

Научная статья

УДК 623.76.07

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182681>

МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА ПРИ РАБОТЕ В РЕЖИМЕ С ПОВЫШЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Алексей Владимирович Зюзин¹, Александр Сергеевич Захаров²✉, Анатолий Юрьевич Перлов³, Александр Васильевич Тимошенко⁴

^{1,4}Ярославское Высшее Военное училище Противовоздушной обороны,
Ярославль, Россия

^{2,3}Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

²zakharov.as17@physics.msu.ru ✉

³laperlov@yandex.ru

Аннотация. В статье показано, что при решении задач высокоточного сопровождения космических аппаратов при воздействии деструктивных факторов применение зондирующих сигналов радиолокационной станции (РЛС) сигналов как правило не достигает своей теоретически обоснованной эффективности.

Показано, что точностные характеристики режима сверхразрешения определяются полосой рабочих частот, шириной спектра применяемых зондирующих сигналов, неравномерностью амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) приемной системы РЛС, а также требованиями к зондирующим сигналам. Приведена

взаимосвязь точностных характеристик РЛС с деструктивными факторами, АЧХ приемного тракта, отношением сигнал/шум, амплитудно-фазовым распределением, в том числе определяющих работу РЛС в режиме сверхразрешения.

Обоснована необходимость оперативного учета возможностей РЛС по применению сигналов для работы в режиме с повышенным разрешением по результатам анализа всей совокупности деструктивных факторов: как внешних (реальный космический фон, авроральные помехи, пассивные и активные (шумовые и имитирующие помехи), так и внутренних деструктивных факторов (тепловые процессы и тепловые флуктуации, искажения при формировании зондирующих сигналов и др.).

Для управления сигналами в интересах повышения качества обработки принимаемой информации разработана методика на основе комплексного показателя в интересах повышения качества работы в режиме сверхразрешения. Благодаря выстроенным связям можно оперировать большим объемом данных о сигналах при этом тандемно вычисляя информацию о динамике деструктивных воздействий. На основе уравнения Фоккера-Планка получена начально-краевая задача по расчету плотности распределения вероятности воздействия деструктивных факторов на аппаратуру, решение которой позволяет оценить необходимость смены сигнала. Представлено решение начально-краевой задачи расчета плотности вероятности воздействия деструктивных факторов, а также расчет риска выбора неоптимального сигнала на примере линейно-частотно модулированного сигнала и сигнала Костаса.

Проведен демонстрационный эксперимент, поэтапно показывающий работу интеллектуального модуля по нахождения плотности вероятности воздействия деструктивных факторов и расчет риска выбора неоптимального сигнала.

Приведено распределение плотности вероятности воздействия деструктивных факторов для разных моментов времени с использованием различных типов зондирующих сигналов. Определена зависимость риска выбора неоптимального сигнала от времени для ЛЧМ-сигнала и сигнала Костаса.

В статье представлены основные положения комплексной методики для управления сигналами РЛС мониторинга космического пространства в режиме сверхразрешения, отличительной особенностью которого является оперативная оценка деструктивных факторов совместно.

Ключевые слова: Уравнение Фоккера-Планка, радиолокационная станция, деструктивные факторы, антенная решетка

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 24-Ш01-04.

Для цитирования: Зюзин А.В., Захаров А.С., Перлов А.Ю., Тимошенко А.В. Методика выбора оптимальных параметров зондирующего сигнала при работе в режиме с повышенным разрешением // Труды МАИ. 2024. № 138. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182681>

Original article

THE METHOD OF SELECTING THE OPTIMAL PARAMETERS OF THE PROBING SIGNAL WHEN OPERATING IN HIGH-RESOLUTION MODE

Alexey V. Zyuzin¹, Aleksandr S. Zakharov²✉, Anatoly Yu. Perlov³,

Alexander V. Timoshenko⁴

^{1,4}Yaroslavl Higher Military School of Air Defense,
Yaroslavl Russia

^{2,3}Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

²zakharov.as17@physics.msu.ru✉

³laperlov@yandex.ru

Abstract. The article shows that when solving problems of high-precision tracking of spacecraft under the influence of destructive factors, the use of probing signals of a radar station (RLS) signals, as a rule, does not achieve its theoretically justified efficiency.

It is shown that the accuracy characteristics of the super-resolution mode are determined by the operating frequency band, the spectrum width of the probing signals used, the unevenness of the frequency response of the radar receiving system, as well as the requirements for probing signals. The relationship between the accuracy characteristics of the radar and destructive factors, frequency response, signal-to-noise ratio, amplitude-phase distribution, including those determining the operation of the radar in the super-resolution mode, is given. The necessity of operational consideration of radar capabilities for application of signals for operation in the mode with increased resolution is substantiated based on the results of analysis of the whole set of destructive factors: both external (real

cosmic background, auroral interference, passive and active (noise and simulating interference), and internal destructive factors (thermal processes and thermal fluctuations, distortions during formation of probing signals, etc.).

To control signals in the interests of improving the quality of processing of received information, a technique based on a complex indicator has been developed in the interests of improving the quality of operation in the super-resolution mode. Due to the established connections, it is possible to operate with a large volume of data on signals while tandemly calculating information on the dynamics of destructive effects. Based on the Fokker-Planck equation, an initial-boundary value problem has been obtained for calculating the probability distribution density of the impact of destructive factors on equipment, the solution of which allows one to estimate the need to change the signal. The solution of the initial-boundary value problem of calculating the probability density of the impact of destructive factors, as well as the calculation of the risk of choosing a non-optimal signal using the example of a linear-frequency modulated signal and a Costas signal, is presented.

A demonstration experiment was conducted, step by step showing the operation of the intelligent module for finding the probability density of the impact of destructive factors and calculating the risk of choosing a non-optimal signal.

The distribution of the probability density of the impact of destructive factors for different moments in time using different types of probing signals is given. The dependence of the risk of choosing a non-optimal signal on time for a chirp signal and a Costas signal is determined.

