УДК 621.373.8 EDN: JLSUYY

# АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМЕ НАВЕДЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

**Д.М. Кадочников** i49116@voen_meh.ru
**С.Ю. Страхов** strakhovl@voen_meh.ru
**Н.В. Сотникова** sotnikova_nv@voen_meh.ru

**БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Российская Федерация**

**Аннотация**

Рассмотрен актуальный вопрос разработки высокоскоростных, защищенных и малозаметных каналов оптической связи для межплатформенного обмена данными в рамках развития технологий беспилотных авиационных комплексов. Разработана модель энергетического баланса оптической системы связи и определены критические параметры, влияющие на ее эффективность. Для достижения требуемой точности позиционирования (в пределах нескольких миллирадиан) применяются комбинированные методы, основанные на синтезе данных от инерциальных навигационных систем, спутниковых приемников, оптико-электронных сенсоров и предиктивных алгоритмов цифровой фильтрации, наведение луча происходит сначала грубо, затем точно. Проведен анализ системной архитектуры отказоустойчивого наведения луча, который включает в себя мультисенсорную компоновку, состоящую из инерциальных навигационных систем, барометрического высотомера, а также начальных фазовых оценок оптического контраста в предполагаемом направлении на корреспондента, и позволяет организовать время установки связи 3…15 с. Спроектирована система точного наведения, подобраны ключевые компоненты, выполнен энергетический расчет системы и определен ключевой параметр — диаметр энергетического пятна на заданной дальности. Приведены результаты моделирования и исследования диаметра энергетического пятна и мощности на входе приемника при различных ошибках наведения. Установлено, что увеличение угловой ошибки наведения всего на 1° приводит к умень-

**Ключевые слова**

*Диаметр энергетического пятна, оптическая связь, ошибка наведения, система точного наведения луча, энергетический баланс*

шению на ~ 100 м максимальной дальности связи, что указывает на необходимость минимизации погрешностей позиционирования. Сформулированы направления дальнейших исследований

Поступила 24.10.2025
Принята 17.08.2026
© Автор(ы), 2026

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (НИР «Разработка и исследование методов управления группами автономных беспилотных летательных аппаратов на основе перспективных систем информационного обеспечения и взаимодействия между отдельными аппаратами в группе», № FZWF-2024-0002)*

**Введение.** В последние десятилетия наблюдается стремительное развитие технологий беспилотных авиационных комплексов, что обусловило рост интереса к высокоскоростным защищенным и малозаметным каналам межплатформенного обмена данными [1]. В этом контексте особое внимание привлекают системы лазерной связи, имеющие ряд критически важных преимуществ по сравнению с традиционными радиочастотными средствами: высокую направленность, стойкость к перехвату и потенциально высокую пропускную способность. Однако эффективное функционирование таких систем требует решения принципиально сложной задачи — обеспечить устойчивое пространственное наведение лазерного излучения между подвижными объектами, находящимися в условиях ограниченной априорной информации и постоянно меняющейся пространственной ориентации [2].

**Материалы и методы решения задач, принятые допущения.** В условиях активного маневрирования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), наличия внешних динамических возмущений и угроз радиоэлектронного противодействия наведение лазерного луча приобретает характер многоуровневой задачи, состоящей из этапов грубой и точной ориентации, компенсации относительного движения, а также обеспечения устойчивости к отказам и потере контакта [3]. Для достижения требуемой точности позиционирования (в пределах нескольких миллирадиан) применяются комбинированные методы, основанные на синтезе данных от инерциальных навигационных систем, спутниковых приемников, оптико-электронных сенсоров и предиктивных алгоритмов цифровой фильтрации [4]. При этом необходимо учитывать ограниченные ресурсы БПЛА — массу, энергопотребление и вычислительную мощность, что накладывает строгие требования к архитектуре, и реализацию навигационно-управляющих подсистем.

На этапе грубого наведения основное внимание уделяется формированию первичной ориентации лазерного излучателя по направлению к пред-

полагаемой позиции корреспондента. Это достигается на основе комплексной обработки данных от инерциальных измерительных модулей и спутниковых навигационных приемников [5]. В типичной конфигурации применяются волоконно-оптические гироскопы с низким (до 0,01…0,05 °/ч) дрейфом, высокоточные акселерометры и трехосевые магнитометры, дополняемые двухчастотными приемниками GPS/ГЛОНАСС, реализующими фазовое псевдодальномерное измерение с возможностью использования дифференциальной или RTK-коррекции. Такие приемники обеспечивают абсолютную пространственную привязку, что критически важно для начальной геометрической инициализации процесса поиска лазерного партнера.

Следует учитывать, что сигналы спутниковой навигации являются уязвимыми для целого спектра воздействий, включая как непреднамеренные (атмосферные аномалии, многопутевые искажения), так и преднамеренные (глушение (jamming) и подмена (spoofing)) формы радиоэлектронного воздействия [6]. Преднамеренные формы воздействия представляют особую угрозу в условиях активного противодействия, поскольку позволяют ввести навигационную систему в устойчивую ошибку вплоть до полной утраты пространственной привязки. В силу этого полагаться на спутниковую навигацию в качестве единственного и приоритетного источника информации для грубого наведения представляется методологически и тактически нецелесообразным [7].

