

# АНАЛИЗ ПРОБЛЕМНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Долгов Г.А.

Главный научно-исследовательский испытательный межвидовой  
центр перспективного вооружения, Москва, Россия  
workmail\_dga@mail.ru

*Аннотация.* В статье анализируются перспективные методы автономной навигации малых БЛА в зонах с помехами и ложными данными ГНСС: нейросетевая навигация по рельефу, SLAM на данных от лидаров или стереокамер и альтернативные технологии, обеспечивающие устойчивую и автономную навигацию без спутниковых сигналов.

*Ключевые слова:* автономная навигация, навигация по оптическому потоку, SLAM, ГНСС-спуфинг, ГНСС-джемминг.

## Введение

Современные малые беспилотные летательные аппараты (БЛА) широко применяются в различных сферах – от сельского хозяйства и мониторинга окружающей среды до охраны и военных операций. Ключевым элементом их эффективной работы является надежная система навигации, которая обеспечивает точное определение положения и ориентацию в пространстве. В настоящее время большинство БЛА используют глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), однако они уязвимы к различным видам радиоэлектронного воздействия, в частности, например, к ГНСС-спуфингу – технологии передачи ложных спутниковых сигналов, способных дезориентировать аппарат и вывести его из строя.

В связи с этим возникает необходимость разработки альтернативных методов автономной навигации, способных обеспечить устойчивую работу БЛА в условиях отсутствия или искажения спутниковых сигналов. В статье рассматриваются преимущества и ограничения современных подходов к решению этой задачи, среди которых нейросетевая навигация по подстилающей поверхности на основе анализа особенностей рельефа, метод SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) с использованием, например, LiDAR-данных, обеспечивающих одновременную локализацию и картографирование окружающей среды, а также другие технологии, позволяющие повысить автономность и надежность навигационных систем.

## 1. Проблема джемминга и спуфинга данных ГНСС (Jamming & GPS spoofing)

Одной из ключевых угроз для современных БЛА, в зоне полета с повышенной радиочастотной активностью или особенно в условиях боевого применения, является уязвимость к помехам и «атакам» на сигнал глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Спуфинг (подмена) и джемминг (подавление) сигналов ГНСС (рисунок 1) становятся всё более распространёнными методами радиоэлектронного противодействия, используемыми в вооруженных конфликтах, где ежедневно фиксируются тысячи инцидентов, связанных с искажением навигационных данных [1-2].



Рис. 1. Виды воздействия на ГНСС БЛА

Спуфинг представляет собой технологию, при которой злоумышленник транслирует ложный сигнал ГНСС, замаскированный под настоящий. В результате БЛА может принять этот сигнал за достоверный и изменить своё местоположение, высоту или курс, основываясь на ложных координатах. Джемминг – это форма радиоэлектронного подавления, использующая генераторы помех, излучающие сигнал на той же частоте, что и спутниковый. В результате принимающее устройство ГНСС БЛА теряет способность определять истинные координаты и время. Последствия таких атак варьируются от потери управления до полной «гибели» летательного аппарата. Особенно уязвимыми являются малые БЛА, не оснащённые многоуровневыми системами навигационного резервирования и проверки достоверности сигналов. Спуфинг и джемминг провоцируют отказ инерциальных систем, автопилота и предупреждающих систем.

Ключевой проблемой при реализации спуфинга и джемминга является обеспечение широкого спектра частот (1,1–1,6 ГГц) с достаточной выходной мощностью (сотни ватт – киловатты), чтобы гарантировать надёжное подавление или подмену сигналов ГНСС в радиусе от сотен метров до десятков километров.

Актуальность проблемы подчеркивается широким распространением коммерческих и военных средств радиоэлектронного подавления, а также простотой реализации спуфинга при наличии специализированного оборудования, примеры использующихся комплексов и их характеристики представлены в таблице 1. В этих условиях крайне важно развивать альтернативные и устойчивые методы автономной навигации, не зависящие от спутниковых сигналов.

