

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MODELING AND SIMULATION

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-600-609

УДК 621.396.67.01

Обоснование путей построения и оценка эффективности применения пространственно распределенной системы информационных сенсоров для мониторинга обстановки

Алексей Владимирович Зюзин¹, Марина Владимировна Кныш²,
 Сергей Николаевич Разиньков³, Александр Васильевич Тимошенко⁴✉

^{1,2} Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, Ярославль, 150001, Российская Федерация

³ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, 394065, Российская Федерация

⁴ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация

¹ aleksey.zyuzin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8315-0586>

² mariku2713@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2674-9074>

³ razinkovsergey@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3987-0607>

⁴ u567ku78@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-9791-142X>

Аннотация

На основе принципов структурно-информационного анализа обстановки обоснованы пути построения системы пространственно распределенных информационных сенсоров с функциями реконфигурации структуры и изменения состава в соответствии с задачами и условиями мониторинга. С использованием метода неопределенных множителей Лагранжа разработана процедура рационального выбора конфигурации системы сенсоров для контроля заданной зоны пространства. Получены экспериментальные оценки точности определения местоположения объектов в пространственно распределенных системах пассивной радиолокации при использовании в качестве информационных сенсоров азимутально-угломестных пеленгаторов и приемников-измерителей времени прихода сигналов. Выявлены закономерности повышения точности местоопределения объектов за счет выбора числа и позиций информационных сенсоров.

Ключевые слова

мониторинг обстановки, система информационных сенсоров, среднеквадратическая ошибка определения местоположения объекта

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00481

Ссылка для цитирования: Зюзин А.В., Кныш М.В., Разиньков С.Н., Тимошенко А.В. Обоснование путей построения и оценка эффективности применения пространственно распределенной системы информационных сенсоров для мониторинга обстановки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 600–609. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-600-609

Substantiation of construction and evaluation ways of the application efficiency for spatially distributed system of information sensors to provide environment monitoring

Alexey V. Zyuzin¹, Marina V. Knysh², Sergey N. Razinkov³, Alexander V. Tymoshenko⁴✉

^{1,2} Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, 150001, Russian Federation

³ Air Force Education and Research Center “The Zhukovsky - Gagarin Air Force Academy”, Voronezh, 394065, Russian Federation

⁴ Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation

© Зюзин А.В., Кныш М.В., Разиньков С.Н., Тимошенко А.В., 2022

¹ aleksey.zyuzin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8315-0586>

² mariku2713@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2674-9074>

³ razinkovsergey@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3987-0607>

⁴ u567ku78@gmail.com[✉], <https://orcid.org/0000-0002-9791-142X>

Abstract

Based on the principles of structural information analysis of the situation, the ways to build a system of spatially distributed information sensors with functions of reconfiguring the structure and changing the composition in accordance with monitoring tasks and conditions are justified. Using the method of indeterminate Lagrange multipliers, a procedure has been developed for rationally selecting the configuration of a sensor system to achieve stability and reliability of control over a given area of space. Experimental estimates of the determining location accuracy of objects in spatially distributed passive radar systems are obtained when azimuth-angular direction finders and signal detectors are used as information sensors. Regularities of accuracy increase due to selection of number and positions of information sensors are revealed.

Keywords

environment monitoring, information sensor system, standard error of object location determination, recurrence linear filtering of parameters

Acknowledgements

This work is supported by the Russian Science Foundation under grant № 21-19-00481.

For citation: Zyuzin A.V., Knysh M.V., Razinkov S.N., Tymoshenko A.V. Substantiation of construction and evaluation ways of the application efficiency for spatially distributed system of information sensors to provide environment monitoring. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 600–609 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-600-609

Введение

Интенсивное развитие технологий создания объектов, характеризующихся малыми уровнями фоновой контрастности, а также радиоэлектронных средств со структурной и энергетической скрытностью работы [1, 2] определяет потребности совершенствования систем мониторинга [2]. Ввиду возможного нарушения устойчивости процедур обнаружения и распознавания объектов, обусловленного нестабильностью проявления и низкой точностью оценки демаскирующих признаков отдельными информационными сенсорами [3, 4], необходимо наращивать информационные ресурсы мониторинга за счет структурно-информационного анализа обстановки [5, 6].

Суть структурно-информационного анализа обстановки заключается в согласованном применении группы пространственно распределенных информационных сенсоров с общим центром сбора, обработки информации и управления для оценки переменных признаков объектов с целью определения их типа (назначения) и динамических состояний в масштабе времени, близком к реальному [6]. Система мониторинга организуется путем создания каналов информационного взаимодействия с функциями передачи добываемой информации для централизованной обработки и обобщения, а также доведения команд управления информационным сенсором.

На информационные сенсоры возлагаются задачи обнаружения и нахождения количественной меры демаскирующих признаков, содержащихся в параметрах принимаемых сигналов. В системах активной радиолокации демаскирующие признаки объектов выявляются по результатам обработки сигналов, отраженных радиолокационными целями, а в системах пассивной радиолокации — по результатам обнаружения и оценки частотно-временных параметров собственных излучений объектов [7]. На основе комплексной обработки

демаскирующих признаков в разнесенных точках пространства в системах пассивной радиолокации определяется местоположение объектов [8].

Наличие множества информационных сенсоров позволяет изменять состав и выполнять реконфигурацию структуры системы мониторинга за счет активизации сенсоров, которые в текущий момент времени характеризуются наилучшими возможностями выявления демаскирующих признаков [5] объектов в контролируемой зоне.

Комплексная обработка данных, поступающих от различных сенсоров, обуславливает синергетические эффекты прироста эффективности мониторинга обстановки относительно показателей, достижимых при объединении результатов функционирования отдельных информационных сенсоров. В частности, в системах пассивной радиолокации за счет измерения направлений или времени прихода сигналов в разнесенных точках пространства осуществляется оценка местоположения передатчиков [5, 6]. Для определения позиций излучателей по измерениям направлений прихода сигнала требуется применять пространственно распределенные системы с минимальным комплектом из $N = 2$ сенсоров; при оценке координат объектов по измерениям времени прихода сигналов в различных точках пространства необходимо задействовать не менее $N = 3$ сенсоров [8].