Для повышения устойчивости к таким воздействиям современные системы пространственного наведения реализуют отказоустойчивую архитектуру, в которой каждый элемент позиционирования имеет резервную или кросс-контролируемую поддержку. В частности, инерциальная навигационная сеть (ИНС) работает в режиме навигационного доминирования (INS-dominant mode), при котором спутниковые данные воспринимаются лишь как коррекционные поправки, подвергаемые проверке на физическую согласованность с инерциальной моделью движения. Кроме того, реализуются алгоритмы верификации псевдодальности между спутниками, анализ распределения ошибок и скользящей статистики SNR (Signal-to-Noise Ratio), что позволяет обнаружить аномалии, характерные для атак спуфинга [8].

Системная архитектура такого отказоустойчивого наведения включает в себя мультисенсорную компоновку, состоящую из ИНС, барометрического высотомера, а также начальных фазовых оценок оптического контраста в предполагаемом направлении на корреспондента. Это позво-

ляет реализовать схему навигатор–верификатор, где каждое измерение сопровождается логическим фильтром достоверности [9].

При обнаружении рассогласования между ИНС и глобальной навигационной спутниковой системой (ГНСС) более заданного порога система переходит в автономный режим с приоритетом на инерциальные данные и предиктивное моделирование движения. Данные от указанных подсистем синхронизируются и интегрируются в едином вычислительном контуре, что позволяет определить вектор пространственного положения и ориентации БПЛА с точностью до 0,1…0,2° при частоте обновления не менее 100 Гц. Математическая модель такого позиционирования, как правило, формализуется через систему уравнений навигационной динамики, состоящую из компонентов скорости, положения и ориентации, а также аддитивных и мультипликативных ошибок сенсоров, что позволяет учитывать инерциальные и стохастические искажения измерений [10].

При практическом использовании время установки связи на основе только грубого наведения составляет, как правило, 3…15 с в зависимости от начального рассогласования, кинематики движения и точности предварительного позиционирования. Однако в условиях ограниченного или ненадежного ГНСС-покрытия архитектура наведения должна предусматривать автономное функционирование по инерциальным данным с прогнозированием относительной траектории и последующим уточнением по результатам оптической обратной связи.

Точное наведение в системах межбортовой лазерной связи представляет собой замкнутый процесс оптико-механического и алгоритмического сопровождения положения, корреспондирующего БПЛА в реальном времени с субмиллирадной угловой точностью. Целью точного наведения является удержание центра лазерного луча в пределах диафрагмы приемной оптики другой платформы при наличии относительного движения, вибраций и неопределенностей траектории [11].

Ключевым элементом системы точного наведения является блок детектирования отклонений, реализуемый на основе координатно-чувствительных фотоприемников. Наиболее распространены квадрантные фотодиоды (QPD, Quadrant Photodiodes), обеспечивающие прямое измерение смещения пятна лазерного излучения относительно центра с типовой точностью порядка 1…5 % диаметра энергетического пятна. Для более высокой точности применяются линейные или двумерные позиционно-чувствительные детекторы (PSD), а также матричные сенсоры CCD/CMOS

с цифровой обработкой изображения. Примером промышленной реализации является модуль Hamamatsu S5991 (Hamamatsu Photonics, Япония), обеспечивающий высокое разрешение в компактном корпусе с высокой частотой считывания [12].

Наведение луча на излучающей стороне реализуется с использованием различных типов исполнительных механизмов. Наиболее широко применяются микроэлектромеханические зеркала (MEMS), позволяющие с высокой скоростью и малой инерцией проводить двухосевое отклонение отражаемого луча в пределах ±5…10°. Зеркала MEMS производства компании Mirrorcle Technologies, в частности модели A7M20.2, демонстрируют рабочую частоту коррекции до 20 кГц с угловым разрешением порядка 0,1 мрад [13]. Альтернативой MEMS-решениям являются гальванометрические зеркала — сканаторы (galvo systems), которые обеспечивают более широкий динамический диапазон (до ±20°) при меньшей частоте реакции и применяются в системах ближнего действия или в терминалах наземных станций [14]. В высокоточных системах применяется пьезоэлектрическое отклонение фокусирующих линз FSM (Fast Steering Mirrors), способное вносить мелкомасштабные поправки с субмиллирадной точностью на частотах до 5…10 кГц [15]. Для наведения луча возможно также использование призм Рисли.

На приемной стороне точное позиционирование входной диафрагмы реализуется либо посредством подвижных вторичных зеркал, либо с помощью системы активного слежения на базе инфракрасной камеры и исполнительных приводов.

