

УДК 623.626

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ПОДВЕРЖЕННОСТИ МАЛОКАНАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМИТИРУЮЩИХ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

П.С. Облов, В.А. Миронов, В.В. Неровный (Воронеж)

Как показывает опыт проведения специальной военной операции, все более существенную роль в исходе боевых действий играют беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Особую роль в сложившейся обстановке играют БПЛА микро-, нано-класса, согласно классификации международной ассоциации по беспилотным системам AUVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International). Такие БПЛА относят к семейству тактических беспилотных аппаратов ближнего действия [1]. Одной из эффективных мер противодействия тактическим БПЛА является постановка преднамеренных помех [2]. Особая роль при этом отводится постановке имитирующих помех, так как в данном случае признаков нарушения функционирования нет, и помеха не обнаружена, в то же время навигационно-временное обеспечение нарушено.

При описании функционирования навигационной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем (НАП ГНСС) были введены следующие ограничения и допущения:

- воздействие помех на НАП ГНСС постоянно и непрерывно с момента появления АП в зоне действия постановщика помех;
- обнаружение и захват имитирующих помех каналами обработки НАП ГНСС осуществляется при появлении нового НС в зоне радиовидимости АП;
- прием хотя бы одной сигналоподобной помехи влечет за собой искажение навигационной информации [3];
- время функционирования НАП ГНСС составляет 60 минут [1].
- НАП ГНСС функционирует в штатном режиме, что достигается не только работоспособностью самой АП, но и выполнением требований по ряду иных условий, таких, как количество и расположение спутников, качество сигналов и др.

Рассмотрим математическое представление сигналов ГНСС и имитирующих помех НАП ГНСС [2,4]. В качестве примера приведем навигационный сигнал с модуляцией BPSK.

$$S_{BPSK}(t) = AG_{ДК}(t)G_{НС}(t)\cos(2\pi f_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

где $S_{BPSK}(t)$ – навигационный сигнал с модуляцией BPSK;

A – амплитуда сигнала;

$G_{ДК}(t)$ – дальномерный код;

$G_{НС}(t)$ – навигационное сообщение;

f_0 – несущая частота;

φ_0 – начальная фаза сигнала, равномерно распределённая на интервале $[0; 2\pi]$.

Помеху, структура которой идентична структуре полезного сигнала, называют сигналоподобной или имитирующей, а сам факт воздействия такой помехи называют спуфинг-атакой (от англ. spoofing – подмена). Для примера укажем математическое представление помехи типа «ложное созвездие» [2]:

$$S(t) = AG_{\text{Ии}}(t)G_{\text{Дки}}(t)\cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (2)$$

где $S(t)$ – имитирующая помеха;

$G_{\text{Ии}}(t) = [\mathbf{q}_i, \mathbf{V}_i, \mathbf{a}_i, \tau_i]^T$ – навигационное сообщение с искажающей информацией.

Для получения вероятностных характеристик системы поиска и обнаружения НАП ГНСС в программной среде Matlab Simulink проведено моделирование воздействия сигналорободной помехи на НАП ГНСС при различных значениях уровня ложной тревоги и различных отношений мощности сигналорободной помехи к мощности сигнала. Основу работы программы [5] составляют модели навигационных сигналов, модели имитирующих помех и модель приемника навигационных сигналов. Конечные результаты моделирования представлены на рисунке 1. Эти результаты в дальнейшем будут использованы в качестве исходных данных при описании соответствующей полумарковской модели.