The article presents the main provisions of a comprehensive methodology for managing signals from space monitoring radars in the super-resolution mode, a distinctive

feature of which is the operational assessment of destructive factors jointly.

Keywords: Fokker-Planck equation, radar station, destructive factors, antenna array

Funding: This research was supported by MSU Program of Development, Project №24-S-04

For citation: Zyuzin A.V., Zakharov A.S., Perlov A.Yu., Timoshenko A.V. The method of selecting the optimal parameters of the probing signal when operating in high-resolution mode. *Trudy MAI*, 2024, no. 138. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=182681>

Введение

Современные требования к радиолокационным станциям мониторинга космического пространства (РЛС МКП) наряду с традиционными задачами по обнаружению и сопровождению воздушных и космических целей режима сверхразрешения малоразмерных космических объектов (КО) [1]. Актуальность режима обосновывается участвовавшими кластерными запусками космических аппаратов [2], что накладывает требования по частоте обновления каталога. Режим сверхразрешения в РЛС МКП – особый режим, при котором станция работает с узким лучом для обновления каталога космических аппаратов.

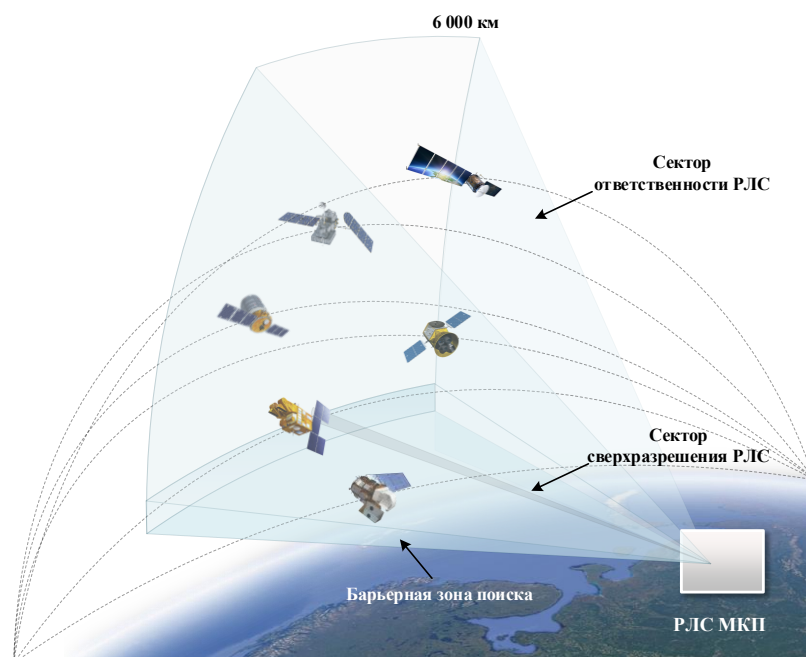


Рисунок 1 – сравнение сектора сверхразрешения РЛС и барьерной зоны поиска

Вопросам обработки широкополосных сигналов в интересах классификации объектов посвящено множество научных статей [3-6]. Однако они требуют своего развития для учета особенностей современных РЛС МКП с крупноапертурной АФАР, работающей в непрерывном режиме с квазинепрерывными зондирующими сигналами.

Воздействие внешних и внутренних факторов приводит к изменению принимаемых сигналов. В [8-10] показано деструктивное влияние помех на снижение показателя суммы нормированных амплитуд при понижении отношения сигнал/шум. Проблема учета потерь в каналах приема и передачи при формировании диаграммы направленности, фазирования и коэффициента усиления продемонстрирована в [11], где также говорится о невозможности качественной обработки при воздействии внутренних деструктивных воздействий, в том числе и таких как тепловые процессы.

Точностные характеристики режима сверхразрешения определяются полосой рабочих частот, шириной спектра применяемых зондирующих сигналов, неравномерностью АЧХ приемной системы РЛС, а также требованиями к зондирующим сигналам. Ухудшение точностных характеристик (рис.2.) происходит в результате влияния деструктивных факторов на характеристики РЛС, в том числе такие как АЧХ, отношение сигнал/шум, амплитудно-фазовое распределение и др.



Рисунок 2 – Взаимосвязь точностных характеристик РЛС с деструктивными факторами

Исследования показали, что потенциальные значения функциональных характеристик РЛС определяются параметрами зондирующих, гетеродинных сигналов и возможностями системы обработки сигналов на основе процессов фильтрации, модуляции и демодуляции. При этом потенциальные значения функциональных и тактико-технических характеристик также в значительной

степени определяются параметрами стабильности сигналов [12]. Искажения параметров делятся на мультипликативные (происходит искажение закона изменения фазы) и аддитивные (происходят амплитудные искажения и спад импульса) [13].

Если рассматривать только внутренние деструктивные факторы, то их стохастическое воздействие приводит к изменению характеристик РЛС, таких как амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) приема-передающего тракта или амплитудно-фазовое распределение в каналах тракта. Данные изменения происходят из-за повышения плотности компоновки аппаратуры в РЛС, что повышает степень воздействия стохастических деструктивных факторов, которые могут уменьшать функциональные характеристики до 60% [14-21]. При этом данные изменения невозможно откорректировать с помощью статистических оценок, в связи с чем появляется необходимость в новых методиках оценки и прогноза динамики деструктивных факторов.

Таким образом, возникает ситуация, при которой внутренние деструктивные факторы стохастической природы изменяют текущие возможности РЛС по обработке сигналов, что приводит к необходимости смены сигнала с меньшими требованиями. При этом необходимо производить смену оперативно и находить баланс между текущими возможностями РЛС, требованиями сигналов и тактико-техническими характеристиками (ТТХ).

