

Труды МАИ. 2024. № 139
Trudy MAI. 2024. No. 139. (In Russ.)

Научная статья
УДК 621.39; 004.056
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183462>
EDN: <https://www.elibrary.ru/REDVVK>

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМИТИРУЮЩИХ ПОМЕХ

**Неровный Валерий Владимирович¹, Коратаев Павел Дмитриевич²,
Облов Пётр Сергеевич³, Толстых Марина Юрьевна⁴**

^{1,2,3}Военно-учебный научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина», Воронеж, Россия

⁴Московский государственный лингвистический университет, Москва, Россия

⁴Московский университет МВД России им.В.Я. Кикотя, Москва, Россия

⁴marina_lion@mail.ru 

Аннотация. Статья тематически относится к области научного обеспечения процессов развития и интеграции беспилотных летательных аппаратов, использующих для навигации сигналы глобальных навигационных спутниковых систем. К основному преимуществу указанных систем относится высокая точность навигации, при этом отмечаются существенные недостатки, заключающиеся в уязвимости навигационной аппаратуры потребителей глобальных навигационных

спутниковых систем к помехам, имитирующим истинный навигационный сигнал. В результате подобных помех аппаратура принимает ложные сигналы за истинные, что приводит к ошибкам в определении местоположения. Цель данной научной статьи заключается в разработке и анализе методики для оценки вероятности корректного функционирования беспилотных летательных аппаратов в условиях сложной помеховой обстановки. Для конкретного случая рассматривается воздействие на сигнал BPSK, который используется в навигации. При этом на навигационную аппаратуру потребителей глобальных навигационных спутниковых систем могут действовать различные типы имитирующих помех, воспроизводящие ложную навигационную информацию, увеличивающие ошибки измерения псевдодальностей или обладающие случайной структурой. В рамках исследования проведено моделирование воздействия имитирующих помех на приемники BPSK-сигнала с использованием программной среды Matlab/Simulink. Результаты показывают, что вероятность успешной спуфинг-атаки, то есть использования ложного сигнала в качестве истинного, зависит от соотношения мощности помехи к мощности навигационного сигнала, а также от времени функционирования навигационной аппаратуры потребителей. Для моделирования функционирования навигационной аппаратуры потребителей в сложных условиях используются полумарковские процессы, что позволяет учесть различные сценарии переходов между состояниями системы. Предлагаемая методика оценивается как универсальная и адаптированная к любым навигационным сигналам спутниковых радионавигационных систем, поскольку позволяет оценить вероятность корректного функционирования беспилотных летательных аппаратов в условиях сложной помеховой обстановки и

определить эффективность применяемых мер защиты. Описанные подходы могут быть использованы для дальнейших исследований в области повышения устойчивости навигационной аппаратуры глобальных навигационных спутниковых систем к воздействию помех.

Ключевые слова: навигационная аппаратура потребителей глобальных навигационных спутниковых систем, навигационный сигнал, имитирующие помехи, вероятность обнаружения, методика

Для цитирования: Неровный В.В., Коратаев П.Д., Облов П.С., Толстых М.Ю. Функционирования навигационной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем в условиях воздействия имитирующих помех // Труды МАИ. 2024. № 139. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183462>

Original article

METHOD FOR CALCULATING PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF THE OPERATION OF NAVIGATION EQUIPMENT FOR CONSUMERS OF GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS UNDER CONDITIONS OF IMPACT OF SIMULATED INTERFERENCE

Valery V. Nerovny¹, Pavel D. Korataev², Petr S. Oblov³, Marina Yu. Tolstykh^{4✉}

^{1,2,3}Air force academy named after professor N.E. Zhukovskii and Y.A. Gagarin, Voronezh, Russia

⁴Moscow State Linguistic University, Moscow, Russia

⁴Kikot Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia,
Moscow, Russia

⁴marina_lion@mail.ru✉

Abstract. The article pertains to the scientific support for the development and integration processes of unmanned aerial vehicles that utilize signals from global navigation satellite systems for navigation. The primary advantage of these systems is their high navigation accuracy. However, they also have significant drawbacks, namely the vulnerability of global navigation satellite systems user navigation equipment to interference that mimics a genuine navigation signal. As a result of such interference, the equipment may mistake false signals for genuine ones, leading to errors in determining the location. The purpose of this scientific article is to develop and analyze a methodology for assessing the probability of correct functioning of unmanned aerial vehicles under complex interference conditions. A specific case is considered where the impact on the BPSK signal, which is used in navigation, is examined. Various types of spoofing interference can affect global navigation satellite systems user navigation equipment, reproducing false navigation information, increasing pseudorange measurement errors, or possessing a random structure. The study involves modeling the impact of spoofing interference on BPSK signal receivers using the Matlab/Simulink software environment. The results indicate that the probability of a successful spoofing attack meaning the use of a false signal as a genuine one depends on the interference-to-signal power ratio and the operating time of the user navigation equipment. Semi-Markov processes are used to model the functioning of user navigation equipment under challenging conditions, allowing for the consideration of various scenarios of state transitions within the system. The proposed methodology is evaluated as universal and

adaptable to any navigation signals of satellite radionavigation systems, as it allows for the assessment of the probability of correct functioning of unmanned aerial vehicles under complex interference conditions and the determination of the effectiveness of the protective measures applied. The described approaches can be utilized for further research in enhancing the resilience of global navigation satellite systems navigation equipment to interference.

