

Научная статья

УДК 621.37

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186892>

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

МОДЕЛЬ ОПЕРАТИВНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И КОМПЕНСАЦИИ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В СВЕТОДИОДНОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ МАЛОЙ БОРТОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

В.А. Ненашев[✉] , В.П. Кузьменко^{ORCID}, С.В. Солёный^{ORCID}

Санкт-Петербургский государственный университет

аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия

[✉] nenashev.va@yandex.ru

Цитирование: Ненашев В.А., Кузьменко В.П., Солёный С.В. Модель оперативного обнаружения и компенсации преднамеренных внешних воздействий в светодиодном канале связи малой бортовой радиолокационной станции // Труды МАИ. 2025. № 145.
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186892>

Аннотация. В работе рассматривается технология оперативного обнаружения и компенсации преднамеренных воздействий на оптический канал связи, построенный по принципу передачи сигналов по видимому свету с использованием светодиодного излучателя для мультиканальной малогабаритной бортовой радиолокационной станции. Предложена модель пакетного протокола передачи данных, в котором преамбула и контрольная последовательность пакетов используются для синхронизации и оценки фоновой световой засветки и внешних преднамеренных атак. В модели применено Пуассоновское распределение, позволяющее учитывать четыре класса внешних воздействий на оптический канал: устойчивая засветка приёмника сигналов, кратковременные импульсные световые вспышки, воспроизведение ранее зарегистрированного сигнала (replay) и имитация легитимного начала пакета (ложная преамбула). Имитационное моделирование

при характерных параметрах геометрии канала и фоновой засветки демонстрирует надёжное раннее обнаружение (истинно-положительные $\approx 0,85$ при ложных тревогах $\approx 0,12$) и сохранение доли доставленной полезной информации.

Ключевые слова: бортовой светодиодный излучатель, связь по видимому свету, VLC, компенсация преднамеренных воздействий, передача информации по видимому свету.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-79-10259).

MODEL FOR RAPID DETECTION AND COMPENSATION OF DELIBERATE EXTERNAL INFLUENCES IN THE LED COMMUNICATION CHANNEL OF A SMALL AIRBORNE RADAR

V.A. Nenashev[✉]^{ORCID}, V.P. Kuzmenko^{ORCID}, S.V. Solyonyj^{ORCID}

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Saint Petersburg, Russia

✉ nenashev.va@yandex.ru

Citation: Nenashev V.A., Kuzmenko V.P., Solyonyj S.V. Model for rapid detection and compensation of deliberate external influences in the led communication channel of a small airborne radar // Trudy MAI. 2025. No. 145. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186892>

Abstract. The technology of in-packet, real-time detection and mitigation of intentional optical interference in an LED-based visible-light communication (VLC) link for a compact multichannel airborne radar is considered. An original packet protocol is presented that uses a known preamble for coarse synchronization and background estimation and a control sequence for intra-packet diagnostics under a Poisson count model. Four threat classes are addressed: steady receiver glare, short impulsive flashes, replay of previously recorded signal fragments, and spoofing of a legitimate start via a false preamble. Detection statistics include a stable background shift on control zeros, exceedance counting for impulsive events, a normalized inter-slot dependence coefficient for replay, and a template-mismatch rate for preamble spoofing. Two intra-

packet adaptation mechanisms are introduced-dynamic threshold update with local outlier suppression and controlled redundancy/re-timing of optical pulses-both preserving the end-to-end delay budget. The description is accompanied by block diagrams and timing plots illustrating the diagnostic sequence and decision flow. Preference is given to a unified decision basis built on Poisson statistics with detector thresholds preset to required false-alarm levels, enabling low computational overhead. Experimental results in a representative simulation campaign (typical geometry, background illumination, and all four interference types) demonstrate reliable early detection (≈ 0.85 true-positive at ≈ 0.12 false-alarm) and sustained payload delivery via intra-packet adaptation, including BER reduction under impulsive interference compared with a non-adaptive baseline.

Keywords: edge-lit LED emitter, visible light communication, VLC, intentional interference compensation, visible light information transmission.

Funding: the reported study was funded by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 24-79-10259).

Введение

Малогоабаритные бортовые радиолокационные станции (МБРЛС) применяются в задачах наблюдения, картографирования и мониторинга обстановки, где критически важны оперативная передача служебной и измерительной информации, невысокая масса аппаратуры и устойчивость к внешним воздействиям [1, 2, 3]. В составе таких станций востребованы каналы связи, обеспечивающие передачу данных в условиях ограничений на использование радиочастот, а также в сценариях, где требуется низкая электромагнитная восприимчивость [4, 5]. В данном случае рассматривается малогоабаритная бортовая радиолокационная станция мультиканальной архитектуры: радиолокационный канал выполняет функции обзора и картирования, а оптический канал служит независимым служебным каналом для передачи данных телеметрии или сигнализации. Каналы физически и функционально разделены; объединение информации, полученной из каждого

канала, осуществляется на уровне системной синхронизации при обработке и обмене метаданными, что исключает смешение радиочастотной и оптической составляющих.

Одним из технологически простых и вместе с тем перспективных решений в области решения таких задач является передача информации по оптическому каналу в видимой части спектра света: светодиодный излучатель формирует во времени последовательность световых импульсов, а фотоприёмник на принимающей стороне регистрирует изменения светового потока и восстанавливает передаваемую последовательность битов информации [6, 7].

Постановка задачи

Для обеспечения надёжной передачи служебной и измерительной информации мультиканальной МБРЛС по оптическому каналу в видимой части спектра света требуется автоматизированное выявление нарушений в работе канала и оперативная реакция на них в пределах допустимой задержки. Ручная настройка порогов и режимов передачи данных в реальном времени непрактична и субъективна: статистические свойства наблюдений на приёмной стороне изменяются под воздействием фоновой засветки, дрожания наведения и частичных перекрытий линии визирования, а также при преднамеренных оптических воздействиях [8].

Эти факторы напрямую влияют на устойчивость синхронизации по служебным фрагментам передаваемого пакета (преамбула и контрольная последовательность), что приводит к росту ошибок на полезной части сигнала и к потере доли полученной информации, если не предусмотрены механизмы ранней диагностики и управляемой адаптации режима передачи информации [9-11].