Необходим также новый метод для оценки динамики деструктивных факторов, поскольку существующие методы основаны либо на компенсации одного фактора, либо на калибровке все станции. В работе [14] представлен алгоритм калибровки по тепловым процессам на основе тандемного уравнения теплопроводности, а в патентах

[22,23] представлены методы полной калибровки РЛС, основанные на пролете спутников по орбите. Эти методы не позволяют учесть множество деструктивных факторов, а также производить калибровку оперативно, поскольку необходимо ожидать пролета спутников. Возникает необходимость в новом аппарате расчета динамики внутренних деструктивных факторов в РЛС МКП.

В данной работе предлагается рассмотреть только внутренние деструктивные факторы и формализовывать сквозной интегральный показатель.

Методика управления сигналами на основе комплексного показателя

Так как стохастические деструктивные факторы имеют не детерминированную природу, то в интересах нахождения изменения функциональных характеристик перейдем к вероятностному описанию процессов. Эффективным аппаратом прогнозирования и расчета нестационарного поведения стохастических процессов используется уравнение Фоккера-Планка. В настоящее время имеются работы [24,23] для прогноза временных рядов и генерации нестационарных траекторий временных рядов, что также применимо к анализу деструктивных факторов. Применительно к задаче оценке риска с помощью уравнения Фоккера-Планка оценивали вероятность выхода из строя элементов модуля [26,27]. Двумерное уравнение для нахождения функции плотности вероятности воздействия деструктивных факторов на РЛС:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = - \sum_{i=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_i} (\sigma_{if}) + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (D_{ij} f)$$

Где f – функция плотности вероятности от координат x и y , σ – коэффициент сноса, D – коэффициент диффузии. В дальнейшем необходимо формализовать

взаимосвязь функции плотности вероятности с функциональными характеристиками РЛС, однако, для упрощения предлагается рассматривать изменения максимума функции плотности вероятности и площадь воздействия деструктивных факторов.

С этой целью представим задачу выбора зондирующего сигнала с наилучшими характеристиками как задачу оценки риска выбора «неоптимального» сигнала. Для расчета риска можно применить теорию минимизации риска, в достаточной степени проработанной в работе [28]. Из теории для расчета риска можно применить следующую формулу:

$$R = \sqrt{\sum_i \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} \sigma_i \sigma_j}$$

где σ_i – среднеквадратичное отклонение i -ой характеристики РЛС, C_{ij} - коэффициент корреляции между i -ой и j -ой функциональными характеристиками. Для сохранения размерности наиболее правильно оценивать в виде логарифма отношения измеренной величины на k -ом к $k-1$ шагу.

Общая методика управления сигналом представлено на рисунке 3.

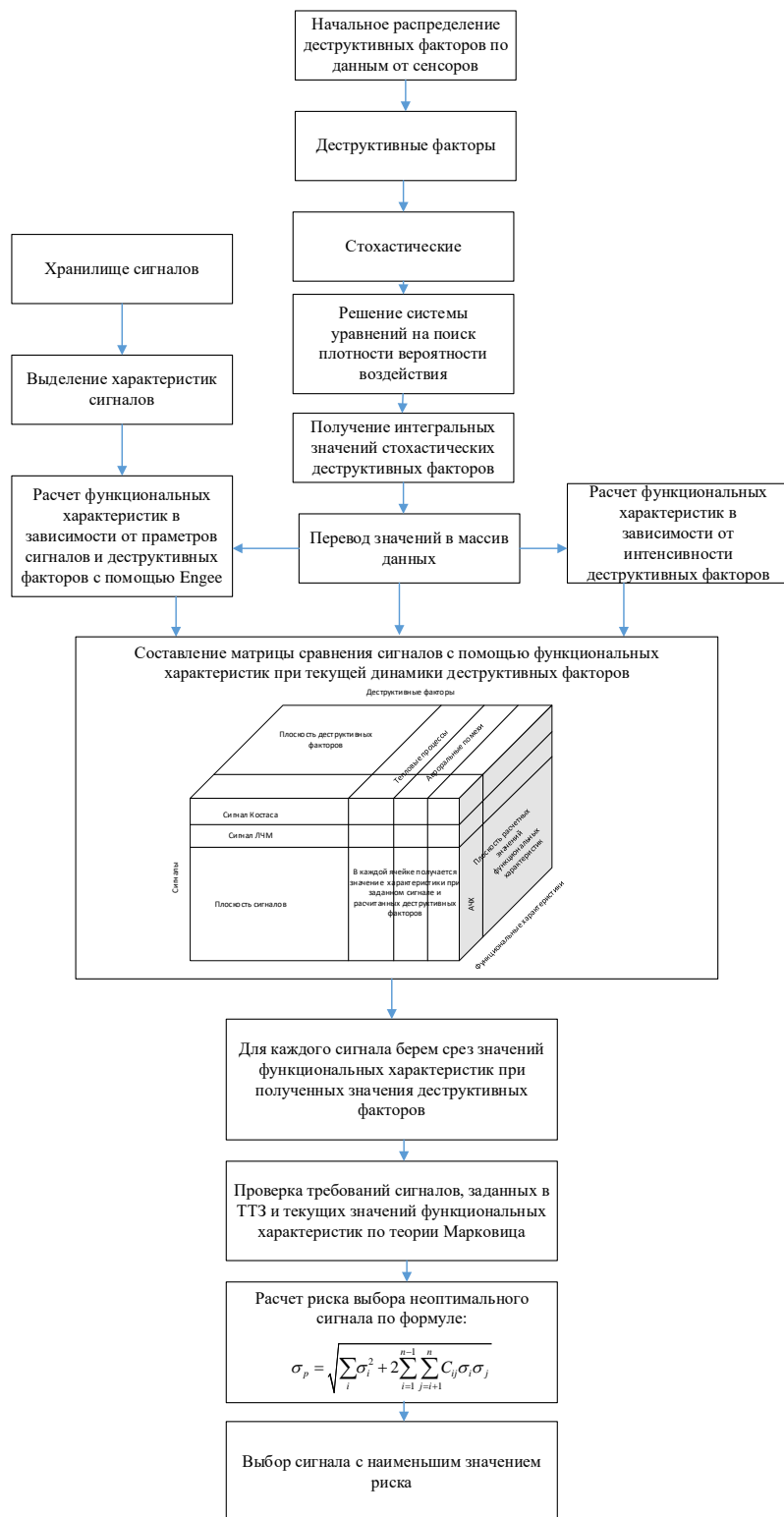


Рисунок 3 – Методика управления сигналами РЛС МКП в режиме сверхразрешения

Таким образом, представлена методика управление сигналами, позволяющая по решению начально-краевой задачи на поиск распределения плотности вероятности

вычислить сквозной интегральный показатель риска выбора неоптимального сигнала по теории минимизации рисков.

