

Научная статья

УДК 656.254.1

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-98-110>

EDN:QNLEDM

Модель оценки разведзащищенности элементов локальной навигационной системы

- ✉ Сергей Алексеевич Якушенко^{1,2}, was16@mail.ru
Владимир Юрьевич Копыльцов², vkopylcov@yandex.ru
Алексей Анатольевич Ларионов¹, alekseilariionov2000@yandex.ru
Дина Владимировна Васильева¹, Profinst2guap@mail.ru
Сергей Викторович Дворников^{1,2}, practicsv@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

²Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Уязвимость систем глобального позиционирования стимулирует к развертыванию и практической эксплуатации локальных радионавигационных систем в интересах решения частных навигационных задач беспилотных авиационных систем. Прагматизм такого подхода базируется на успешности эксплуатации таких радиосистем ближней навигации, как TACAN и VOR / DME. Вместе с тем, применение беспилотных летательных аппаратов в качестве платформ для аппаратуры комплексов несанкционированного радиомониторинга и постановки помех делает локальные радионавигационные системы уязвимыми к деструктивным воздействиям. Поэтому необходима разработка комплекса мероприятий по оценке разведзащищенности линий радионавигационной информации и, в перспективе, – методов повышения их помехозащищенности.

Цель: создание математической модели для исследования и оценки разведзащищенности элементов локальных радионавигационных систем на основе совпадения импульсных потоков. Для этого использовались **методы** энергетического расчета линий радиосвязи, теория вероятностей, формализации процедур поиска сигналов на основе теории импульсных потоков.

Результаты: разработана частная модель функционирования локальной радионавигационной системы обслуживания беспилотных авиационных платформ; уточнен аналитический аппарат для модели радиомониторинга сигналов источников радиоизлучений с учетом пространственного, частотного и временного совпадения диаграмм направленности антенн приемника поиска и излучаемого в импульсном режиме радионавигационного сигнала; получены зависимости вероятности электромагнитной доступности источников радиоизлучений от дистанции мониторинга при различной ширине диаграмм направленности антенны приемника поиска; формализованы процедуры поиска навигационных сигналов в виде импульсного потока; рассчитаны зависимости вероятности и времени совпадения импульсных потоков, характеризующих процедуры поиска и функционирования локальных радионавигационных систем.

Практическая значимость: результаты работы могут использоваться при развертывании локальных радионавигационных систем для обеспечения их разведзащищенности в зависимости от потенциальной дальности мониторинга при различной ширине диаграммы направленности антенны приемника поиска.

Ключевые слова: локальная радионавигационная система, оценка разведзащищенности, процедуры поиска сигналов в терминах теории совпадающих импульсных потоков, электромагнитная доступность

Ссылка для цитирования: Якушенко С.А., Копыльцов В.Ю., Ларионов И.А., Васильева Д.В., Дворников С.В. Модель оценки разведзащищенности элементов локальной навигационной системы // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 98–110. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-98-110. EDN:QNLEDM

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-98-110>

EDN:QNLEDM

Model for Assessing the Intelligence Protection of Local Navigation System Elements

 **Sergey A. Yakushenko**^{1,2} , was16@mail.ru

 **Vladimir Yu. Kopyltsov**¹, vkopyltcov@yandex.ru

 **Alexey A. Larionov**¹, alekseilarionov2000@yandex.ru

 **Dina V. Vasilyeva**¹, Profinst2guap@mail.ru

 **Sergey V. Dvornikov**^{1,2}, practcdsv@yandex.ru

¹Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, 190000, Russian Federation

²Military Academy of Communications,
St. Petersburg, 194064, Russian Federation

Аннотация

Relevance. The vulnerability of global positioning systems stimulates the deployment and practical operation of local radio navigation systems in order to solve specific navigation tasks for unmanned aerial systems. This approach is based on the successful operation of short-range navigation systems such as TACAN and VOR/DME. However, the use of unmanned aerial vehicles as platforms for unauthorized radio monitoring and jamming systems makes local radio navigation systems vulnerable to destructive interference. Therefore, it is necessary to develop a set of measures to assess the intelligence protection of radio navigation information lines and, in the future, to develop methods to improve their interference protection.

Objective: to create a mathematical model for researching and evaluating the intelligence protection of elements of local radio navigation systems based on the coincidence of impulse streams.

Methods: energy calculation methods for radio communication lines, probability theory, and formalization of signal search procedures based on pulse flow theory.

Results: a private model of the functioning of a local radio navigation system for servicing unmanned aircraft platforms has been developed; an analytical apparatus for a model of radio monitoring of radio source signals has been refined, taking into account the spatial, frequency and time coincidence of the antenna patterns of the search receiver and the radio navigation signal emitted in pulsed mode; dependences of the probability of electromagnetic availability of radio sources on the monitoring distance for different antenna pattern widths have been obtained. the search receiver; the procedures for searching for navigation signals in the form of a pulse stream are formalized; the dependences of the probability and time of coincidence of pulse streams characterizing the search procedures and the functioning of local radio navigation systems are calculated.

Practical significance: the results of the work can be used in the design of the deployment of local radio navigation systems, taking into account the dependence of the probability of revealing radio emission sources on the potential monitoring range at different antenna beam widths.

Ключевые слова: local radio navigation system, assessment of intelligence protection, signal search procedures in terms of the theory of coinciding impulse flows, electromagnetic accessibility

For citation: Yakushenko S.A., Kopyltsov V.Yu., Larionov I.A., Vasilyeva D.V., Dvornikov S.V. Model for Assessing the Intelligence Security of Local Navigation System Elements. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(3):98–110. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-98-110. EDN:QNLEDM

Введение

В настоящее время системы глобального позиционирования все чаще подвергаются деструктивным воздействиям со стороны международных

террористических организаций [1, 2]. В таких условиях целесообразным видится переход к развертыванию и практической эксплуатации локальных радионавигационных систем (ЛРНС) [3]. Эффек-

тивность данного подхода обусловлена возможностью развертывания наземных опорных станций (ОС), связанных сетью с центральной опорной станцией (ЦС) и работающих в системе единого времени. Прагматизм предлагаемой стратегии базируется на успешности эксплуатации таких радиосистем ближней навигации, как TACAN и VOR / DME, функционирующих в диапазоне 108–118 МГц, а также отечественной системы РСБН (полоса частот 873,6–935,2 МГц) [4]. Высокий диапазон частот обеспечивает мобильность таких ЛРНС, что является актуальным моментом с позиций развертывания на неподготовленных в техническом плане территориях, а использование антенных систем с управляемыми диаграммами направленности наделяет их приемлемой помехозащищенностью. Вместе с тем применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве платформ для аппаратуры комплекса радиомониторинга и постановки помех (КРПП) делает ЛРНС уязвимыми к деструктивным воздействиям [5].

В целях исследования такой ситуации была разработана математическая модель оценки разведзащищенности элементов (объектов) ЛРНС, базирующаяся на элементах теории совпадения импульсных потоков, которая представлена в статье.

Описание структуры модели ЛРНС

Будем полагать, что в общем случае ЛРНС состоит из нескольких наземных ОС и ЦС, причем работа такой сети ведется в импульсном режиме. ОС излучают радионавигационные сигналы [6], тем самым образуя радионавигационную сеть, управляемую посредством ЦС (рисунок 1). ЦС принимает сигналы от всех ОС и решает навигационную задачу, результаты которой передает на объекты навигации (ОН), в качестве которых рассмотрим группу беспилотных авиационных систем (БАС), выполняющих задачи по радиолокационному зондированию местности в интересах картографии.

