимизационной задачи в (37) чрезвычайно высока вследствие невыпуклой целевой функции и широкого пространства поиска. Для сужения области поиска может быть использована информация о предыдущем состоянии и местоположении UE.

3.1.2. Геометрическое позиционирование с двухэтапной обработкой

В алгоритмах с двухэтапной обработкой выделяют этап извлечения геометрических параметров первичных ДМ / УМ измерений и этап вторичной обработки первичных ДМ / УМ измерений с оценкой координат и ориентации UE. Разделение на два этапа позволяет снизить вычислительную сложность алгоритма позиционирования. В двухэтапном алгоритме из принятого сигнала сначала извлекается вектор первичных измерений $\hat{\mathbf{y}}$, а затем на его основе выполняется вычисление вектора состояния $\hat{\mathbf{s}}_U$, включающего искомую оценку координат $\hat{\mathbf{p}}_U$ и ориентации $\hat{\mathbf{o}}_U$ UE [6, 7].

Алгоритм геометрического позиционирования с двухэтапной обработкой можно формализовать выражением максимизации следующей целевой функции [2]:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{s}}_{\text{multi-stage}} &= \arg \max_{\mathbf{s}} p(\hat{\mathbf{y}}|\mathbf{s}) = \\ &= \arg \min_{\mathbf{s}} [(\hat{\mathbf{y}} - \boldsymbol{\gamma}(\mathbf{s}))^H \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{y}}}^{-1} (\hat{\mathbf{y}} - \boldsymbol{\gamma}(\mathbf{s}))], \end{aligned} \quad (38)$$

где $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{y}}}$ – ковариационная матрица вектора измерений $\hat{\mathbf{y}}$; первичные измерения в составе вектора $\hat{\mathbf{y}}$ извлекаются из оценки принятого сигнала $\hat{\mathbf{y}}$.

Алгоритм двухэтапной обработки по своей сути является субоптимальным [3] и обычно уступает по точности алгоритму с одноэтапной обработкой. Однако учет МЛК, вычислительно сложный в реализации за один этап, позволяет алгоритму с двухэтапной обработкой приблизиться к точности алгоритма с одноэтапной обработкой, что подтвер-

ждается оценками точности в [6, 7]. Пример практической реализации алгоритма сжатого зондирования при оценке углов прихода / ухода, иллюстрирующий геометрическое позиционирование с двухэтапной обработкой, рассмотрен в [22].

Извлечение первичных дальномерных ТОА, угломерных АОА / АОД и других измерений для каждой компоненты прямого и отраженных лучей в составе вектора $\hat{\mathbf{y}}$ может выполняться как совместно, так и по отдельности. Например, оценка амплитудных коэффициентов канала может быть выполнена методом наименьших квадратов. Определение углов прихода / ухода АОА / АОД сигналов может выполняться методом анализа подпространств MUSIC (аббр. от англ. Multiple Signal Classification) [23], сжатого зондирования [24] и глубокого обучения [25]. Определение задержек прихода ТОА сигналов может выполняться методом корреляционного [26] или энергетического [27] анализа. Параметры канала можно также оценить и совместно с использованием многомерного анализа методом MD-ESPRIT (аббр. от англ. Multi-Dimensional Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) [28]. Точность сбора УМ измерений АОА и АОД определяется, в первую очередь, размерностью AP на базовой станции и UE, а точность сбора ДМ измерений ТОА определяется, в первую очередь, шириной полосы частот и начальными условиями синхронизации в радиолинии BS $\leftrightarrow$ UE. Особенностью позиционирования с двухэтапной обработкой является то, что погрешности первичных измерений на первом этапе снижают результирующую точность оценок координат и ориентации в результате вторичной обработки на втором этапе, поэтому в двухэтапных алгоритмах следует предусматривать механизмы компенсации.

3.1.2. Практическая реализация геометрических алгоритмов

Аналитическое решение задачи геометрического позиционирования с двухэтапной обработкой может быть получено путем приравнивания производной целевой функции (38) к нулю и нахождения неизвестной оценки координат $\hat{\mathbf{p}}_U$ и ориентации $\hat{\mathbf{b}}_U$ UE. Однако данный подход непрактичен вследствие того, что целевая функция в (38) не является выпуклой. На практике используют два типа алгоритмов оптимизации: конвергентные итерационные и эвристические [29].

Принцип работы конвергентных итерационных алгоритмов основан на том, что при известной из модели сигнала информации о градиенте можно реализовать алгоритмы на основе градиента (т. е. вектора, указывающего направление наискорейшего роста некоторой скалярной величины) или Гессiana (Гессиян функции – симметрическая

квадратичная форма, описывающая поведение функции во втором порядке). За несколько итераций конвергентные алгоритмы сходятся к оптимуму целевой функции. Сходимость зависит от критериев оптимизации целевой функции и параметров итеративного поиска, например, размера шага, при которых могут быть достигнуты локальные решения.

Принцип работы эвристических алгоритмов основан на оптимизации недифференцируемых нелинейных целевых функций и более быстром нахождении субоптимальных решений. Популярные алгоритмы включают роевой интеллект и генетические алгоритмы [2]. В связи с достаточно большим числом первичных измерений вследствие высокой размерности AP и широкой полосы сигнала, а также принимая во внимание свойство разряженности радиоканала диапазона ММВ и ТГц-волн предпочтительным с вычислительной точки зрения является позиционирование с двухэтапной обработкой. Однако в сценариях, где необходима максимально возможная точность, целесообразно сначала оценить область поиска координат и ориентации алгоритмом двухэтапной обработки, а затем в этой области выполнить повторный поиск с одноэтапной обработкой.

3.2. Алгоритмы позиционирования с обучением

В сложных условиях РРВ при наличии большого числа не разрешаемых в домене времени МЛК, а также при невозможности реализации алгоритмов геометрического позиционирования в реальном времени могут использоваться алгоритмы с обучением. В настоящем разделе рассмотрим особенности практической реализации алгоритмов позиционирования с машинным обучением (ML, аббр. от англ. Machine Learning). Данные алгоритмы, как и геометрические, подразделяются на ML-позиционирование с одноэтапной и двухэтапной обработкой.

3.2.1. Позиционирование с обучением и одноэтапной обработкой

Обобщенный алгоритм позиционирования с обучением включает две фазы: предварительное оффлайн-обучение модели $f(\cdot)$ и онлайн-обработку наблюдений $\mathbf{y}$, в результате которой получается оценка координат и ориентации $\hat{\mathbf{p}} = f(\mathbf{y})$. На этапе обучения необходимо сформировать набор обучающих данных $\mathcal{D} = \langle \mathcal{D}_y, \mathcal{D}_p \rangle$ для обучения модели – оптимизации параметров функции $f(\cdot)$ по критерию минимизации функции потерь:

$$\mathcal{L}(f(\mathbf{y}^{\text{train}}), \mathbf{p}^{\text{train}}).$$

Набор обучающих данных включает наборы пар сигнал-местоположение $\langle \mathbf{y}_i^{\text{train}}, \mathbf{p}_i^{\text{train}} \rangle$, задающих соотношение между i -м наблюдением $\mathbf{y}_i^{\text{train}}$ и i -й

оценкой координат и ориентации $\mathbf{p}_i^{\text{train}}$, где $1 \leq i \leq |\mathcal{D}|$, $\mathbf{y}_i^{\text{train}} \in \mathcal{D}_y$, $\mathbf{p}_i^{\text{train}} \in \mathcal{D}_p$.

Используя в качестве критерия оптимизации целевой минимум среднеквадратического отклонения, получим выражение [2]:

$$\mathcal{L}(f(\mathcal{D}_y), \mathcal{D}_p) = \sum_i^{|\mathcal{D}|} \|f(\mathbf{p}_i^{\text{train}}) - \mathbf{p}_i^{\text{train}}\|^2. \quad (39)$$

После обучения модель $f(\cdot)$ может использоваться для извлечения непосредственной оценки координат и ориентации $\hat{\mathbf{p}}$ из собранных наблюдений $\mathbf{y}$.

Подход анализа на соответствие шаблону использует базу данных предварительно записанных шаблонов-измерений с известными местоположениями для поиска наилучшего соответствия между текущим собранным измерением и предварительно записанным в базу данных. При нахождении наилучшего соответствия текущему измерению ставится в соответствие записанное в базу местоположение. В качестве первичных измерений может выступать информация о состоянии канала (CSI, аббр. от англ. Channel State Information), включающая, например, уровни мощности принимаемого сигнала (RSS, аббр. от англ. Received Signal Strength). Сбор и обработка CSI, как правило, требует больших накладных расходов и вычислительной сложности, а измерения RSS обычно не обеспечивают высокой точности позиционирования. Одним из измеряемых параметров канала, обеспечивающим компромисс между точностью позиционирования, накладными расходами и вычислительной сложностью является SNR в заданных пространственных лучах [30]. Для извлечения местоположения из наблюдений могут также использоваться модели и методы глубоких нейронных сетей (DNN, аббр. от англ. Deep Neural Networks) и сверточных нейронных сетей (CNN, аббр. от англ. Convolutional Neural Networks) [31]. Позиционирование с обучением и одноэтапной обработкой обеспечивает высокую точность только тогда, когда сценарий онлайн ОМП соответствует тому, в котором выполнено предварительное оффлайн-обучение; поэтому недостатком такого позиционирования является зависимость результирующей точности оценки координат от набора данных, на которых выполнено обучение.

3.2.2. Позиционирование с обучением и многоэтапной обработкой

Как и в случае алгоритмов геометрического ОМП, позиционирование с обучением может быть реализовано в несколько этапов, например: предварительная обработка принятого сигнала, извлечение геометрических параметров из первичных измерений и результирующая оценка координат и ориентации. Каждый из данных этапов может выпол-

няться методами и средствами ML со значительно меньшим объемом набора обучающих данных.

На первом этапе методы ML могут быть использованы для снижения эффектов несовершенства оборудования, например, ошибок расположения антенных элементов [32], дисбаланса синфазной и квадратурной составляющих [33], взаимной связи антенных элементов [34], а также нелинейности усилителя мощности [35]. Принятый искаженный вследствие несовершенства оборудования сигнал может быть компенсирован и восстановлен на начальном этапе предварительной обработки.

На следующем этапе извлечения геометрических параметров из первичных измерений методы ML могут быть использованы для оценки угла DOA [36, 37] и задержки TOA [38, 39] прихода сигнала.

На заключительном этапе оценки координат методы ML могут быть использованы для повышения точности позиционирования посредством идентификации МЛК в условиях NLOS [40] и последующего комплексирования [41].

Принимая во внимание сложность и разнообразность сценариев, а также высокую размерность наборов данных для обучения, реализация ML позиционирования с одноэтапной обработкой представляется непрактичной. В тоже время обучение модели $f(\cdot)$ для составных этапов при заданных параметрах может существенно снизить вычислительную сложность реализации ML-алгоритма позиционирования. Недостатком этого является то, что обученная модель для MIMO системы будет работать только для нее и не подойдет для MISO системы. Также при многоэтапной обработке необходимо учитывать накопление ошибок на каждом из этапов.

3.2.3. Классификация алгоритмов с обучением

ML-алгоритмы обычно классифицируют на контролируемое обучение, или обучение с учителем, используемое для решения задач классификации и регрессии; и неконтролируемое обучение, или обучение без учителя, используемое для кластеризации данных [42]. Другие подходы, включая полуконтролируемое обучение, обучение с подкреплением, трансферное и федеративное обучение, предназначены для решения задач, с которыми сталкиваются контролируемые и неконтролируемые алгоритмы обучения.

Алгоритмы контролируемого обучения включают методы случайного леса, опорных векторов и глубокого обучения. Вследствие их широкого применения в различных областях разработаны инструменты их реализации, однако на практике они сталкиваются с двумя проблемами [2]. Одна заключается в сборе данных на этапе обучения, когда реальные данные собрать затруднительно, а

синтезированные данные не позволяют достичь требуемой точности. Другая заключается в выборе параметров модели, например, количество слоев и нейронов.

Алгоритмы неконтролируемого обучения широко используются в задачах кластеризации и снижения размерности (или извлечения признаков), так как не требуют предварительно размеченных наборов данных. Пример реализации такого алгоритма, называемого диаграммой канала, предложен в [43] и заключается в изучении состояния канала CSI полностью неконтролируемым образом с последующим отображением многомерного набора параметров канала (с большим числом точек) на маломерную диаграмму канала (с малым числом точек). Данный прием может использоваться только на этапе предварительной обработки принятого сигнала [2].

Алгоритмы полуконтролируемого обучения совмещают принципы работы описанных выше алгоритмов и позволяют выполнить обучение модели на основе частично размеченного набора данных $\mathcal{D}$, когда $|\mathcal{D}_p| \ll |\mathcal{D}_y|$. Для сценария без явно формализованной целевой функции предпочтительным является обучение с подкреплением на основе собранных наблюдений в режиме онлайн. Трансферное обучение целесообразно использовать при существующей модели $f(\cdot)$ для снижения времени ее обучения, а федеративное обучение работает в распределенном режиме и повышает конфиденциальность пользователя.