Таблица 1. Характеристики существующих комплексов радиоэлектронной борьбы

№ пп	Система	Частоты, ГГц	Радиус действий, км	Мобильность
1	CEW-03A (Китай, Алжир)	0,5-400	до 300	Возимый/стационарный комплекс
2	SRC SEAPA (США)	1,1-1,6	до 200	Возимый/стационарный комплекс
3	DRFM Jammer (Израиль)	2,0-18,0	до 100	Возимый комплекс
4	Серп-BC5 (СНГ)	0,3-5,8	до 20	Возимый комплекс
5	Meteksan Seymen (Турция)	1,1-1,6	до 10	Возимый комплекс
6	IDAS (Германия)	0,1-6,0	до 5	Мобильная станция
7	EDM4S (Франция)	0,1-6,0	до 3	Мобильная станция
8	MP809/MP806 (США, Израиль)	0,9-5,8	до 1,0	Носимый комплекс (рюкзак)
9	СКЖ-2205MP6-D (Китай)	0,4-5,8	до 1,5	Носимый комплекс (рюкзак)
10	DroneSentry-X (США)	0,4-5,8	до 1,0	Носимый комплекс
11	C-Guard RJ (Израиль)	0,02-2,5	до 0,5	Носимый комплекс (рюкзак)

Источник: По данным из открытых источников

## 2. Обзор перспективных методов навигации без ГНСС

В отличие от ГНСС-навигации, где ориентация зависит от внешнего источника сигнала, альтернативные технологии основываются на данных от бортовых датчиков и алгоритмах расчета траектории. Современные подходы к навигации можно разбить на две категории: абсолютная локализация (по внешним картам или эталонам) и относительная локализация (наращиваемая по пройденному пути). Развитие технологий искусственного интеллекта и сенсоров позволило выделить несколько перспективных направлений автономной навигации малых БЛА в условиях отсутствия или искажения спутниковых сигналов.

### 2.1. Нейросетевая навигация по подстилающей поверхности

Принцип действия основан на сопоставлении визуального изображения местности, полученного с бортовых камер, с эталонной геопривязанной картой или цифровой моделью местности. На борту БЛА устанавливается камера (часто, направленная вниз) и инерциальный блок (IMU). С помощью нейросетевых алгоритмов (например, таких как SuperPoint, ViT, ORB, LoFTR, SIFT) текущие изображения земли сравниваются с предварительно загруженной геореференцированной картой (спутниковыми снимками или аэроснимками местности). Алгоритм определяет совпадающий участок карты и вычисляет точные геокоординаты аппарата. Описанный принцип реализован, например, в системах типа TERCOM, SITAN и DSMAC (рисунок 2) – которые по изображению подстилающей поверхности выдают координаты полета. Такой метод дает абсолютную (не дрейфующую) позицию, но требует больших вычислений и актуальной карты.

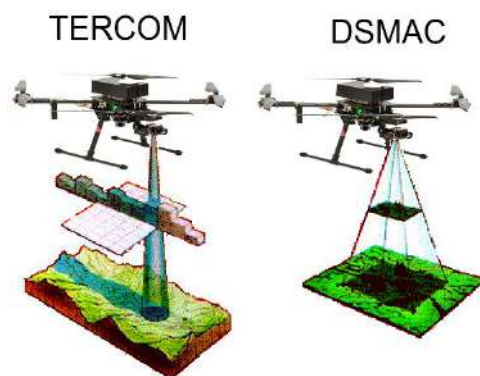


Рис. 2. Пример работы алгоритмов TERCOM и DSMAC

Основные компоненты бортовой системы:

- Высокопроизводительный бортовой вычислитель, имеющий сопряжение с полетным контроллером;
- Инерциальные измерительные системы (IMU), магнитный компас, барометр;
- Камеры (телевизионного диапазона, стерео или мультиспектральные);
- Подготовленные данные цифровой карты и модель нейронной сети, обученная на задаче геопривязки изображений.

Метод обеспечивает высокую автономность в зонах с выраженным рельефом и характерными объектами (горные районы, леса, реки), но требует актуальных карт и устойчивости к изменениям освещения и погодных условий.

## 2.2. Алгоритм SLAM и нейронные модели

Алгоритмы SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) строят карту местности и оценивают траекторию одновременно. При использовании лидаров (2D или 3D) SLAM демонстрирует высокую точность позиционирования в структурированных и закрытых средах. Компоненты системы: лидар, IMU, вычислительное устройство, SLAM-алгоритмы.

