

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-513-519

УДК 004.942, 519.8, 658.51

Применение теории нечетких множеств при решении задач управления временным ресурсом радиолокационной станции мониторинга космического пространства

Юрий Владимирович Бабкин¹, Глеб Петрович Зверев²,
Александр Васильевич Тимошенко³✉, Анатолий Юрьевич Перлов⁴,
Марат Фатыхович Булатов⁵

¹ АО «НПО дальней радиолокации», Москва, 127083, Российская Федерация

^{2,3,4,5} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Российская Федерация

¹ yuvlbabkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1603-5374>

² glebzverev2001@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-3634-6169>

³ u567ku78@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-9791-142X>

⁴ laperlov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8480-3772>

⁵ bulatov_agu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7839-8416>

Аннотация

Введение. Современные радиолокационные станции (РЛС) мониторинга космического пространства одновременно решают по несколько разноплановых задач обнаружения и сопровождения большого числа объектов. Данное обстоятельство обуславливает актуальность оптимизации распределения временного ресурса между задачами в условиях большого потока объектов мониторинга. Анализ потенциальных возможностей существующих методов распределения временного ресурса между текущими задачами РЛС показал, что распределение ресурса, основанное на статически заданной системе приоритетов целей, не позволяет оптимально управлять временным ресурсом. В работе представлен оригинальный способ решения задачи динамического распределения временного ресурса между задачами РЛС, основанный на использовании теории нечетких множеств. Показано, что использование математического аппарата нечеткой логики позволяет учитывать влияние на функционирование РЛС особенностей режимов работы РЛС, в том числе для высокоточного измерения координат космического объекта. Также теория нечетких множеств учитывает текущие значения характеристик РЛС и деструктивное влияние ряда внешних параметров в реальном масштабе времени. **Метод.** Задача управления временным ресурсом РЛС формализуется как поиск оптимального расписания работы станции в эфире (распределения ресурса между задачами) с целью минимизации количества пропусков целей. Для решения этой задачи применяется теория нечетких множеств, что позволяет учесть неопределенность и динамику изменения количества космических объектов в секторе обзора РЛС. **Основные результаты.** Приведено описание основных операций алгоритма управления ресурсом РЛС, продемонстрированы результаты работы алгоритма, обеспечивающие оптимальное распределение между текущими задачами. **Обсуждение.** В отличие от известных методов распределения временного ресурса между текущими задачами РЛС, использование теории нечетких множеств применительно к задаче управления временным ресурсом РЛС позволяет гибко реагировать на изменения внешних условий выполнения задач в условиях временных ограничений. В перспективе данный подход может быть адаптирован и применен в других областях, где существует необходимость оптимизации ресурсов при условии их ограниченности и неопределенности внешних факторов.

Ключевые слова

РЛС, временный ресурс, мониторинг космического пространства, нечеткие множества

Благодарности

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

Ссылка для цитирования: Бабкин Ю.В., Зверев Г.П., Тимошенко А.В., Перлов А.Ю., Булатов М.Ф. 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

Management of space surveillance radar temporal resource on fuzzy set theory

Yuri V. Babkin¹, Gleb P. Zverev², Alexander V. Timoshenko³✉,
Anatoly Yu. Perlov⁴, Marat F. Bulatov⁵

¹ JSC “NPO Long-Range Radar”, Moscow, 127083, Russian Federation

^{2,3,4,5} Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

¹ yuvlbabkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1603-5374>

² glebzverev2001@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-3634-6169>

³ u567ku78@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-9791-142X>

⁴ laperlov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8480-3772>

⁵ bulatov_agu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7839-8416>

Abstract

This paper addresses the problem of optimizing the use of temporal resources of a radar station (RS) under limited time resources. Special attention is given to the necessity of considering a multitude of compensatory optimality criteria when allocating the RS operating time. The proposed approach is based on the use of fuzzy set theory which represents an innovative solution in the context of this task. The task of managing the RS temporal resources is formulated as the search for an optimal work schedule among all potentially possible options. This schedule should minimize the values of all partial optimality criteria. Fuzzy set theory is applied to solve this problem, allowing for the consideration of uncertainty and variability in task execution conditions. An algorithm for managing the RS temporal resources was presented. The review results confirm the probable increase in efficiency, especially in conditions of acute shortage of temporal resources, ensuring their optimal distribution among current tasks. Furthermore, the algorithm enables decisions to be made about the possibility of performing special or additional tasks without compromising the main monitoring functions. The review of the proposed algorithm provides a basis for hypothesizing its advantages over traditional methods of managing the RS temporal resources. In particular, the use of fuzzy set theory allows for more flexible responses to changes in task execution conditions and enhances the overall adaptability of the system. In the future, this approach could be adapted and applied in other areas where there is a need for resource optimization under conditions of limitation and uncertainty of external factors.

