

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.6.12>

УДК: 629.056

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС, РЕАЛИЗУЮЩИЙ ТЕХНОЛОГИЮ LBS-НАВИГАЦИИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

М.Л. Белокопытов¹, Д.А. Шлёнских¹, Д.В. Анохин¹, С.А. Алёхин²

¹Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13

²Войсковая часть 25522 МО РФ,
684400, Камчатский Край, р-н Усть-камчатский, г. Ключи-1

Статья поступила в редакцию 18 мая 2026 г.

Аннотация. В данной статье рассматриваются актуальные вопросы навигационного обеспечения воздушных судов в условиях возрастающей сложности эксплуатации и ограниченной доступности сигналов глобальных спутниковых систем позиционирования (ГЛОНАСС/GPS). Основное внимание уделяется проблеме потери точности навигации из-за блокирования сигналов препятствиями, воздействия систем радиоэлектронной борьбы и специфических условий распространения сигналов в северных широтах. В качестве эффективного решения авторами предлагается разработка и внедрение интегрированной системы навигации, сочетающей инерциальные, спутниковые и современные LBS-технологии (*Location-based services*). В работе подробно описывается созданный авторами макет программно-аппаратного комплекса, реализующий технологию LBS-навигации. Рассмотрены основные методы позиционирования, такие как *Cell of Origin* (COO), *Time of Arrival* (TOA) и *Angle of Arrival* (AOA), однако акцент сделан на использовании метода *Received Signal Strength* (RSS). Описана математическая модель распространения сигнала, алгоритмы трилатерации по трем и более базовым станциям сотовой связи, а также программная реализация комплекса. Авторами проведена апробация работы созданного

макета непосредственно на борту воздушного судна, в ходе которой была произведена оценка точности определения местоположения. В статье приводится сравнительный анализ разработанного комплекса с традиционными спутниковыми приемниками. Выделены ключевые преимущества *LBS*-навигации: высокая устойчивость к средствам радиоэлектронного подавления, низкое энергопотребление и экономическая эффективность оборудования. Результаты исследования подтверждают целесообразность использования геолокационных сервисов как надежного дополнения к существующим авиационным навигационным системам, особенно в труднодоступных регионах и при отсутствии стабильного спутникового сигнала.

Ключевые слова: воздушное судно, навигация, определение положения, геолокационные сервисы, программно-аппаратный комплекс.

Автор для переписки: Белокопытов Марк Львович, hommer@mail.ru

Введение

В задачах мониторинга объектов и навигации воздушных судов (ВС) общим является регулярное оценивание положения с заданной точностью [1-3]. Различие между ними – в конечной цели, для которой делается позиционирование. Использование спутниковых методов для решения этих задач в последние два десятилетия произвело подлинную революцию.

При всей своей привлекательности спутниковое позиционирование на основе *GPS* и ГЛОНАСС имеет ряд недостатков, которые ограничивают их применение [3-4]. Прежде всего – это падение точности из-за уменьшения числа спутников (когда их число становится равным трем или меньшим) или из-за их неблагоприятного расположения относительно наблюдателя (приёмника сигналов). Уменьшение количества доступных спутников чаще всего происходит вследствие:

- блокирования сигналов различными препятствиями;
- ионосферных возмущений;
- воздействия систем радиоэлектронной борьбы.

Особую актуальность эти недостатки спутниковых систем позиционирования приобретают при решении задачи навигации малых ВС в северных широтах, где космические аппараты системы *GPS* практически не доступны пользователям из-за особенностей распространения сигналов в ионосфере и наклонения орбит спутников.

Традиционно пользователи *GPS* и ГЛОНАСС-аппаратуры справляются с этой проблемой двумя путями [5]:

1) используют дополнительные источники навигационных сигналов, совместимые с сигналами глобальных навигационных спутниковых систем;

2) объединяют метод спутниковой навигации с другими методами радионавигационных технологий (например, инерциальными навигационными системами).

Авторы настоящей статьи для повышения точности позиционирования ВС (в условиях отсутствия сигналов от спутниковых систем позиционирования) предлагают использовать службы, основанные на определении положения.