Использование современных реализаций алгоритмов SLAM позволяет повысить устойчивость к динамичным объектам и шумам, а также адаптироваться к сложной обстановке. Традиционно для этого применяют методы Iterative Closest Point (ICP), картографирование на графах (Graph-based SLAM) и фильтры Калмана (EKF-SLAM). В последние годы [4] в SLAM интегрируются нейросетевые модели: например, нейросети могут выделять ключевые контуры или классифицировать точки сканирования для более надежного сопоставления. Архитектуры моделей SLAM можно разделить на следующие группы:

- Графовые (DGCNN, RandLA-Net, PointNet и другие);
- Вокселизация (3DCNNDQN-RNN, NeuralRecon, PointPillars и другие);
- Проекция лидарного облака на 2D поверхность (MVCNN, RangerNet, LaserNet и другие).

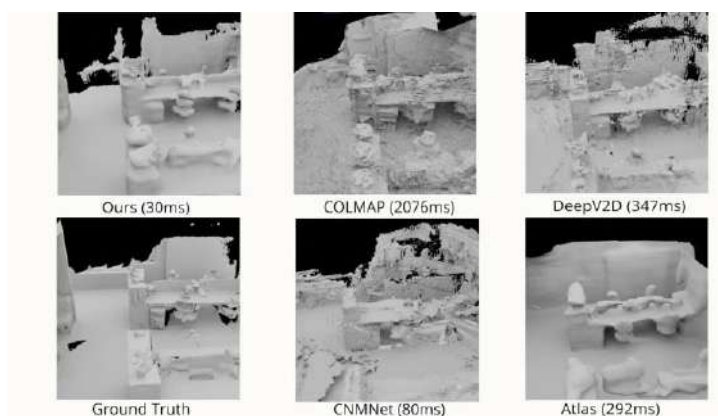


Рис. 3. Сравнение результатов работы алгоритмов реконструирования облака точек пространства

### 2.3. Другие навигационные технологии

К другим системам навигации можно отнести радиолокационные методы и радиометрия. Также один из набирающих популярность способов – сеть ретрансляционных БЛА, использующих трилатерацию на основе RSSI (RSSI-based trilateration). Такой метод в качестве ретрансляторов использует стационарные беспилотники (рисунок 4) (БЛА, закрепленные на месте, использующие наземную станцию питания [5]), находящиеся вне зоны искажающих воздействий. Опционально применяют сверхширокополосную радиолокацию (UWB Radar) для краткосрочной высокоточной локализации [6].



Рис. 4. Наземная станция питания привязных дронов LIGH-T

Альтернативные системы навигации малых БЛА строятся на комбинации: аппаратных датчиков (камеры, LiDAR, IMU, UWB-приемники) и программных алгоритмов (глубокие нейросети для распознавания и сопоставления карт подстилающей поверхности, классические OpticalFlow, фильтры Калмана, методы оптимизации на графах и т.д.). Так, обзорные исследования подчеркивают важность мультисенсорного комплексирования: сочетание визуальной информации, инерциальных данных и LiDAR-SLAM, что позволит значительно улучшить устойчивость навигации в условиях спуфинга и джемминга, например, что отражено в работе [7].

### 3. Проблемы автономной навигации и пути их решения

На сегодняшний день одним из наиболее популярных и эффективно зарекомендовавших себя подходов в области автономной навигации является интеграция открытой платформы ArduPilot или INAV установленной на полетном контроллере БЛА и бортового вычислителя обеспечивающий обработку алгоритмов, описанных в статье. Система ArduPilot предоставляет данные от IMU, барометра, магнитометра и прочих датчиков через протокол MAVLink в бортовой вычислитель, а средства планирования миссий позволяет задавать действия, которые необходимо выполнить БЛА.

В ходе анализа, проведенного по результатам экспериментов и исследований таких систем, были выделены ключевые проблемы и предложены варианты их решения.

#### 3.1. Нейросетевая навигация по подстилающей поверхности

В ходе экспериментальных исследований с системами визуальной навигации, были выделены следующие проблемы:

- Объем данных (тайлы подстилающей поверхности), которые необходимо хранить на бортовом вычислителе и обрабатывать алгоритмом, зависит от требований высоты полета БЛА. Так, по экспериментальным оценкам с оптической навигационной системой для полета на высотах от 50 до 300 м требуется от 4 уровней (zoom) масштаба. Для площади 10 км<sup>2</sup> объем данных спутниковых снимков составляет 163 МБ. Соответственно покрытие большей площадью и высотами работы БЛА будут повышать требование к хранилищу бортовой системы. Оценка объема данных производилась по данным из программы SASPlanet, где подстилающая поверхность была загружена в формате mbtiles (PNG, 50% сжатие), в рамках экспериментальных исследований.
- Точность навигации сильно зависит от количества ключевых точек, попадающих в поле зрения сенсора (Sensor FoV) оптико-электронной системы (ОЭС). Алгоритм также не функционирует, если подстилающая поверхность представляет из себя песчаный покров, сплошной лесной или водный массив.

