

СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ И ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ. ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

УДК 629.7

DOI 10.51955/2312-1327_2025_1_105

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В СЕТЯХ СОТОВОЙ СВЯЗИ*

*Олег Николаевич Скрыпник,
orcid.org/0000-0002-2006-0428,
доктор технических наук, профессор
Белорусская государственная академия авиации,
ул. Уборевича, 77
Минск, 220096, Республика Беларусь
skripnikon@yandex.ru*

*Александр Александрович Козич,
orcid.org/0009-0007-4880-1607,
Государственное предприятие «Белазронавигация»,
ул. Короткевича, 19
Минск, 220065, Республика Беларусь
aliaksanderkozich@gmail.com*

Аннотация. В работе рассмотрены перспективы использования существующих сетей сотовой связи для создания интегрированной системы связи, навигации и наблюдения (iCNS). Основное внимание уделено проблеме применения iCNS для решения задачи навигации. Рассмотрены классические методы решения задачи позиционирования беспилотных воздушных судов, для которых приведены выражения, позволяющие оценить точность позиционирования. Рассмотрены также методы, присущие только сетям сотовой связи, их основные особенности. Представлены методика проведения натурных экспериментов по оценке точности позиционирования абонентского терминала и результаты, полученные для города районного значения, проведено их сравнение с результатами эксперимента в условиях крупного города. Определены перспективы применения существующих сетей сотовой связи для решения задач CNS.

Ключевые слова: сотовая связь, базовая станция, беспилотное воздушное судно, технология iCNS, методы позиционирования, точность позиционирования.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант T23-029).

ASSESSMENT OF THE MOBILE POSITIONING ACCURACY IN CELLULAR NETWORKS

*Oleg N. Skrypnik,
orcid.org/0000-0002-2006-0428,
Doctor of Technical Sciences, Full professor
Belarusian State Academy of Aviation,
77, Uborevich str.
Minsk, 220096, Republic of Belarus
skripnikon@yandex.ru*

*Alexander A. Kozich,
orcid.org/0009-0007-4880-1607,
the state enterprise «Belaeronavigatsia»,
19, Korotkevich str.
Minsk, 220065, Republic of Belarus
aliaksanderkozich@gmail.com*

Abstract. The paper considers the prospects of using existing cellular communication networks to create an integrated communication, navigation and surveillance system (iCNS). The main attention is paid to the problem of using iCNS to solve a navigation problem. Classical methods for solving the problem of positioning unmanned aircraft are considered, for which expressions are given that allow estimating the accuracy of positioning. The methods unique to cellular communication networks and their main features are also considered. A methodology for conducting field experiments to assess the accuracy of positioning of a subscriber terminal is presented, and the results obtained for a city of regional subordination are compared to the results of an experiment in a large city. The prospects of using existing cellular communication networks to solve CNS problems have been determined.

Keywords: cellular communication, base station, unmanned aircraft, iCNS technology, positioning methods, positioning accuracy.

Введение

Современная авиационная транспортная система характеризуется высокими темпами развития беспилотной авиации. Это обусловлено тем, что данный вид транспортно-логистического обслуживания предоставляет государствам и различным категориям пользователей уникальные возможности – от доставки жизненно важных материалов, мониторинга объектов природы и до поддержки борьбы со стихийными бедствиями, инспектирования инфраструктуры и пр., включая и такое инновационное направление, как городская аэромобильность.

Быстрое развитие рынков применения, парка и технологий, связанных с беспилотной авиацией, создает специфические и серьезные проблемы для обеспечения безопасных операций беспилотной и пилотируемой авиации в едином (интегрированном) воздушном пространстве (ВП).

Одним из путей решения проблемы интеграции беспилотных воздушных судов (БВС) в общее ВП является создание эффективной системы организации и управления низковысотным воздушным движением – UTM (Unmanned Traffic Management). Такая система должна обеспечить требуемый уровень безопасности полетов БВС за счет автоматизации и цифровизации

информационных и технологических процессов. Система UTM принципиально отличается от системы организации воздушного движения пилотируемых ВС, но дополняет ее и взаимодействует с ней. Основные отличия состоят в предоставлении системой UTM новых сервисов и услуг, необходимых для эксплуатантов беспилотных авиационных систем (БАС).