Координаты объекта инвариантны к изменениям фоновой контрастности демаскирующих признаков [5, 7]. Они позволяют проводить пространственную селекцию излучателей, что, в свою очередь, обеспечивает снижение ошибок установления принадлежности различных сигналов с перекрывающимися по значениям частотно-временными параметрами отдельным источникам и способствует повышению достоверности распознавания (классификации) объектов.

В настоящей работе определены пути построения пространственно распределенной системы информа-

ционных сенсоров в соответствии с принципами структурно-информационного анализа обстановки [4, 5]. Получены экспериментальные значения среднеквадратических ошибок (СКО) оценивания координат объектов при изменении направлений и времени прихода сигналов в различных точках пространства, и исследованы возможности повышения точности выполняемых изменений в зоне мониторинга за счет выбора числа и позиций информационных сенсоров.

Цель работы — обоснование процедуры рационального выбора конфигурации системы для контроля установленной зоны пространства и распределения информационных сенсоров в соответствии с условиями и задачами мониторинга обстановки.

Обоснование путей построения пространственно распределенной системы мониторинга обстановки

Для полномасштабного и надежного контроля обстановки, достижимого при рациональном размещении информационных сенсоров в пространстве исходя из условий наилучшего использования ресурса, состав и структуру системы мониторинга требуется выбирать в соответствии со следующими положениями.

1. Соответствие системы мониторинга целям и задачам анализа обстановки и оценки динамических состояний контролируемых объектов, что позволит сформировать на базе пространственно распределенных информационных сенсоров единое информационное пространство в зоне ответственности.
2. Открытость системы информационных сенсоров с возможностями наращивания ее состава и изменения местоположения компонентов, привлекаемых для выполнения целевых функций мониторинга в текущий момент времени, согласно требованиям к достоверности, полноте и оперативности анализа обстановки.
3. Реализация многоконтурного процесса добывания и обработки информации с возможностями централизованного управления информационными сенсорами в сочетании с их автономной работой [5, 6].
4. Обеспечение непрерывности процессов добывания и обработки информации для постоянного контроля за состоянием и изменениями обстановки независимо от временных циклов функционирования объектов [4, 5].

Основными факторами, повышающими эффективность мониторинга обстановки с применением пространственно распределенной системы информационных сенсоров являются: высокие вероятностно-временные показатели обнаружения объектов, достижимые вследствие выбора комплекта информационных сенсоров, для которых в текущие моменты времени складываются наиболее благоприятные условия функционирования; малые СКО оценки характеристик демаскирующих признаков объектов, обусловленные рациональным выбором числа и позиций размещения сенсоров из множества обладающих возможностями приема и обработки сигналов; непрерывность наблюдения за объектами ввиду возможностей включения в систему мониторинга новых информационных сен-

соров при малой степени ухудшения качества приема сигналов за счет воздействия непреднамеренных (случайных) помех, к числу которых относятся маскирующие вторичные излучения в радиоканалах с флюктуирующими параметрами [9, 10], промышленные и атмосферные радиопомехи, а также преднамеренных (организованных) помех, специально создаваемых для защиты контролируемых объектов [1, 6].

Рассмотрим систему мониторинга в виде совокупности из N информационных сенсоров, местоположение которых в ортогональной системе координат характеризуется набором векторов $\mathbf{r}_n = [r_n; \theta_n]^T$, где $r_n = |\mathbf{r}_n|$ — расстояние до n -го сенсора относительно центра системы координат; $\theta_n = \arg \mathbf{r}_n$ — угловое положение n -го сенсора относительно опорного направления, $n = 1, \dots, N$; символом « T » обозначена операция транспонирования.

Показателем пространственной избирательности приема, поступающего с направления $\theta = \arg \mathbf{r}$, где $\mathbf{r}$ — вектор координат объекта, информация о котором заключена в сигнале, n -м сенсором, $n = 1, \dots, N$, является функция

$$f_n(\theta - \theta_n) = \exp\left(-\frac{|r - r_n|}{r_n}\right), n = 1, \dots, N;$$

наличие индекса « n » означает, что свойства избирательного приема сигналов зависят от местоположения сенсора.

Для построения пространственно распределенной системы мониторинга в соответствии с принципами структурно-информационного анализа обстановки для каждого информационного сенсора устанавливается динамический коэффициент использования a_n , $n = 1, \dots, N$. Максимальные значения динамических коэффициентов a_n , $n = 1, \dots, N$, при пороговых уровнях принимаемых сигналов, задаваемых чувствительностью аппаратуры мониторинга, определяются дальностью действия информационных сенсоров. В частности, применительно к компонентам системы пассивной радиолокации максимальные значения динамических коэффициентов характеризуют электромагнитную доступность источников радиоизлучений [1, 6] в позициях $\mathbf{r}_n$, $n = 1, \dots, N$; их значения зависят от пространственной структуры канала, электрофизических параметров среды распространения [7, 9, 10] и частоты сигналов.

Граница зоны мониторинга определяется функцией

$$R(\theta) = \sum_{n=1}^N a_n f_n(\theta - \theta_n). \quad (1)$$

За счет изменения набора и значений динамических коэффициентов a_n , $n = 1, \dots, N$, в текущий момент времени в соответствии со складывающейся обстановкой и текущими задачами мониторинга выполняется реконфигурация пространственно распределенной системы. Смещение границы (1) может осуществляться за счет изменения числа N и координат $\mathbf{r}_n$, $n = 1, \dots, N$, сенсоров и, как следствие, функций $f_n(\theta - \theta_n)$, $n = 1, \dots, N$.

Предельно достижимая площадь зоны, в которой осуществляется мониторинг обстановки системой из N информационных сенсоров, расположенных в точках

с координатами $\mathbf{r}_n$, $n = 1, \dots, N$, находится из условия максимизации по множеству коэффициентов a_n , $n = 1, \dots, N$, функции

$$\alpha(\theta) = \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^N a_n C_{np}(\theta) a_p, \quad (2)$$

где

$$C_{np}(\theta) = f_n(\theta - \theta_n) f_p(\theta - \theta_p), \quad n = 1, \dots, N, \quad (3)$$

— функция совместной пространственной избирательности приема сигналов объектов мониторинга n -м и p -м информационными сенсорами, $n, p = 1, \dots, N$.