Демонстрационный эксперимент

Эффективность приведенной выше метода управления подтверждается на частном примере оценки деструктивного воздействия тепловых процессов на искажения АЧХ приемного тракта активной фазированной антенной решетки (АФАР), приведенной теоретически в работе [29]. Проведем моделирование в среде MatLab по решению уравнения расчета плотности вероятности воздействия деструктивных факторов.

Будем полагать, что изменение характеристик РЛС в режиме сверхразрешения можно представить, как диффузионный процесс воздействия множества деструктивных факторов, каждый из которых либо приводит к изменению точностных характеристик, либо нет. Для этого возьмем коэффициент сноса и диагональные коэффициенты диффузии равные 0, а осевые коэффициенты диффузии равными и постоянными, то есть будем рассматривать только диффузионные деструктивные факторы, такие как тепловые процессы в радиоэлектронных комплексах и параметрические возмущения в блоках усиления мощности.

Для сравнения возьмем сигналы Костаса [30] и линейно-частотно модулированный (ЛЧМ) сигнал. При этом в качестве допущения не будем учитывать дискретную структуру решетки. А в качестве небольшого упрощения рассмотрим изменения максимума функции плотности вероятности и площади воздействия деструктивных факторов для анализа риска выбора неоптимального сигнала.

Решение начально-граничной задачи на поиск плотности вероятности будем осуществлять численным методом Рунге-Кутты 4 порядка. На рисунке 4 представлено решение уравнения для ЛЧМ-сигнала.

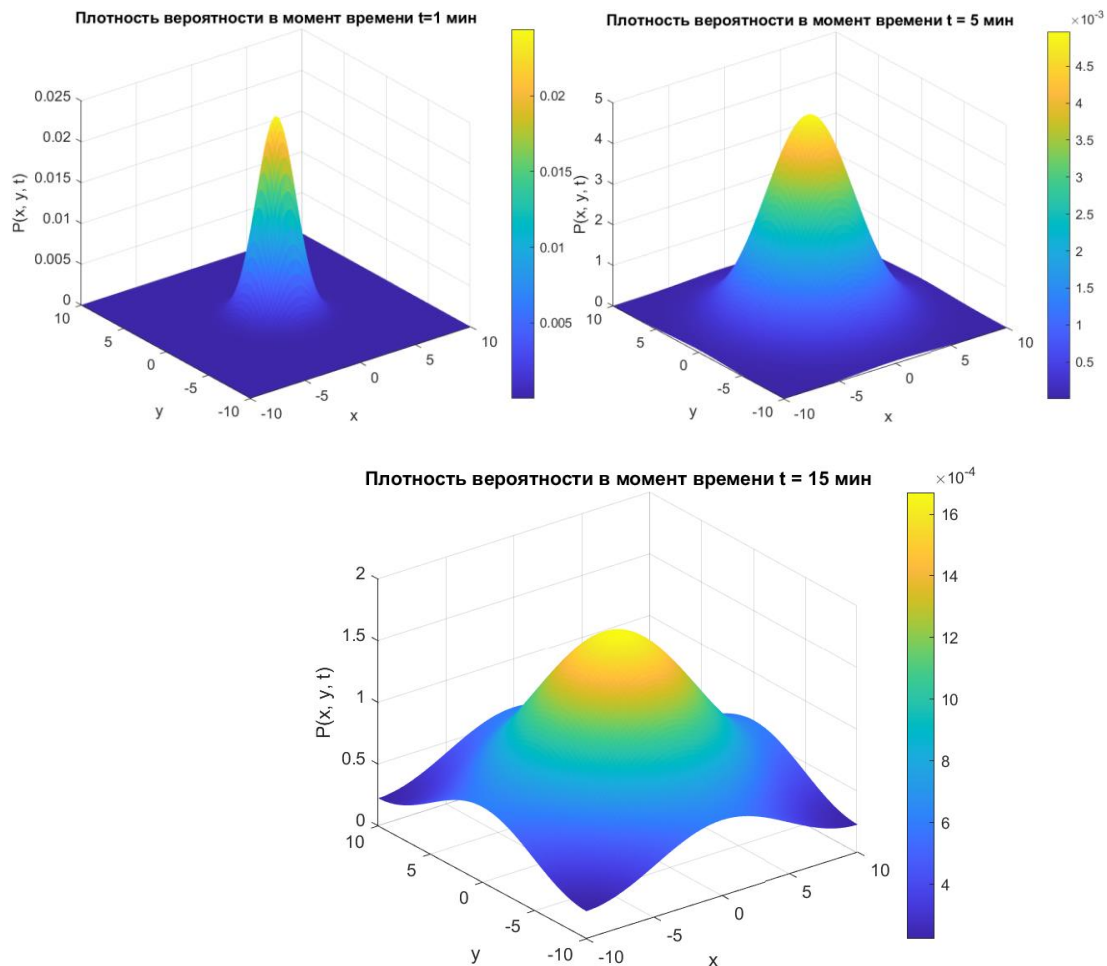


Рисунок 4 – распределение плотности вероятности воздействия деструктивных факторов на решетку размерами 20 метров на 20 метров для разных моментов времени ЛЧМ-сигнала

Решение начально-краевой задачи для ЛЧМ сигнала согласуется с наблюдениями, поскольку в центре полотна воздействия деструктивных факторов вероятнее из-за большого количества соседних элементов. Для сигналов Костаса вид решения представлен на рисунке 5.