- В сумерках снижается эффективность работы алгоритма навигации – эксперименты показали, что при освещенности ниже 350 лк (время измерения 18:03; заход солнца в 18:25; наступление темноты в 19:01) количество ключевых точек снижается в разы. В ночное время с ОЭС телевизионного диапазона навигация не работает. К факторам, временно блокирующим работу алгоритма, относятся – туман, облачность, сильный снегопад.

Пути решения:

- Применение бортовых вычислителей с поддержкой SATA/PCI-E накопителей вместо flash и eMMC памяти, повысит эффективность работы нейросетевых алгоритмов и позволит хранить большие объемы геопривязанных фрагментов покрытия.
- Для эффективной работы на малых высотах требуется применять оптическую систему со сверхширокоугольной линзой, для того чтобы увеличить площадь охвата подстилающей поверхности, но при этом необходимо компенсировать оптическое искажение такой линзой.
- Применение комбинации камер телевизионного и тепловизионного диапазона решает проблему навигации в сумерках и ночью. Для реализации работы с такими ОЭС необходима доработка алгоритма, объединяющего ключевые точки с обоих каналов.

Эксперименты с БЛА, алгоритм которого, использует комбинацию нейросети на базе LoFTR, наведения по оптическому потоку (OpticalFlow) и предсказания движения на базе данных от IMU и бортового компаса, показали точность порядка 1-2 м на высотах от 50 до 250 м и скорости движения до 40 км/ч.

### 3.2. Алгоритм SLAM и нейронные модели

Анализ работы систем применяющих сочетание алгоритмов SLAM и нейронную модель показал следующие проблемы:

- 3D-лидары позволяют строить точную карту окружения, но очень дорогие и тяжелые для применений их в малых БЛА. Также у доступных лидаров низкая механическая прочность из-за движущихся частей.
- На большой высоте окружающие объекты кажутся мелкими и размытыми, что ухудшает качество построения карты. В результате оценки положения дрона на основе SLAM могут накапливаться ошибки. При возврате в ранее известную зону неизбежен «дрейф» карты: начальная и конечная точки не совпадают (проблема замыкания контура).
- Визуальный SLAM критичен к освещению и погоде. В условиях слабой видимости (ночь, туман, дымка) или при резких перепадах освещенности система может потерять ориентиры. Лидары, напротив, нечувствительны к освещенности, но плохо работают в условиях, где нет четких отражающих объектов.
- Высокая вычислительная сложность алгоритмов SLAM в сочетании с нейросетевой обработкой результатов. Обработка потоковых данных от камер/лидаров и инференса нейронных сетей требует вычислительной мощности ускорителя на уровне сотен TOPS. Недорогие решения типа Rockchip имеют встроенный NPU всего ~0.8-1 TOPS, Nvidia Jetson – от 67 до 200 TOPS в зависимости от модели. Из-за ограниченной вычислительной мощности встроенных бортовых процессоров – алгоритмы перестают работать в реальном времени без серьезной оптимизации.
- Классические SLAM-подходы предполагают статичную обстановку. Наличие движущихся объектов (людей, машин, животных) нарушает эти условия. Нейронные модели могут попытаться выделять динамичные элементы, но это усложняет систему и увеличивает нагрузку.
- Однообразные участки (пустыня, водный массив) почти не дают особенностей окружения для отслеживания траектории, а в городских районах часто повторяются похожие фасады, что вызывает путаницу при сверке ключевых точек.
- Для обучения нейронных сетей требуется много размеченных данных. Дроны летают в самых разных условиях (высота, ландшафт, погода), и часто отсутствуют репрезентативные датасеты. Из-за этого обученные модели могут плохо работать вне зоны исследовательского полигона.