Функция (2) характеризует условия доступности для приема и обработки сигналов объектов, дислоцируемых в зоне с границей (1), для парных сочетаний из N сенсоров. Применительно к системам пассивной радиолокации при максимизации функции (2) устанавливается область пространства с границей (1), где местоположение объектов определяется с использованием минимального комплекта информационных сенсоров ($N = 2$). В системах активной радиолокации из $N = 2$ сенсоров за счет максимизации функции (2) находится область пространства, в пределах которой мониторинг может проводиться с коллективной идентификацией наблюдений [11].

Для функционирования системы мониторинга в условиях помех, создаваемых M источниками, требуется изменить зону контроля, граница которой задается функцией (1), при максимизации функции (2).

По природе возникновения помехи подразделяются на два класса [1]: непреднамеренные помехи, создаваемые сторонними источниками электромагнитного излучения [2, 10] в результате нарушения электромагнитной совместимости с информационными сенсорами системы мониторинга; преднамеренные помехи, специально организованные для нарушения работы системы мониторинга за счет ухудшения условий приема и обработки сигналов информационными сенсорами и передачи данных о демаскирующих признаках объектов, выявленных отдельными сенсорами, в центр сбора и обработки информации для комплексного анализа [1].

Деструктивное влияние помех на систему мониторинга может проявляться в форме энергетического подавления приемных устройств путем создания на их входах малых отношений сигнал-помеха, исключающих выявление демаскирующих признаков с требуемым качеством, а также навязывание дезинформации за счет имитации ложных источников [1, 6].

Зададим критерий установления границы зоны мониторинга системой уравнений

$$\alpha(\theta_0) \rightarrow \max; \quad (4.1)$$

$$|R(\theta_m)| = \alpha_m, \quad m = 1, \dots, M, \quad (4.2)$$

где θ_0 — направление центральной линии сектора углов наблюдения; α_m — предельно допустимые уровни помех, при которых сохраняется требуемая эффективность мониторинга; θ_m — направления, для которых задаются границы зоны мониторинга с учетом предельно допустимых уровней помех, $m = 1, \dots, M$.

Уравнение (4.1) представляет собой целевую функцию построения системы мониторинга, а уравнение (4.2) — устанавливает внешние системные ограничения на условия выполнения задач мониторинга при наличии помех.

Совместное выполнение условий, задаваемых уравнениями (4.1) и (4.2), может быть достигнуто за счет выбора весовых коэффициентов информационных сенсоров a_n , $n = 1, \dots, N$, с применением метода неопределенных множителей Лагранжа [12].

Конфигурация системы устанавливается путем задания координат N информационных сенсоров $\mathbf{r}_n$, $n = 1, \dots, N$, осуществляющих мониторинг в области пространства с границей (1). Взаимное расположение сенсоров при формировании пространственно распределенной системы находится с использованием критерия (4.1) для зоны мониторинга, определяемой коэффициентами a_n , $n = 1, \dots, N$, в (1). Распределение информационных сенсоров в пространстве в соответствии с задачами и условиями мониторинга заключается в нахождении значений этих коэффициентов, при которых с учетом (2) и (3) для направлений θ_m , $m = 1, \dots, M$, выполняется критерий (4.2).

Граница области мониторинга (1) устанавливается при фиксированном числе и множестве допустимых значений координат $\mathbf{r}_n$, $n = 1, \dots, N$, сенсоров. Потому условная оптимизация системы мониторинга по критерию (4.1) эквивалентна безусловной оптимизации взаимного расположения информационных сенсоров, обеспечивающей наибольшее значение функции (2) в требуемых направлениях.

При этом весовые коэффициенты сенсоров a_n , $n = 1, \dots, N$, удовлетворяющие критерию (4.1), должны обеспечивать минимум функционала

$$\Phi = \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^N a_n S_{np} a_p + \sum_{m=0}^M \tilde{\lambda}_m \sum_{n=1}^N f_n(\theta_m - \theta_n) a_n, \quad (5)$$

где $\tilde{\lambda}_m$ — неизвестные множители Лагранжа, $m = 1, \dots, M$,

$$S_{np} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_{np}(\theta) d\theta, \quad n, p = 1, \dots, N, \quad (6)$$

— усредненное значение функции (3) в круговом секторе обзора, выполняемое для нахождения коэффициентов a_n , $n = 1, \dots, N$, при априорной неопределенности направлений прихода сигналов объектов мониторинга.

Минимизация функционала (5) эквивалентна нахождению минимального абсолютного значения показателя (2), усредненного в секторах углов мониторинга, при условии, что функция (1), определяющая сектор углов, контролируемый системой информационных сенсоров, принимает значения α_m в M направлениях (θ_m, φ_m) , $m = 1, \dots, M$, при неизменном значении функции (6).

Приравняв нулю первую вариацию (5) по переменной a_n , $n = 1, \dots, N$, получим

$$a_n = - \sum_{m=0}^M \tilde{\lambda}_m \sum_{p=1}^N S_{pn}^{-1} f_p(\theta_m - \theta_n), \quad (7)$$

где S_{pn}^{-1} — элементы матрицы, формируемой в результате обращения матрицы с элементами S_{np} , $n, p = 1, \dots, N$.

Подставляя (7) в уравнение системы (4.1), получим систему линейных алгебраических уравнений размером $M \times M$ относительно неопределенных множителей Лагранжа

$$\sum_{q=0}^M \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^N f_p(\theta_m - \theta_n) S_{pn}^{-1} f_n(\theta_q - \theta_n) \tilde{\lambda}_q = -\alpha_m, \quad m = 1, \dots, M \quad (8)$$

В результате подстановки корней $\tilde{\lambda}_m$, $m = 1, \dots, M$, системы линейных алгебраических уравнений (8) в (7) найдем динамические коэффициенты использования информационных сенсоров a_n , $n = 1, \dots, N$, устанавливающие границу зоны мониторинга (1) при выполнении критерия (4.1).

