

Позиционирование транспортных средств в сверхплотных сетях радиодоступа V2X/5G с использованием расширенного фильтра Калмана

Г.А. Фокин^{1*}, А.Г. Владыко¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: grihafokin@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 30.10.2020

Принята к публикации 19.11.2020

Ссылка для цитирования: 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

Аннотация: Настоящая работа посвящена исследованию математических моделей позиционирования транспортных средств в сверхплотных сетях радиодоступа V2X/5G с использованием расширенного фильтра Калмана. На основе исследования вероятности наличия прямой видимости в условиях сверхплотного распределения опорных станций радиодоступа и транспортных средств, а также существующих математических моделей-прототипов позиционирования, разработана новая имитационная модель построения траектории транспортного средства для оценки соответствия требованиям по точности оценки координат на примере сценария приоритетного проезда перекрестков. В имитационной модели реализованы процедуры сбора первичных угломерных и дальномерных измерений опорными станциями, полученными от транспортного средства, для последующей вторичной обработки с использованием расширенного фильтра Калмана, в результате чего в реальном времени строится траектория движения транспортного средства. В отличие от существующих моделей-прототипов, разработанная в настоящей работе имитационная модель позволяет производить оценку соответствия заданным требованиям и другим спецификациям в зависимости от текущих условий наличия прямой видимости, а также точности сбора первичных угломерных измерений, определяемых установленной на опорном устройстве антенной решеткой. Результаты имитационного моделирования согласуются с известными оценками моделей-прототипов и подтверждают возможность достижения точности до 1 м для сценария управления дорожным движением при погрешности определения угла прихода сигнала в 2°.

Ключевые слова: позиционирование, сверхплотные сети 5G, vehicle to everything, дальномерные и угломерные измерения, расширенный фильтр Калмана.

1. Введение

Вопросы позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа (СРД) 5G являются актуальным направлением исследований на очередном этапе эволюции при переходе к экосистеме пятого поколения, в которой, помимо инфокоммуникационных услуг, реализуются также и новые услуги геолокации [1, 2].

Значительный вклад в исследование вопросов позиционирования подвижных устройств и транспортных средств в сетях 5G внесла исследовательская группа университета Тампере [3], результаты которой отражены в работах [4–9]. Нарботанный группой опыт по отслеживанию траекторий по-

движных и высокоподвижных устройств, в том числе в сверхплотных сетях радиодоступа 5G с использованием расширенного фильтра Калмана (РФК), представляет определенный интерес для перспективных интеллектуальных транспортных систем с учетом специфики построения и функционирования СРД 5G.

Новой особенностью построения и функционирования СРД 5G применительно к интеллектуальным транспортным системам является повышение плотности *опорных устройств радиодоступа* – RSU (аббр. от англ. Roadside Unit) – дорожной инфраструктуры для интеллектуальных транспортных систем, что, помимо увеличения удельной

пропускной способности на единицу площади, способствует практической реализации технологий высокоточного сетевого позиционирования *пользовательских устройств бортового оборудования транспортных средств* – VUE (аббр. от англ. Vehicular User Equipment). Уплотнение инфраструктуры RSU дает основания полагать, что осведомленность о местоположении транспортных средств VUE станет присущей особенностью СРД V2X/5G, причем решение задачи сетевой геолокации станет возможным, в том числе, в условиях отсутствия приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

Следствием сверхплотного территориального и/или пространственного расположения опорных и пользовательских устройств является высокая вероятность наличия прямой видимости – LOS (аббр. от англ. Line of Sight) – между пользовательским VUE и несколькими опорными устройствами RSU. Условия LOS способствуют сбору первичных дальномерных (ДМ) – TOA (аббр. от англ. Time of Arrival) – и угломерных (УМ) – AOA/DOA (аббр. от англ. Angle/Direction of Arrival) – измерений, полученных без переотражений. При этом есть основания ожидать повышенной точности сбора первичных измерений в СРД 5G по сравнению с СРД предыдущих поколений: точность дальномерных измерений TOA может быть выше вследствие более широких используемых полос частот миллиметрового диапазона (mmWave), а точность угломерных измерений AOA может быть увеличена за счет многоэлементных антенных систем *mass ive* – MIMO (аббр. от англ. Multiple Input Multiple Output) [1, 2].

Для сбора первичных измерений в СРД может использоваться как канал «вниз» – DL (аббр. от англ. Downlink) – от опорного к пользовательскому устройству (RSU → VUE), так и канал «вверх» от пользовательского к опорному устройству (VUE → RSU). После сбора первичных измерений выполняется их обработка, в результате которой с использованием некоторого вычислительного алгоритма и знания координат опорных устройств RSU осуществляется вычисление координат пользовательского устройства VUE. В зависимости от того, где производятся вычисления, различают позиционирование с обработкой в пользовательском устройстве и в сети опорных устройств.

Предпочтительным вариантом позиционирования в СРД 5G является обработка в сети опорных устройств; первичные измерения при этом собираются базовыми опорными устройствами радиодоступа RSU в канале UL по транслируемым пользовательскими устройствами VUE сигналам; это могут быть не только выделенные сигналы позиционирования, как PRS (аббр. от англ. Positioning Reference Signals) в сетях LTE (аббр. от англ. Long-Term Evolution), но и другие служебные сигналы, например, для оценки канальной матрицы MIMO;

данный подход позволяет осуществлять определение местоположения в фоновом режиме работы VUE и, таким образом, снижать *энергопотребление* VUE на два порядка по сравнению с ГНСС – GNSS (аббр. от англ. Global Navigation Satellite System) [5].

Одним из направлений исследований высокоточного сетевого позиционирования устройств в СРД 5G является использование подхода, основанного на комплексировании первичных угломерных DOA и дальномерных TOA измерений с последующей их вторичной обработкой РФК – EKF (аббр. от англ. Extended Kalman Filter) [4–9].

Известным препятствием для использования дальномерных измерений в сценариях сетевого позиционирования является необходимость синхронизации передатчика и приемника первичных измерений TOA. Если синхронизация опорных дорожных устройств радиодоступа RSU, являющихся пунктами приема первичных измерений, может быть реализована с определенной погрешностью на практике, то синхронизация опорных RSU и пользовательских бортовых устройств транспортных средств VUE затруднительна, поэтому актуальной является задача позиционирования и совместной синхронизации передатчика первичных измерений (пользовательского устройства VUE) и приемника первичных измерений (опорного устройства RSU).

Для использования ДМ-измерений и предварительной синхронизации опорных устройств RSU, как пунктов приема сигналов TOA, и подвижных пользовательских устройств VUE, как источников сигналов TOA, в работах [4–9] исследуются вопросы совместной синхронизации и позиционирования методом DOA/TOA EKF. Анализ работ [5–7] позволяет сделать вывод о возможности одновременной совместной синхронизации опорных RSU и пользовательских устройств VUE и их позиционирования с использованием всего пары опорных станций RSU, что представляет определенный интерес для позиционирования в сценариях управления дорожным движением. Для подвижных пользовательских устройств целесообразно вместе с оценкой координат вычислять их траектории движения; в работах [5–7] для решения указанной задачи предлагается модель РФК/EKF.

Одним из перспективных приложений отслеживания траекторий подвижных и высокоподвижных устройств интеллектуальных транспортных систем в экосистеме 5G являются системы обмена данными между транспортными средствами, элементами дорожной инфраструктуры и другими участниками движения – V2X (аббр. от англ. Vehicle to Everything Communications), которые должны повысить уровень безопасности для водителей, пассажиров и пешеходов, снизить расход топлива и затраты времени на поездки.

Сети транспортных средств V2X появились как новый тип автомобильной связи, включающий в себя связь: между транспортными средствами – V2V (аббр. от англ. Vehicle-to-Vehicle), между транспортными средствами и придорожной инфраструктурой – V2I (аббр. от англ. Vehicle-to-Infrastructure), между транспортными средствами и пешеходами – V2P (аббр. от англ. Vehicle-to-Pedestrian), между транспортными средствами и сетью – V2N (аббр. от англ. Vehicle-to-Network) и пр. [10]. Определение местоположения транспортных средств в сетях V2X представляет собой сложную задачу из-за широкого диапазона требований, включая высокую точность и надежность, сверхмалую задержку и экономичность [11].

Повышенные требования к точности определения местоположения включают в себя, помимо непосредственно точности оценки координат, оперативность получения, надежность и доступность данных искомого местоположения. Одним из примеров использования определения местоположения в СРД V2X/5G является предотвращение столкновений транспортных средств: каждое транспортное средство должно «знать» свое местоположение и местоположение соседних автомобилей, а также ожидаемые пути их передвижения для предупреждения столкновений. Критически важное значение в данном случае приобретают V2X-приложения для предупреждения о риске столкновения на перекрестке – ICRW (аббр. от англ. Intersection Collision Risk Warning) [12], а также другие V2X-приложения, связанные с необходимостью использования высокоточной навигации, например, такие, как приоритетный проезд перекрестков – TSP (аббр. от англ. Transit Signal Priority) [13] – и взимание платы за проезд транспортных средств – RUC (аббр. от англ. Road-User Charging) [14].

В настоящей работе выполняется оценка соответствия требований к позиционированию VUE в приложениях организации приоритетного проезда перекрестков [15]; TSP-Система реализуется посредством протоколов связи V2X. В общем случае радиосвязь организуется между устройствами VUE на транспортных средствах и устройствами RSU на светофорных контроллерах перекрестков. Связь осуществляется по определенной схеме для предоставления приоритета: транспортные средства отправляют запросы к перекрестку, к которому они приближаются или который они пересекают в соответствии с разработанным алгоритмом. После этого RSU принимает решение о возможностях предоставления приоритетного проезда или состоянии перекрестка (информацию о будущем зеленом свете светофора). Принимаемые решения основаны на данных о текущем местоположении транспортных средств с приоритетом. Для реализации данного сценария предъявляются следующие требования к позиционированию VUE:

частота выдачи местоположения не менее 5 Гц; погрешность определения местоположения не хуже 1 м; погрешность определения курса не хуже 1 град.; время готовности к работе не более 30 с; допустимая скорость транспортного средства не хуже 150 км/ч (≈ 42 м/с).