Для компенсации относительного движения, вибраций и погрешностей наведения в системах оптической связи малых БПЛА предлагается реализация двухосевого контура позиционирования с оптической обратной связью. Данная система должна обеспечивать точность наведения не хуже 0,2° при угловых скоростях до 10 °/с, что соответствует типичным динамическим характеристикам малогабаритных БПЛА. Конструктивно система включает в себя несколько ключевых компонентов: излучающий модуль, приемное устройство, систему обработки сигналов и алгоритмы управления.

В качестве излучателя применяется полупроводниковый лазер с выходной апертурой 10 мм, что обеспечивает необходимую расходимость пучка (порядка 1…2 мрад) при сохранении компактности системы. Лазерный модуль комплектуется коллимационной оптикой, позволяющей формировать пучок с заданными параметрами. Для точного позиционирования луча

используется сканатор или прецизионный сервопривод (например, для более грубого наведения в область сканирования). Выбор конкретного типа исполнительного механизма зависит от требований к быстродействию системы: гальванометрические сканаторы обеспечивают более высокую скорость реакции (до нескольких килогерц), тогда как сервоприводы отличаются большим рабочим диапазоном (до 180° по каждой оси) при меньшей стоимости.

Приемный модуль построен на основе квадрантного фотодиода, например, Hamamatsu S5980 (рис. 1), который обеспечивает измерение положения светового пятна с высокой точностью.

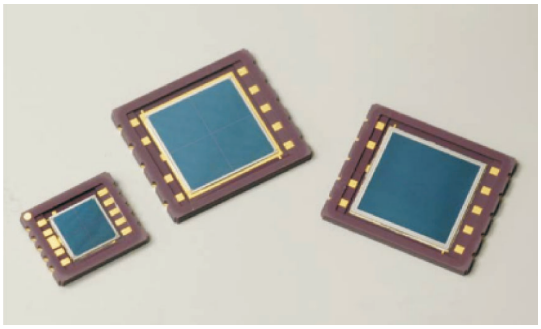


**Рис. 1.** Квадрантный фотодиод Hamamatsu S5980

Квадрантный фотодиод формирует четыре независимых аналоговых сигнала ($I_1$–$I_4$), по которым можно рассчитать координаты пятна в плоскости детектора. Для обработки этих сигналов применяется дифференциальная схема: горизонтальное ($x$) и вертикальное ($y$) отклонения вычисляются по формулам:

$$x = \frac{(I_1 + I_4) - (I_2 + I_3)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}; \quad y = \frac{(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}.$$

Такая нормализация делает измерения независимыми от колебаний интенсивности сигнала. Сигналы с фотодиода усиливаются малошумящими усилителями с полосой пропускания, соответствующей ожидаемой динамике системы (обычно 1…10 кГц).

Обработка сигналов и управление системой реализованы на микроконтроллере, оснащенном четырехканальным АЦП с частотой дискретизации не менее 10 кГц и разрядностью 12 бит. Вычислительная мощность современных микроконтроллеров позволяет реализовать цифровой ПИД-регулятор непосредственно в прошивке устройства. Алгоритм управления включает следующие этапы: оцифровка сигналов с QPD, вычисление

текущих координат пятна, расчет ошибки положения относительно заданной точки (обычно центра детектора), вычисление управляющего воздействия по алгоритму ПИД-регулирования и формирование управляющих сигналов для исполнительных механизмов:

$$u_x(t) = K_p x(t) + K_i \int x(t)dt + K_d \frac{dx(t)}{dt};$$

$$u_y(t) = K_p y(t) + K_i \int y(t)dt + K_d \frac{dy(t)}{dt}.$$

Параметры ПИД-регулятора (коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих) подбираются экспериментально с учетом динамических характеристик конкретной системы. Интегральная составляющая обеспечивает подавление статических ошибок, например, вызванных постоянным смещением БПЛА, тогда как дифференциальная составляющая улучшает реакцию на быстрые изменения положения. На практике реализуют адаптивные алгоритмы, автоматически подстраивающие параметры регулятора в зависимости от текущих условий работы [16].

Важным аспектом реализации является компенсация собственных вибраций БПЛА, которые могут существенно ухудшить точность наведения. Совместная обработка сигналов от QPD и ИНС позволяет достичь точности наведения на уровне 0,2…0,8° даже в условиях существенных механических возмущений [17–19].

При проектировании системы наведения ключевым параметром является диаметр энергетического пятна $D_{\text{п}}$ на заданной дальности $D$, определяемый совокупностью факторов:

$$D_{\text{п}}(t) = 2\left(D\text{tg}\theta_{\text{расх}} + \sqrt{\sigma^2_{\text{навед}} + \sigma^2_{\text{вибр}} + \sigma^2_{\text{атм}}}\right),$$

где $\theta_{\text{расх}}$ — полный угол расходимости луча (полуугол при вершине конуса); $\sigma_{\text{навед}}$ — СКО отклонения от погрешностей наведения; $\sigma_{\text{вибр}}$ — эквивалентное отклонение от вибраций БПЛА; $\sigma_{\text{атм}}$ — турбулентное уширение.