В заключение отметим следующее. С одной стороны, радиоканал терагерцового диапазона является более детерминированным, чем радиоканал диапазона УКВ и ММВ вследствие более высоких потерь РРВ и меньшего числа различных МЛК, поэтому больше подходит для использования алгоритмов геометрического позиционирования. С другой стороны, радиоканал терагерцового диапазона характеризуется гораздо более широкой полосой частот и, следовательно, значительно большим объемом выборки принимаемых сигналов, для своевременной обработки которых в режиме реального времени на этапе извлечения параметров из первичных измерений целесообразно применение именно ML-алгоритмы. Более того, их использование оправдано для снижения эффектов несовершенства оборудования, существенно проявляющихся в терагерцовом диапазоне.

3.3. Алгоритмы отслеживания и построения карты в сетях 6G

Настоящее исследование посвящено позиционированию на основе сделанной в данный момент времени выборки текущих измерений. Однако данный подход к ОМП является составной частью

более общего класса задач отслеживания подвижных объектов, в которых оценка координат в данный момент времени определяется не только текущими измерениями, но и моделью предыдущего состояния объекта.

3.3.1. Алгоритмы отслеживания на основе фильтра Калмана

В сценарии отслеживания UE сбор первичных измерений необходим для инициализации модели состояния устройства, после чего оценка координат извлекается уже в режиме отслеживания. Математически сценарий отслеживания UE можно формализовать следующими выражениями [2]:

$$\mathbf{s}_{U,t} \sim p(\mathbf{s}_{U,t} | \mathbf{s}_{U,t-1}), \quad (40)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_t \sim p(\mathbf{y}_t | \mathbf{s}_{U,t}), \quad (41)$$

где $\mathbf{s}_{U,t}$ – вектор состояния UE в момент времени t , который зависит от вектора состояния UE $\mathbf{s}_{U,t-1}$ в предыдущий момент времени согласно модели движения устройства; $\hat{\mathbf{y}}_t$ – вектор измерений в момент времени t , определяемый выражениями (4, 7, 11), который зависит от вектора состояния UE $\mathbf{s}_{U,t}$ в момент времени t .

Наблюдения образованы задержками TOA, а также углами прихода / ухода AOA / AOD сигналов LOS и отраженных от RIS. Сценарий отслеживания инициализируется начальным состоянием $p(\mathbf{s}_{U,0})$, которое должно быть известно. Обобщенное решение задачи отслеживания сводится к оценке апостериорного состояния $p(\mathbf{s}_{U,t} | \hat{\mathbf{y}}_{1:t})$ с учетом всех собранных измерений до текущего момента времени t . Для решения задачи отслеживания на практике используются различные фильтры, в том числе фильтры Калмана [44–46], которые дают аппроксимацию оценки координат UE. Если сделать допущение о том, что модель движения устройства и модель измерений линейны и подчиняются нормальному закону, то оценка координат получится несмещенной.

Фильтры Калмана обеспечивают рекурсивное решение задачи отслеживания. В сценариях нелинейной модели движения или сбора измерений на практике используется расширенный фильтр Калмана, который аппроксимирует нелинейные модели наблюдений и состояния с помощью линеаризации посредством разложения в ряд Тейлора. Другими разновидностями фильтров Калмана являются сигма-точечный фильтр Калмана, который используется там, где простая линеаризация приводит к уничтожению полезных связей между компонентами вектора состояния. В этом случае «линеаризация» основана на сигма-точечном преобразовании.

Другим распространенным для решения задач отслеживания инструментом являются так назы-

ваемые фильтры частиц [47] или многочастичные фильтры, которые реализуют рекурсивный алгоритм численного решения проблем оценивания для нелинейных и негауссовских случаев. В сравнении с расширенным фильтром Калмана, фильтры частиц не зависят от методов линеаризации или аппроксимации, однако более требовательны к вычислительным ресурсам.

3.3.2. Алгоритмы одновременной локализации и построения карты

Алгоритмы одновременной локализации и построения карты SLAM используются в подвижных UE для построения карты в заранее неизвестном пространстве с одновременным контролем текущего местоположения и пройденного пути. Актуальность SLAM связана с тем, что карты, используемые для позиционирования UE, обычно отражают пространство, зафиксированное в момент их построения, и которое может быть уже не актуально на момент текущего ОМП. Алгоритмы SLAM объединяют два независимых процесса в непрерывный цикл последовательных вычислений, при этом результаты одного процесса участвуют в вычислениях другого.

Принцип работы SLAM основан на том, что измерения $\hat{\mathbf{y}}_t$ в текущий момент времени t могут служить не только для оценки координат UE, но также и для ОМП отражателей SP (Scattering Points) в пространстве, совокупность которых и образует карту [48, 49]. Знание координат отражателей, в свою очередь, может повысить точность позиционирования самого UE. Системы SLAM можно разделить на две укрупненные категории: те, что используют инфраструктуру [50], и те, что ее не используют [51]. В системах SLAM, основанных на инфраструктуре, для оценки координат UE и SP используются сигналы, передаваемые базовыми станциями. Без базовых станций UE само передает зондирующие сигналы и затем само же их принимает и обрабатывает. Сложность в данном случае заключается в поиске соответствия между первичными измерениями времени TOA и угла прихода / ухода AOA / AOD сигналов и потенциальными местоположениями отражателей SP в пространстве.

Для реализации алгоритмов SLAM применительно к модели позиционирования в терагерцовом диапазоне [1] необходимо выразить коэффициенты канальной матрицы $\mathbf{H}_N^{(l)}$ для l -й МЛК в условиях NLOS через координаты $\mathbf{p}_N^{(l)}$ l -го отражателя SP. Затем следует поставить в соответствие измерения задержек и углов в локальной и глобальной СК из вектора измерений $\hat{\mathbf{y}}_t$ местоположениям SP и выполнить их ранжирование согласно оценкам правдоподобия. Реализация алгоритмов SLAM в терагерцовом диапазоне достаточно

затруднительна вследствие необходимости использования узких лучей при передаче и приеме. Для различных сценариев мобильности UE может потребоваться адаптация ширины луча по уровню половинной мощности HPBW (*аббр. от англ. Half Power Beam Width*) [52].

На сегодняшний день известно о достижении дециметровой точности в комплексированной системе высокоточной системы позиционирования локомотивов с использованием цифровых карт местности (<https://niias.ru/products-and-services/products/bortovye-kompleksy/programmno-apparatnyy-kompleks-vysokotochnoy-sistemy-pozitsionirovaniya>).

4. ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ СЕТЕВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ 6G

Оптимизация систем сетевого позиционирования 6G служит для достижения потенциальной точности оценок координат и ориентации UE при заданных ограничениях. В настоящем разделе выполняется постановка задачи оптимизации, а затем рассматриваются сценарии оффлайн и онлайн оптимизации систем сетевого позиционирования 6G.

4.1. Задача оптимизации систем сетевого позиционирования 6G

4.1.1. Постановка задачи

При построении и функционировании систем радиосвязи решают задачи их оптимизации с целью минимизации отношения сигнал / (шум + помеха) – SINR, *аббр. от англ. Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*, – максимизации энергоэффективности, пропускной способности и т. д. При построении и функционировании систем позиционирования очевидным критерием оптимизации является минимизация РЕВ и ОЕВ. В некоторых сценариях ОМП приоритетными могут быть и другие (помимо точности) критерии оптимизации. При построении и функционировании систем сетевого позиционирования следует учитывать то, что сеть 6G решает как задачи связи, так и задачи навигации, используя единый радиointерфейс, поэтому вероятно потребуется поиск компромисса между противоречивыми требованиями.

Для технологий сетевого позиционирования 4G LTE [53] и 5G NR [54, 55], работающих в диапазоне УКВ с выделенными опорными сигналами позиционирования, которые широкоэмитально излучаются базовыми станциями, оптимизация системы выполняется преимущественно оффлайн. Объектом оптимизации в системе сетевого позиционирования диапазона УКВ являются местоположения базовых станций, которые определяют геометрический фактор снижения точности GDOP (*аббр. от англ. Geometric Dilution of Precision*) [56], а также конфигурация AP на базовых станциях.

GDOP связывает точность первичных измерений с точностью оценок координат [57]. Отметим, что для различных методов позиционирования искомая по критерию минимума GDOP топология базовых станций будет отличаться [58], а минимальный GDOP обеспечивается при комбинировании ДМ и УМ измерений [59].

Для технологий сетевого позиционирования 5G NR, работающих в диапазоне ММВ, точность ОМП зависит, в первую очередь, от пространственного разрешения углов прихода/ухода сигналов и определяется процедурами управления лучом на этапе установления и ведения радиосвязи [52]. Для повышения эффективности выравнивания лучей по критериям скорости и точности передатчику необходимо предварительно знать угловое расположение приемника, а приемнику – угловое расположение передатчика, т.е. необходимо выполнить предварительное выравнивание лучей. Диапазон углов расположения становится известен передатчику и приемнику после успешного выполнения грубого сканирования широкими лучами на этапе начального установления соединения и более узкими лучами на этапе уточнения при ведении связи [52]. Для реализации процедур выравнивания лучей используются матрицы прекодирования на передаче и матрицы комбинирования на приеме. Оптимизация этих матриц может производиться в режиме онлайн [2].

Для технологий сетевого позиционирования 6G, работающих в терагерцовом диапазоне, установление и ведение радиосвязи осуществляется еще более узкими лучами, чем в диапазоне ММВ, поэтому описанная выше задача онлайн-оптимизации весовых матриц пространственной обработки сигналов на передаче (прекодирование) и приеме (комбинирование) остается актуальной.

Математическая формализация матриц прекодирования и комбинирования представлена в пояснении к формуле (49) первой части исследования [1]. Осложняется данная задача тем, что решать ее приходится уже не для единого массива из отдельных элементов, выход каждого из которых связан с отдельным аналоговым RFC, а AOSA, образованного из SA. Если в диапазоне ММВ оптимизация матриц выполняется на уровне отдельных антенных элементов, то в терагерцовом диапазоне каждый RFC соответствует отдельному подмассиву SA, поэтому оптимизация выполняется дополнительно и на уровне каждого SA. Также в сетях 6G используются RIS, поэтому дополнительным объектом оптимизации становятся их отражающие коэффициенты.

4.1.2. Формализация задачи

Формализация задачи оптимизации зависит от критериев и сценария, в котором работает система

сетевого позиционирования. В качестве критерия, помимо точности [60], может быть радиопокрытие, задержка, энергопотребление, частота обновления оценки координат [61]. Зачастую различные критерии являются противоречивыми и требуют поиска компромисса. Например, увеличение радиопокрытия влечет за собой рост задержки, а повышение частоты обновления оценок координат может привести к снижению их точности [44, 45]. Задача оптимизации системы позиционирования при заданных ограничениях может быть как однокритериальной, так и многокритериальной. Обобщенная задача оптимизации системы позиционирования 6G терагерцового диапазона включает целевую функцию $f(V)$, функцию ограничений $g(V)$ и может быть формализована в виде выражения [2]:

$$V = \arg \min_V f(V) \text{ при } g(V) \leq 0, \quad (42)$$

где V – набор переменных, которые выбираются из L_Q субъектов $Q \in \{B, R, U\}$: местоположения p_Q , число элементов в массиве N_Q и подмассиве N'_Q AP, разнос элементов Δ' и подмассивов Δ AP, углы ДО ϕ' , коэффициенты RIS Ω , число передач ζ и др. Обычно рассматривается задача многокритериальной оптимизации при нескольких ограничениях, когда и целевая функция $f(V)$ и функция ограничений $g(V)$ образованы наборами параметров.

Целевая функция $f(V)$ зависит от предъявляемых к системе сетевого позиционирования требований [1], а функция ограничений $g(V)$ задает область поиска параметров оптимизации. В зависимости от сценария позиционирования заданный параметр может выступать как целевым критерием оптимизации, так и ограничением. Например, точность оценок координат по метрике РЕВ может выступать целевым критерием оптимизации; также РЕВ может выступать ограничением, например, служить максимально допустимой погрешностью оценки координат при оптимизации по критерию энергопотребления сетевого устройства. Таблица 1 содержит критерии и параметры оптимизации систем сетевого позиционирования для режимов оффлайн и онлайн, а также влияние параметров на критерии [2].

Под кодовой книгой лучей (см. таблицу 1) понимается предварительно заданный набор матриц пространственной обработки сигналов на передаче (прекодирование) и приеме (комбинирование); каждой матрице соответствует свой луч. Под периодом и числом передач – конфигурация сигналов, по которым выполняются первичные измерения. Порядок конфигурации опорных сигналов позиционирования, включая период и число их передач для выполнения сеанса позиционирования, описан в [54, 55].

ТАБЛИЦА 1. Критерии и параметры оптимизации сетевого позиционирования

TABLE 1. Criteria and Parameters for Network Positioning Optimization

Режим	Критерии / параметры	Переменные	Точность	Покрытие	Задержка	Частота обновления	Стабильность	Масштабируемость	Мобильность	Сложность
Оффлайн	число и МП BS, RIS	L_Q, p_Q	✓	✓	–	–	✓	✓	✓	✓
	размерность AP	N_Q, N'_Q	✓	✓		–	–	✓	–	✓
	направленность AP	G_0	✓	✓	✓	–	–	–	–	–
	квантование	Q	✓	–	–	–	–	–	–	✓
	кодовая книга	C	–	✓	✓	–	–	✓	–	–
Онлайн	период, число передач	T, G	✓		–	✓	✓	✓	✓	–
	ширина полосы	B, K	✓	✓	–	✓	–	✓	✓	✓
	мощность	P, s	✓	✓	–	–	✓	✓	–	–
	углы ДО	φ'	✓	✓	–	–	✓	✓	✓	–
	коэффициенты RIS	Ω	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓	–

Примечание: МП BS – местоположение базовых станций

4.2. Сценарии оптимизации систем сетевого позиционирования

При построении и функционировании системы сетевого позиционирования 6G следует учитывать следующие сценарии и средства [61]:

- топология и структура сети;
- стратегии кооперативного ОМП;
- возможности аппаратного обеспечения базовых станций и UE;
- используемые сигналы для сбора первичных измерений.