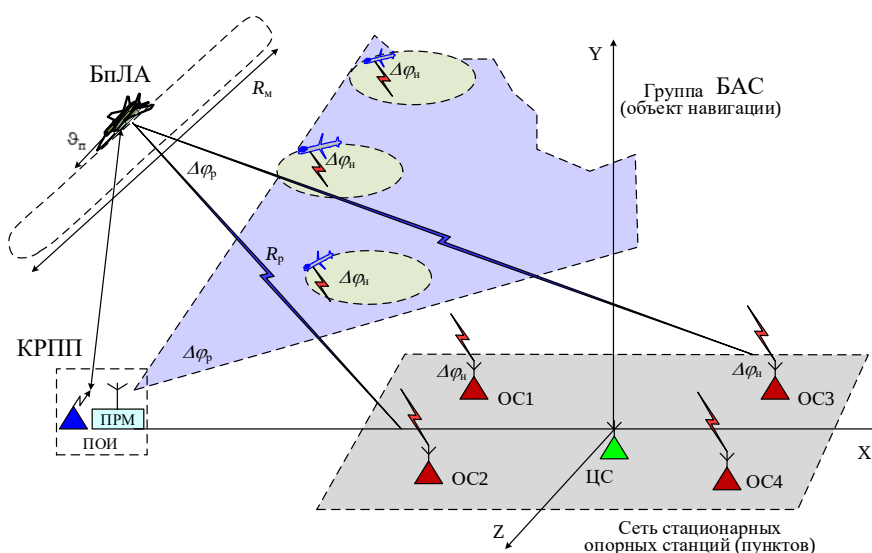


Рис. 1. Модель функционирования ЛРНС

Fig. 1. Model of Functioning of the LRNS

Далее будем полагать, что модель позиционирования БАС использует асинхронно разностно-дальномерный (А-РД) способ для определения в пространстве своего местоположения [7]. Такой способ позволяет обойтись без реализации процедуры предварительной синхронизации часов на ОС. Это достигается за счет того, что радионавигационные сигналы ретранслируются от ОС на ЦС [6]. При этом эти те же сигналы принимает ЦС по радиоканалу прямой видимости от БАС, что дает ей возможность компенсировать нестабильность своих опорных генераторов.

Таким образом, согласно модели, каждый БАС принимает n -импульсных потоков радионавигационных сигналов от наземных n -ОС и далее ретранс-

лируют их на ЦС. Поскольку все ОС работают в верхнем субдиапазоне высоких частот и нижней части диапазона крайне высоких частот, то станции ЛРНС размещаются на местности с учетом обеспечения прямой видимости, как с БАС, так и друг с другом.

Радионавигационные сигналы в такой ЛРНС представляют собой импульсную последовательность с постоянной длительностью импульсов и псевдослучайным периодом их следования [6, 8]. Закон модуляции для каждой ОС, $i = 1, 2, \dots, N$, задает период перед началом работы. Временные параметры радионавигационных сигналов ОС приведены на рисунке 2а [9].

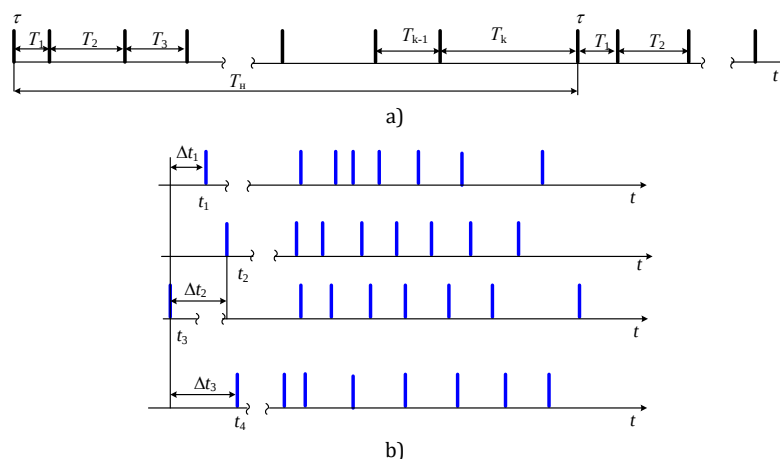


Рис. 2. Структура навигационного сигнала с изменяемым периодом повторения: а) временные параметры; б) групповой синхронизированный навигационный сигнал

Fig. 2. Structure of a Navigation Signal with a Variable Repetition Period: a) Timing Parameters; b) Group Synchronized Navigation Signal

Временное разделение сигналов осуществляется посредством привязки к шкале времени ЦС за счет передачи синхросигналов на каждую ОС. Для обеспечения однозначного взаимного расположения сигналов на шкале импульсной последовательности прихода импульсов от ОС_і в ЦС, исключающего их одновременный приход, необходимо выполнять коррекцию шкал времени ОС [8]. Такая коррекция осуществляется путем вычисления величины расхождения моментов времени отсчета импульсов последовательностей, генерируемых каждой из ОС (это необходимо в виду несинхронной работы передатчиков ОС).

Результат рассогласования (например, для четырех ОС), определяемый как разность, дает величину расхождения шкалы времени *i*-ых ОС относительно времени *t*_ц ЦС:

$$t_i - t_{\text{ц}} = \Delta t_{\text{иц}},$$

где *i* = 1, 2, 3, 4.

Значение $\Delta t_{\text{иц}}$ определяет индивидуальную поправку для шкалы времени передатчика соответствующего *i*-ой ОС (рисунок 2б). Использование на каждом ОС_і сигналов с уникальной временной структурой следования импульсов повышает устойчивость ЛРНС к имитационным помехам [10, 11], а также снижает возможность любого несанкционированного доступа в радионавигационную систему. В рамках ЛРНС время цикла навигации составляет 200 мс.

Нарушитель будет использовать деструктивное радиоэлектронное воздействие, приводящее или к энергетическому подавлению сигналов, или к локальной деформации радионавигационного поля. Поэтому радиоэлектронные воздействия будут или в виде шумовых помех (активное энергетическое радиоподавление), или структурных помех

(ложная радиоимитация) [10]. Очевиден выбор последнего подхода, поскольку он менее энергетически затратный, с учетом того, что часть элементов КРПП размещается на БПЛА [11].

Таким образом, проведенный анализ особенностей построения и функционирования ЛРНС позволяет заключить, что работа в импульсном режиме ЛРНС потребует аналогичной работы от КРПП. Поэтому использование классических методов оценки радиоэлектронного воздействия [9], основанных на электромагнитной доступности (ЭМД) каналов непрерывного излучения, не позволит получить приемлемого адекватного результата.

Следовательно, необходима разработка соответствующего научно-методического аппарата, с учетом вышеприведенных особенностей, но вначале необходимо рассмотреть особенности мониторинга объектов ЛРНС.

Модель радиомониторинга объектов ЛРНС

Эффективное ведение радиомониторинга возможно только при условии ЭМД источников радиоизлучений (ИРИ) приемнику КРПП [12].

Кроме того, особенностью мониторинга ЛРНС являются наличия множества наземных и воздушных ИРИ (ОС и ретрансляторов на БАС), излучающих однотипные сигналы в форме импульсной последовательности, но с различной структурой и параметрами. Номиналы частот радионавигационных сигналов и их ширина спектра, в отличие от радиотелевизионных ГЛОНАСС, могут быть неизвестными, поэтому нарушитель вынужден проводить частотный поиск ИРИ в широком диапазоне. Такой процесс можно описать на основе импульсного потока [13, 14], характеризующего поиск сигнала по частоте. Отметим, что процесс ведения радиомониторинга с БАС посредством антенных систем с управляемыми диаграммами направленности (ДН), может быть также

описан посредством импульсного потока, но в пространстве. Согласно рассмотренной модели, для эффективного ведения радиомониторинга ЛРНС необходимо выполнение ряда условий. Это наличие электромагнитной доступности, а также частотно-временного и пространственного совпадения сигналов объектов ЛРНС и ДН приемника поиска КРПП [15]. Очевидно, что такой поиск будет носить случайный характер, который может быть оценен вероятностно-временными показателями, а именно вероятностью и временем вскрытия радионавигационных линий ИРИ ЛРНС.

В общем случае вскрытие радионавигационных линий ИРИ системой поиска КРПП зависит от вероятности обнаружения $p_{обн}$ ИРИ и вероятности его распознавания $p_{расп.}$ Данные события независимы, поэтому вероятность вскрытия равна:

$$p_{вскр} = p_{обн} p_{расп.} \quad (1)$$

В свою очередь, вероятность обнаружения ИРИ предусматривает выделение сигнала на фоне помех: установление факта наличия радиоизлучения в пространстве в определенный момент времени на заданной частоте (в полосе частот) и проведение первичного анализа (определение среднего значения частоты несущей, полосы частот сигнала, его структура, вид модуляции и т. п.). Математически результаты обнаружения можно записать выражением [16]:

$$p_{обн} = p_{эмд} p_{к}, \quad (2)$$

где $p_{эмд}$ – вероятность ЭМД; $p_{к}$ – вероятность пространственного и частотно-временного контакта импульсных потоков.