Для условий слабой турбулентности $C_n^2 = (5 \cdot 10^{-14})^{-2/3}$ запишем

$$\sigma_{\text{атм}} \approx 2{,}1\lambda^{-1/5}\left(\int C_n^2(z)dz\right)^{3/5}.$$

Энергетический расчет системы основан на определении мощности, поступающей на приемное устройство, и учитывает несколько важных аспектов.

Основное уравнение энергетического баланса имеет вид

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{опт}} \frac{A_{\text{пр}}}{A_{\text{п}}} \eta_{\text{опт}} \eta_{\text{атм}},$$

где $P_{\text{опт}}$ — мощность, излучаемая лазером; $A_{\text{пр}}$ — эффективная площадь апертуры приемного устройства; $A_{\text{п}}$ — площадь лазерного пятна на заданной дальности; $\eta_{\text{опт}}$ — потери в оптической системе (отражающие и пропускающие поверхности, качество юстировки); $\eta_{\text{атм}}$ — ослабление сигнала в атмосфере с коэффициентом затухания.

На дальности 500 м атмосферные потери составляют ~ 5 %, увеличиваясь до 10 % на 1000 м.

Динамические возмущения, вызванные вибрациями платформы БПЛА, приводят к модуляции принимаемого сигнала. Этот эффект количественно описывается соотношением:

$$\frac{\Delta P}{P_{\text{опт}}} \approx (2\pi f_{\text{виб}} \tau)^2,$$

где $\Delta P$ — флуктуации мощности из-за вибраций; $f_{\text{виб}}$ — характерная частота механических вибраций БПЛА; $\tau$ — постоянная времени системы стабилизации луча.

При типичных для малых БПЛА параметрах ($f_{\text{виб}}$ = 30 Гц, $\tau$ = 1 мс) глубина модуляции составляет ~ 3,5 %, что соответствует колебаниям мощности на приемнике ±0,35 мкВт при номинальном уровне 10 мкВт.

Особенно критично это становится при работе вблизи порога чувствительности приемника (2 мкВт), где такие колебания могут вызывать периодическое снижение сигнала ниже порога детектирования.

Фундаментальным ограничением чувствительности системы являются тепловые шумы фотоприемника, характеризуемые эквивалентной шумовой мощностью:

$$E_{\text{т.ш}} = \sqrt{\frac{2hcP_{\text{прм}}}{\lambda \eta_{\text{д}}}},$$

где $h$ — постоянная Планка; $c$ — скорость света; $\lambda$ — длина волны излучения; $\eta_{\text{д}}$ — квантовая эффективность фотодиода.

Для типичной принимаемой мощности $P_{\text{прм}}$ = 10 мкВт уровень шумов составляет ~ 0,5 пВт/Гц$^{1/2}$. Это определяет минимально детектируемую мощность на входе приемника на уровне ~ 2 мкВт при полосе пропускания системы 100 МГц и отношении сигнал/шум 10/1.

За начальные условия моделирования примем ошибку наведения 1°; амплитуду колебаний летательного аппарата ±2 м; мощность оптического излучателя 2 Вт; расходимость луча 0,035 рад (3°); апертуру приемного телескопа 0,05 м; минимальную мощность на входе приемника 2 мкВт. Зависимость мощности на входе приемника от дальности при ошибке наведения 1° приведена на рис. 2, *а*. Результаты исследований сведены в табл. 1. Результаты расчетов диаметра энергетического пятна при ошибках наведения 2, 3 и 4° приведены в табл. 2, зависимости мощности на входе приемника от дальности при различных ошибках наведения — на рис. 2, *б–г*.