Целью настоящей работы является разработка имитационной модели для верификации требований к точности позиционирования транспортных средств в сетях V2X/5G. Для достижения поставленной цели далее решаются следующие частные задачи. В разделе 2 представлен анализ математической модели позиционирования подвижных устройств с использованием РФК по материалам [5]. В разделе 3 формализована имитационная модель позиционирования транспортных средств с использованием РФК для сценария управления на примере системы приоритетного проезда перекрестков. Раздел 4 содержит выводы и направления дальнейших исследований.

2. Математическая модель позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа V2X/5G

2.1. Постановка задачи

Рассмотрим задачу совместной синхронизации RSU-VUE и оценки координат VUE комплексированием дальномерных (TOA) и угломерных (AOA) первичных измерений путем учета временного рассогласования в расширенном фильтре Калмана EKF по материалам [5]; результирующий алгоритм DOA/TOA EKF должен решать задачу оценки координат VUE и синхронизации с RSU в реальном времени. Будем полагать далее, что каждая опорная станция RSU оборудована антенной решеткой с возможностью определения направления прихода сигнала DOA. Для случая на плоскости обозначим через $\mathbf{x}_{\text{RSU}_k} = (x_k, y_k)^T$ известные координаты RSU_k , а через $\mathbf{x}_{\text{VUE}} = (x[n], y[n])^T$ – вектор истинных координат пользовательского устройства VUE на транспортном средстве в дискретный момент времени n , если $n = 1, \dots, N$, где N – общее количество дискретных моментов времени сбора первичных измерений (число точек в оцениваемой траектории движения VUE). Также допустим, что опорные станции RSU синхронизированы между собой; точность временной синхронизации должна составлять порядка 1–4 нс и не превышать погрешность дальномерных измерений TOA, что соответствует 0,3–1,2 м для высокоточного позиционирования в сверхплотных сетях 5G. Допустим, VUE периодически излучают некоторые сигналы маяка в канале «вверх» UL, которые используются для оценки состояния канала – CSI (аббр. от англ. Channel State Information) – в опорной станции RSU, например, для оценки канальной матрицы MIMO. Получив сигналы маяка от VUE, опорная станция RSU устанавливает признак LOS/NLOS одним из известных способов. В случае приема сигнала в

условиях наличия прямой видимости RSU_k выполняет первичные измерения времени и угла прихода сигнала маяка DOA/TOA. После сбора первичных измерений на всех опорных пунктах осуществляется их вторичная обработка – оценка координат VUE с использованием алгоритма DOA/TOA EKF: $\hat{\mathbf{x}}_{VUE} = (\hat{x}[n], \hat{y}[n])^T$.

2.2. Модель временного сдвига опорного и подвижного устройств

Формализуем математическую модель рассинхронизации/расстройки (временного сдвига) опорного и подвижного устройств RSU-VUE. Временной сдвиг $\rho[n]$ является переменной по дискретному времени n величиной вследствие нестабильности опорных генераторов устройств VUE; на интервале времени сбора первичных измерений T временной сдвиг в дискретный момент времени n может быть представлен рекурсивным выражением [5]:

$$\rho[n] = \rho[n-1] + \alpha[n]T, \quad (1)$$

где $\alpha[n]$ – фазовый сдвиг (временной набег) между опорным и подвижным устройствами RSU-VUE (фазовый сдвиг синхронизирующих импульсов, или расфазировка синхросигналов, характеризующая скорость изменения временного сдвига). Иногда на интервале времени сбора первичных измерений T фазовый сдвиг принимают постоянным, однако измерения показывают, что он меняется со временем на значительном временном интервале. Для учета временной зависимости временной набег $\alpha[n]$ представляют авторегрессионной моделью – AR (аббр. от англ. Autoregressive Model); AR – модель временных рядов, в которой значения временного ряда в данный момент линейно зависят от предыдущих значений этого же ряда. Временной набег $\alpha[n]$ характеризует скорость изменения временного сдвига $\rho[n]$ и определяется рекурсивным выражением [5]:

$$\alpha[n] = \beta\alpha[n-1] + \eta[n], \quad (2)$$

где β – постоянный параметр; $\eta[n] \sim N(0, \sigma_\eta^2)$ – аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ) с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_η . В имитационной модели параметры рассинхронизации устройств и опорных станций инициализируются следующим образом: начальная расстройка $\rho[0] = 20$ мкс; начальная скорость изменения расстройки $\alpha[0] = 25$ мкс/мкс; СКО $\sigma_\eta = 10$ мкс; интервал времени сбора первичных измерений T вместе со скоростью движения транспортного средства непосредственно влияет на точность позиционирования: для 10 км/ч интервал можно принять равным $T = 0,1$ с; для получения требуемой точности позиционирования высокоподвижных транспортных средств интервал измерений следует уменьшать пропорционально увеличению скорости движения. В [16] показано,

что для моделирования расширенного фильтра Калмана EKF в (2) справедливо допущение $\beta = 1$; из [5–7] также следует, что РФК DOA/TOA EKF оказывается слабо чувствительным к разнице между оценкой $\hat{\beta}$ и самим параметром β . Далее формализуем алгоритм совместной обработки DOA/TOA EKF и затем оценим порядок инициализации фильтра EKF.

2.3. Определение местоположения и временного сдвига с РФК

Фильтр EKF является нелинейным расширением популярного фильтра Калмана, которое итеративно оценивает состояние динамической системы. Рассмотрим итеративные процедуры EKF. Совместной оценке для подвижного объекта в дискретный момент времени n подлежат: координаты VUE $\mathbf{x}_{VUE} = (x[n], y[n])^T$, скорость движения по координатам $\mathbf{v}_{VUE} = (v_x[n], v_y[n])^T$, временной $\rho[n]$ и фазовый $\alpha[n]$ сдвиги. Таким образом, вектор состояния РФК в дискретный момент времени n , при $n = 1, \dots, N$, определяется выражением:

$$\mathbf{s}[n] = (x[n], y[n], v_x[n], v_y[n], \rho[n], \alpha[n])^T, \quad (3)$$

$$n = 1, \dots, N.$$

Вектор состояния на очередном этапе итерации в РФК определяется как [5]:

$$\mathbf{s}[n] = \mathbf{F}\mathbf{s}[n-1] + \mathbf{w}[n], \quad (4)$$

где $\mathbf{w}[n] \sim N(0, \mathbf{Q})$, $\mathbf{Q} = \text{diag}[0, 0, \sigma_v^2, \sigma_v^2, 0, \sigma_\eta^2]$, а матрица процесса, описывающая модель изменения состояния с течением времени, определяется выражением [5]:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_2 & T \cdot \mathbf{I}_2 & \mathbf{0}_2 \\ \mathbf{0}_2 & \mathbf{I}_2 & \mathbf{0}_2 \\ \mathbf{0}_2 & \mathbf{0}_2 & \mathbf{F}_c \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где составные матрицы размерности $\mathbb{R}^{2 \times 2}$ определяются выражениями:

$$\mathbf{I}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{0}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{F}_c = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & \beta \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Вектор состояния РФК $\mathbf{s}[n]$ в дискретный момент времени n состоит из двух составляющих. С одной стороны, есть составляющая, характеризующая оценку траектории по координатам и скорости движения. С другой стороны, есть составляющая, характеризующая рассинхронизацию устройств VUE и опорных станций RSU параметрами временного $\rho[n]$ (1) и фазового сдвига $\alpha[n]$ (2).

Формализуем процедуру сбора первичных измерений для РФК согласно [5]. Обозначим через $L[n]$ число опорных станций RSU в дискретный момент времени n , находящихся в условиях прямой видимости с пользовательским устройством VUE, тогда множество $l = \{l_1, l_2, \dots, l_{L[n]}\}$ содержит индексы этих опорных LOS-станций RSU в дискретный момент времени n . На каждой опорной станции RSU_k $k \in l$

выражение для процедуры сбора первичных измерений DOA $y_{\varphi_k}[n]$ содержит угол прихода сигнала $\varphi_k[n]$; выражение для процедуры сбора первичных измерений TOA $y_{\tau_k}[n]$ содержит время прихода сигнала TOA $\tau_k[n]$:

$$y_{\varphi_k}[n] = \varphi_k[n] + \delta\varphi_k[n], \quad (7)$$

$$y_{\tau_k}[n] = \tau_k[n] + \delta\tau_k[n], \quad (8)$$

где $\delta\varphi_k[n] \sim N(0, \sigma_{\text{DOA}}^2)$ и $\delta\tau_k[n] \sim N(0, \sigma_{\text{DOA}}^2)$ – ошибки первичных УМ и ДМ-измерений, соответственно; $\sigma_{\text{DOA}} = 50$ нс – СКО первичных ДМ-измерений; $\sigma_{\text{DOA}} = 2$ – СКО первичных УМ-измерений. Вектор первичных измерений \mathbf{y}_k равен:

$$\mathbf{y}_k[n] = (y_{\varphi_k}[n], y_{\tau_k}[n])^T = \mathbf{h}_k(\mathbf{s}[n]) + \mathbf{u}[n], \quad (9)$$

где вектор ошибок измерений определяется выражением:

$$\mathbf{u}_k = [\delta\varphi_k, \delta\tau_k]^T, \quad (10)$$

и имеет ковариационную матрицу:

$$\mathbf{R}_k = E[\mathbf{u}_k, \mathbf{u}_k^T]^T, \quad (11)$$

а векторная функция $\mathbf{h}_k(\mathbf{s}[n])$ определяется выражением:

$$\mathbf{h}_k(\mathbf{s}[n]) = [h_{k,1}(\mathbf{s}[n]), h_{k,2}(\mathbf{s}[n])]^T. \quad (12)$$

Векторная функция $\mathbf{h}_k(\mathbf{s}[n])$ преобразует размерность $\mathbb{R}^6 \rightarrow \mathbb{R}^2$ вектора состояния $\mathbf{s}[n]$ РФК в дискретный момент времени n и связывает вектор измерений \mathbf{y}_k с состоянием устройства VUE нелинейными соотношениями:

$$h_{k,1}(\mathbf{s}[n]) = \tan^{-1}(\Delta y_k[n]/\Delta x_k[n]), \quad (13)$$

$$h_{k,2}(\mathbf{s}[n]) = d_k[n]/c + \rho[n], \quad (14)$$

$$\Delta x_k[n] = x[n] - x_k; \quad \Delta y_k[n] = y[n] - y_k, \quad (15)$$

$$d_k[n] = \sqrt{\Delta^2 x_k[n] + \Delta^2 y_k[n]}, \quad (16)$$

где c – скорость света; $\mathbf{x}_{\text{VUE}} = (x[n], y[n])^T$ – вектор истинных координат устройства VUE в дискретный момент времени n ; вектор координат стационарной опорной станции RSU_k $\mathbf{x}_{\text{RSU}_k} = (x_k, y_k)^T$; $d_k[n]$ – расстояние между VUE и опорной станцией RSU_k в дискретный момент времени n (рисунок 1).