4.2.1. Топология и структура

В первой части исследования [1] была формализована модель позиционирования в сетях 6G при наличии на приеме UE компоненты LOS от одной базовой станции [62], нескольких отраженных от препятствий SP МЛК в условиях NLOS [63] и отраженных от RIS-компонент. В условиях построения и функционирования сверхплотных терагерцевых сетей 6G в сеансе позиционирования может участвовать несколько базовых станций, RIS и UE, число которых равно L_B , L_R и L_U , соответственно. В таком случае система сетевого позиционирования может характеризоваться централизованной, распределенной и кластерной топологией. Кластерная топология свойственна наносетям ближнего радиуса действия, в которых критически важна энергоэффективность. Централизованная и распределенная топология характерна для сценариев микросот сверхплотных сетей 5G [61] и B5G / 6G. Централизованная топология обеспечивает, как правило, наилучшую сетевую организацию планиро-

вания процедур позиционирования [64], а распределенная топология характеризуется повышенной конфиденциальностью UE, вовлеченного в сеанс определения местоположения.

Для сценариев микросот сверхплотных сетей, с точки зрения вовлечения базовых станций и RIS в сеанс ОМП, различают три структуры систем сетевого позиционирования [2]: гетерогенную, с участием RIS и без организации сот (cell-free network).

Современные и перспективные сети связи по своей сути гетерогенны и образованы различными радиотехнологиями с радиоинтерфейсами нескольких стандартов и диапазонов. Преимуществом гетерогенных сетей является повышенное радиопокрытие и потенциальное снижение сквозной задержки.

В структуре системы сетевого позиционирования с участием RIS возможно увеличение радиопокрытия и прогнозирование коэффициентов ее канальной матрицы. В терагерцевом диапазоне требуемая для RIS площадь крайне мала, поэтому они могут без особых проблем развертываться в сценариях, где требуется повышенная точность позиционирования. Также RIS могут формировать условия NF, которые при надлежащей обработке повышают точность позиционирования [18].

В структуре системы сетевого позиционирования без организации сот радиопокрытие в заданном местоположении UE может обеспечиваться несколькими базовыми станциями одновременно. При оборудовании базовых станций и UE многоэлементными AP сверхбольшой размерности UM-

MIMO (аббр. от англ. Ultra-Massive MIMO) в структуре cell-free говорят о функционировании распределенных MIMO систем [65]. Одновременное участие нескольких базовых станций в сеансе ОМП позволяет собирать измерения с тех из них, которые обеспечивают наилучший геометрический фактор GDOP и более точные оценки углов прихода / ухода AOA / AOD сигналов.

Помимо перечисленных трех структур, находят применение и стратегии кооперативного позиционирования UE в режиме их непосредственного взаимодействия D2D (аббр. от англ. Device-to-Device). Несмотря на повышенное энергопотребление и накладные расходы при организации обмена данными между UE, кооперативное позиционирование способствует повышению точности оценки координат и радиопокрытия при ОМП [66]. Помимо базовых станций, RIS и других UE наземного развертывания, в сеансе ОМП могут участвовать и беспилотные летательные аппараты [61], а также бортовые инерциальные навигационные системы [45].

4.2.2. Аппаратное обеспечение

Для достижения компромисса между стоимостью оборудования и ключевыми показателями эффективности систем сетевого позиционирования оптимизация аппаратного обеспечения выполняется заблаговременно, или оффлайн. Она заключается в обоснованном выборе направленных свойств AP, разрядности квантования фазовращателей диаграммообразующей схемы и фаз элементов RIS, учете вклада эффектов несовершенства оборудования в результирующую точность. В частности, для учета влияния несовершенства аппаратного обеспечения на точность позиционирования вводится новая уточненная метрика НГКР – MCRB (аббр. от англ. Misspecified Cramer – Rao Bound) [67].

4.2.3. Сигналы первичных измерений

На сегодняшний день вопрос о выборе одностотных или многочастотных сигналов OFDM для использования в радиointерфейсе 6G терагерцового диапазона остается открытым [2]. Широкополосные одностотные сигналы с одной несущей характеризуются простотой реализации и могут использоваться в радиоканалах с гладкими по частоте замираниями, когда многолучевость проявляется незначительно. Однако вследствие частотной зависимости потерь молекулярного поглощения и присущих сценариям внутри помещений эффектов многолучевого РРВ предпочтительной для радиointерфейса 6G остается форма многочастотных сигналов OFDM с несколькими поднесущими; и это несмотря на достаточно высокую сложность их реализации и низкую энергоэффективность вследствие высокого пик-

фактора. Вместо отработанного радиointерфейса OFDM, в сетях 6G может также использоваться более новая схема передачи OFDM с дискретным преобразованием Фурье (DFT, аббр. от англ. Discrete Fourier Transform), известная как DFT-OFDM. Она позволяет снизить пик-фактор по сравнению с обычной многочастотной схемой OFDM. В настоящем исследовании в целях сравнения эффективности систем сетевого позиционирования 5G диапазона MMB и 6G терагерцового диапазона далее для сбора первичных измерений в обоих случаях будем полагать использование радиointерфейса на основе многочастотной схемы OFDM.

Выбор других параметров радиointерфейса, таких как несущая частота, ширина полосы, длина кадра / пакета и др. также влияют и на пропускную способность системы радиосвязи, и на точность позиционирования системы сетевого ОМП. Например, увеличение ширины полосы частот позволяет повысить разрешение различных МЛК в домене времени, однако сопутствующий рост разрядности аналого-цифрового преобразователя на приеме и цифроаналогового преобразователя на передаче повысят сложность аппаратной реализации и снижат энергоэффективность. На выбор длины пакета также влияют противоречивые факторы. С одной стороны, чем больше длина пакета, тем большую энергию он в себе содержит и, соответственно, позволит более точно выполнить оценку первичных ДМ и УМ измерений. С другой стороны, чем выше скорость движения UE, т. е. короче интервал когерентности, тем короче должен быть и интервал сигнала (длина пакета, по которому выполняются первичные измерения). Также на длину пакета влияют ограничения по задержке.

4.3. Оффлайн-оптимизация систем сетевого позиционирования

Будем далее под оффлайн-оптимизацией понимать оптимизацию системы сетевого позиционирования 6G, которая проводится до начала функционирования этой системы и при отсутствии какой-либо предварительной информации об оценке координат и ориентации UE, однако в предположении об известном сценарии позиционирования, расположении окружающих объектов, например, отражателей SP, конфигурации и размерности AP базовой станции, RIS и UE. Целью оффлайн-оптимизации является выбор геометрической топологии субъектов позиционирования, включая базовую станцию, RIS и SP, синтез конфигурации и размерности AP, а также поиск кодовой книги лучей, т. е. матриц прекодирования на передаче и комбинирования на приеме.

4.3.1. Оптимизация топологии

Если число субъектов позиционирования базовых станций RIS и UE известно заблаговременно, их топология размещения может быть оптимизирована по критерию минимизации геометрического фактора снижения точности GDOP [68–70]. Дополнительно на этом этапе может быть выполнен прогноз зон LOS и NLOS, а также сориентированы надлежащим образом диаграммы направленности антенн на базовых станциях.

4.3.2. Оптимизация антенной решетки и кодовой книги лучей

С ростом числа элементов AP повышается угловое разрешение и увеличивается коэффициент усиления. Однако рост размерности AP приводит и к увеличению ее стоимости, а также повышенному энергопотреблению. При использовании AOSA объектом оптимизации становится каждый подмассив SA. Рост числа элементов в SA при достоинствах высокого углового разрешения и усиления имеет и недостатки, которые проявляются в снижении зоны радиопокрытия и возникновении зон так называемой «глухоты» вследствие работы узкими лучами [2].

Оптимизация кодовой книги лучей актуальна и востребована для режима начального установления направленного соединения, когда решение этой задачи можно трактовать как угловое позиционирование при отсутствии какой-либо предварительной информации о местоположении устройства. Работа узкими лучами на передачу и прием в терагерцовом диапазоне вследствие высоких потерь РРВ является вынужденной необходимостью и осложняет решение задачи первоначального выравнивания лучей. Эта задача осложняется еще больше в условиях движения UE, вследствие блокировок радиолиний LOS между базовой станцией и UE-препятствиями, а также при повороте корпуса устройства, так как ориентация луча, выполняемая в локальной СК, зависит от текущей ориентации UE в глобальной СК. Для режима начального установления направленного соединения могут быть предусмотрены заранее подготовленные кодовые книги ориентации лучей в заданных направлениях [71].

Различают следующие три подхода к поиску и оптимизации кодовой книги лучей [2]. При *исчерпывающем* поиске базовой станции или UE передают / принимают символы данных во всевозможных направлениях до тех пор, пока лучи не будут выровнены [72]. При *итеративном* поиске формируются иерархические кодовые книги для передачи сначала пилот-сигналов в широких секторах лучами с большим HPBW с последующей передачей пилот-сигналов в более узких секторах лучами с малым HPBW для уточнения ориентации

[73]. При поиске с *известным контекстом*, когда координаты устройства и / или отражателя известны, лучи могут быть сформированы на основе данных о местоположении UE и / или SP [74].

Из трех перечисленных подходов наилучшее выравнивание лучей с сохранением радиопокрытия обеспечивает исчерпывающий поиск. Недостатком этого подхода является увеличение задержки процедуры выравнивания с уменьшением ширины луча [52]. Итеративный поиск снижает и задержку, и зону радиопокрытия, так как сканирование выполняется с разными значениями HPBW, которым соответствуют разные коэффициенты усиления: широкой диаграмме направленности антенн соответствует слабое усиление, а узкой – высокое. Для систем сетевого позиционирования 6G терагерцового диапазона наиболее перспективным подходом к оптимизации кодовой книги лучей представляется поиск с известным контекстом, или ДО на основе позиционирования, когда выравнивание лучей выполняется по заранее известному местоположению [75, 76].

4.3.3. Пример оффлайн-оптимизации

Рассмотрим в качестве примера задачу оптимизации расположения RIS по критерию максимизации зоны радиопокрытия, в которой нижняя граница РЕВ не превышает заданный порог ϵ при известных местоположениях и ориентации AP базовых станций [2]. Для каждого возможного расположения RIS в зоне позиционирования, задаваемого координатами $\mathbf{p}_R$ и ориентацией $\mathbf{o}_R$, и каждого возможного местоположения UE, оборудованного ненаправленной антенной и задаваемого координатами $\mathbf{p}_U$, можно рассчитать FIM $J(\mathbf{p}_U, \boldsymbol{\eta} | \mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R)$ и соответствующую ей метрику РЕВ $\mathcal{R}(\mathbf{p}_U, \boldsymbol{\eta} | \mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R)$ по формуле (19). В приведенных выражениях вектор $\boldsymbol{\eta}$ содержит вспомогательные (помимо координат UE) параметры состояния, такие как коэффициенты канала, сдвиги синхронизации и др. При вычислении FIM $J(\mathbf{p}_U, \boldsymbol{\eta} | \mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R)$ при заданных исходных данных $\mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R$ и $\mathbf{p}_U$ вектор вспомогательных параметров $\boldsymbol{\eta}$ инициализируется с их учетом как $\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\eta}(\mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R, \mathbf{p}_U)$.

Задача оффлайн-оптимизации расположения RIS при описанных выше условиях и ограничениях быть формализована следующим образом [2]:

$$\begin{aligned} & \text{maximize } |\mathcal{R}(\mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R)| \text{ при } \mathbf{p}_R \in \mathbb{R}^3, \mathbf{o}_R \in \text{SO}(3), \\ & \mathcal{R}(\mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R) = \{\mathbf{p}_U \in \mathbb{R}^3 | \text{РЕВ}(\mathbf{p}_U, \boldsymbol{\eta} | \mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R) \leq \epsilon\}, \end{aligned} \quad (43)$$

где $\mathcal{R}(\mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R)$ – зона радиопокрытия, в которой РЕВ не превышает заданный порог ϵ ; $|\mathcal{R}(\mathbf{p}_R, \mathbf{o}_R)|$ – измеримый по числу перебираемых местоположений UE объем зоны радиопокрытия, в которой осуществляется поиск расположения RIS.

Оптимизационная задача в такой постановке (43), как правило, не принадлежит к классу вы-

пуклых, и может потребовать поиска методом перебора [68–70].

Оптимизация систем сетевого позиционирования в сетях 6G терагерцового диапазона отличается от оптимизации систем предыдущих поколений по следующим признакам. Во-первых, матрицы прекодирования сигналов на передаче и комбинирования сигналов на приеме, а также коэффициенты RIS должны быть оптимизированы до того, как начинается оптимизация местоположений базовых станций и / или RIS для заданного сценария позиционирования. Во-вторых, оптимизация при наличии нескольких базовых станций и / или RIS гораздо сложнее, чем оптимизация системы с одной базовой станцией и одной RIS; поиск глобального экстремума чрезвычайно сложен с вычислительной точки зрения. Для поиска решения в таком случае предпочтительно использовать эвристические алгоритмы, которые вместо глобального экстремума дают наиболее подходящие субоптимальные результаты [2].