Пути решения

- В малых БЛА возможно использовать дешевые альтернативы: стереокамеры или ToF (RGB-D) сенсоры. Такие системы дешевле лидара, но уступают ему в дальности и плотности данных. Например, российские компании выпускают готовые решения, объединяющие стереокамеру и вычислительный процессор в одном блоке (рисунок 5).



Рис. 5. Встраиваемый модуль стереозрения SVCam PRO

- Регулярный поиск ранее посещённых мест и оптимизация графа позиций (Pose Graph Optimization) позволяют скорректировать накопленные ошибки при закольцовке траектории (loop closure). В классическом подходе, при обнаружении пересечения траектории, карта перестраивается так, чтобы минимизировать ошибку положения. Нейросети могут улучшить этот алгоритм, например, выделять более устойчивые дескрипторы для сверки изображений или сегментировать динамичные объекты, способны восполнить недостающую информацию и повысить точность локализации.

Эксперименты с модулем стереозрения SVCam PRO установленным на БЛА типа вертикального взлёта и посадки (VTOL) (для выполнения автономного полета на полетном контроллере использовалась система INAV) показал точность позиционирования порядка 5 м. При этом основной проблемой стала loop closure при возвращении БЛА в точку взлета. Из-за чего общая погрешность позиционирования составила порядка 10 м.

### 3.3. Другие навигационные технологии

Ключевые проблемы при использовании RSSI-трилатерации [8-11]:

- Точность оценки расстояния по RSSI зависит от мощности сигнала, многолучевого распространения и отражений от объектов. Измеренный RSSI легко перевести в расстояние через модель распространения, например, модель Фрииса, но это лишь грубая аппроксимация, чувствительная к помехам.
- Требуется хорошо известная геометрия системы. Ретрансляторы должны точно удерживать свою позицию долгое время, что тяжело реализовать, например, в условиях сильных порывов ветра. Также, если не использовать стационарный наземный источник питания, БЛА размером 12” продержится порядка 20 мин, что недостаточно для долговременного сопровождения БЛА.
- Существующие решения на частоте ~900 МГц (LoRa) и мощностью порядка 20 дБм – дают дальность до десятков км на открытом пространстве. На частоте 2.4-5.8 ГГц – дальность сотни метров. Так как существующие решения спуфинга и джемминга (таблица 1) могут легко подавить эти частоты, требуется разработка перестраиваемого приемопередатчика с широким диапазоном частот. Изменение радиообстановки требует постоянного мониторинга подавленных частот, например, сканерами на основе SDR.
- Покрываемая площадь ограничена расположением базовых БЛА. Следует использовать  $\geq 3$  ретрансляторов для триангуляции, оптимально расположенных (большие треугольники или непересекающиеся сетки) для максимальной площади покрытия.
- RSSI можно комбинировать с методом оценки угла пришедшего сигнала (Angle of Arrival – AoA). Для этого необходимо использовать фазированную антенную решетку или несколько приёмников в одной точке (рисунок 6).

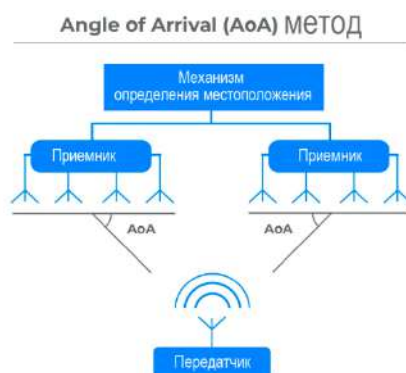


Рис. 6. Метод определения положения объекта по углу принимаемого сигнала (AoA)

- Еще один метод противодействия в таких системах джеммингу – псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ПППЧ). Стоит также заранее составлять радиомаршруты или карты уровня сигнала (RSSI-fingerprinting) на местности и использовать машинное обучение для коррекции оценки положения, сопровождаемого БЛА.

Сверхширокополосная радиолокация (UWB Radar) – использует очень короткие, длительностью менее 1 нс, радиоимпульсы с шириной полосы более 500 МГц в диапазоне 2.8–10.6 ГГц, что позволяет достичь высокой точности позиционирования (десятки дециметров) при устойчивости к многолучевости и переотражениям. Однако есть и существенные ограничения [12-17]:

- UWB метод требует специализированной аппаратуры. Расчёт положения проводится по известным методикам: Two Way Ranging (TWR), Time Difference of Arrival (TDoA) и Phase Difference/Angle of Arrival (PDoA/AoA) [19] (рисунок 7). Предел излучаемой мощности UWB очень низок (около -41.3 дБм/МГц) [18]. Для дальности на 100 км свободное затухание при 6 ГГц (по формуле Фрииса) превышает 148 дБ, следовательно, без соответствующего усилителя и направленных антенн организовать связь невозможно.