1. Постановка задачи

За последние несколько лет в Российской Федерации начали активно развиваться службы, основанные на определении положения (геолокационные сервисы) – *Location-based services (LBS)*. Эти службы обеспечивают пользователей специфичной, целенаправленной информацией, основанной на местоположении [6-8]. Основными направлениями *LBS*-технологии являются: определение собственного местоположения мобильной станции и определение местоположения удаленной мобильной станции (определение местоположения другого пользователя).

Служба *LBS*, представляющая собой систему беспроводной связи, состоит из трех главных компонентов: мобильных центров переключения (*Mobile Switching Center, MSC*) или оборудования центральной обработки, базовых станций и приёмников сигналов. *MSC* отвечает за взаимодействие с большим числом базовых станций, управление обработкой запроса и составление счетов [9].

Базовые станции являются «линиями связи» между *MSC* и приёмниками сигналов и представляют собой вышки сотовой связи, при этом каждая базовая станция имеет свой уникальный идентификатор – *Cell ID (CID)*. В свою очередь, приёмником сигнала может быть как обычный мобильный телефон, так и специализированное устройство, включающее в себя блок контроля, блок интерфейса, приёмопередатчик и антенную систему.

Когда пользователь (вызывающая сторона) делает запрос, вызываемая базовая станция принимает запрос и передает его запрашиваемому центру *MSC*. Вызванный *MSC* обрабатывает запрос, устанавливает профиль запроса от базы данных и производит соответствующую информацию, доступную *MSC*. Вызывающая сторона получает запрос через вызванную базовую станцию. Связь между *MSC* выполняется через установленную систему сотовой связи.

Для определения положения пользователя с использованием *LBS*-технологии применяются, как правило, методы, основанные на трилатерации, триангуляции и полигонометрии. Среди них наибольшее распространение получили [10]:

1) *Cell of Origin (COO)* – наиболее простой метод, который использует информацию об идентификации ячейки в пределах мобильной телефонной сети для расчёта приблизительного местоположения абонента. Однако, на практике этот практически не применяется ввиду низкой точности позиционирования.

2) *Received Signal Strength (RSS)* – это метод оценки местоположения, который использует значение силы принятого сигнала для вычисления расстояния между опорными маяками и целевым объектом.

3) *Time of Arrival (TOA)* – трилатерация, в которой для вычисления местоположения устройства используется разница во времени принятых сигналов от устройства пользователя до, по крайней мере, трех базовых станций.

4) *Time Difference of Arrival (TDOA)* – мультилатерация, известная также как гиперболическая трилатерация. В данном методе местоположение рассчитывается по разнице во времени получения сигналов. Этот метод аналогичен *TOA*, но не нуждается в синхронизации часов.

5) *Angle of Arrival (AOA)* – триангуляция, метод позиционирования, в котором местоположение определяется по углам и сторонам треугольников, образованных объектом и источниками сигналов.

Работа любого из этих методов основывается на информации от ближайших базовых станций мобильной связи, каждая из которых передаёт свой *CID*. С его помощью приёмное устройство пользователя получает локацию вышки, название оператора сотовой связи и другие данные.

2. Программно-аппаратный комплекс, реализующий технологию *LBS*-навигации ВС

Для повышения точности позиционирования ВС предлагается использовать интегрированную систему навигации с поддержкой *LBS*-технологий. Для этих целей авторы настоящей статьи разработали программно-аппаратный комплекс, работа которого основывается на использовании метода *RSS*.

Алгоритм позиционирования на основе метода *RSS* моделирует распространение сигнала от передатчика к приемнику, на основе чего определяется зависимость значения принятого сигнала от расстояния объект-приемник [11-13]. Простейшей моделью данного метода является модель прямого распространения, учитывающая только затухание сигнала:

$$P(r)_{dBm} = P(r_0)_{dBm} + 10d \log\left(\frac{r_0}{r}\right) + \varepsilon, \quad (1)$$

где $P(r)_{dBm}$ – значение силы принятого сигнала на расстоянии r , $P(r_0)_{dBm}$ – значение силы принятого сигнала на заданном расстоянии r_0 , d – коэффициент затухания сигнала (близок к 2), а ε – добавка, обусловленная внешними факторами и имеющая, соответственно, случайный характер. Как правило, предполагается нормально распределённой величиной [13].