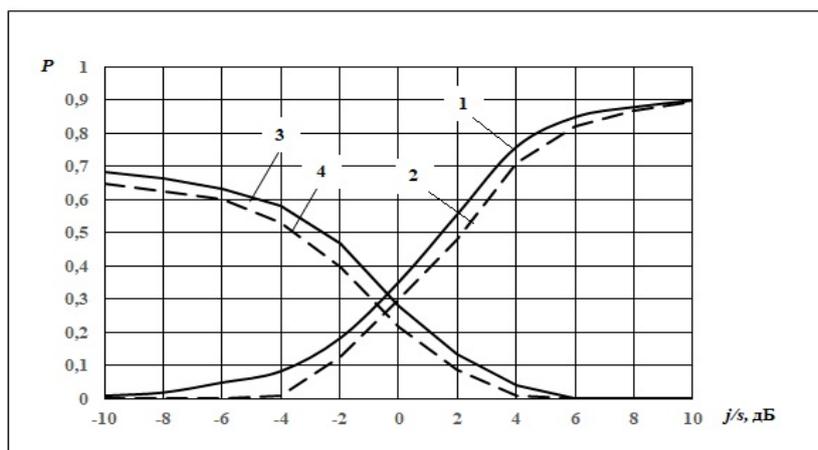


Рис. 1 – Вероятностные показатели системы поиска и обнаружения

На рисунке 1 P характеризует вероятность приема сигнала, отношение j/s характеризует отношение мощностей помехи к сигналу, 1, 2 – зависимости вероятностей обнаружения сигналорободной помехи за три цикла помеха/сигнал при вероятности ложной тревоги 10^{-4} и 10^{-6} соответственно, 3 и 4 – зависимости вероятностей обнаружения истинного сигнала за три цикла при вероятности ложной тревоги 10^{-4} и 10^{-6} соответственно.

Вопросу уязвимости НАП ГНСС к воздействию сигналорободных помех посвящена работа [3], в которой приводятся результаты имитационного моделирования функционирования НАП ГНСС в зоне действия постановщика имитирующих помех, получены вероятностные характеристики срыва управления БПЛА на основе смены состава рабочей группировки навигационных спутников. Реализованная программно модель невозмущенного движения спутников, задается математическими соотношениями [7]:

$$X = (R_3 + H_{\text{НС}}) \cdot (\cos \omega_{\text{П}} \cdot \cos \lambda - \sin \omega_{\text{П}} \cdot \sin \lambda \cdot \cos i) \quad (3)$$

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

$$Z = (R_3 + H_{\text{НС}}) \cdot \sin \omega_{\text{П}} \cdot \sin i \quad (5)$$

$$\omega_{\text{П}} = \omega_0 + t_{\text{ТЕК}} \cdot 2\pi/T_{\text{СР}} \quad (6)$$

$$\lambda = \lambda_0 + t_{\text{ТЕК}} \cdot 2\pi/T_{\text{СР}} \quad (7)$$

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.

Полученные в ходе моделирования с использованием среды Matlab Simulink результаты представлены на рисунках 2 и 3 [8,9].

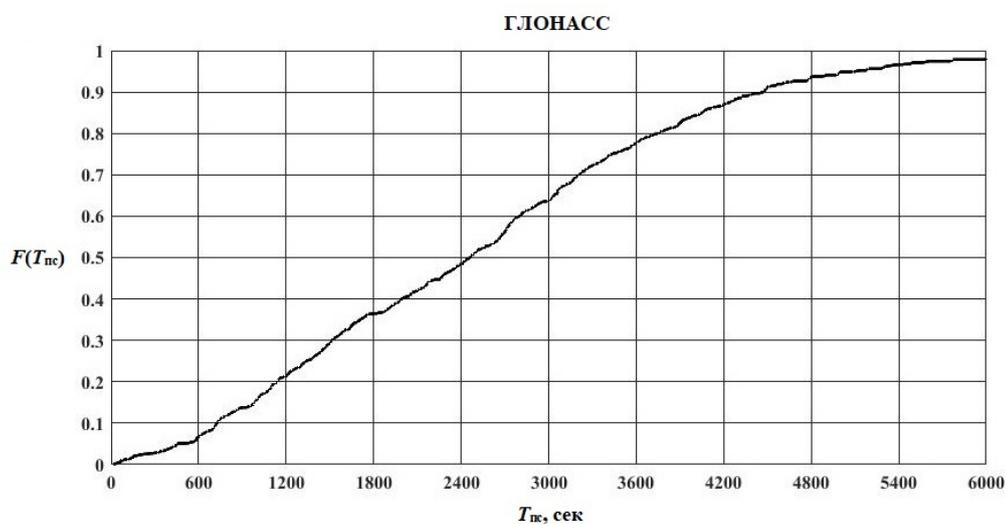


Рис. 2 – Эмпирическая функция распределения случайной величины $T_{\text{пс}}$ для ГНСС ГЛОНАСС