БАС и UTM должны развиваться в соответствии с концепцией PBN (Performance Based Navigation) ИКАО, что определяет требования к бортовым датчикам БВС, каналам связи борт-земля и земля-борт и содержанию передаваемой по ним информации. Определено, что развитие сервисов UTM и ее интеграция в общее ВП будут осуществляться на основе технологий CNS/ATM (Communication, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management).

Применительно к системе UTM технологии CNS предполагают обеспечение решения задач связи (линия контроля и управления БВС С2, линия связи С3, обмен данными для обеспечения ситуационной осведомленности пользователей ВП, полотно-информационное обслуживание), навигации (определение параметров движения БВС, выдерживание траекторий) и наблюдения (кооперативное и некооперативное наблюдение для контроля трафика системой UTM) при выполнении маловысотных операций БВС. При этом решение указанных задач, как правило, обеспечивается отдельными функциональными модулями, размещение которых на малых БВС с массой до 30 кг является в ряде случаев проблематичным, так как значительно снижает массу полезной нагрузки.

По экспертным оценкам более 60% операций БВС реализуются в полетах BVLOS и RLOS (за пределами дальности визуальной и радиовидимости). Для безопасного выполнения таких операций БАС в интегрированном ВП необходима соответствующая инфраструктура средств управления воздушным движением. При этом следует ожидать, что значительная часть полетов БВС открытой (в основном физические лица) и специальной (в основном организации, оказывающие услуги по доставке грузов, мониторингу объектов и т.д.) категорий будет проходить в зонах устойчивого действия мобильных сетей связи. Сети сотовой связи могут обеспечить передачу данных, идентификацию и наблюдение за БВС, управление трафиком в выделенном для полетов БВС открытой и специальной категорий слое ВП (VLL) на высотах до 150 м, особенно в районах с плотной застройкой. Поэтому исследование возможностей использования сетей сотовой связи для выполнения функций CNS является актуальной научной и практической задачей.

Материалы и методы

Технологии CNS постоянно совершенствуются, прежде всего в интересах пилотируемой авиации, обеспечивая повышение эффективности использования ВП и требуемый уровень безопасности полетов. Одним из перспективных направлений развития является разработка интегрированной iCNS, в которой традиционные для пилотируемой авиации технические средства и методы связи, навигации и наблюдения дополняются

возможностями решения этих же задач на основе современных сетей сотовой связи 4G/5G (рис. 1) [FACT, 2022; Fischer, 2021].

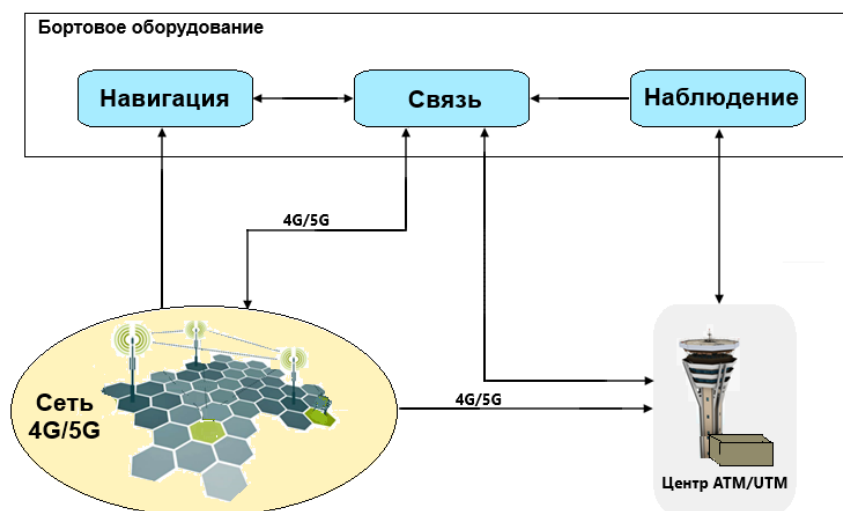


Рисунок 1 – Архитектура iCNS

Так, через сеть сотовой связи можно осуществлять обмен данными между БВС и операторами (внешними пилотами), реализуя функцию линии связи С2 при выполнении полетов RLOS, организовывать связь с центрами управления воздушным движением по линии С3. На основе широкополосной передачи данных о параметрах траекторного движения БВС можно реализовать функцию наблюдения в центрах UTM. Существует и потенциальная возможность позиционирования БВС, используя уже применяемые операторами сотовой связи методы. При этом важна оценка не только возможности, но и точности такого позиционирования, что позволит конкретизировать области его использования применительно к поддержке операций БАС и UTM.