Keywords: navigation equipment for consumers of global navigation satellite systems, navigation signal, simulating interference, probability of detection, methodology

For citation: Nerovny V.V., Korataev P.D., Oblov P.S., Tolstykh M.Yu. Method for calculating probabilistic characteristics of the operation of navigation equipment for consumers of global navigation satellite systems under conditions of impact of simulated interference. *Trudy MAI*. 2024. No. 139. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=183462>

Введение

В настоящее время наблюдается интенсивное использование и динамичное развитие малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые для навигационного обеспечения используют сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [1, 2]. Наряду с рядом неоспоримых преимуществ, подобный подход не лишен недостатков, наиболее существенным из которых является низкая устойчивость навигационной аппаратуры потребителей (НАП) ГНСС к воздействию помех, имитирующих истинный навигационный сигнал (НС) [3]. В данном научном исследовании преследуется цель разработки методики, с помощью

которой можно оценить вероятность корректного функционирования БПЛА в зоне сложной помеховой обстановки [4].

Приведенная в данной статье методика позволяет получить вероятностные характеристики при использовании любых НС. При выборе конкретного НС изменяются лишь исходные данные для дальнейших расчетов, обусловленные особенностями сигналов. Это говорит об универсальности приведенной методики, которая может быть применима при рассмотрении взаимодействия НАП с любыми НС любых спутниковых радионавигационных систем (СРНС).

Описание содержания методики расчета вероятностных характеристик функционирования навигационной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем в условиях воздействия имитирующих помех на примере BPSK-сигнала

Для описания конкретного случая, в качестве примера выбран сигнал BPSK. Навигационный BPSK-сигнал имеет следующий вид:

$$S(t) = AG_{\text{нс}}(t)G_{\text{дк}}(t - \tau) \cos((\omega_0 + \omega_d)t + \varphi_0) \quad (1)$$

где A – амплитуда сигнала; ω_0 – несущая частота; ω_d – доплеровское смещение частоты; φ_0 – начальная фаза сигнала, равномерно распределённая на интервале $[0; 2\pi]$; τ – задержка; $G_{\text{нс}}(t)$ – навигационное сообщение (информация); $G_{\text{дк}}(t)$ – псевдослучайная последовательность дальномерного кода.

Одновременно с истинным НС на НАП ГНСС воздействуют имитирующие помехи [5]. Их структура подобна структуре НС, в связи с чем аппаратура потребителей не может обнаружить факт преднамеренного помехового воздействия

и принимает помеху за НС. При дальнейшем выделении из помехи навигационной информации возникают ошибки, обусловленные искажением частоты Доплера и времени задержки, что приводит к ложному определению местоположения потребителя НС. Основная опасность данного вида помех заключается в скрытности воздействия, стандартные меры защиты в данном случае неэффективны.

Имитирующие помехи допустимо дифференцировать следующим образом: помехи вида «пилот-сигнал»; сигналы, имитирующие ложное созвездие НАП ГНСС; помехи, обогащающие ошибку измерения псевдодальностей; шумы со случайной структурой навигационного сообщения (информации).

Возможно комбинированное воздействие перечисленных видов помех. Конкретный вид имитирующей помехи может быть выбран в зависимости от наличия и полноты априорной информации об истинном НС.

В качестве конкретного примера рассмотрим воздействие имитирующей помехи, увеличивающей ошибки измерения псевдодальностей. Ниже представлено описание данной помехи с кодовым (2) и частотным (3) разделением.

$$S(t) = AG_{Иi}(t)G_{ДКi}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi); \quad (2)$$

$$S(t) = AG_{Иi}(t)G_{ДК}(t) \cos(\omega_i t + \varphi), \quad (3)$$

где $G_{Иi}(t)$ – навигационное сообщение с искажающей информацией; $G_{ДК}(t)$ – псевдослучайная последовательность дальномерного кода i -го имитируемого НС; ω_i – значение несущей частоты сигнала i -го имитируемого НС.

Для обеспечения корректности результатов, получаемых при применении разработанной методики, были заданы необходимые ограничения, уточняющие

рамки проводимого исследования и границы применения методики. Приведенные ограничения не противоречат практическому опыту и заключаются в следующем:

- к началу отсчета времени НАП ГНСС функционирует нормально, что достигается работоспособностью самой АП, выполнением других требований, связанных с характеристиками орбитальной группировки, качеством НС и др.;

- уровень мощности имитирующих помех превышает уровень мощности НС на 2...4 дБ, что позволяет обеспечить идентичность помехи истинному сигналу и добиться скрытности воздействия;

- при попадании в зону действия постановщика помех НАП ГНСС, непрерывно подвергается преднамеренному помеховому воздействию;

- для успешного проведения спуфинг-атаки достаточно приема и обработки хотя бы одной имитирующей помехи [6];

- в начальный момент времени НАП находится в режиме «слежения» за сигналами навигационных спутников, а при приеме одного или нескольких сигналов от новых навигационных спутников, которые до этого не входили в состав рабочей группировки, переходит в режим «допоиска»;

- время функционирования НАП ГНСС ограничивается временем функционирования БПЛА, на борту которого она установлена. В данном случае рассматриваются БПЛА микро- и нано-классов, в рамках дифференцирования международной ассоциации по беспилотным системам Association for Unmanned Vehicle Systems International. Подобные БПЛА, как правило, могут функционировать 20 - 60 минут [7].

После того как заданы ограничения, необходимо произвести соответствующие расчеты для получения исходных данных.