В зависимости от модели распространения сигнала, на приёмном устройстве пользователя измеряется энергия полученного сигнала и затем рассчитывается расстояние между двумя узлами. Чтобы определить расстояние

по измерениям энергии, необходимо классифицировать характеристики канала передачи [14]. Это можно сделать по постоянной или переменной составляющим. Постоянная компонента определяется моделью распространения сигнала, а переменная – целым рядом сложных эффектов распространения. К этим эффектам относятся: затухание сигнала, многолучевость и затенение. Влияние многолучевости на точность синхронизации подлежит дополнительному исследованию и в данной работе не учитывалось.

Для оценки положения приёмного устройства пользователя используются опорные точки в зоне покрытия беспроводной сети с известной геометрией, в качестве которых выступают базовые станции сотовой связи. Для реализации метода необходимо, чтобы приёмник пользователя находился в зоне покрытия трёх и более базовых станций. Каждая опорная точка считается центром окружности, на которой лежит целевой узел. Пересечение этих трех окружностей и будет являться точкой расположения целевого устройства (рисунок 1).

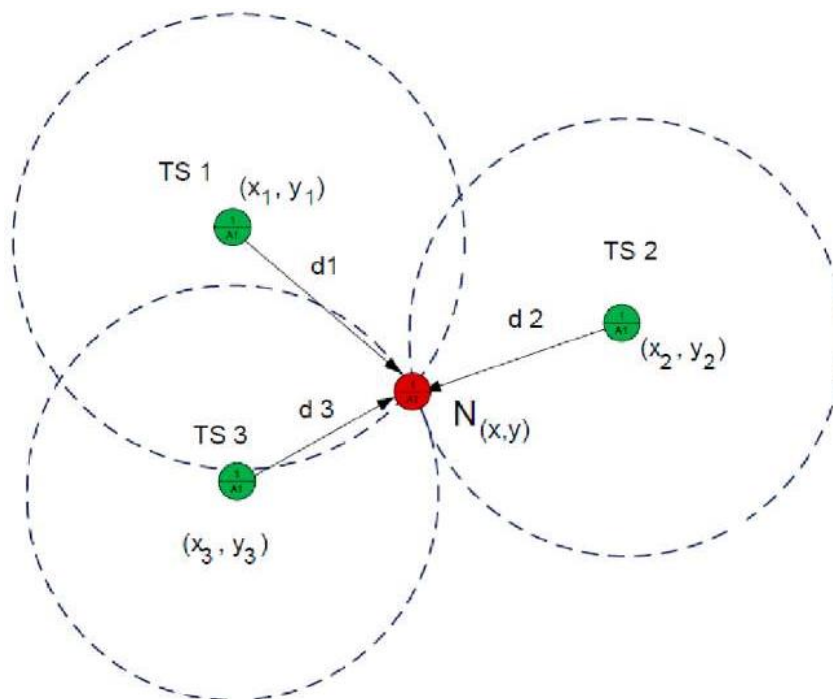


Рис. 1. Схема определения местоположения пользователя с помощью метода *Received Signal Strength*.

На рисунке обозначениям соответствует:

TS – базовая станция;

(x, y) – координаты базовой станции.

Расстояния между опорными точками и целевым узлом (приёмным устройством пользователя) рассчитываются следующим образом [15]:

$$d_i = d_0 \sqrt[n]{\frac{P_0}{P_i}}. \quad (2)$$

Экспоненциальная потеря на пути определяется как [16]

$$\frac{P_r}{P_0} = \left(\frac{d_0}{d_r} \right)^n, \quad (3)$$

где d_i ($i = 1, 2, 3, \dots$) – расстояние между опорным и целевым узлами, d_0 – опорное расстояние, P_r – мощность принимаемого сигнала, P_0 – мощность принимаемого сигнала на расстоянии d_0 , n – коэффициент затухания сигнала различных сред (для свободного пространства $n = 2$). Оценка расстояния цели может быть вычислена из полученных радиусов (рисунок 1).

При проведении расчётов (ввиду отсутствия информации о мощности передатчика конкретной базовой станции) авторами было принято следующее допущение – мощности передатчиков различных базовых станций были приняты за одинаковую величину.