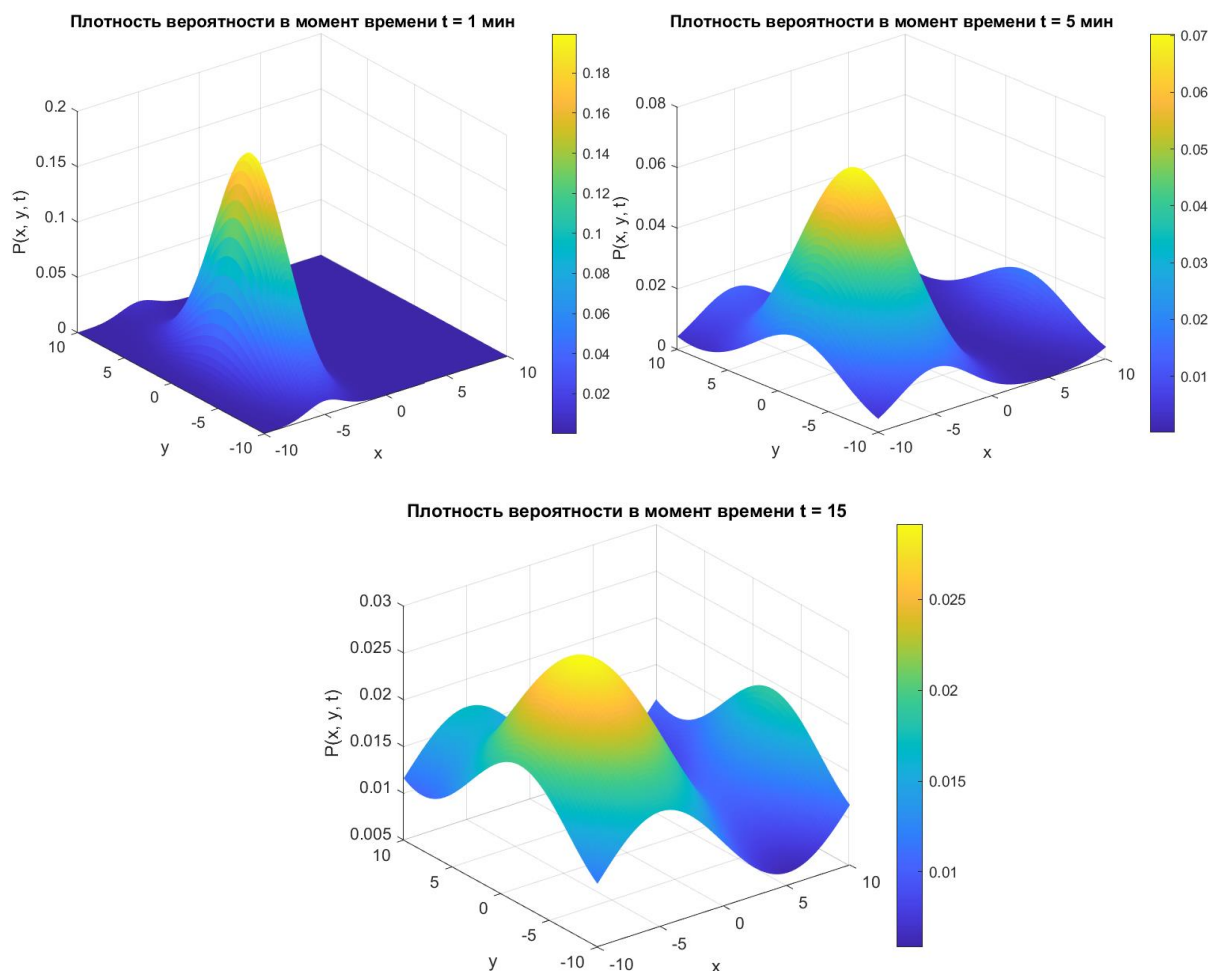


Рисунок 5 – распределение плотности вероятности воздействия деструктивных факторов для разных моментов времени сигналом для сигнала Костаса

Как видно из рисунка 5, решение уравнения согласуется с тем, что неравномерность деструктивных факторов происходит за счет высокой степени нелинейности закона изменения частоты. Зависимость риск выбора неоптимального сигнала от времени работы представлена на рисунке 6. В данном случае критерием оптимальность будет сравнения рисков для двух сигналов.

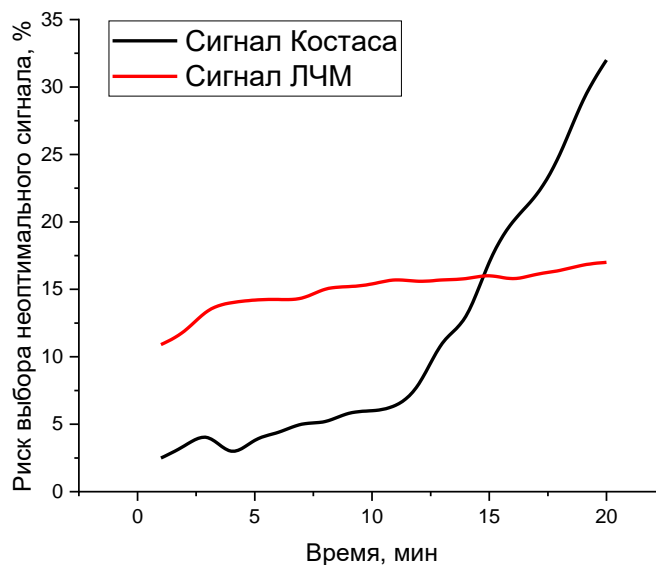


Рисунок 6 – зависимость риска выбора неоптимального сигнала от времени для ЛЧМ-сигнала и сигнала Костаса

На рисунке 6 после 15 минут появляется необходимость перехода на ЛЧМ сигнал из-за воздействия деструктивных факторов. Это согласуется с высокими требованиями сигнала Костаса к аппаратуре [30].