При функционировании пространственно распределенной системы мониторинга с зоной (1) действуют достаточно сложные и противоречивые закономерности, связывающие условия внешней среды, технические характеристики сенсоров, эффективность решения отдельных задач обработки информации, а также результирующую эффективность мониторинга. При изменении характеристик сенсоров меняются факторы, влияющие на эффективность решения частных информационных задач и отдельных этапов обработки информации в положительном и отрицательном планах. В результате повышения чувствительности аппаратуры мониторинга, с одной стороны, улучшается энергетическая доступность объектов, а с другой — возрастает число источников непреднамеренных помех, воздействующих на информационные сенсоры [6]. Указанные факторы одновременно способствуют возрастанию вероятностно-временных показателей обнаружения

отдельных объектов и увеличению времени обработки потоков информации [4, 13] или снижению эффективности разделения и идентификации сигналов различных источников [10, 11].

Для системы из N информационных сенсоров, расположенных равномерно на окружности радиуса r_0 при угловом расстоянии друг от друга $2\pi/N$, осуществляется одновременный круговой обзор пространства в плоскости азимута с использованием изотропных антенн. При определении границы зоны мониторинга в уравнениях (1), (3), (5), (8) используются функции $f_n(\theta - \theta_n) \equiv f_n(\theta)$, $n = 1, \dots, N$.

На рисунке, *a* представлены нормированные на максимальные значения $R_{\max} = \max_{\theta \in [0; 2\pi]} R(\theta)$ угловые распределения зон, контролируемых системами мониторинга из $N = 5$ и $N = 15$ информационных сенсоров. Направление центральной линии сектора углов наблюдения $\varphi_0 = 90^\circ$. Значения $\tilde{R}_0$ и a_n , $n = 1, \dots, N$, выбраны таким образом, чтобы сигналы объектов, расположенных в зоне с границей (1), были энергетически доступны для приема каждым сенсором. При этом расстояние $R_{\max}$ для каждой системы изменяется пропорционально соотношению между числом применяемых сенсоров в степени, примерно равной 0,5.

На рисунке, *b* приведены нормированные угловые распределения областей пространства, обслуживаемых системами мониторинга при ограничении относительной дальности действия в $M = 2$ направлениях до $\alpha_m = 0,1$, $m = 1, 2$. Для системы из $N = 5$ сенсоров заданы направления $\theta_1 = 13^\circ$ и $\theta_2 = 167^\circ$; рабочая зона системы мониторинга из $N = 15$ сенсоров ограничена путем установления значений $\alpha_m = 0,1$, $m = 1, 2$, при $\theta_1 = 30^\circ$ и $\theta_2 = 150^\circ$.

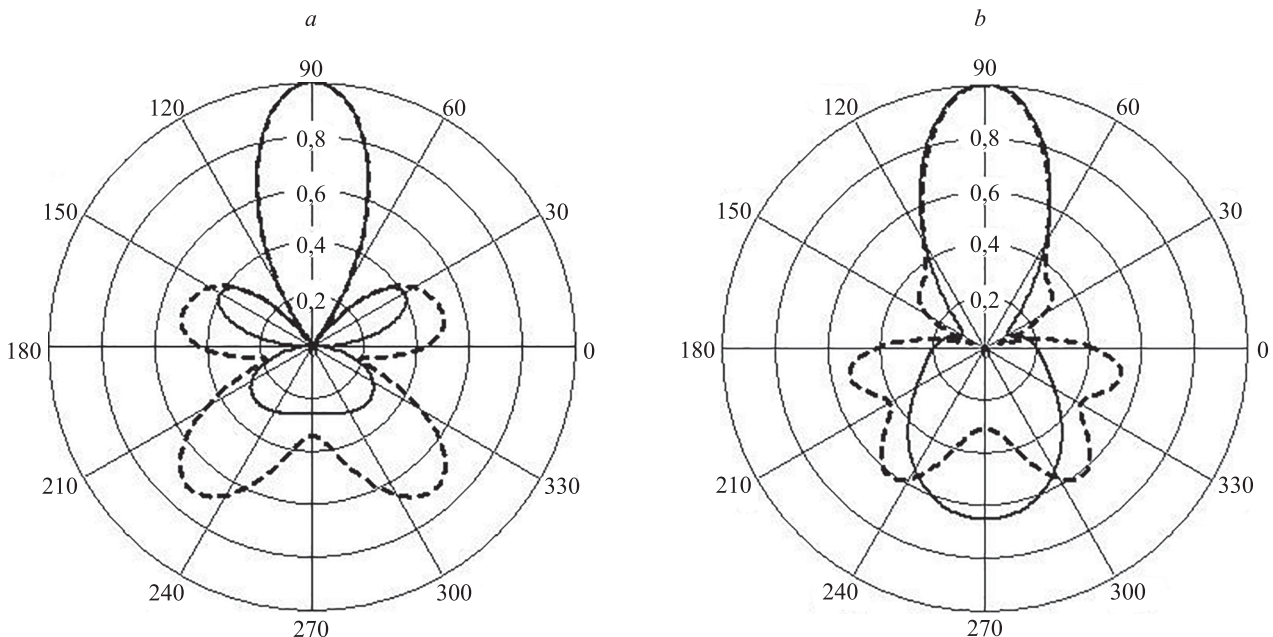


Рисунок. Нормированные области, контролируемые системами из $N = 5$ (пунктирная линия) и $N = 15$ (сплошная линия) информационных сенсоров без ограничений (*a*), и при установлении ограничений на дальность действия в $M = 2$ направлениях (*b*)

Figure. Normalized areas controlled by systems of $N = 5$ (dashed line) and $N = 15$ (solid line) information sensors without restrictions (*a*) and when setting range limits in $M = 2$ directions (*b*)

Из сравнения зависимостей, приведенных на рисунке, следует, что ограничения α_m , $m = 1, 2$, обуславливают возрастание сектора обзора пространства системой из $N = 15$ сенсоров в 1,1 раза при уменьшении дальности действия в направлении $\theta_0 = 90^\circ$ на 15 %. В секторе углов $\theta \in [180^\circ, 360^\circ]$ появляются области энергетической доступности объектов, удаленных от центра системы на расстояние, не превышающее $0,65R_{\max}$. В системе из $N = 5$ сенсоров сектор обзора пространства в направлении $\theta_0 = 90^\circ$ увеличивается в 1,15 раза при аналогичном сокращении дальности действия; расстояние, на котором контролируются объекты в секторе углов $\theta \in [180^\circ, 360^\circ]$, увеличивается в 1,52 раза.