Keywords

RLS, temporal resource, space monitoring, fuzzy sets

Acknowledgements

This work was done with the support of MSU Program of Development, Project No. 24-S01-04.

For citation: Babkin Yu.V., Zverev G.P., Timoshenko A.V., Perlov A.Yu., Bulatov M.F. Management of space surveillance radar temporal resource on fuzzy set theory. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 3, pp. 513–519 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-513-519

Введение

В последние годы решение задач мониторинга околоземного космического пространства стало более затруднительно в связи с усложнением космической обстановки [1]. Например, по сравнению с 2000 г. (по данным каталога NORAD) в 2020 году количество космических объектов (КО) увеличилось в два раза, и по прогнозам в ближайшие десятилетия будет возрастать с еще большей интенсивностью [2]. Кроме того, кластерные запуски КО, в том числе вывод на рабочие орбиты спутников системы StarLink, а также планирующихся европейского, российского и китайского аналогов [3], в еще большей степени усложняют функционирование радиолокационных станций (РЛС) мониторинга космического пространства, и тем самым затрудняют обеспечение требуемых значений их характеристик в целом.

На рис. 1 показаны задачи, решаемые функционирующей радиолокационной станцией.

Отметим, что степень деструктивного влияния реального космического фона на характеристики РЛС в значительной степени определяется и особенностями

режима функционирования РЛС мониторинга космического пространства.

Основными штатными режимами (задачами) являются: обзор барьерной зоны, характеризуемый поиском объектов космического пространства (ОКП); захват, сопровождение целей (с накоплением траекторной информацией, вычислением параметров движения и последующим сбросом с сопровождения) [4].

К специальным (дополнительным) задачам можно отнести: поиск и сопровождение ОКП, в том числе и высокоскоростных и маневрирующих объектов во всем секторе ответственности; обнаружение и сопровождение высокоорбитальных космических объектов (ВОКО) по целеуказанию; радиопортретирование КО.

Для каждой из перечисленных задач требуется выделение временного ресурса РЛС, который определяется количеством времени, затраченным РЛС для решения данной задачи. Время работы РЛС при мониторинге объектов складывается из отрезков времени циклов работы РЛС по каждому объекту, состоящих из периода излучения, ожидания и приема ответного сигнала. Такой временной цикл функционирования РЛС

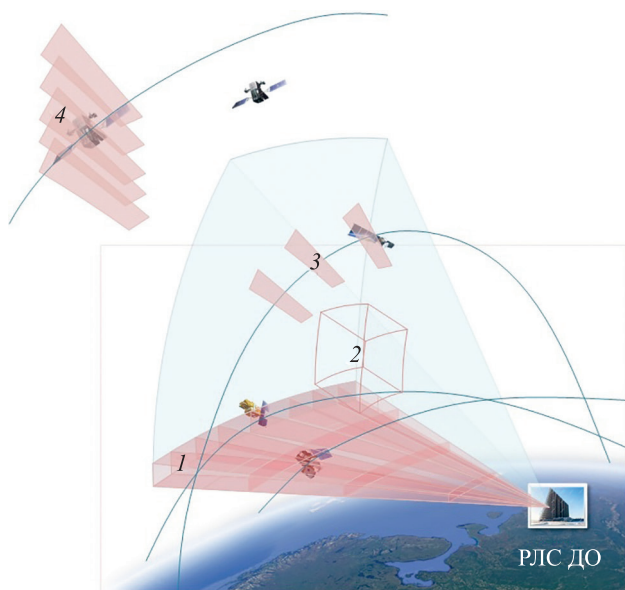


Рис. 1. Иллюстрация функционирования радиолокационной станции дальнего обнаружения (РЛС ДО) при решении различных задач:

- 1 — поиск космических объектов в карьерной зоне и их сопровождение; 2 — дополнительная зона поиска цели по указанию от командного пункта; 3 — сопровождение особо важных космических объектов через весь сектор ответственности; 4 — работа по высокоорбитальным космическим объектам

