



Научная статья

УДК 629.056.8

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187456>

EDN: <https://www.elibrary.ru/IOVKXV>

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

**А.В. Азаров<sup>✉</sup>, О.С. Макаров, Д.А. Туров**

Московский институт радиотехники, электроники и автоматики — Российский технологический университет,

г. Москва, Россия

✉ [andrey\\_91@bk.ru](mailto:andrey_91@bk.ru)

---

**Цитирование:** Азаров А.А., Макаров О.С., Туров Д.А., Дифференциальные методы в спутниковой навигации // Труды МАИ. 2026. № 146. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187456>

---

**Аннотация.** Глобальные навигационные спутниковые системы включают в себя различные части, такие как станции управления, станции мониторинга Земли и космоса, мобильные навигационные системы. Основными результатами работы глобальной навигационной спутниковой системы являются определение времени, местоположения и контроль навигационных методов. На основе процедуры подхода с вертикальным наведением локальные и глобальные спутниковые навигационные системы используются для позиционирования и точного подхода в авиации вместо современных инструментальных системы посадки так как инструментальные системы посадки имеют ошибки в позиционировании и измерении скорости. Дифференциальные поправки определяются с помощью одной или нескольких опорных станций. Концепция одиночной опорной станции проста, но точность определения положения ниже. В данной статье сравниваются методы коррекции ошибок дифференциальных систем.

**Ключевые слова:** глобальная навигационная спутниковая система, спутник, навигация, дифференциальные системы, рефракция, навигационный сигнал, космический аппарат

---

# DIFFERENTIAL METHODS IN SATELLITE NAVIGATION

A.V. Azarov✉, O.S. Makarov, D.A. Turov

Moscow Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation — Russian  
Technological University, Moscow, Russia

✉[andrey\\_91@bk.ru](mailto:andrey_91@bk.ru)

---

**Citation:** Azarov A.V., Makarov O.S., Turov D.A. Differential methods in satellite navigation // Trudy MAI. 2026. No. 146. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187456>

---

**Abstract.** Global navigation satellite systems include various parts, such as control stations, Earth and space monitoring stations, and mobile navigation systems. The main results of the global navigation satellite system are the determination of time, location and control of navigation methods. Based on the vertical guidance approach procedure, local and global satellite navigation systems are used for positioning and precision approach in aviation instead of modern instrumental landing systems, as instrumental landing systems have errors in positioning and speed measurement. Differential corrections are determined using one or more reference stations. The concept of a single support station is simple, but the accuracy of position determination is lower. This article compares the methods of error correction of differential systems.

**Keywords:** global navigation satellite system, satellite, navigation, differential systems, refraction, navigation signal, spacecraft

---

## Введение

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), включая американскую Глобальную систему позиционирования (GPS), российскую ГЛОНАСС, европейскую Galileo и китайскую Beidou (также называемую COMPASS), а также несколько региональных навигационных спутниковых систем, представляет собой технологию связи в диапазоне L, обеспечивающую высокоточную, непрерывную и всепогодную передачу данных реального времени. Земли. Эти характеристики ГНСС предполагают все более широкое применение и потенциал. Каждый космический аппарат (КА) ГНСС непрерывно передает радиосигналы на двух или более частотах в L-диапазоне (1-2 ГГц) с длиной волны

около 20 см. Прямые сигналы используются для навигации, позиционирования и определения времени. Метод объединения лимбовых измерений и данных наземных ГНСС-сетей позволяет получать высокоточные профили тропосферного водяного пара, недостижимые при использовании каждого метода в отдельности, температуры и давления, параметров тропопаузы, а также ионосферного полного содержания электронов (ТЭС) и профиля электронной плотности.[1,2] По отраженным сигналам ГНСС от поверхности океана и суши можно определить высоту океана, скорость и направление ветра на поверхности океана, влажность нефти, толщину льда и снега. Таким образом, преломленные и отраженные сигналы GPS позволяют получать информацию о состоянии земной поверхности в качестве нового, высокоточного, непрерывного, всепогодного и близкого к реальному времени инструмента дистанционного зондирования, который будет играть ключевую роль в различных видах зондирования атмосферы, дистанционного зондирования океана и картографирования суши/гидрологии.

### **Сигналы системы ГНСС**

ГНСС состоит из космического сегмента с группировкой спутников на средней околоземной орбите (МЕО) на высоте около 20 000 км и выше, сегмента управления со станциями мониторинга и контроля для мониторинга/контроля/обновления группировки спутников и пользовательского сегмента, состоящего из приемников для определения положения, скорости и времени (PVT) статичного и мобильного пользователя по всему земному шару в любое время с использованием не менее четырех спутников группировки в поле зрения[1].

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) — это совокупность независимых спутниковых систем, включая американскую GPS, российскую ГЛОНАСС, европейскую Galileo и китайскую Beidou. Каждая из этих систем является самостоятельной ГНСС, обладающей собственной орбитальной группировкой, управляющей инфраструктурой и пользовательским сегментом.

Первоначально развитие ГНСС было инициировано США (GPS) и СССР (ГЛОНАСС), а позднее к ним добавились европейская (Galileo) и китайская (Beidou)

системы. Несмотря на различия в архитектуре и стандартах сигналов, все четыре системы выполняют схожие функции: предоставление глобального покрытия, определение координат, скорости и времени (PVT), а также поддержку дифференциальных методов коррекции.

На 2025 год в мире действуют четыре глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), обеспечивающие покрытие по всему миру (рисунок 1).

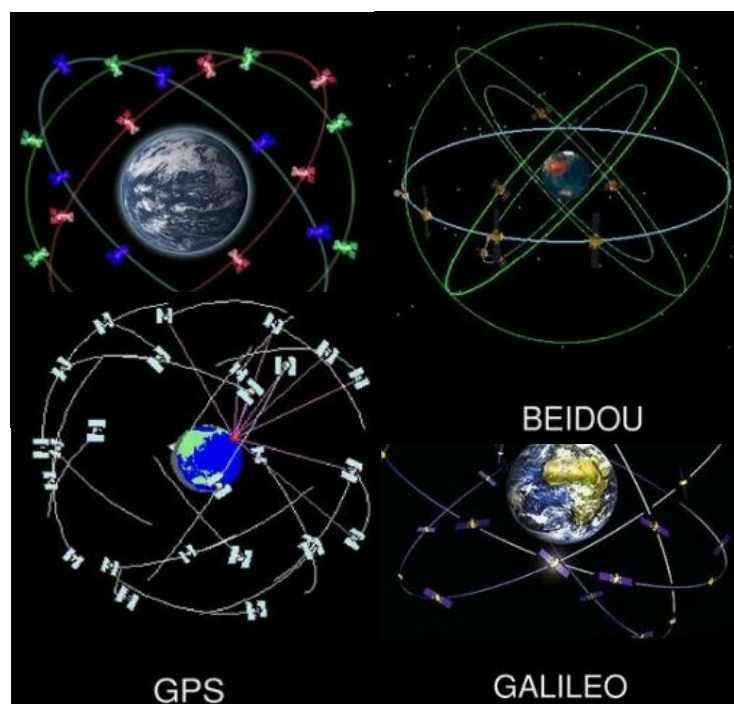


Рисунок 1 – Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС).