В целом за счет реконфигурации системы для исключения направлений на источники помех, нарушающих работу информационных сенсоров, зона ответственности системы мониторинга сужается. Ширина секторного провала функции (1) зависит от числа и плотности размещения информационных сенсоров, количества, угловых координат источников и уровней помех. Для сохранения формы функции (1) требуется минимизировать ее уровни в направлениях, отличных от положений локальных максимумов.

Расширение сектора мониторинга возможно за счет реконфигурации системы с изменением местоположения сенсоров $\mathbf{r}_n$, $n = 1, \dots, N$, а также увеличения числа информационных сенсоров. Как показано в [14], наибольшая площадь покрытия зоны мониторинга при ограниченном числе информационных сенсоров ($N \geq 5$) достигается за счет их размещения по сотовому принципу – в вершинах равностороннего пятиугольника, центр которого совпадает с центром контролируемой области. При этом СКО оценки местоположения источника радиоизлучения триангуляционным способом возрастает пропорционально дальности до объекта во второй степени и убывает по мере увеличения расстояния между информационными сенсорами. В разностно-дальномерной системе местоопределение точности оценки координат целей снижается по мере увеличения отношения дальности к расстоянию между сенсорами во второй степени [8].

Оценка эффективности применения пространственно распределенной системы информационных сенсоров для мониторинга обстановки

Эффективность применения пространственно распределенных информационных сенсоров по сравнению с однопозиционными средствами [1, 6] обусловлена расширением возможностей мониторинга за счет получения новых признаков объектов при комплексной обработке данных от различных источников. Комплект пассивных информационных сенсоров, охваченных единым контуром управления с каналами передачи информации для централизованной обработки, обладает функциями определения координат источников сигналов.

Для количественной оценки эффективности мониторинга обстановки найдены экспериментальные значения СКО определения местоположения источников

излучений в диапазоне коротких волн пространственно распределенными системами, в которых информационными сенсорами выступали: азимутально-угломестные пеленгаторы, осуществляющие синхронные измерения направлений прихода сигналов в $N = 2$ точках пространства по командам управления с центра сбора и обработки информации; приемники-измерители времени прихода сигналов, расположенные в $N = 5-6$ позициях и программно-управляемые по каналам информационно-телекоммуникационной сети [15].

Местоположение объектов при синхронном пеленговании оценивалось триангуляционным (угломерным) способом и охарактеризованы координатами точек пересечения лучей в направлениях прихода сигналов в позиции приема [8]. По измеренному времени прихода сигналов с помощью пространственно разнесенными приемниками оценивались их задержки в различных точках пространства. В соответствии с разностно-дальномерным способом [8] построены линии положений объектов относительно позиций приемников и вычислены координаты путем нахождения точки пересечения этих линий.

В триангуляционной системе местоопределения применены азимутально-угломестные пеленгаторы с кольцевыми решетками из 16 несимметричных вертикальных активных вибраторов высотой 2,5 м. За счет калибровки антенно-фидерных трактов при настройке на частоту пеленгуемого сигнала и синхронизации радиоприемных устройств при когерентном приеме фазовая неидентичность каналов пеленгаторов не превышала 3° , амплитудная неидентичность составила не более 2 %; при этом инструментальная погрешность измерения угловых координат получена в пределах $0^\circ 30' 0''$ [10].

При проведении измерений в летний период пеленгаторы были размещены в районах с географическими координатами $51^\circ 36' 57,9''$ с.ш. $39^\circ 06' 43''$ в.д. и $60^\circ 24' 57''$ с.ш. $30^\circ 28' 45''$ в.д. на удалении 1000 км; в осенне-зимний период измерения проведены при размещении пеленгаторов в районах с координатами $51^\circ 36' 57,9''$ с.ш. $39^\circ 06' 43''$ в.д. и $47^\circ 14' 24''$ с.ш. $39^\circ 42' 36''$ в.д. при базе угломерной системы 500 км. Геометрические факторы угломерных систем, выбранные из условия достижения наименьшей СКО оценок координат излучателей [8] в зоне мониторинга с границей (1), удовлетворяющей критерию (4.1), характеризовались максимальным значением угла прихода сигналов в азимутальной плоскости 30° и удалением их источников от центра базы от 200 км до 6500 км.

В табл. 1 приведены СКО определения местоположения радиостанций метеоинформации аэродромных сетей в летний период. На радиостанциях использованы сигналы с амплитудной модуляцией и программной перестройкой рабочей частоты. Выбор указанных источников радиоизлучений обусловлен возможностями селекции сигналов на совпадающих частотах в соответствии с временным регламентом работы, что позволяет корректно оценивать СКО выполняемых измерений координат.

Из анализа результатов табл. 1 следует, что точность выполняемых измерений зависит не только от частоты сигнала, но и геометрического фактора угломерной

Таблица 1. Точность определения местоположения объектов в летний период

Table 1. Accuracy of objects location in summer period

Номер объекта	Географические координаты объекта	Удаление объекта от центра базы угломерной системы, км	Диапазон рабочих частот объекта, кГц	СКО оценки координат объекта (% от дальности)
1.1	51°32'00" с.ш. 46°00'00" в.д.	500	1500–4500 4500–18000 18000–30000	65,1 51,7 44,9
1.2	54°43'00" с.ш. 20°30'00" в.д.	1000	1500–4500 4500–18000 18000–30000	24,5 2,9 2,4
1.3	56°76'07" с.ш. 60°52'27" в.д.	1600	1500–4500 4500–18000 18000–30000	37,2 3,3 2,2
1.4	55°01'00" с.ш. 82°13'00" в.д.	2900	1500–4500 4500–18000 18000–30000	14,5 5,3 4,6
1.5	51°49'26" с.ш. 107°36'27" в.д.	4700	1500–4500 4500–18000 18000–30000	14,2 5,2 4,6
1.6	48°29'00" с.ш. 135°04'00" в.д.	6500	1500–4500 4500–18000 18000–30000	* 6,7 —

Примечание. «*» — условия распространения сигналов в диапазоне частот не позволяют осуществлять их прием в точках размещения пеленгаторов; «—» — оценки местоположения объектов выполняются с аномальными ошибками, обусловленными пространственно-коррелированными помехами сторонних источников и не устранимыми при выборе конфигурации зоны по критерию (4.1).