Для определения количественных показателей эффективности воздействия сигналоподобных помех на НАП ГНСС в программной среде Matlab/Simulink была реализована схема приемника BPSK-сигнала, на который параллельно оказывают воздействие НС и имитирующая помеха. Оценка была реализована при условии, что приемник функционирует в режиме «горячего старта» [8, 9].

Разработанная модель реализует три цикла поиска сигналов, учитывает влияние собственных шумов на НАП ГНСС (рисунок 1), пороговое значение рассчитывается по критерию Немана-Пирсона. Подробное описание проведенных расчетов представлены в работе [3].

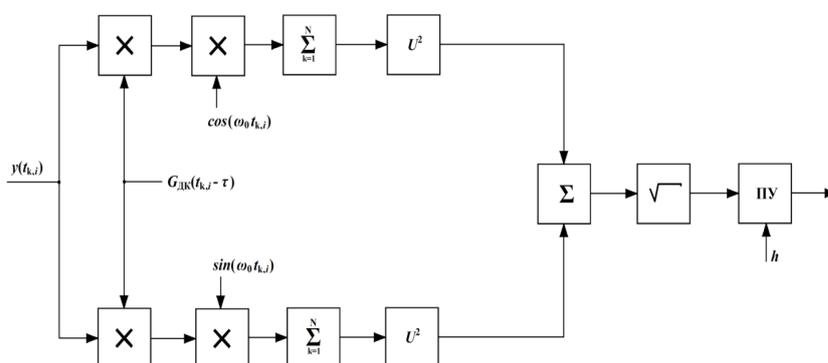


Рис. 1. Схема обнаружителя BPSK-сигнала

Полученные в ходе функционирования программы результаты приведены графически (рисунок 2).

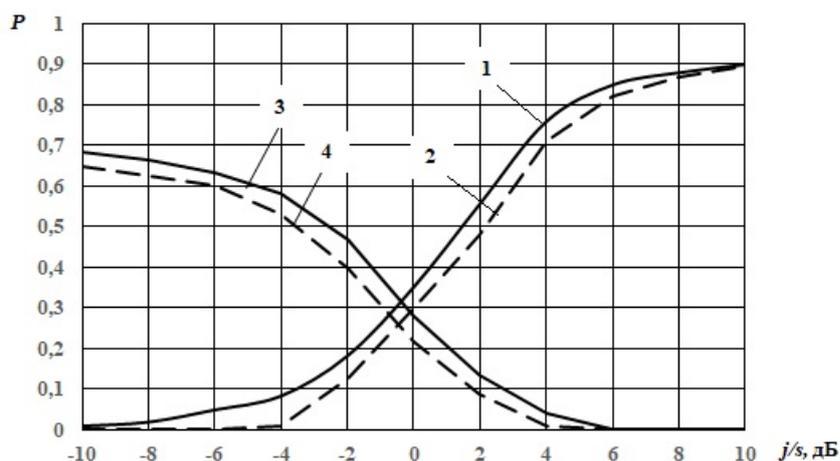


Рис. 2. Зависимости вероятности обнаружения имитационной помехи и навигационного сигнала от отношения помеха/сигнал

На рисунке 2 цифрой 1 обозначена зависимость вероятности обнаружения имитирующей помехи от отношения мощности сигналоподобной помехи к мощности НС j/s при вероятности ложной тревоги 10^{-4} , цифрой 2 при вероятности ложной тревоги 10^{-6} ; цифрой 3 обозначена зависимость для вероятности обнаружением НС за от отношения помеха/сигнал при вероятности ложной тревоги 10^{-4} , цифрой 4 при вероятности ложной тревоги 10^{-6} .

Следующим шагом исследования является определение уязвимости НАП ГНСС к спуфинг-атакам, то есть вычисление вероятности самого факта успешного приема сигналоподобной помехи и использования ее в качестве истинного сигнала при решении задач навигационно-временных определений [6, 10].

В рамках данного этапа работы в программной среде Matlab/Simulink произведено моделирование взаимодействия НАП ГНСС с орбитальной группировкой навигационных спутников.

Цель моделирования заключается в определении вероятностно-временных характеристик появления нового навигационного спутника в составе рабочего

созвездия, что в соответствии с принятыми ограничениями, означает изменение режима функционирования НАП ГНСС (активируется режим «допоиска» сигналов), в связи с чем возникает опасность проведения успешной спуфинг-атаки.

Программа основана на использовании модели невозмущенного движения спутников, и задана следующими математическими выражениями [8]:

$$X = (R_3 + H_{\text{НС}}) \cdot (\cos \omega_{\text{П}} \cdot \cos \lambda - \sin \omega_{\text{П}} \cdot \sin \lambda \cdot \cos i); \quad (4)$$

$$Y = (R_3 + H_{\text{НС}}) \cdot (\cos \omega_{\text{П}} \cdot \cos \lambda + \sin \omega_{\text{П}} \cdot \sin \lambda \cdot \cos i); \quad (5)$$

$$Z = (R_3 + H_{\text{НС}}) \cdot \sin \omega_{\text{П}} \cdot \sin i; \quad (6)$$

$$\omega_{\text{П}} = \omega_0 + t_{\text{тек}} \cdot \frac{2\pi}{T_{\text{ср}}}; \quad (7)$$

$$\lambda = \lambda_0 + t_{\text{тек}} \cdot \frac{2\pi}{T_{\text{ср}}}; \quad (8)$$

где X, Y, Z – геоцентрические координаты НС; $H_{\text{НС}}$ – высота орбиты НС; ω_0 – начальное значение аргумент перигея; λ_0 – начальное значение долготы восходящего узла; R_3 – радиус Земли; i – текущее значение наклона орбиты НС; $T_{\text{ср}}$ – среднее значение драконического периода обращения НС; $\omega_{\text{П}}$ – аргумент перигея, рад; $t_{\text{тек}}$ – текущее время, на которое рассчитываются параметры движения спутника, сек.