4.4. Онлайн-оптимизация систем сетевого позиционирования

Будем далее под онлайн-оптимизацией понимать оптимизацию системы сетевого позиционирования 6G, которая проводится в процессе функционирования этой системы в предположении частичной предварительной осведомленности о местоположении и ориентации UE. Например, в сценарии отслеживания текущее состояние UE оценивается на основе предыдущего состояния. Обобщенная задача онлайн-оптимизации системы позиционирования может быть сформулирована в терминах минимизации РЕВ и ОЕВ. Далее рассмотрим сценарии онлайн-оптимизации в контексте распределения радиоресурсов, процедур управления лучами и выбора коэффициентов RIS [2].

4.4.1. Оптимизация распределения радиоресурсов

Оптимальное распределение радиоресурсов является одной из задач управления многопользовательской системой радиосвязи и позиционирования. Рассмотрим вопросы управления радиоресурсов в традиционных для подвижной радиосвязи доменах времени, частоты и мощности. Управление радиоресурсом времени для однопользовательской системы радиосвязи, применительно к содержанию информационного кадра, должно преследовать цель максимизации полезной нагрузки и минимизации накладных расходов. В то же время, для повышения точности позиционирования передачи одних и тех же кадров, по которым выполняются первичные ДМ и УМ измерения, целесообразно повторять иногда по несколько раз; даже несмотря на повышение накладных расходов и задержки. Организация обмена кадрами, с

точки зрения выбора их длительности и частоты передач, должна соответствовать сценарию мобильности UE, в частности, длительность кадра следует выбирать в пределах интервала когерентности. Для многопользовательской системы радиосвязи и позиционирования описанные выше соображения должны учитываться в комплексе.

Управление радиоресурсом частоты в терагерцовом диапазоне имеет свою специфику, которая определяется зависимостью молекулярного поглощения, вызванного водяными парами и другими газами, от конкретного диапазона частот. Для учета этого обстоятельства терагерцовый диапазон подразделяется на поддиапазоны [77]. При этом ширина используемого поддиапазона уменьшается с увеличением требуемой дальности радиосвязи. Такой подход к выбору поддиапазона применим как для решения задач радиосвязи, так и позиционирования.

Управление радиоресурсом мощности определяется сценарием использования системы сетевого позиционирования. Обычно точность оценок координат (35) и ориентации (36) повышается с увеличением мощности передачи сигналов, по которым выполняются первичные измерения. В то же время система сетевого позиционирования обычно должна обеспечивать некоторую заданную точность. Поэтому, например, если внутри помещения требуется достижение точности в 1 см, то повышать мощность для достижения точности в 1 мм нецелесообразно [2].

Управление радиоресурсами при онлайн-оптимизации системы сетевого позиционирования обычно сводится к формализации заданных сценарием ограничений. Особый интерес представляет оптимизация процедур ДО: под оптимизацией активного ДО понимают формирование лучей на передаче и приеме базовой станции и UE, а под оптимизацией пассивного ДО – поиск коэффициентов RIS.

4.4.2. Оптимизация процедур управления лучами и коэффициентов RIS

При наличии сведений о местоположении UE базовая станция может сориентировать диапазон углов ухода / прихода своих лучей в направлении на UE так, чтобы максимизировать коэффициент усиления и, таким образом, увеличить дальность радиопокрытия. Такое ДО по местоположению позволяет повысить SNR в радиолинии и дает положительный эффект для радиосвязи [75, 76], однако повышение точности позиционирования по метрике НГКР при этом не гарантировано. С точки зрения позиционирования целесообразнее оптимизировать матрицы прекодирования и комбинирования для отслеживания углов ухода AOD и прихода AOA в заданной области неопределенно-

сти местоположения UE [78]. При многократных первичных УМ измерениях может выполняться синхронная локализация и оптимизация матриц диаграммообразующей схемы [79]. Примеры сценариев управления формой и шириной луча, которые иллюстрируют суть подхода, описаны в [82].

При использовании AOSA возможно одновременное формирование нескольких лучей в пространстве, формируемых SA. Объектом оптимизации могут быть также и матрицы коэффициентов гибридного ДО. В многопользовательском сценарии актуальна задача распределения лучей SA на различные UE при выполнении задач радиосвязи и позиционирования с требуемыми показателями [2].

В системах сетевого позиционирования с участием RIS оптимизация коэффициентов RIS так же важна, как и оптимизация процедур управления лучами на базовой станции и UE. Надлежащий выбор коэффициентов RIS позволяет управлять отражением МЛК и повышает коэффициент усиления полезного сигнала. Коэффициенты RIS можно оптимизировать как для решения задач радиосвязи, так и для позиционирования [80]. Для радиосвязи критерием оптимизации может выступать максимизация SNR, который, однако, не гарантирует повышения точности ОМП. Для позиционирования критерием оптимизации может выступать минимизация РЕВ.

4.4.3. Пример онлайн-оптимизации

Рассмотрим в качестве примера задачу оптимизации коэффициентов интеллектуальной поверхности ω_g , содержащихся в матрицах профилей фаз RIS $\Omega_1, \dots, \Omega_G$ для $g = 1, \dots, G$ передач при ограничении на заданную матрицу прекодирования передающего UE и матрицу комбинирования принимающей базовой станции [2]. Критерием оптимизации будем считать минимизацию порога ε РЕВ. Будем полагать, что местоположение UE известно с точностью до принадлежности к некоторой зоне неопределенности в пространстве: $\mathbf{p}_U \in \mathcal{R} \subset \mathbb{R}^3$. Пусть вектор $\boldsymbol{\eta}$ содержит вспомогательные (помимо координат UE) параметры состояния, а искомые коэффициенты RIS образованы диагональными элементами матрицы комплексных профилей фаз $\omega_g = \text{diag}(\Omega_g) \in \mathbb{C}^{N_R \times N_R}$. Тогда можно вычислить FIM $\mathbf{J}(\hat{\mathbf{p}}_U, \boldsymbol{\eta} | \omega_1, \dots, \omega_G)$ оценок координат $\hat{\mathbf{p}}_U$ в зависимости от набора коэффициентов RIS $\omega_1, \dots, \omega_G$ для G передач. Задача онлайн-оптимизации коэффициентов RIS при описанных выше условиях и ограничениях может быть формализована следующим образом [2]:

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \varepsilon \text{ при РЕВ}(\mathbf{p}_U, \boldsymbol{\eta} | \omega_1, \dots, \omega_G) \leq \varepsilon, \\ & \mathbf{p}_U \in \mathcal{R}^*, \quad |\omega_{r,g}| = 1, \forall r, g, \end{aligned} \quad (44)$$

где $|\omega_{r,g}| = 1, \forall r, g$ означает, что выполняется поиск только фаз комплексных коэффициентов с единичной амплитудой.

В системах сетевого позиционирования 6G вопросы оффлайн- и онлайн-оптимизации с участием RIS являются принципиально важными [11–17], поскольку RIS способны частично компенсировать высокое затухание при PPV и вероятные блокировки в радиолиниях терагерцового диапазона.

5. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В СЕТЯХ 6G

В настоящем разделе выполняется имитационное моделирование заданного геометрического сценария позиционирования в сетях 5G диапазона ММВ и сетях 6G терагерцового диапазона согласно программному модулю [81]. Сравниваются показатели точности позиционирования по метрикам РЕВ и ОЕВ на несущей $f_c = 60$ ГГц диапазона ММВ 5G и несущей $f_c = 0,3$ ТГц терагерцового диапазона 6G для сценария сбора первичных измерений в радиолинии «вверх» UE $\rightarrow$ BS.

Таблица 2 содержит используемые в имитационной модели позиционирования параметры исследуемого сценария с некоторыми отличиями от [2], в частности, с увеличенным территориальным разнесом базовых станций и UE для реализации сценария дальней зоны (скрипт 1 в [1]). В исследуемом сценарии сравниваются РЕВ и ОЕВ. Для сравнения фиксируются параметры мощности P и интервала передачи T , а также геометрические размеры приемной AP на базовой станции.

Для системы сетевого позиционирования диапазона ММВ будем полагать использование модели приема в полносвязной цифровой MIMO системе с единым массивом AP, когда каждому элементу AP соответствует свой модуль RFC, а для терагерцового диапазона будем полагать использование модели приема в гибридной MIMO системе из AOSA, когда каждому SA соответствует свой модуль RFC [1]. В рассматриваемом сценарии UE и базовые станции работают в условиях LOS, согласно модели плоского фронта волны PWM, в дальней зоне. При этом UE и базовая станция идеально синхронизированы и в радиолинии UE $\rightarrow$ BS $B = 0$. Ненулевой сдвиг синхронизации сделал бы оценку времен прихода сигналов TOA в единственной радиолинии с прямой видимостью LOS затруднительной. В то же время сбор ДМ измерений при наличии сдвига синхронизации в радиолинии UE $\rightarrow$ BS возможен в условиях NLOS с обработкой нескольких МЛК, в том числе, при участии RIS в сеансе позиционирования. Также в рассматриваемом сценарии предполагается отсутствие информации о состоянии UE, поэтому ДО единым массивом и составными подмассивами AP на этапе

начального установления соединения начинается с передач в лучах со случайно выбранной ориентацией в диапазоне $\tilde{\varphi}, \tilde{\theta} \in (-90^\circ, 90^\circ)$ азимутов $\tilde{\varphi}$ и углов места $\tilde{\theta}$ в пространстве.

ТАБЛИЦА 2. Параметры сценария имитационной модели позиционирования в сетях 5G / 6G

TABLE 2. Parameters of the Simulation Model Scenario for Positioning in 5G / 6G Networks

Параметр	Значение
Центральная несущая частота, f_c	60 ГГц / 0,3 ТГц
Мощности передачи, P	20 дБм
Спектральная плотность мощности шума, N_0	-174 дБм/Гц
Коэффициент шума приемника	10 дБм
Геометрический размер AP на базовой станции	2×2 см ²
Расстояние между элементами AP, Δ	$\lambda_c/2$
Ширина полосы частот, W	100 МГц
Число передач, G	5
Модель фронта волны	PWM в дальней зоне
Сценарий оценки координат и ориентации	оценка координат 2D, ориентация 1D
Размерность AP в диапазоне ММВ / ТГц на базовой станции, N_B	1×1, 2×2, 3×3, ..., 10×10
Размерность AOSA в терагерцевом диапазоне на базовой станции, $N'_B N_B$	5×5, 10×10, 15×15, ..., 50×50
Размерность SA в ТГц на базовой станции, N'_B	5×5
Истинные координаты базовой станции / UE, p_B / p_U	[0,0,0] ^T / [10,5,0] ^T м
Истинная ориентация базовой станции / UE, o_B / o_U	[0,0,0] ^T / [π, 0,0] ^T

Рисунок 2 иллюстрирует вариант размерности и конфигурации AP в диапазоне ММВ и ТГц на подложке размером 2×2 см² при $N_B = 4 \times 4$ и $N'_B = 5 \times 5$ [2]. Рисунок 3 – зависимости НГКР дисперсии оценок координат РЕВ и ОЕВ устройств в пространстве от размерности и конфигурации AP на базовой станции. Цвета не соответствуют конфигурациям на рисунке 2: черный, зеленый и синий показывают сценарии, в которых участвует единый массив AP, определяемый размерностью N_B от 1×1, до 10×10; красный цвет показывает сценарии, в которых участвует массив AOSA из подмассивов SA размерностью $N'_B = 5 \times 5$; итоговая размерность определяется произведением $N'_B N_B$ и в примере на рисунке 2d равна 20×20.

Результаты оценки РЕВ (см. рисунок 3a) и ОЕВ (см. рисунок 3b) показаны для сценариев, учитывающих диапазон с несущей частотой f_c , ширину полосы W , конфигурацию AP и расстояние Δ между ее элементами: 1) $f_c = 60$ ГГц, $W = 0,1$ ГГц, единый массив AP из N_B элементов с $\Delta = \lambda_c/2$; 2) $f_c = 0,3$ ТГц, $W = 0,1$ ГГц, единый массив AP из N_B

элементов с $\Delta = \lambda_c/2$; 3) $f_c = 0,3$ ТГц, $W = 0,1$ ГГц, единый массив AP из N_B элементов с $\Delta = 2,5\lambda_c$; 4) $f_c = 0,3$ ТГц, $W = 0,1$ ГГц, составной массив AOSA из $N_B N'_B$ элементов с $\Delta = \lambda_c/2$; 5) $f_c = 0,3$ ТГц, $W = 1$ ГГц, составной массив AOSA из $N_B N'_B$ элементов с $\Delta = \lambda_c/2$; 6) $f_c = 0,3$ ТГц, $W = 1$ ГГц, составной массив AOSA из $N_B N'_B$ элементов с $\Delta = \lambda_c/2$ и знанием канала CSI.