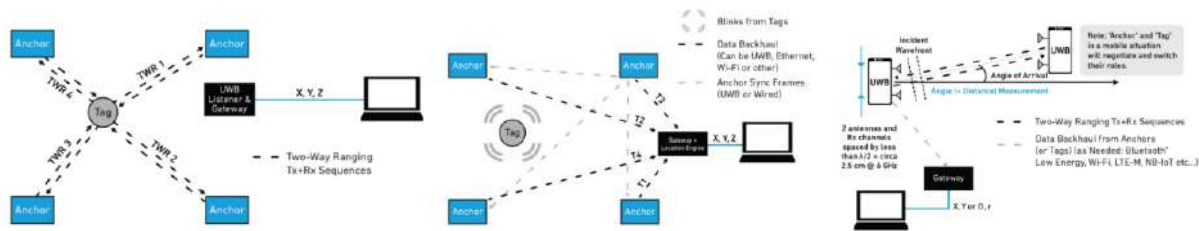


Рис. 7. TWR, TDoA, PDoA методы позиционирования [19]

- UWB-сигнал легко блокируется различными материалами, соответственно, когда сопровождаемый БЛА будет за пределами прямой видимости (LOS), например, за зданием или лесным массивом его позиционирование оказывается невозможным.
- Для TDoA необходима точная синхронизация базовых станций. Ошибка синхронизации даже в наносекундах даёт метры погрешности [19]. Без надёжного «референтного времени» метод TDoA становится неустойчив. Напротив, TWR менее требователен к общей синхронизации, но требует большого обмена сообщениями, что невозможно реализовать при джемминге.
- Приём UWB-импульсов требует высокоскоростных АЦП и/или корреляционных приёмников: нужно точно детектировать появление сигналов. Это приводит к проблемам высокой стоимости оборудования, сложности разработки аппаратуры и ее устойчивости к шуму. Любая нестабильность кварца в тракте приемопередатчика (джиттер) сразу приводит к ошибкам.
- Криптографическая аутентификация (IEEE 802.15.4z). В стандарте 4z введено поле Scrambled Timestamp Sequence (STS) – зашифрованная метка времени передачи. Порядок импульсов в STS задаётся криптографической сессией, поэтому злоумышленник не может предсказать шаблон и корректно подделать данные. Исследования показали, что при правильно реализованном STS-приёмнике достигается защищённое позиционирование (secure ranging). Таким образом такая система устойчива к спуфингу и подмене пакетов, так как атакующему сложно притвориться приемником или базовой станцией.

В настоящее время технология RSSI-трилатерации используется в качестве технологии косвенной (далеко-близко) оценки расстояния до БЛА (например, протокол ExpressLRS на базе модуля LoRa SX1280), но в условиях спуфинга и джемминга использование этого метода ограничено. UWB-навигация обеспечивает высокую точность определения расстояния за счёт методов TWR, TDoA и PDoA, однако требует специализированного оборудования, высокой синхронизации и прямой видимости между БЛА и базовыми станциями. При этом большие дистанции невозможны без направленных антенн и усилителей, а работа вне LOS затруднена из-за экранирования/подавления сигнала. Тем не менее, стандарты IEEE 802.15.4z с криптографической защитой (STS) делают метод с применением UWB устойчивым к спуфингу сигнала.

#### 4. Заключение

В ходе исследования были рассмотрены проблемные направления автономной навигации малых БЛА в условиях отсутствия или искажения ГНСС-сигналов. Анализ показал, что отдельные методы – нейросетевая визуальная навигация, SLAM или радиочастотные технологии (RSSI-трилатерация, UWB

Radar) – имеют ограниченную применимость и чувствительны к внешним условиям, изменениям среды и требованиям к бортовому оборудованию БЛА.

Проблема подмены и подавления сигналов глобальной навигационной системы требует специальной разработки устойчивых автономных навигационных систем. Перспективны мультисенсорные и нейросетевые методы на основе визуальных, лидаров/ToF сенсоров, инерциальных и радиочастотных данных. Единого решения нет, однако их сочетание позволяет компенсировать ограничения каждого подхода и обеспечить надежную работу в условиях подавления и помех.