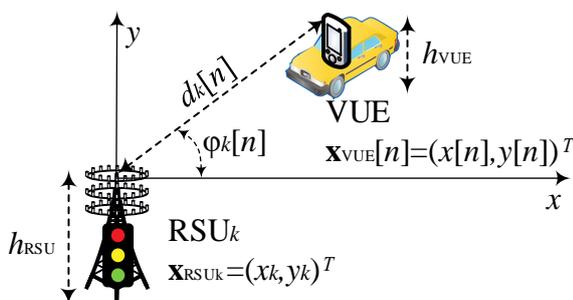


Рис. 1. Вычисление параметров угла и расстояния между RSU_k и VUE

Fig. 1. Calculating the Angle and Distance Between RSU_k and VUE

Таким образом, полное выражение сбора первичных измерений \mathbf{y}_k в дискретный момент времени n от всех $L[n]$ RSU , находящихся в условиях прямой видимости, можно записать как вектор размера $\mathbb{R}^{L[n] \times 1}$:

$$\mathbf{y}[n] = \mathbf{h}(\mathbf{s}[n]) + \mathbf{u}[n], \quad (17)$$

где

$$\mathbf{y}[n] = [y_1^T, y_2^T, \dots, y_{L[n]}^T]^T; \quad (18)$$

$$\mathbf{h} = [\mathbf{h}_1^T, \mathbf{h}_2^T, \dots, \mathbf{h}_{L[n]}^T]^T. \quad (19)$$

Вектор ошибок $\mathbf{u} \sim N(0, \mathbf{R})$ имеет нормальное распределение с диагональной матрицей ковариаций размера $\mathbb{R}^{L[n] \times L[n]}$:

$$\mathbf{R} = \text{blkdiag}(\mathbf{R}_{l_1}, \mathbf{R}_{l_2}, \dots, \mathbf{R}_{l_{L[n]}}). \quad (20)$$

Формализуем процедуру вторичной обработки первичных измерений в РФК. Обозначим через $\hat{\mathbf{s}}^- [n]$ априорную оценку состояния, т. е. оценку, полученную по измерениям $y_{\varphi_k}[n]$ и $y_{\tau_k}[n]$ до момента дискретного времени n , и не включающую измерения $\mathbf{y}[n]$; обозначим через $\hat{\mathbf{s}}^+ [n]$ апостериорную оценку состояния, т. е. оценку, полученную по измерениям, включая измерения $\mathbf{y}[n]$. Используя введенные обозначения, можно записать априорную оценку состояния и соответствующую матрицу ковариации в дискретный момент времени n :

$$\hat{\mathbf{s}}^- [n] = \mathbf{F}\hat{\mathbf{s}}^+ [n-1]; \quad (21)$$

$$\mathbf{P}^- [n] = \mathbf{F}\mathbf{P}^+ [n-1]\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}[n]. \quad (22)$$

Апостериорная оценка состояния и соответствующая матрица ковариации в дискретный момент времени n определяются выражениями:

$$\mathbf{K}[n] = \mathbf{P}^- [n]\mathbf{H}^T [n](\mathbf{H}[n]\mathbf{P}^- [n]\mathbf{H}^T [n] + \mathbf{R}[n])^{-1}; \quad (23)$$

$$\hat{\mathbf{s}}^+ [n] = \hat{\mathbf{s}}^- [n] + \mathbf{K}[n](\mathbf{y}[n] - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{s}}^- [n])); \quad (24)$$

$$\mathbf{P}^+ [n] = (\mathbf{I} - \mathbf{K}[n]\mathbf{H}[n])\mathbf{P}^- [n]. \quad (25)$$

В выражениях (23) и (25) используется матрица Якоби $\mathbf{H} = \partial \mathbf{h}[n]/\partial \mathbf{s}[n]$, вычисленная в состоянии $\mathbf{s}[n]$. Частные производные для алгоритма DOA/TOA EKF выражений (13) и (14) по двум координатам x и y с учетом выражений (15) и (16) дадут следующие элементы матрицы \mathbf{H} при $k = 1, \dots, L[n]$:

$$\mathbf{H}_{2k-1,1}[n] = [\mathbf{h}_{k,1}]_{\partial x}(\hat{\mathbf{s}}^- [n]) = -\frac{\Delta y_k[n]}{d_k^2[n]}, \quad (26)$$

$$\mathbf{H}_{2k-1,2}[n] = [\mathbf{h}_{k,1}]_{\partial y}(\hat{\mathbf{s}}^- [n]) = \frac{\Delta x_k[n]}{d_k^2[n]}, \quad (27)$$

$$\mathbf{H}_{2k,1}[n] = [\mathbf{h}_{k,2}]_{\partial x}(\hat{\mathbf{s}}^- [n]) = \frac{\Delta x_k[n]}{cd_k[n]}, \quad (28)$$

$$\mathbf{H}_{2k,2}[n] = [\mathbf{h}_{k,2}]_{\partial y}(\hat{\mathbf{s}}^- [n]) = \frac{\Delta y_k[n]}{cd_k[n]}, \quad (30)$$

$$\mathbf{H}_{2k,5}[n] = [\mathbf{h}_{k,2}]_{\partial \rho}(\hat{\mathbf{s}}^- [n]) = 1. \quad (31)$$

Оценка координат $\hat{\mathbf{x}}_{VUE} = (\hat{x}[n], \hat{y}[n])^T$ в момент дискретного времени n определяется первыми двумя элементами вектора состояния $\hat{\mathbf{s}}_{12}^+[n] = (\hat{\mathbf{s}}_1^+[n], \hat{\mathbf{s}}_2^+[n])^T = (\hat{x}[n], \hat{y}[n])^T$; ковариационная матрица оценки координат образована верхней левой подматрицей размера $\mathbb{R}^{2 \times 2}$ матрицы $\mathbf{P}^+[n]$ в (25) оценка скорости $\hat{\mathbf{v}}_{VUE} = (\hat{v}_x[n], \hat{v}_y[n])$ определяется вторыми двумя элементами вектора состояния $\hat{\mathbf{s}}_{34}^+[n] = (\hat{\mathbf{s}}_3^+[n], \hat{\mathbf{s}}_4^+[n])^T = (\hat{v}_x[n], \hat{v}_y[n])^T$; оценка временного сдвига $\hat{\rho}[n]$ содержится в $\hat{\mathbf{s}}_5^+[n] = \hat{\rho}[n]$; оценка временного набега $\hat{\alpha}[n]$ содержится в $\hat{\mathbf{s}}_6^+[n] = \hat{\alpha}[n]$.

Инициализация РФК включает выбор вектора оценки начального состояния $\hat{\mathbf{S}}^+[0]$, начальной матрицы ковариации $\mathbf{P}^+[0]$ и является важной составляющей эффективной работы EKF [5]. В пессимистическом сценарии неудачный выбор $\hat{\mathbf{S}}^+[0]$ приведет к отсутствию сходимости РФК. В сверхплотных СРД 5G расхождение полученной оценки координат можно легко проверить, сопоставив ее с известными координатами ближайшей опорной станции RSU, которая осуществляет сбор первичных измерений от VUE, находясь в условиях LOS. Инициализировать вектор начальной оценки координат можно по принципу соседства к ближайшей опорной станции RSU с погрешностью расстояния LOS; инициализировать вектор скорости можно по предполагаемому сценарию позиционирования (транспортное средство со скоростью пешехода, транспортное средство, высокоподвижное транспортное средство). Временной сдвиг между RSU и VUE ограничен временем распространения сигнала от RSU на расстояние LOS, которое можно уточнить по временной метке момента отправления сигнала RSU; приняв этот сигнал, VUE корректирует свое время. Таким образом, временной сдвиг между RSU и VUE определяется задержкой передачи, приема и распространения сигнала между RSU и VUE [5]. Обычно производители указывают фазовый сдвиг генераторов устройств в единицах миллионной доли ppm (миллионная доля – единица измерения каких-либо относительных величин, равная $1 \cdot 10^{-6}$ от базового показателя). Так, значение 20 ppm для генератора означает, что временной сдвиг составит ± 20 мкс за 1 с работы; практика показывает, что чаще наблюдается положительный сдвиг. В [5] в качестве оценки для инициализации временного набега используется значение $\hat{\alpha}[0] = 25$ ppm с СКО $\sigma_\eta = 10$ ppm.

2.4. Анализ позиционирования по сценарию METIS Madrid

Проанализируем результаты оценки траектории алгоритмом DOA/TOA EKF [5] по сценарию городской застройки типа METIS Madrid [17] (рисунок 2). В двумерной модели сценария (см. рисунок 2а) здание в городе моделируется на плоскости квадратным блоком размера 120 м; всего на карте имита-

ционной модели представлено 16 зданий; ширина дороги принимается равной 12 м; опорные станции RSU установлены через каждые 60 м.