В качестве эталонной архитектуры для сравнительного анализа часто рассматривается GPS, поскольку данная система исторически была первой полностью развернутой глобальной навигационной спутниковой системой и имеет наиболее подробно документированную структуру в научной литературе [2]. Однако современные системы, такие как Galileo и BeiDou, также обладают полной функциональностью и в некоторых аспектах превосходят GPS по точности и надежности [3]. Анализ современных глобальных навигационных систем показал их значительную структурную и функциональную схожесть, которая проявляется в следующих аспектах:

Орбитальные характеристики: большинство глобальных навигационных систем (GPS, Galileo) используют средневысотные круговые орбиты (MEO)

высотой около 20 000-23 000 км с периодом обращения приблизительно 12 часов и наклоном  $\sim 55^\circ$ . Российская система ГЛОНАСС отличается более высоким наклоном орбит ( $64,8^\circ$ ) и меньшей высотой (19 100 км). Особенностью китайской системы BeiDou является использование комбинированной орбитальной группировки, включающей:

- 24 МЕО-спутника (высота 21 528 км, наклонение  $55^\circ$ )
- 3 геостационарных спутника (GEO)
- 3 спутника на наклонных геосинхронных орбитах (IGSO)

Такая архитектура обеспечивает BeiDou повышенную точность позиционирования в Азиатско-Тихоокеанском регионе. Рабочие частоты: основной диапазон излучения сигналов составляет 1–2 ГГц; срок активного функционирования спутников варьируется в пределах 10–15 лет.

Сравнительный анализ ключевых характеристик современных ГНСС выявил следующие принципиальные различия между системами:

Конструктивные параметры космических аппаратов:

- Масса спутников варьируется от 700 кг (Galileo) до 1405 кг (ГЛОНАСС-М);
- Габариты отличаются на 30-40% между системами;
- Срок активного существования: от 7 до 15 лет;

Геодезические основы:

Используемые референц-эллипсоиды:

- GPS: WGS 84
- ГЛОНАСС: ПЗ-90
- Galileo: GTRF
- BeiDou: CGCS2000

Различия в системах координат достигают 0.5-1.2 м

Методы модуляции:

- GPS: BPSK, MBOC
- ГЛОНАСС: FDMA+BPSK
- Galileo: AltBOC, CBOC
- BeiDou: QPSK, AltBOC

Форматы навигационных сообщений несовместимы между системами.

Частотные планы имеют принципиальные отличия.

Дифференцирующие факторы:

- точность позиционирования (от 1 до 5 м для гражданских пользователей),
- поддерживаемые сервисы (SBAS, аутентификация и др.),
- стратегии обновления и модернизации систем.

В таблице 1 представлен всесторонний обзор конструктивных особенностей всех эксплуатируемых космических аппаратов в сетях ГНСС. Из таблицы видно, что большинство этих систем демонстрируют тенденцию к увеличению срока службы своих космических аппаратов в ответ на неблагоприятные условия окружающей среды.

Таблица 1

Параметры космических аппаратов различных систем

Группировка	Действующие космические аппараты	Срок активного существования, лет	Масса на орбите, кг	Габариты, м
GPS	GPS Block IIR	10	1126,7	1,58 × 1,96 × 2,21
ГЛОНАСС	«Глонасс-М»	7	1405	2,71 × 3,05 × 2,71
	«Глонасс-К2»	10	1600	2,53 × 6,01 × 1,43
Galileo	Galileo IOV	12	700	3,02 × 1,58 × 1,59
Beidou	BeiDou-3 MEO	12	1100	5,0 × 2,0 × 2,28

Кроме того, с каждым новым поколением спутников во всех четырёх основных глобальных навигационных системах (GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou) наблюдается устойчивая тенденция к увеличению массы космических аппаратов [4].

Это связано с:

1. Включением резервных систем:

- дублирование критических компонентов,
- добавление новых функциональных модулей.

2. Модернизацией полезной нагрузки:

- установка более точных атомных часов,
- добавление новых частотных каналов,
- улучшение антенных систем.

Для примера:

- Масса спутников GPS III (1630 кг) на 45% больше, чем у GPS IIF (1126 кг);
- Спутники ГЛОНАСС-К2 (1600 кг) тяжелее ГЛОНАСС-М (1405 кг) на 14%;
- Galileo второго поколения планируется на 20% массивнее текущих аппаратов.

### Космический сегмент

Состоит из группировки спутников, оснащенных навигационной полезной нагрузкой, точными атомными часами, навигационными антеннами и другими подсистемами: тепловой, двигательной, определения ориентации и управления орбитой (AODC), слежения, телеметрии и управления (TT&C) и энергетической подсистемой. Созвездие спроектировано с учетом того, что любой земного шара должно быть доступно не менее четырех спутников [5,6] Навигационные КА расположены в разных плоскостях, чтобы обеспечить наилучшее геометрическое разведение точности (GDOP), параметр геометрии КА. Для группировки спутников выбраны средние околоземные орбиты (МЕО) высотой 20000 км, что обусловлено значительной стоимостью запуска и глобальным покрытием.

В таблице 2 приведены средние параметры круговой орбиты для всех действующих систем.

Таблица 2

Параметры средних круговых орбит ГНСС

Система	Количество КА	Тип орбиты	Высота орбиты, км	Количество плоскостей	Период	Наклонение
GPS	31	МЕО	20200	6	11 ч 58 мин	55°
ГЛОНАСС	24	МЕО	19100	3	11 ч 15 мин 44 с	64,8°
Galileo	28	МЕО	23222	3	14 ч 4 мин 45 с	56°
Beidou	35	МЕО: 24 ГЕО: 3 ИГСО: 3	МЕО: 21 528 ГЕО: 35 786 ИГСО: 35 786	3	МЕО: 12 ч 53 мин ГЕО/ИГСО: 23 ч 56 мин	МЕО: 55.0° ИГСО: 55.0° ГЕО: 0.0°

## **Сегмент управления**

Состоит из главного центра управления, а также нескольких станций мониторинга и телеметрических антенн, разбросанных по всему земному шару, для выполнения следующих основных задач:

- измеряет положение каждого спутника и контролирует его ориентацию и орбиту;
- контролирует сигналы, передаваемые спутниками;
- отправляет информацию на спутники правильного выравнивания часов;
- отправляет информацию на спутники для навигационного сообщения.