системы — от местоположения объекта в зоне мониторинга. При исследовании закономерностей изменения СКО для различного пространственного положения учтем, что зависимости динамических коэффициентов использования сенсоров a_n , $n = 1, \dots, N$, от частоты сигналов, изменяют границы зоны мониторинга в частичных участках диапазона частот. По мере приближения к границе (1) геометрический фактор угломерной системы [8] снижается, что влечет за собой пропорциональное возрастание погрешностей определения местоположения объектов.

Существенные СКО оценок координат объекта № 1.1 связаны с незначительным удалением от центра базы угломерной системы. Углы прихода сигналов к пеленгаторам малы, и геометрический фактор угломерной системы, обратно пропорциональный их значениям [8], даже в направлении нормали к базе пеленгования достаточно велик [10, 16].

Погрешность оценивания координат объекта № 1.2 в диапазоне частот от 1500 до 4500 кГц, составляющая 24,5 % от дальности, превышает значения, достижимые в диапазонах частот от 4500 до 18000 кГц и от 18000 до 30000 кГц в 8,45 раза и 10,2 раза соответственно. Показатели точности определения координат объекта № 1.3 в указанных диапазонах частот различаются в 11,3 раза и 16,9 раза. При различии удалений объектов № 1.2 и № 1.3 от центра базы угломерной системы в 1,6 раза СКО их местоопределения в диапазоне частот от 1500 до 4500 кГц различаются в 1,52 раза, а в диапазонах более высоких частот измерения выполняются практически с одинаковой точностью. Координаты

источников радиоизлучений № 1.4 и № 1.5, расположенные на дальностях, различающихся в 1,62 раза, определяются практически с одинаковыми СКО. Погрешность оценки местоположения объекта № 1.6 в диапазоне частот от 4500 до 18000 кГц составляет 7,5 % от дальности и превосходит значения, полученные для источников № 1.4 и № 1.5, в 1,26 и 1,28 раза вследствие смещения направления прихода сигнала в азимутальной плоскости к максимально допустимому значению. При поступлении сигналов под близкими по значениям углами, не превышающими 30°, СКО оценок координат объектов, как показано в [8], возрастает пропорционально отношению дальности до них во второй степени к базе угломерной системы.

В угломерной системе с базой 1000 км на дальности от 1000 до 1500 км определение местоположения источников радиоизлучений в диапазоне частот 1500–4500 кГц выполняется с СКО, превышающей погрешность, характерную для диапазона частот от 18000 до 30000 кГц, в 10,2–16,2 раза. На дальностях от 3000 до 4700 км различие СКО выполняемых измерений составляет 3,1 раза. В диапазоне частот от 18000 до 30000 кГц погрешность оценки координат объектов возрастает в 1,55 раза относительно значений, полученных в диапазоне частот от 4500 до 18000 кГц [10].

В табл. 2 приведены СКО оценок местоположения источников сигналов радиостанций метеоинформации аэродромных сетей с амплитудной модуляцией и программной перестройкой рабочей частоты в осенне-зимний период.

Таблица 2. Точность определения местоположения объектов в осенне-зимний период

Table 2. Accuracy of objects location in autumn-winter period

Номер объекта	Географические координаты объекта	Удаление объекта от центра базы угломерной системы, км	Диапазон рабочих частот объекта, кГц	СКО оценки координат объекта (% от дальности)
2.1	51°32'00" с.ш. 46°00'00" в.д.	500	1500–4500 4500–18000 18000–30000	12,7 5,5 4,2
2.2	53°12'00" с.ш. 45°00'00" в.д.	600	1500–4500 4500–18000 18000–30000	— 2,8 *
2.3	53°12'00" с.ш. 50°06'00" в.д.	800	1500–4500 4500–18000 18000–30000	— 3,8 *
2.4	51°46'00" с.ш. 55°06'00" в.д.	1400	1500–4500 4500–18000 18000–30000	* 4,3 *
2.5	56°76'07" с.ш. 60°52'27" в.д.	1700	1500–4500 4500–18000 18000–30000	* 7,5 *

Примечание. «*» — условия распространения сигналов в диапазоне частот не позволяют осуществлять их прием в точках размещения пеленгаторов; «—» — оценки местоположения объектов выполняются с аномальными ошибками, обусловленными пространственно-коррелированными помехами сторонних источников и не устраняемыми при выборе конфигурации зоны по критерию (4.1).

Как следует из табл. 2, в угломерной системе с базой 500 км СКО оценки координат объектов на расстоянии до 500 км в диапазонах частот от 1500 до 4500 кГц и от 4500 до 18000 кГц различаются в 2,3 раза; в диапазоне частот от 18000 до 30000 кГц погрешность местоопределения возрастает в 1,55 раза [10].

Программно-управляемые измерители времени прихода сигналов представляют собой диапазонные приемные устройства с программным обеспечением, позволяющим осуществлять многопользовательское управление трансиверами и ресиверами с помощью удаленных компьютеров, подключенных к информационно-телекоммуникационной сети, например, через сервер WebSDR [15].