Fig. 1. Illustration of the functioning of the long range detection radar station in solving various problems:

- 1 — search for space objects in the quarry zone and their tracking;
- 2 — additional target search area as directed by the command post;
- 3 — escort of particularly important space objects across the entire sector of responsibility;
- 4 — work on high-orbit space objects

назовем заявкой. Существующие способы управления временными ресурсами РЛС основаны на составлении тактового расписания по принципу очереди, где каждая заявка имеет свой вес и приоритет, зависящий от длительности ожидания заявки в очереди на исполнение и типа КО. Тактовое расписание РЛС представляет собой последовательно выстроенные в ряд по времени заявки.

Данные способы в современных условиях функционирования РЛС дальнего обнаружения имеет следующие недостатки: приоритеты целей являются статическими; не учитывается текущая космическая обстановка (количество КО в секторе действия РЛС), текущее состояние РЛС и прочие факторы, имеющие влияние на пропускную способность локатора.

Вместе с тем существует потенциальная возможность повышения эффективности системы космического мониторинга в условиях кластерных пусков за счет реализации динамического управления временным ресурсом РЛС между решаемыми задачами на основе их приоритета. Однако реализация динамического управления временным ресурсом РЛС потребует оперативного и достоверного решения задачи определения приоритета задачи (в частности, при наблюдении КО — с учетом оценки длительности сопровождения объекта, оценки точности получаемой траекторной информации,

классификации объекта, факта идентификации объекта), а также внешних факторов и состояния РЛС фактически в реальном масштабе времени.

Таким образом, актуальной задачей является совершенствование существующих способов управления временным ресурсом РЛС с учетом совокупности факторов: приоритеты задач, космическая обстановка и состояние РЛС.

Алгоритм управления ресурсом РЛС

Целью работы является управление распределением временного ресурса РЛС между задачами для обеспечения оптимального решения штатных и дополнительных задач. Для работы РЛС в условиях большого потока целей и ограничения временного ресурса алгоритм распределения временного ресурса, в условиях его нехватки, должен: обеспечить минимизацию пропуска целей при максимизации характеристик РЛС; принимать решение о работе РЛС по специальным, дополнительным задачам — фактически выделять или совсем не выделять для решения задач требуемый объем ресурса.

В качестве исходных данных для решения задачи управления ресурсами РЛС космического мониторинга примем следующие величины:

- текущие параметры работы РЛС по штатным задачам (количество объектов на сопровождении);
- фактический период обзора зоны поиска;
- прогноз количества КО в секторе;
- команды от командного пункта (КП) на работу по дополнительной задаче.

Блок-схема алгоритма управления ресурсом РЛС приведена на рис. 2.

Последовательность этапов алгоритма заключается в следующем.

Этап 1. На основе данных о параметрах текущих задач РЛС оценивается количество временного ресурса, требуемое для решения этих задач.

Общий вид оценки объема временного ресурса для задачи имеет вид:

$$T = \frac{\tau N_a}{\delta t},$$

где τ — длительность реализации используемого сигнала зондирования; N_a — количество осматриваемых направлений; δt — периодичность зондирования. А также метрики качества выполнения задач.

Этап 2. Фазификация входных переменных. На основе заданных четких значений текущего состояния решения задач проводится процедура преобразования данных в нечеткие переменные (рис. 2).

Этап 3. Агрегирование подусловий, активизация подзаключений, агрегирование заключений. На данном этапе проводится процедура логического вывода. Для формирования нечеткого логического вывода была выбрана функция Мамдани, описываемая выражением

$$1 - k_j(i = \widehat{1}, n; x_i = a_{i,j_p}) = d_j,$$

где $a_{i,j_p} = \int_{x_i}^{x_{i-1}} \mu_j(x_i)/x_i$ — нечеткий терм входа (принадлежит множеству условий); $\mu_j(x)$ — функция при-