Методологической основой решения задачи позиционирования объектов в сетях сотовой связи является тот факт, что базовые станции (БС) по существу являются навигационными опорными точками (НОТ), поскольку их координаты известны с геодезической точностью. Поэтому, принимая сигналы от НОТ и измеряя их параметры (мощность сигнала, время распространения по радиолинии БС-абонентский терминал (АТ), разность моментов приема сигналов от пары БС на борту БВС, или наоборот, разность моментов приема сигнала АТ сетью БС), связанные с навигационными параметрами (дальность, направление распространения, разность расстояний до БС), можно решить задачу позиционирования БВС. При этом для целей навигации задача должна решаться на борту БВС, а для целей наблюдения – на наземном сегменте (на БС, сетевом сервере центра коммутации оператора сотовой связи, в центре UTM) как методами, известными в теории радионавигации – дальномерным, угломерным, угломерно-дальномерным, разностно-дальномерным, многопозиционным, корреляционно-

экстремальным)⁹, так и методами, разработанными специально для позиционирования АТ в сетях сотовой связи. Эти методы основаны на использовании особенностей построения сетей сотовой связи, структуры сигналов сотовой связи и особенности их распространения. При этом по мере развития технологий сотовой связи совершенствовались и методы позиционирования абонентов в них. Так, в работах [Фокин, 2020а; Фокин, 2020б] рассмотрены такие методы, как близость, анализ сцен, гибридный, интегрированный и др. и приведены результаты экспериментов по оценке точности позиционирования. В работах [Ayad, 2010; Hybrid..., 2010; Mobile Phone..., 2009; Singh et al., 2014; Thorpe et al., 2013] рассмотрены комбинированные методы, методы на основе мультilaterации, а также приведены оценки точности позиционирования, полученные расчетными методами и путем моделирования. В работе [Dardari et al., 2015] приведены методы позиционирования внутри помещений с использованием сетей сотовой связи, GPS, а также теоретически рассчитанные точности позиционирования этими методами.

В работах [Скрыпник и др., 2024; Sand et al., 2014] проведен анализ методов позиционирования АТ, применяемых в сетях сотовой связи, которые можно разделить на две группы: методы позиционирования при работе по одной БС и методы позиционирования по сети БС.

К первой группе относятся следующие методы:

- a1) идентификации соты;
- a2) идентификации соты с измерением направления прихода сигнала от БС;
- a3) идентификации соты с измерением задержки между известным моментом излучения и измеренным моментом приема сигнала от БС на БВС;
- a4) идентификации соты с измерением задержки сигнала при распространении по радиолинии БВС-БС-БВС;
- a5) идентификации соты с измерением мощности принимаемого на БВС сигнала;
- a6) определение направления прихода сигнала от БС и времени задержки между моментом излучения и приема сигнала от БС на борту БВС.

Метод a1) идентификации соты позволяет достаточно грубо, с точностью, соответствующей дальности до БС (размеру соты, а это могут быть сотни метров и более), определить местоположение БВС.

Методы a2)-a6) являются комбинированными, поскольку основаны на одновременном измерении на объекте позиционирования двух параметров.

Метод a2) по точности определения расстояния до БС аналогичен методу a1), но дополнительно позволяет определить направление на БС, что может использоваться при построении маршрута полета БВС, проходящего через БС (метод навигации ОТ или НА радиомаяк).

⁹ Скрыпник О. Н. Системы радионавигации и посадки: учебник для студентов, обучающихся по направлениям подготовки и специальностям радиотехнического профиля. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2025. 491 с.