ЭМД радиоизлучений (ОС ЛРНС и ретрансляторов на БПЛА) к приемнику поиска КРПП в гауссовом канале определяется выражением [17]:

$$p_{эмд} = p(h \geq h_{тр}) = \Phi(u), \quad (3)$$

где $u = \gamma h$ – параметр распределения; γ – параметр модуляции (для сигналов с фазовой модуляцией $\gamma = \sqrt{2}$); $\Phi(u)$ – функция Крампа:

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-t^2/2} dt = \Phi(\gamma h) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\gamma h} \exp\left(-\frac{h}{2}\right) dh.$$

При ЭМД реальное отношение средней мощности сигнала к средней мощности шума h на входе приемника поиска будет не менее требуемого значения $h_{тр}$, которое определяется техническими характеристиками КРПП, т. е.:

$$h = (P_{снр}/P_{шр}) > (P_{снр}/P_{шр})^* = h_{тр}, \quad (4)$$

где $P_{шр}$ – уровень мощности шума на входе приемника; $P_{снр}$ – уровень мощности радионавигационного сигнала входе приемника [18]:

$$P_{шр} = k_6 T_{шр} \Delta F_{пм},$$

где $k_6 = 1,38 \cdot 10^{-23}$ ВтГц/град – постоянная Больцмана; $\Delta F_{пм}$ – полоса пропускания приемника, согласованная с шириной спектра навигационного сигнала $\Delta F_{сн}$; $T_{шр}$ – шумовая температура приемника разведки ($T_0 = 273^\circ + t^\circ\text{C}$ – температура окружающей среды в Кельвинах):

$$T_{шр} = (n_{ш} - 1) T_0,$$

где $n_{ш}$ – коэффициент шума приемника поиска.

Значение медианной мощности сигнала на входе приемника разведки определяется в соответствии с первым уравнением связи [19]:

$$P_{снр} = P_{пдн} + W_{пдн} + G_{пдн}(\varphi_{нр}) + W_{\Sigma} + G_{пмр} + W_{пмр}, \quad (5)$$

где $P_{пдн}$ – уровень мощности радионавигационного сигнала на выходе передатчика ИРИ; $G_{пдн}(\varphi_{нр})$ – коэффициент усиления передающей антенн ОС в направлении приемника поиска; $G_{пмр}$ – коэффициент усиления приемной антенны КРПП; $W_{пдн}$ – затухание в фидере передатчика ИРИ; $W_{пмр}$ – затухание в фидере приемника поиска [10]; W_{Σ} – суммарное затухание на трассе поиска (W_p – дополнительное затухание радиосигнала, вносимое рельефом местности; $W_{атм}$ – дополнительное затухание радиосигнала, вызываемое атмосферой; $W_{св}$ – затухание в свободном пространстве):

$$W_{\Sigma} = W_{св} + W_p + W_{атм}.$$

Затухание в свободном пространстве равно:

$$W_{св[дБ]} = 10 \cdot \lg\left(\frac{4\pi R_p}{\lambda}\right)^2 \quad (6)$$

или

$$W_{св} = 92,45 + 20 \lg(f_{[Гц]} + 20 \lg R_{п[км]}),$$

где R_p – дальность поиска; λ – длина волны передатчиков ИРИ.

Дальность между БПЛА поиска и ИРИ, размещенными на БАС, можно определить по уравнению прямой видимости [18, 19]:

$$R_p = \sqrt{h_p^2 + R_{пз}^2}, \quad (7)$$

где R_p – дальность между БПЛА разведки и ИРИ по поверхности Земли; h_p – высота полета БПЛА поиска.

Остальные параметры определяются техническими характеристиками КРПП и ИРИ. Учитывая, что мониторинг ИРИ ведется с БПЛА с применением направленных антенн с узкими ДН, то будем полагать, что расширение зоны пространственного поиска достигается прокладкой и итерационного маршрута полета протяженностью R_m вдоль зоны мониторинга (такой выбор авторами сделан

умышленно, т. к. это самые сложные условия для обеспечения разведзащищенности). В современных КРПП поиск ИРИ в широком диапазоне частот реализуется автоматически, посредством сканирующих приемников, анализирующих обнаруженные сигналы. Результаты оценки ЭМД ИРИ приемнику поиска, размещенного на платформе БПЛА, представлены на рисунке 3.

Результаты получены, исходя из следующих исходных данных: $P_{\text{пдн}} = 10$ Вт; $G_{\text{пдн}}(\varphi_{\text{нр}}) = 3$ дБ; $G_{\text{пмр}} = 18, 12, 8, 6$ дБ; $\Delta F_c = 200$ МГц; $h_{\text{тр}} = 5$ дБ; затухание в фидерных линиях не более 3 дБ.

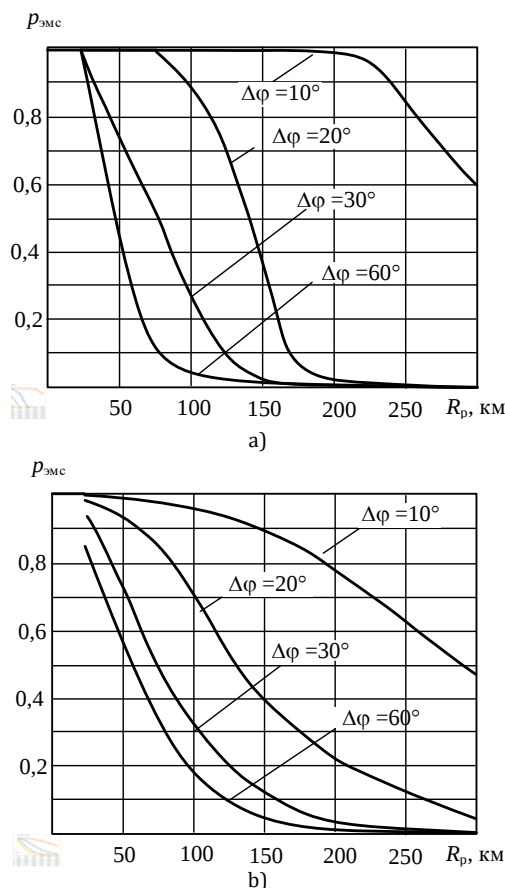


Рис. 3. Зависимость вероятности ЭМД ИРИ от дальности поиска при различной ширине ДН антенны приемника КРПП в гауссовом (а) и райсовском (б) каналах связи

Fig. 3. Dependence of the Probability of EML IRI on the Search Range for Different Widths of the RPMS Monitoring Receiver Antenna in a Gaussian (a) and Rician (b) Communication Channels

Анализ полученных на рисунке 3 графиков показывает, что ЭМД ИРИ не превышает 240 км для гауссова и 150 км для райсовского канала связи при использовании узких ДН антенн поисковых приемников. С увеличением ширины ДН антенны до 60° зона ЭМД значительно сокращается – до 30 км.

Формализация процедур временного контакта ИРИ и приемника поиска КРПП

Вероятность контакта приемников поиска КРПП с излучениями ИРИ ЛРНС в пространственной и частотно-временной области зависит от степени совпадения (пересечения) их ДН с ДН передатчиков ИРИ ЛРНС, а также от размеров частотного диапазона поиска и ширины спектра радиосигналов ИРИ [20, 21]. Обнаружение сигнала происходит только в том случае, когда радиоизлучение передатчика попадает в сектор главного лепестка ДН антенны приемника поиска. Т. е. ДН приемника и передатчика в этом случае должны быть сонаправленными.