На рисунке 1 представлена структурная схема формирования оптического канала связи «Светодиодный передатчик мультиканальной МБРЛС – фоточувствительный приемник» с учетом фоновой компоненты окружающей среды и преднамеренного воздействия в виде дополнительных световых импульсов.

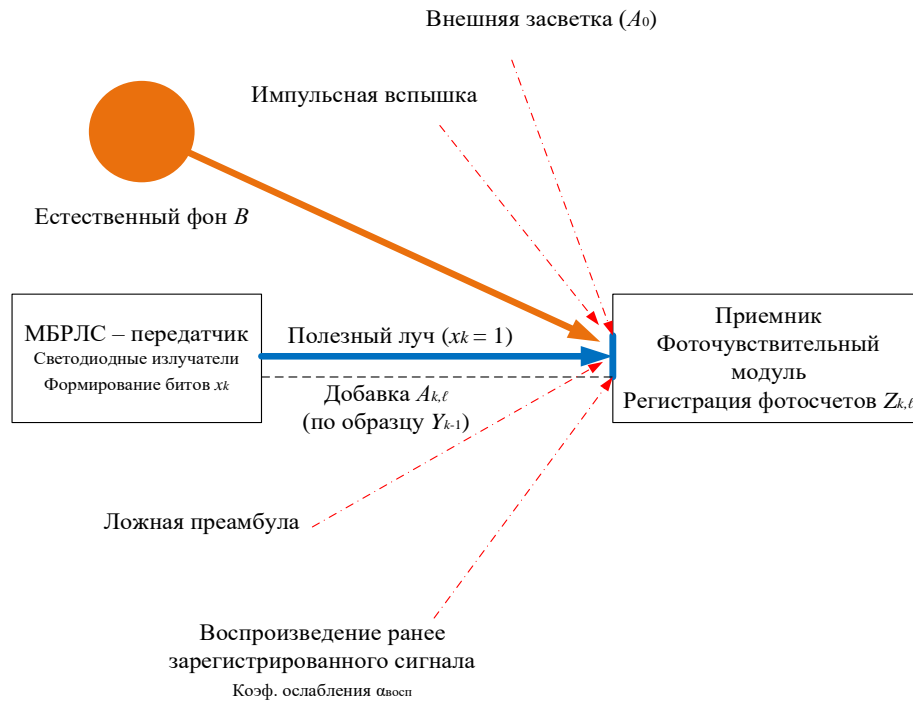


Рисунок 1 – Графическое представление передачи данных по оптическому каналу с возникновением внешних воздействий.

В рамках настоящего исследования решается задача разработки и обоснования протокола пакетной передачи данных по оптическому каналу в видимой части спектра для мультиканальных малогабаритных бортовых радиолокационных станций, то есть обладающих и радиочастотным и оптическим каналами связи. При этом радиочастотные каналы в данном конкретном примере не рассматриваются.

Модель системы оптической передачи и канала распространения

Условимся, что формируемый мультиканальной малогабаритной бортовой радиолокационной станцией пакет данных для оптического канала: $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, $x_k \in \{0,1\}$, $k = 1, \dots, N$, обладает жёсткой структурой, необходимой для синхронизации, диагностики и адаптации. Считаем, что передача осуществляется посредством оптического излучения светодиодного излучателя в видимой части спектра через открытую воздушную среду при наличии прямой видимости между передатчиком и приёмником.

Принимаем допущение, что передаваемый пакет данных состоит из трёх функциональных участков: преамбулы, контрольной последовательности, полезной части сигнала.

Также считаем, что преамбула содержит исключительно известную приёмной стороне бинарную последовательность и используется для начальной синхронизации, а также для оценки фоновой засветки и уровня полезного сигнала [12].

Контрольная последовательность (в ряде технических источников – опорная последовательность) не содержит полезных данных, но состоит из заранее согласованных символов, предназначенных для диагностики состояния канала в пределах текущего пакета, обнаружения преднамеренных оптических воздействий (постоянная засветка, импульсные вспышки, воспроизведение ранее зарегистрированного сигнала (replay attack)), адаптации параметров приёма, в частности – порогов декодирования.

Таким образом, контрольная последовательность играет роль служебного диагностического блока, обеспечивающего оперативную перестройку режима передачи до завершения текущего пакета.

Геометрия канала распространения определяется расстоянием r между аппаратами и углом отклонения θ их оптических осей. Интенсивность полезного сигнала на приёмной стороне подчиняется закону обратных квадратов и зависит от направленности излучения [13].

Для k -го слота длительностью $T_s > 0$ полезная компонента интенсивности описывается выражением:

$$\eta_s(r, \theta) = \eta_0 \cdot \frac{\cos \theta}{r^2} \cdot G_{эф},$$

где η_0 – нормировочный коэффициент, отражающий эффективность передатчика и приёмника, фотосчёты/Вт;

r – расстояние между передатчиком и приёмником, м;

θ – угол между оптическими осями, рад;

$G_{эф}$ – эффективный коэффициент усиления оптической системы (диаграммы направленности), безразмерный [14].

Медленные вариации уровня полезного сигнала, вызванные дрожанием платформы и изменениями ориентации, учтены через множитель $\alpha_k \approx 1$, постоянный на масштабе пакета [15, 16].

В каждом слоте k выполняется L равномерных по времени подвыборок. Результат ℓ -й подвыборки в слоте k , обозначаемый $Z_{k,\ell}$, моделируется распределением Пуассона [17]. Тогда математическое ожидание числа фотосчётов $\lambda_{k,\ell}$ в подвыборке (k, ℓ) обусловлено суммой трёх физических вкладов: полезного сигнала, фоновой засветки и возможного преднамеренного воздействия:

$$\lambda_{k,\ell} = x_k \cdot \eta_s(r, \theta) \cdot \alpha_k + B + A_{k,\ell},$$

где $\lambda_{k,\ell}$ – ожидаемое (среднее) число фотосчётов в подвыборке (k, ℓ) счёты/подвыборка;

$\eta_s(r, \theta)$ – вклад от полезного сигнала при передаче «1», счёты/подвыборка;

α_k – множитель, учитывающий дрожание наведения, безразмерный;

B – уровень фоновой засветки, счёты/подвыборка;

$A_{k,\ell}$, – добавка к ожидаемому числу фотосчётов, возникающая при поступлении на приёмник дополнительного излучения вследствие преднамеренного внешнего воздействия (например, засветки или импульсной вспышки), счёты/подвыборка.