Анализ графиков на рисунке 3 позволяет сделать следующие выводы:

1) с увеличением размерности AP, независимо от ее конфигурации (единый или составной массив) показатели РЕВ и ОЕВ уменьшаются для всех сценариев имитационной модели;

2) при прочих равных условиях, РЕВ и ОЕВ в диапазоне ММВ для единого массива AP ниже, чем в терагерцевом диапазоне, что можно объяснить меньшими потерями при РРВ; в то же время, в терагерцевом диапазоне увеличение разности антенных элементов с $\Delta = \lambda_c/2$ до $\Delta = 2,5\lambda_c$ приводит к небольшому снижению РЕВ и значительному снижению ОЕВ;

3) использование AOSA приводит к снижению РЕВ и ОЕВ в терагерцевом диапазоне по сравнению с диапазоном ММВ несмотря на более высокие потери РРВ;

4) при увеличении ширины полосы частот с $W = 0,1$ ГГц до $W = 1$ ГГц показатель РЕВ заметно уменьшается, а показатель ОЕВ не изменяется; данные зависимости объясняются повышением разрешения при корреляционной обработке ДМ измерений, которые влияют только на точность оценки координат;

5) использование предварительного знания о состоянии канала CSI повышает точность оценки координат по критерию РЕВ;

6) в диапазоне ММВ дециметровая точность оценки координат с единым массивом достигается при более, чем $N_B = 64$ элементах AP и ширине полосы частот $W = 0,1$ ГГц; в терагерцевом диапазоне дециметровая точность оценки координат достигается составным массивом размерности более, чем $N'_B N_B = 525$ элементов AOSA с расстоянием между элементами $\Delta = \lambda_c/2$ и ширине полосы частот $W = 0,1$ ГГц;

7) сантиметровая точность оценки координат в терагерцевом диапазоне достигается составным массивом размерности более, чем $N'_B N_B = 2500$ элементов AOSA с расстоянием между элементами $\Delta = \lambda_c/2$, ширине полосы частот $W = 1$ ГГц и предварительном знании состояния канала CSI;

8) точность ориентации в 1° в терагерцевом диапазоне достигается составным массивом AOSA размерности из более, чем $N'_B N_B = 525$ элементов с расстоянием между ними $\Delta = \lambda_c/2$, шириной полосы частот $W = 1$ ГГц и предварительным знанием состояния канала CSI.

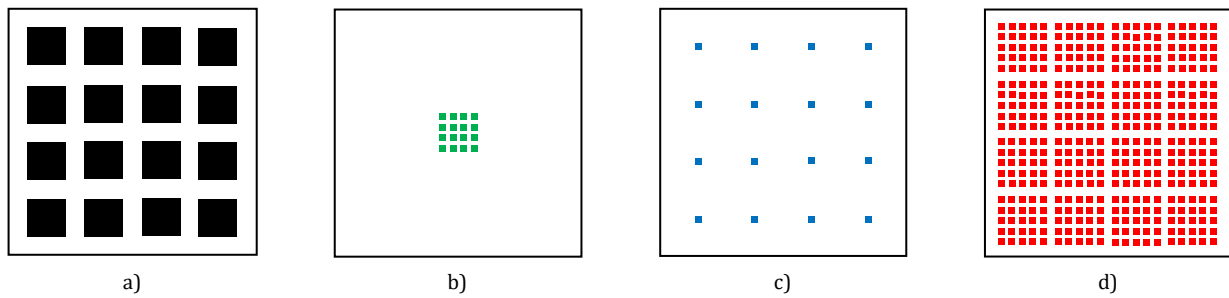


Рис. 2. Варианты размерности и конфигурации АР в диапазоне ММВ и ТГц: а) $f_c = 60$ ГГц, $\Delta = \lambda_c/2$; б) $f_c = 0,3$ ТГц, $\Delta = \lambda_c/2$; в) $f_c = 0,3$ ТГц, $\Delta = 2,5\lambda_c$; д) АОСА, $f_c = 0,3$ ТГц, $\Delta = \lambda_c/2$

Fig. 2. Variants of the Dimensions and Configurations of the AA in the MMW and THz Range: а) $f_c = 60$ GHz, $\Delta = \lambda_c/2$; б) $f_c = 0,3$ THz, $\Delta = \lambda_c/2$; в) $f_c = 0,3$ THz, $\Delta = 2,5\lambda_c$; д) АОСА, $f_c = 0,3$ THz, $\Delta = \lambda_c/2$

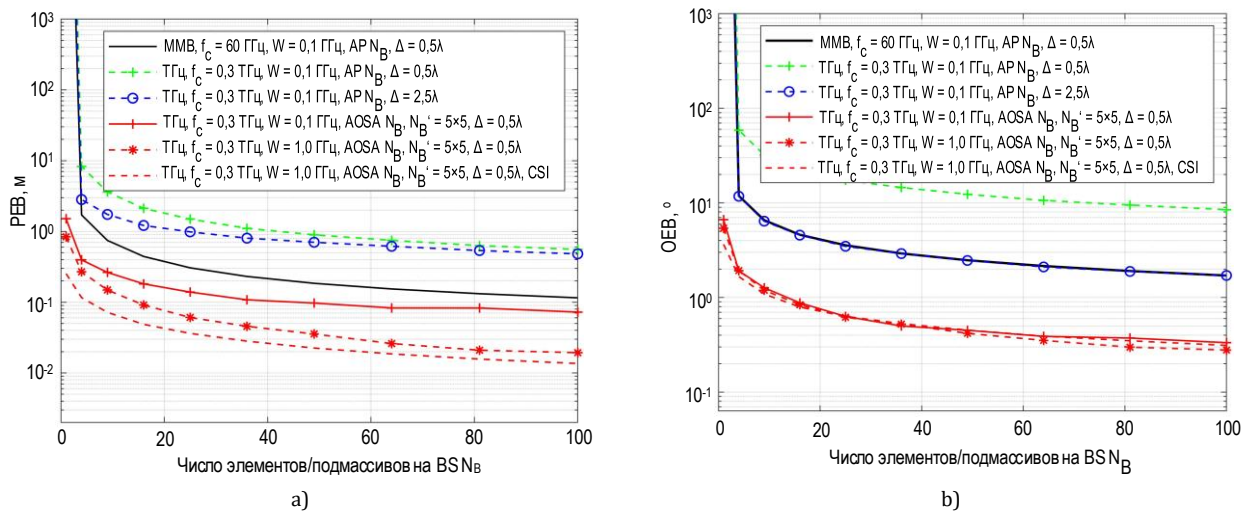


Рис. 3. Зависимости РЕВ (а) и ОЕВ (б) от размерности и конфигурации АР

Fig. 3. Dependences of PEB (a) and OEB (b) on the Dimension and Configuration of the AA

Отметим, что полученные оценки отличаются от результатов [2] в сторону снижения точности по причине увеличения расстояния между базовой станцией и UE. Основным выводом проведенного имитационного моделирования является научное обоснование достижения дециметровой точности оценок координат по метрике РЕВ и углового разрешения ориентации устройств в 1° в терагерцовом диапазоне при использовании полосы частот $W = 1$ ГГц и АОСА из более, чем полутысячи элементов.

Дальнейшие пути повышения углового и пространственного разрешения устройств по критериям РЕВ и ОЕВ в сверхплотных сетях 6G терагерцового диапазона связаны с использованием эффектов NF и переотражений, в том числе, от RIS.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в настоящем исследовании анализ моделей оценки точности, обзор алгоритмов и путей их оптимизации, а также численный эксперимент служат цели обоснования используемой конфигурации и размерности антенной решетки на базовой станции для достижения дециметровой точности. В рамках обозначенной в первой части цикла научной проблемы поиска новых методов и средств достижения дециметровой и сантиметровой точности оценок координат в третьей части цикла исследования планируется моделирование сценариев использования однократно отраженных многолучевых компонент, реконфигурируемой интеллектуальной поверхности, а также эффекта сферического фронта волны в ближней зоне для достижения сантиметровой точности.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

AOA	Angle of Arrival	Угол прихода сигнала
AOD	Angle of Departure	Угол ухода сигнала
AOSA	Array of Sub Array	Антенная решетка из составных подмассивов
BS	Base Station	Базовая станция

CNN	Convolutional Neural Networks	Сверточные нейронные сети
CRF	Conventional Radio Frequency	Традиционный (для систем подвижной радиосвязи) диапазон ДМВ и СМВ
CSI	Channel State Information	Информация о состоянии канала
D2D	Device-to-Device	Режим непосредственного взаимодействия устройств
DFT	Discrete Fourier Transform	Дискретное преобразование Фурье
DNN	Deep Neural Networks	Глубокие нейронные сети
EFIM	Equivalent Fisher Information Matrix	Эквивалентная информационная матрица Фишера
ESPRIT	Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariant Techniques	Метод определения углов прихода множества источников сигналов в антенных решетках; использует спектральное разложение корреляционной матрицы сигналов
GDOP	Geometric Dilution of Precision	Геометрический фактор снижения точности
gNB	gNodeB	Базовая станция 5G NR
HPBW	Half Power Beam Width	Ширина луча по уровню половинной мощности
LOS	Line Of Sight	Наличие прямой видимости
MCRB	Misspecified Cramer-Rao Bound	Уточненная нижняя граница Крамера – Рао
ML	Machine Learning	Машинное обучение
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	Многоантенная система с множеством входов и множеством выходов
MSE	Mean Squared Error	Среднеквадратическая ошибка
MUSIC	MUltiple Signal Classification	Метод определения углов прихода множества источников сигналов в антенных решетках
NF	Near Field	Ближняя зона
NLOS	Non-Line of Sight	Отсутствие прямой видимости
OEB	Orientation Error Bound	Нижняя граница погрешности оценки ориентации
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing	Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением
PEB	Position Error Bound	Нижняя граница погрешности оценки координат
PWM	Plane Wave Model	Модель плоского фронта волны
RFC	Radio Frequency Chain	Радиочастотный модуль
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface	Реконфигурируемая интеллектуальная поверхность
RMSE	Root Mean Squared Error	Корень из среднеквадратической ошибки
RSS	Received Signal Strength	Уровень мощности принимаемого сигнала
SA	Sub Array	Составной подмассив
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping	Одновременная локализация и построение карты
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio	Отношение сигнал / (шум + помеха)
SP	Specular Point	Рассеиватель
SWM	Spherical Wave Model	Модель сферического фронта волны
TOA	Time of Arrival	Время прихода сигнала
UE	User Equipment	Пользовательское устройство
UM-MIMO	Ultra-Massive MIMO	Многоантенные MIMO системы сверхбольшой размерности
АБГШ	Аддитивный белый гауссовский шум	
АР	Антенная решетка	
ДМ	Дальномерный метод	
ДМВ	Дециметровые волны	
ДММВ	Децимиллиметровые волны	
ДО	Диаграммообразование	
МЛК	Многолучевая компонента	
ММВ	Миллиметровые волны	
НГКР	Нижняя граница Крамера – Рао	
ОМП	Определение местоположения	
РДМ	Разностно-дальномерный метод	
РРВ	Распространение радиоволн	
СМВ	Сантиметровые волны	
ТГц	Терагерцовый диапазон	
УМ	Угломерный метод	