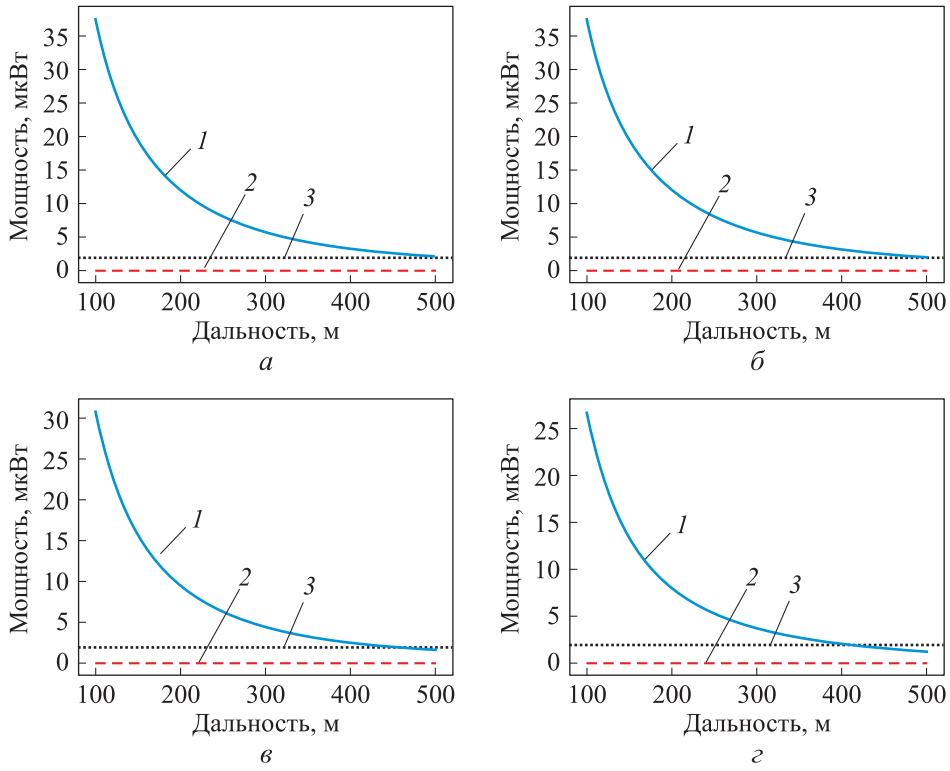



**Рис. 2.** Зависимости мощности на входе приемника от дальности при ошибке наведения, равной 1 (*а*), 2 (*б*), 3 (*в*) и 4° (*г*):
*1–3* — мощность, тепловой шум, порог чувствительности

**Результаты и их обсуждение.** По результатам моделирования выявлено, что с увеличением дальности связи диаметр энергетического пятна увеличивается линейно, что обусловлено геометрическим расхождением лазерного пучка. Например, при ошибке наведения 1° диаметр энергетического пятна увеличивается от 10,56 м на дистанции 100 м до 43,03 м на дистанции 500 м.

*Таблица 1*

**Результаты расчета диаметра энергетического пятна и мощности на входе приемника при ошибке наведения 1°**

| Параметр | Дальность, м | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| Диаметр энергетического пятна, м | 10,56 | 18,46 | 26,42 | 35,05 | 43,03 |
| Мощность, мкВт | 37,71 | 12,21 | 5,90 | 3,32 | 2,18 |

*Таблица 2*

**Результаты расчета диаметра энергетического пятна, м**

| Ошибка наведения, град | Дальность, м | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| 2 | 10,98 | 19,41 | 27,89 | 37,10 | 45,61 |
| 3 | 11,66 | 20,90 | 30,20 | 40,29 | 49,62 |
| 4 | 12,56 | 22,82 | 33,16 | 44,38 | 54,76 |

Введение дополнительной угловой ошибки наведения от 2 до 4° приводит к дальнейшему увеличению диаметра энергетического пятна за счет смещения его центра относительно приемной апертуры. Так, при ошибке наведения 4° и дальности 500 м диаметр энергетического пятна достигает 54,76 м.

Отметим, что на точность наведения излучения при определенном характере оптической трассы влияет и отклонение излучения от прямолинейной траектории за счет неоднородности распределения показателя преломления по высоте [20]. В планах дальнейших исследований есть построение строгой математической модели линии оптической связи с учетом всех факторов, определяющих эффективность ее работы, а также экспериментальное моделирование канала связи.

При анализе системы лазерной связи более полным критерием эффективности является параметр BER (Bit Error Rate) как комплексная характеристика информационного канала, однако здесь акцент сделан именно на энергетическом балансе линии связи.

**Заключение.** Проведенное моделирование энергетического баланса системы демонстрирует критическую зависимость мощности принимаемого сигнала и, следовательно, максимальной дальности устойчивой связи от точности наведения. Установлено, что увеличение угловой ошибки

наведения всего на 1° приводит к сокращению максимальной дальности связи ~ 100 м, что подчеркивает необходимость минимизации погрешностей позиционирования. Таким образом, ключевыми направлениями для дальнейшего совершенствования являются разработка и внедрение прецизионных исполнительных систем, интеграция оптических сенсоров с адаптивными алгоритмами цифровой обработки для компенсации вибраций и динамических возмущений, а также исследования в области подавления атмосферных искажений. Комплексное решение этих задач позволит существенно расширить рабочий диапазон и повысить надежность лазерных каналов связи в сложных эксплуатационных условиях, отвечающих требованиям современных беспилотных систем.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Лахнов А.Ю. Современные тенденции развития беспилотных авиационных систем в России: результаты анализа научных публикаций 2024 года. *Проблемы безопасности полетов*, 2025, № 2, с. 55–65.
DOI: https://doi.org/10.36535/0235-5000-2025-02-6

[2] Антонов А.А., Журавлева Л.М., Чыонг Д.Х. и др. Сеть атмосферной оптической связи на базе беспилотных летательных аппаратов. *Проектирование и технология электронных средств*, 2024, № 2, с. 3–9. EDN: MTIEMY

[3] Журавлева Л.М., Левшунов В.В., Рыжков Д.А. и др. Беспроводный оптический канал связи с подвижными объектами. *Автоматика, связь, информатика*, 2022, № 1, с. 13–16. DOI: https://doi.org/10.34649/AT.2022.1.1.003