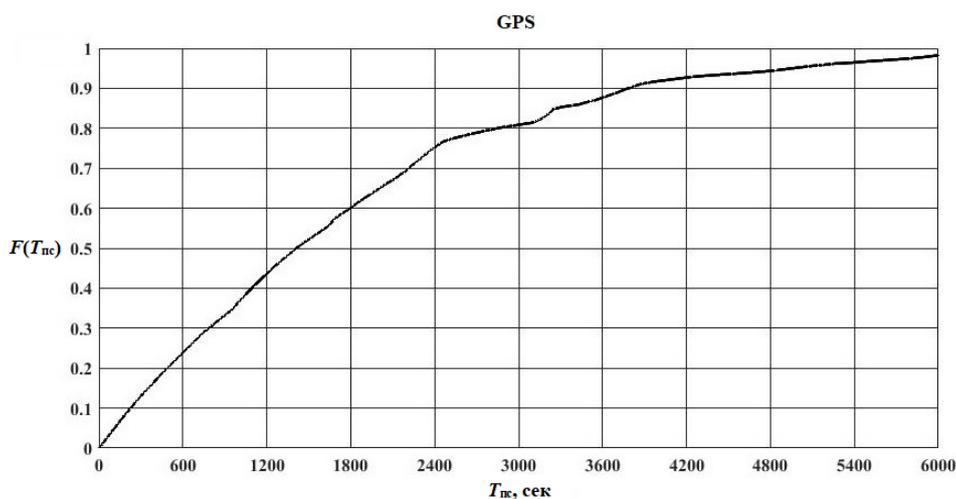


Рис. 3 – Эмпирическая функция распределения случайной величины $T_{\text{пс}}$ для ГНСС GPS

На рисунке 2 $P_{нс}$ – вероятность появления нового НС в составе орбитальной группировки, 1 – результаты для GPS, 2 – для ГЛОНАСС.

Для дальнейших вычислений необходимо аппроксимировать полученные результаты. С точки зрения удобства будущих вычислений, произведем аппроксимацию экспоненциальной функцией, для чего используем метод наименьших квадратов. Результаты аппроксимации представлены на рисунке 4.

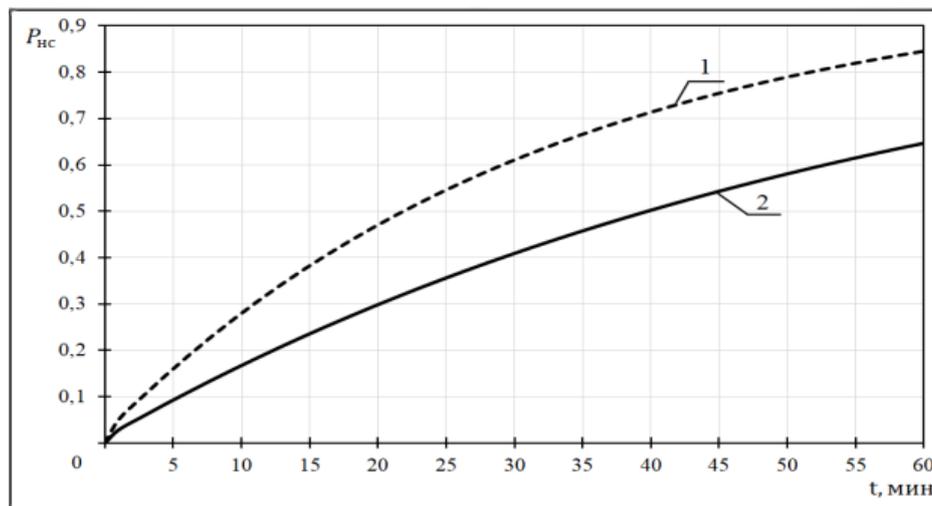


Рис. 4 – График зависимости вероятности появления нового НС в составе рабочего созвездия НС для ГНСС GPS и ГЛОНАСС от времени функционирования НАП ГНСС

Далее осуществлялось моделирование процессов функционирования НАП ГНСС с использованием методов теории полумарковских процессов [10], с целью получения характеристик функционирования НАП в условиях сложной помеховой обстановки с учетом ограничений, изложенных в [3]. Основу моделирования составляют уравнения (8) и (9):

$$\sum_{l=1}^N P(S_l, t) = 1, \tag{8}$$

где $P(S_l, t)$ – вероятность нахождения процесса в состоянии S_l к отсчету времени t ; N – количество вершин графа, отображающих все возможные состояния АП. Выражение, описывающее динамику элементарного перехода системы из состояния j в состояние i , имеет следующий вид:

$$\dot{P}(i, t) = \sum_j P_{ji} \int_0^{\infty} \dot{P}(j, \tau) \varphi_{ji}(t - \tau) d\tau, \tag{9}$$

где $\dot{P}(i, \tau)$ – вероятность того, что в интервале времени $(t, t + dt)$ с вероятностью $\dot{P}(j, \tau)$ переходит в состояние j , после чего с вероятностью $\dot{P}_{ji} \varphi_{ji}(t - \tau)$ за время попадает в состояние i , где $\varphi_{ji}(t - \tau)$ – плотность распределения времени ожидания при переходе.