Для каждого временного отсчета производится расчет количества видимых НС и время, которое необходимо выждать для появления нового НС в составе рабочей группировки $T_{\text{пс}i}$. По завершению расчетов формируется совокупность (выборка) значений $T_{\text{пс}}$ объемом N для интересующей ГНСС. Далее вычисляются следующие статистические величины:

$$\bar{T}_{\text{пс}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{\text{пс}i}; \quad (9)$$

$$\sigma_{T_{\text{пс}}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{\text{пс}i} - \bar{T}_{\text{пс}})^2}; \quad (10)$$

$$F_n(T_{\text{пс}}) = \frac{n_{T_{\text{пс}}}}{N}; \quad (11)$$

где $\bar{T}_{\text{пс}}$ – выборочное среднее; $\sigma_{T_{\text{пс}}}$ – выборочное значения среднеквадратического отклонения; $F_n(T_{\text{пс}})$ – эмпирическая функция распределения; $n_{T_{\text{пс}}}$ – количество значений меньше $T_{\text{пс}}$.

Описываемые измерения подробно приведены в [11, 12] ограничимся расчетом вероятности возникновения угрозы спуфинг-атаки в течении отсчета времени $T_{\text{псз}}$, которая вычисляется по формуле:

$$P_{\text{са}}(T_{\text{псз}} < T_{\text{пс}}) = F(T_{\text{псз}}). \quad (12)$$

За час функционирования НАП ГНСС вероятность возникновения угрозы спуфинг-атаки для ГНСС GPS составляет 0,88; для ГНСС ГЛОНАСС – 0,67. Отметим, что данное значение вероятности корректно при соблюдении вышеописанных ограничений и справедливо для случая воздействия имитирующей помехи на малоканальную НАП, устанавливаемую на БПЛА микро- и нанокласса.

Используя полученные результаты, получим график зависимости для интересующей ГНСС (рисунок 3). Для краткости изложения приведем уже аппроксимированный график зависимости вероятности появления нового НС в составе рабочей группировки от времени функционирования НАП для наиболее распространенных ГНСС – GPS и ГЛОНАСС. На данном графике цифрой 1 обозначена вероятность появления нового НС в составе рабочей группировки для системы GPS, цифрой 2 – для ГНСС ГЛОНАСС.

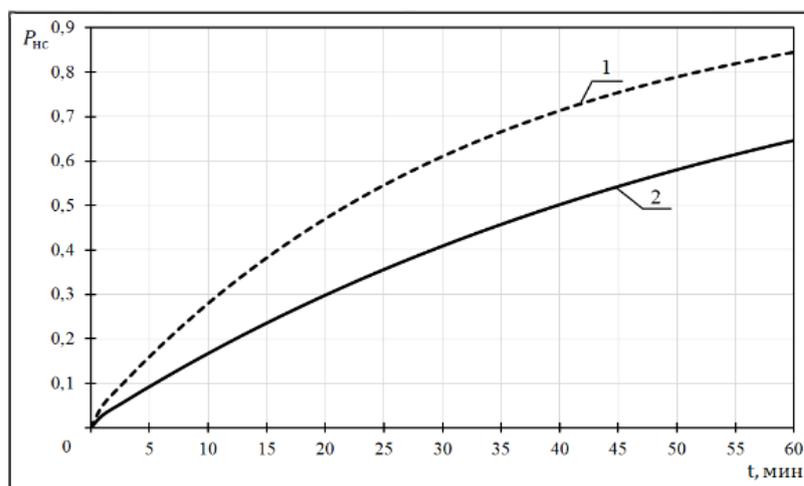


Рис. 3. Вероятность появления нового НС в составе рабочего созвездия НС для ГНСС GPS и ГЛОНАСС

Функция, аппроксимирующая полученные результаты, представлена ниже:

$$\varphi(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (13)$$

где λ – параметр, путем изменения которого подбирают наиболее близкий вид распределения, t – текущее время наблюдения.

Подбирая значение параметра λ , оцениваем степень корреляции полученных результатов с зависимостью $\varphi(t)$. Используя метод наименьших квадратов, удалось добиться степени корреляции функции с результатами измерений равной 0,99 при значении параметра $\lambda = 0,029$ для ГНСС ГЛОНАСС и $\lambda = 0,052$ для ГНСС GPS.

Следующим этапом работы стало получение вероятностных характеристик функционирования НАП ГНСС в условиях воздействия имитирующих помех с учетом характеристик уязвимости НАП. Целью данного этапа является получение наиболее полной картины функционирования НАП в указанных условиях, что в

совокупности с учетом принятых ограничений позволит говорить о максимальной достоверности ожидаемых результатов.

Для реализации данной цели предлагается использовать математический аппарат полумарковских процессов (ПМП), который обладает такими достоинствами, как: простота в использовании и хорошая совместимость с другими методами моделирования и анализа систем; гибкость при адаптации для описания различных систем и работе с аппаратурой различного уровня сложности; высокая степень точности функционирования аппаратуры и вместе с этим высокая эффективность, обусловленная минимальными вычислительными затратами; возможность прогнозирования поведения аппаратуры и адаптивность МП [13, 14], что позволяет учитывать изменения обстановки и поведение аппаратуры в новых условиях; возможность учета зависимости значения вероятности перехода в последующее состояние от времени пребывания описываемого процесса в предыдущем состоянии.