Для экспериментальной проверки метода *Received Signal Strength* был разработан макет специализированного программно-аппаратного комплекса. Архитектура устройства построена по модульному принципу, что обеспечивает гибкость его настройки и возможность модернизации. В состав аппаратной части макета входят следующие ключевые компоненты:

1) GSM-модуль *SIM7000E*, который выступает в роли приемного устройства. Модуль поддерживает стандарты 2G (*GSM 900/1800* МГц), обеспечивая при этом широкий охват территории даже в удаленных зонах. Он отвечает за сканирование радиоэфира, регистрацию в сети и получение служебных параметров соседних сот (*Cell ID*, уровень сигнала *RSSI*, и тд.).

2) Микроконтроллер *ESP8266* (платформа *NodeMCU*), который выполняет функции управляющего ядра. Контроллер осуществляет буферизацию «сырых»

данных от *GSM*-модуля, реализует логику алгоритма пересчета *RSS* в расстояние и управляет периферийными устройствами. Выбор данной платформы обусловлен её высокой производительностью при низком энергопотреблении.

3) Интерфейс индикации – *OLED*-дисплей с разрешением 128x32 пикселей, который предназначен для оперативного вывода диагностической информации, команд и результатов вычислений непосредственно на устройстве.

4) Интерфейс связи – модуль *USB-UART* на базе чипа *CH340*, который обеспечивает возможность подключения макета к персональному компьютеру, что позволяет осуществлять управление устройством посредством *AT*-команд, загружать обновления прошивки и проводить мониторинг данных в реальном времени.

5) Система автономного питания – *Li-Ion* аккумулятор напряжением 3.7 В, который обеспечивает работу макета в полевых условиях без привязки к стационарной сети.

Внешний вид макета программно-аппаратного комплекса представлен на рисунке 2.

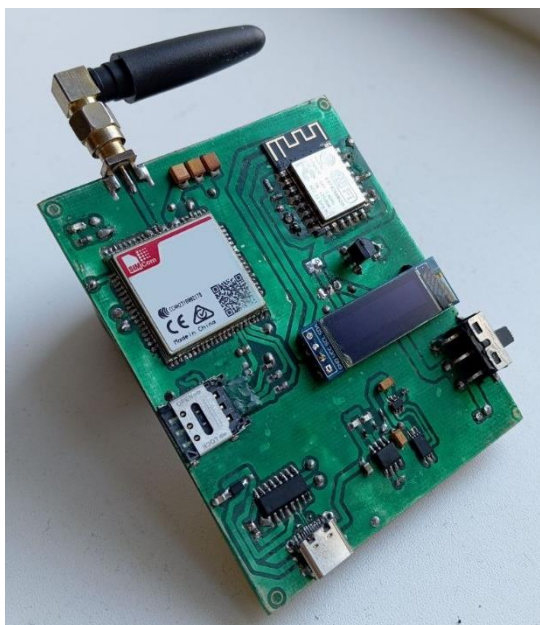


Рис. 2. Внешний вид разработанного макета.

Компактная компоновка элементов позволяет использовать устройство как в стационарных тестах, так и в составе мобильных носителей.

Принципиальная электрическая схема макета, отображающая логические связи между его компонентами, приведена на рисунке 3.