## **Пользовательский сегмент**

Состоит в основном из ГНСС-приемников, которые обрабатывают сигналы, полученные со спутников, и определяют положение пользователя. Функции, общие для любого типа приемников, можно свести к идентификации спутников в поле зрения, оценке расстояния между пользователем и спутником и триангуляции.

## **Сегмент аугментации**

Сегмент аугментации (дополнения) ГНСС включает функциональные подсистемы, улучшающие точность, надежность и доступность навигационных сервисов.

Основные типы дополнений:

### **1. Спутниковые системы дополнения (SBAS):**

- WAAS (США)
- EGNOS (ЕС)
- MSAS (Япония)
- SDCM (Россия для ГЛОНАСС)
- GAGAN (Индия)

### **2. Дифференциальные системы:**

- Локальные (LDGNSS): псевдолиты, наземные маяки
- Региональные (DGPS, ГЛОНАСС-КРТК)
- Глобальные (GDGPS)

### 3. Гибридные решения:

- Интеграция с системами связи (LTE, 5G)
- Датчики дополненной реальности
- Квантовые стандарты времени

### 4. Особенности SDCM для ГЛОНАСС:

- 3 геостационарных спутника "Луч"
- Коррекция ионосферных ошибок
- Мониторинг целостности сигналов
- Совместимость с международными SBAS

## Сигналы ГНСС

Спутники GPS непрерывно передают правосторонние циркулярно поляризованные сигналы с навигационным сообщением и кодами дальности, модулированные на двух несущих частотах микроволнового диапазона L, т. е. L1 ( $f_1=1,57542$  ГГц,  $\lambda_1\approx 19,0$  см) и L2 ( $f_2=1,2276$  ГГц,  $\lambda_2\approx 24,4$  см). Начиная с 2006 года, в рамках модернизации GPS, на спутниках GPS нового поколения стали передаваться два новых сигнала гражданского назначения L2C (частота L2, C обозначает гражданское лицо) и L5 ( $f_{L5}=1,17645$  ГГц,  $\lambda_{L5}\approx 25,5$  см).[7] Современные спутники GPS III F (с 2023 года) и Galileo второго поколения уже передают навигационные сигналы на частоте L1C (1575.42 МГц), которая специально разработана для гражданских пользователей [8]. Этот сигнал использует усовершенствованную модуляцию MBOC и обеспечивает:

- совместимость между GPS, Galileo и BeiDou,
- улучшенное подавление помех,
- повышенную точность позиционирования.

Навигационное сообщение включает в себя данные эфемерид, используемые для расчета положения отдельного спутника GPS на орбите в момент передачи сигнала, и данные альманаха с информацией о времени и состоянии всего спутникового созвездия. С другой стороны, код дальности позволяет приемнику пользователя определить время прохождения (или распространения) сигнала и тем самым определить дальность связи между спутником и пользователем. В

современных глобальных навигационных системах применяются различные методы множественного доступа:

1. CDMA (кодовое разделение) - используется в:

- GPS (все поколения)
- Galileo (все спутники)
- BeiDou-3 (новое поколение)

Принцип: Каждый спутник передает на одной частоте с уникальным PRN-кодом

2. FDMA (частотное разделение) - применяется в:

- ГЛОНАСС (традиционная схема)

Принцип: Каждый спутник использует отдельную частоту в L1/L2 диапазонах

3. Гибридный доступ - реализован в:

- ГЛОНАСС-К (новые спутники с CDMA+L1OC/L2OC)

Особенности: Совмещение FDMA и CDMA технологий

Для ГЛОНАСС важно учитывать:

- Только спутники серии "К" (ГЛОНАСС-К1/К2) поддерживают CDMA
- Основная группировка (ГЛОНАСС-М) работает исключительно на FDMA
- Полный переход на CDMA запланирован после 2025 года

Оба сигнала L1 и L2 модулируются псевдослучайным кодом точного определения дальности (P-код), формула 1 и 2. Несущий сигнал L1 также модулируется кодом грубого/точности (C/A) дальности для гражданского использования. P-код может быть зашифрован как так называемый P(Y), который доступен только военному оборудованию с соответствующим ключом дешифровки. Сигналы L1 и L2, принимаемые с каждого спутника GPS, можно выразить следующим образом [9] (Spilker 1980):

$$S_{L1}(t) = \sqrt{\frac{2C_{C/A}}{A}} D(t) X(t) \sin(2\pi f_1 t + \theta_1) + \sqrt{2C_{P1}} D(t) P(t) \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) \quad 1$$

$$S_{L2}(t) = \sqrt{2C_{P2}} D(t) P(t) \cos(2\pi f_2 t + \theta_2) \quad 2$$

где C/A и CP1 - принятые мощности синфазной и квадратурной составляющих сигнала L1, соответственно, CP2 - принятая мощность сигнала L2, D(t) амплитудная модуляция для L1 и L2, содержащая навигационные данные, X(t) - псевдослучайная последовательность  $\pm 1$ , известная как четкий прием или C/A-код

модулирующая синфазную составляющую L1 с частотой 1.023 МГц, а P(t) - псевдослучайная последовательность  $\pm 1$ , известная как P-код, модулирующая квадратурную составляющую L1 и L2 на частоте 10,23 МГц. C/A-код и P-код являются примерами PRN-кодов. Каждый спутник передает уникальную последовательность C/A-кода и P-кода (на тех же частотах L1 и L2), и поэтому спутник может быть идентифицирован по его "номеру PRN", например PRN2 или PRN14 — это конкретные спутники GPS.

Технология CDMA позволяет приемнику распознавать несколько спутников на одной и той же частоте с разными PRN. GPS-приемник определяет амплитуду, псевдодальность и фазу для каждого сигнала C/A, L1 P-кода (P1) и L2 P-кода (P2). Сигналы C/A и P1 содержат идентичную информацию, однако C/A предпочтительнее P1 из-за его большей мощности и отсутствия шифрования. Обратите внимание, что псевдодальность — это абсолютное измерение дифференциальной групповой задержки между временем передачи и приема. Она представляет собой сумму фактической дальности между передатчиком и приемника, атмосферные и ионосферные задержки и смещения часов передатчика и приемника. [10]

Параметры сигналов ГНСС, представленные в Таблице 3, имеют критическое значение для проектирования приемников.