Методы а3)-а5) относятся к дальномерным и, в отличие от метода а1), позволяют уменьшить зону неопределенности положения БВС, которая будет иметь форму окружности относительно БС, радиус которой определяется измеренным значением дальности до БС плюс погрешностью ее измерения.

Метод а6) является наиболее точным из рассмотренных методов позиционирования по одной БС, поскольку здесь измеряются направление и дальность R относительно БС. В теории авиационной навигации данный метод называется угломерно-дальномерным и реализован, например, в системе ближней навигации VOR/DME¹⁰. Погрешность (среднеквадратическая ошибка) определения местоположения БВС данным методом находится из выражения:

$$\sigma_r = \sqrt{R^2 \sigma_\Theta^2 + \sigma_R^2}, \quad (1)$$

где σ_Θ^2 – дисперсия погрешности измерения направления, σ_R^2 – дисперсия погрешности измерения дальности до БС.

К методам, основанным на работе с сетью БС, относятся следующие:

b1) измерения времени задержки сигнала при распространении по радиолинии БС-БВС;

b2) измерения разности моментов приема сигналов от пар БС;

b3) усовершенствованный метод измерения разности времени прихода сигнала Enhanced Observed Time Difference (E-OTD);

b4) определения направлений прихода сигнала от нескольких БС;

b5) измерения мощности принятых сигналов от нескольких БС;

b6) анализа сцен и сопоставления образов или сигнатурный метод.

Большинство из рассмотренных методов широко используются в авиационной радионавигации и системах наблюдения.

Так, метод b1), известный как дальномерный, используется в системе DME (дальномерный метод с ответчиком) и спутниковых системах навигации GNSS (псевдодальномерный метод). Для решения задачи позиционирования необходимо принимать сигналы минимум от двух БС.

Погрешность (среднеквадратическая ошибка) позиционирования данным методом определяется выражением:

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_{R1}^2 + \sigma_{R2}^2}}{\sin \alpha}, \quad (2)$$

где $\sigma_{R1}^2, \sigma_{R2}^2$ – дисперсии погрешностей измерения дальности до БС1 и БС2; α – угол пересечения линий положения, которые представляют собой окружности, в центре которых находятся БС.

Методы b2), b3), известные как разностно-дальномерные (гиперболические), используются в системах дальней навигации eLoran, Loran-C. Обращенный разностно-дальномерный метод используется в многопозиционных системах наблюдения MLAT. Для реализации этих

¹⁰ Скрыпник О. Н. Радионавигационные системы аэропортов и воздушных трасс: Учебник. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2020. 325 с.

методов необходимо измерить две разности расстояний, что предполагает наличие минимум трех БС.

Погрешность (среднеквадратическая ошибка) позиционирования данным методом определяется выражением:

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_{R12}^2 \sin^2 \frac{\Psi_{61}}{2} + \sigma_{R13}^2 \sin^2 \frac{\Psi_{62}}{2}}}{2 \sin \alpha \sin \frac{\Psi_{61}}{2} \sin \frac{\Psi_{62}}{2}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{R13}^2, \sigma_{R12}^2$ – дисперсии погрешностей измерения разности дальностей до БС1 и БС3, БС1 и БС2; α – угол пересечения линий положения, которые представляют собой гиперболы, в фокусах которых находятся БС; Ψ_{61}, Ψ_{62} – углы, образованные направлениями от БС к БВС (рис. 2).

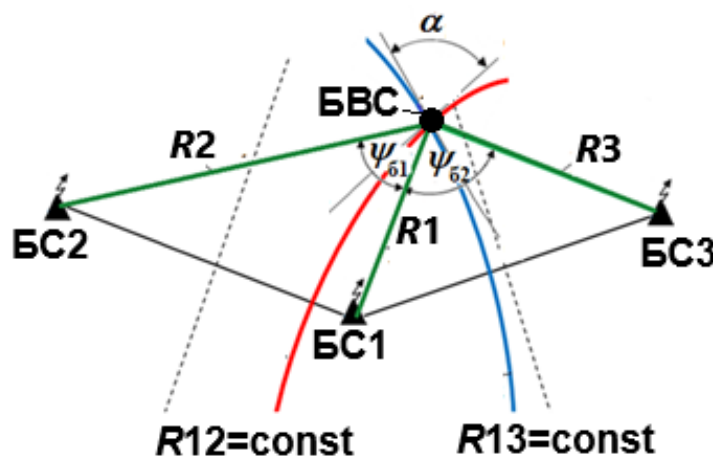


Рисунок 2 – Пояснение разностно-дальномерного метода

Метод b4), известный как угломерный, используется в системах VOR/VOR. Для реализации метода необходимо принимать сигналы минимум от двух БС.