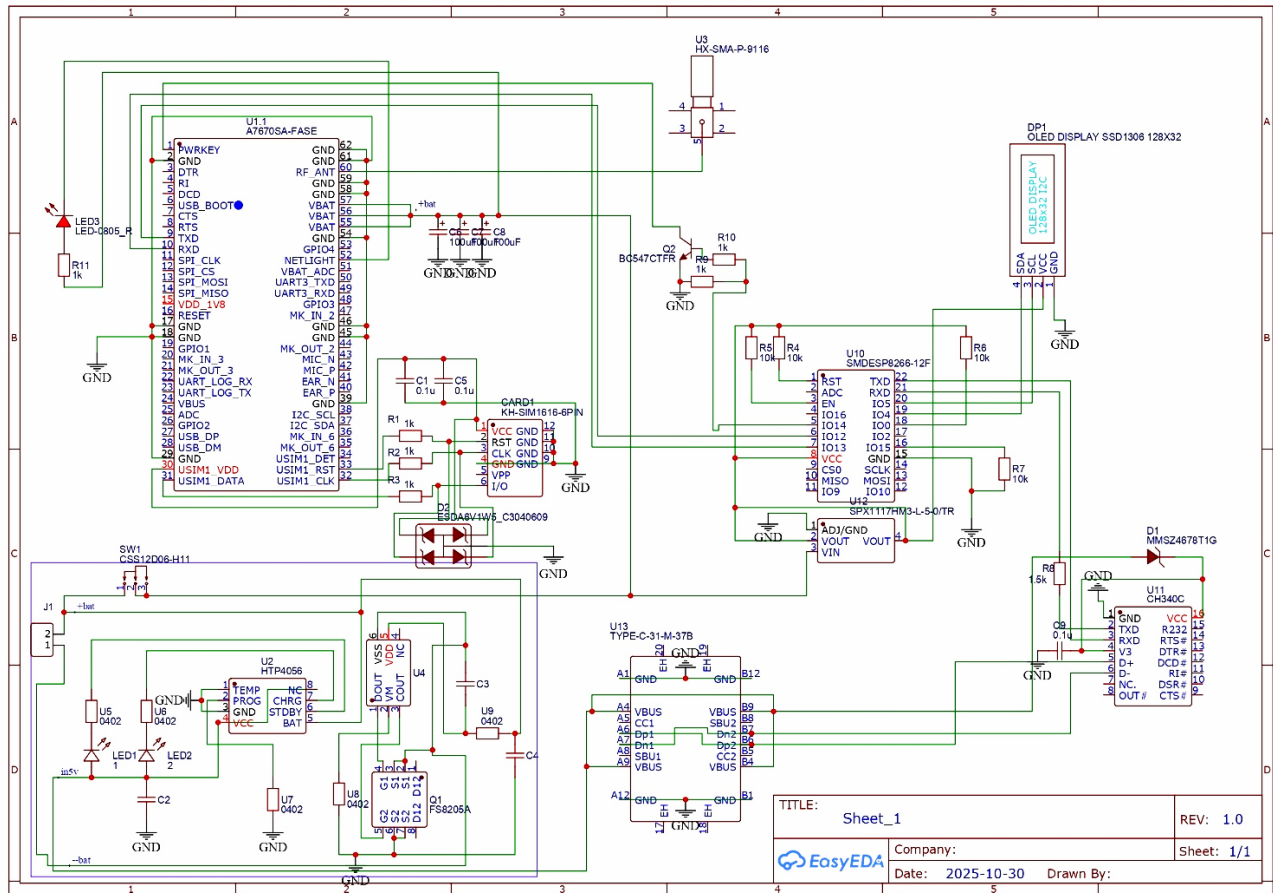


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема макета.

На рисунке 4 приведена схема печатной платы, которая была разработана и произведена авторами макета.