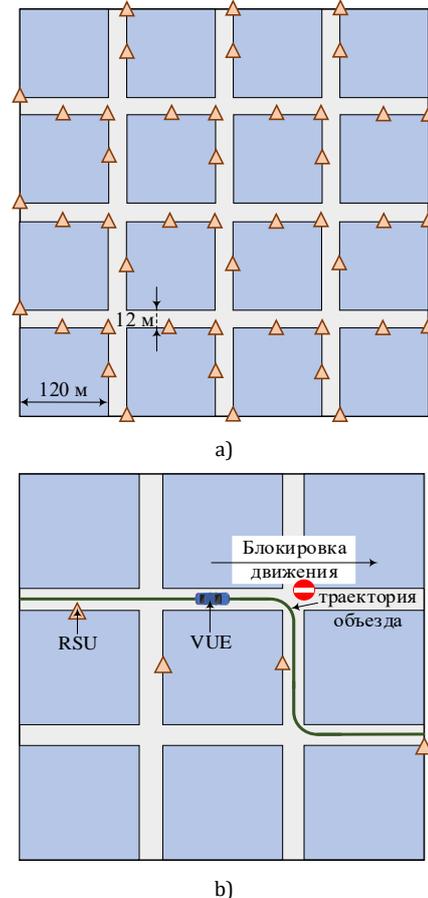


Рис. 2. Сценарий имитационного моделирования METIS Madrid в условиях LOS с VUE: а) несколько RSU; б) один RSU

Fig. 2. METIS Madrid Simulation Scenario в условиях LOS с VUE: а) several RSU; б) single RSU

По сценарию имитационной модели устройство VUE начинает движение по дороге в направлении от одного из углов здания (север, юг, запад, восток); на перекрестке маршрут VUE выбирается случайным образом, исключая то направление, откуда устройство начинало свое движение; маршрут заканчивается после 6 перекрестков, или при достижении подвижным устройством границы карты имитационной модели.

Для удобства моделирования предполагается, что VUE перемещается по середине дороги и движется с постоянной скоростью:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = 15 \text{ км/ч.} \tag{31}$$

Для каждого нового устройства VUE в начале его движения инициализируется случайное начальное значение временного и фазового сдвигов: временной сдвиг имеет нормальное распределение $\rho[0] \sim N(0, \sigma_{\rho,0}^2)$ с параметром СКО $\sigma_{\rho,0} = 100$ мкс; временной набег также имеет нормальное распре-

деление $\alpha[0] \sim N(\mu_{\alpha,0}, \sigma_{\alpha,0}^2)$ с параметрами математического ожидания $\mu_{\alpha,0} = 25$ ppm и СКО $\sigma_{\alpha,0} = 30$ ppm. По материалам [16] значение параметра СКО шума фазового сдвига $\eta[n] \sim N(0, \sigma_{\eta}^2)$ в (2), имеющего нормальное распределение, можно принять равным $\sigma_{\eta} = 6,3 \cdot 10^{-8}$. Для каждого нового подвижного устройства VUE инициализируется совместный алгоритм DOA/TOA EKF.

В [5] сделано допущение о том, что начальная оценка $\hat{\mathbf{x}}_{\text{VUE}}[0] = (\hat{x}[0], \hat{y}[0])^T$ истинного местоположения VUE $\mathbf{x}_{\text{VUE}}[0] = (x[0], y[0])^T$ получается извне, например, с использованием ГНСС; при этом начальная оценка имеет нормальное распределение $\hat{\mathbf{x}}_{\text{VUE}}[0] \sim N(\mathbf{x}_{\text{VUE}}[0], \sigma_{xy,0}^2 \mathbf{I}_2)$, с математическим ожиданием $\mathbf{x}_{\text{VUE}}[0]$ и СКО $\sigma_{xy,0} = 5$ м. Таким образом, вектор состояния и ковариационная матрица инициализируются следующим образом:

$$\hat{\mathbf{s}}^+[0] = (\hat{\mathbf{x}}_{\text{VUE}}^T[0], 0, 0, 0, \mu_{\alpha,0})^T, \quad (32)$$

$$\mathbf{P}^+[0] = \text{diag}(\sigma_{xy,0}^2, \sigma_{xy,0}^2, \sigma_{v,0}^2, \sigma_{v,0}^2, \sigma_{\rho,0}^2, \sigma_{\alpha,0}^2), \quad (33)$$

где СКО оценки скорости $\sigma_{v,0} = 5$ м/с. Состояния фильтра EKF обновляются каждый интервал $T = N_T T_f$, где $T_f = 167,3$ мкс – длительность кадра и N_T – некоторое постоянное целое число [5]. В каждый момент дискретного времени n предполагается, что VUE передает сигналы двум ближайшим RSU, находящимся в условиях прямой видимости. Опорные станции RSU осуществляют сбор первичных угломерных DOA и дальномерных TOA измерений согласно (17). При этом составная матрица \mathbf{R}_{l_i} ковариационной матрицы \mathbf{R} (20) становится нижней границей Крамера – Рао, полученной для кратчайших расстояний между ближайшей RSU с индексом l_i и подвижным устройством VUE. Настраиваемыми параметрами EKF являются СКО шума движения $\sigma_v = 0,1$ м/с и $\sigma_{\eta}^2 = 10^{-4}$; последнее значение значительно превышает фактические, однако способствует лучшей сходимости EKF, так как при выборе значительно меньшего σ_{η}^2 весьма вероятно расхождение алгоритма DOA/TOA EKF вследствие высоких погрешностей оценки временного и фазового сдвига (временного набега), который имеет место, например, при инициализации.

Имитационная модель алгоритма DOA/TOA EKF в [5] показала точность позиционирования по метрике RMSE (аббр. от англ. Root-Mean-Square Error) до 1 м; 0,4 м; 0,6 м; и 1,0 м для параметра N_T , равного 100, 500 и 1000, соответственно; результаты получены по усреднению 10^3 различных маршрутов движения VUE, в каждом из которых моделировались свои погрешности первичных измерений DOA/TOA. Для учета эффекта итеративной сходимости РФК, первые 20 оценок координат исключались при подсчете итоговой ошибки позиционирования RMSE вследствие значительно более высокой погрешности при первоначальной настройке фильтра. Оценка СКО времен-

ного сдвига составила 4 нс, что значительно меньше СКО начальной оценки в 100 мкс; рост ошибки с числом N_T говорит об известном эффекте накопления/размножения ошибки. Таким образом, прием и обработка первичных измерений по алгоритму DOA/TOA EKF от двух опорных станций RSU, находящихся в условиях прямой видимости VUE, позволяет достигнуть точности RMSE до 1 м и синхронизации в единицы нс, что удовлетворяет требованиям к сценариям позиционирования в СРД 5G и представляет несомненный интерес для приложений интеллектуальных транспортных систем в задачах управления дорожным движением для сценариев V2X/5G. Преимущество алгоритма совместной обработки УМ и ДМ-измерений заключается в следующем. Для алгоритма DOA наблюдается резкое снижение точности при таких конфигурациях территориального распределения, когда две RSU и VUE оказываются выстроенными в линию, и объясняется недостаточностью исключительно УМ-измерений. Комплексование угломерных и дальномерных измерений DOA/TOA EKF позволяет преодолеть этот недостаток DOA и применимо для решетчатой топологии территориального распределения опорных устройств RSU, в качестве которых могут выступать светофоры на перекрестках. В [5] представлено также исследование пессимистического сценария (см. рисунок 2б), когда в результате движения VUE оказывается в условиях прямой видимости только с одной опорной станцией RSU: алгоритм DOA/TOA EKF показал точность позиционирования с RMSE порядка 3 м с рассинхронизацией в 10,3 нс для параметра $N_T = 100$.

Результаты анализа прототипа имитационной модели по сценарию городской застройки типа METIS Madrid позволяют корректно инициализировать параметры разрабатываемой модели; сам сценарий является достаточно распространенным для оценки точности позиционирования в сверхплотных СРД 5G и будет далее реализован в имитационной модели для проверки соответствия требованиям по точности координат на примере сценария приоритетного проезда перекрестков.

3. Имитационная модель позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа V2X/5G

3.1. Описание работы имитационной модели

Для учета влияния погрешностей первичных измерений на оценку траектории движения VUE в настоящей работе реализован трехмерный сценарий территориального распределения RSU в сети V2X/5G, оборудованных планарной антенной решеткой; пример сценария в 3D и 2D для планарной решетки из 64 элементов с возможностью определения направления прихода сигнала с точностью до 2° , реализованной в Phased Array Toolbox [18], показан на рисунке 3.

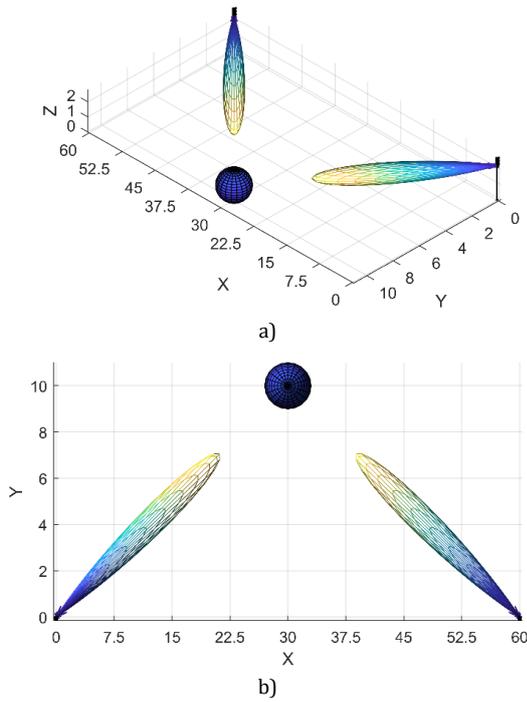


Рис. 3. Трехмерный сценарий имитационной модели с двумя RSU, оборудованными прямоугольной антенной решеткой из 64 элементов

Fig. 3. 3D Simulation Scenario with Two RSUs, Equipped with a Rectangular Antenna Array of 64 Elements

Имитационная модель предназначена для анализа работы РФК, использующего ДМ и УМ-измерения в сети V2X/5G. Измерения собираются опорными стационарными устройствами радиодоступа RSU, местоположение которых известно. Траектория подвижного устройства VUE на транспортном средстве определяется массивом точек траектории, периодом измерений T (с) и скоростью движения v (м/с). Помимо двумерных координат и скоростей VUE алгоритм РФК оценивает временную расстройку/сдвиг $\rho[n]$ между RSU и VUE, а также скорость изменения этой расстройки $\alpha[n]$.

В имитационной модели шум измерений принимается гауссовым, а точность первичных измерений задается СКО в единицах измеряемой величины и для дальности составляет 50 нс, для угла 2 градуса. В имитационной модели предполагается, что первичные измерения доступны и РФК обрабатывает их для каждой точки траектории движения VUE. Ошибка вычисляется как среднее значение евклидова расстояния между истинными координатами текущего местоположения VUE $\mathbf{x}_{VUE} = (x[n], y[n])^T$ и их оценкой $\hat{\mathbf{s}}_{12}^+[n] = (\hat{x}[n], \hat{y}[n])^T$ в n -ый момент времени:

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sqrt{(x[n] - \hat{x}[n])^2 + (y[n] - \hat{y}[n])^2}, \quad (34)$$

где $\hat{\mathbf{s}}_{12}^+[n] = (\hat{x}[n], \hat{y}[n])^T$ – n -ая оценка координат VUE; $n = 1, \dots, N$; N – общее количество оценок по траектории движения устройства VUE.