[4] Серпуховитов С.С., Овакимян Д.Н., Зеленский В.А. и др. Анализ инерциальных микроэлектромеханических компонентов с целью улучшения параметров автономной навигации малых БПЛА. *Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. Матер. Всерос. науч.-техн. конф.* Самара, Офорт, 2018, с. 111–112. EDN: XPEADR

[5] Агеев А.М., Белоусов А.С., Проценко В.В. и др. Предложения по использованию технологий для автономной навигации тактических БПЛА в условиях радиоэлектронного подавления. *Радиолокация, навигация, связь. Сб. тр. XXXI Междунар. науч.-техн. конф.* Воронеж, Изд-во ВГУ, 2025, с. 299–304. EDN: KZKGXW

[6] Нугманов А.А. Обзор современных технологий с GNSS-навигацией с применением БПЛА. *Актуальные проблемы геодезии, землеустройства и кадастра. Сб. матер. VI Региональной науч.-практ. конф.* Омск, Изд-во ОГАУ, 2024, с. 69–77. EDN: WUORTU

[7] Немов А.В., Никитин А.В., Ермолаев С.В. Принципы построения навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС для полетных контроллеров легких беспилотных летательных аппаратов в условиях ограничений. *Радиотехника*, 2022, т. 86, № 11, с. 121–130. EDN: LSSDOL

[8] Петренко В.И., Тебуева Ф.Б., Волошин Д.Г. Метод построения траектории полета беспилотных летательных аппаратов в условиях кибератак GPS/ГЛОНАСС спуфинга. *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*, 2024, № 2, с. 71–80. EDN: QXZYYU

[9] Горшков П.С., Патрикеев А.П., Харьков В.П. и др. Инерциально-спутниковая компенсация траекторных нестабильностей оптико-электронных систем позиционирования на качающемся основании. *XXVII Санкт-Петербургская междунар. конф. по интегрированным навигационным системам.* Санкт-Петербург, ЦНИИ Электроприбор, 2020, с. 109–111. EDN: LYAQSW

[10] Гулютин Н.Н., Ермиенко Н.А., Антамошкин О.А. Система комплексирования сенсорных данных в бортовых системах управления беспилотными авиационными системами. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*, 2025, т. 13, № 1. DOI: https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.019

[11] Горобинский А.В., Жиган И.П., Кузнецов Е.В. и др. Способ наведения лазерного луча на объект. Патент РФ 2788943. Заявл. 15.06.2022, опубл. 26.01.2023.

[12] Казанцев С.Г. Лазерные технологии для телекоммуникационной платформы малого космического аппарата. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*, 2018, т. 163, № 2, с. 29–47. EDN: XVQYQH

[13] Меснянкин Е.П. Особенности построения оптико-механического тракта дуплексной космической оптической линии связи. *Оптический журнал*, 2024, т. 91, № 9, с. 5–17. DOI: http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-5-17

[14] Вовк А.В., Королёв Б.В., Легостаев В.П. и др. Система космической оптической связи между кооперируемым объектом и объектом-корреспондентом. Патент РФ 2276836. Заявл. 28.01.2004, опубл. 20.05.2006.

[15] Горячев О.В., Овчинников А.В. Разработка следящего привода оптико-электронной системы с пьезоэлектрическим исполнительным актюатором. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2017, № 12-3, с. 145–154. EDN: YSJLGS

[16] Крылова М.А., Сотникова Н.В., Страхов С.Ю. Электромагнитное моделирование распределенной антенной решетки на основе роя беспилотных летательных аппаратов. Москва–Севастополь, РНТОРЭС им. А.С. Попова, СевГУ, 2024.

[17] Акимов В.Н. Методика исследования динамического поведения беспилотного летательного аппарата в наземных условиях с учетом данных летного эксперимента. *Научный вестник МГТУ ГА*, 2019, т. 22, № 3, с. 16–24.
DOI: https://doi.org/10.26467/2079-0619-2019-22-3-16-24

[18] Лобатый А.А. Вероятностная оценка влияния вибраций на чувствительные элементы системы. *Наука и техника,* 2009, № 6, с. 34–37. EDN: WXOMXP

[19] Гу П., Авсиевич А.М., Лобатый А.А. Математическая модель оценки влияния вибраций на элементы мультикоптера. *Системный анализ и прикладная информатика*, 2024, № 1, с. 37–42.
DOI: http://doi.org/10.21122/2309-4923-2024-1-37-42

[20] Страхов С.Ю., Савин А.В., Сотникова Н.В. и др. Оценка влияния оптических неоднородностей атмосферы на точность позиционирования лазерного луча при вертикальном зондировании. *Оптический журнал*, 2025, т. 92, № 2, с. 56–66. DOI: http://doi.org/10.17586/1023-5086-2025-92-02-56-66

**Кадочников Данила Михайлович** — аспирант кафедры «Радиоэлектронные системы управления» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1).

**Страхов Сергей Юрьевич** — д-р техн. наук, профессор, декан факультета «Информационные и управляющие системы» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1).