Количественно время контакта можно оценить длительностью импульса, характеризующего процедуру доступности $\tau_{\text{пр}}$ радиоизлучения ИРИ для приемника поиска. В противном случае ИРИ будет недоступен КРПП. Такому условию будет соответствовать пауза $\tau_{\text{нпр}}$. С таких позиций процесс поиска сигналов ИРИ в пространстве можно представить импульсным потоком во времени с длительностью пространственного контакта ДН антенны приемника мониторинга с радиоизлучением ИРИ ЛРНС во временной области.

Длительность импульса, характеризующего такой контакт, будет равна [9, 22]:

$$\bar{\tau}_{\text{пр}} = \bar{T}_{\text{мр}} - \bar{\tau}_{\text{нпр}} = \frac{\bar{r}_p}{\bar{v}_n} - \frac{\Delta\varphi_p \bar{R}_p}{\bar{v}_n}, \quad (8)$$

где $\bar{T}_{\text{мр}}$ – среднее значение периода патрулирования БПЛА КРПП на маршруте полета; $\bar{\tau}_{\text{пр}}$ – средняя продолжительность поиска i -ой ОС (импульса от ИРИ ЛРНС, далее по тексту как ОС); $\bar{\tau}_{\text{нпр}}$ – средняя продолжительность паузы при поиске i -ой ОС; $\bar{r}_p$ – средняя протяженность полета БАС, при котором осуществляется прием радионавигационных сигналов (контакт с ИРИ); $\Delta\varphi_p$ – ширина ДН антенны приемника поиска в радианах; $\bar{v}_n$ – средняя скорость полета БПЛА на маршруте; $\bar{R}_p$ – средняя дальность дистанции поиска сигналов ИРИ ЛРНС.

При этом интервал паузы разведки i -ой ОС равен:

$$\bar{\tau}_{\text{нпр}} = \bar{T}_m - \bar{\tau}_p = \frac{\bar{R}_m}{\bar{v}_n} - \frac{\Delta\varphi_p \bar{R}_p}{\bar{v}_n} = \frac{\bar{R}_m - \Delta\varphi_p \bar{R}_p}{\bar{v}_n}, \quad (9)$$

где $\bar{R}_m$ – средняя протяженность маршрута патрулирования БПЛА КРПП.

Период поиска можно определить как:

$$\bar{T}_{\text{мр}} = \bar{T}_1 = \bar{R}_m / \bar{v}_n. \quad (10)$$

Таким образом, процедуру сканирования приемником поиска сигналов ИРИ в пространстве можно представить импульсной последовательностью с длительностью $\bar{\tau}_p = \bar{\tau}_1$ и периодом $\bar{T}_1$ (рисунок 4а) [22, 23].

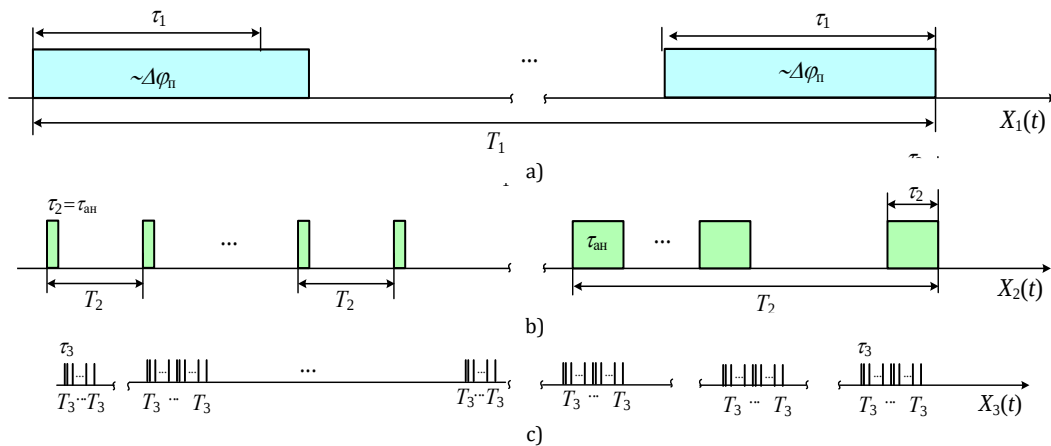


Рис. 4. Схематическое представление процедуры поиска навигационных сигналов в виде импульсного потока: а) сканирования в пространстве; б) сканирования по частоте; в) излучения радионавигационных сигналов

Fig. 4. Schematic Representation of the Search Procedure for Navigation Signals in the Form of a Pulse Stream: a) Spatial Scanning; b) Frequency Scanning; c) Emission of Radio Navigation Signals

Сканирование частотного диапазона приемник поиска КРПП осуществляет в диапазоне частот с шагом, равным полосе частот, сопряженной с шириной полосы радионавигационного сигнала. При этом на каждом шаге (интервале частот) осуществляется анализ присутствия сигнала и его параметров для выделения первичных признаков. Затрачиваемое время на анализ $\tau_{ан}$ зависит от технических возможностей приемника поиска. Приемник поиска перестраивается по частоте в диапазоне ведения мониторинга $\Delta F_{др}$.

Общее количество полос сканирования в диапазоне поиска равно:

$$N_f = \Delta F_{др} / \Delta F_c,$$

а период частотного сканирования приемника:

$$\bar{T}_f = \bar{T}_2 = \Delta F_{др} / \bar{\gamma}_p, \quad (11)$$

где γ – средняя скорость перестройки приемника поиска.

Следовательно, сканирование частотного диапазона также можно представить импульсной последовательностью с длительностью $\bar{\tau}_2$ и периодом $\bar{T}_2$ (см. рисунок 4б).

Таким образом, обнаружение радиоизлучений в заданном диапазоне частот возможно при одновременном выполнении следующих событий: радиоизлучение радионавигационного сигнала присутствует, и оно энергетически доступно приемнику поиска (рисунок 4с), существует пространственный и временной контакт приемника поиска с частотой радиоизлучений ОС. При таком подходе модель мониторинга радионавигационных сигналов может быть представлена в виде оконной функции [24], равной по амплитуде единице в момент совпадения

пространственных, частотных и сигнальных импульсов во времени, и нулю в противном случае, как это изображено на рисунке 4.

Согласно рисунку 4, продолжительности радиоизлучения навигационных сигналов поставим в соответствие импульсный поток 3 длительностью τ_3 и периодом T_3 . Продолжительности частотной доступности (контакта) радиоизлучения ОС к приемнику поиска поставим в соответствие поток импульсов 2 длительностью τ_2 и периодом следования T_2 . Продолжительности пространственной доступности (контакта) ДН приемника поиска с ИРИ поставим в соответствие последовательность импульсов 1 длительностью τ_1 и период следования T_1 . Тогда наступление события совпадения во времени импульсных потоков (пространственного, частотного и сигнального) является фактом обнаружения сигнала ИРИ, а при вероятности распознавания равной единицы – фактом вскрытия радионавигационных линий ЛРНС.

В (8–11) продолжительности импульсов представляют собой средние значения параметров импульсных потоков, что связано с их некоторым случайным их разбросом. Данный разброс можно оценить допустимым среднеквадратическим отклонением от среднего значения $\sigma^2(\tau) = \overline{\tau^2(\xi)} - \overline{\tau(\xi)}^2$. Тогда относительная погрешность измерения τ вследствие временной асимметрии при накоплении импульсов равна:

$$\sigma = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^N (\Delta t_i - \Delta t_{i+1}). \quad (12)$$

Данная погрешность пренебрежимо мала, т. к. временные интервалы Δt_i и Δt_{i+1} следующих друг за другом импульсов отличаются незначительно, т. е.:

$$(\Delta t_{i+1} - \Delta t_i) / \Delta t_i \ll 1,$$

и вышеприведенные импульсные потоки можно рассматривать как квазипериодические.

Приложение теории импульсных потоков к решению задачи поиска сигналов ИРИ

Из вышеприведенного анализа следует, что процесс ведения поиска можно формализовать различными импульсными потоками во времени, различающихся по длительности и частоте следования импульсов. Такой подход позволяет разработать методический аппарат оценки показателей разведзащищенности радионавигационных линий ЛРНС на основе теории совпадения импульсных потоков [25]. Для этого проанализируем импульсные потоки, характеризующие субпроцессы процедуры поиска сигналов ИРИ.