Для описания функционирования НАП ГНСС построим ориентированный граф состояний, каждое состояние которого представляет собой определенный этап работы НАП. Дуги графа должны быть ориентированы с учетом возможных переходов, одновременно может произойти не более одного перехода. Предлагаемый граф состояний представлен на рисунке 4.

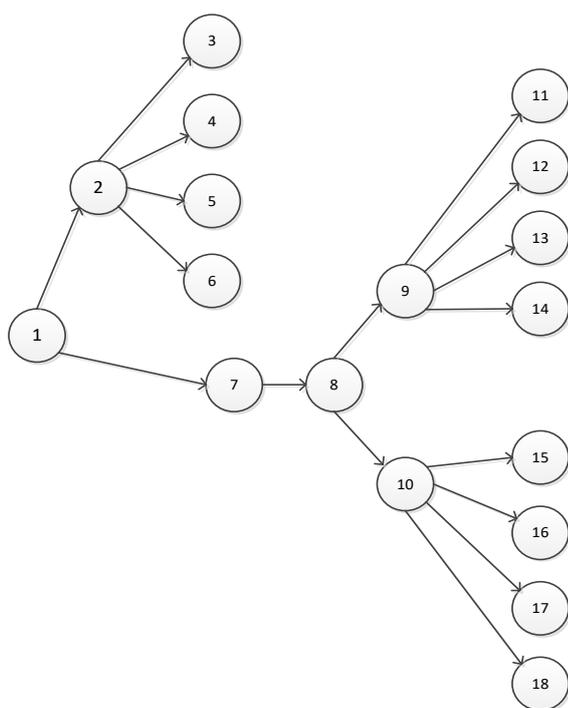


Рис. 4. Граф состояний системы, описывающий функционирование НАП ГНСС

На рисунке 4 S_1 – учитывает НАП ГНСС при отсутствии воздействия имитирующей помехи; S_2 – учитывает состояние приема истинного сигнала, и выделение из него навигационно-временной информации; S_3 – учитывает состояние правильного обнаружения НС и его дальнейшую обработку; S_4 учитывает правильное необнаружения НС; S_5 учитывает состояние пропуска истинного сигнала; S_6 учитывает «ложную тревогу», то есть в условиях отсутствия сигнала было принято решение о наличии сигнала; S_7 учитывает вероятность изменения видимой группировки НС относительно АП; S_8 – учитывает прием аддитивной смеси сигнала и имитирующей помехи; S_9 – учитывает прием и выделение навигационной информации из сигналоподобной помехи; S_{10} – учитывает выделение навигационной информации из НС при условии воздействия сигналоподобной помехи; состояния

$S_{11} - S_{14}$ аналогичны состояниям графа $S_3 - S_6$, но для случая приема имитирующей помехи; состояния $S_{15} - S_{18}$ аналогичны состояниям графа $S_3 - S_6$, но для случая приема в обработку НС на фоне воздействия имитирующей помехи.

Приведем некоторые сведения из теории полумарковских процессов, касающиеся рассматриваемого случая. При построении полумарковских моделей должно соблюдаться равенство:

$$\sum_{l=1}^N P(S_l, t) = 1, \quad (14)$$

где $P(S_l, t)$ – вероятность пребывания процесса в состоянии S_l в момент времени t ; N – количество вершин графа, характеризующих все важные состояния с точки зрения рассматриваемого процесса.

Динамика элементарного перехода системы из предыдущего состояния в последующее описывается формулой:

$$\tilde{P}(i, t) = \sum_j P_{ji} \int_0^\infty \tilde{P}(j, \tau) \varphi_{ji}(t - \tau) d\tau, \quad (15)$$

где $\tilde{P}(i, t)$ – вероятность такого события, что во временном интервале $(t, t + dt)$ система с вероятностью $\tilde{P}(j, \tau)$ окажется в состоянии j , затем с вероятностью $\tilde{P}_{ji} \varphi_{ji}(t - \tau)$ за время $(t - \tau)$ окажется в состоянии i , $\varphi_{ji}(t - \tau)$ – плотность распределения времени ожидания в процессе перехода из предыдущего состояния в последующее.

Приняв за основу выражение (15), составим систему уравнений, представляющую динамику элементарных переходов полученного графа состояний:

$$\left. \begin{aligned}
& \tilde{P}_1(t) = P_{1H}\varphi(t) \\
& \tilde{P}_2(t) = P_{2H}\varphi(t) + P_{12} \int_0^t \tilde{P}_1(t_0)\varphi_{12}(t-t_0)dt_0 \\
& \tilde{P}_3(t) = P_{3H}\varphi(t) + P_{23} \int_0^t \tilde{P}_2(t_0)\varphi_{23}(t-t_0)dt_0 \\
& \tilde{P}_4(t) = P_{4H}\varphi(t) + P_{24} \int_0^t \tilde{P}_2(t_0)\varphi_{24}(t-t_0)dt_0 \\
& \tilde{P}_5(t) = P_{5H}\varphi(t) + P_{25} \int_0^t \tilde{P}_2(t_0)\varphi_{25}(t-t_0)dt_0 \\
& \tilde{P}_6(t) = P_{6H}\varphi(t) + P_{26} \int_0^t \tilde{P}_2(t_0)\varphi_{26}(t-t_0)dt_0 \\
& \tilde{P}_7(t) = P_{7H}\varphi(t) + P_{17} \int_0^t \tilde{P}_1(t_0)\varphi_{17}(t-t_0)dt_0 \\
& \tilde{P}_8(t) = P_{8H}\varphi(t) + P_{78} \int_0^t \tilde{P}_7(t_0)\varphi_{78}(t-t_0)dt_0 \\
& \tilde{P}_9(t) = P_{9H}\varphi(t) + P_{89} \int_0^t \tilde{P}_8(t_0)\varphi_{89}(t-t_0)dt_0 \\
& \tilde{P}_{10}(t) = P_{10H}\varphi(t) + P_{810} \int_0^t \tilde{P}_8(t_0)\varphi_{810}(t-t_0)dt_0 \\
& \tilde{P}_{11}(t) = P_{11H}\varphi(t) + P_{911} \int_0^t \tilde{P}_9(t_0)\varphi_{911}(t-t_0)dt_0 \\
& \tilde{P}_{12}(t) = P_{12H}\varphi(t) + P_{912} \int_0^t \tilde{P}_9(t_0)\varphi_{912}(t-t_0)dt_0 \\
& \tilde{P}_{13}(t) = P_{13H}\varphi(t) + P_{913} \int_0^t \tilde{P}_9(t_0)\varphi_{913}(t-t_0)dt_0 \\
& \tilde{P}_{14}(t) = P_{14H}\varphi(t) + P_{914} \int_0^t \tilde{P}_9(t_0)\varphi_{914}(t-t_0)dt_0 \\
& \tilde{P}_{15}(t) = P_{15H}\varphi(t) + P_{1015} \int_0^t \tilde{P}_{10}(t_0)\varphi_{1015}(t-t_0)dt_0 \\
& \tilde{P}_{16}(t) = P_{16H}\varphi(t) + P_{1016} \int_0^t \tilde{P}_{10}(t_0)\varphi_{1016}(t-t_0)dt_0 \\
& \tilde{P}_{17}(t) = P_{17H}\varphi(t) + P_{1017} \int_0^t \tilde{P}_{10}(t_0)\varphi_{1017}(t-t_0)dt_0 \\
& \tilde{P}_{18}(t) = P_{18H}\varphi(t) + P_{1018} \int_0^t \tilde{P}_{10}(t_0)\varphi_{1018}(t-t_0)dt_0
\end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

Данную динамическую модель удобно рассматривать в виде передаточных функций, являющихся преобразованием Лапласа от плотностей вероятностей. Данный подход позволит использовать алгебраические уравнения относительно образов описанных выше дифференциальных выражений. Тогда дуги графа состояний описываются как линейная динамическая система с переменными параметрами [15].

Преобразование Лапласа имеет следующий вид:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt, \quad (17)$$

где $F(s)$ и $f(t)$ есть изображение и оригинал функции соответственно.

Мгновенные переходы системы будем аппроксимировать дельта-функцией [15], преобразование Лапласа от дельта-функции равно единице.

Приведем решение представленной выше системы уравнений относительно интересующих состояний S_{11} и S_{15} , выполнив переход во временную область с помощью оператора обратного преобразования Лапласа:

$$\tilde{P}_{11}(t) = P_{17}P_{78}P_{89}P_{911}\varphi_{17}(\tau), \quad (18)$$

$$\tilde{P}_{15}(t) = P_{17}P_{78}P_{810}P_{1015}\varphi_{17}(\tau). \quad (19)$$

В данном случае состояния являются поглощающими, что снимает необходимость использования функции восстановления для вычисления искомых вероятностей.

Крайней операцией разработанной методики является использование полученных вероятностных характеристик функционирования НАП ГНСС в условия воздействия имитирующих помех и характеристик уязвимости НАП ГНСС к воздействию имитирующих помех в качестве исходных данных для решения полученных уравнений. Конечные результаты расчетов представлены в виде графика на рисунке 5.

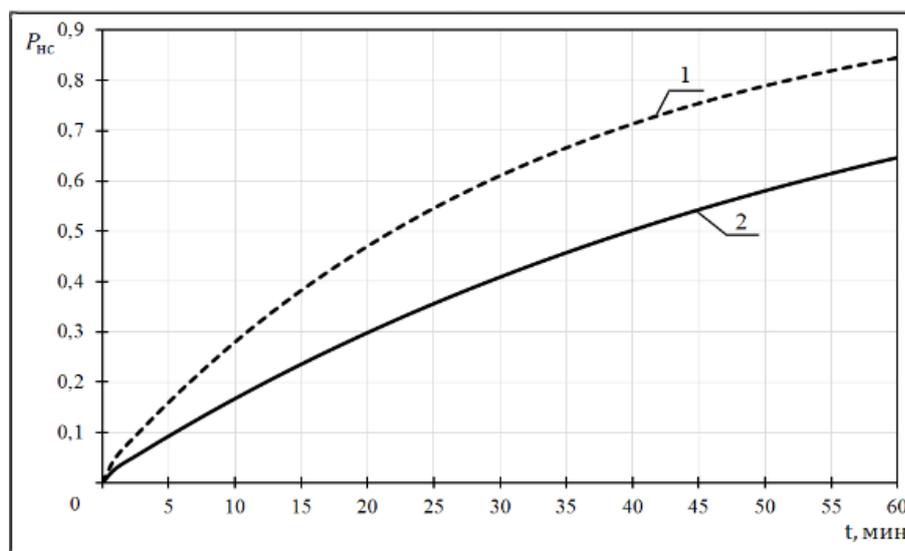


Рис. 5. Зависимость значения вероятности приема помехи и вероятности приема истинного сигнала от времени функционирования НАП ГНСС