В процессе мониторинга обстановки дистанционная регулировка параметров приемников, обладающих однозначно идентифицируемыми адресами IP — Internet Protocol, осуществлялась по протоколу TCP/IP — Transmission Control Protocol/Internet Protocol. Синхронизация измерений в системе мониторинга выполнена на основе установления точного времени ответа удаленного сервера. Время задержки сигнала каждого приемника-измерителя в сети определено по результатам зондирования удаленного IP-адреса специальным «эхо-сигналом», представляющим собой пакет ICMP — Internet Control Message Protocol. При этом учтены ошибки синхронизации, зависящие от маршрута прохождения пакета ICMP, что имеет значение для обработки результатов многократных измерений координат объектов.

Для анализа частотно-временных параметров сигналов, принимаемых каждым информационным сенсором, и их обработки в интересах оценки координат

объектов в системе мониторинга применены программные пакеты типа LabVIEW, MATLAB/Simulink и GNU RADIO.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что оценка местоположения источника сигналов диапазона от 4500 до 18000 кГц с географическими координатами 52°31'00" с.ш. 2°42'00" з.д. при использовании комплекта из $N = 6$ приемников, размещенных на дальностях до 1000 км, может быть выполнена с СКО, лежащей в пределах 12–25,1 км. Погрешности местоопределения излучателей с географическими координатами 39°09'00" с.ш. 116°04'00" в.д. и 39°54'00" с.ш. 116°24'00" в.д. системой из $N = 5$ измерителей времени прихода сигналов, находящихся на удалении 1500–6000 км, составляют 104,1–143,9 км и 101,3–153 км. При увеличении числа измерительных приемников до $N = 6$ СКО оценок координат этих объектов снижаются до 88,9 км и 92,8 км.

Различие СКО оценок координат источников радиолучений обусловлено изменением удалений приемников и плотности их размещения в зонах мониторинга. За счет изменения числа и местоположения приемников-измерителей выполнена реконфигурация системы мониторинга, при которой уменьшены флуктуации лучевых траекторий и замираний (фединги) сигналов. В результате получена устойчивость приема сигналов и достижение высоких отношений сигнал-шум при их обработке [10].

При близких по значениям показателей точности измерения времени прихода сигналов в пункты приема СКО оценки местоположения объектов изменены пропорционально удалению от центра измерительной базы [8].

Управление компонентами пространственно распределенной системы мониторинга можно осуществлять с применением алгоритмов структурной и параметрической адаптации и рекуррентной линейной фильтрации результатов измерений параметров сигналов, исходя из требований к эффективности выполнения задач мониторинга обстановки при выбранном местоположении информационных сенсоров.

Заключение

На основе принципов структурно-информационного анализа обстановки обоснованы пути построения и получены оценки эффективности применения системы пространственно распределенных информационных сенсоров с функциями реконфигурации структуры и изменения состава в соответствии с задачами и условиями мониторинга. С использованием метода неопределенных множителей Лагранжа разработана процедура рационального выбора конфигурации системы сенсоров для контроля заданной зоны пространства. Построение системы мониторинга с охватом заданной зоны заключается в безусловной оптимизации взаимного расположения информационных сенсоров. Выбранные позиции для размещения сенсоров должны обеспечить за счет установления динамических коэф-

фициентов использования наибольшие значения функции, характеризующей совместную пространственную избирательность приема сигналов контролируемых объектов группами из двух сенсоров.

Получены экспериментальные оценки точности определения местоположения объектов в пространственно распределенных системах пассивной радиолокации, функционирующих в диапазоне коротких волн. В эксперименте использованы в качестве информационных сенсоров азимутально-угловые пеленгаторы для синхронных измерений направлений прихода сигналов в $N = 2$ точках пространства, и приемники-измерители времени прихода сигналов, установленные в $N = 5-6$ точках пространства и программно-управляемые с помощью информационно-телекоммуникационной сети.

Выявлены закономерности снижения среднеквадратических ошибок оценок местоположения объектов за счет выбора числа и позиций информационных сенсоров для обеспечения устойчивости приема сигналов и прироста точности оценивания направления и времени их прихода в различные точки пространства вследствие малых энергетических потерь на трассах распространения.

Литература

1. Куприянов А.И., Сахаров А.В. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы: учебное пособие. М.: Вузовская книга, 2007. 356 с.
2. Kostylev V.I., Slichenko M.P. Energy detection of partially polarized radio signals against the background of gaussian noise // *Radio-Physics and Quantum Electronics*. 2011. V. 53. N 12. P. 721–731. <https://doi.org/10.1007/s11141-011-9265-9>
3. Trifonov A.P., Korchagin Y.E., Chernoyarov O.V., Shakhtarin B.I. Detection of radio signals that appear and disappear at unknown moments // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2015. V. 60. N 4. P. 375–385. <https://doi.org/10.1134/S1064226915040130>
4. Kochkarov A.A., Razin'kov S.N., Timoshenko A.V., Shevtsov V.A. Comprehensive method of information resources control ensuring the security of telecommunication systems of aviation monitoring complexes // *Russian Aeronautics*. 2020. V. 63. N 2. P. 347–356. <https://doi.org/10.3103/s1068799820020233>
5. Меньшаков Ю.К. Теоретические основы технических разведок: учебное пособие. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2008. 536 с.
6. Радзиевский В.Г., Сирота А.А. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. М.: Радиотехника, 2004. 432 с.
7. Pieraccini M., Miccinesi L., Rojhani N. RCS Measurements and ISAR images of small UAVs // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2017. V. 32. N 9. P. 28–32. <https://doi.org/10.1109/MAES.2017.160167>
8. Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / под ред. В.В. Цветнова. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
9. White W.D. Low-angle radar tracking in the presence of multipath // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1974. V. AES-10. N 6. P. 835–852. <https://doi.org/10.1109/TAES.1974.307892>
10. Razinkov S.N., Reshetnyak E.A., Zhidko E.A. Measurement of the coordinates of radio emission at high frequencies by goniometric and goniometric-range finding methods // *Measurement Techniques*. 2020. V. 62. N 12. P. 1056–1063. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01734-y>
11. Гуров Г.Б., Поздышев В.Ю., Тимошенко А.В., Разинькова О.Э. Идентификация маневрирующих объектов при структурно-си-