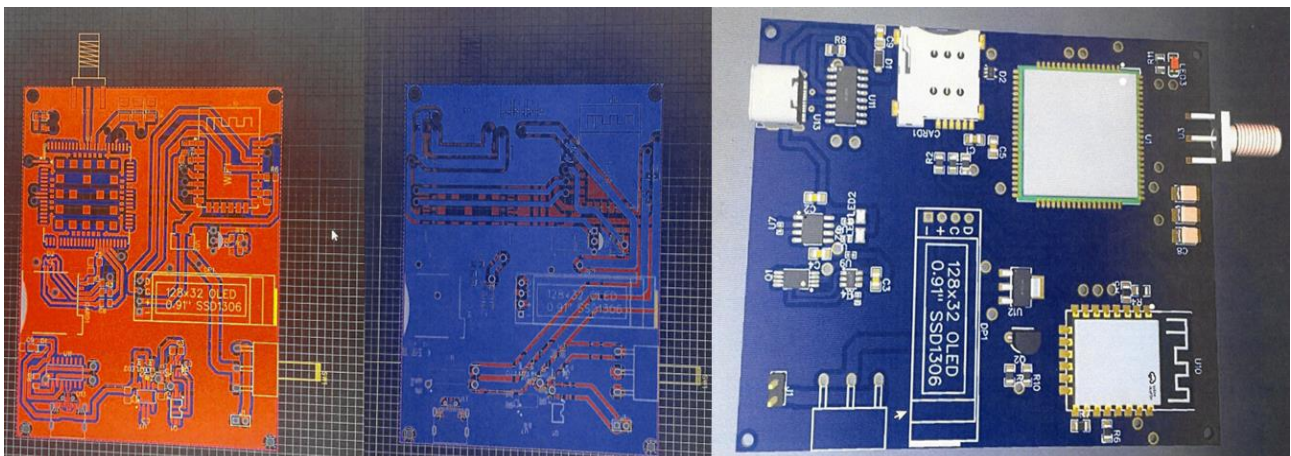


Рис. 4. Схема печатной платы.

На схемах видно, что обмен данными между контроллером *ESP8266* и *GSM*-модемом осуществляется по последовательному интерфейсу, а подключение дисплея реализовано через шину *I2C*, что минимизирует количество задействованных портов ввода-вывода микроконтроллера. Особое внимание при разработке схемы было уделено цепям стабилизации питания, необходимым для корректной работы чувствительного радиотракта модуля *SIM7000E*.

Управление работой комплекса реализовано в виде специализированного программного обеспечения, написанного на языке *C++* в среде *Arduino IDE*. Алгоритм программы включает в себя цикл опроса *GSM*-модуля для получения списка доступных базовых станций и значений их сигналов. Для геопривязки полученных идентификаторов сот (*Cell ID*) используется интеграция с открытой базой данных *OpenCellID.org*. Программа выполняет фильтрацию шумовых выбросов, расчет расстояний на основе принятой модели затухания и формирование итоговой оценки координат объекта.

Разработанный авторами программно-аппаратный комплекс, реализующий технологию *LBS*-навигации, обладает рядом преимуществ относительно *GPS* и ГЛОНАСС. Среди них:

- повышенная помехоустойчивость: сигналы сотовой связи обладают высокой мощностью и распределены по нескольким диапазонам частот, что делает их менее уязвимыми для подавления средствами РЭБ по сравнению с сигналами спутников;

- экономическая эффективность: оборудование для реализации *LBS*-навигации значительно дешевле специализированных авиационных спутниковых приемников;

- энергоэффективность: технология обеспечивает более низкое потребление энергии, что критично для автономных систем малых ВС;

- универсальность: гибкость переключения между сетями (*GSM*, *4G*, *5G*) гарантирует непрерывность получения навигационных данных в зоне покрытия наземных сетей.

Заключение

Усиление возможностей работы спутниковой аппаратуры производится либо путем добавления навигационных сигналов от других систем, либо путем объединения с другими методами определения положения [17-19]. В первом случае в одном приемнике объединяются возможности работать по сигналам *GPS* и ГЛОНАСС или сигналам других спутников. Такие системы получили название систем усиления спутникового базирования (*SBAS*). Зачастую, в них используются дорогостоящие приемники с повышенной чувствительностью, способные определять положение в неблагоприятных условиях.

Во втором случае спутниковый приемник объединяется с другими средствами позиционирования, например с инерциальной навигационной системой, барометром-высотомером, цифровым магнитным компасом и т. д. Однако большая стоимость дополнительных средств позиционирования послужила толчком к появлению специальных служб, основанных на определении местоположения.

Проведенное исследование показало, что использование геолокационных служб, основанных на *LBS*-технологиях, является перспективным направлением для повышения надежности позиционирования ВС. Разработанный программно-аппаратный комплекс, использующий метод оценки мощности принятого сигнала (*RSS*), позволяет определять местоположение объекта путем трилатерации относительно базовых станций сотовой связи. Математическое моделирование и последующая апробация макета на борту воздушного судна подтвердили жизнеспособность предложенного алгоритма.

Таким образом, интеграция *LBS*-технологий в состав бортовых навигационных систем позволяет создать устойчивый резервный канал позиционирования, особенно актуальный для полетов в труднодоступных регионах и условиях активного радиоэлектронного противодействия.