Список источников

1. Фокин Г.А. Комплекс моделей позиционирования устройств в сетях шестого поколения. Часть 1. Обзор методов и постановка задачи. Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 4. С. 73–98. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-4-73-98. EDN:FTOVZJ
2. Chen H., Sardeddeen H., Ballal T., Wymeersch H., Alouini M.-S., Al-Naffouri T.Y. A Tutorial on Terahertz-Band Localization for 6G Communication Systems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2022. Vol. 24. Iss. 3. PP. 1780–1815. DOI:10.1109/COMST.2022.3178209
3. Garcia N., Wymeersch H., Larsson E.G., Haimovich A.M., Coulon M. Direct Localization for Massive MIMO // IEEE Transactions on Signal Processing. 2017. Vol. 65. Iss. 10. PP. 2475–2487. DOI:10.1109/TSP.2017.2666779
4. Shen Y., Win M.Z. Fundamental Limits of Wideband Localization–Part I: A General Framework // IEEE Transactions on Information Theory. 2010. Vol. 56. Iss. 10. PP. 4956–4980. DOI:10.1109/TIT.2010.2060110
5. Shen Y., Wymeersch H., Win M.Z. Fundamental Limits of Wideband Localization. Part II: Cooperative Networks // IEEE Transactions on Information Theory. 2010. Vol. 56. Iss. 10. PP. 4981–5000. DOI:10.1109/TIT.2010.2059720
6. Shahmansoori A., Garcia G.E., Destino G., Seco-Granados G., Wymeersch H. 5G Position and Orientation Estimation through Millimeter Wave MIMO // Proceedings of the Globecom Workshops (GC Wkshps, San Diego, USA, 06–10 December 2015). IEEE, 2015. PP. 1–6. DOI:10.1109/GLOCOMW.2015.7413967
7. Shahmansoori A., Garcia G.E., Destino G., Seco-Granados G., Wymeersch H. Position and Orientation Estimation through Millimeter-Wave MIMO in 5G Systems // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2018. Vol. 17. Iss. 3. PP. 1822–1835. DOI:10.1109/TWC.2017.2785788
8. Abu-Shaban Z., Zhou X., Abhayapala T., Seco-Granados G., Wymeersch H. Error Bounds for Uplink and Downlink 3D Localization in 5G Millimeter Wave Systems // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2018. Vol. 17. Iss. 8. PP. 4939–4954. DOI:10.1109/TWC.2018.2832134
9. Abu-Shaban Z., Wymeersch H., Zhou X., Seco-Granados G., Abhayapala T. Random-Phase Beamforming for Initial Access in Millimeter-Wave Cellular Networks // Proceedings of the Global Communications Conference (GLOBECOM, Washington, USA, 04–08 December 2016). IEEE, 2016. PP. 1–6. DOI:10.1109/GLOCOM.2016.7842197
10. Abu-Shaban Z., Wymeersch H., Abhayapala T., Seco-Granados G. Single-Anchored Two-Way Localization Bounds for 5G mmWave Systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. Vol. 69. Iss. 6. PP. 6388–6400. DOI:10.1109/TVT.2020.2987039
11. Wymeersch H., Denis B. Beyond 5G Wireless Localization with Reconfigurable Intelligent Surfaces // Proceedings of the International Conference on Communications (ICC, Dublin, Ireland, 07–11 June 2020). IEEE, 2020. PP. 1–6. DOI:10.1109/ICC40277.2020.9148744
12. Elzanaty A., Guerra A., Guidi F., Alouini M.-S. Reconfigurable Intelligent Surfaces for Localization: Position and Orientation Error Bounds // IEEE Transactions on Signal Processing. 2021. Vol. 69. PP. 5386–5402. DOI:10.1109/TSP.2021.3101644
13. Elzanaty A., Guerra A., Guidi F., Dardari D., Alouini M.-S. Toward 6G Holographic Localization: Enabling Technologies and Perspectives // IEEE Internet of Things Magazine. 2023. Vol. 6. Iss. 3. PP. 138–143. DOI:10.1109/IOTM.001.2200218
14. Keykhosravi K., Keskin M.F., Seco-Granados G., Wymeersch H. SISO RIS-Enabled Joint 3D Downlink Localization and Synchronization // Proceedings of the International Conference on Communications (Montreal, Canada, 14–23 June 2021). IEEE, 2021. PP. 1–6. DOI:10.1109/ICC42927.2021.9500281
15. Huang C., Hu S., Alexandropoulos G.C., Zappone A., Zappone A., Yuen C., et al. Holographic MIMO Surfaces for 6G Wireless Networks: Opportunities, Challenges, and Trends // IEEE Wireless Communications. 2020. Vol. 27. Iss. 5. PP. 118–125. DOI:10.1109/MWC.001.1900534
16. Basar E., Yildirim I., Kilinc F. Indoor and Outdoor Physical Channel Modeling and Efficient Positioning for Reconfigurable Intelligent Surfaces in mmWave Bands // IEEE Transactions on Communications. 2021. Vol. 69. Iss. 12. PP. 8600–8611. DOI:10.1109/TCOMM.2021.3113954
17. He J., Jiang F., Keykhosravi K., Kokkonen J., Wymeersch H., Juntti M. Beyond 5G RIS mmWave Systems: Where Communication and Localization Meet // IEEE Access. 2022. Vol. 10. PP. 68075–68084. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3186510
18. Wymeersch H. A Fisher Information Analysis of Joint Localization and Synchronization in near Field // Proceedings of the International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops, Dublin, Ireland, 07–11 June 2020). IEEE, 2020. PP. 1–6. DOI:10.1109/ICCWorkshops49005.2020.9145059
19. Nazari M.A., Seco-Granados G., Johannisson P., Wymeersch H. 3D Orientation Estimation with Multiple 5G mmWave Base Stations // Proceedings of the Conference on Communications (Montreal, Canada, 14–23 June 2021). IEEE, 2021. PP. 1–6. DOI:10.1109/ICC42927.2021.9500778
20. Chepuri S.P., Leus G., van der Veen A.-J. Rigid Body Localization Using Sensor Networks // IEEE Transactions on Signal Processing. 2014. Vol. 62. Iss. 18. PP. 4911–4924. DOI:10.1109/TSP.2014.2336621
21. Wen F., Wymeersch H., Peng B., Tay W.P., So H.C., Yang D. A survey on 5G massive MIMO localization // Digital Signal Processing. 2019. Vol. 94. PP. 21–28. DOI:10.1016/j.dsp.2019.05.005
22. Фокин Г.А. Разработка и оценка методов позиционирования приемопередатчиков в системах когнитивного радио 6G // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18. № 6. С. 4–20. DOI:10.36724/2072-8735-2024-18-6-4-20. EDN:KVNDXU
23. Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1986. Vol. 34. Iss. 3. PP. 276–280. DOI:10.1109/TAP.1986.1143830
24. Fortunati S., Grasso R., Gini F., Greco M.S., LePage K. Single snapshot DOA estimation by using compressed sensing // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2014. Vol. 1. Iss. 120. PP. 1–17. DOI:10.1186/1687-6180-2014-120

25. Wan L., Sun Y., Sun L., Ning Z., Rodrigues J.J.P.C. Deep Learning Based Autonomous Vehicle Super Resolution DOA Estimation for Safety Driving // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021. Vol. 22. Iss. 7. PP. 4301–4315. DOI:10.1109/TITS.2020.3009223
26. Dardari D., Chong C.-C., Win M. Threshold-Based Time-of-Arrival Estimators in UWB Dense Multipath Channels // IEEE Transactions on Communications. 2008. Vol. 56. Iss. 8. PP. 1366–1378. DOI:10.1109/TCOMM.2008.050551
27. Giorgetti A., Chiani M. Time-of-Arrival Estimation Based on Information Theoretic Criteria // IEEE Transactions on Signal Processing. 2013. Vol. 61. Iss. 8. PP. 1869–1879. DOI:10.1109/TSP.2013.2239643
28. Jiang F., Ge Y., Zhu M., Wymeersch H. High-dimensional Channel Estimation for Simultaneous Localization and Communications // Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC, Nanjing, China, 29 March – 01 April 2021). IEEE, 2021. PP. 1–6. DOI:10.1109/WCNC49053.2021.9417496
29. Fei Z., Li B., Yang S., Xing C., Chen H., Hanzo L. A Survey of Multi-Objective Optimization in Wireless Sensor Networks: Metrics, Algorithms, and Open Problems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2017. Vol. 19. Iss. 1. PP. 550–586. DOI:10.1109/COMST.2016.2610578
30. Koike-Akino T., Wang P., Pajovic M., Sun H., Orlik P.V. Fingerprinting-Based Indoor Localization with Commercial MMWave WiFi: A Deep Learning Approach // IEEE Access. 2020. Vol. 8. PP. 84879–84892. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2991129
31. Vieira J., Leitinger E., Sarajlic M., Li X., Tufvesson F. Deep convolutional neural networks for massive MIMO fingerprint-based positioning // Proceedings of the 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC, Montreal, Canada, 08–13 October 2017). IEEE, 2017. PP. 1–6. DOI:10.1109/PIMRC.2017.8292280
32. Mateos-Ramos J.M., Song J., Wu Y., Häger C., Keskin M.F., Yajnanarayana V., et al. End-to-End Learning for Integrated Sensing and Communication // Proceedings of the International Conference on Communications (Seoul, Republic of Korea, 16–20 May 2022). IEEE, 2022. PP. 1942–1947. DOI:10.1109/ICC45855.2022.9838308
33. Wu Y., Gustavsson U., Amat A.G.I., Wymeersch H. Low Complexity Joint Impairment Mitigation of I/Q Modulator and PA Using Neural Networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2022. Vol. 40. Iss. 1. PP. 54–64. DOI:10.1109/JSAC.2021.3126024
34. Alzahed A.M., Mikki S.M., Antar Y.M.M. Nonlinear Mutual Coupling Compensation Operator Design Using a Novel Electromagnetic Machine Learning Paradigm // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2019. Vol. 18. Iss. 5. PP. 861–865. DOI:10.1109/LAWP.2019.2903787
35. Wu Y., Song J., Häger C., Gustavsson U., i Amat A.G., Wymeersch H. Symbol-Based Over-the-Air Digital Predistortion Using Reinforcement Learning // Proceedings of the International Conference on Communications (Seoul, Republic of Korea, 16–20 May 2022). IEEE, 2022. PP. 2615–2620. DOI:10.1109/ICC45855.2022.9839091
36. Kase Y., Nishimura T., Ohgane T., Ogawa Y., Kitayama D., Kishiyama Y. DOA Estimation of Two Targets with Deep Learning // Proceedings of the 15th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC, Bremen, Germany, 25–26 October 2018). 2018. PP. 1–5. DOI:10.1109/WPNC.2018.8555814
37. Barthelme A., Utschick W. A Machine Learning Approach to DoA Estimation and Model Order Selection for Antenna Arrays With Subarray Sampling // IEEE Transactions on Signal Processing. 2021. Vol. 69. PP. 3075–3087. DOI:10.1109/TSP.2021.3081047
38. Dvorecki N., Bar-Shalom O., Banin L., Amizur Y. A machine learning approach for Wi-Fi RTT ranging // Proceedings of the International Technical Meeting of The Institute of Navigation (Hyatt Regency Reston Reston, Virginia, USA, 28 – 31 January 2019). 2019. PP. 435–444. DOI:10.33012/2019.16702
39. Wymeersch H., Marano S., Gifford W.M., Win M.Z. A Machine Learning Approach to Ranging Error Mitigation for UWB Localization // IEEE Transactions on Communications. 2012. Vol. 60. Iss. 6. PP. 1719–1728. DOI:10.1109/TCOMM.2012.042712.110035
40. Jiang C., Shen J., Chen S., Chen Y., Liu D., Bo Y. UWB NLOS/LOS Classification Using Deep Learning Method // IEEE Communications Letters. 2020. Vol. 24. Iss. 10. PP. 2226–2230. DOI:10.1109/LCOMM.2020.2999904
41. Guo X., Li L., Ansari N., Liao B. Knowledge Aided Adaptive Localization via Global Fusion Profile // IEEE Internet of Things Journal. 2018. Vol. 5. Iss. 2. PP. 1081–1089. DOI:10.1109/JIOT.2017.2787594
42. Burghal D., Ravi A.T., Rao V., Alghafis A.A., Molisch A.F. A comprehensive survey of machine learning based localization with wireless signals // arXiv:2012.11171. 2020. DOI:10.48550/arXiv.2012.11171
43. Studer C., Medjkouh S., Gonultas E., Goldstein T., Tirkkonen O. Channel Charting: Locating Users Within the Radio Environment Using Channel State Information // IEEE Access. 2018. Vol. 6. PP. 47682–47698. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2866979
44. Фокин Г.А., Владыко А.Г. Позиционирование транспортных средств в сверхплотных сетях радиодоступа V2X/5G с использованием расширенного фильтра Калмана // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 4. С. 45–59. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-45-59. EDN:PYHUMZ
45. Фокин Г.А., Владыко А.Г. Позиционирование транспортных средств с комплексированием дальномерных, угломерных и инерциальных измерений в расширенном фильтре Калмана // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 2. С. 51–67. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-2-51-67. EDN:AIEESO
46. 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
47. Gustafsson F. Particle filter theory and practice with positioning applications // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2010. Vol. 25. Iss. 7. PP. 53–82. DOI:10.1109/MAES.2010.5546308
48. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous localization and Mapping: Part I // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2006. Vol. 13. Iss. 2. PP. 99–110. DOI:10.1109/MRA.2006.1638022