Таблица 3

Параметры сигналов ГНСС

Система	Перевозчик	Модуляция	Множественная адресация
GPS	L1/L2/L5 L1C/L2C	BPSK/BOC/MBOS/QPSK	CDMA
Galileo	E1/E5/E6 E5a/E5b	BOCe/CBC Alt BOC BPSK	CDMA
ГЛОНАСС	L1/L2/L3	BPSK/QPSK	FDMA/CDMA
Beidou	B1/B2/B3	МВОС/ВОС Alt BOC QPSK	CDMA

Так:

- выбор BPSK/QPSK в ГЛОНАСС ограничивает спектральную эффективность, но упрощает аппаратную реализацию;
- AltBOC в Galileo E5 обеспечивает широкополосность (51 МГц), повышая точность дальнометрии;
- совместимость GPS L1C и BeiDou B1 по модуляции MBOC снижает взаимные помехи в двухсистемных приемниках.

Эквивалентные ошибки пользователей ГНСС определяются как ошибки в вычислениях PVT, тремя сегментами архитектуры ГНСС. В космическом сегменте источником ошибки может быть стабильность спутниковых часов, возмущения спутника или селективная доступность (отключена в мае 2001 года). В сегменте управления возникают такие ошибки, как предсказание эфемерид, а сегменте пользователя основная часть ошибок связана с ионосферной задержкой, тропосферной задержкой, шумами приемника, многолучевостью, позиционированием внутри помещений или в городских каньонах [11].

На рисунке 2 схематично представлено влияние многолучевого распространения на сигналы ГНСС:

1.Элементы схемы:

- прямые сигналы (сплошные линии от GPS1-GPS6 к приемнику),
- отраженные сигналы (пунктирные линии от зданий/рельефа),
- приемник (точка в центре),
- локальные отражающие объекты (условные здания).

2.Ключевые эффекты:

- для спутников GPS1-GPS4: минимальные отражения,
- для GPS5-GPS6 (низкий угол места),
- удлиненный путь отраженных сигналов,
- максимальная задержка ( $\Delta t \approx 10-50$  нс),
- интерференция прямого/отраженного сигналов.

3.Обозначения:

- Красным: критические отражения

- Черным: стандартные сигналы
- Серым: препятствия

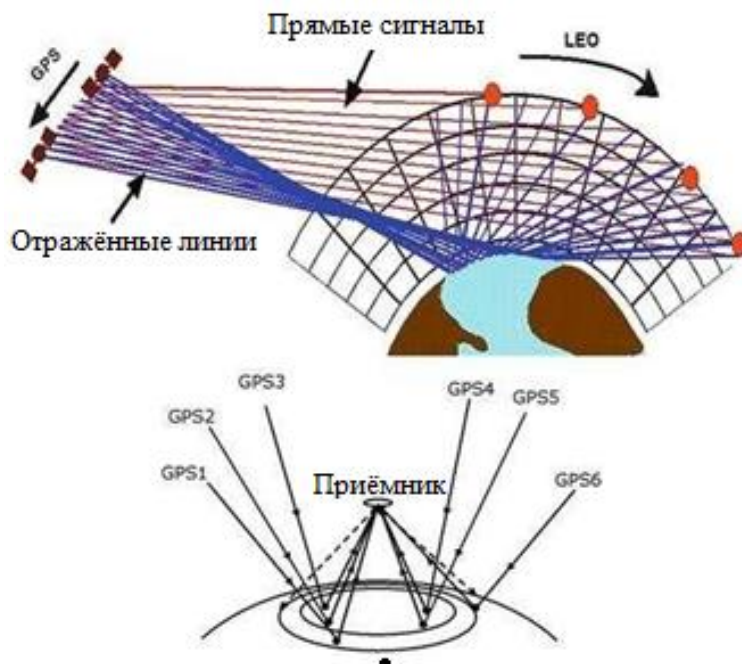


Рисунок 2 - Преломленные и отраженные сигналы ГНСС и геометрия

Спутниковая составляющая ошибки в системах глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) включает, главным образом, орбитальную погрешность и ошибку спутниковых часов. Орбитальная погрешность обусловлена воздействием возмущающих сил, ограниченным числом и пространственным распределением станций мониторинга, а также точностью определения орбитальных параметров. Величина данной ошибки может составлять от 1,5 до 7 м. Для её снижения применяются методы уточнения орбитальных данных, включая дифференциальные и относительные методы, позволяющие ограничить погрешность до уровня порядка 1 м [12].

Ошибка спутниковых часов связана с несинхронностью между временем, отсчитываемым часами спутника, и эталонным временем ГНСС. Такие отклонения могут достигать 1 мс, что эквивалентно ошибке определения расстояния до 300 км. Коррекция данной погрешности осуществляется посредством применения моделей ошибок времени и непрерывных измерений со стороны наземных станций. В результате эквивалентная ошибка может быть снижена до уровня порядка 6 м. Дополнительное уменьшение остаточной ошибки возможно с

использованием дифференциальных технологий и прецизионных методов синхронизации.

Распространение сигнала в системах глобальной навигации сопровождается рядом ошибок, существенно влияющих на точность навигационных определений. К числу наиболее значимых относятся ионосферная и тропосферная рефракции, а также ошибки, обусловленные многолучевым распространением сигнала.

Ионосферная рефракция представляет собой систематическое отклонение, вызванное прохождением сигнала через плазменную среду с переменной электронной плотностью. Амплитуда данной ошибки зависит от солнечной активности, геомагнитной обстановки, времени суток и географической широты. Ошибка обратно пропорциональна квадрату несущей частоты сигнала. Учитывая высокую степень изменчивости ионосферных условий, точное предсказание и компенсация этой погрешности требуют применения соответствующих методов. Наиболее эффективным средством уменьшения ионосферного влияния является использование двухчастотных приёмников, позволяющих вычислять и устранять ошибку по разности фаз на различных частотах. В условиях дифференциального позиционирования возможно применение моделей ионосферных задержек, формируемых на основе наблюдений базовой станции, что обеспечивает повышение точности до уровней, приемлемых для задач высокой прецизионности.

Тропосферная рефракция, обусловленная замедлением сигнала в плотных слоях атмосферы, также приводит к систематическим погрешностям. Амплитуда ошибки варьируется в зависимости от температуры, давления и влажности воздуха. Для её коррекции используются эмпирические и численные атмосферные модели, уточняемые с помощью данных локальных метеонаблюдений. В дифференциальных ГНСС-системах влияние тропосферы эффективно компенсируется за счёт пространственной корреляции задержек, что особенно актуально при малых базисах между станцией и подвижным приёмником.

Многолучевая ошибка возникает вследствие отражения навигационного сигнала от окружающих объектов и регистрации приёмником как прямого, так и отражённого сигнала. Это приводит к фазовым сдвигам и искажению измерений.