Импульсные потоки в пространстве можно считать детерминированными с периодом следования T_1 и длительностью τ_1 (см. рисунок 4а), что обеспечивается регулярностью процесса ведения поиска. При этом параметры импульсного потока зависят от протяженности маршрута полета БПЛА, ведущего мониторинг, его скорости и ширины ДН антенны приемника поиска.

Импульсный поток, описывающий процедуры поиска сигналов ИРИ по частоте, также можно считать детерминированным, т. к. его параметры – цикл перестройки T_2 и длительность анализа признаков τ_2 – определяется технологиями построения приемника поиска.

Радионавигационные сигналы ОС ЛРНС индивидуальны и обладают высокой структурной скрытностью, т. к. формируются по псевдослучайному закону. И при этом они коррелированы относительно друг друга. В интересах одновременного совпадения таких потоков во временной области необходимо, чтобы произошло событие пространственного совпадения потоков, характеризующих работу ЛРНС $X_1(t)$, $X_2(t)$ и $X_3(t)$ с циклами поиска.

Для этого введем следующие ограничения:

– каждый поток X состоит из не пересекающихся во времени импульсов, когда:

$$\tau_i = t_i - t_{i-1} > \tau_{i-1} \quad (13)$$

где t_i , t_{i-1} – момент появления i -го импульса; τ_i – длительность i -го импульса;

– импульсные потоки стационарны, т. е. их числовые характеристики на зависят от времени, например, математическое ожидание случайной величины интервала импульса (τ) не зависит от времени:

$$\bar{\tau} = \int_0^{\infty} \tau \omega(\tau) d\tau, \quad (14)$$

где $\omega(\tau)$ – плотность вероятности случайной величины длительностей τ импульсов.

В задачах поиска и обнаружения радиосигналов практический интерес представляют импульсы, принадлежащие потоку совпадений, длительность которых больше длительности минимального импульса этих потоков $\tau_i \geq \tau$. Доля перекрытия потоков импульсов является случайной величиной, а ее значение может быть любым.

Далее будем считать, что контакт состоялся, если длительность импульсов совпадения τ потоков будет не менее длительности анализа (выделения) первичных признаков радионавигационного сигнала, т. е. $\tau \geq \tau_{ан}$ [26].

Для решения рассматриваемой задачи найдем соотношения применительно к этому условию, в рамках соответствия ограничениям. При этом будем полагать, что распределение длительностей импульсов каждого из n стационарных и независимых потоков $X_s(t)$ ($s = 1, 2, 3, \dots, n$) заданы равномерными плотностями вероятностей $\alpha_s(\tau)$. В процессе совпадения участвуют импульсы n – стационарных и независимых потоков, каждый из которых удовлетворяет требованию (13), а длительность $\tau_{n,k}$ импульсов совпадений является всегда величиной случайной.

Тогда распределение длительностей импульсов потока совпадения, образованных в результате перекрытия во времени k из n импульсов, определяется плотностью вероятностей вида:

$$\alpha_{n,k}(\tau) = \frac{1}{\mu_{n,k}} \frac{d^2}{d\tau^2} P_{n,k}(\tau), \quad (15)$$

где $\overline{\mu_{n,k}}$ – средняя частота совпадений k импульсов в n потоках; $P_{n,k}(\tau)$ – вероятность совпадения k импульсов различных потоков из n возможных потоков.

В случайный момент времени средняя частота совпадений k из n импульсов вычисляется при условии, что продолжительность перекрытия $\tau \geq \tau_{ан}$ находится по формуле [9]:

$$\overline{\mu_{n,k}(\delta)} = \overline{\mu_{n,k}} \int_0^{\infty} \alpha_{n,k}(\tau) d\tau = -\frac{d}{d\delta} p_{n,k}(\tau - \delta), \quad (16)$$

где δ – заданная величина укорочения перекрытия импульсов совпадения.

Для успешного поиска и обнаружения в поставленной задаче необходимо выполнение условия $n = k$. Тогда положив в (15) $n = k$, и выполнив дифференцирование по δ , получим выражение для средней частоты следования импульсов совпадения:

$$\overline{\mu_{n,n}(\delta)} = \sum_{s=1}^n \frac{\int_0^Y \alpha_s(\tau) d\tau}{\int_0^Y (\tau - \delta) \alpha_s(\tau) d\tau} \times \quad (17)$$

$$\times \prod_{i=1}^n \bar{\mu}_i \int_0^Y (\tau - \delta) \alpha_s(\tau) d\tau.$$

В соответствии с вышеприведенными условиями длительности импульсов фиксированы, т. е.:

$$\alpha_i(\tau) = \delta(\tau - \tau_i), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (18)$$

где $\delta(x)$ – дельта функция.

Тогда выражение (17) примет вид:

$$\overline{\mu_{n,n}(\delta)} = \sum_{s=1}^n \frac{1}{\tau_s - \delta} \prod_{i=1}^n \bar{\mu}_i(\tau_s - \delta). \quad (19)$$

Без укорочения импульсов совпадения ($\delta = 0$), согласно выражению (17), имеем:

$$\overline{\mu_{n,n}} = \sum_{s=1}^n \frac{1}{\tau_s} \prod_{i=1}^n \bar{\mu}_i \tau_i, \quad (20)$$

где $\mu_i = 1/T_i$ – частота следования i -го импульсного потока.

Вероятность совпадения импульсов потоков, образованного в результате перекрытия во времени независимых и стационарных потоков, равна:

$$p_{n,n} = \overline{\mu_{n,n} \tau_{n,n}} = \sum_{s=1}^n \frac{1}{\tau_s} \prod_{i=1}^n \bar{\mu}_i \tau_i. \quad (21)$$

В предоставленных потоках два – детерминированные, а один – случайный. Тогда при выполнении равенства $n = k$ с учетом выражения (18) после аналогичных преобразований (15–21), получим формулу для определения вероятности совпадения импульсов n -потоков:

$$p_{n,n}(\tau_0) = \prod_{s=1}^n \left(1 - \frac{\tau}{\tau_s}\right) \frac{\sum_{s=1}^n \frac{1}{\tau_s - \tau_0}}{\sum_{s=1}^n \frac{1}{\tau_s}}, \quad (22)$$

где τ_0 – минимальная длительность совпадения импульсов потока совпадений, равная $\tau_{ан}$.

Применительно к решаемой задаче для случая, когда $\tau_i \leq T_i$, $T_3 \leq T_2 \leq T_1$ ($i = 1, 2, 3$), могут быть определены следующие вероятностно-временные характеристики:

1) $\bar{\mu}_3 = \frac{T_1 T_2 T_3}{(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)}$ – средняя частота совпадения трех потоков;

2) $p_3(T_2) = T_2 / \bar{\mu}_3 = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3}{T_1 T_3}$ – вероятность совпадения импульсных потоков приемника разведки с радиоизлучением ОС за один период;

3) $t_p = T_2 \frac{\ln(1-p_0)}{\ln(1-p_3(T_2))}$ – время, необходимое для совпадения импульсов потоков с заданной вероятностью p_0 (время поиска по направлению и частоте с заданной вероятностью встречи диаграмм направленности антенн, приемника поиска и излучения ОС).

Результаты оценки вероятности контакта ИРИ с приемником поиска, размещенном на БПЛА при различной ширине ДН антенны приемника поиска приведены на рисунке 5.