Для повышения времени моделирования можно воспользоваться анализом временных рядов воздействий деструктивных факторов, тем самым прогнозируя дальнейшие изменения функции плотности вероятности. Также возможные неточности связаны с эмпирическим подбором начальных условий для сигналов, что вызвано оригинальной постановкой задачи связи сигналов и деструктивных факторов от чего недостаточно данных для построения качественных начальных условий. В качестве дальнейших исследований необходимо уточнить начальные условия и коэффициенты диффузии для разных типов сигнала.

Заключение

Приведена оригинальная методика выбора сигналов РЛС МКП при адаптивном режиме повышения точности сопровождения с учетом воздействия деструктивных факторов.

Динамика искажений функциональных характеристик оценена на основе теории минимизации риска. На основе теории был выделен сквозной интегральный показатель на основе изменений функциональных характеристик из-за воздействия деструктивных факторов.

На основе онтологической модели была построена схема методики управления зондирующими сигналами РЛС. Благодаря выстроенным связям можно оперировать большим объемом данных о сигналах при этом тандемно вычисляя информацию о динамике деструктивных воздействий.

Приведен демонстрационный эксперимент, поэтапно показывающий работу интеллектуального модуля по нахождения плотности вероятности воздействия деструктивных факторов и расчет риска выбора неоптимального сигнала. По результатам эксперимента показано, что методика, которая является основой интеллектуального модуля, качественно рассчитывает риск выбора неоптимального сигнала, что и было показано для сложного в обработке сигнала Костаса.

Список источников

1. Порсев В.И., Гелесев А.И., Красько А.Г. Угловое сверхразрешение сигналов с использованием «виртуальных» антенных решеток // Вестник Концерна ВКО «Алмаз

- Антей». 2019. № 4. С. 24-34. URL: <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2019-4-24-34>
2. Мацеевич С.В., Владко У.А., Зюзина А.Д., Мочалов М.Н., Захаров А.С. Применение показателя когнитивной нагрузки графического элемента для обоснования требований к системе визуализации РЛС дальнего обнаружения // Научная визуализация. 2024. № 16 (3). С. 87–96. DOI: [10.26583/sv.16.3.09](https://doi.org/10.26583/sv.16.3.09)
3. Черников А.А. Алгоритм обнаружения и классификации объектов на неоднородном фоне для оптико-электронных систем // Труды МАИ. 2023. № 129. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173039>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-26](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-26)
4. Дементьев А.Н., Ключев Д.С., Новиков А.Н., Межнов А.С., Питерскова Ю.А., Захарова Е.В., Дементьев Л.А. Развитие методов пространственновременной обработки широкополосных сигналов в адаптивной антенной решетке // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=167170>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-25](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-25)
5. Патраков С.С. Метод оценивания устойчивости радиоуправления динамическим объектом в условиях сложной помеховой обстановки // Труды МАИ. 2024. № 135. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179685>
6. Генов А.А., Осипов В.В., Мацыкин С.В., Савилкин С.С. Математическое моделирование цифровых методов формирования амплитуднофазового распределения излучателей в X-диапазоне // Труды МАИ. 2024. № 135. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179693>
7. Зверев Г.П., Тимошенко А.В., Перлов А.Ю. и др. Применение теории нечетких множеств при решении задач управления временным ресурсом радиолокационной станции мониторинга космического пространства // Научно-технический вестник

информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24. № 3. С. 513-519. DOI: [10.17586/2226-1494-2024-24-3-513-519](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-3-513-519)

8. Кибирниченко А.Г., Кудряшов М.Ю., Худанов А.А. Влияние параметров радиолокационных дальностных портретов целей на характеристики их обнаружения известными обнаружителями сверхширокополосных сигналов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 3 (19). С. 26-33.

9. Чижов А.А. Сверхразрешение радиолокационных целей при воздействии активных шумовых помех по основному и ближним боковым лепесткам диаграммы направленности антенны РЛС // Информационно-управляющие системы. 2016. № 1. С. 94-98. DOI: [10.15217/issn1684-8853.2016.1.88](https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2016.1.88)

10. Миронов В.А. Филонович А.В. К вопросу о сверхразрешении стохастических сигналов в радиолокационных системах // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 16. С. 272-281.

11. Ступин Д.Д., Перлов А.Ю., Маврин А.В. Исследование и испытания передающих комплексов АФАР для обеспечения тактико-технических характеристик РЛС // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 3 (197). С. 143-155. DOI: [10.23683/2311-3103-2018-3-143-155](https://doi.org/10.23683/2311-3103-2018-3-143-155)

12. Зюзин А.В., Гомозов А.В., Гомозов В.И., Батурин Н.Г. Динамическая теория формирования сложных СВЧ-сигналов с высокой скоростью модуляции: Монография. – Ярославль: Изд-во ООО «Торговая фирма НОРД», 2010. – 552 с.

13. Кремер И.Я., Владимиров В.И., Карпухин В.И. Модулирующие (мультипликативные) помехи и прием радиосигналов. – М.: Советское радио, 1972. – 480 с.