References

1. Kupriianov A.I., Sakharov A.V. *Theoretical Background of the Radioelectronic Warfare*. Tutorial. Moscow, Vuzovskaja kniga Publ., 2007, 356 p. (in Russian)
2. Kostylev V.I., Slichenko M.P. Energy detection of partially polarized radio signals against the background of gaussian noise. *Radio-Physics and Quantum Electronics*, 2011, vol. 53, no. 12, pp. 721–731. <https://doi.org/10.1007/s11141-011-9265-9>
3. Trifonov A.P., Korchagin Y.E., Chernoyarov O.V., Shakhtarin B.I. Detection of radio signals that appear and disappear at unknown moments. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2015, vol. 60, no. 4, pp. 375–385. <https://doi.org/10.1134/S1064226915040130>
4. Kochkarov A.A., Razin'kov S.N., Timoshenko A.V., Shevtsov V.A. Comprehensive method of information resources control ensuring the security of telecommunication systems of aviation monitoring complexes. *Russian Aeronautics*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 347–356. <https://doi.org/10.3103/s1068799820020233>
5. Menshakov Yu.K. *Theoretical Background of the Technical Reconnaissance*. Tutorial. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2008, 536 p. (in Russian)
6. Radzievskii V.G., Sirota A.A. *Theoretical Background of the Electronic Reconnaissance*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004, 432 p. (in Russian)
7. Pieraccini M., Miccinesi L., Rojhani N. RCS Measurements and ISAR images of small UAVs. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2017, vol. 32, no. 9, pp. 28–32. <https://doi.org/10.1109/MAES.2017.160167>
8. Kondratev V.S., Kotov A.F., Markov L.N. *Multi-Position Radio Engineering Systems*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986, 264 p. (in Russian)
9. White W.D. Low-angle radar tracking in the presence of multipath. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1974, vol. AES-10, no. 6, pp. 835–852. <https://doi.org/10.1109/TAES.1974.307892>
10. Razinkov S.N., Reshetnyak E.A., Zhidko E.A. Measurement of the coordinates of radio emission at high frequencies by goniometric and goniometric-range finding methods. *Measurement Techniques*, 2020, vol. 62, no. 12, pp. 1056–1063. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01734-y>

- стемном контроле воздушного пространства // Вычислительные технологии. 2021. Т. 26. № 4. С. 16–26. <https://doi.org/10.25743/ICT.2021.26.4.003>
12. Бахтин В.И., Иваниско И.А., Лебедев А.В., Пиндрик О.И. Метод множителей Лагранжа. Минск: БГУ, 2012. 40 с.
 13. Barton D.K. Modern Radar System Analysis. Norwood, Mass.: Artech House, 1988. 388 p.
 14. Агафонов Л.К. Элементы математического описания структуры сотовых систем подвижной радиосвязи // Средства связи. 1991. № 2. С. 28–32.
 15. Львов А.В., Мителкова А.Д., Кабаев Д.В., Стародубровский А.С. Разработка и прототипирование радиоэлектронных устройств по технологии SDR с использованием системы GNU RADIO // Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» Т. 2. Воронеж: ВГУ, 2018. С. 228–234.
 16. Zhidko E.A., Razin'kov S.N. Methods for determining the angular coordinates and locations of radio sources in unmanned monitoring systems and experimental estimates of the accuracy of these parameters // Measurement Techniques. 2020. V. 62. N 10. P. 893–899. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01710-6>
 11. Gurov G.B., Pozdyshev V.Y., Timoshenko A.V., Razinkova O.E. Identification of maneuvering objects during structural and system control of airspace. *Journal of Computational Technologies*, 2021, vol. 26, no. 4, pp. 16–26. (in Russian). <https://doi.org/10.25743/ICT.2021.26.4.003>
 12. Bakhtin V.I., Ivanishko I.A., Lebedev A.V., Pindrik O.I. *Method of the Lagrange Multipliers*. Minsk, BSU, 2012, 40 p. (in Russian)
 13. Barton D.K. Modern Radar System Analysis. Norwood, Mass., Artech House, 1988, 388 p.
 14. Agafonov L.K. Elements of the Mathematical Description of the Cellular Systems Structures for Mobile Radio Communications. *Sredstva svyazi*, 1991, no. 2, pp. 28–32. (in Russian)
 15. Lvov A.V., Mitelkova A.D., Kabaev D.V., Starodubrovsky A.S. Development and prototyping of SDR radio systems using the GNU RADIO toolkit. *Proc. of the XXIV International Conference "Radar Ranging, Navigation, and Communications"*. Vol. 2. Voronezh, Voronezh State University, 2018, pp. 228–234. (in Russian)
 16. Zhidko E.A., Razin'kov S.N. Methods for determining the angular coordinates and locations of radio sources in unmanned monitoring systems and experimental estimates of the accuracy of these parameters. *Measurement Techniques*, 2020, vol. 62, no. 10, pp. 893–899. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01710-6>

Авторы

Зюзин Алексей Владимирович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, Ярославль, 150001, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-8315-0586>, aleksey.zyuzin@mail.ru

Кныш Марина Владимировна — кандидат физико-математических наук, доцент, Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, Ярославль, 150001, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-2674-9074>, mariku2713@mail.ru

Разиньков Сергей Николаевич — доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, 394065, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3987-0607>, razinkovsergey@rambler.ru

Тимошенко Александр Васильевич — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-9791-142X>, u567ku78@gmail.com

Authors

Alexey V. Zyuzin — D. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department, Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, 150001, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8315-0586>, zyuzin@mail.ru

Marina V. Knysh — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, 150001, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2674-9074>, mariku2713@mail.ru

Sergey N. Razinkov — D. Sc. (Physics & Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher, Air Force Education and Research Center “The Zhukovsky — Gagarin Air Force Academy”, Voronezh, 394065, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3987-0607>, razinkovsergey@rambler.ru

Alexander V. Tymoshenko — D. Sc. (Eng.), Professor, Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9791-142X>, u567ku78@gmail.com

Статья поступила в редакцию 21.12.2021
Одобрена после рецензирования 05.04.2022
Принята к печати 19.05.2022

Received 21.12.2021
Approved after reviewing 05.04.2022
Accepted 19.05.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»