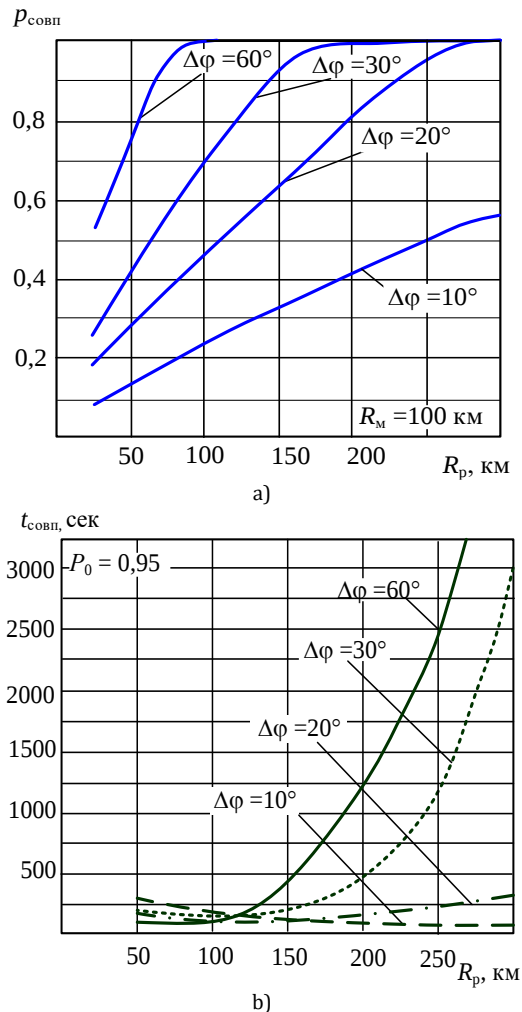


Рис. 5. Зависимость вероятности (а) и времени (б) совпадения импульсных потоков за один пространственный цикл от дальности мониторинга при различной ширине ДН антенны приемника поиска КРПП

Fig. 5. Dependence of the Probability (a) and Time (b) of Coincidence of Pulse Flows in One Spatial Cycle on the Monitoring Range for Different Widths of the Antenna of the KRPP Search Receiver

Результаты вычислений показывают, что вероятность совпадения (обнаружения) импульсных потоков повышается с увеличением дальности мониторинга. Она стремится к единице при широкой ДН антенн приемника поиска вплоть до 150 км. Однако при ее сужении до 10° вероятность контакта значительно уменьшается и становится приемлемой лишь на дальности до 30 км.

Время вскрытия возрастает с увеличением дальности мониторинга и тем быстрее, чем шире ДН антенны приемника поиска, что связано с расширением импульса пространственного контакта.

Ранее было установлено, что на вероятность вскрытия ОС влияет ЭМД радиоизлучения к приемнику поиска (1 и 2). Тогда, при условии того, что время распознавания мало, и им можно пренебречь, вероятность вскрытия можно рассматривать как совместное событие двух независимых процедур. Это ЭМД и процедуры контакта радиоизлучения ИРИ с приемником поиска в пространственной, частотной и временной областях.

Результаты оценки вероятности контакта радиоизлучения ОС с приемником поиска, размещенном на БПЛА, как функции дистанции мониторинга при различной ширине ДН антенны приемника поиска, приведены на рисунке 6.

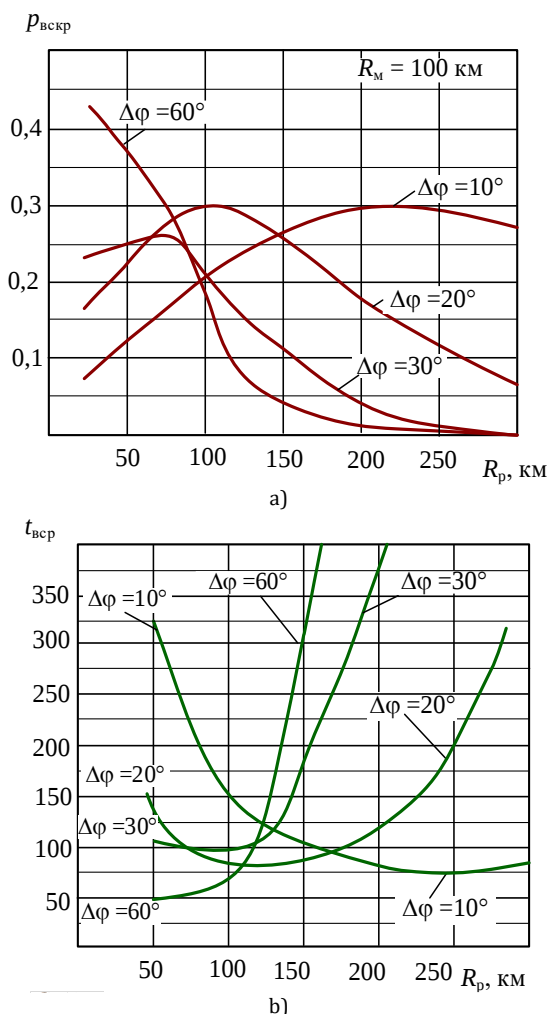


Рис. 6. Зависимость вероятности вскрытия ИРИ от дистанции мониторинга при различной ширине ДН антенны приемника поиска в гауссовом (а) и ростовском (б) каналах

Fig. 6. Dependence of the Probability of Opening an IRI on the Monitoring Range at Different Antenna Beamwidths of the Search Receiver in the Gaussian (a) and Rostov (b) Channels

При этом время, необходимое для вскрытия с требуемой вероятностью $p_{тр}$ импульсных потоков радиоизлучения передатчика ОС ЛРНС с приемником поиска за период пролета по маршруту БПЛА КРПП, можно определить по формуле:

$$t_{вскр} = T_2 \frac{\ln(1 - p_{тр})}{\ln(1 - p_{вскр})}. \quad (23)$$

Используя приведенные выше выражения, были определены вероятностно-временные показатели поиска радиоизлучений ОС с БПЛА при различных дальностях мониторинга (таблица 1). Анализ полученных результатов показывает, что время вскрытия нелинейно и зависит от дистанции мониторинга.

ТАБЛИЦА 1. Результаты оценки вероятностно-временных параметров при различных параметрах ДН антенны

TABLE 1. Results of Evaluation of Probability-Time Parameters for Different Antenna Pattern Parameters

Параметры	Значения			
Ширина ДНА приемника поиска, град.	10	20	30	60
Допустимая дальность мониторинга, км	250	120	80	50
Дальность мониторинга, км	50			
Время вскрытия ИРИ, с	325	140	110	50
Дальность мониторинга, км	125			
Время вскрытия ИРИ, с	125	80	110	125
Дальность мониторинга, км	200			
Время вскрытия ИРИ, с	75	125	375	3600

Контакт приемника поиска КРПП и сигналов ИРИ ЛРНС в пространственно-частотной области определяется шириной ДН антенны приемника поиска, его параметрами и дистанцией мониторинга. Причем с увеличением дальности мониторинга вероятность контакта улучшается и вступает в противоречие с требованиями ЭМД, которая, наоборот, с увеличением дальности уменьшается. Следовательно, в зоне предельной дальности мониторинга существует наибольшее и наименьшее значение дистанций, зависящие как от ЭМД ИРИ, так и от параметров импульсных потоков поиска и сигналов ИРИ в пространственно-частотной области.

Заключение

Разработанный научно-методический аппарат оценки разведзащищенности ЛРНС позволяет определять условия успешного проведения несанкционированного мониторинга сигналов ИРИ, обеспечивающих работу группы БАС. Предложенный подход основан на формализации процедур поиска сигналов ИРИ в терминах теории совпадающих импульсных потоков, что позволило получить вероятностные и временные характеристики разведзащищенности элементов ЛРНС. Полученные результаты исследований открывают новые возможности по оценке и повышению разведзащищенности радионавигационных линий, что может использоваться для обоснования требований к ней и при проектировании защищенных ЛНС с дискретной случайной структурой радионавигационного сигнала. В дальнейших исследованиях авторы планируют оценить помехозащищенность сетей информационного обмена БАС, при их привязке к ЛРНС.

