

УДК 623.09

doi: 10.53816/23061456_2024_11–12_14

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СРЕДНЕ-ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА
ВАРИАНТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ
МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА
В НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВАХ**

**APPLICATION OF THE METHOD OF MEAN-DISPERSION ANALYSIS
OF OPTIONS FOR UPGRADING A SPACE MONITORING RADAR STATION
IN FUZZY SETS**

Д-р техн. наук А.В. Тимошенко¹, А.С. Захаров², канд. техн. наук Н.А. Ходатаев², И.А. Байкалов³

D.Sc. A.V. Timoshenko, A.S. Zakharov, Ph.D. N.A. Khodataev, I.A. Baykalov

*¹Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,
²НПО дальней радиолокации, ³Высшая школа системного инжиниринга МФТИ*

Современные требования к существующим радиолокационным станциям мониторинга космического пространства (РЛС МКП) в части реализации режима высокоточного сопровождения малозаметных техногенных космических объектов обуславливают необходимость проведения крайне сложных и дорогостоящих работ по модернизации. В статье представлена гипотеза о возможности снижения рисков неоптимального выбора технических решений при модернизации РЛС МКП барьерного обзора для реализации режимов с повышенной разрешающей способностью при безусловном выполнении штатных задач. В основе гипотезы лежит выбор новых технических решений из множества возможных вариантов, который осуществляется по результатам средне-дисперсионного анализа. При этом вся совокупность возможных вариантов модернизации формируется путем преобразования параметров стоимости и времени модернизации в нечеткие множества с последующей оценкой функционала риска неоптимального выбора.

Ключевые слова: проектирование, системный инжиниринг, мониторинг космического пространства, нечеткая логика.

Modern requirements for existing space monitoring radars (SM radars) in terms of implementing a high-precision tracking mode for low-visibility man-made space objects necessitate extremely complex and expensive modernization work. The article presents a hypothesis about the possibility of reducing the risks of suboptimal choice of technical solutions during the modernization of the barrier survey radar for the implementation of modes with increased resolution while unconditionally performing routine tasks. The hypothesis is based on the choice of new technical solutions from a variety of possible options, which is carried out according to the results of the mean-variance analysis. At the same time, the entire set of possible modernization options is formed by converting the cost and time parameters of modernization into fuzzy sets, followed by an assessment of the risk functional of a suboptimal choice.

Keywords: design, system engineering, space monitoring, fuzzy logic.

Введение

С ростом скорости и маневренности космических объектов (КО), а также с увеличением вероятности столкновений космических объектов существенно возрастает необходимость своевременного и эффективного совершенствования функциональных характеристик радиолокационных систем мониторинга космического пространства (РЛС МКП) [1], в том числе из-за появления малозаметных (размером от 7 см на высоте 1700 км) и маневрирующих техногенных космических объектов (ТКО), представляющих опасность для космических аппаратов различного назначения. При этом сложность обнаружения и сопровождения таких объектов существенно возрастает из-за необходимости одновременного сопровождения не менее 100 ТКО.

Указанное обстоятельство требует проведения комплекса работ по модернизации РЛС МКП с целью повышения таких функциональных характеристик, как поиск, обнаружение, сопровождение и выдача высокоточной информации о ТКО в единый каталог космических объектов [2, 3], что достигается за счет расширения диаграммы направленности (ДН) на излучение в режиме барьерного обзора, разработки новых аппаратно-программных решений для зондирования группы ТКО одним импульсом с расширенной ДН на излучение, а также формирования субимпульсов на разных угловых направлениях, в том числе с дискретно кодированными по частоте (ДКЧ) сигналами, которые синтезируются в блоке формирования зондирующих сигналов (БФЗС).

При этом сложность выполнения указанных работ в интересах повышения точностных характеристик сопровождения малоразмерных и маневрирующих ТКО возрастает из-за необходимости постоянной оценки риска невыполнения требований как в штатном (барьерном) режиме, так и в новом режиме высокоточных измерений координат космического объекта по следующим критериям: реализуемость — стоимость — время разработки новых компонент РЛС МКП.

Применение методов системного инжиниринга, которые заключаются в комплексном анализе связей между компонентами и подсистемами

для обеспечения общей функциональности и производительности [4–6], позволяет как корректно формализовать собственно процесс выбора лучшего варианта модернизации, так и оперативно управлять процессом модернизации от этапа концептуального проектирования до проведения испытаний.