Алгоритм РФК позволяет оценить вектор состояния динамической системы (3), используя модель изменения состояния динамической системы (4) и ряд измерений (7, 8), косвенно описывающих ее состояние. Далее уточним математическую модель DOA/TOA EKF для двух опорных пунктов приема первичных измерений RSU.

Алгоритм работы РФК можно описать в 2 этапа:

1) этап получения априорной оценки вектора состояния $\hat{\mathbf{s}}^-[n]$ (21) для момента дискретного времени n и ковариационной матрицы ошибок оценки состояния $\mathbf{P}^-[n]$ (22) для шага n на основе данных с предыдущего шага $n - 1$;

2) этап обновления, на котором формируется апостериорная оценка $\hat{\mathbf{s}}^+[n]$ (24) и ковариационная матрица ошибок оценки состояния $\mathbf{P}^+[n]$ (25) с учетом новых измерений $\mathbf{y}[n]$ (17).

Априорная оценка описывается уравнениями (21) и (22), где $\hat{\mathbf{s}}^-[n]$ и $\mathbf{P}^-[n]$ – априорные оценки вектора состояния и ковариационной матрицы ошибок оценки состояния в момент дискретного времени n ; $\hat{\mathbf{s}}^+[n - 1]$ и $\mathbf{P}^+[n - 1]$ – апостериорные оценки в предыдущий момент дискретного времени $n - 1$; либо значения $\hat{\mathbf{s}}^+[0]$ и $\mathbf{P}^+[0]$ в начальный момент времени $n = 0$. Оценка вектора состояния $\hat{\mathbf{s}}[n] = (\hat{x}[n], \hat{y}[n], \hat{v}_x[n], \hat{v}_y[n], \hat{\rho}[n], \hat{\alpha}[n])^T$ для момента дискретного времени n содержит оценку координат VUE $\hat{\mathbf{s}}_{12}^+[n] = (\hat{x}[n], \hat{y}[n])^T$, оценку скорости $\hat{\mathbf{s}}_{34}^+[n] = (\hat{v}_x[n], \hat{v}_y[n])^T$ по x и y ; и параметры рассинхронизации RSU-VUE: оценку расстройки временного сдвига $\hat{\mathbf{s}}_5^+[n] = \hat{\rho}[n]$, выраженную в м; оценку скорости изменения расстройки $\hat{\mathbf{s}}_6^+[n] = \hat{\alpha}[n]$ в м/с; \mathbf{F} – матрица процесса из (5), описывающая модель изменения состояния системы с течением времени:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (35)$$

где T – период измерений. Подстановка выражений (6) в формулу (5) приводит к выражению (35).

Ковариационная матрица ошибок принятой модели изменения состояния $\mathbf{Q} = \mathbf{G}\mathbf{G}^T\sigma_s^2$ зависит от матрицы управления \mathbf{G} и определяет погрешность, вносимую в оценку состояния на этапе предсказания; σ_s – параметр задающий неточность модели заложенной в РФК. Если допустить, что между $(n-1)$ -ым и n -ым интервалами VUE движется с постоянным ускорением, распределенным по нормальному закону, матрица \mathbf{G} определяется как:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 \\ 0 & T^2/2 \\ T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix}. \quad (36)$$

Этап обновления описывается уравнениями (23-25), где $\mathbf{K}[n]$ – матрица усиления РФК; $\hat{\mathbf{s}}^+[n]$; $\mathbf{P}^+[n]$ – новые апостериорные оценки вектора состояния и ковариационной матрицы ошибок оценки состояния соответственно; \mathbf{I} – единичная матрица. Вектор обновления ($\mathbf{y}[n] - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{s}}^-[n])$) в момент дискретного времени n для $k = 1, 2$ выражается как:

$$\mathbf{y} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{s}}^-) = \begin{bmatrix} y_{k,2} - h_{k,2}(\mathbf{s}) \\ y_{k,1} - h_{k,1}(\mathbf{s}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{d}_k - (d_k + c\rho) \\ \hat{\varphi}_k - \tan^{-1}(\Delta y_k / \Delta x_k) \end{bmatrix}, \quad (37)$$

где $y_{k,2} = \hat{d}_k$ – оценка расстояния от RSU $_k$ с координатами $\mathbf{x}_{\text{RSU}_k} = (x_k, y_k)^T$ до VUE с априорной оценкой координат устройства $\hat{\mathbf{s}}_{12}^- = (\hat{\mathbf{s}}_1^-, \hat{\mathbf{s}}_2^-) = (\hat{x}, \hat{y})$:

$$\hat{d}_k = \sqrt{(\hat{\mathbf{s}}_1^- - x_k)^2 + (\hat{\mathbf{s}}_2^- - y_k)^2} + c\hat{\mathbf{s}}_5^-, \quad (38)$$

где $y_{k,1} = \hat{\varphi}_k$ – оценка угла прихода сигнала на RSU $_k$ с координатами $\mathbf{x}_{\text{RSU}_k} = (x_k, y_k)^T$ от VUE с априорной оценкой координат $\hat{\mathbf{s}}_{12}^- = (\hat{\mathbf{s}}_1^-, \hat{\mathbf{s}}_2^-) = (\hat{x}, \hat{y})$:

$$\hat{\varphi}_k = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{\mathbf{s}}_2^- - y_k}{\hat{\mathbf{s}}_1^- - x_k} \right). \quad (39)$$

Ковариационная матрица ошибок измерений \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_d^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_d^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\varphi^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_\varphi^2 \end{bmatrix}. \quad (40)$$

где σ_φ – СКО измерений угла прихода; σ_t – СКО измерений времени прихода.

Функция, связывающая измеренные расстояния с положением VUE, является, согласно (15) и (16), нелинейной функцией положения VUE:

$$d_k = \|\mathbf{x}_{\text{VUE}} - \mathbf{x}_{\text{RSU}_k}\| = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} + \Delta, \quad k = 1, 2, \quad (41)$$

где d_k – дальность от VUE до k -й RSU; $\mathbf{x}_{\text{VUE}} = (x, y)^T$ – координаты VUE; $\mathbf{x}_{\text{RSU}_k} = (x_k, y_k)^T$ – вектор координат стационарной опорной станции RSU $_k$; $\Delta = c\rho$ – временной сдвиг между RSU и VUE (в метрах).

Функция, связывающая измеренные углы прихода с положением VUE, является, согласно (13) и (15), нелинейной функцией положения VUE:

$$\varphi_k = \tan^{-1} \left(\frac{y - y_k}{x - x_k} \right). \quad (42)$$

Матрица наблюдений \mathbf{H} , для построения которой используются оценки величин d и φ , полученные из априорной оценки $\hat{\mathbf{s}}^-$, т. е. величины \hat{d}_k и $\hat{\varphi}_k$, представляет собой матрицу частных производных $\frac{\partial \mathbf{h}[n]}{\partial \mathbf{s}[n]}$, вычисленную по элементам вектора состояний $\hat{\mathbf{s}}^-$ (26-30) и, с учетом (41) и (42) для двух RSU определяется выражением:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial d_1}{\partial x} & \frac{\partial d_1}{\partial y} & \frac{\partial d_1}{\partial v_x} & \frac{\partial d_1}{\partial v_y} & \frac{\partial d_1}{\partial \Delta} & \frac{\partial d_1}{\partial \delta} \\ \frac{\partial d_2}{\partial x} & \frac{\partial d_2}{\partial y} & \frac{\partial d_2}{\partial v_x} & \frac{\partial d_2}{\partial v_y} & \frac{\partial d_2}{\partial \Delta} & \frac{\partial d_2}{\partial \delta} \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial v_x} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial v_y} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial \Delta} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial \delta} \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial v_x} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial v_y} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial \Delta} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial \delta} \end{bmatrix}. \quad (43)$$

В имитационной модели матрица \mathbf{H} имеет вид:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} (x - x_1)/r_1 & (y - y_1)/r_1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ (x - x_2)/r_2 & (y - y_2)/r_2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -(y - y_1)/r_1^2 & (x - x_1)/r_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(y - y_2)/r_2^2 & (x - x_2)/r_2^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (44)$$

где $\mathbf{x}_{\text{RSU}_k} = (x_k, y_k)^T$ – вектор координат стационарной опорной станции RSU $_k$; (x, y) – координаты VUE из вектора $\hat{\mathbf{s}}_{12}^- = (\hat{\mathbf{s}}_1^-, \hat{\mathbf{s}}_2^-)$.

Этапы 1 и 2 алгоритма РФК повторяются циклично по мере поступления новых измерений, обновляя вектор состояния и ковариационную матрицу ошибок оценки состояния системы.

3.2. Оценка условий прямой видимости в сверхплотных СРД 5G

Оценка условий прямой видимости в сверхплотных СРД 5G приводится для обоснования возможности сбора первичных УМ и ДМ-измерений в условиях LOS при сверхплотном территориальном распределении RSU и VUE на основе рекомендаций ITU [19, 20] в сценариях городской застройки типа METIS Madrid; полученное значение расстояния прямой видимости используется затем в имитационной модели для учета числа текущих опорных приемных устройств, находящихся в условиях LOS, и позволяет оценивать точность позиционирования транспортного средства при смене направления движения на перекрестках.

В соответствии с рекомендацией ITU-R M.2083-0 [19] сценарии использования сетей 5G классифицированы МСЭ на 3 группы:

- усовершенствованная подвижная широкополосная связь – eMBB (аббр. от англ. Enhanced Mobile Broadband);
- крупномасштабные системы межмашинной связи – mMTC (аббр. от англ. massive Machine Type Communications);
- сверхнадежная передача данных с малой задержкой – URLLC (аббр. от англ. Ultra-Reliable and Low Latency Communications).