Список источников

1. Неровный В.В., Коратаев П.Д., Облов П.С., Толстых М.Ю. Характеристики уязвимости аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем к спуфинг-атакам // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 6. С. 95–100. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-6-95-100. EDN:GBDCCJ
2. Дворников С.В., Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х., Федоренко И.В. Оценка влияния свойств сигнала PRS LTE на точность позиционирования // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2017. № 4. С. 94–103. EDN:YQWNLJ
3. Борзов А.Б., Микаэльян С.В. Алгоритм построения собственной системы координат локальной автономной радионавигационной системы // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4-7. С. 1399–1405. EDN:ZAULWV
4. Бабуров В.И., Агарков А.В., Бондаренко А.П., Вострецов А.Г., Зубарев В.Ю., Кацаев Ю.А. и др. Совершенствование интегрированного бортового радиоэлектронного навигационно-посадочного оборудования // Новости навигации. 2019. № 4. С. 44–50. EDN:XCNRES
5. Лукиянов А.С., Подстригаев А.С. Методика проектирования устройства с регулируемой задержкой для системы радиотехнического обзора комплекса радиомониторинга // Морская радиоэлектроника. 2025. № 1(91). С. 14–20. EDN:UQSGHJ
6. Бурлаков С.О., Снежко В.К., Якушенко С.А., Егрюшев В.Е., Веркин С.С., Антонов В.В. Синтез топологии интегрированной системы навигации и связи, функционирующей в условиях воздействия помех // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. № 1-1(76). С. 15–18. DOI:10.24412/2500-1000-2023-1-1-15-18. EDN:LRJGDG
7. Симонов А.Н., Волков Р.В., Дворников С.В. Основы построения и функционирования угломерных систем координатометрии источников радиоизлучений: учеб. пособие. СПб.: ВАС, 2017. 248 с. EDN: XRBXML
8. Лукиянов А.С., Подстригаев А.С. Оценка повышения доли импульсов, принимаемых комплексом радиомониторинга в условиях сложной сигнальной обстановки, при использовании устройств задержки // Успехи современной радиоэлектроники. 2024. Т. 78. № 3. С. 13–21. DOI:10.18127/j20700784-202403-02. EDN:QIMNQR
9. Якушенко С.А., Тихоненкова О.В., Сатдинов А.И. Электромагнитная деформация высокоточного радионавигационного поля потребителей бассейнов внутренних водных путей России // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2024. Т. 22. № 4. С. 53–61. DOI:10.18127/j20700814-202404-06. EDN:GVCCGB
10. Бондаренко В.Н., Гарифуллин В.Ф., Краснов Т.В., Галеев Р.Г. Помехи множественного доступа в широкополосных системах радионавигации со спектрально-эффективными шумоподобными сигналами // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2015. Т. 8. № 3. С. 313–318. EDN:TUWLUH
11. Неровный В.В., Паринов М.Л., Облов П.С., Коратаев П.Д. Моделирование и анализ вероятностных характеристик функционирования малоканальной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем в условиях имитирующих помех // Радиотехника. 2024. Т. 88. № 7. С. 118–123. DOI:10.18127/j00338486-202407-21. EDN:RBUPXW
12. Дворников С.В., Марков Е.В., Манюши Э.А. Повышение помехозащищенности передач декаметровых радиоканалов в условиях непреднамеренных помех // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 6. С. 4–9. DOI:10.36724/2072-8735-2021-15-6-4-9. EDN:KHPWUJ
13. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Зацепина В.И., Зацепин Е.П. Случайные импульсные потоки к анализу и синтезу многоуровневых систем. Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2017. 308 с. EDN:LFIYIC
14. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Бойчевский А.В. Оценка безотказности системы электроснабжения на основе теории импульсных потоков // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2022. № 1(15). С. 18–21. EDN:NHOTMV
15. Городов И.А., Беляев Д.В., Трошков А.В. Формализация задачи оценки эффективности системы радиомониторинга в современных условиях // Научная мысль. 2018. Т. 4. № 2(28). С. 40–48. EDN:XRRCHZ
16. Артемов М.Л., Афанасьев О.В., Воропаев Д.И., Сличенко М.П., Ильин М.Ю., Серебрянникова О.А. Частотная селекция сигналов в многоканальной системе радиомониторинга с учетом ограниченной пропускной способности линии передачи данных // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 1. С. 93–99. DOI:10.18127/j00338486-202201-14. EDN:EYLQGE
17. Артемов М.Л., Гордиенко Д.Ю., Сличенко М.П., Трушин С.П. Обнаружение источников радиоизлучения по результатам многоканальной пространственно-корреляционной обработки радиосигналов в динамически меняющейся электромагнитной обстановке // Радиотехника. 2025. Т. 89. № 9. С. 70–77. DOI:10.18127/j00338486-202509-07. EDN:FEJMFJ
18. Ломакин А.А., Пантенков Д.Г., Соколов В.М. Математические модели оценки скрытности спутниковых каналов радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами. Часть 2 // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 37–48. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-37-48. EDN:XFNWYQ
19. Снежко В.К., Якушенко С.А., Егрюшев В.Е., Веркин С.С., Антонов В.В., Чеканова Е.В. Оценка доступности радиоизлучений тропосферных станций средствам мониторинга // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. № 1-2(88). С. 207–212. DOI:10.24412/2500-1000-2024-1-2-207-212. EDN:RHYHDO
20. Меркулов В.И., Миляков Д.А., Чернов В.С. Способы двухэтапного отождествления пеленгов в многопозиционных системах радиомониторинга воздушного базирования // Успехи современной радиоэлектроники. 2021. Т. 75. № 11. С. 77–88. EDN:APYWEN
21. Подстригаев А.С., Смоляков А.В., Лукиянов А.С. Возможность использования оптико-электронного тракта в фазовом радиопеленгаторе СВЧ-диапазона в условиях динамических температурных воздействий // Успехи современной радиоэлектроники. 2022. Т. 76. № 9. С. 55–65. DOI:10.18127/j20700784-202209-03. EDN:ESTDSX
22. Дворников С.В., Волков Р.В., Желнин С.Р., Саяпин В.Н., Симонов А.Н. Основы построения и функционирования угломерно-дальномерных систем координатометрии источников радиоизлучений: учеб. пособие. СПб.: ВАС, 2008. 104 с. EDN:WWJMJF

23. Кудряшова А.Ю., Богомолова Н.К. Алгоритм поиска радиосигналов ГЛОНАСС в программно-определяемом приемнике с частотным и кодовым разделением // *DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов*. 2024. Т. 14. № 4. С. 54–64. EDN:HQJDFD
24. Михайлов Н.В., Чистяков В.В. Методы поиска сигналов спутниковых навигационных систем в приемниках космического базирования. Ч. 1. Комбинированный поиск // *Гироскопия и навигация*. 2013. № 4(83). С. 60–71. EDN:RRTGDH
25. Пылаев Н.А. Модель составного радиоканала через ретранслятор связи на беспилотном летательном аппарате, обеспечивающая аппроксимацию его состояния потоком импульсов совпадений случайных импульсных потоков // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. № 2. С. 62–71. DOI:10.24412/2071-6168-2022-2-62-71. EDN:NGHJNC
26. Кульпин С.И., Кузьмин В.Г., Орлов И.Я. Особенности блокирования приемной системы потоком импульсных помех // *Датчики и системы*. 2003. № 4. С. 16–19. EDN:KWNOS