Преамбула содержит известную приёмнику бинарную последовательность:

$$s^{pre} = (s_1^{pre} \dots, s_N^{pre}) \in \{0,1\}^{N_{pre}},$$

где символы «0» и «1» расположены заранее определённым образом. Она используется для начальной диагностики канала: по слотам с $s_k^{pre} = 0$ оценивается уровень фоновой засветки, а по слотам с $s_k^{pre} = 1$ – полезный уровень сигнала.

Оценка фоновой засветки вычисляется как среднее по всем подвыборкам тех слотов преамбулы, где ожидается «0»:

$$\hat{B} = \frac{1}{|M_0|} \sum_{k \in M_0} \left(\frac{1}{L} \sum_{\ell=1}^L Z_{k,\ell} \right),$$

где \hat{B} – оценка фонового уровня засветки, счёты/подвыборка;

$M_0 \subset \{1, \dots, N_{pre}\}$ – множество индексов слотов преамбулы с $s_k^{pre} = 0$;

L – число подвыборок на слот, безразмерное;

$Z_{k,\ell}$ – зарегистрированное число фотосчётов в подвыборке (k, ℓ) , счёты;

$|M_0|$ – мощность множества M_0 , то есть число слотов с ожидаемой «0», шт.

Оценка полезного уровня сигнала выполняется по слотам преамбулы, в которых ожидается передача «1», с предварительным вычитанием фона:

$$\hat{\eta}_s = \frac{1}{|M_1|} \sum_{k \in M_1} \left(\frac{1}{L} \sum_{\ell=1}^L Z_{k,\ell} - \hat{B} \right),$$

где $\hat{\eta}_s$ – оценка интенсивности полезного сигнала, счёты/подвыборка;

$M_0 \subset \{1, \dots, N_{\text{pre}}\}$ – множество индексов слотов преамбулы $s_k^{\text{pre}} = 1$.

Моделирование преднамеренных воздействий происходит следующим образом:

- при постоянной засветке $A_{k,\ell} = A_0$, для всех (k, ℓ) , где A_0 , – постоянная добавка, фотосчёты/подвыборка;
- при импульсных вспышках $A_{k,\ell} = A_p \cdot 1_{(k, \ell) \in P}$, где A_p – амплитуда воздействия, P – множество поражённых подвыборок;
- при воспроизведении сигнала (replay attack):

$$\lambda_{k,\ell} = x_k \cdot \eta_s \cdot \alpha_k + B + \alpha_{\text{rep}} \cdot (Y_{k-1} - \hat{B})_+,$$

где $Y_{k-1} = \frac{1}{L} \sum_{\ell=1}^L Z_{k-1,\ell}$ – среднее число фотосчётов в предыдущем слоте пакета;

$\alpha_{\text{rep}} \in (0, 1)$ – коэффициент ослабления (масштабирования) имитированного сигнала, описывает, насколько интенсивным получится воздействие при воспроизведении ранее записанного фрагмента; задаётся в рамках сценария преднамеренного воздействия типа «воспроизведение ранее записанного сигнала» и отражает уровень ослабления перехваченного наблюдения при его повторном излучении;

$(\cdot)_+ = \max(0, \cdot)_+$ – операция взятия положительной части, применяемая для исключения отрицательных значений при вычитании фона (в случае, если наблюдение в предыдущем слоте меньше фонового уровня, вклад от воспроизведения ранее зарегистрированного сигнала обнуляется) [18].

Ложная преамбула моделируется на уровне синхронизации через случайные корреляционные совпадения [19] при поиске s^{pre} . Решение о принятом бите в слоте k принимается по суммарному числу фотосчётов:

$$\hat{x}_k = \begin{cases} 1, \sum_{\ell=1}^L Z_{k,\ell} \geq D, \\ 0, \text{иначе}, \end{cases}$$

где D – адаптивный порог, рассчитываемый на основе $\hat{\eta}$ и \hat{B} , фотосчёты/слот.

Далее обозначим контрольную (служебную) последовательность длиной N_{ctrl} и её индексное множество:

$$K_{\text{ctrl}} = \{k: k \text{ принадлежит контрольной последовательности}\}, |K_{\text{ctrl}}| = N_{\text{ctrl}},$$

где K_{ctrl} – индексы слотов контрольной последовательности (безразмерно);

N_{ctrl} – общее число индексы слотов контрольной последовательности (безразмерно).

Разобьём K_{ctrl} на подмножества слотов, где ожидается «0» и «1»:

$$K_{\text{ctrl}(0)} = \{k \in K_{\text{ctrl}} : s_{\text{ctrl}}(k) = 0\}, K_{\text{ctrl}(1)} = \{k \in K_{\text{ctrl}} : s_{\text{ctrl}}(k) = 1\}.$$

Здесь $s_{\text{ctrl}}(k) \in \{0, 1\}$ – известный символ контрольной последовательности в слоте k (безразмерно).

Для постоянной засветки проводится тест на устойчивое превышение уровней «нуля» в контрольной последовательности:

$$\Delta B_{\text{ctrl}} = \frac{1}{K_{\text{ctrl}(0)}} \sum_{k \in K_{\text{ctrl}(0)}} Y_k - \hat{B},$$

где ΔB_{ctrl} – оценка добавки к фону на контрольной последовательности, счёты/подвыборку;

$$\Delta B_{\text{ctrl}} > \tau_B \Rightarrow \text{признак постоянной засветки, величина добавки } \hat{A}_0 = \Delta B_{\text{ctrl}};$$

где τ_B – порог по добавке, выбираемый под заданную допустимую вероятность ложной тревоги на основе пуассоновской модели, счёты/подвыборку.