**Сотникова Наталья Викторовна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы управления» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Кадочников Д.М., Страхов С.Ю., Сотникова Н.В. Анализ требований к системе наведения излучения при решении задач оптической связи. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2026, № 3 (156), с. 47–62. EDN: JLSUYY

## ANALYSIS OF THE REQUIREMENTS FOR THE RADIATION GUIDANCE SYSTEM IN SOLVING OPTICAL COMMUNICATION PROBLEMS

**D.M. Kadochnikov** i49116@voen_meh.ru
**S.Yu. Strakhov** strakhovl@voen_meh.ru
**N.V. Sotnikova** sotnikova_nv@voen_meh.ru

**BSTU "VOENMEH" named after D.F. Ustinov, St. Petersburg, Russian Federation**

**Abstract**

The article addresses the urgent issue of developing high-speed, secure, and unobtrusive optical communication channels for cross-platform data exchange within the framework of advancing unmanned aircraft system technologies. A model of the energy balance of an optical communication system is being developed, and critical parameters affecting its efficiency are identified. To achieve the required positioning accuracy, combined methods based on the synthesis of data from inertial navigation systems, satellite receivers,

**Keywords**

*Energy spot diameter, optical coupling, guidance error, precise beam guidance system, energy balance*

optoelectronic sensors and predictive digital filtering algorithms are used. In this case, the beam guidance occurs first roughly, and then accurately. The analysis of the system architecture of fault-tolerant beam guidance is carried out, which includes a multi-sensor layout consisting of an inertial navigation system, a barometric altimeter, as well as initial phase estimates of optical contrast in the intended direction to the correspondent and allows you to organize a communication setup time of 3–15 s. A precision guidance system has also been designed, key components have been selected, an energy calculation of the system has been performed, and a key parameter has been determined — the diameter of the energy spot at a given range. The results of modeling and investigation of spot diameter and receiver input power at various guidance errors are presented. It has been found that an increase in the angular error of guidance by only one degree leads to a reduction in the maximum communication range by approximately 100 m, which emphasizes the need to minimize positioning errors. The directions of further research are formulated

Received 24.10.2025
Accepted 17.08.2026
© Author(s), 2026

*The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (research project "Development and study of methods for managing groups of autonomous unmanned aerial vehicles based on promising information support systems and interaction between individual devices in the group", no. FZWF-2024-0002*)

## REFERENCES

[1] Lakhnov A.Yu. Current trends in the development of unmanned aerial systems in Russia: results of the analysis of scientific publications in 2024. *Problemy bezopasnosti poletov* [Problems of Flight Safety], 2025, no. 2, pp. 55–65 (in Russ.).
DOI: https://doi.org/10.36535/0235-5000-2025-02-6

[2] Antonov A.A., Zhuravleva L.M., Chyong D.Kh., et al. An atmospheric optical communication network basedon unmanned aerial vehicles. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv* [Design and Technology of Electronic Means], 2024, no. 2, pp. 3–9 (in Russ.). EDN: MTIEMY

[3] Zhuravleva L.M., Levshunov V.V., Ryzhkov D.A., et al. Wireless optical communication channel with moving objects. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, Communications, Informatics], 2022, no. 1, pp. 13–16 (in Russ.).
DOI: https://doi.org/10.34649/AT.2022.1.1.003

[4] Serpukhovitov S.S., Ovakimyan D.N., Zelenskiy V.A., et al. [Analysis of inertial microelectromechanical components in order to improve the parameters of autonomous

navigation of small UAVs]. *Aktualnye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy. Mater. Vseros. nauch.-tekh. konf.* [Actual Problems of Radio Electronics and Telecommunications. Proc. Russ. Sc.-Tech. Conf.]. Samara, Ofort Publ., 2018, pp. 111–112 (in Russ.). EDN: XPEADR

[5] Ageev A.M., Belousov A.S., Protsenko V.V., et al. [Proposals for the use of technologies for autonomous navigation of tactical UAVs in conditions of electronic warfare]. *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz. Sb. tr. XXXI Mezhdunar. nauch.-tekh. konf.* [Radar, Navigation, Communications. Proc. XXXI Int. Sc.-Tech. Conf.]. Voronezh, VGU Publ., 2025, pp. 299–304 (in Russ.). EDN: KZKGXW

[6] Nugmanov A.A. [Overview of modern technologies with GNSS navigation using UAVs]. *Aktualnye problemy geodezii, zemleustroystva i kadastra. Sb. mater. VI Regionalnoy nauch.-prakt. konf.* [Actual Problems of Geodesy, Land Management and Cadastre. Proc. Regional Sc.-Pract. Conf.]. Omsk, OGAU Publ., 2024, pp. 69–77 (in Russ.). EDN: WUORTU

[7] Nemov A.V., Nikitin A.V., Ermolaev S.V. About the principles of construction of Glonass receivers for light UAVs flight controllers in the conditions of restrictions. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2022, vol. 86, no. 11, pp. 121–130 (in Russ.). EDN: LSSDOL