Ориентированный граф состояний, описывающий функционирование малоканальной мультисистемной НАП ГНСС представлен на рисунке 5.

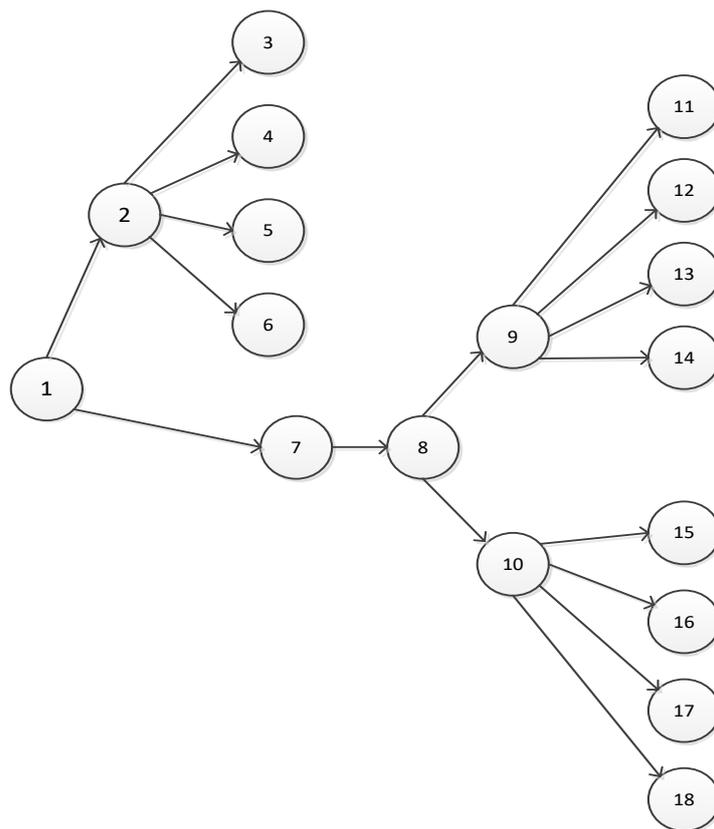


Рис. 5 – Граф состояний системы, описывающий функционирование НАП ГНСС

На рисунке 5: S_1 – характеризует функционирование НАП ГНСС в условиях отсутствия спуфинг-атаки; S_2 – отражает прием истинного сигнала, их обработку и выделение навигационной информации; S_3 – состояние правильного обнаружения и выделения навигационной информации из истинного сигнала; S_4 означает состояние правильного необнаружения ИС; S_5 характеризует заменить синонимами: «отражает», «означает» и т. п. пропуск истинного сигнала; S_6 есть состояние «ложной тревоги», когда при отсутствии сигнала принимается решение о его наличии; S_7 отражает изменение рабочего созвездия НС относительно АП, что определяет вероятность воздействия спуфинг-атаки; S_8 – означает прием аддитивной смеси сигнала и сигналоподобной помехи; S_9 – характеризует состояние приема в обработку и выделения навигационной информации из сигналоподобной помехи состояние выделения навигационной информации из сигналоподобной помехи; S_{10} – отражает состояние выделения навигационной информации из истинного сигнала на фоне воздействия имитирующей помехи; состояния $S_{11} - S_{14}$ есть состояния, аналогичные $S_3 - S_6$, при условии приема в обработку сигналоподобной помехи; состояния $S_{15} - S_{18}$ также имеют тот же смысл, что и состояния $S_3 - S_6$, но при условии приема в обработку истинного навигационного сигнала на фоне спуфинг-атаки.

Система дифференциальных уравнений Колмогорова, описывающая динамику элементарных переходов, представлена ниже:

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

В ходе решения системы уравнений применялось преобразование Лапласа. Так как интересные состояния являются поглощающими, функция восстановления равна самой полученной вероятности. Полученные результаты достаточно подробно описаны в [11] – см. рисунок 6.