14. Захаров А.С., Перлов А.Ю., Разиньков С.Н., Темник Я.А. Алгоритм оперативной калибровки амплитудно-фазового распределения крупноапертурных активных фазированных антенных решеток наземных радиолокационных станций с учетом тепловых процессов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2024. № 29. С. 94-102.
15. Yang S., Cheng W., Wang L., Zhao R., Ning B., Deng Q. Thermal Design of Active Phased Array Antenna for GEO Communication Satellite Based on Structure and Thermal Control Integration Method // Proceedings of the Eighth Asia International Symposium on Mechatronics. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2022, vol. 885, Springer, Singapore. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-19-1309-9_145
16. Nikolaenko Yu.E., Baranyuk A.V., Reva S.A., Pis'mennyi E.N., Dubrovka F.F. Numerical simulation of the thermal and hydraulic characteristics of the liquid heat exchanger of the APAA transmitter–receiver module // Thermal Science and Engineering Progress, 2020, vol. 17, pp. 100499. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100499>
17. Rabideau D.J., Galejs R.J., Willwerth F.G., McQueen D.S. An S-band digital array radar testbed // IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Boston, MA, USA, 2003, pp. 113-118. DOI: [10.1109/PAST.2003.1256966](https://doi.org/10.1109/PAST.2003.1256966)
18. Chae S.C., Jo H. W., Oh J.I., Kim G., Yu J.W. Coupler Integrated Microstrip Patch Linear Phased Array for Self-Calibration // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, vol. 19, no. 9, pp. 1615-1619. DOI: [10.1109/lawp.2020.3011862](https://doi.org/10.1109/lawp.2020.3011862)
19. Zakharov A.S., Perlov A.Y., Timoshenko A.V., Sazonov V.V. Model for calculating changes in the radiation pattern and amplitude-phase distribution in the subarray of a large-aperture apaa based on a modified thermal conductivity equation // 2024 Systems of Signals

Generating and Processing in the Field of on Board Communications, IEEE, 2024, pp. 1-4.

DOI: [10.1109/ieeecnf60226.2024.10496770](https://doi.org/10.1109/ieeecnf60226.2024.10496770)

20. Wang Ya., Wang C. Effect of Temperature on Electromagnetic Performance of Active Phased Array Antenna // Electronics, 2020, no. 9, pp. 1211–1214. DOI: [10.3390/electronics9081211](https://doi.org/10.3390/electronics9081211)

21. Xueming J., Manqing W. Jianmei T. Experimental study on a digital T/R module for phased array radar // CIE International Conference on Radar Proceedings, 2001, pp. 898–902. DOI: [10.1109/ICR.2001.984856](https://doi.org/10.1109/ICR.2001.984856)

22. Мисник В.П., Кулешов Ю.П., Полуян А.П. Способ калибровки радиолокационной станции по миниспутнику с эталонным значением эффективной поверхности рассеяния. Патент RU 2 535 661 С1, 20.12.2014.

23. Полуян А.П. Способ калибровки радиолокационной станции с активной фазированной антенной решёткой. Патент RU 2 674 432 С1, 10.12.2018.

24. Орлов Ю.Н., Федоров С.Л. Генерация нестационарных траекторий временного ряда на основе уравнения Фоккера-Планка // Труды Московского физико-технического института. 2016. Т. 8. № 2. С. 126-133.

25. Орлов Ю.Н., Босов А.Д. Кинетико-гидродинамический подход к прогнозированию нестационарных временных рядов на основе уравнения Фоккера–Планка // Труды Московского физико-технического института. 2012. Т. 4. № 4. С. 134-140.

26. Захаров С.М., Митрохин М.А., Климов А.Е. Анализ возможности использования методов прогнозирования временных рядов для адаптации решающих правил средств обнаружения систем безопасности объектов // Известия высших учебных заведений.

Поволжский регион. Технические науки. 2015. № 2 (34). С. 36–44.

27. Кубарев А.В., Лапсарь А.П., Асю.тиков А.А. Синтез модели объекта критической информационной инфраструктуры для безопасного функционирования технической системы в условиях деструктивного информационного воздействия // Вопросы кибербезопасности. 2020. № 6 (40). С. 48-56. DOI: [10.681/2311-3456-2020-06-48-56](https://doi.org/10.681/2311-3456-2020-06-48-56)

28. Markowitz H.M. Mean Variance Analysis in Portfolio Choice and Capital Markets, 1990, Basil, Blackwell, Oxford, UK.

29. Zakharov A.S., Perlov A.Y., Timoshenko A.V., Bulatov M.F., Tyutin I.V. Increasing the accuracy characteristics of the space monitoring system based on intelligent calibration of the APAA radio information system // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 2024, Vyborg, Russia. DOI: [10.1109/synchroinfo61835.2024.10617593](https://doi.org/10.1109/synchroinfo61835.2024.10617593)

30. Манукьян А.А. Построение двумерных радиоизображений объектов по неэквидистантным кодированным частотно-временным последовательностям импульсов // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 3. С. 282. DOI: [10.7868/S0033849414120134](https://doi.org/10.7868/S0033849414120134)

References

1. Porsev V.I., Gelesev A.I., Kras'ko A.G. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz – Antei»*. 2019, no. 4, pp. 24-34. URL: <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2019-4-24-34>

2. Matseevich S.V., Vladko U.A., Zyuzina A.D., Mochalov M.N., Zakharov A.S. *Nauchnaya vizualizatsiya*, 2024, no. 16 (3), pp. 87–96. DOI: [10.26583/sv.16.3.09](https://doi.org/10.26583/sv.16.3.09)