[8] Petrenko V.I., Tebueva F.B., Voloshin D.G. Method for planning an unmanned aerial vehicle flight path in conditions of GPS/GLONASS spoofing cyberattacks. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2024, no. 2, pp. 71–80 (in Russ.). EDN: QXZYYU

[9] Gorshkov P.S., Patrikeev A.P., Kharkov V.P., et al. [Inertial-satellite compensation of trajectory instabilities of optoelectronic positioning systems on a swinging base]. *XXVII Sankt-Peterburgskaya mezhdunar. konf. po integrirovannym navigatsionnym sistemam* [XXVII St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems]. St. Peterburg, TsNII Elektropribor Publ., 2020, pp. 109–111 (in Russ.). EDN: LYAQSW

[10] Gulyutin N.N., Ermienko N.A., Antamoshkin O.A. Sensor data integration system in onboard control systems of unmanned aerial systems. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, Optimization and Information Technology], 2025, vol. 13, no. 1 (in Russ.). DOI: https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.019

[11] Gorobinskiy A.V., Zhigan I.P., Kuznetsov E.V., et al. Sposob navedeniya lazernogo lucha na obekt [Method for pointing a laser beam at an object]. Patent RU 2788943. Appl. 15.06.2022, publ. 26.01.2023 (in Russ.).

[12] Kazantsev S.G. Laser technologies for telecommunications platform of small spacecraft. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM* [Electromechanical matters. VNIIEM Studies], 2018, vol. 163, no. 2, pp. 29–47 (in Russ.). EDN: XVQYQH

[13] Mesnyankin E.P. Design features for optical-mechanical paths of duplex space optical-communication lines. *J. Opt. Technol.*, 2024, vol. 91, no. 9, pp. 579–586. DOI: https://doi.org/10.1364/JOT.91.000579

[14] Vovk A.V., Korolev B.V., Legostaev V.P., et al. Sistema kosmicheskoy opticheskoy svyazi mezhdu kooperiruemym obektom i obektom-korrespondentom [Space optical

system for communication between affiliated and sending objects]. Patent RU 2276836. Appl. 28.01.2004, publ. 20.05.2006 (in Russ.).

[15] Goryachev O.V., Ovchinnikov A.V. Design of servodrive of the optical stabilization system with piezoelectric actuator. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2017, no. 12-3, pp. 145–154 (in Russ.).
EDN: YSJLGS

[16] Krylova M.A., Sotnikova N.V., Strakhov S.Yu. Elektromagnitnoe modelirovanie raspredelennoy antennoy reshetki na osnove roya bespilotnykh letatelnykh apparatov [Electromagnetic modeling of a distributed antenna array based on a swarm of unmanned aerial vehicles]. Moscow–Sevastopol, RNTORES im. A.S. Popova Publ., SevGU Publ., 2024.

[17] Akimov V.N. Research technique of unmanned aerial vehicle dynamic behavior in ground conditions with account of flight experiment data. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies], 2019, vol. 22, no. 3, pp. 16–24 (in Russ.).
DOI: https://doi.org/10.26467/2079-0619-2019-22-3-16-24

[18] Lobatyy A.A. Probabilistic estimation of vibration influence on sensitive system elements. *Nauka i tekhnika* [Science & Technique], 2009, no. 6, pp. 34–37 (in Russ.).
EDN: WXOMXP

[19] Gu P., Avsievich A.M., Lobatyy A.A. Mathematical model for assessing the influence of vibrations for multicopter elements. *Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika* [System analysis and applied information science], 2024, no. 1, pp. 37–42 (in Russ.).
DOI: http://doi.org/10.21122/2309-4923-2024-1-37-42

[20] Strakhov S.Yu., Savin A.V., Sotnikova N.V., et al. Assessing the influence of atmospheric optical inhomogeneities on the accuracy of laser beam positioning in vertical sounding. *J. Opt. Technol.*, 2025, vol. 92, no. 2, pp. 101–107.
DOI: https://doi.org/10.1364/JOT.92.000101

**Kadochnikov D.M.** — Post-Graduate Student, Department of Radioelectronic Control Systems, BSTU "VOENMEH" named after D.F. Ustinov (1-ya Krasnoarmeyskaya ul. 1, St. Petersburg, 190005 Russian Federation).

**Strakhov S.Yu.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Faculty of Information and Control Systems, BSTU "VOENMEH" named after D.F. Ustinov (1-ya Krasnoarmeyskaya ul. 1, St. Petersburg, 190005 Russian Federation).

**Sotnikova N.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Radioelectronic Control Systems, BSTU "VOENMEH" named after D.F. Ustinov (1-ya Krasnoarmeyskaya ul. 1, St. Petersburg, 190005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Kadochnikov D.M., Strakhov S.Yu., Sotnikova N.V. Analysis of the requirements for the radiation guidance system in solving optical communication problems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2026, no. 3 (156), pp. 47–62 (in Russ.). EDN: JLSUYY