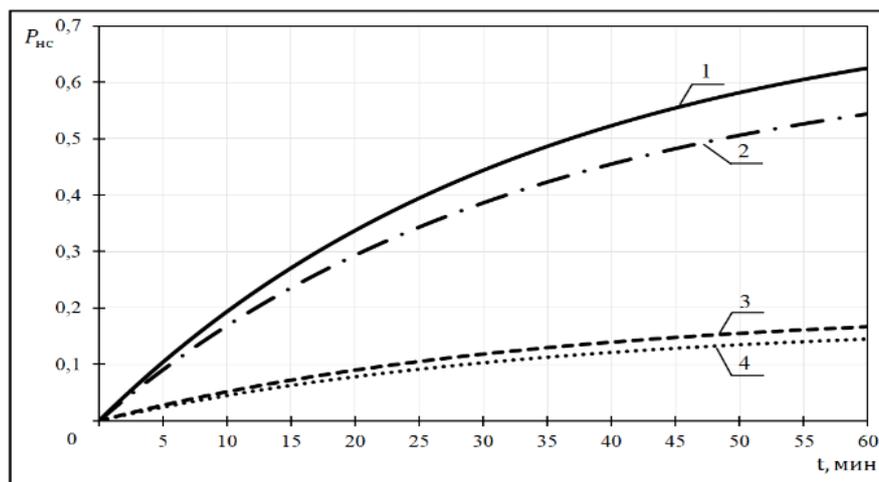


Рис. 6 – Зависимость значения вероятности приема помехи и вероятности приема истинного сигнала от времени функционирования НАП ГНСС

На рисунке 6 по оси абсцисс указана вероятность приема сигнала в обработку, по оси ординат указано время функционирования НАП ГНСС в минутах. 1 и 2 – вероятности проведения успешной спуфинг-атаки на НАП ГНСС, использующих сигналы ГНСС GPS и ГЛОНАСС соответственно, 3 и 4 – вероятности приема истинного сигнала в условии проведения спуфинг-атаки для НАП ГНСС, использующих GPS и ГЛОНАСС соответственно.

Таким образом, представлен вариант описания процессов функционирования мультисистемной малоканальной НАП ГНСС. Проведено моделирование функционирования систем поиска и обнаружения навигационного сообщения, получены характеристики уязвимости, проведены вычисления с использованием ранее не применяемого в данной области аппарата полумарковских процессов. Примененный авторами подход может быть использован при описании широкого круга ситуаций работы мультисистемной НАП. К достоинствам данного подхода относится возможность свободного выбора начальных условий и характеристик для описания работы различной НАП ГНСС, функционирующей на фоне помеховой обстановки разной интенсивности.

Литература

1. **Великий А., Филатов С.** Солдаты «с ладонь» и «с плеча» // Армейский сборник 2023. №1. С.78-82.
2. **Неровный В.В., Облов П.С., Коратаев П.Д.** Математические модели имитирующих помех в навигационной аппаратуре потребителей глобальных навигационных спутниковых систем. Сборник трудов XXVII Международной НТК, «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 28-30 сентября 2021 г. Том 3. С. 18-24.
3. **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.
4. **Филоненко В.В., Облов П.С.** Сигналы, используемые в глобальных спутниковых навигационных системах // Сборник научных статей по материалам XI Международной науч.-техн. конф. «Современное состояние и перспективы развития систем связи и радиотехнического обеспечения в управлении авиацией» (2-3 марта 2022 г.). – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2022. 495 с. С.325-330.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665081 от 12.07.2023 г., «Программа формирования вероятности появления нового навигационного спутника в видимой группировке навигационных спутников глобальной навигационной системы «ГЛОНАСС». Неровный В.В., Коратаев П.Д., Неровная Н.А.
6. **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 №7 2023. С. 60-66.
7. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration. Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill, Angus P. Andrews: 2001. John Wiley & Sons, Inc.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023688614 от 22.12.2023 г., «Программа формирования вероятности появления нового навигационного спутника в видимой группировке навигационных спутников глобальной навигационной спутниковой системы «ГЛОНАСС». Неровный В.В., Неровная Н.А., Коратаев П.Д.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024610126 от 09.01.2024 г. «Программа формирования вероятности появления нового навигационного спутника в видимой группировке навигационных спутников глобальной навигационной спутниковой системы «КОМПАСС». Неровный В.В., Неровная Н.А., Коратаев П.Д.
10. Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения. Монография / под ред. Ю.Л. Козирацкого – М.: Радиотехника, 2013. 232с.
11. **Неровный В.В., Паринов М.Л., Облов П.С., Коратаев П.Д.** Имитационное моделирование и анализ вероятностных характеристик функционирования малоканальной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем в условиях сигналоподобных помех // Радиотехника №7, 2024. С. 60-66.