Существующие методы [7–9] разработки РЛС МКП, как правило, основаны на использовании универсального показателя эффективности создания РЛС — в общем случае применяются показатель риска, под которым понимается вероятностная мера отклонения характеристик создаваемой РЛС от требуемых заказчиком значений, учитывающая как текущие характеристики производственного процесса создания РЛС, прежде всего его технологическую готовность, так и финансовые и временные ограничения при создании РЛС [7–10]. Однако такой подход не учитывает множества равнозначных вариантов модернизации. Для минимизации риска необходимо проанализировать всевозможные варианты для выбора лучшего набора компонент, из которых необходимо выбрать наилучший.

Потенциально высокой эффективностью обладает метод средне-дисперсионного анализа, заключающийся в расчете меры взаимосвязи дисперсий разных величин и дальнейшей минимизации данной меры. Средне-дисперсионный анализ применяется для величин одной размерности, в нашем же случае необходимо учитывать срок и время модернизации, а также требуемое повышение характеристик после модернизации.

Таким образом, необходимо разработать метод, который бы позволил формализовать процесс выбора оптимального варианта модернизации РЛС МКП из множества вариантов при ограничениях на стоимость, время модернизации и технические характеристики. Оптимизационная задача выглядит следующим образом:

$$M: \lim_{\substack{T \rightarrow T_{\text{опт}} \\ C \rightarrow C_{\text{опт}} \\ TX \rightarrow TX_{\text{опт}}}} (R_{\text{var}} - R_{\text{var}}^*) = 0;$$

$$\{TX\}_{\text{опт}} = \operatorname{argmax} K(C, T, TX);$$

$$\{C, T\}_{\text{опт}} = \operatorname{argmin} \mathbf{K}(C, T, \text{TX}),$$

где M — методика выбора оптимального облика модернизации;

R_{var} — риск варианта, соответствующего оптимальным характеристикам;

R_{var}^* — риск выбранного варианта;

$T_{\text{опт}}$ — оптимальное время модернизации;

$C_{\text{опт}}$ — оптимальная стоимость модернизации;

$\text{TX}_{\text{опт}}$ — оптимальные технические характеристики модернизации;

$\mathbf{K}$ — вектор параметров РЛС.

В такой задаче применение математического аппарата нечетких множеств позволит сравнить множество вариантов и при этом получить однозначный ответ какой из них наиболее оптимальный.

Формализация метода оптимального выбора технических решений на основе применения средне-дисперсионного анализа и теории нечетких множеств

Ранее конструкторы РЛС МКП представляли множество вариантов модернизации, которые потом сравнивали по частным критериям и упускали из вида наиболее оптимальный. Предлагается всевозможные варианты модернизации РЛС МКП расположить в пространстве, значения времени, стоимости модернизации и функциональных характеристик задать не в абсолютных величинах, а ввести меру соответствия. Меру соответствия можно ввести с помощью аппарата нечеткой логики, в которой можно показать, насколько данный вариант оптимален по стоимости, времени модернизации и функциональным характеристикам.

В рамках теории нечеткой логики для принадлежности величины u к множеству A используются функции принадлежности величины u [1], которая будет являться технической характеристикой, стоимостью и временем модернизации. Линейными функциями принадлежности величины u к множеству A , для нашего случая, под которым будем понимать множество благоприятных и реализуемых вариантов, функции определяются мерой μ_A :

$$\mu_A = \begin{cases} 0, & \text{при } u < a_l; \\ \frac{u - a_l}{a' - a_l}, & \text{при } a_l \leq u \leq a'; \\ 1 & \text{при } u = a'; \\ \frac{a_r - u}{a_r - a'}, & \text{при } a' \leq u \leq a_r; \\ 0 & \text{при } u > a_r. \end{cases}$$

В нашем случае a_l^L и a_r^r являются заданными заранее благоприятными уровнями для стоимости, времени модернизации и функциональными характеристиками. Геометрически нечеткое множество стоимости, времени реализации и технической характеристики представляется как многомерная пирамида, где точка вершины является идеальным вариантом, обычно не достижимым в жизни, в таком случае равенство $\mu_A = 1$ будет означать идеальное совпадение величины требуемому уровню $C_{\text{зад}}, T_{\text{зад}}, \text{TX}_{\text{зад}}$ по функциональной характеристике TX , стоимости C или срокам модернизации T . Таким образом, такая формализация позволяет учесть различные технические решения для рассмотрения различных вариантов, которые возможны на этапе согласования с заказчиком стоимости или времени модернизации, оценка которых будет осуществляться с помощью нечетких чисел μ_{A_i} . Теперь формализуем решающее правило на основе средне-дисперсионного анализа в пространстве нечетких вариантов модернизации.