Погрешность (среднеквадратическая ошибка) позиционирования данным методом определяется выражением:

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{R1^2 \sigma_{\Theta1}^2 + R2^2 \sigma_{\Theta2}^2}}{\sin \alpha}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\Theta1}^2, \sigma_{\Theta2}^2$ – дисперсии погрешностей измерения направлений на БС1 и БС2; α – угол пересечения линий, указывающих направления на БС; $R1, R2$ – расстояния до БС (в угломерной системе не измеряются).

Из выражений (2)-(4) следует, что точность позиционирования методами b1)-b4) будет зависеть не только от точности измерения параметров (дальности, направления, разности дальностей), но и от положения БВС относительно БС (геометрического фактора), влияющего на значение угла α .

Метод b6) аналогичен корреляционно-экстремальному, который не нашел применения в гражданской авиации.

Также в авиации не используется метод b5), поскольку при распространении радиосигнала в реальных средах на большие расстояния его

уровень в точке приема будет зависеть не только от расстояния, но и от различных случайных факторов, оказывающих критическое влияние на точность измерения дальности. Однако на незначительных дальностях от БС влияние данных факторов проявляется гораздо в меньшей степени, что позволяет реализовать такой метод на практике с приемлемой точностью позиционирования.

Рассмотренные группы методов позиционирования (кроме b6)) предполагают выполнение условия прямой радиовидимости между БС и БВС. Это условие выполняется при полетах БВС над ровной земной поверхностью, что имеет место в малонаселенных районах с маловысотными объектами инфраструктуры.

При выполнении операций в мегаполисах, в условиях значительных неровностей рельефа местности существенное влияние на точность измерения параметров сигнала может оказывать эффект многолучевости. Из-за искажений фазового фронта результирующего сигнала в точке приема многолучевость может существенно снизить точность позиционирования БВС при полетах на малых высотах [Mobile Phone..., 2009].

Метод b6) не критичен к эффекту многолучевости, но требует значительных затрат на получение образов сигнала в районе решения задачи позиционирования, при этом точность позиционирования будет определяться расстоянием между точками фиксации сигнатур.

Существенной проблемой при использовании методов b1)-b3) является необходимость синхронизации шкал времени либо БС, либо БС и АТ, что требует привлечения дополнительного оборудования и усложнения алгоритмов взаимодействия АТ и БС.

К проблемам использования метода b5) следует отнести необходимость контроля и поддержания постоянства уровня сигнала, излучаемого БС, который может быть критичен к состоянию радиолинии, стабильности диаграмм направленности антенн, параметров передатчика.

Общей же проблемой позиционирования в сетях сотовой связи является отсутствие рекомендаций для операторов сотовой связи по использованию единых, стандартизованных для БАС и UTM, методов позиционирования в их сетях и использование различных стандартов связи (например, в Беларуси используются сети 2G, 3G, технология LTE, 4G, LTE Advanced pro, 5G) [Карта покрытия, 2025]. По этой причине один из предлагаемых подходов к решению данной проблемы состоит в выделении отдельной сети в стандарте G5 для поддержки операций БАС и UTM.

Результаты экспериментальных исследований точности позиционирования

Экспериментальные исследования точности позиционирования АТ в сетях сотовой связи проводились в г. Минске [Скрыпник и др., 2024] и г. Кобрине (районный центр с населением чуть более 50 тыс. человек), отличающихся уровнем покрытия и используемыми технологиями сотовой связи.

В г. Минске в основном используются высокоскоростные сети 4G и 4G+, в то время, как в г. Кобрине – сеть 3G.