Точная модель многолучевой погрешности затруднена в силу неопределённости геометрии отражающих поверхностей и их свойств. Для её минимизации применяются конструктивные меры, в частности, антенны с подавлением боковых лепестков (например, антенны с кольцом подавления), а также оптимальное размещение антенн в местах с минимальным уровнем отражений. Дифференциальные методы позволяют частично устранить систематические составляющие многолучевых ошибок, особенно в условиях стационарных или медленно меняющихся окружений.

К числу внутренних (приёмных) источников ошибок в системах ГНСС относятся погрешности, связанные с приёмником и его аппаратно-программным обеспечением. Основными из них являются: погрешность измерения псевдодальности, ошибка синхронизации внутренних часов приёмника, а также систематические смещения, обусловленные положением фазового центра антенны.

Погрешность измерения псевдодальности во многом определяется техническими характеристиками приёмника, включая разрешающую способность аналоговых и цифровых трактов, алгоритмы обработки сигнала, а также точность установки и юстировки антенны. Неправильное ориентирование или нестабильность установки антенны может вносить дополнительные смещения в измерения.

Ошибка часов приёмника возникает из-за несовпадения времени, отсчитываемого внутренними часами приёмного устройства, с эталонным временем ГНСС. Поскольку приёмник не содержит высокостабильного генератора, данная ошибка учитывается как дополнительный параметр в уравнении псевдодальности и может быть устранена в процессе обработки. Особенно эффективно эта ошибка нивелируется при использовании дифференциального подхода, когда синхронизация по отношению к базовой станции позволяет компенсировать временные расхождения.

Погрешность, связанная с фазовым центром антенны, возникает вследствие смещения между геометрическим центром антенны и её реальным фазовым центром. Это смещение зависит от направления прихода сигнала и может

варьироваться в зависимости от условий установки и характеристик антенны. Величина эквивалентной ошибки в определении расстояния может составлять от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Для её компенсации применяются предварительно определённые калибровочные модели фазового центра антенн, а также методы относительного (дифференциального) позиционирования, позволяющие устранить постоянные составляющие смещений.

Таким образом, совокупность рассмотренных внутренних и внешних источников погрешностей — от многолучевой составляющей до ошибок часов и смещений фазового центра антенны — определяет фундаментальные ограничения автономного позиционирования в системах ГНСС. При том что часть этих ошибок может быть уменьшена конструкторскими решениями и калибровочными моделями, полностью устранить их влияние исключительно средствами приёмного оборудования невозможно. Значительная доля погрешностей носит систематический характер и проявляется сходным образом для пространственно близких приёмников. Это обстоятельство открывает возможность их существенного подавления за счёт использования внешней опорной информации. Наиболее развитым и практически применимым подходом к такой компенсации являются дифференциальные методы, которые обеспечивают повышение точности путём выделения и устранения общей составляющей навигационных ошибок. Рассмотрим их развитие и принципы функционирования более подробно.

### **Дифференциальные системы**

В ряде ранних навигационных систем, предшествующих современным ГНСС, позиционирование осуществлялось с использованием геостационарных спутников. В системах типа GEOSTAR сигнал передавался от наземной станции к пользователю через геостационарный спутник, после чего пользовательское оборудование осуществляло обратную передачу сигнала тем же путём. Главная наземная станция, принимая двусторонние данные, определяла координаты пользователя по результатам измерений дальности, в ряде случаев дополняя

расчёты информацией о высоте, полученной от барометрических датчиков. Именно данная схема двухстороннего позиционирования легла в основу китайской программы Twin-Star, которая в дальнейшем эволюционировала в первую фазу национальной спутниковой системы BeiDou-1.

Подобные принципы были реализованы и в коммерческих навигационно-коммуникационных системах. В 1988 году американская компания Qualcomm запустила систему OmniTRACS, предназначенную для определения местоположения и передачи телеметрических данных, прежде всего в сфере управления автотранспортом. Европейский аналог — система EutelTRACS — функционировал в сотрудничестве с Европейской организацией спутниковой связи (Eutelsat). Обе системы базировались на архитектуре, аналогичной GEOSTAR: сигнал дальности передавался от наземной станции к пользователю и обратно через геостационарный спутник, а координаты вычислялись на основе анализа временных задержек. Для повышения точности в систему OmniTRACS была интегрирована подсистема Qualcomm Automatic Satellite Position Reporting (QASPR), а также приёмники сигналов ГНСС, позволявшие комбинировать результаты двухстороннего позиционирования с данными спутниковых наблюдений. Данные о местоположении передавались в центр обслуживания по двустороннему каналу связи [18].

Использование дифференциального метода основано на сравнении измеренных и вычисленных псевдодальностей между спутниками и приёмниками, один из которых (референцный) размещается в точке с известными координатами. Вычисленные на его основе поправки передаются подвижному приёмнику для устранения общих погрешностей, включая ионосферные и тропосферные задержки, а также ошибки спутниковых эфемерид и часов. Схема функционирования дифференциальной ГНСС-обработки представлена на рисунке 3.

Ограничения по точности, возникшие из-за политики избирательной доступности (Selective Availability, SA) в системе GPS, стимулировали развитие методов дифференциальной коррекции. Несмотря на последующую отмену SA,

дифференциальные технологии остаются актуальными, так как позволяют существенно повысить точность и надёжность позиционирования.