Для классического средне-дисперсионного анализа рассчитываются изменения дисперсии и ковариации связанных величин во времени, из которых находятся логарифмическое отношение ее значение на i -расчете к $i-1$ -расчету

$$\delta_i A = \ln \left(\frac{A_i}{A_{i-1}} \right).$$

В каждый момент времени рассчитывается среднее значение E и среднеквадратичное отклонение σ . Риск обосновывается тем, что значительное изменение одной из величин приведет за собой изменение связанных с ней характеристик, что приводит к интегральному изменению характеристик по цепочке. В математическом плане задача многопараметрической

кой оптимизации функциональных характеристик ТХ, времени T и стоимости модернизации C выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \theta_i \theta_j \text{Cov}_{i,j} \rightarrow \min; \\ \sum_{i=1}^{\infty} E(r_i) \theta_i = E(r); \\ \sum_{i=1}^{\infty} \theta_i = 1; \quad C \rightarrow \min; T \rightarrow \min, \end{cases}$$

где θ_i — доля i -й величины;

$\text{Cov}_{i,j}$ — ковариация значений i -й и j -й величины;

$E(r)$ — математическое ожидание.

Ковариация — базовая мера линейной связи двух величин, которая задается формулой:

$$\text{Cov}(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}),$$

где $\bar{x}$ и $\bar{y}$ — средние значения величин x и y . Риск задается следующей формулой:

$$\sigma_p = \sqrt{\theta_i \theta_j \text{Cov}_{i,j}}.$$

Если раскрыть формулу ковариации и принять все величины с равными весами, то можно рассчитать риск по формуле:

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

где σ_i — среднеквадратичное отклонение i -й функциональной характеристики под воздействием внешних факторов;

C_{ij} — коэффициент корреляции между характеристиками при проектировании.

Однако средне-дисперсионный анализ величин, изменяющихся во времени, не подходит для многопараметрической оптимизации при модернизации, поскольку может дать в ответе равнозначные варианты. Применение нечетких множеств поможет избежать многозначности такого из-за величины μ_A , физический смысл которой является мерой соответствия идеальному варианту модернизации из множества вариантов. Риск будет являться комбинацией мер μ_i для разных величин для каждого варианта, показываю-

щей расстояние до вершины пирамиды в пространстве нечетких величин.

Для каждого варианта задаем дисперсию расхождения из нечеткого множества, равную:

$$\begin{aligned} \sqrt{\sum_i \sigma_i^2} &= \\ &= \sqrt{(\mu_C C_K - 1)^2 + (\mu_{TX} TX_K - 1)^2 + (\mu_T T_K - 1)^2} = \\ &= \sqrt{\sum_i (\mu_i - 1)^2}, \end{aligned}$$

где i — обозначает принадлежность к множеству стоимости, времени или характеристики.

Коэффициент корреляции в нечетком множестве зададим как

$$C_{AB} = \frac{\left(1 - \frac{A}{A_{\text{зад}}}\right) \left(1 - \frac{B}{B_{\text{зад}}}\right)}{\sqrt{\mu_A^2 + \mu_B^2}}.$$

Тогда можно задать функционал риска в пространстве нечеткого множества, минимальное значение которого будет означать максимальную близость к идеальному варианту модернизации с заданными характеристиками:

$$\begin{aligned} \sigma_R &= \\ &= \sqrt{\sum_i (\mu_i - 1)^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} (1 - \mu_i)(1 - \mu_j)} \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Технический вариант, наиболее близкий к локальному минимуму, и будет являться оптимальным. Схема методики изображена на рис.

Данная методика работает с риском не как с вероятностной оценкой, а переводит его в плоскость нечетких множеств, что позволяет оценивать неограниченное число вариантов модернизации. Данный эффект обеспечивается новым функционалом риска выбора неоптимального облика на основе средне-дисперсионного анализа и мерой соответствия данного варианта к идеальному на основе подходов нечеткой логики. Достоинством такого подхода является оперативность расчетов и возможность работы с неограниченным числом характеристик и вариантов.



Рис. Структурно-логическая схема методики выбора оптимального варианта модернизации РЛС МКП для достижения требуемых характеристик при ограничениях по стоимости и времени модернизации

Выводы

В статье представлен вариант решения задачи выбора новых технических решений при модернизации РЛС МКП для режимов с повышенной разрешающей способностью при выполнении требований к функциональным характеристикам в режиме барьерного обзора.

В качестве гипотезы предложен научно-методический аппарат снижения рисков неоптимального выбора технических решений при модернизации, основанный на представлении множества вариантов как нечеткого множества с последующей минимизацией риска по результатам средне-дисперсионного анализа. Основным достоинством предложенной оптимизации является возможность оценить неограниченное количество вариантов модернизации РЛС МКП и риски неоптимального выбора для каждого технического решения.