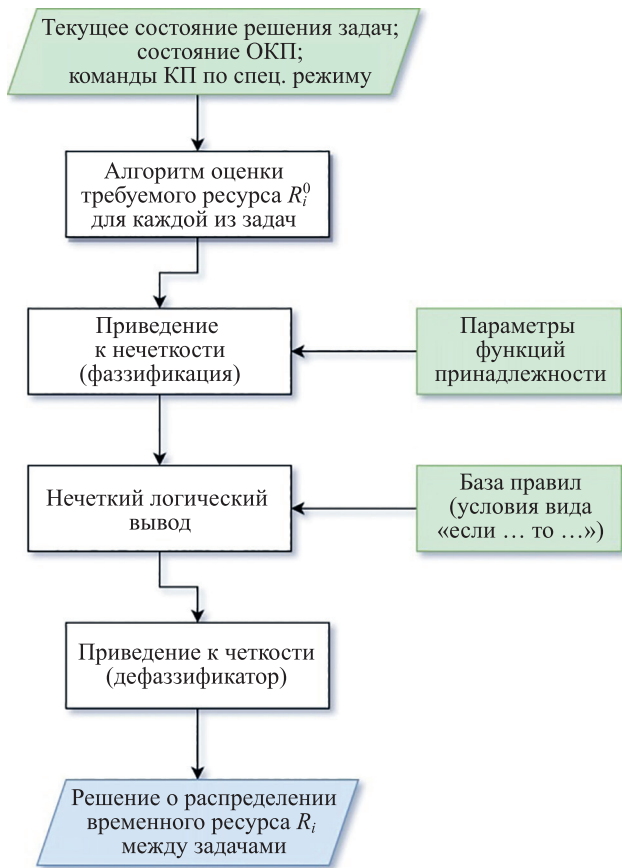


Рис. 2. Блок-схема алгоритма управления ресурсом радиолокационной станции.

R_i — распределение ресурса по задачам; R_i^0 — распределение в нулевой такт времени

Fig. 2. Block diagram of the radar station resource management algorithm.

R_i — resource distribution among tasks; R_i^0 — distribution at zero time step

надлежности входа к нечеткому терму a_j ; d_j — нечеткий терм вывода; k_j — весовой коэффициент ($\sum k_j = 1$); n — количество переменных; x_i — i -ая входная переменная.

Этап 4. Дефаззификация логического вывода выполняется по методу центра тяжести, описываемого формулой

$$x = \frac{\int x^* \mu(x) dx}{\int \mu(x) dx} \quad (1)$$

где x^* — фиксированное значение из области определения, полученное в результате нечеткого вывода.

На данном этапе происходит обратное преобразование и нормирование нечетких значений к управляющим переменным. На выходе операции дефаззификации содержатся численные значения выделяемого ресурса для решения задач РЛС и решение о работе РЛС по специальным задачам.

Идея алгоритма управления временным ресурсом РЛС основана на динамической приоритизации задач и учете относительного изменения тактового расписания [5], что позволяет статистически оптимизировать расписание на каждом последующем этапе по постав-

ленным задачам. Статистическая оптимизация осуществляется путем изменения выделяемого ресурса для выполнения задач в соответствии с установленными приоритетами. После каждого этапа происходит анализ относительного изменения качества расписания, что позволяет алгоритму динамически адаптироваться к изменяющимся условиям и требованиям.

Таким образом, разработанный алгоритм с учетом неопределенности и изменяющихся условий имеет потенциальную возможность эффективно оптимизировать временные ресурсы для многофункциональных РЛС различного назначения [6–8].

Новизна предложенного подхода заключается в применении аппарата нечеткой логики для составления «тактового» машинного расписания, что отличает его от большинства известных методов использования нечетких множеств. Традиционно нечеткая логика и теория нечетких множеств находят широкое применение в задачах, связанных с классификацией объектов [9], принятием решений в условиях неопределенности, управлением и оптимизацией процессов, где ключевым аспектом является обработка нечеткой информации о свойствах объектов или процессов. Эти подходы часто ориентированы на обработку и интерпретацию нечетких данных, получаемых из внешних источников, и использование нечеткой логики для моделирования неопределенности входных данных.

В отличие от данных подходов, использование нечеткой логики для составления тактового машинного расписания открывает новые перспективы в области управления производственными процессами. Представленный алгоритм позволяет более гибко учитывать множество факторов производственной среды, таких как временные рамки, приоритет задач, доступность ресурсов и возможные задержки, применяя нечеткие правила для оптимизации процесса планирования. Таким образом, вместо статической классификации или анализа свойств объектов, нечеткая логика используется для динамического управления процессами, что делает возможным более точное и эффективное распределение ресурсов и времени на производстве.