49. Bailey T., Durrant-Whyte H. Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2006. Vol. 13. Iss. 3. PP. 108–117. DOI:10.1109/MRA.2006.1678144
50. Yassin A., Nasser Y., Al-Dubai A.Y., Awad M. MOSAIC: Simultaneous Localization and Environment Mapping Using mmWave Without A-Priori Knowledge // IEEE Access. 2018. Vol. 6. PP. 68932–68947. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2879436
51. Barneto C.B., Riihonen T., Turunen M., Koivisto M., Talvitie J., Valkama M. Radio-based Sensing and Indoor Mapping with Millimeter-Wave 5G NR Signals // Proceedings of the International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS, Tampere, Finland, 02–04 June 2020). 2020. PP. 1–5. DOI:10.1109/ICL-GNSS49876.2020.9115568
52. Фокин Г.А. Процедуры выравнивания лучей устройств 5G NR // Электросвязь. 2022. № 2. С. 26–31. DOI:10.34832/ELSV.2022.27.2.003. EDN:GWPZQH
53. Дворников С.В., Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х., Федоренко И.В. Оценка влияния свойств сигнала PRS LTE на точность позиционирования // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2017. № 4. С. 94–103. EDN:YQWNJ
54. Фокин Г.А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 1. Конфигурация сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 2. С. 48–63. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-48-63. EDN:OEXILA
55. Фокин Г.А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 2. Обработка сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 80–99. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-80-99. EDN:BRJHYG
56. Дворников С.В., Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х., Федоренко И.В. Исследование зависимости значения геометрического фактора снижения точности от топологии пунктов приема // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 2. С. 99–104. EDN:XRZIXB
57. Лазарев В.О., Фокин Г.А. Оценка точности позиционирования источника радиоизлучения разностно-дальномерным и угломерным методами. Часть 1 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 2. С. 88–100. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-2-88-100. EDN:FFMJWI
58. Фокин Г.А., Лазарев В.О. Оценка точности позиционирования источника радиоизлучения разностно-дальномерным и угломерным методами. Часть 2. 2D-моделирование // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 65–78. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-65-78. EDN:RJHISC
59. Фокин Г.А., Лазарев В.О. Оценка точности позиционирования источника радиоизлучения разностно-дальномерным и угломерным методами. Часть 3. 3D-моделирование // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 2. С. 87–102. DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-2-87-102. EDN:FKSYIZ
60. Фокин Г.А. Сетевое позиционирование 5G и вероятностные модели оценки его точности // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 12. С. 4–17. EDN:DQRXIK
61. Фокин Г.А. Комплекс моделей и методов позиционирования устройств в сетях пятого поколения. Дис. ... докт. техн. наук. СПб.: СПбГУТ, 2021. 499 с. EDN:PQMSQX
62. Фокин Г.А. Методика идентификации прямой видимости в радиолиниях сетей мобильной связи 4-го поколения с пространственной обработкой сигналов // Труды Научно-исследовательского института радио. 2013. № 3. С. 78–82. EDN:RVFDCV
63. Фокин Г.А. Имитационное моделирование процесса распространения радиоволн в радиолиниях сетей мобильной связи 4-го поколения с пространственной обработкой сигналов // Труды Научно-исследовательского института радио. 2013. № 3. С. 83–89. EDN:RVFDDF
64. Фокин Г.А. Процедуры позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2021. № 11. С. 2–8. EDN:DEFMNY
65. Faisal A., Sameddeen H., Dahrouj H., Al-Naffouri T.Y., Alouini M.-S. Ultramassive MIMO Systems at Terahertz Bands: Prospects and Challenges // IEEE Vehicular Technology Magazine. 2020. Vol. 15. Iss. 4. PP. 33–42. DOI:10.1109/MVT.2020.3022998
66. Stratidakis G., Boulogeorgos A.-A.A., Alexiou A. A cooperative localization-aided tracking algorithm for THz wireless systems // Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC, Marrakesh, Morocco, 15–18 April 2019). PP. 1–7. IEEE, 2019. DOI:10.1109/WCNC.2019.8885710
67. Chen H., Aghdam S.R., Keskin M.F., Wu Y., Lindberg S., Wolfgang A., et al. MCRB-based Performance Analysis of 6G Localization under Hardware Impairments // Proceedings of the International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops, Seoul, Republic of Korea, 16–20 May 2022). IEEE, 2022. PP. 115–120. DOI:10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814598
68. Фокин Г.А. Модель поиска топологии локальной дальномерной системы позиционирования 5G по заданному геометрическому фактору // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 4(44). С. 27–38. DOI:10.24412/2221-2574-2021-444-27-38. EDN:XHPHAA
69. Фокин Г.А., Кучерявый А.Е. Размещение устройств сверхплотной сети в пространстве. Часть 1. Модели и методы геометрического фактора // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 3. С. 32–59. DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-3-32-59. EDN:PUMZTF
70. Фокин Г.А., Кучерявый А.Е. Размещение устройств сверхплотной сети в пространстве. Часть 2. Поиск по критерию геометрического фактора // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 4. С. 27–37. DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-4-27-37. EDN:YVEMNW
71. Li Y.-N.R., Gao B., Zhang X., Huang K. Beam Management in Millimeter-Wave Communications for 5G and Beyond // IEEE Access. 2020. Vol. 8. PP. 13282–13293. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2963514
72. Alkhateeb A., Nam Y.-H., Rahman M.S., Zhang J., Heath R.W. Initial Beam Association in Millimeter Wave Cellular Systems: Analysis and Design Insights // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2017. Vol. 16. Iss. 5. PP. 2807–2821. DOI:10.1109/TWC.2017.2666806

73. Qi C., Chen K., Dobre O.A., Li G.Y. Hierarchical Codebook-Based Multiuser Beam Training for Millimeter Wave Massive MIMO // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020. Vol. 19. Iss. 12. PP. 8142–8152. DOI:10.1109/TWC.2020.3019523
74. Hu A., He J. Position-Aided Beam Learning for Initial Access in mmWave MIMO Cellular Networks // *IEEE Systems Journal*. 2022. Vol. 16. Iss. 1. PP. 1103–1113. DOI:10.1109/JSYST.2020.3027757
75. Фокин Г.А. Диаграммообразование на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона. Часть 1. Модель двух радиолиний // *Труды учебных заведений связи*. 2023. Т. 9. № 4. С. 44–63. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-44-63. EDN:DIEAKU
76. Фокин Г.А. Диаграммообразование на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона. Часть 2. Модель совокупности радиолиний. Труды учебных заведений связи. Т. 9. № 5. С. 43–64. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-5-43-64. EDN:QPZIOK
77. Han C., Chen Y. Propagation Modeling for Wireless Communications in the Terahertz Band // *IEEE Communications Magazine*. 2018. Vol. 56. Iss. 6. PP. 96–101. DOI:10.1109/MCOM.2018.1700898
78. Garcia N., Wymeersch H., Slock D.T.M. Optimal Precoders for Tracking the AoD and AoA of a mmWave Path // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2018. Vol. 66. Iss. 21. PP. 5718–5729. DOI:10.1109/TSP.2018.2870368
79. Zhou B., Liu A., Lau V. Successive Localization and Beamforming in 5G mmWave MIMO Communication Systems // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2019. Vol. 67. Iss. 6. PP. 1620–1635. DOI:10.1109/TSP.2019.2894789
80. Björnson E., Wymeersch H., Matthiesen B., Popovski P., Sanguinetti L., de Carvalho E. Reconfigurable Intelligent Surfaces: A signal processing perspective with wireless applications // *IEEE Signal Processing Magazine*. 2022. Vol. 39. Iss. 2. PP. 135–158. DOI:10.1109/MSP.2021.3130549
81. Фокин Г.А., Кучерявый А.Е., Горбачева Л.С. Программный модуль исследования зависимости точности позиционирования и ориентации устройств в пространстве от размерности антенной решетки на базовой станции в сверхплотных сетях миллиметрового и терагерцового диапазона. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2023682152 от 12.10.2023. Оpubл. 23.10.2023. EDN:NIDIYO
82. Фокин Г.А., Волгушев Д.Б. Модели пространственной селекции при диаграммообразовании на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2024. Т. 16. № 1. С. 195–216. DOI:10.20537/2076-7633-2024-16-1-195-216. EDN:ENQMBZ

References

1. Fokin G. A Set of Models for Device Positioning in Sixth Generation Networks. Part 1. Methods Survey and Problem Statement. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(4):73–98. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-4-73-98. EDN:FTOVZJ
2. Chen H., Srieddeen H., Ballal T., Wymeersch H., Alouini M.-S., Al-Naffouri T.Y. A Tutorial on Terahertz-Band Localization for 6G Communication Systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022;24(3):1780–1815. DOI:10.1109/COMST.2022.3178209
3. Garcia N., Wymeersch H., Larsson E.G., Haimovich A.M., Coulon M. Direct Localization for Massive MIMO. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2017;65(10):2475–2487. DOI:10.1109/TSP.2017.2666779
4. Shen Y., Win M.Z. Fundamental Limits of Wideband Localization–Part I: A General Framework. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2010;56(10):4956–4980. DOI:10.1109/TIT.2010.2060110
5. Shen Y., Wymeersch H., Win M.Z. Fundamental Limits of Wideband Localization. Part II. Cooperative Networks. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2010;56(10):4981–5000. DOI:10.1109/TIT.2010.2059720
6. Shahmansoori A., Garcia G.E., Destino G., Seco-Granados G., Wymeersch H. 5G Position and Orientation Estimation through Millimeter Wave MIMO. *Proceedings of the Globecom Workshops, GC Wkshps, 06–10 December 2015, San Diego, USA*. IEEE, 2015. p.1–6. DOI:10.1109/GLOCOMW.2015.7413967
7. Shahmansoori A., Garcia G.E., Destino G., Seco-Granados G., Wymeersch H. Position and Orientation Estimation Through Millimeter-Wave MIMO in 5G Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2018;17(3):1822–1835. DOI:10.1109/TWC.2017.2785788
8. Abu-Shaban Z., Zhou X., Abhayapala T., Seco-Granados G., Wymeersch H. Error Bounds for Uplink and Downlink 3D Localization in 5G Millimeter Wave Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2018;17(8):4939–4954. DOI:10.1109/TWC.2018.2832134
9. Abu-Shaban Z., Wymeersch H., Zhou X., Seco-Granados G., Abhayapala T. Random-Phase Beamforming for Initial Access in Millimeter-Wave Cellular Networks. *Proceedings of the Global Communications Conference, GLOBECOM, 04–08 December 2016, Washington, USA*. IEEE; 2016. p.1–6. DOI:10.1109/GLOCOM.2016.7842197
10. Abu-Shaban Z., Wymeersch H., Abhayapala T., Seco-Granados G. Single-Anchored Two-Way Localization Bounds for 5G mmWave Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020;69(6):6388–6400. DOI:10.1109/TVT.2020.2987039
11. Wymeersch H., Denis B. Beyond 5G Wireless Localization with Reconfigurable Intelligent Surfaces. *Proceedings of the International Conference on Communications, ICC, 07–11 June 2020, Dublin, Ireland*. IEEE; 2020. p.1–6. DOI:10.1109/ICC40277.2020.9148744
12. Elzanaty A., Guerra A., Guidi F., Alouini M.-S. Reconfigurable Intelligent Surfaces for Localization: Position and Orientation Error Bounds. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2021;69:5386–5402. DOI:10.1109/TSP.2021.3101644
13. Elzanaty A., Guerra A., Guidi F., Dardari D., Alouini M.-S. Toward 6G Holographic Localization: Enabling Technologies and Perspectives. *IEEE Internet of Things Magazine*. 2023;6(3):138–143. DOI:10.1109/IOTM.001.2200218

14. Keykhosravi K., Keskin M.F., Seco-Granados G., Wymeersch H. SISO RIS-Enabled Joint 3D Downlink Localization and Synchronization. *Proceedings of the International Conference on Communications, 14–23 June 2021, Montreal, Canada*. IEEE; 2021. p.1–6. DOI:10.1109/ICC42927.2021.9500281
15. Huang C., Hu S., Alexandropoulos G.C., Zappone A., Zappone A., Yuen C., et al. Holographic MIMO Surfaces for 6G Wireless Networks: Opportunities, Challenges, and Trends. *IEEE Wireless Communications*. 2020;27(5):118–125. DOI:10.1109/MWC.001.1900534
16. Basar E., Yildirim I., Kilinc F. Indoor and Outdoor Physical Channel Modeling and Efficient Positioning for Reconfigurable Intelligent Surfaces in mmWave Bands. *IEEE Transactions on Communications*. 2021;69(12):8600–8611. DOI:10.1109/TCOMM.2021.3113954
17. He J., Jiang F., Keykhosravi K., Kokkonen J., Wymeersch H., Juntti M. Beyond 5G RIS mmWave Systems: Where Communication and Localization Meet. *IEEE Access*. 2022;10:68075–68084. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3186510
18. Wymeersch H. A Fisher Information Analysis of Joint Localization and Synchronization in near Field. *Proceedings of the International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops, 07–11 June 2020, Dublin, Ireland*. IEEE, 2020. p.1–6. DOI:10.1109/ICCWorkshops49005.2020.9145059
19. Nazari M.A., Seco-Granados G., Johannisson P., Wymeersch H. 3D Orientation Estimation with Multiple 5G mmWave Base Stations. *Proceedings of the International Conference on Communications, 14–23 June 2021 Montreal, Canada*. IEEE; 2021. p.1–6. DOI:10.1109/ICC42927.2021.9500778
20. Chepuri S.P., Leus G., van der Veen A.-J. Rigid Body Localization Using Sensor Networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2014;62(18):4911–4924. DOI:10.1109/TSP.2014.2336621
21. Wen F., Wymeersch H., Peng B., Tay W.P., So H.C., Yang D. A survey on 5G massive MIMO localization. *Digital Signal Processing*. 2019;94:21–28. DOI:10.1016/j.dsp.2019.05.005
22. Fokin G.A. Development and evaluation of transceiver positioning methods in 6G cognitive radio systems. *T-Comm*. 2024;18(6):4–20. (in Russ.) DOI:10.36724/2072-8735-2024-18-6-4-20. EDN:KVNDXU
23. Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1986;34(3):276–280. DOI:10.1109/TAP.1986.1143830
24. Fortunati S., Grasso R., Gini F., Greco M.S., LePage K. Single snapshot DOA estimation by using compressed sensing. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2014;1(120):1–17. DOI:10.1186/1687-6180-2014-120
25. Wan L., Sun Y., Sun L., Ning Z., Rodrigues J.J.P.C. Deep Learning Based Autonomous Vehicle Super Resolution DOA Estimation for Safety Driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021;22(7):4301–4315. DOI:10.1109/TITS.2020.3009223
26. Dardari D., Chong C.-C., Win M. Threshold-Based Time-of-Arrival Estimators in UWB Dense Multipath Channels. *IEEE Transactions on Communications*. 2008;56(8):1366–1378. DOI:10.1109/TCOMM.2008.050551
27. Giorgetti A., Chiani M. Time-of-Arrival Estimation Based on Information Theoretic Criteria. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2013;61(8):1869–1879. DOI:10.1109/TSP.2013.2239643
28. Jiang F., Ge Y., Zhu M., Wymeersch H. High-dimensional Channel Estimation for Simultaneous Localization and Communications. *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference, WCNC, 29 March – 01 April 2021, Nanjing, China*. IEEE; 2021. p.1–6. DOI:10.1109/WCNC49053.2021.9417496
29. Fei Z., Li B., Yang S., Xing C., Chen H., Hanzo L. A Survey of Multi-Objective Optimization in Wireless Sensor Networks: Metrics, Algorithms, and Open Problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017;19(1):550–586. DOI:10.1109/COMST.2016.2610578
30. Koike-Akino T., Wang P., Pajovic M., Sun H., Orlik P.V. Fingerprinting-Based Indoor Localization With Commercial MMWave WiFi: A Deep Learning Approach. *IEEE Access*. 2020;8:84879–84892. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2991129
31. Vieira J., Leitinger E., Sarajlic M., Li X., Tufvesson F. Deep convolutional neural networks for massive MIMO fingerprint-based positioning. *Proceedings of the 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, PIMRC, 08–13 October 2017, Montreal, Canada*. IEEE; 2017. p.1–6. DOI:10.1109/PIMRC.2017.8292280
32. Mateos-Ramos J.M., Song J., Wu Y., Häger C., Keskin M.F., Yajnanarayana V., et al. End-to-End Learning for Integrated Sensing and Communication. *Proceedings of the International Conference on Communications, 16–20 May 2022, Seoul, Republic of Korea*. IEEE; 2022. p.1942–1947. DOI:10.1109/ICC45855.2022.9838308
33. Wu Y., Gustavsson U., Amat A.G.I., Wymeersch H. Low Complexity Joint Impairment Mitigation of I/Q Modulator and PA Using Neural Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2022;40(1):54–64. DOI:10.1109/JSAC.2021.3126024
34. Alzahed A.M., Mikki S.M., Antar Y.M.M. Nonlinear Mutual Coupling Compensation Operator Design Using a Novel Electromagnetic Machine Learning Paradigm. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2019;18(5):861–865. DOI:10.1109/LAWP.2019.2903787
35. Wu Y., Song J., Häger C., Gustavsson U., Graell i Amat A., Wymeersch H. Symbol-Based Over-the-Air Digital Predistortion Using Reinforcement Learning. *Proceedings of the International Conference on Communications, 16–20 May 2022, Seoul, Republic of Korea*. IEEE; 2022. p.2615–2620. DOI:10.1109/ICC45855.2022.9839091
36. Kase Y., Nishimura T., Ohgane T., Ogawa Y., Kitayama D., Kishiyama Y. DOA Estimation of Two Targets with Deep Learning. *Proceedings of the 15th Workshop on Positioning, Navigation and Communications, WPNC, 25–26 October 2018, Bremen, Germany*. 2018. p.1–5. DOI:10.1109/WPNC.2018.8555814
37. Barthelme A., Utschick W. A Machine Learning Approach to DoA Estimation and Model Order Selection for Antenna Arrays With Subarray Sampling. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2021;69:3075–3087. DOI:10.1109/TSP.2021.3081047