Для импульсных вспышек света (локальные выбросы по подвыборкам) считаем количество превышений на уровне подвыборок сверх «фоно-пороговой» границы:

$$E = \sum_{k \in K_{\text{ctrl}}} \sum_{\ell=1}^L 1\{Z_{k,\ell} > \hat{B} + q_{\alpha(0)}\},$$

где E – число зафиксированных вспышечных превышений (безразмерно, «шт.»);

$1\{\cdot\}$ – индикаторная функция события, если условие в фигурных скобках выполняется \rightarrow индикатор равен 1, если не выполняется \rightarrow индикатор равен 0.

$q_{\alpha(0)}$ – минимальное значение, которое превышает с вероятностью не более $(1-\alpha)$ при распределении Пуассона для \hat{B} , счёты/подвыборку.

Правило выполнения аналогично описанному выше:

$E > \tau_E \Rightarrow$ признак импульсных всплесков (локальная фильтрация выбросов при декодировании), где τ_E – порог по числу превышений, подбираемый из условия: $\Pr(E > \tau_E | \text{без всплесков})$

Для учета воспроизведения ранее зарегистрированного сигнала (attack replay) оцениваем зависимость текущих слотов от предыдущих после вычитания фона:

$$\hat{\alpha}_{восп} = \arg \min_{\alpha \geq 0} \sum_{k \in K_{ctrl} \setminus \{\min K_{ctrl}\}} \left(Y_k - \hat{B} - \alpha(Y_{k-1} - \hat{B})_+ \right)^2,$$

где $\hat{\alpha}_{восп}$ – оценка коэффициента воспроизведения (ослабления) ранее зарегистрированного сигнала, безразмерно;

$(x)_+ = \max(0, x)$ – положительная часть (безразмерно); сумма ведётся по парам соседних слотов контрольной последовательности.

Правило выявления:

$\hat{\alpha}_{восп} > \tau_{восп} \Rightarrow$ признак воспроизведения (для адаптации использовать $\hat{\alpha}_{восп}$),

где $\tau_{восп}$ порог на коэффициент воспроизведения, задаётся по требуемой вероятности ложной тревоги $\beta_{восп}$ (безразмерно).

Далее выполняется проверка согласованности решений, полученных по контрольной последовательности, с её известным шаблоном. Вводим «черновое» бинарное решение по контрольным слотам:

$$\tilde{x}_k = 1 \left\{ Y_k - \hat{B} \geq \frac{1}{2} \hat{\eta}_s \right\}, k \in K_{ctrl},$$

где \tilde{x}_k – грубое решение о символе в контрольном слоте (безразмерно);

порог $\frac{1}{2} \hat{\eta}_s$ – половина оценённого полезного уровня (счёты/подвыборку).

Доля несоответствий с известным шаблоном:

$$\varepsilon_{ctrl} = \frac{1}{N_{ctrl}} \sum_{k \in K_{ctrl}} 1\{\tilde{x}_k \neq s_{ctrl}(k)\},$$

ε_{ctrl} – доля ошибок на контрольной последовательности (безразмерно).

$\varepsilon_{ctrl} > \tau_\varepsilon \Rightarrow$ признак ложной преамбулы (сброс/уточнение синхронизации),

где τ_ε – допустимая доля несоответствий при нормальном канале (безразмерно).

Таким образом возможно реализовать связь системы диагностики с реакцией протокола на пакет. Для оставшейся части того же пакета формируются параметры адаптации:

- оценка устойчивого смещения $\hat{A}_0 = \Delta B_{ctrl}$ используется для коррекции порога D и нормировки статистик;

- индексы (k, ℓ) $Z_{k,\ell} > \hat{B} + q_{\alpha(0)}$ применяется для локальной фильтрации при вычислении $s_k = \sum_{\ell} Z_{k,\ell} > \hat{B} + q_{\alpha(0)}$;

- коэффициент воспроизведения $\hat{\alpha}_{восп}$ служит для умеренного повышения порога и/или разрежения временных позиций импульсов;

- индикатор ложной преамбулы $\varepsilon_{ctrl} > \tau_\varepsilon$ – инициирует перепроверку синхронизации и блокировку начала полезной части до подтверждения.

Все пороги выбираются заранее по требуемым уровням ложных тревог с использованием модели Пуассона и длин контрольных последовательностей.

На рисунке 2 показан ход обработки одного пакета. Методика обработки пакета выглядит следующим образом: приём служебных фрагментов (преамбула и контрольная последовательность), оценка служебных уровней и, диагностика признаков преднамерённых воздействий на контрольной последовательности, узел принятия решения и, при необходимости, согласованная перестройка режима на оставшейся части того же пакета (актуализация порога D , добавление избыточности, перенос/разрежение временных позиций импульсов) с соблюдением ограничения задержки. Завершает схему декодирование полезной части порогом D , с поправками при срабатывании соответствующих ветвей реакции)

[20].