Основные результаты

Предположим, что при решении задачи распределения ресурсов при ограниченном общем временном ресурсе имеется множество компенсированных критериев. Для РЛС такими критериями могут служить: поток КО через сектор действия, количество КО, находящихся на обслуживании, а также ряд показателей, отражающих состояние работы РЛС в реальном времени (среднее время ожидания исполнения заявок, коэффициент готовности и др.). Перечисленные критерии могут быть сформулированы как требование к некоторой целевой функции $f_i(x)$, $i = 1, \dots, n$ (x — допустимое расписание, n — число критериев модели), отражающей отклонение x от оптимального расписания. Оптимальным расписанием назовем x^* такое, что $f_i(x^*) \geq f_i(x^{**})$ для любых x^{**} из множества возможных расписаний для i -го критерия. Область определения целевой функции

$f_i(x)$ обозначим через D_x — множество всех потенциально возможных расписаний.

Задачу построения расписания рассмотрим, как поиск такого $x \in D_x$, при котором достигается минимум всех частных критериев оптимальности.

$$\begin{cases} -f_i(x) \rightarrow \min, i = 1, \dots, n \\ x \in D_x \end{cases} \quad (2)$$

Однако различные критерии часто противоречат друг другу (например, чем больше ресурса на сопровождение, тем выше точность, но при этом меньше ресурса на поиск). Следовательно, решения, в котором одновременно достигается минимум всех критериев, не существует или оно существует как редкое исключение. Потому решение подобных задач возможно найти в множестве $P_x \in D_x$, так называемых Парето-определенных [10] решений, состоящих из всех недоминируемых расписаний.

В контексте многокритериальной оптимизации, Парето-определенное множество представляет собой множество всех решений, для которых невозможно улучшить значение одного критерия без ухудшения значения другого. Такие решения называются Парето-оптимальными или недоминируемыми [11].

Формально решение А не доминирует над решением В, если оно не хуже В по всем критериям и лучше В хотя бы по одному критерию. Парето-определенное множество включает в себя все недоминируемые решения, которые представляют оптимальные компромиссы между различными критериями.

Во избежание неопределенности выбора критериев зачастую используется линейная свертка, сводящая многокритериальную задачу к однокритериальной [12]. Рассмотрим двухкритериальный подход [12] к оценке расписания x , в котором наравне с линейной сверткой частных критериальных показателей рассматривается их оценка сверху. Задача определения x ставится в следующем виде

$$\begin{cases} F_k(x) \rightarrow \min, k = 1, 2, \\ F_1(x) = \sum_{i=1}^n W_i f_i(x), \\ F_2(x) = \max_{i=1, \dots, n} [W_i f_i(x)], \\ x \in D_x \end{cases}$$

где $W_i \in [0, 1]$ — весовой коэффициент, отражающий относительный приоритет i -го критерия; $F_k(x)$, $k = 1, 2$ — частные критериальные показатели задачи; $F_1(x)$ — общая оценка расписания x ; $F_2(x)$ — максимальная (наихудшая) индивидуальная оценка расписания x .

Примем во внимание вид i -ой частной целевой функции

$$f_i(x) = \sum_{r \in R} w_{i,r} q_{i,r}(x) \quad i = 1, \dots, n,$$

где $w_{i,r} \in [0, 1]$ — весовой коэффициент, отражающий относительный приоритет r -го требования среди всех требований i -го критерия, $r \in R$; R — множество рас-

сматриваемых в задаче типов требований к расписанию; $q_{i,r}(x) \in [0, 1]$ — функция, отражающая степень выполнения r -го требования i -го субъекта в расписании x ; $q_{i,r}(x) = 0$, $q_{i,r}(x) = f_i(x)$, если требование выполнено полностью, и $q_{i,r}(x) = 1$ — не выполнено. С учетом выражений (1) и (2) задача принимает вид

$$\begin{cases} F_k(x) \rightarrow \min, k = 1, 2, \\ F_1(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{r \in R} v_{i,r} q_{i,r}(x), \\ F_2(x) = \max_{i=1, \dots, n} \left[\sum_{r \in R} v_{i,r} q_{i,r}(x) \right], \\ v_{i,r} = w_{i,r} W_i, i = 1, \dots, n, r \in R, \\ x \in D_x \end{cases}$$

В общем случае требования минимизации показателей $F_1(x)$ и $F_2(x)$ противоречивы, не доминируют друг над другом и принадлежат одному Парето-определенному множеству. Для вычисления общей оценки расписания $F_1(x)$ и оценки расписания со стороны компонент $F_2(x)$ были выбраны критерии с учетом требований к изделию и разработана система динамического управления на основе аппарата нечеткой логики.