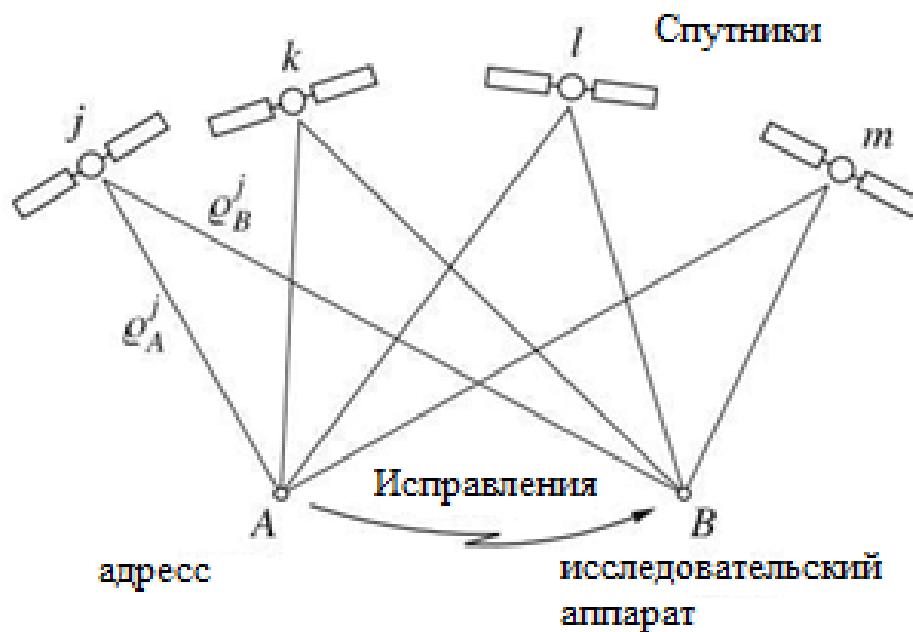


Рисунок 3 - Основная концепция дифференциального позиционирования

Базовый принцип дифференциальной ГНСС состоит в использовании двух или более приёмников: один из них располагается в известной фиксированной точке (референцной станции), а другой — на подвижном объекте (пользовательский приёмник). Зная точные координаты опорной станции и орбитальные параметры спутников, вычисляется истинная дальность до спутника, которая затем сравнивается с измеренной [19]. Полученное расхождение используется в виде дифференциальных поправок, передаваемых на пользовательское оборудование. Эти поправки позволяют устранить или значительно уменьшить ошибки, обусловленные погрешностями спутниковых эфемерид, ионосферной и тропосферной рефракцией, а также ошибками синхронизации [5].

Все ошибки в измерениях псевдодальности условно делятся на три основные группы:

1. ошибки, обусловленные параметрами спутника;
2. ошибки распространения сигнала в атмосфере;
3. ошибки приёмного оборудования.

ГНСС-технология наиболее эффективно компенсирует первые две группы ошибок.

Вариант с одной референционной станцией прост в реализации, но чувствителен к расстоянию между базовой и пользовательской станциями: точность ухудшается по мере увеличения базиса. Приёмник получает поправки по выделенному каналу связи.

Сетевые ГНСС-системы, основанные на множественных референционных станциях, обеспечивают более равномерное покрытие и высокую точность на обширной территории. В этом случае каждая станция определяет дифференциальные поправки, которые затем объединяются и передаются пользователям. Основными недостатками сетевой реализации являются возрастание стоимости, усложнение архитектуры и увеличение задержек в передаче поправок, обусловленных сетевой связью и необходимостью синхронизации [6].

Существует три основных подхода к вычислению дифференциальных поправок: подход, основанный на решении; подход, основанный на измерениях; и подход, основанный на модели состояния.

В подходе, основанном на решении, разница между известным положением опорной станции и её измеренным положением передаётся на пользовательский приёмник. Эти данные позволяют скорректировать координаты приёмника при условии, что он использует те же спутники и модели атмосферных воздействий. Однако при наличии локальных помех или увеличении расстояния между приёмником и опорной станцией возникает риск рассогласования созвездия спутников, что снижает точность. Данный подход характерен для систем с одиночной референционной станцией [13].

В подходе, основанном на измерениях, сравниваются измеренные и вычисленные псевдодальности. Вычисляются поправки псевдодальности (PRC) и поправки скорости дальности (RRC), которые приёмник использует для корректировки собственных измерений. Эти поправки могут быть как результатом среднего по сети опорных станций, так и вычислены с одной референционной станции. При использовании одной станции точность

позиционирования снижается с увеличением расстояния от неё — в среднем на 1 см на каждый километр. Кодовые псевдодальности обеспечивают точность на уровне метра, фазовые псевдодальности — субметровую и даже субдециметровую точность в реальном времени на расстояниях до 20 км. Однако фазовый подход требует разрешения фазовых неоднозначностей, что возможно при наличии двухчастотных приёмников. Такие системы именуются LADGNSS (локальные дифференциальные системы).

В подходе, основанном на пространстве состояний, используется сеть опорных станций для моделирования различных источников ошибок (например, орбитальных и часовых) и передачи параметров модели на пользовательский приёмник [20]. Это особенно актуально для систем дополнения и методов точного позиционирования точек (PPP), в которых используются точные эфемериды и поправки спутниковых часов. Для учёта ионосферных задержек применяются двухчастотные приёмники и сетка вертикальных задержек [17]. Такой подход требует высокой плотности опорной сети и используется в WADGNSS-системах (широкозонные дифференциальные системы). Примеры алгоритмов представлены в работах Мюллера и Ки.

### **Примеры дифференциальных систем**

Дифференциальные GNSS-системы, реализованные различными операторами, существенно отличаются по структуре референчных сетей, технологиям передачи корректирующей информации, типам используемых поправок и достигаемой точности [14]. Коммерческие сервисы Fugro (OmniSTAR, SkyFix, StarFix), отраслевые решения John Deere (StarFire), высокоточная глобальная сеть NASA JPL (GDGPS), а также национальные DGNSS-сервисы (APOS, SAPOS, EUPOS) демонстрируют широкий спектр архитектурных подходов — от простого DGPS до фазовых методик PPP и RTK [15]. Для систематизации ключевых характеристик и обеспечения наглядного сравнения их возможностей представлены в таблице 4, включающая сведения о типах референчных станций, используемых каналах передачи поправок, составе корректирующих данных, а также уровне точности и областях применения [16].

## Основные характеристики современных дифференциальных ГНСС-систем

Система	Референсная сеть	Канал передачи поправок	Используемые данные	Точность	Применение
OmniSTAR (Fugro)	~100 наземных станций	Геостационарные спутники L-диапазона (1531–1559 МГц)	RTCM-поправки, WADGNSS; фазовые методы и PPP для высокоточных уровней	1 м (VBS), ~20 см, до 10 см	Геодезия, сельское хозяйство, наземная навигация
SkyFix / StarFix (Fugro)	~100 наземных станций	GEO-спутники L-диапазона	Дифференциальные поправки с технологическим резервированием	Дециметровая, сантиметровая	Морская навигация, оффшорные работы
StarFire (John Deere)	60 глобальных станций, 2 центра управления	Спутники Inmarsat	Точные орбиты, поправки часов; двухчастотная обработка	< 1 м	Прецизионное сельское хозяйство, геодезические задачи
GDGPS (NASA JPL)	Глобальная сеть двухчастотных приёмников	Интернет (до 1 Гц), перспективно TDRSS (S-band)	Точные эфемериды, поправки часов; устранение ионосферных ошибок	Субметровая (RT), до сантиметров	Научные миссии, мониторинг, спутниковое слежение
Национальные DGNSS-сети (APOS, SAPOS, EUPOS)	От 40 до 870 станций (SAPOS ~270, EUPOS ~870)	УКВ, GSM/LTE, Интернет	DGPS, RTK, PPP-постобработка; многоуровневые сервисы	Сантиметровая (RTK), дециметровая (DGPS)	Геодезия, кадастр, инженерный мониторинг, навигация