3. Chernikov A.A. *Trudy MAI*, 2023, no. 129. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=173039>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-26](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-26)
4. Dement'ev A.N., Klyuev D.S., Novikov A.N., Mezhnov A.S., Piperskova Yu.A., Zakharova E.V., Dement'ev L.A. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167170>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-25](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-25)
5. Patrakov S.S. *Trudy MAI*, 2024, no. 135. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=179685>
6. Genov A.A., Osipov V.V., Matsykin S.V., Savilkin S.S. *Trudy MAI*, 2024, no. 135. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=179693>
7. Zverev G.P., Timoshenko A.V., Perlov A.Yu. et al. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2024, vol. 24, no. 3, pp. 513-519. DOI: [10.17586/2226-1494-2024-24-3-513-519](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-3-513-519)
8. Kibirnichenko A.G., Kudryashov M.Yu., Khudanov A.A. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, 2015, no. 3 (19), pp. 26-33.
9. Chizhov A.A. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2016, no. 1, pp. 94-98. DOI: [10.15217/issn1684-8853.2016.1.88](https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2016.1.88)
10. Mironov V.A. Filonovich A.V. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*. 2020, no. 16, pp. 272-281.
11. Stupin D.D., Perlov A.Yu., Mavrin A.V. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. 2018, no. 3 (197), pp. 143-155. DOI: [10.23683/2311-3103-2018-3-143-155](https://doi.org/10.23683/2311-3103-2018-3-143-155)
12. Zyuzin A.V., Gomozov A.V., Gomozov V.I., Baturin N.G. *Dinamicheskaya teoriya formirovaniya slozhnykh SVCh-signalov s vysokoi skorost'yu modulyatsii: Monografiya*.

(Dynamic theory of formation of complex microwave signals with high modulation rate: Monograph), Yaroslavl', Izd-vo OOO «Torgovaya firma NORD», 2010, 552 p.

13. Kremer I.Ya., Vladimirov V.I., Karpukhin V.I. *Moduliruyushchie (mul'tiplikativnye) pomekhi i priem radiosignalov* (Modulating (multiplicative) interference and reception of radio signals), Moscow, Sovetskoe radio, 1972, 480 p.

14. Zakharov A.S., Perlov A.Yu., Razin'kov S.N., Temnik Ya.A. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*, 2024, no. 29, pp. 94-102.

15. Yang S., Cheng W., Wang L., Zhao R., Ning B., Deng Q. Thermal Design of Active Phased Array Antenna for GEO Communication Satellite Based on Structure and Thermal Control Integration Method // Proceedings of the Eighth Asia International Symposium on Mechatronics. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2022, vol. 885, Springer, Singapore.

URL: https://doi.org/10.1007/978-981-19-1309-9_145

16. Nikolaenko Yu.E., Baranyuk A.V., Reva S.A., Pis'mennyi E.N., Dubrovka F.F. Numerical simulation of the thermal and hydraulic characteristics of the liquid heat exchanger of the APAA transmitter–receiver module, *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 17, pp. 100499. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100499>

17. Rabideau D.J., Galejs R.J., Willwerth F.G., McQueen D.S. An S-band digital array radar testbed, *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, Boston, MA, USA, 2003, pp. 113-118. DOI: [10.1109/PAST.2003.1256966](https://doi.org/10.1109/PAST.2003.1256966)

18. Chae S.C., Jo H. W., Oh J.I., Kim G., Yu J.W. Coupler Integrated Microstrip Patch Linear Phased Array for Self-Calibration, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, vol. 19, no. 9, pp. 1615-1619. DOI: [10.1109/lawp.2020.3011862](https://doi.org/10.1109/lawp.2020.3011862)

19. Zakharov A.S., Perlov A.Y., Timoshenko A.V., Sazonov V.V. Model for calculating changes in the radiation pattern and amplitude-phase distribution in the subarray of a large-aperture antenna based on a modified thermal conductivity equation, *2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, IEEE, 2024, pp. 1-4. DOI: [10.1109/ieeconf60226.2024.10496770](https://doi.org/10.1109/ieeconf60226.2024.10496770)
20. Wang Ya., Wang C. Effect of Temperature on Electromagnetic Performance of Active Phased Array Antenna, *Electronics*, 2020, no. 9, pp. 1211–1214. DOI: [10.3390/electronics9081211](https://doi.org/10.3390/electronics9081211)
21. Xueming J., Manqing W. Jianmei T. Experimental study on a digital T/R module for phased array radar, *CIE International Conference on Radar Proceedings*, 2001, pp. 898–902. DOI: [10.1109/ICR.2001.984856](https://doi.org/10.1109/ICR.2001.984856)
22. Misnik V.P., Kuleshov Yu.P., Poluyan A.P. *Patent RU 2 535 661 C1*, 20.12.2014.
23. Poluyan A.P. *Patent RU 2 674 432 C1*, 10.12.2018.
24. Orlov Yu.N., Fedorov S.L. *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 126-133.
25. Orlov Yu.N., Bosov A.D. *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta*, 2012, vol. 4, no. 4, pp. 134-140.
26. Zakharov S.M., Mitrokhin M.A., Klimov A.E. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki*. 2015, no. 2 (34), pp. 36–44.
27. Kubarev A.V., Lapsar' A.P., Asyutikov A.A. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2020, no. 6 (40), pp. 48-56. DOI: [10.681/2311-3456-2020-06-48-56](https://doi.org/10.681/2311-3456-2020-06-48-56)
28. Markowitz H.M. *Mean Variance Analysis in Portfolio Choice and Capital Markets*, 1990, Basil, Blackwell, Oxford, UK.

29. Zakharov A.S., Perlov A.Y., Timoshenko A.V., Bulatov M.F., Tyutin I.V. Increasing the accuracy characteristics of the space monitoring system based on intelligent calibration of the APAA radio information system, 2024 *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, 2024, Vyborg, Russia. DOI: [10.1109/synchroinfo61835.2024.10617593](https://doi.org/10.1109/synchroinfo61835.2024.10617593)
30. Manuk'yan A.A. *Radiotekhnika i elektronika*, 2015, vol. 60, no. 3, pp. 282. DOI: [10.7868/S0033849414120134](https://doi.org/10.7868/S0033849414120134)

Статья поступила в редакцию 26.08.2024

Одобрена после рецензирования 09.09.2024

Принята к публикации 25.10.2024

The article was submitted on 26.08.2024; approved after reviewing on 09.09.2024; accepted for publication on 25.10.2024