В результате критерии, по которым принимается решение о распределении временного ресурса РЛС, могут быть следующими:

- мера загруженности РЛС по временному ресурсу для каждой из задач;
- количество целей на сопровождении в данный момент;
- априорная оценка количества объектов в секторе действия РЛС по данным каталога КО;
- команда и целеуказание от командного пункта для работы РЛС по дополнительной задаче, а также оценка требуемого временного ресурса для ее решения.

Для каждого из критериев, на основе которых алгоритм принимает решение о выделении той или иной задачи требуемого временного ресурса, составляется так называемая функция принадлежности. Функция принадлежности описывает в парадигме нечетких множеств принадлежность лингвистической оценки конкретным числовым характеристикам выбранного показателя. Другими словами, функции принадлежности описывают степень принадлежности утверждения (например: большое количество КО в секторе действия РЛС) конкретным числам (конкретной величине количества КО в секторе действия РЛС).

На рис. 3 приведен пример функции принадлежности для критерия «требуемый ресурс для сопровождения целей».

На основе нечеткой логики определено соответствие лингвистической оценки количества требуемого временного ресурса для выполнения задачи по сопровождению целей (терм-множество). Получено соответствие лингвистическим понятиям: «достаточное количество временного ресурса для сопровождения целей»; «достаточное количество временного ресурса для работы только по важным целям»; «временного ресурса РЛС недопустимо мало для выполнения задач захвата

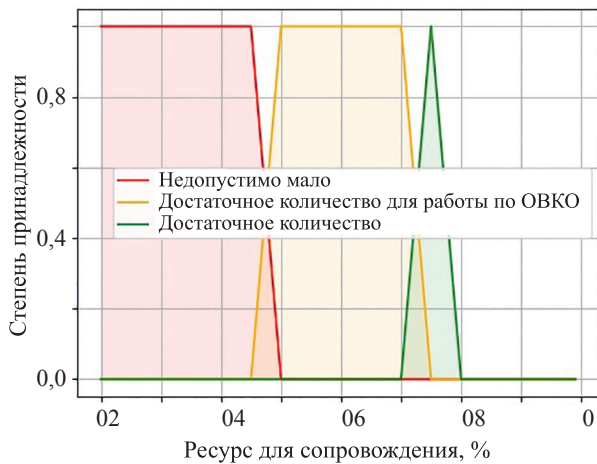


Рис. 3. Пример функции принадлежности для показателя «требуемый ресурс для сопровождения целей»

Fig. 3. Resource for tracking the objects

и сопровождения, соответствующим количественным оценкам». Также определены функции принадлежности для критериев «количество целей в секторе», «требуемый объем временного ресурса для работы по ВОКО» и др.

База правил является основой для проведения операций генерации нечеткого вывода. База представляет собой набор правил (условий) составления расписания работы РЛС по задачам. Правила должны быть основаны на перечисленных критериях распределения временного ресурса. В рамках настоящей работы правила могут устанавливать порядок выделения временного ресурса РЛС на задачи обзора, сопровождения, а также задавать условия начала/конца работы РЛС по дополнительным задачам. Правила должны составляться для каждой РЛС исходя из требований, количественных оценок потока КО через сектор ответственности, порядке взаимодействия с вышестоящим командным пунктом.

База правил состоит из двух элементов: предпосылок (условий) и заключений (выводов) вида: «если..., то...». Когда все предпосылки определенного правила выполняются или являются истинными, то активируются подзаключения (указанные в заключении правила) логический выводом.

Литература

1. Методы наблюдения и модели космического мусора / под науч. ред. Г.Г. Райкунова. М.: Физматлит, 2014. 248 с.
2. Левкина П.А. Физические и орбитальные характеристики объектов космического мусора по данным оптических наблюдений: диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Институт Астрономии РАН, 2016 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gaoran.ru/russian/diss/LevkinaPA.pdf>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 03.09.2023).
3. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор - угроза человечеству. М.: Изд-во ИКИ РАН, 2012. 192 с.
4. Саврасов Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации. М.: Радио и Связь, 1985. 216 с.
5. Biacino L., Gerla G. Fuzzy Logic, Continuity and Effectiveness // *Archive for Mathematical Logic*. 2002. V. 41. N 7. P. 643–667. <https://doi.org/10.1007/s001530100128>

Правила должны определять условия начала/конца работы РЛС в специальных режимах, условия распределения ресурсов между штатными задачами РЛС.