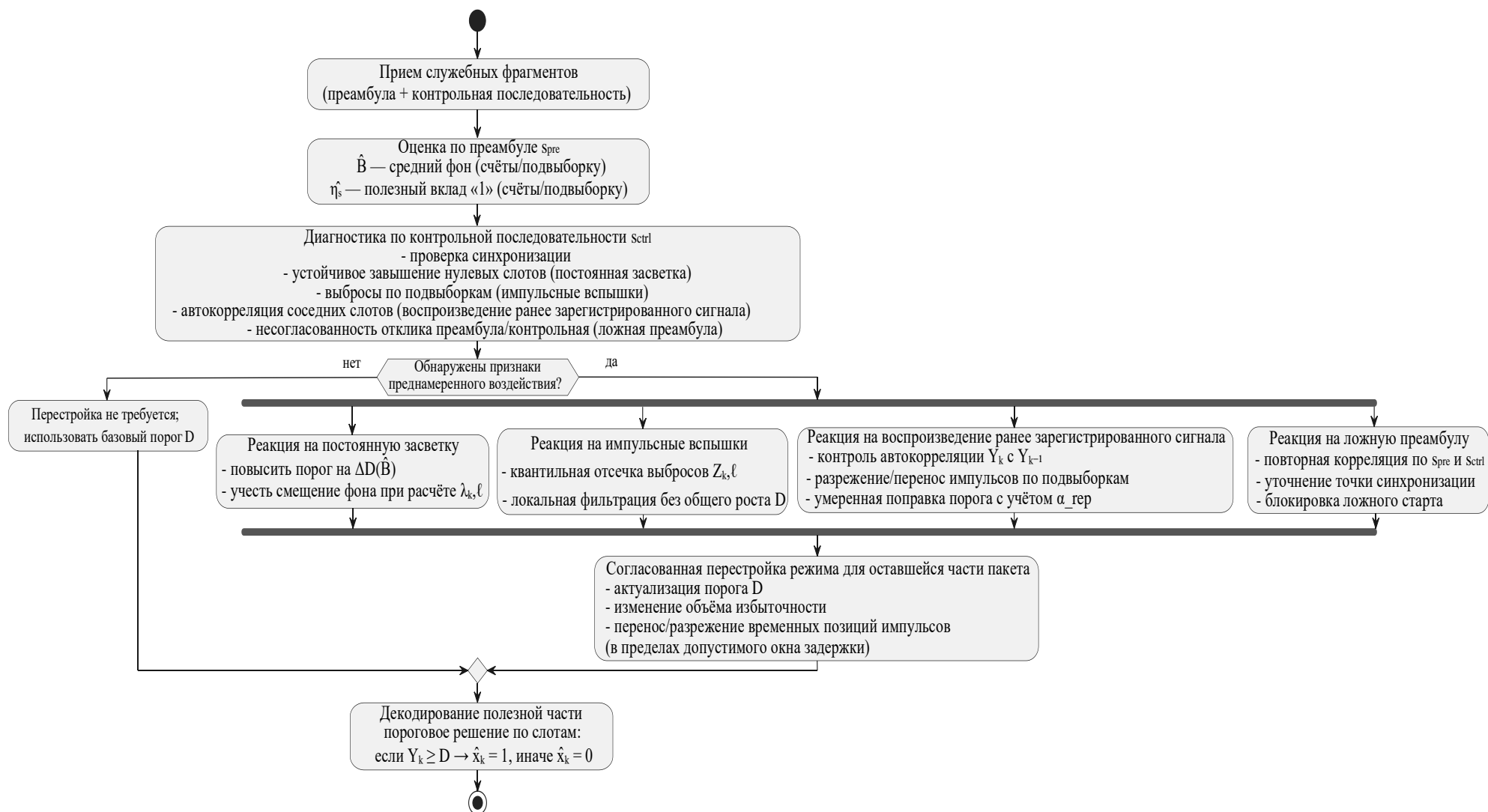


Рисунок 2 – Алгоритм модели оперативного обнаружения и компенсации преднамеренных внешних воздействий в светодиодном канале связи малой бортовой РЛС.

Результаты экспериментов

Для проверки работоспособности разработанной модели оперативного обнаружения и компенсации преднамеренных внешних воздействий в оптическом канале связи мультиканальной МБРЛС выполнено имитационное моделирование: основные параметры которого представлены в таблице 1.

Таблица 1

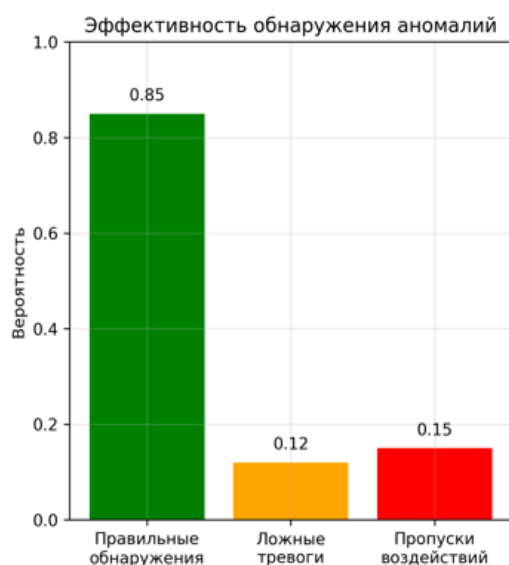
Исходные параметры моделирования сценария оперативного обнаружения и компенсации преднамеренных внешних воздействий в светодиодном канале связи

Параметр	Значение
Расстояние между приёмником и передатчиком, r	100 м
Угол отклонения оптических осей, θ	0 рад
Уровень фоновой засветки, B	2 счёта / подвыборка
Нормировочный коэффициент излучения, η_0	50 счётов / Вт
Эффективный коэффициент усиления, $G_{\text{эф}}$	0,8 (безразмерный)
Длительность слота, T_s	1 мкс
Число подвыборок на слот, L	10
Длина преамбулы	16 слотов
Длина контрольной последовательности	16 слотов
Длина полезной части пакета	100 слотов
Коэффициент ослабления при воздействии воспроизведения, $\alpha_{\text{пер}}$	0.6
Амплитуда импульсной вспышки, A_p	40 счётов / подвыборка
Добавка при постоянной засветке, A_0	8 счётов / подвыборка
Позиции вспышек (сценарий «импульс»)	[25, 60, 90, 110] (номера слотов)