В соответствии с рекомендацией ITU-R M.2412-0 [20] для оценки показателей функционирования СРД 5G с точки зрения условий распространения радиоволн и типа услуг eMBB/mMTC/URLLC различают следующие сценарии:

- *Indoor hotspot-eMBB*: внутри помещений для стационарных и малоподвижных устройств (пешеходы) с очень высокой их плотностью;
- *Dense Urban-eMBB*: город для малоподвижных (пешеходы) и подвижных (транспорт) устройств с высокой их плотностью;
- *Rural-eMBB*: село с большими зонами обслуживания для малоподвижных (пешеходы), подвижных (транспорт) и высокоподвижных устройств;
- *Urban Macro-mMTC*: город с большими зонами обслуживания большого числа устройств межмашинной связи;
- *Urban Macro-URLLC*: город с большими зонами обслуживания устройств URLLC.

В соответствии с перечисленными сценариями ITU-R M.2412-0 [20] содержит следующие типы моделей распространения радиоволн для СРД 5G: InH (аббр. от англ. Indoor Hotspot), UMa (аббр. от англ. Urban Macro), UMi (аббр. от англ. Urban Micro) и RMa (аббр. от англ. Rural Macro); оценка вероятности наличия прямой видимости осуществляется по формулам в таблице 1 с учетом расстояния между RSU и VUE на плоскости d_{2D} . Оценка расстояния в пространстве с учетом высот подвеса определяется как:

$$d_{3d} = \sqrt{d_{2D}^2 + (h_{RSU} - h_{VUE})^2}, \quad (46)$$

где h_{RSU} – высота подвеса антенной решетки опорной станции RSU; h_{VUE} – высота подвеса антенны пользовательского устройства VUE на транспортном средстве.

Зависимость вероятности прямой видимости от расстояния между опорным и пользовательским устройствами для сценария V2X/5G согласно формулам в таблице 1 для транспортных средств с высотой $h_{VUE} < 13$ м представлена на рисунке 4. Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что при расстоянии d_{LOS} до 30 м вероятность пря-

мой видимости между RSU и VUE составляет более 80 % для всех сценариев снаружи помещений и, таким образом, дает основания для надежного сбора и обработки первичных УМ и ДМ-измерений в сверхплотных СРД для сценариев V2X/5G.

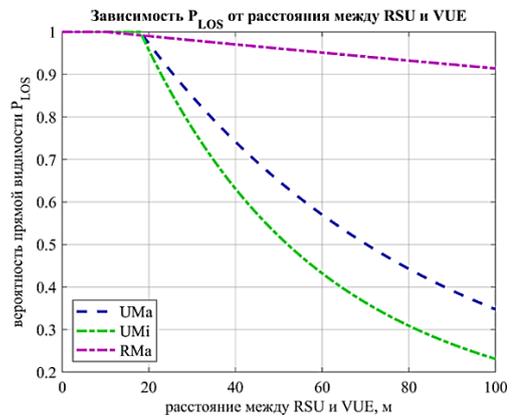


Рис. 4. Зависимость вероятности LOS от расстояния между RSU и VUE

Fig. 4. LOS Probability Dependence on Distance between RSU and VUE

3.3. Результаты имитационной модели для сценария приоритетного проезда перекрестков

Допустим, СКО первичных УМ-измерений DOA $\sigma_\phi = 2^\circ$; СКО первичных ДМ-измерений TOA $\sigma_\tau = 50$ нс. На рисунке 5 представлен пример оценки координат и визуализации точности оценки эллипсом рассеивания для сценария с двумя опорными станциями RSU, оборудованными антенными решетками и находящимися в условиях LOS с VUE (рисунк 6): расстояние между опорными станциями – 60 м; высокоподвижное транспортное средство движется слева направо со скоростью $v = 42$ м/с (≈ 150 км/ч); рассматривается точность позиционирования для двух интервалов сбора измерений $T = 0,1$ с и $T = 0,01$ с.

ТАБЛИЦА 1. Вероятность прямой видимости в СРД 5G [20]

TABLE 1. LOS Probability Dependence in 5G RAN [20]

Тип	Выражение для вычисления вероятности
UMa	$P_{LOS} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq 18 \text{ м} \\ \left[\frac{18}{d_{2D}} + \exp\left(-\frac{d_{2D}}{63}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D}}\right) \right] \left(1 + C'(h_{VUE}) \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2D}}{63}\right)^3 \exp\left(-\frac{d_{2D}}{150}\right) \right) & 18 \text{ м} < d_{2D} \end{cases}$ <p>где</p> $C'(h_{VUE}) = \begin{cases} 0 & h_{VUE} \leq 13 \text{ м} \\ \left(\frac{h_{VUE} - 13}{10}\right)^{1,5} & 13 \text{ м} < h_{VUE} \leq 23 \text{ м} \end{cases}$
UMi	$P_{LOS} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq 18 \text{ м} \\ \frac{18}{d_{2D}} + \exp\left(-\frac{d_{2D}}{36}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D}}\right) & 18 \text{ м} < d_{2D} \end{cases}$
RMa	$P_{LOS} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq 10 \text{ м} \\ \exp\left(-\frac{d_{2D} - 10}{1000}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D}}\right) & 10 \text{ м} < d_{2D} \end{cases}$

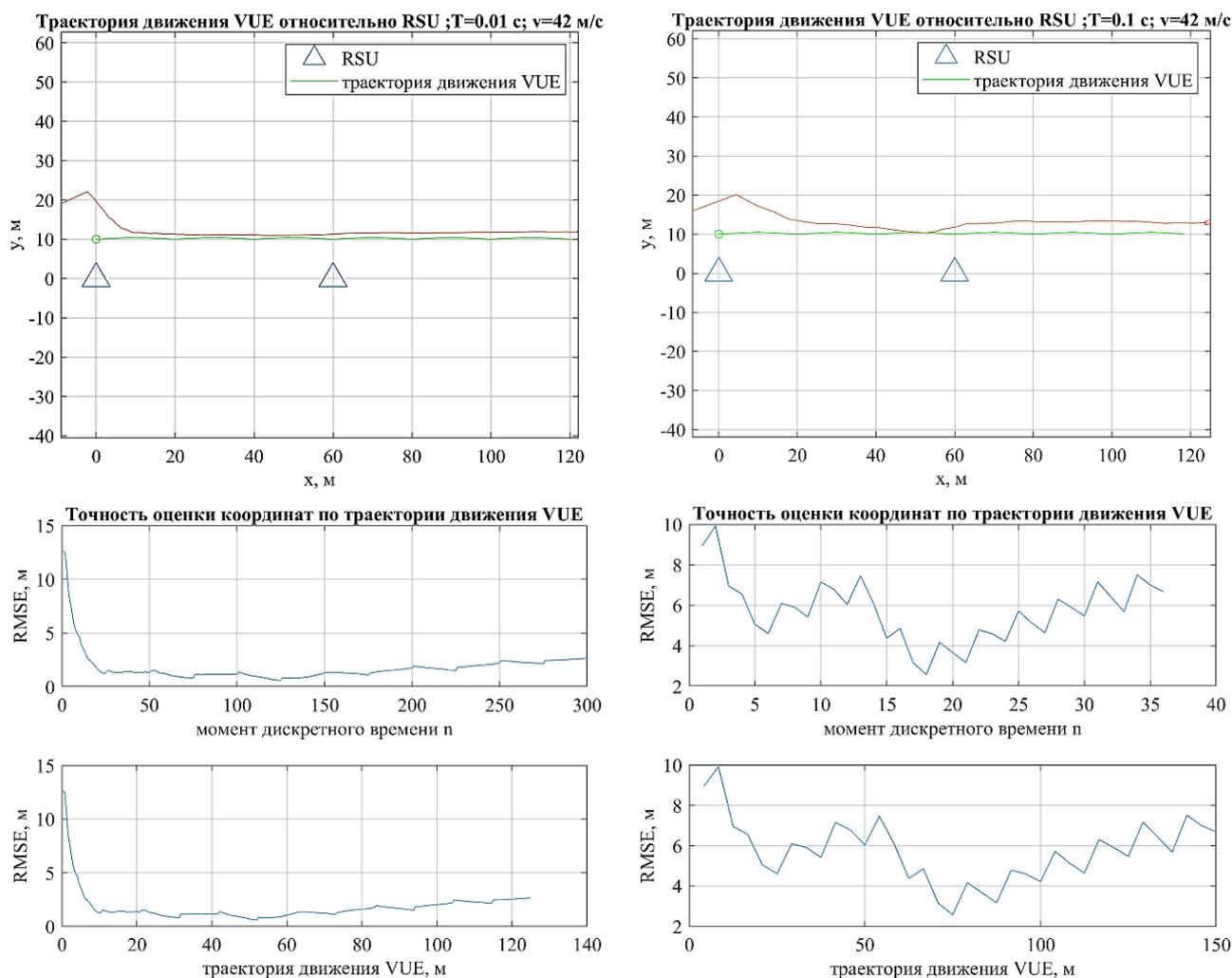


Рис. 5. Пример оценки и визуализации точности позиционирования высокоподвижных транспортных средств; $v = 42$ м/с (≈ 150 км/ч)

Fig. 5. An Example of Assessing and Visualizing Positioning Accuracy of Highly Mobile Vehicles; $v = 42$ m/s (≈ 150 km/h)

Анализ графиков (см. рисунок 5) позволяет сделать следующие выводы:

1) в начале движения VUE наблюдаются высокие погрешности оценки координат RMSE вследствие настройки РФК; для схождения РФК требуется порядка 20 итераций, что согласуется с результатами в [5]; после схождения точность позиционирования VUE достигает 1 м для интервала измерений $T = 0,01$ с; с увеличением длительности на порядок до $T = 0,1$ с точность снижается в разы;

2) при движении слева направо VUE при выходе за зону непосредственного охвата второй опорной станции RSU после 60 м погрешность оценки координат RMSE увеличивается.

Этот пример соответствует оптимистическому сценарию (см. рисунок 2а), когда VUE находится в условиях LOS с двумя RSU. Рассмотрим пессимистический сценарий, когда VUE в результате поворота на перекрестке оказывается временно в условиях LOS с одним опорным устройством RSU (см. рисунок 2б); в разработанной BV данная возможность реализована установкой параметра d_{LOS} . Используя результаты оценки условий LOS в зави-

симости от расстояния между RSU и VUE, при заданной траектории движения VUE воспроизводятся сценарии сбора первичных измерений от одной, или двух опорных станций RSU.