Цифрами 1 и 2 указана вероятность успешного перехвата управления малоканальным БПЛА микро- и нано-классов путем воздействия с помощью имитирующих помех для ГНСС GPS и ГЛОНАСС соответственно. Цифрами 3 и 4 указана вероятность приема истинного сигнала на фоне воздействия имитирующих помех для ГНСС GPS и ГЛОНАСС соответственно. Как видно, данный исход хотя и возможен, но маловероятен, что позволяет судить о высокой эффективности воздействия имитирующих помех на НАП ГНСС.

Заключение

В современных реалиях большинство организаций, сфер деятельности, отраслей экономики и безопасности сильно зависят от ГНСС. Области их приложений весьма обширны: транспорт, авиация, сельское хозяйство и др. С увеличением технологической зависимости возрастает необходимость обеспечения

надежности и устойчивости работы навигационного оборудования в любых условиях, включая помеховую обстановку.

В данном контексте, воздействие имитирующих помех (спуфинг), представляет серьезную угрозу для точности и надежности работы ГНСС, а также представления навигационной информации в целом [16, 17]. Спуфинг заключается в передаче поддельных сигналов, которые имитируют сигналы спутников, что может привести к ошибкам в определении местоположения [18, 19]. В военной сфере ГНСС играет критическую роль в навигации и управлении боевыми системами. Помехи могут быть использованы как часть информационной войны для дезориентации противника, поэтому разработка методик для оценки устойчивости к таким воздействиям имеет стратегическое значение [20].

В данной работе представлена методика расчета вероятностных характеристик функционирования навигационной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем в условиях воздействия имитирующих помех, позволяющая получать результаты в условиях меняющейся помеховой обстановки. Методика построена на базе математических моделей и программного обеспечения для моделирования радиосигналов и отличается универсальностью, поскольку позволяет получить вероятностные характеристики при использовании любых НС, поскольку при выборе конкретного НС изменяются лишь исходные данные для дальнейших расчетов, обусловленные особенностями сигналов. Результаты могут быть применимы при рассмотрении взаимодействия НАП с вариативными НС любых СРНС.

Список источников

1. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. - 268 с.
2. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М.: Радиотехника, 2010. - 800 с.
3. Кирюшкин В.В., Бабусенко С.И., Коратаев П.Д., Неровный В.В., Облов П.С. Вероятностные характеристики системы поиска и обнаружения навигационных сигналов в условиях имитирующих помех // Радиотехника. 2023. № 7. С. 60-66. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202307-07>
4. Иванов В.Ф., Кошкарлов А.С. Повышение помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителя ГЛОНАСС за счет комплексирования с инерциальными навигационными датчиками // Труды МАИ. 2017. № 93. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=80455>
5. Романов А.С., Турлыков П.Ю. Исследование влияния имитирующих помех на аппаратуру потребителей навигационной информации // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=66445>
6. 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.
7. Великий А., Филатов С. Солдаты «с ладонь» и «с плеча» // Армейский сборник. 2023. № 1. С. 78-82.

8. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития: монография / Под. ред. Перова А.И. - М.: Радиотехника, 2020. -1072 с.
9. Кружков Д.М., Пасынков В.В. Отечественная глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС: особенности создания, развития и использования. - М: МАИ, 2022. - 111 с.
10. Dixit S., Nagaria D. LMS adaptive filters for noise cancellation // International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2017, vol. 7, no. 5, pp. 2520-2529. DOI: [10.11591/ijece.v7i5.pp2520-2529](https://doi.org/10.11591/ijece.v7i5.pp2520-2529)
11. Mohinder S. Grewal, Lawerence R. Weill, Angus P. Andrews. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration, 2001, John Wiley & Sons, Inc. DOI: [10.1002/9780470099728.ch3](https://doi.org/10.1002/9780470099728.ch3)
12. Harry L. Van Trees. Optimum Array Processing, New York, Wiley, 2002, 1400 p. DOI: [10.1049/sbew046e_ch3](https://doi.org/10.1049/sbew046e_ch3)
13. Голяков А.Д., Ричняк А.М., Фоминов И.В. Исследование точности навигационных параметров космического аппарата с адаптивной системой автономной навигации // Труды МАИ. 2022. № 126. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=169009>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-23)
14. Чистяков В.А. Алгоритм адаптивной фильтрации помех в цифровых антенных решетках спутниковой связи // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=104239>
15. Козирацкий Ю.Л. Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения: монография. - М.: Радиотехника, 2013. - 232 с.

16. Овакимян Д.Н., Зеленский В.А., Капалин М.В., Ерескин И.С. Исследование методов и разработка алгоритмов комплексирования навигационной информации. Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176849>
17. Неровный В.В., Облов П.С., Коратаев П.Д. Вероятностные характеристики навигационной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем в условиях имитирующих помех // XXIX Международная научно-техническая конференция, посвященная 70-летию кафедры радиофизики ВГУ «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 18–20 апреля 2023): сборник трудов. - Воронеж: ВГУ, 2023. С. 47-54.
18. Alex G Quinchia, Gianluca Falco, Emanuela Falletti, Fabio DAVIS. A Comparison between different error modeling of MEMS applied to GPS. INS integrated systems // Italian National Conference on Sensor, 24 July 2013, vol. 13, no. 3, pp. 9549-9588. DOI: [10.3390/s130809549](https://doi.org/10.3390/s130809549)
19. Алешин Б.С., Афонин А.А., Веремеенко К.К. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии. – М.: Физматлит, 2006. - 421 с.
20. Зубов Н.П. Особенности применения скоростных ударных беспилотных летательных аппаратов средней дальности // Военная мысль. 2024. № 1. С. 37-44.