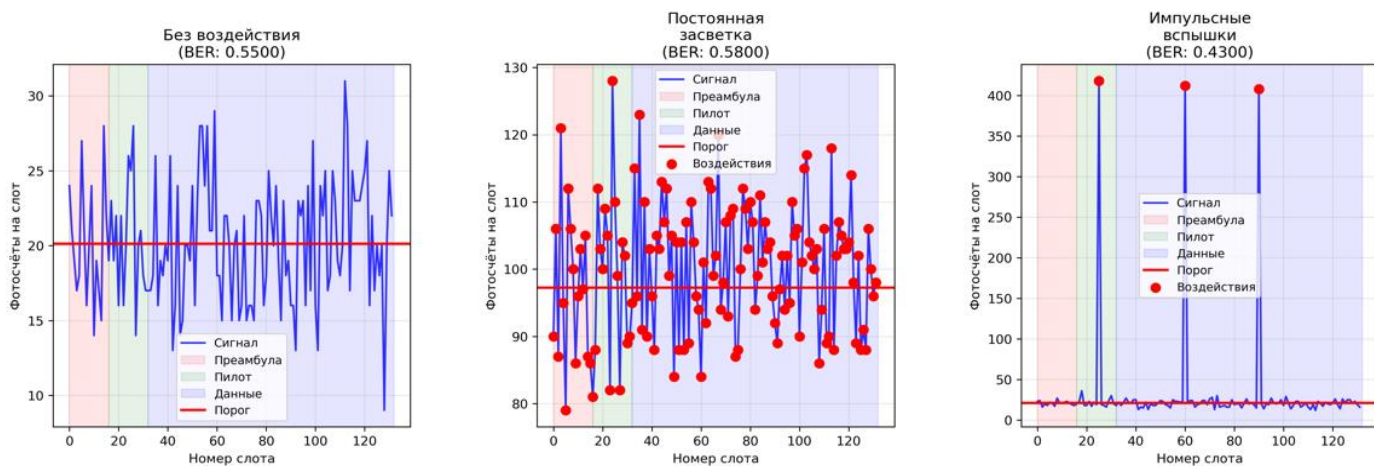
Сценарий включает передачу одного пакета фиксированной структуры («преамбула → контрольная последовательность → данные») через оптический канал в видимой части спектра при наличии прямой видимости. В модели учитываются геометрические параметры (расстояние и угол между оптическими осями), фоновая засветка, дрожание наведения, а также два типа внешних воздействий: постоянная засветка, импульсные вспышки, в которые включены воспроизведение ранее зафиксированного сигнала и ложная преамбула. На приёмной стороне реализуется алгоритм диагностики по контрольной

последовательности и адаптации режима приёма. Эффективность модели оценивается по вероятности битовых ошибок, надёжности выявления воздействий и устойчивости передачи при изменении расстояния.

На рисунке 3 представлены результаты экспериментального исследования работы алгоритма обнаружения и компенсации внешних оптических воздействий в светодиодном канале связи малогабаритной бортовой радиолокационной станции, включая сравнительный анализ эффективности передачи данных при различных типах помеховых воздействий и оценку характеристик обнаружения аномалий.



а



б

Рисунок 3 – Результаты экспериментального исследования работы алгоритма обнаружения (а) и компенсации внешних оптических воздействий (б).

Результаты моделирования демонстрируют эффективность предложенного алгоритма обнаружения и компенсации внешних оптических воздействий в оптическом канале связи мультисканальной МБРЛС. В сценарии

без воздействий зафиксирован базовый уровень битовых ошибок (Bit Error Rate, BER) 0,55, обусловленный естественными факторами – фоновой засветкой и дрожанием наведения. При постоянной засветке интенсивностью 8 фотосчётов/подвыборку наблюдается увеличение BER до 0,5800, что подтверждает уязвимость системы к аддитивным помехам. Напротив, импульсные вспышки амплитудой 40 фотосчётов/подвыборку приводят к снижению BER до 0,43 благодаря эффективной работе адаптивного алгоритма, идентифицирующего и исключающего аномальные всплески сигнала. Статистика обнаружения аномалий показывает высокую эффективность с вероятностью правильного обнаружения 0,85 при уровне ложных тревог 0,12, что соответствует требованиям к системам оперативного реагирования в условиях ограниченного времени обработки данных.

Заключение

В результате исследования разработана и исследована модель оперативного обнаружения и компенсации преднамеренных внешних воздействий в оптическом канале связи мультиканальной МБРЛС. Основной научный вклад состоит в создании комплексного подхода к диагностике состояния оптического канала связи, основанного на статистическом анализе параметров передаваемого сигнала. Предложенная модель интегрирует в себе методы обнаружения четырёх основных типов преднамеренных оптических воздействий: постоянной засветки, импульсных вспышек, воспроизведения ранее записанного сигнала и имитации легитимной преамбулы.

Практическая значимость работы заключается в создании на основании модели методики и алгоритмического обеспечения для повышения устойчивости оптических каналов связи мультиканальной МБРЛС к внешним помехам, что особенно актуально в условиях возрастающих требований к электромагнитной совместимости и защищённости систем передачи информации. Разработанная модель может быть использована при проектировании перспективных систем оптической связи, а также для оценки их помехозащищённости на этапе разработки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Xiao Zhang, Griffin Klevering, Xinyu Lei, Yiwen Hu, Li Xiao, and Guan-Hua Tu. 2023. The Security in Optical Wireless Communication: A Survey. ACM Comput. Surv. 55, 14s, Article 329 (December 2023), 36 pages. <https://doi.org/10.1145/3594718>
2. Örnek, C.; Kartal, M. Securing the Future: A Resourceful Jamming Detection Method Utilizing the EVM Metric for Next-Generation Communication Systems. Electronics 2023, 12, 4948. <https://doi.org/10.3390/electronics12244948>
3. Солёный С. В., Ненашев В. А., Кузьменко В. П. Авиационный контроль земной поверхности на основе формирования видеокадров и методов группового технического зрения: монография – СПб.: ГУАП, 2025. – 186 с. ISBN 978-5-8088-2062-3
4. Гончаренко Я. В. Осуществление навигации беспилотных воздушных судов в зоне действия наземных радиотехнических систем // Труды МАИ. 2025. № 142.
5. Горбунов С. А., Ненашев В. А., Мажитов М. В., Хадур А. А. Алгоритм оценивания координат состояния вертолётa в бортовой радиолокационной станции // Труды МАИ. 2022. № 127.
6. Weng, H.; Wang, W.; Chen, Z.; Zhu, B.; Li, F. A Review of Indoor Optical Wireless Communication. Photonics 2024, 11, 722. <https://doi.org/10.3390/photonics11080722>
7. Nasution, M.R.A.; Herfandi, H.; Sitanggang, O.S.; Nguyen, H.; Jang, Y.M. Proximity-Based Optical Camera Communication with Multiple Transmitters Using Deep Learning. Sensors 2024, 24, 702. <https://doi.org/10.3390/s24020702>