### Заключение

Проведенный анализ методов дифференциальной коррекции в глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС), охватывающих GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou, позволил сформулировать ряд ключевых положений относительно их архитектурных особенностей, методологических преимуществ, практической эффективности и перспективных направлений развития. В части архитектурных особенностей установлено, что системы DGNSS обеспечивают повышение точности позиционирования: при использовании кодовых измерений достигается точность в диапазоне 0,5–1,2 м, а при реализации фазовых решений (например, в системах OmniSTAR, StarFire) — 5–15 см. Достижение высокой точности обусловлено функционированием сетей, включающих не менее трех референчных станций, использованием двухчастотных приемников и

применением технологии кинематики реального времени (RTK). Методологические преимущества выражаются в том, что технология локальной дифференциальной коррекции (LADGNSS) обеспечивает точность 30–50 см в радиусе до 50 км, в то время как системы широкозонной дифференциальной коррекции (WADGNSS) демонстрируют точность 10–20 см на расстояниях до 100–150 км. Использование гибридных сетевых решений, таких как EUPOS, приводит к снижению общих системных ошибок на 40% по сравнению с автономными системами. Практическая эффективность методов подтверждается сокращением ионосферных ошибок на 70–85% при использовании двухчастотных измерений, снижением уровня многолучевых ошибок до 60% за счет применения специализированных антенн и устранением орбитальных ошибок до 90% посредством сетевых моделей. К перспективным направлениям развития относятся интеграция квантовых эталонов времени для достижения точности до 1 см, внедрение алгоритмов искусственного интеллекта для прогнозирования ошибок и разработка унифицированных межсистемных протоколов для повышения эффективности совместного использования данных от различных ГНСС.

Данное исследование актуально для специалистов в области ГНСС, проектировщиков оборудования и разработчиков навигационных решений, предлагая систематизированные подходы к выбору технологий в зависимости от области применения — от геодезии до авиационной ориентированная оценка коммерческих систем коррекции.

Дальнейшие исследования планируется направить на разработку адаптивных алгоритмов коррекции для городских условий с интенсивной многолучевостью.

---

### **Конфликт интересов**

Авторы данной статьи заявляют об отсутствии конфликта интересов. Исследование выполнено в рамках академической деятельности Московского института радиотехники, электроники и автоматики (РТУ МИРЭА). Результаты работы, касающиеся сравнения методов коррекции ошибок дифференциальных

спутниковых навигационных систем и их применения в авиации, не зависят от коммерческих интересов каких-либо организаций или личных заинтересованностей авторов. Никакие финансовые или иные взаимоотношения не оказали влияния на объективность представленного материала и выводы исследования.

### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest. The study was conducted within the academic framework of the Moscow Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation (RTU MIREA). The results concerning the comparison of error correction methods for differential satellite navigation systems and their application in aviation are independent of any commercial interests or personal biases of the authors. No financial or other relationships influenced the objectivity of the presented material and the conclusions of the study.

### **Список источников**

1. Неровный В. В., Коратаев П. Д., Облов П. С., Толстых М. Ю. Функционирования навигационной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем в условиях воздействия имитирующих помех // Труды МАИ. 2024. № 139

2. Конструктивно-технологические основы унификации параметров цельнометаллических баллонов высокого давления в ракетно-космическом машиностроении / В. А. Тарасов, А. В. Бараев, А. С. Филимонов [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2014. – № 5. – С. 70 – 84.

3. Унификация элементов устройства отделения космических аппаратов / А. С. Вехов, С. И. Немчанинов // Материалы XXI Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения». – 2017. – Т. 1. – С.101– 103.

4. Ракетные технические средства геофизического мониторинга, их развитие и возможность / Ю. А. Матвеев, А. А. Позин, В. М. Шершаков // Общероссийский научнотехнический журнал «Полет». – 2017. – № 8.– С. 26 – 31.

4. Малышев Г.В. Проектирование автоматических космических аппаратов.

Вероятностные методы анализа / Г. В. Малышев, Х. С. Блейх, В. И. Зернов. – Москва : Машиностроение, 1982. – 152 с.

5. Задача определения рациональной программы модернизации Космической системы дистанционного зондирования Земли на планируемый период / Ю. А. Матвеев, В. А. Ламзин, В. В. Ламзин // Журнал АИР Материалы конференции 2171. – 2019.

6. Прогнозирование программы модернизации космической системы дистанционного зондирования Земли и создания модификаций космических аппаратов в планируемый период / Ю. А. Матвеев, В. А. Ламзин, В. В. Ламзин [и др.] // Журнал АИР Материалы конференции 2318. -2021.

7. Автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого функционирования космических систем ДЗЗ/ В. В. Дарнопых, И. В. Усовик, // Труды МАИ. – 2010. – Том 49. – № 65. – С. 607 – 614.

8. Метод прогнозных исследований эффективности модификаций космических аппаратов с заменой интегрированных подсистем / Ю. А. Матвеев, В. А. Ламзин, В. В. Ламзин // Исследования солнечной системы. – 2016. – Том 50. – № 7. – С. 604 – 610.

9. Основы проектирования модификаций космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / Ю. А. Матвеев, В. А. Ламзин, В. В. Ламзин. – Москва: Издательство МАИ. – 2015. – 176 с

10. Основные направления развития зарубежных оптикоэлектронных космических систем дистанционного зондирования Земли (обзор)/ К. А. Занин, И. В.Москатиныйев // Вестник НПО имени С. А. Лавочкина. – 2019. – № 2/44. – С. 28 – 36.

11. Чистяков В.А. Моноимпульсный радиопеленгатор с использованием цифровой антенной решетки// Труды МАИ. 2020. № 115.

12. Аппаратура высокого разрешения для перспективного космического аппарата «Ресурс-ПМ» / А. И. Бакланов, В. Д. Блинов, И. А. Горбунов [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2016. – Т. 15. – № 2. – С. 30 – 35

13. Разработка систем космических аппаратов / Под ред. П. Фортескью, Г. Суайнерда, Д. Старка; пер. с англ. – Москва: Альпина Пабlishер, 2015. – 765 с.
14. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли/ Н. Н. Севастьянов, В. Н. Бранец, В. А. Панченко [и др.] // Труды МФТИ. – 2009. – Т. 1. – № 3.
15. Принципы построения сверхширокополосного канала связи на беспилотном летательном аппарате вертолетного типа легкого класса / К.Д. Титов // Труды МАИ. 2022 - №122
16. Оптимизация широкополосной фазированной антенной решётки с вибраторными излучателями / В. А. Цветков, С. Г. Кондратьева // Труды МАИ. – 2019. – № 108.
17. Лифанов А.С. Определение движущихся объектов на одноантенной радиолокационной системе с синтезированной апертурой // Труды МАИ. 2003. № 11
18. Неровный В. В.1, Коратаев П. Д.1, Облов П. С.1, Толстых М. Ю. Функционирования навигационной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем в условиях воздействия имитирующих помех// Труды МАИ. 2024. № 139
19. Седелников А. В., Чугунков Е. В., Танеева А. С. Самодиагностика информационно-измерительной системы малого космического аппарата с высоким уровнем погрешностей измерителя угловой скорости// Труды МАИ. 2035. № 143
20. Артюшин А. А., Кирюшкина А. С., Григорьев Д. П., Сухачев К. И. Разработка многоцелевого модульного блока питания для бортовой космической аппаратуры// Труды МАИ. 2025. № 143