## Литература

1. How do we ensure GNSS security against spoofing? <https://www.gpsworld.com/how-do-we-ensure-gnss-security-against-spoofing/> (дата обращения 17.05.2024).
2. GPS Spoofing Technical Guide / OpsGroup Working Group // OpsGroup Technical Report. – 2024. – WG2024-OG2. – P. 29.
3. Yang M. et al. Deep Visual Geo-Localization Benchmark // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. IEEE Trans. – 2022. – Vol. 44, № 5. – P. 32–48.
4. Jiaming Sun, Yiming Xie, Linghao Chen, Xiaowei Zhou, Hujun Bao. NeuralRecon: Real-Time Coherent 3D Reconstruction from Monocular Video // arXiv. – 2021. – arXiv:2104.00681. – P. 25.
5. Наземная станция бесперебойного питания привязных дронов. <https://www.pergam.ru/catalog/cctv/oem/elistair-light.htm> (дата обращения 18.05.2025).
6. Kramaric L, Jelusic N, Radisic T, Mustra M. A Comprehensive Survey on Short-Distance Localization of UAVs // Drones. – 2025. – P. 28.
7. Jarraya I, Al-Batati A. S., Kadri M. B., Abdelkader M., Ammar A., Boulila W. and Koubaa A. Gnss-denied unmanned aerial vehicle navigation: analyzing computational complexity, sensor fusion, and localization methodologies // Satellite Navigation. – 2025. – Vol. 6, Article № 9. – P.32.
8. Yucer S., Tektas F., Kilinc M.V., Kandemir I., Celebi H., Genç Y.S.A. RSSI-based outdoor localization with single unmanned aerial vehicle // arXiv preprint. – 2020. – № 2004.10083. — P. 10.
9. Michalak J. Location Accuracy of Terrestrial Radio Sources as a Function of the Increasing Number of RSSI Measurements Performed by a Simple UAV // Communications of the IBIMA. 2024. – Vol. 2024, Article 388963. – P. 11.
10. Quoc Duy Vo, Pradipta De. A Survey of Fingerprint-Based Outdoor Localization // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – P. 18.
11. Mengxing Pan, Yunfei Li, Weiqiang Tan, Wengen Gao. Drone-Assisted Fingerprint Localization Based on Kernel Global Locally Preserving Projection // Drones. – 2023. – P. 22.
12. Salimpour A., et al. Exploiting redundancy for UWB anomaly detection in infrastructure-supported multi-robot localization // Sensors. 2023. – Vol. 23, Issue 12. – Article 417. – P. 22.
13. Wang X., et al. Ranging With Ultra-wideband Signals in Multipath Environments // IEEE Trans. Wireless Commun. – 2010. – Vol. 9, № 4. – P. 1304–1315.
14. Großwindhager B., Rath M., Kulmer J., et al. SALMA: UWB-based Single-Anchor Localization System using Multipath Assistance // Proc. ACM/IEEE IPSN. – 2018. – P. 12.
15. Morón F.J., et al. Building ToF Resiliency Into UWB-Based Secure Distance Bounding // IEEE Trans. Information Forensics and Security. – 2023. – Vol. 18, Issue 5. – P. 1245–1257.
16. Ismail M.I.M., Dzyauddin R.A., Samsul S., et al. An RSSI-based Wireless Sensor Node Localisation using Trilateration and Multilateration Methods for Outdoor Environment // arXiv. – 2019. – № 1912.07801. – P. 8.
17. AlHajri M., Goian A., Darweesh M., et al. Accurate and Robust Localization Techniques for Wireless Sensor Networks // arXiv. – 2018. – № 1806.05765. – P. 142.
18. Unlocking the Future: How UWB Is Reshaping Secure Access in the Connected World. <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/unlocking-the-future-how-uwband-is-reshaping-secure-access-in-the-connected-world#:~:text=Unlike%20traditional%20amplitude%20or%20frequency,Fi>. (дата обращения 24.05.2025).
19. Qorvo. Getting Back to Basics with Ultra-Wideband (UWB) // White Paper. — Beaverton, OR: Qorvo, Inc., – May 2021. – P. 10.