38. Dvorecki N., Bar-Shalom O., Banin L., Amizur Y. A machine learning approach for Wi-Fi RTT ranging. *Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 28–31 January 2019, Reston, USA. 2019. p.435–444. DOI:10.33012/2019.16702
39. Wymeersch H., Marano S., Gifford W.M., Win M.Z. A Machine Learning Approach to Ranging Error Mitigation for UWB Localization. *IEEE Transactions on Communications*. 2012;60(6):1719–1728. DOI:10.1109/TCOMM.2012.042712.110035
40. Jiang C., Shen J., Chen S., Chen Y., Liu D., Bo Y. UWB NLOS/LOS Classification Using Deep Learning Method. *IEEE Communications Letters*. 2020;24(10):2226–2230. DOI:10.1109/LCOMM.2020.2999904
41. Guo X., Li L., Ansari N., Liao B. Knowledge Aided Adaptive Localization via Global Fusion Profile. *IEEE Internet of Things Journal*. 2018;5(2):1081–1089. DOI:10.1109/JIOT.2017.2787594
42. Burghal D., Ravi A.T., Rao V., Alghafis A.A., Molisch A.F. A comprehensive survey of machine learning based localization with wireless signals. *arXiv:2012.11171*. 2020. DOI:10.48550/arXiv.2012.11171
43. Studer C., Medjkouh S., Gonultas E., Goldstein T., Tirkkonen O. Channel Charting: Locating Users within the Radio Environment Using Channel State Information. *IEEE Access*. 2018;6:47682–47698. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2866979
44. Fokin G., Vladko A. The Vehicles Positioning in Ultra-Dense 5G/V2X Radio Access Networks Using the Extended Kalman Filter. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2020;6(4):45–59. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-45-59. EDN:PYHUMZ
45. Fokin G., Vladko A. Vehicles Positioning with the Fusion of Time of Arrival, Angle of Arrival and Inertial Measurements in the Extended Kalman Filter. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2021;7(2):51–67. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-2-51-67. EDN:AIEESO
46. Kireev A., Fokin G. Accuracy Evaluation of Local Positioning by Radiomap Building and Inertial Navigation System. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2017;3(4):54–62. (in Russ.) EDN:YMIHOI
47. Gustafsson F. Particle filter theory and practice with positioning applications. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2010;25(7):53–82. DOI:10.1109/MAES.2010.5546308
48. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous localization and mapping: part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2006;13(2):99–110. DOI:10.1109/MRA.2006.1638022
49. Bailey T., Durrant-Whyte H. Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2006;13(3):108–117. DOI:10.1109/MRA.2006.1678144
50. Yassin A., Nasser Y., Al-Dubai A.Y., Awad M. MOSAIC: Simultaneous Localization and Environment Mapping Using mmWave Without A-Priori Knowledge. *IEEE Access*. 2018;6:68932–68947. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2879436
51. Barneto C.B., Riihonen T., Turunen M., Koivisto M., Talvitie J., Valkama M. Radio-based Sensing and Indoor Mapping with Millimeter-Wave 5G NR Signals. *Proceedings of the International Conference on Localization and GNSS, ICL-GNSS, 02–04 June 2020, Tampere, Finland*. 2020. p.1–5. DOI:10.1109/ICL-GNSS49876.2020.9115568
52. Fokin G.A. Beam alignment procedures for 5G NR devices. *Elektrosvyaz*. 2022;2:26–31. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2022.27.2.003. EDN:GWPZQH
53. Dvornikov S.V., Fokin G.A., Al-Odhari A.Kh., Fedorenko I.V. Assessing the influence of PRS LTE signal properties on positioning accuracy. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. 2017;4:94–103. (in Russ.) EDN:YQWNLJ
54. Fokin G. Model of 5G NR Precision Metro Network Positioning Technology. Part 1. Configuration of PRS Signals. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2022;8(2):48–63. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-48-63. EDN:OEXILA
55. Fokin G.A. Model of 5G NR Precision Metro Network Positioning Technology. Part 2. PRS Signal Processing. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2022;8(3):80–99. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-80-99 EDN:BRJHYG
56. Dvornikov S.V., Fokin G.A., Al-Odhari A.Kh., Fedorenko I.V. Study of the dependence of the value of the geometric factor of reducing accuracy on the topology of receiving points. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. 2018;2:99–104. (in Russ.) EDN:XRZIXB
57. Lazarev V., Fokin G. Positioning Accuracy Evaluation of Radio Emission Sources Using Time Difference of Arrival and Angle of Arrival Methods. Part 1. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(2):88–100. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-2-88-100. EDN:FFMJWI
58. Fokin G., Lazarev V. Positioning Accuracy Evaluation of Radio Emission Sources Using Time Difference of Arrival and Angle of Arrival Methods. Part 2. 2D-Simulation. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(4):65–78. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-65-78. EDN:RJHISC
59. Fokin G., Lazarev V. Positioning Accuracy Evaluation of Radio Emission Sources Using Time Difference of Arrival and Angle of Arrival Methods. Part 3. 3D-Simulation. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2020;6(2):87–102. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-2-87-102. EDN:FKSYIZ
60. Fokin G.A. 5G network positioning and probabilistic models for assessing its accuracy. *T-Comm*. 2020;14(12):4–17. (in Russ.) EDN:DQRXIK
61. Fokin G.A. *A Set of Models and Methods for Positioning Devices in Fifth-Generation Networks*. D.Sc Thesis. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2021. 499 p. (in Russ.) EDN:PQMSQX
62. Fokin G.A. Methodology for identifying line of sight in radio links of 4th generation mobile communication networks with spatial signal processing. *Proceedings of the Radio Research Institute*. 2013;3:78–82. (in Russ.) EDN:RVFDCV
63. Fokin G.A. Simulation modeling of the process of radio wave propagation in radio links of 4th generation mobile communication networks with spatial signal processing. *Proceedings of the Radio Research Institute*. 2013;3:83–89. (in Russ.) EDN:RVFDDF
64. Fokin G.A. Positioning procedures in 5G networks. *Vestnik sviazy*. 2021;11:2–8. (in Russ.) EDN:DEFMNY
65. Faisal A., Sameddeen H., Dahrouj H., Al-Naffouri T.Y., Alouini M.-S. Ultramassive MIMO Systems at Terahertz Bands: Prospects and Challenges. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2020;15(4):33–42. DOI:10.1109/MVT.2020.3022998

66. Stratidakis G., Boulogeorgos A.-A.A., Alexiou A. A cooperative localization-aided tracking algorithm for THz wireless systems. *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference, WCNC, 15–18 April 2019, Marrakesh, Morocco*. IEEE; 2019. p.1–7. DOI:10.1109/WCNC.2019.8885710
67. Chen H., Aghdam S.R., Keskin M.F., Wu Y., Lindberg S., Wolfgang A., et al. MCRB-based Performance Analysis of 6G Localization under Hardware Impairments. *Proceedings of the International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops, 16–20 May 2022, Seoul, Republic of Korea*. IEEE; 2022. p.115–120. DOI:10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814598
68. Fokin G.F. Model for searching the topology of range-based local 5G positioning system for a given geometric factor. *Radio Engineering and Telecommunication Systems*. 2021;4(44):27–38. (in Russ.) DOI:10.24412/2221-2574-2021-444-27-38. EDN:XHPHAA
69. Fokin G., Kucheryavy A. Deployment of ultra dense network devices in space. Part 1. Models and methods of geometric factor. *Telecom IT*. 2022;10(3):32–59. (in Russ.) DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-3-32-59. EDN:PUMZTF
70. Fokin G., Kucheryavy A. Deployment of Ultra Dense Network Devices in Space. Part 2. Search Using Geometric Factor. *Telecom IT*. 2022;10(4):27–37. (in Russ.) DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-4-27-37. EDN:YVEMNW
71. Li Y.-N.R., Gao B., Zhang X., Huang K. Beam Management in Millimeter-Wave Communications for 5G and Beyond. *IEEE Access*. 2020;8:13282–13293. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2963514
72. Alkhateeb A., Nam Y.-H., Rahman M.S., Zhang J., Heath R.W. Initial Beam Association in Millimeter Wave Cellular Systems: Analysis and Design Insights. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2017;16(5):2807–2821. DOI:10.1109/TWC.2017.2666806
73. Qi C., Chen K., Dobre O.A., Li G.Y. Hierarchical Codebook-Based Multiuser Beam Training for Millimeter Wave Massive MIMO. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020;19(12):8142–8152. DOI:10.1109/TWC.2020.3019523
74. Hu A., He J. Position-Aided Beam Learning for Initial Access in mmWave MIMO Cellular Networks. *IEEE Systems Journal*. 2022;16(1):1103–1113. DOI:10.1109/JSYST.2020.3027757
75. Fokin G. Location Aware Beamforming in Millimeter-Wave Band Ultra-Dense Radio Access Networks. Part 1. Model of Two Links. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2023;9(4):44–63. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-44-63. EDN:DIEAKU
76. Fokin G. Location Aware Beamforming in Millimeter-Wave Band Ultra-Dense Radio Access Networks. Part 2. Model of a Set of Radio Links. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2023;9(5):43–64. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-5-43-64. EDN:QPZIOK
77. Han C., Chen Y. Propagation Modeling for Wireless Communications in the Terahertz Band. *IEEE Communications Magazine*. 2018;56(6):96–101. DOI:10.1109/MCOM.2018.1700898
78. Garcia N., Wymeersch H., Slock D.T.M. Optimal Precoders for Tracking the AoD and AoA of a mmWave Path. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2018;66(21):5718–5729. DOI:10.1109/TSP.2018.2870368
79. Zhou B., Liu A., Lau V. Successive Localization and Beamforming in 5G mmWave MIMO Communication Systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2019;67(6):1620–1635. DOI:10.1109/TSP.2019.2894789
80. Björnson E., Wymeersch H., Matthiesen B., Popovski P., Sanguinetti L., de Carvalho E. Reconfigurable Intelligent Surfaces: A signal processing perspective with wireless applications. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2022;39(2):135–158. DOI:10.1109/MSP.2021.3130549
81. Fokin G.A., Kucheryavy A.E., Gorbacheva L.S. *Software Module for Studying the Dependence of the Accuracy of Positioning and Orientation of Devices in Space on the Dimension of the Antenna Array at the Base Station in Ultra-Dense Networks of the Millimeter and Terahertz Range*. Patent RU no. 2023682152, 12.10.2023. (in Russ.) EDN:NIDIYO
82. Fokin G.A., Volgushev D.B. Models of spatial selection in beamforming based on positioning in ultra-dense millimeter-wave radio access networks. *Computer Research and Modeling*. 2024;16(1):195–216. DOI:10.20537/2076-7633-2024-16-1-195-216. EDN:ENQMBZ

Статья поступила в редакцию 10.09.2024; одобрена после рецензирования 20.10.2024; принята к публикации 22.10.2024.

The article was submitted 10.09.2024; approved after reviewing 20.10.2024; accepted for publication 22.10.2024.

Информация об авторе:

ФОКИН
Григорий Алексеевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиосвязи и вещания
Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0002-5358-1895>

Автор сообщает об отсутствии конфликтов интересов.

The author declares no conflicts of interests.