References

1. Solov'ev Yu.A. *Sistemy sputnikovoi navigatsii* (Satellite navigation systems). Moscow: Eko-trendz Publ., 2000. 268 p.

2. Perov A.I., Kharisov V.N. *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* (GLONASS. Principles of construction and operation). Moscow: Radiotekhnika Publ., 2010. 800 p.
3. Kiryushkin V.V., Babusenko S.I., Korataev P.D., Nerovnyi V.V., Oblov P.S. Probabilistic characteristics of the navigation signal search and detection system in of simulating interference. *Radiotekhnika*. 2023. No. 7. P. 60-66. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202307-07>
4. Ivanov V.F., Koshkarov A.S. Improving the noise immunity of GLONASS consumer navigation equipment by combining with inertial navigation sensors. *Trudy MAI*. 2017. No. 93. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=80455>
5. Romanov A.S., Turlykov P.Yu. Investigation of the effect of imitating interference on the equipment of consumers of navigation information. *Trudy MAI*. 2016. No. 86. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=66445>
6. Nerovnyi V.V., Korataev P.D., Oblov P.S., Tolstykh M.Yu. Characteristics of vulnerability of consumer equipment of global navigation satellite systems to spoofing attacks. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi*. 2023. V. 9, No. 6. P. 95-100. (In Russ.)
7. Velikii A., Filatov S. Soldiers "from the palm" and "from the shoulder". *Armeiskii sbornik*. 2023. No. 1. P. 78-82. (In Russ.)
8. Perov A.I. *GLONASS. Modernizatsiya i perspektivy razvitiya* (GLONASS. Modernization and development prospects): monograph. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2020. 1072 p.
9. Kruzhkov D.M., Pasyukov V.V. *Otechestvennaya global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema GLONASS: osobennosti sozdaniya, razvitiya i ispol'zovaniya*

(Domestic global navigation satellite system GLONASS: features of creation, development and use). Moscow: MAI Publ., 2022. 111 p.

10. Dixit S., Nagaria D. LMS adaptive filters for noise cancellation, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2017. V. 7, No. 5. P. 2520-2529. DOI: [10.11591/ijece.v7i5.pp2520-2529](https://doi.org/10.11591/ijece.v7i5.pp2520-2529)

11. Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill, Angus P. Andrews. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. John Wiley & Sons, Inc., 2001. DOI: [10.1002/9780470099728.ch3](https://doi.org/10.1002/9780470099728.ch3)

12. Harry L. Van Trees. *Optimum Array Processing*. New York, Wiley, 2002, 1400 p. DOI: [10.1049/sbew046e_ch3](https://doi.org/10.1049/sbew046e_ch3)

13. Golyakov A.D., Richnyak A.M., Fominov I.V. Investigation of the accuracy of navigation parameters of a spacecraft with an adaptive autonomous navigation system. *Trudy MAI*. 2022. No. 126. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=169009>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-23)

14. Chistyakov V.A. Algorithm of adaptive interference filtering in digital antenna arrays of satellite communications. *Trudy MAI*. 2019. No. 105. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104239>

15. Koziratskii Yu.L. *Modeli informatsionnogo konflikta sredstv poiska i obnaruzheniya: monografiya* (Models of information conflict of search and detection tools: monograph). Moscow: Radiotekhnika Publ., 2013. 232 p.

16. Ovakimyan D.N., Zelenskii V.A., Kapalin M.V., Ereskin I.S. Research of methods and development of algorithms for integration of navigation information. *Trudy MAI*. 2023. No. 132. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176849>

17. Nerovnyi V.V., Oblov P.S., Korataev P.D. Probabilistic characteristics of navigation equipment for consumers of global navigation satellite systems in conditions of simulating interference. *XXIX Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 70-letiyu kafedry radiofiziki VGU «Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz'»*: sbornik trudov. Voronezh: VGU Publ., 2023. P. 47-54.
18. Alex G Quinchia, Gianluca Falco, Emanuela Falletti, Fabio DAVIS. A Comparison between different error modeling of MEMS applied to GPS. INS integrated systems. *Italian National Conference on Sensor*. 24 July 2013. V. 13, No. 3. P. 9549-9588. DOI: [10.3390/s130809549](https://doi.org/10.3390/s130809549)
19. Aleshin B.S., Afonin A.A., Veremeenko K.K. *Orientatsiya i navigatsiya podvizhnykh ob"ektov: sovremennyye informatsionnyye tekhnologii* (Orientation and navigation of moving objects: modern information technologies). Moscow: Fizmatlit Publ., 2006. 421 p.
20. Zubov N.P. Features of the use of high-speed attack unmanned aerial vehicles of medium range. *Voennaya mysl'*. 2024. No. 1. P. 37-44. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 18.09.2024

Одобрена после рецензирования 25.09.2024

Принята к публикации 25.12.2024

The article was submitted on 18.09.2024; approved after reviewing on 25.09.2024; accepted for publication on 25.12.2024