8. Ахмедов Э. М. Вопросы оптимизации расположения центра приема и управления разведывательными БПЛА с учетом отражений сигнала от городских застроек // Труды МАИ. 2025. № 142.
9. Глушков А. Н., Коратаев П. Д., Частухин К. Р., Толстых М. Ю. Способ демодуляции биортогональных сигналов с двоичной фазовой манипуляцией // Труды МАИ. 2025. № 142.
10. Ананьев А. В., Печкарев В. А. Алгоритм оценки коэффициентов признаков потерь при рисках передачи информации в воздушных сетях связи // Труды МАИ. 2025. № 141.
11. Саута О. И., Чембарисова Р. И., Рыжов К. Ю., Ненашев С. А., Ненашев В. А., Лагошина К. В., Григоров М. Ю., Кузьменко В. П. Анализ автокорреляционных характеристик модифицированных последовательностей на основе кодов Баркера: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025618102. Зарег. 11.04.2025. Заявка № 2025616862 от 01.04.2025. Доступ: открытый.
12. Yiting Yang, Jing He, and Biao Zhou, "Effective interference mitigation scheme for multi-LED-based mobile optical camera communication," Appl. Opt. 60, 10928-10934 (2021).
13. Тепликова В. И., Сенцов А. А., Ненашев В. А., Поляков В. Б. Анализ диаграммы направленности плоской многоэлементной активной фазированной антенной решётки // Труды МАИ. 2022. № 125.
14. Palacios Játiva, P.; Román Cañizares, M.; Azurdia-Meza, C.A.; Zabala-Blanco, D.; Dehghan Firoozabadi, A.; Seguel, F.; Montejo-Sánchez, S.; Soto, I. Interference Mitigation for Visible Light Communications in Underground Mines Using Angle Diversity Receivers. Sensors 2020, 20, 367. <https://doi.org/10.3390/s20020367>
15. Zicai Cao, Mengfan Cheng, Qi Yang, Ming Tang, Deming Liu, and Lei Deng, "Experimental investigation of environmental interference mitigation and blocked LEDs using a memory-artificial neural network in 3D indoor visible light positioning systems," Opt. Express 29, 33937-33953 (2021)

16. Bera, K.; Karmakar, N. Interference Mitigation in VLC Systems using a Variable Focus Liquid Lens. *Photonics* 2024, 11, 506.
<https://doi.org/10.3390/photonics11060506>
17. Junbin Fang, Junxing Pan, Xia Huang, Jiajun Lin, and Canjian Jiang, "Integrated physical-layer secure visible light communication and positioning system based on polar codes," *Opt. Express* 31, 41756-41772 (2023).
18. Chauhan I, Paul P, Bhatnagar MR, Nebhen J. Performance of optical space shift keying under jamming. *Appl Opt.* 2021 Mar 1;60(7):1856-1863. doi: 10.1364/AO.414456. PMID: 33690274.
19. Chen J., Shu T. VL-Watchdog: Visible Light Spoofing Detection With Redundant Orthogonal Coding // *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. Vol. 9, No. 12. P. 9858–9871. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3155600.
20. Chauhan, I.; Bhatnagar, M.R. Performance of Transmit Aperture Selection to Mitigate Jamming. *Appl. Sci.* 2022, 12, 2228.
<https://doi.org/10.3390/app12042228>.

References

1. Zhang, X.; Klevering, G.; Lei, X.; Hu, Y.; Xiao, L.; Tu, G.-H. (2023). The Security in Optical Wireless Communication: A Survey. *ACM Computing Surveys*, 55(14s), Article 329. <https://doi.org/10.1145/3594718>
2. Örnek, C.; Kartal, M. (2023). Securing the Future: A Resourceful Jamming Detection Method Utilizing the EVM Metric for Next-Generation Communication Systems. *Electronics*, 12, 4948. <https://doi.org/10.3390/electronics12244948>
3. Solyonyj, S. V.; Nenashev, V. A.; Kuzmenko, V. P. (2025). *Aviatsionnyy kontrol' zemnoy poverkhnosti na osnove formirovaniya videokadrov i metodov gruppovogo tekhnicheskogo zreniya: monografiya* [Aviation Control of the Earth's Surface Based on Frame Formation and Group Technical Vision Methods: Monograph]. Saint Petersburg: GUAP. 186 p. ISBN 978-5-8088-2062-3. [in Russian]
4. Goncharenko, Ya. V. (2025). *Osushchestvlenie navigatsii bespilotnykh vozдушnykh sudov v zone deystviya nazemnykh radiotekhnicheskikh sistem* [Navigation of Unmanned Aerial Vehicles within the Coverage of Ground-Based Radio-

Technical Systems]. Trudy MAI, no. 142. [in Russian]

5. Gorbunov, S. A.; Nenashev, V. A.; Mazhitov, M. V.; Khadur, A. A. (2022). Algoritm otsenivaniya koordinat sostoyaniya vertolyota v bortovoy radiolokatsionnoy stantsii [Algorithm for Estimating the State Coordinates of a Helicopter in an Onboard Radar Station]. Trudy MAI, no. 127. [in Russian]

6. Weng, H.; Wang, W.; Chen, Z.; Zhu, B.; Li, F. (2024). A Review of Indoor Optical Wireless Communication. Photonics, 11, 722. <https://doi.org/10.3390/photonics11080722>

7. Nasution, M. R. A.; Herfandi, H.; Sitanggang, O. S.; Nguyen, H.; Jang, Y. M. (2024). Proximity-Based Optical Camera Communication with Multiple Transmitters Using Deep Learning. Sensors, 24, 702. <https://doi.org/10.3390/s24020702>

8. Akhmedov, E. M. (2025). Voprosy optimizatsii raspolozheniya tsentra priema i upravleniya razvedyvatel'nyimi BPLA s uchetom otrazheniy signala ot gorodskikh zastroek [Issues of Optimizing the Location of the Reception and Control Center for Reconnaissance UAVs Considering Reflections from Urban Buildings]. Trudy MAI, no. 142. [in Russian]