В качестве входных параметров определим следующие показатели: параметры и состояние решения текущих задач РЛС, позволяющие оценить количество временного ресурса, которое необходимо для их успешного выполнения на ближайший отрезок времени; оценка и прогноз на ближайший отрезок времени текущей ситуации в околоземном космическом пространстве (прогноз количества КО в секторе действия РЛС); команды и целеуказания от командного пункта для работы РЛС в специальном режиме (ВОКО, радиопортретирование и др.).

Таким образом, решение задачи управления временным ресурсом РЛС может быть получено с использованием теории нечетких множеств. Доля временного ресурса, отводимая на решаемую задачу, будет определена с учетом текущих приоритетов, изменяемых в соответствии с установленными правилами. Ожидается, что данный подход позволит учесть динамические изменения космической обстановки, и минимизировать негативные последствия нехватки временного ресурса.

В отличие от существующих алгоритмов, в которых распределение временного ресурса основано на составлении тактового расписания за счет статически определенных приоритетов, предлагаемый алгоритм позволяет: оптимизировать работу РЛС на основе набора критериев оценки эффективности ее работы в целом; принимать решение о работе РЛС по специальным задачам; рассмотреть влияние предложенного алгоритма на показатели отказоустойчивости, восстановление работоспособности системы [13, 14].

Заключение

Предложен алгоритм управления временным ресурсом радиолокационной станции, который решает задачу распределения временного ресурса радиолокационной станции между текущими задачами. Рассмотренный подход основан на использовании теории нечетких множеств. Суть алгоритма заключается в принятии решения о выделении временного ресурса для наиболее приоритетных текущих задач.

References

1. *Observation Methods and Models of Space Debris*. Ed. by G.G. Raikunov. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014, 248 p. (in Russian)
2. Levkina P.A. *Physical and orbital characteristics of space debris objects based on optical observation data*. Dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences. Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, 2016. Available at: <http://www.gaoran.ru/russian/diss/LevkinaPA.pdf> (accessed: 03.09.2023). (in Russian)
3. Veniaminov S.S., Chervonov A.M. *Space Debris is a Threat to Common Humanity*. Moscow, Space Research Institute Publ., 2012, 192 p. (in Russian)
4. Savrasov Yu.S. *Algorithms and Programs in Radio Detecting and Ranging*. Moscow, Radio i Svjaz' Pub., 1985, 216 p. (in Russian)
5. Biacino L., Gerla G. Fuzzy Logic, Continuity and Effectiveness. *Archive for Mathematical Logic*, 2002, vol. 41, no. 7, pp. 643–667. <https://doi.org/10.1007/s001530100128>