### **References**

1. Nerovny V. V., Korataev P. D., Oblov P. S., Tolstykh M. Yu. Functioning of navigation equipment for consumers of global navigation satellite systems under the influence of simulated interference// Proceedings of MAY 2024, No. 139.
2. V. A. Tarasov, A.V. Baraev, A. S. Filimonov [Structural and technological foundations of the unification of parameters of all-metal high-pressure cylinders in

rocket and space engineering [and others] // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. "Mechanical Engineering". – 2014. – No. 5. – pp. 70-84.

3. Unification of the elements of the spacecraft separation device / A. S. Vekhov, S. I. Nemchaninov // Proceedings of the XXI International Scientific and Practical Conference "Reshetnev Readings". – 2017. – Vol. 1. –pp.101-103.

4. Rocket technical means of geophysical monitoring, their development and possibility / Yu. A. Matveev, A. A. Pozin, V. M. Shershakov // All-Russian Scientific and Technical Journal Polet. 2017. No. 8. pp. 26-31. 4. Malyshev G.V. Design of automatic spacecraft. Probabilistic methods of analysis / G. V. Malyshev, H. S. Bleikh, V. I. Zernov. Moscow : Mashinostroenie Publ., 1982. 152 p.

5. The task of determining a rational program for the modernization of the Space system of remote sensing of the Earth for the planned period / Yu. A. Matveev, V. A. Lamzin, V. V. Lamzin // AIP Journal Materials of the conference 2171. – 2019.

6. Forecasting the program for the modernization of the space system of remote sensing of the Earth and the creation of modifications of spacecraft in the planned period / Yu.A. Matveev, V. A. Lamzin, V. V. Lamzin [and others] // AIP Journal Conference Proceedings 2318. -2021.

7. An automated software package for parametric analysis and optimization of planning for the targeted functioning of remote sensing space systems/ V. V. Darnopykh, I. V. Usovik, // Proceedings of MAI. – 2010. – Volume 49. – No. 65. – pp. 607-614.

8. Method of predictive studies of the effectiveness of spacecraft modifications with the replacement of integrated subsystems / Yu. A. Matveev, V. A. Lamzin, V. V. Lamzin // Solar system research. – 2016. – Volume 50. – No. 7. – pp. 604-610.

9. Fundamentals of designing modifications of spacecraft for remote sensing of the Earth / Yu. A. Matveev, V. A. Lamzin, V. V. Lamzin. Moscow : MAI Publishing House. 2015. 176 p.

10. The main directions of development of foreign optoelectronic space systems for remote sensing of the Earth (review)/ K. A. Zanin, I. V. Moskatinev // Bulletin of NPO named after S. A. Lavochkin. – 2019. – No. 2/44. – pp. 28-36.

11. Chistyakov V.A. Monopulse radio direction finder using a digital antenna array// Proceedings of MAY 2020. No. 115.

12. High-resolution equipment for the promising spacecraft "Resurs-PM" / A. I. Baklanov, V. D. Blinov, I. A. Gorbunov [et al.] // Bulletin of the Samara State Aerospace University. – 2016. – Vol. 15. – No. 2. – pp. 30-35
13. Development of spacecraft systems / Edited by P. Fortescue, G. Swinerd, D. Stark ; translated from English – Moscow : Alpina Publisher, 2015. – 765 p.
14. Analysis of modern possibilities of creating small spacecraft for remote sensing of the Earth/ N. N. Sevastyanov, V. N. Branets, V. A. Panchenko [et al.] // Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology, 2009, vol. 1, No. 3.
15. Principles of building an ultra-broadband communication channel on an unmanned aerial vehicle of a light-class helicopter type / K.D. Titov // Proceedings of MAY 2022 - No. 122
16. Optimization of a broadband phased array antenna with vibrator radiators / V. A. Tsvetkov, S. G. Kondratieva // Proceedings of MAI. – 2019. – No. 108.
17. Lifanov A.S. Determination of moving objects on a single-antenna radar system with a synthesized aperture // Proceedings of MAI. 2003. № 11
18. Nerovny V. V.1, Korataev P. D.1, Oblov P. S.1, Tolstykh M. Yu. Functioning of navigation equipment for consumers of global navigation satellite systems under the influence of simulated interference// Proceedings of MAY 2024, No. 139
19. Sedelnikov A.V., Chugunkov E. V., Taneeva A. S. Self-diagnosis of the information and measurement system of a small spacecraft with a high error rate of the angular velocity meter// Proceedings of MAY 2035, No. 143
20. Artyushin A. A., Kiryushkina A. S., Grigoriev D. P., Sukhachev K. I. Development of a multipurpose modular power supply for on-board space equipment// Proceedings of MAY 2025, No. 143

#### **Информация об авторах**

**Андрей Вадимович Азаров**, аспирант, РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия;  
e-mail: [andrey\\_91@bk.ru](mailto:andrey_91@bk.ru)

**Олег Сергеевич Макаров**, аспирант, РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия;  
e-mail: [onardiy@yandex.ru](mailto:onardiy@yandex.ru)

**Данил Андреевич Тузов**, аспирант, РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия;  
e-mail: [tda.93@mail.ru](mailto:tda.93@mail.ru)

### Information about the authors

**Andrey V. Azarov**, postgraduate student, RTU MIREA, Moscow, Russia;  
e-mail: [andrey\\_91@bk.ru](mailto:andrey_91@bk.ru)

**Oleg S. Makarov**, postgraduate student, RTU MIREA, Moscow, Russia;  
e-mail: [onardiy@yandex.ru](mailto:onardiy@yandex.ru)

**Danil A. Turov**, postgraduate student, RTU MIREA, Moscow, Russia;  
e-mail: [tda.93@mail.ru](mailto:tda.93@mail.ru)

---

Получено 24 ноября 2025 ● Принято к публикации 12 декабря 2025 ● Опубликовано 27 февраля 2026  
Received 24 November 2025 ● Accepted 12 December 2025 ● Published 27 February 2026

---