На рисунке 6 представлен пример оценки координат и визуализации точности оценки эллипсом рассеивания для сценария с тремя опорными станциями RSU, оборудованными антенными решетками; VUE движется слева направо со скоростью $v \approx 3$ м/с и при достижении второй опорной станции RSU осуществляет поворот вниз; интервал сбора измерений равен $T = 0,1$ с; рассматривается точность позиционирования для двух расстояний $d_{LOS} = 40$ м и $d_{LOS} = 30$ м. Для снижения погрешности позиционирования на интервалах утраты LOS, т.е. при повороте транспортного средства на перекрестке, целесообразно использовать дополнительные измерения, например, данные бортовых инерциальных навигационных систем, которые на непродолжительном интервале позволяют компенсировать недостаток первичных измерений от RSU, находящихся в условиях NLOS [21–23].

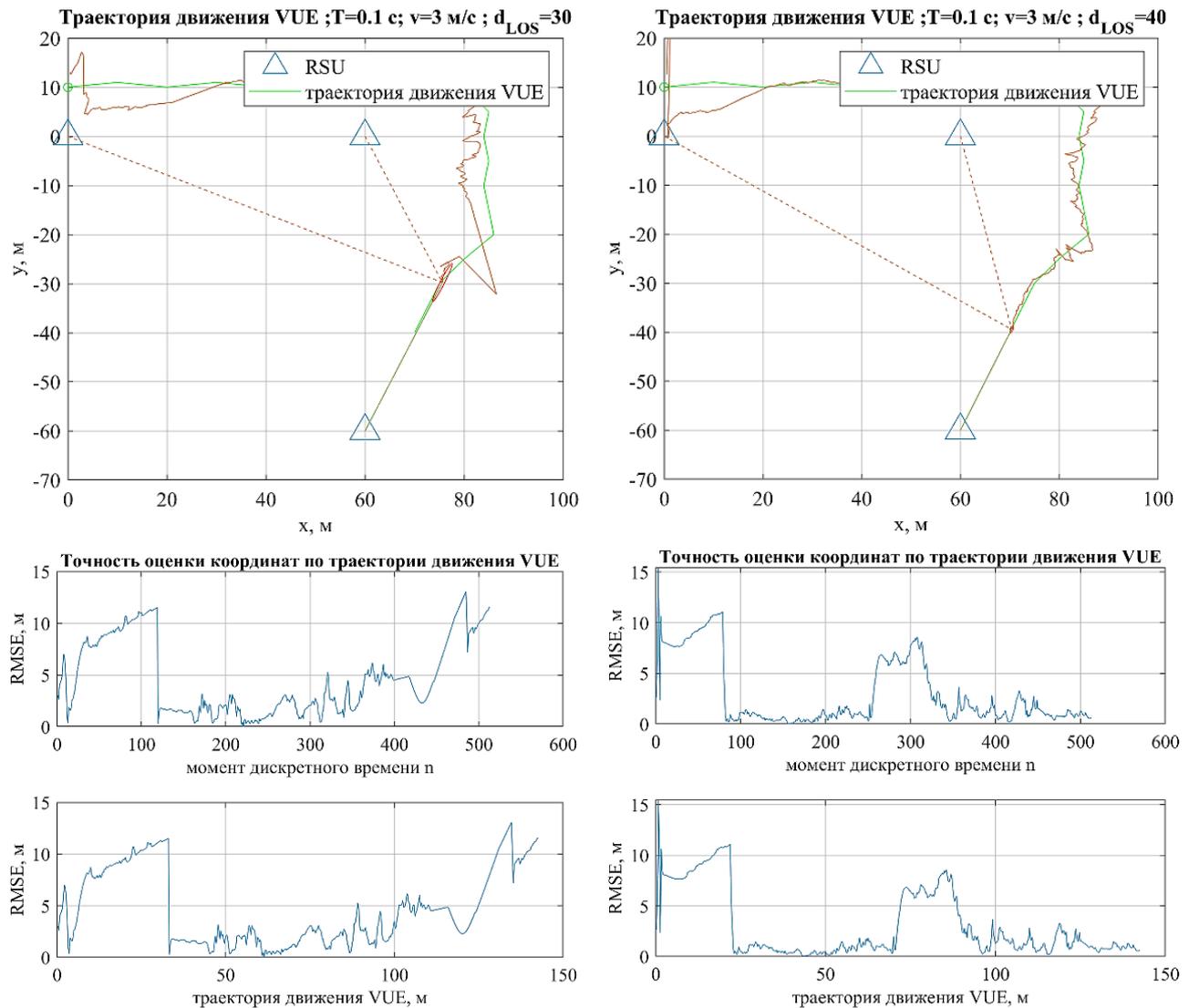


Рис. 6. Пример оценки и визуализации точности позиционирования транспортных средств при повороте на перекрестке; $v = 3 \text{ м/с}$ ($\approx 11 \text{ км/ч}$)

Fig. 6. An Example of Assessing and Visualizing Positioning Accuracy Vehicles when Turning at an Intersection; $v = 3 \text{ m/s}$ ($\approx 11 \text{ km/h}$)

Выводы

Разработанная в настоящем исследовании имитационная модель позволяет получить результаты, которые согласуются с известными оценками моделей-прототипов университета Тампере и подтверждают возможность достижения точности позиционирования транспортного средства VUE до 1 м для сценария управления дорожным движением путем комплексирования дальномерных и угломерных измерений расширенным фильтром Калмана в условиях прямой видимости с двумя опорными устройствами RSU при погрешности определения угла прихода сигнала в 2° , времени прихода 50 нс и начальной рассинхронизации RSU-VUE в 20 мкс. В отличие от существующих моделей-прототипов, разработанная в настоящей работе имитационная модель позволяет производить оценку соответствия заданным требованиям к точности позиционирования в зависимости от

наличия условий прямой видимости и точности сбора первичных угломерных измерений, определяемых установленной на опорном устройстве антенной решеткой, реализованной в Phased Array Toolbox. Также разработанная в настоящей работе имитационная модель позволяет устанавливать зависимости периода сбора дальномерных и угломерных первичных измерений от скорости движения устройства для достижения требуемой точности прогноза траектории без предварительной синхронизации с опорными пунктами инфраструктуры сверхплотной сети радиодоступа в приложениях интеллектуальных транспортных систем. В дальнейшем имитационную модель планируется усовершенствовать для реализации возможности сопровождения транспортного средства VUE лучом адаптивно-формируемой диаграммы направленности антенны RSU для обеспечения пространственного уплотнения в сетях V2X/5G.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках исполнения Государственного контракта № ПЗ3-1-26/9.

Список используемых источников

1. Фокин Г.А., Кучерявый А.Е. Сетевое позиционирование в экосистеме 5G // Электросвязь. 2020. № 9. С. 51–58. DOI:10.34832/ELSV.2020.10.9.006
2. Фокин, Г. А. Технологии сетевого позиционирования: монография. СПб.: СПбГУТ, 2020. 558 с.
3. Positioning and Location-Awareness in Future 5G Networks // Tampere University of Technology. 2019. URL: <http://www.tut.fi/5G/positioning/index.html> (дата обращения 11.11.2020).
4. Hakkarainen A., Werner J., Costa M., Leppanen K., Valkama M. High-Efficiency Device Localization in 5G Ultra-Dense Networks: Prospects and Enabling Technologies // Proceedings of the 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall, Boston, USA, 6–9 September 2015). IEEE, 2015. DOI:10.1109/VTCFall.2015.7390965
5. Werner J., Costa M., Hakkarainen A., Leppanen K., Valkama M. Joint User Node Positioning and Clock Offset Estimation in 5G Ultra-Dense Networks // Proceedings of the Global Communications Conference (GLOBECOM, San Diego, USA, 6–10 December 2015). IEEE, 2015. DOI:10.1109/GLOCOM.2015.7417360
6. Koivisto M., Costa M., Werner J., Heiska K., Talvitie J., Leppänen K., Koivunen V., Valkama M. Joint Device Positioning and Clock Synchronization in 5G Ultra-Dense Networks // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2017. Vol. 16. Iss. 5. PP. 2866–2881. DOI:10.1109/TWC.2017.2669963
7. Koivisto M., Costa M., Hakkarainen A., Leppanen K. and Valkama M. Joint 3D Positioning and Network Synchronization in 5G Ultra-Dense Networks Using UKF and EKF // IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps, Washington, USA, 4–8 December 2016). IEEE, 2016. DOI:10.1109/GLOCOMW.2016.7848938
8. Koivisto M., Hakkarainen A., Costa M., Kela P., Leppanen K., Valkama M. High-Efficiency Device Positioning and Location-Aware Communications in Dense 5G Networks // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55. Iss. 8. PP. 188–195. DOI:10.1109/MCOM.2017.1600655
9. Koivisto M., Hakkarainen A., Costa M., Talvitie J., Heiska K., Leppänen K., et al. Continuous high-accuracy radio positioning of cars in ultra-dense 5G networks // Proceedings of the 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC, Valencia, Spain, 26–30 June 2017). IEEE, 2017. PP. 115–120. DOI:10.1109/IWCMC.2017.7986272
10. Wang J., Shao Y., Ge Y., Yu R. A Survey of Vehicle to Everything (V2X) Testing // Sensors. 2019. Vol. 19. Iss. 2. DOI:10.3390/s19020334
11. Ko S.W., Chae H., Han K., Lee S., Seo D.W., Huang K. V2X-based vehicular positioning: Opportunities, challenges, and future directions // arXiv Preprint, 2019, arXiv:1908.04606. URL: <https://arxiv.org/abs/1908.04606> (дата обращения 20.11.2021)
12. ETSI TS 101 539-2 V1.1.1 (2018-06). Intelligent Transport Systems (ITS); V2X Applications; Part 2: Intersection Collision Risk Warning (ICRW) application requirements specification. ETSI, 2018.
13. Zhang Y., Yang T., Tan J., Qiu T.Z. Research on Transit Signal Priority Strategy of Single Intersection Based on V2X Environment // Proceedings of the 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS, Liverpool, UK, 14–17 July 2019). IEEE, 2019. PP. 356–363. DOI:10.1109/ICTIS.2019.8883556
14. Toledo-Moreo R., Santa J., Ubeda B., Piñana C., Zamora-Izquierdo M.A., Gomez-Skarmeta A.F. Performance Aspects of Navigation Systems for GNSS-Based Road User Charging // Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2010, Portland, USA, 21–24 September 2010). 2010. PP. 1157–1165.
15. Владыко А.Г., Кучерявый А.Е., Буйневич М.В., Парамонов А.И., Киричек Р.В., Фокин Г.А. и др. Разработка и экспериментальная апробация аппаратно-программной платформы предоставления приоритетного проезда регулируемых перекрестков для общественного, грузового и специального транспорта. Отчет о НИР № АААА-Б19-219080890025-6. СПб: СПбГУТ, 2018. 367 с.
16. Kim H., Ma X., Hamilton B.R. Tracking Low-Precision Clocks with Time-Varying Drifts Using Kalman Filtering // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2012. Vol. 20. Iss. 1. PP. 257–270. DOI:10.1109/TNET.2011.2158656
17. METIS D6.1. Simulation guidelines. Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society (METIS). METIS, 2013.
18. Phased Array Toolbox™ User's Guide, The MathWorks, Inc, September 2019. https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/phased/phased_ug.pdf (дата обращения 20.11.2021)
19. Rec. ITU-R M.2083-0. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. ITU, 2015.
20. Report ITU-R M.2412-0. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020. ITU, 2017.
21. Киреев А.В., Фокин Г.А. Оценка точности локального позиционирования мобильных устройств с помощью радиокарт и инерциальной навигационной системы // Труды учебных заведений связи. 2017. Том 3. № 4. С. 54–62.
22. Духовницкий О.Г., Рагило М.А., Сиверс М.А., Фокин Г.А. Применение фильтра Калмана в задачах позиционирования // Электросвязь. 2016. № 1. С. 78–81.
23. Sivers M., Fokin G., Dmitriev P., Kireev A., Volgushev D., Al-Odhari A. Indoor Positioning in WiFi and NanoLOC Networks // Proceedings of the 16th International on Next Generation Wired/Wireless Networking (NEW2AN 2016) and 9th Conference on Conference on Internet of Things and Smart Spaces (ruSMART 2016), St. Petersburg, Russia, 26–28 September 2016. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2016. Vol. 9870. PP. 465–476. DOI:10.1007/978-3-319-46301-8_39