Для проведения экспериментов использовался АТ модели «Redmi Note 8». В АТ была активирована функция определения местоположения только в мобильной сети без использования сигналов GNSS и других беспроводных сетей (Wi-Fi, Bluetooth). Для отображения позиции АТ использовались мобильные приложения «Яндекс Карты», «Гугл карты», «Геотрекер», «Network cell info lite». Измерения выполнялись в 13 контрольных точках, координаты которых были определены с точностью GNSS через приложение «Гугл карты». В каждой контрольной точке выполнялось однократное позиционирование. В постобработку включены данные 15 экспериментов (сеансов измерений).

Результаты экспериментов в г. Минске приведены в [Скрыпник и др., 2024]. Максимальная погрешность позиционирования составила 176 м, минимальная – 11 м. Среднее значение погрешности для всех измерений составило 62 м.

Результаты экспериментов в г. Кобрине.

При проведении эксперимента в г. Кобрине измерения проводились также в 13 точках маршрута (рис. 3). Первые 4 точки находятся в частном секторе, соответственно покрытие в этом районе будет хуже, тип сети преимущественно 3G. Следующие 5 точек расположены на небольшом удалении друг от друга, проходят через зону с лучшим покрытием, сеть преимущественно 4G. Точки 11, 12, 13 снова находятся в районе с меньшим покрытием, сеть преимущественно 3G.

Общее среднее значение погрешности для всех измерений составило 243 м, что гораздо хуже значений, полученных в Минске. В 39% измерений тип сети был 3G, в то время как в Минске данный тип сети встречался очень редко в единичных случаях, в основном для контрольной точки 9, в которой наблюдалась наибольшая погрешность позиционирования. В Кобрине среднее значение погрешности для измерений в сети 3G составило 298 м, в сети 4G – 208 м. Эти данные свидетельствуют, что точность позиционирования существенно зависит от типа рабочей сети.

Треки, соответствующие фактическому и построенному по данным позиционирования (усреднение по 15-ти измерениям) в сети сотовой связи маршруту движения АТ, и расположение на нем контрольных точек показаны на рис. 3. Максимальная погрешность позиционирования составила 496 м, минимальная – 11 м, средняя – 155 м.

Результаты проведенных экспериментов показали, что в настоящее время точность позиционирования абонентов в сетях сотовой связи в среднем составляет несколько десятков метров в крупных городах, где имеется более густая сеть БС и используются более совершенные технологии, и более 100 м в районах, где сеть БС недостаточно густая. При этом в обоих сценариях наблюдаются значительные вариации точности по маршруту движения АТ.

Исходя из полученных экспериментальным путем результатов следует заключить, что в настоящее время решение задачи навигации БВС с использованием сетей сотовой связи можно рассматривать только в качестве резервного варианта, поскольку точность позиционирования БВС с помощью штатных бортовых средств навигации (инерциальных систем навигации, приемников спутниковой навигации GNSS, оптических систем) намного лучше и составляет единицы метров. По мере развертывания сетей 5G позиционирование в сетях сотовой связи сможет составить конкуренцию используемым в настоящее время методам навигации БВС. Вместе с этим использование сетей сотовой связи для решения задач обмена данными и наблюдения (при решении задачи позиционирования БВС на БС) уже в настоящее время является достаточно перспективным направлением.