References

1. Nerovny V., Korataev P., Oblov P., Tolstykh M. Vulnerability Characteristics of Global Navigation Satellite System Consumer Equipment to Spoofing Attacks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2023;9(6):95–100. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-6-95-100. EDN:GBDCCJ
2. Dvornikov S.V., Fokin G.A., Alodhari A.H., Fedorenko I.V. Positioning of Mobile TV Systems on Reference Signals in LTE Networks. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. 2017;4:94–103. (in Russ.) EDN YQWNLJ
3. Borzov A.B., Mikaelyan S.V. Algorithm of Constructing a Domestic Coordinate System of Local Autonomous Radio-Navigation System. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016;18(4-7):1399–1405. (in Russ.) EDN:ZAULWV
4. Baburov V.I., Agarkov A.V., Bondarenko A.P., Vostretsov A.G., Zubarev V.Yu., Katsaev Yu.A., et al. Improvement of Integrated Airborne Radio Electronic Navigational and Landing Equipment. *Navigation news*. 2019;4:44–50. (in Russ.) EDN:XCNRES
5. Lukiyanov A.S., Podstrigaev A.S. Design Methodology of a Device with an Adjustable Delay for a Radiotechnical Review System of a Radio Monitoring Complex. *Marine Radioelectronics*. 2025;1(91):14–20. (in Russ.) EDN UQSGHJ
6. Burlakov S.O., Snezhko V.C., Yakushenko S.A., Egrushev V.E., Verkin S.S., Antonov V.V. Synthesis of the Topology of the Integrated Navigation and Communication System Functioning in the Conditions of Influence. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2023;1-1(76):15–18. (in Russ.) DOI:10.24412/2500-1000-2023-1-1-15-18. EDN:LRJGDG
7. Simonov A.N., Volkov R.V., Dvornikov S.V. *Fundamentals of the Construction and Operation of Goniometric Systems for Coordinate Measurement of Radio Emission Sources*. St. Petersburg: Military Academy of Communications Publ.; 2017. 248 p. (in Russ.) EDN:XRXML
8. Lukiyanov A.S., Podstrigaev A.S. Assessment of the Increase in the Proportion of Pulses Received by an RF Spectrum Management System in a Complex Signal Environment When Using Delay Devices. *Journal Achievements of Modern Radioelectronics*. 2024;78(3):13–21. (in Russ.) DOI:10.18127/j20700784-202403-02. EDN:QIMNQR
9. Yakushenko S.A., Tikhonenkova A.V., Satdinov A.I. Electromagnetic Deformation of a High-Precision Radio Navigation Field Consumers of the Basins of the Inland Waterways of Russia. *Information-measuring and Control Systems*. 2024;22(4):53–61. (in Russ.) DOI:10.18127/j20700814-202404-06. EDN:GVCCGB
10. Bondarenko V.N., Garifullin V.F., Krasno T.V., Galeev R.G. Multiple Access Interferences in Wideband Radionavigation Systems with Spectrum-Effective Pseudonoise Signals. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technology*. 2015;8(3):313–318. (in Russ.) EDN:TUWLUH
11. Nerovny V.V., Parinov M.L., Oblov P.S., Korataev P.D. Modeling and Analysis of Probabilistic Characteristics of the Functioning of Low-Channel Equipment of Consumers of Global Navigation Satellite Systems in Conditions of Signal-Like Interference. *Radiotekhnika*. 2024;88(7):118–123. (in Russ.) DOI:10.18127/j00338486-202407-21. EDN:RBUPXW
12. Dvornikov S.V., Markov E.V., Manoshi A.A. Increasing immunity of decimeter radio channel transmissions under unintended interference. *T-Comm*. 2021;15(6):4–9. (in Russ.) DOI:10.36724/2072-8735-2021-15-6-4-9. EDN:KHPWMU
13. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Zatsepina V.I., Zatsepin E.P. *Random Pulse Flows to the Analysis and Synthesis of Multilevel Systems*. Lipetsk: Lipetsk State Technical University Publ.; 2017. 308 p. (in Russ.) EDN:LFKIYC
14. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Boychevskiy A.V. Estimation of Power Supply System Reliability Based on Pulse Flows Theory. *Vestnik VSU. Series: Technical Sciences*. 2022;1(15):18–21. (in Russ.) EDN:NHOTMV
15. Gorodov I.A., Beliaev D.V., Troshkov A.V. The Task of Formalization of Effectiveness Estimation of the Radio Monitoring System in Modern Conditions. *Nauchnaya mysl'*. 2018;42(28):40–48. (in Russ.) EDN:XRRCHZ
16. Artemov M.L., Afanasyev O.V., Voropaev D.I., Slichenko M.P., Ilyin M.Yu., Serebryannikova O.A. Frequency selection of signals in a multichannel radio monitoring system taking into account the limited bandwidth of the data transmission line. *Radiotekhnika*. 2022;86(1):93–99. (in Russ.) DOI:10.18127/j00338486-202201-14. EDN:EYLQGE
17. Artemov M.L., Gordienko D.Yu., Slichenko M.P., Trushin S.P. Detection of radio emission sources by the results of multichannel spatial-correlation processing of radio signals in dynamically changing electromagnetic environment. *Radiotekhnika*. 2025;89(9):70–77. (in Russ.) DOI:10.18127/j00338486-202509-07. EDN:FEJMFJ
18. Lomakin A., Pantenkov D., Sokolov V. Mathematical Models of Satellite Communication Systems with Unmanned Aerial Vehicles and Counter-Means of Radio Control. Part 2. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(4):37–48. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-37-48. EDN:XFNWYQ
19. Snezhko V.C., Yakushenko S.A., Egrushev V.E., Verkin S.S., Antonov V.V., Chekanova E.V. Assessment of Availability of Radio Emissions of Troposphere Stations to Monitoring Means. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2024;1-2(88):207–212. (in Russ.) DOI:10.24412/2500-1000-2024-1-2-207-212. EDN:RHYHDO
20. Merkulov V.I., Milyakov D.A., Chernov V.S. Ways of the Two-Stage Identification of Bearings in Multiposition Airborne Systems of Radio Monitoring. *Journal Achievements of Modern Radioelectronics*. 2021;75(11):77–88. (in Russ.) EDN:APYWEN

21. Podstrigaev A.S., Smolyakov A.V., Lukiyanov A.S. Possibility of using a microwave photonic link in a phase direction finder of the microwave range under dynamic temperature effects. *Achievements of modern radioelectronics*. 2022;76(9):55–65. (in Russ.) DOI:10.18127/j20700784-202209-03. EDN:ESTDSX
22. Dvornikov S.V., Volkov R.V., Zhelnin S.R., Sayapin V.N., Simonov A.N. *The Basics of Building and Functioning of the Angular-Distance Measuring Systems of Coordinate-free Emitters*. St. Petersburg: Military Academy of Communications Publ.; 2008. 104 p. (in Russ.) EDN:WWJMJF
23. Kudryashova A.Yu., Bogomolova N.K. Algorithm for Searching for GLONASS Radio Signals in a Software-Defined Receiver with Frequency and Code Division. *Digital Signal Processing and Its Applications*. 2024;14(4):54–64. (in Russ.) EDN:HQJDFD
24. Mikhailov N.V., Chistyakov V.V. Methods of searching for signals of satellite navigation systems in space-based receivers. Part 1. Combined search. *Gyroscopy and Navigation*. 2013;4(83):60–71. (in Russ.) EDN:RRTGDH
25. Pylaev N.A. Model of Composite Radio Channel Through Communication Retransmitter on Unmanned Aerial Vehicle, Which Provides an Approximation of Its State by Pulses Coincidences Sequence of Random Pulse Sequences. *Izvestiya Tula State University*. 2022;2:62–71. (in Russ.) DOI:10.24412/2071-6168-2022-2-62-71. EDN:NGHJNC
26. Kul'pin S.I., Kuzmin V.G., Orlov I.Ya. The Features of Receiving System Blocking with an Impulse Noise Flow. *Sensors and Systems*. 2003;4:16–19. (in Russ.) EDN:KWNOS

Статья поступила в редакцию 10.01.2026; одобрена после рецензирования 30.03.2026; принята к публикации 31.03.2026

The article was submitted 10.01.2026; approved after reviewing 30.03.2026; accepted for publication 31.03.2026

Информация об авторах:

**Якушенко
Сергей Алексеевич**

доктор технических наук, доцент, профессор института радиотехники, электроники и связи (институт 2) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, старший научный сотрудник Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0000-0002-7722-020X>

**КОПЫЛЬЦОВ
Владимир Юрьевич**

соискатель Научно-исследовательского центра Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0009-0008-3547-3744>

**ЛАРИОНОВ
Алексей Анатольевич**

аспирант института радиотехники, электроники и связи (институт 2) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения
 <https://orcid.org/0009-0001-4322-6937>

**ВАСИЛЬЕВА
Дина Владимировна**

старший преподаватель института радиотехники, электроники и связи (институт 2) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения
 <https://orcid.org/0009-0009-5343-3356>

**ДВОРНИКОВ
Сергей Викторович**

доктор технических наук, профессор, профессор института радиотехники, электроники и связи (институт 2) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного
 <https://orcid.org/0000-0002-4889-0001>

Дворников С.В. является членом редакционного совета журнала «Труды учебных заведений связи» с 2016 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Dvornikov S.V. has been a member of the journal "Proceedings of Telecommunication Universities" Editorial Council since 2016, but has nothing to do with the decision to publish this article. The article has passed the review procedure accepted in the journal. The authors have not declared any other conflicts of interest.