* * *

The Vehicles Positioning in Ultra-Dense 5G/V2X Radio Access Networks Using the Extended Kalman Filter

G. Fokin¹, A. Vladyko¹

¹The Bonch-Bruevich State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-45-59

Received 30th October 2020

Accepted 19th November 2020

For citation: Fokin G., Vladyko A. The Vehicles Positioning in Ultra-Dense 5G/V2X Radio Access Networks Using the Extended Kalman Filter. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(4):45–59. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-4-45-59

Abstract: *This work is devoted to the study of mathematical models of vehicle positioning in ultra-dense V2X / 5G radio access networks using the extended Kalman filter. Based on the study of the probability of line-of-sight availability in the conditions of ultra-dense distribution of reference radio access stations and vehicles, as well as existing mathematical prototype positioning models, a new simulation model for constructing the trajectory of a vehicle has been developed to assess compliance with the requirements for the accuracy of coordinate assessment on the example of the scenario of priority passage of intersections. The simulation model implements the procedures for collecting primary angle and rangefinder measurements by reference stations received from the vehicle for subsequent secondary processing using the extended Kalman filter, as a result of which the vehicle trajectory is built in real time. In contrast to the existing prototype models, the simulation model developed in this work makes it possible to assess compliance with the specified requirements and other specifications depending on the current conditions of line-of-sight availability, as well as the accuracy of collecting primary angle measurements determined by the antenna array installed on the support device. The results of simulation are consistent with the known estimates of prototype models and confirm the possibility of achieving an accuracy of up to 1 m for a traffic control scenario with an error in determining the angle of arrival of a signal of 2 °.*

Keywords: *positioning, ultra-dense 5G networks, vehicle to everything, range and angle measurements, extended Kalman filter.*

References

1. Fokin G.A., Koucheryavy A.Y. Network Positioning in 5G Ecosystem. *Electrosvyaz*. 2020;9:51–58. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2020.10.9.006
2. Fokin G.A. Technologies of Network Positioning. St. Petersburg.: The Bonch-Bruevich State University of Telecommunications Publ.; 2020. 558 p. (in Russ.)
3. Tampere University of Technology. *Positioning and Location-Awareness in Future 5G Networks*. 2019. Available from: <http://www.tut.fi/5G/positioning/index.html> [Accessed 10.12.2020]
4. Hakkarainen A., Werner J., Costa M., Leppanen K., Valkama M. High-Efficiency Device Localization in 5G Ultra-Dense Networks: Prospects and Enabling Technologies. *Proceedings of the 82nd Vehicular Technology Conference, VTC2015-Fall, 6–9 September 2015, Boston, USA*. IEEE; 2015. DOI:10.1109/VTCFall.2015.7390965
5. Werner J., Costa M., Hakkarainen A., Leppanen K., Valkama M. Joint User Node Positioning and Clock Offset Estimation in 5G Ultra-Dense Networks. *Proceedings of the Global Communications Conference, GLOBECOM, 6–10 December 2015, San Diego, USA*. IEEE; 2015. DOI:10.1109/GLOCOM.2015.7417360
6. Koivisto M., Costa M., Werner J., Heiska K., Talvitie J., Leppänen K., Koivunen V., Valkama M. Joint Device Positioning and Clock Synchronization in 5G Ultra-Dense Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2017;16(5):2866–2881. DOI:10.1109/TWC.2017.2669963
7. Koivisto M., Costa M., Hakkarainen A., Leppanen K. and Valkama M. Joint 3D Positioning and Network Synchronization in 5G Ultra-Dense Networks Using UKF and EKF. *IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps, 4–8 December 2016, Washington, USA*. IEEE; 2016. DOI:10.1109/GLOCOMW.2016.7848938
8. Koivisto M., Hakkarainen A., Costa M., Kela P., Leppanen K., Valkama M. High-Efficiency Device Positioning and Location-Aware Communications in Dense 5G Networks. *IEEE Communications Magazine*. 2017;55(8):188–195. DOI:10.1109/MCOM.2017.1600655

9. Koivisto M., Hakkarainen A., Costa M., Talvitie J., Heiska K., Leppänen K., et al. Continuous high-accuracy radio positioning of cars in ultra-dense 5G networks. *Proceedings of the 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IWCMC, 26–30 June 2017, Valencia, Spain*. IEEE; 2017. p.115–120. DOI:10.1109/IWCMC.2017.7986272
10. Wang J., Shao Y., Ge Y., Yu R. A Survey of Vehicle to Everything (V2X) Testing. *Sensors*. 2019;19(2). DOI:10.3390/s19020334
11. Ko S.W., Chae H., Han K., Lee S., Seo D.W., Huang K. V2X-based vehicular positioning: Opportunities, challenges, and future directions. *arXiv Preprint, 2019, arXiv:1908.04606*. URL: <https://arxiv.org/abs/1908.04606> [Accessed 20th November 2020]
12. ETSI TS 101 539-2 V1.1.1 (2018-06). *Intelligent Transport Systems (ITS); V2X Applications; Part 2: Intersection Collision Risk Warning (ICRW) application requirements specification*. ETSI; 2018.
13. Zhang Y., Yang T., Tan J., Qiu T.Z. Research on Transit Signal Priority Strategy of Single Intersection Based on V2X Environment. *Proceedings of the 5th International Conference on Transportation Information and Safety, ICTIS, 14–17 July 2019, Liverpool, UK*. IEEE; 2019. p.356–363. DOI:10.1109/ICTIS.2019.8883556
14. Toledo-Moreo R., Santa J., Ubeda B., Piñana C., Zamora-Izquierdo M.A., Gomez-Skarmeta A.F. Performance Aspects of Navigation Systems for GNSS-Based Road User Charging. *Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, ION GNSS 2010, 21–24 September 2010, Portland, USA*. 2010. p.1157–1165.
15. Vlado A.G., Kucheryavy A.E., Buinevich M.V., Paramonov A.I., Kirichek R.V., Fokin G.A., et al. *Development and Experimental Testing of a Hardware and Software Platform for Providing Priority Passage at Controlled Intersections for Public, Freight and Special Transport*. Tech. report No. AAAA-Б19-219080890025-6. St. Petersburg.: The Bonch-Bruевич State University of Telecommunications Publ.; 2018. 367 p. (in Russ.)
16. Kim H., Ma X., Hamilton B.R. Tracking Low-Precision Clocks with Time-Varying Drifts Using Kalman Filtering. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2012;20(1):257–270. DOI:10.1109/TNET.2011.2158656
17. *METIS D6.1. Simulation guidelines. Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society (METIS)*. METIS, 2013.
18. *Phased Array Toolbox™ User's Guide, The MathWorks, Inc, September 2019*. https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/phased/phased Ug.pdf [Accessed 20th November 2020]
19. Rec. ITU-R M.2083-0. *IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*. ITU; 2015.
20. Report ITU-R M.2412-0. *Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020*. ITU; 2017.
21. Kireev A.V., Fokin G.A. Accuracy Evaluation of Local Positioning by Radiomap Building and Inertial Navigation Systems. *Proc. of Telecom. Universities*. 2017. Vol. 3. Iss. 4. PP. 54–62.
22. Dukhovnitskiy O.G., Ragilo M.A., Sivers M.A., Fokin G.A. Kalman Filtering for Positioning Applications. *Electrosvyaz*. 2016;1:78–81. (in Russ.)
23. Sivers M., Fokin G., Dmitriev P., Kireev A., Volgushev D., Al-Odhari A. Indoor Positioning in WiFi and NanoLOC Networks. *Proceedings of the 16th International on Next Generation Wired/Wireless Networking, NEW2AN 2016, and 9th Conference on Conference on Internet of Things and Smart Spaces. ruSMART 2016, St. Petersburg, Russia, 26–28 September 2016. Lecture Notes in Computer Science*. Cham: Springer; 2016. vol.9870. p.465–476. DOI:10.1007/978-3-319-46301-8_39

Сведения об авторах:

ФОКИН
Григорий Алексеевич

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

ВЛАДЬКО
Андрей Геннадьевич

кандидат технических наук, директор НИИ «Технологии связи» Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, vladyko@sut.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-8852-5607>