9. Glushkov, A. N.; Korataev, P. D.; Chastukhin, K. R.; Tolstykh, M. Yu. (2025). Sposob demodulyatsii biortogonal'nykh signalov s dvoichnoy fazovoy manipulyatsiey [A Method of Demodulating Biorthogonal Signals with Binary Phase Shift Keying]. Trudy MAI, no. 142. [in Russian]

10. Ananyev, A. V.; Pechkarev, V. A. (2025). Algoritm otsenki koeffitsientov priznakov poter' pri riskakh peredachi informatsii v vozdushnykh setyakh svyazi [An Algorithm for Assessing Loss-Feature Coefficients under Information-Transfer Risks in Airborne Communication Networks]. Trudy MAI, no. 141. [in Russian]

11. Sauta, O. I.; Chembarisova, R. I.; Ryzhov, K. Yu.; Nenashev, S. A.; Nenashev, V. A.; Lagoshina, K. V.; Grigorov, M. Yu.; Kuzmenko, V. P. (2025). Analiz avtokorrelyatsionnykh kharakteristik modifitsirovannykh posledovatel'nostey na osnove kodov Barkera: svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM RU 2025618102, 11.04.2025; Zayavka No. 2025616862 ot 01.04.2025 [Analysis of Autocorrelation Characteristics of Modified Sequences Based on Barker Codes: Certificate of Registration of a Computer Program (RU 2025618102)]. [in Russian]

12. Yang, Y.; He, J.; Zhou, B. (2021). Effective Interference Mitigation Scheme for Multi-LED-Based Mobile Optical Camera Communication. *Applied Optics*, 60(35), 10928–10934. <https://doi.org/10.1364/AO.443681>
13. Teplikova, V. I.; Sentsov, A. A.; Nenashev, V. A.; Polyakov, V. B. (2022). Analiz diagrammy napravlenosti ploskoy mnogoelementnoy aktivnoy fazirovannoy antennoy reshetki [Analysis of the Radiation Pattern of a Planar Multi-Element Active Phased Array Antenna]. *Trudy MAI*, no. 125. [in Russian]
14. Palacios Játiva, P.; Román Cañizares, M.; Azurdia-Meza, C. A.; Zabala-Blanco, D.; Dehghan Firoozabadi, A.; Seguel, F.; Montejo-Sánchez, S.; Soto, I. (2020). Interference Mitigation for Visible Light Communications in Underground Mines Using Angle Diversity Receivers. *Sensors*, 20, 367. <https://doi.org/10.3390/s20020367>
15. Cao, Z.; Cheng, M.; Yang, Q.; Tang, M.; Liu, D.; Deng, L. (2021). Experimental Investigation of Environmental Interference Mitigation and Blocked LEDs Using a Memory-Artificial Neural Network in 3D Indoor Visible Light Positioning Systems. *Optics Express*, 29, 33937–33953.
16. Bera, K.; Karmakar, N. (2024). Interference Mitigation in VLC Systems Using a Variable Focus Liquid Lens. *Photonics*, 11, 506. <https://doi.org/10.3390/photonics11060506>
17. Fang, J.; Pan, J.; Huang, X.; Lin, J.; Jiang, C. (2023). Integrated Physical-Layer Secure Visible Light Communication and Positioning System Based on Polar Codes. *Optics Express*, 31, 41756–41772.
18. Chauhan, I.; Paul, P.; Bhatnagar, M. R.; Nebhen, J. (2021). Performance of Optical Space Shift Keying Under Jamming. *Applied Optics*, 60(7), 1856–1863. <https://doi.org/10.1364/AO.414456>.
19. Chen, J.; Shu, T. (2022). VL-Watchdog: Visible Light Spoofing Detection With Redundant Orthogonal Coding. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(12), 9858–9871. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3155600>.
20. Chauhan, I.; Bhatnagar, M. R. (2022). Performance of Transmit Aperture Selection to Mitigate Jamming. *Applied Sciences*, 12, 2228. <https://doi.org/10.3390/app12042228>

Информация об авторах

Владимир Павлович Кузьменко, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры №32 электромеханики и робототехники, заведующий Лабораторией электроэнергетики Инженерной школы, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия; SPIN-код: 3159-4202; AuthorID: 1111872; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0270-4875>; ScopusID: 57215003337.

Вадим Александрович Ненашев, кандидат технических наук, доцент, – доцент кафедры №23 конструирования и технологий электронных и лазерных средств, заведующий Лабораторией машинного обучения Инженерной школы, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия; SPIN-код: 6728-6108; AuthorID: 745612; ScopusID: 57188553603; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5285-2051>; e-mail: nenashev.va@yandex.ru

Сергей Валентинович Солёный, проректор по образовательным технологиям и инновационной деятельности, заведующий кафедрой №32 электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия; SPIN-код: 3957-5891, AuthorID: 745612; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7919-3890>; ScopusID: 57190976506.

Information about the authors

Vladimir P. Kuzmenko, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor at Department No.32 of Electromechanics and Robotics, Head of the Laboratory of Electrical Power Engineering School of Engineering, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia; SPIN-код: 3159-4202; AuthorID: 1111872; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0270-4875>; ScopusID: 57215003337.

Vadim A. Nenashev, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor at Department No. 23 of Design and Technologies of Electronic and Laser Systems, Head of the Machine Learning Laboratory School of Engineering, Saint Petersburg State

University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia; SPIN-код: 6728-6108; AuthorID: 745612; ScopusID: 57188553603; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5285-2051>; e-mail: nenashev.va@yandex.ru

Sergey V. Soleny, Vice-Rector for Educational Technologies and Innovative Activities, Head of Department No.32 of Electromechanics and Robotics, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia; SPIN-код: 3957-5891, AuthorID: 745612; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7919-3890>; ScopusID:57190976506.

Получено 6 ноября 2025 ● Принято к публикации 15 декабря 2025 ● Опубликовано 30 декабря 2025
Received 6 November 2025 ● Accepted 15 December 2025 ● Published 30 December 2025