Литература

1. Антонович К.М., Карпик А.П. Мониторинг объектов с применением GPS-технологий // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2004. – № 1. – С. 53-67.
2. Boguspayev N. et al. A comprehensive review of GNSS/INS integration techniques for land and air vehicle applications // Applied Sciences. – 2023. – Т. 13. – № 8. – С. 19-48.
3. Дворкин Б.А. Развитие и современное состояние спутниковых навигационных систем и сервисов. Интеграция технологий ДЗЗ и ГНСС // Геоматика. – 2010. – № 2. – С. 12-18.
4. Wu D. L. Innovation: Recent GPS jamming in regions of geopolitical conflict // GPS World. – 2024. URL: <https://coordinates.net/innovation-recent-gps-jamming-in-regions-of-geopolitical-conflict/> (дата обращения: 27.02.2026).
5. Камбиева Ф.З., Амшоков Б.Х. Анализ различных методов определения координат // Экономика и социум. – 2022. – № 1-1 (92). – С. 460-463.
6. Del Peral-Rosado J. A. et al. Survey of cellular mobile radio localization methods: From 1G to 5G // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2017. – Т. 20. – № 2. – С. 1124-1148.
7. Sidorenko J. et al. Fusion of time of arrival and time difference of arrival for ultra-wideband indoor localization // arXiv preprint arXiv: 1903.00901. – 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1903.00901> (дата обращения: 27.02.2026)
8. Bellabas A. et al. Effects Study of Sensors Placement on the Accuracy of a 3D TDOA-Based Localization System // ICINCO (2). – 2023. – С. 94-100.
9. Максименко В.Н. Методика выбора технологии определения местоположения LBS-услуг // Экономика и качество систем связи. – 2018. – № 1 (7). – С. 59-68.
10. Серегин Д.Р., Белов Ю.С. Технологии локального позиционирования // Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2017. – № 1 – С. 56-61.
11. Махонин В.А, Чудников В.С, Рудаков И.Н. Метод определения координат мобильных абонентов в RTLS // Беспроводные технологии. – 2018. – № 1. – С. 42-44.

12. Тюрин Д.В., Шишанов С.В., Казаков В.В. Оценка координат беспилотных летательных аппаратов с помощью распределенной системы из базовых станций // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2024. – Т. 27. – № 2. – С. 85-90. Т. 27, № 2. С. 85-90. <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2024.27.2.85-90>.
13. Фокин Г.А. Комплекс моделей позиционирования устройств в сетях шестого поколения. Часть 2. Обзор алгоритмов и оценка точности // Труды учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10. – № 5. – С. 50-78. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-5-50-78>.
14. Хыя Х.К., Фокин Г.А., Нгуен Х.Н. Позиционирования устройств в сетях LTE. Часть 2. Исследование влияния топологии базовых станций на точность оценок координат // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2024. – Т. 12. – № 3. – С. 13-28. <https://doi.org/10.31854/2307-1303-2024-12-3-13-28>.
15. Плясовских А.П., Копосов А.В., Давиденко В.Ю. Использование метода TDOA для подтверждения достоверности информации радиовещательного автоматического зависимого наблюдения // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. – 2023. – № 4. – С. 10. https://doi.org/10.51955/2312-1327_2023_4_50.
16. Клочко В.К. Обнаружение движущихся объектов пассивной сканирующей системой // Автометрия. – 2019. – Т. 55. – № 1. – С. 72-79. <https://doi.org/10.15372/AUT20190110>.
17. Дардари Д., Фаллети Э., Луизе М. Методы спутникового и наземного позиционирования. Перспективы развития технологий обработки сигналов. ТЕХНОСФЕРА // Москва. – 2012.
18. Обод И.И., Булай А.Н., Луценко Ю.А. Оценка точности определения местоположения воздушных объектов в синхронных информационных сетях // Системы обработки информации. – 2006. – № 9. – С. 69-71.

19. Разиньков С.Н. Экспериментальные оценки угловых координат и местоположения источников радиоизлучения высокомобильными обнаружителями-пеленгаторами // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2019. – Т. 22. – №. 4. – С. 74-81.
<https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.4.74-81>.

Для цитирования:

Белокопытов М.Л., Шлёнских Д.А., Анохин Д.В., Алёхин С.А. Программно-аппаратный комплекс, реализующий технологию LBS-навигации воздушных судов. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.6.12>