6. Laborie P., Rogerie J., Shaw P., Vilim P. IBM ILOG CP optimizer for scheduling // *Constraints*. 2018. V. 23. N 2. P. 210–250. <https://doi.org/10.1007/s10601-018-9281-x>
7. Ведяков А.А., Милованович Е.В., Слита О.В., Тертычный-Даури В.Ю. Вариационная задача адаптивного оптимального управления. Теоретический и прикладной компьютерный анализ // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 2. С. 252–262. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-2-252-262>
8. Бессмертный И.А. Теоретико-множественный подход к логическому выводу в базах знаний // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 2(66) С. 43–48.
9. Татарникова Т.М., Архипцев Е.Д. Алгоритм контроллера нечеткой логики для размещения файлов в системе хранения данных // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 6. С. 1171–1177. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-6-1171-1177>
10. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: МГУ им. Ломоносова, 2011. 222 с.
11. Догадина Е.П., Кропотов Ю.А. Определение Парето-оптимального множества реализации работы на примере применения генетического алгоритма // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 4. С. 142–149.
12. Безгинов А.Н., Трегубов С.Ю. Многокритериальный подход к оценке расписания занятий на основе нечёткой логики // Проблемы управления. 2011. № 2. С. 52–59.
13. Богатырев В.А., Богатырев С.В., Богатырев А.В. Оценка готовности компьютерной системы к своевременному обслуживанию запросов при его совмещении с информационным восстановлением памяти после отказов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 3. С. 608–617. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-3-608-617>
14. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Reliability and timeliness of servicing requests in infocommunication systems, taking into account the physical and information recovery of redundant storage devices // *Proc. of the 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*. 2022. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/icct56057.2022.9976800>
6. Laborie P., Rogerie J., Shaw P., Vilim P. IBM ILOG CP optimizer for scheduling. *Constraints*, 2018, vol. 23, no. 2, pp. 210–250. <https://doi.org/10.1007/s10601-018-9281-x>
7. Vedyakov A.A., Milovanovich E.V., Slita O.V., Tertychny-Dauri V.Yu. Variational problem of adaptive optimal control. Theoretical and applied computer analysis. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 2, pp. 252–262. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-2-252-262>
8. Bessmertnyi I. A Set-theoretic approach to the logical inference in knowledge bases. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2010, no. 2(66), pp. 43–48. (in Russian)
9. Tarnikova T.M., Arkhptsev E.D. Fuzzy logic controller algorithm for placing files in a data storage system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 6, pp. 1171–1177. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-6-1171-1177>
10. Lazarev A.A., Gafarov E.R. *Scheduling Theory. Problems and Algorithms*. Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2011, 222 p. (in Russian)
11. Dogadina E.P., Kropotov Yu.A. Determination steamed ensemble to realization of the work on example of the using the genetic algorithm. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 4, pp. 142–149. (in Russian)
12. Bezginov A.N., Tregubov S.Yu. Exploring the existing approaches for evaluating the quality of university course timetables and description of the novel multi-criteria approach based on fuzzy logic. *Control Sciences*, 2011, no. 2, pp. 52–59. (in Russian)
13. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Assessment of the readiness of a computer system for timely servicing of requests when combined with information recovery of memory after failures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 608–617. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-3-608-617>
14. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Reliability and timeliness of servicing requests in infocommunication systems, taking into account the physical and information recovery of redundant storage devices. *Proc. of the 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, 2022, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/icct56057.2022.9976800>

Авторы

Бабкин Юрий Владимирович — начальник лаборатории, АО «НПО дальней радиолокации», Москва, 127083, Российская Федерация, [sc 57223594905](https://orcid.org/0009-0002-1603-5374), <https://orcid.org/0009-0002-1603-5374>, yuvlababkin@yandex.ru

Зверев Глеб Петрович — студент, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0003-3634-6169>, glebzverev2001@gmail.com

Тимошенко Александр Васильевич — доктор технических наук, профессор, старший преподаватель, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Российская Федерация, [sc 57217674240](https://orcid.org/0000-0002-9791-142X), <https://orcid.org/0000-0002-9791-142X>, u567ku78@gmail.com

Перлов Анатолий Юрьевич — кандидат технических наук, старший преподаватель, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Российская Федерация, [sc 57215321304](https://orcid.org/0000-0001-8480-3772), <https://orcid.org/0000-0001-8480-3772>, laperlov@yandex.ru

Булатов Марат Фатыхович — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Российская Федерация, [sc 7003529716](https://orcid.org/0000-0001-7839-8416), <https://orcid.org/0000-0001-7839-8416>, bulatov_agu@mail.ru

Authors

Yuri V. Babkin — Head of Laboratory, JSC “NPO Long-Range Radar”, Moscow, 127083, Russian Federation, [sc 57223594905](https://orcid.org/0009-0002-1603-5374), <https://orcid.org/0009-0002-1603-5374>, yuvlababkin@yandex.ru

Gleb P. Zverev — Student, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0003-3634-6169>, glebzverev2001@gmail.com

Alexander V. Timoshenko — D.Sc., Professor, Senior Lecturer, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc 57217674240](https://orcid.org/0000-0002-9791-142X), <https://orcid.org/0000-0002-9791-142X>, u567ku78@gmail.com

Anatoly Yu. Perlov — PhD, Senior Lecturer, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc 57215321304](https://orcid.org/0000-0001-8480-3772), <https://orcid.org/0000-0001-8480-3772>, laperlov@yandex.ru

Marat F. Bulatov — D.Sc., Professor, Chief Researcher, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc 7003529716](https://orcid.org/0000-0001-7839-8416), <https://orcid.org/0000-0001-7839-8416>, bulatov_agu@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.01.2024
Одобрена после рецензирования 02.04.2024
Принята к печати 24.05.2024

Received 20.01.2024
Approved after reviewing 02.04.2024
Accepted 24.05.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»