В качестве дальнейших исследований предлагается провести вычислительный эксперимент

и проверить эффективность представленного метода по реальным данным о модернизации радиолокационной станции.

Список источников

1. Тимошенко А.В., Перлов А.Ю., Зверев Г.П. 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.
2. Шевцов В.А., Тимошенко А.В., Разиньков С.Н. Оценка состояния безопасности полета воздушного судна на основе анализа рисков авиационных инцидентов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2024. № 1. С. 39–44.
3. Порсев В.И., Гелесев А.И., Красько А.Г. Угловое сверхразрешение сигналов с использова-

нием «виртуальных» антенных решеток // Вестник Концерна ВКО «Алмаз–Антей». 2019. № 4. С. 24–34.

4. Боев С.Ф., Рахманов А.А. Метод повышения эффективности внедрения новых технологий при создании РЛС нового поколения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1(162). С. 73–81.

5. Леонов А.И., Васенев В.Н., Гайдук Ю.И. и др. Моделирование в радиолокации. М.: Сов. Радио, 1979. 264 с.

6. Неведов С.И., Неведова Ю.С., Слукин Г.П. и др. Разработка программного обеспечения имитационного моделирования эффективности применения технических решений РЛС // Наука и образование. 2012. № 3. С. 1–8.

7. Рахманов А.А., Логовский А.С., Мальцев Г.Н., Тимошенко А.В. Техничко-экономический показатель эффективности создания радиолокационных систем дальнего обнаружения // Вооружение и экономика. 2020. № 2 (52). С. 9–23.

8. Управление созданием и эксплуатацией радиолокационных систем дальнего обнаружения; под ред. С.Ф. Боева. М.: Научная книга, 2019. 424 с.

9. Матсеевич С.В., Владко У.А., Зюзина А.Д., Мочалов М.Н. и др. Применение показателя когнитивной нагрузки графического элемента для обоснования требований к системе визуализации РЛС дальнего обнаружения // Научная визуализация. 2024. Т. 16. № 3. С. 87–96.

10. Бушмин В.В., Дубовский В.А., Орлов С.М., Тимошенко А.В. Контроль процессов жизненного цикла высокотехнологичных образцов вооружения и военной техники в ведущих зарубежных военно-промышленных компаниях: методологические, методические и организационные аспекты // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 11–12 (185–186). С. 101–108.

References

1. Timoshenko A.V., Perlov A.Yu., Zverev G.P. et al. An example of the theory of odd opinions in solving the problem of managing the time resource of a space monitoring radar station // Scientific

and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2024. Vol. 24. No 3. Pp. 513–519.

2. Shevtsov V.A., Timoshenko A.V., Razinkov S.N. Assessment of the state of flight safety of an aircraft based on an analysis of the risks of aviation incidents // Bulletin of higher educational institutions. Aviation equipment. 2024. No 1. Pp. 39–44.

3. Porsev V.I., Gelesev A.I., Krasko A.G. Angular excess of signals using «virtual» antenna arrays // Bulletin of the JSC «Almaz-Antey». 2019; (4): 24–34.

4. Boev S.F., Rakhmanov A.A. Method of increasing the efficiency of the introduction of new technologies in the creation of a new radar coverage // Bulletin of South Federal University. Technical science series. 2015. № 1(162). Pp. 73–81.

5. Leonov A.I., Vasenev V.N., Gaidukov Yu.I. et al. Modeling in radar: edited by A.I. Leonov. M.: Sov. Radio, 1979. 264 p.

6. Nefedov S.I., Nefedova Yu.S., Slukin G.P. et al. Software development for simulation modeling of the effectiveness of radar technical solutions // Science and Education. 2012. No 3. 8 p.

7. Rakhmanov A.A., Logovsky A.S., Maltsev G.N., Timoshenko A.V. Technical and economic indicator of the effectiveness of the creation of long-range radar detection systems // Armament and economy. 2020. № 2(52). Pp. 9–23.

8. Management of the creation and operation of long-range radar detection systems / edited by S.F. Boev. M.: Scientific book, 2019. 424 p

9. Matseevich S.V., Vladko U.A., Zyuzina A.D., Mochalov M.N., Zakharov A.S. An example of an indicator of the cognitive load of a graphic element for processing requirements for a long-range radar imaging system // Scientific Visualization, 2024 16.3: 87–96.

10. Bushmin V.V., Dubovsky V.A., Orlov S.M., Timoshenko A.V. Control of the life cycle processes of high-tech weapons and military equipment in leading foreign military-industrial companies: methodological, methodological and organizational aspects // Issues of defense technology. Series 16: Technical means of combating terrorism. 2023. № 11–12 (185–186). Pp. 101–108.