Библиографический список

- Карта покрытия // [Электронный ресурс]. – 2025. URL: <https://www.a1.by/ru/company/coverage-map>. (дата обращения: 24.01.2025).
- Скрыпник О. Н. Методы позиционирования беспилотных воздушных судов в сетях сотовой связи / О. Н. Скрыпник, А. А. Козич // *Авиационный вестник*. 2024. № 10. С. 24-29. EDN JKLYLYI.
- Фокин Г. Эволюция технологий позиционирования в сетях 2G-4G. Часть 1 // *Первая миля*. 2020. № 2(87). С. 32-39. DOI 10.22184/2070-8963.2020.87.2.32.38.
- Фокин Г. Эволюция технологий позиционирования в сетях 2G-4G. Часть 2 // *Первая миля*. 2020. № 3(88). С. 30-35. DOI 10.22184/2070-8963.2020.88.3.30.35.
- Ayad M. H. K. Position Location Techniques in Wireless Communication Systems. Karlskrona: Blekinge Institute of Technology, 2010. 53 p.
- Dardari D. Indoor Tracking: Theory, Methods, and Technologies / D. Dardari, P. Closas, P. M. Djuric // *IEEE*. 2015. pp. 1263-1278.
- FACT Deliverable D2.3: Final Concepts of Operations [Электронный ресурс]. 2022. – URL: <https://fact.itu.edu.tr> (дата обращения: 17.09.2024).
- Fischer S. «5G NR positioning» // *5G and Beyond*. New York: Springer International Publishing, 2021. № 15. pp. 429-483. DOI 10.1007/978-3-030-58197-8_15.
- Hybrid TOA/AOA-based Mobile Localization With and Without Tracking in CDMA Cellular Networks / V. Zhang, A. Wong, K. T. Woo, W. Ouyang. Clear Water Bay, Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2010. 7 p.
- Mobile Phone Location Determination in Urban and Rural Areas Using Enhanced Observed Time Difference Technique / S. F. Shaikat, M. I. Ansari, R. Farooq, U. Ibrahim // *World Applied Sciences Journal*. 2009. № 6(7). PP. 902-905.
- Sand S. Positioning in Wireless Communications Systems / S. Sand, A. Dammann, C. Mensing. Chichester, West Sussex, United Kingdom : John Wiley & Sons, 2014. 255 c.
- Singh B. A Survey of Cellular Positioning Techniques in GSM Networks / S. Balaram, S. Pallai, S. K. Rath. Bhubaneswar: Utkal University, 2014. 7 p.
- Thorpe M. LTE Location Based Services Technology Introduction / M. Thorpe, E. Zelmer. München: Rohde& Schwarz GmbH & Co KG, 2013. 23 p.

References

- Ayad M. H. K. (2010). Position Location Techniques in Wireless Communication Systems. Karlskrona: *Blekinge Institute of Technology*, 2010. 53 p.
- Dardari D. (2015). Indoor Tracking: Theory, Methods, and Technologies / D. Dardari, P. Closas, P. M. Djuric. *IEEE*. 1263-1278.
- FACT Deliverable D2.3: Final Concepts of Operations. 2.9.2022 Available at: <https://fact.itu.edu.tr>. (accessed 17 September 2024).
- Fischer S. (2021). «5G NR positioning». *5G and Beyond*. 15: 429-483. DOI 10.1007/978-3-030-58197-8_15.
- Fokin G. (2020). Evolution of positioning technologies in 2G-4G networks. Part 1. *The first mile*. 2(87): 32-39. DOI 10.22184/2070-8963.2020.87.2.32.38. (In Russian)
- Fokin G. (2020). Evolution of positioning technologies in 2G-4G networks. Part 2. *The first mile*. 3(88). 30-35. DOI 10.22184/2070-8963.2020.88.3.30.35. (In Russian)
- Map of coverage (2025). Available at: <https://www.a1.by/ru/company/coverage-map>. (accessed 24 January 2025). (In Russian)
- Sand S., Dammann A., Mensing C. Positioning in Wireless Communications Systems. Chichester, West Sussex, United Kingdom : John Wiley & Sons, 2014. 255 p.
- Shaukat S. F., Ansari M. I., Farooq R., Ibrahim U. (2009). Mobile Phone Location Determination in Urban and Rural Areas Using Enhanced Observed Time Difference Technique. *World Applied Sciences Journal*. 6(7): 902-905.
- Singh B., Pallai S., Rath S. K. (2014). A Survey of Cellular Positioning Techniques in GSM Networks. Bhubaneswar: *Utkal University*, 2014. 7 p.
- Skrypnik O. N., Kozich A. A. (2024). Methods of positioning unmanned aircraft in cellular networks. *Aviation Bulletin*. 10: 24-29. (In Russian)
- Thorpe M., Zelmer E. (2013). LTE Location Based Services Technology Introduction. München: *Rohde & Schwarz GmbH & Co KG*, 2013. 23 p.
- Zhang V., Wong A., Woo K. T., Ouyang W. (2010). Hybrid TOA/AOA-based Mobile Localization With and Without Tracking in CDMA Cellular Networks. Clear Water Bay, Hong Kong: *The Hong Kong University of Science and Technology*, 2010. 7 p.