

Научная статья

УДК 004-042

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177677>

МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ БОРТОВОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ СЛОЖНО-ПРОГНОЗИРУЕМОГО ВОЗРАСТАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

Дмитрий Геннадьевич Попов^{1✉}, Олег Евгеньевич Нестеренко²,

Андрей Владимирович Романов³, Роман Евгеньевич Трепков⁴

^{1,2,3,4}Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Санкт Петербург, Россия

¹vka@mil.ru ✉

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы оптимального планирования вычислительных ресурсов на средствах бортового вычислительного комплекса космического аппарата дистанционного зондирования Земли в условиях сложно-прогнозируемого возрастания вычислительной нагрузки, а также обеспечение эффективного функционирования бортового комплекса обработки информации при неблагоприятной фоноцелевой обстановке.

Ключевые слова: аппаратура обнаружения, информационный кадр, бортовой вычислительный комплекс, наблюдаемый объект

Для цитирования: Попов Д.Г., Нестеренко О.Е., Романов А.В., Трепков Р.Е. Метод оптимального планирования вычислительных ресурсов бортового вычислительного комплекса космического аппарата в условиях сложно-прогнозируемого возрастания вычислительной нагрузки // Труды МАИ. 2023. № 133. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177677>

Original article

THE METHOD OF OPTIMAL PLANNING OF COMPUTING RESOURCES OF THE ONBOARD COMPUTING COMPLEX OF THE SPACECRAFT IN THE CONDITIONS OF A DIFFICULT-TO-PREDICT INCREASE IN COMPUTING LOAD

Dmitry G. Popov¹, **Oleg E. Nesterenko²**, **Andrey V. Romanov³**, **Roman E. Trepkov⁴**

^{1,2,3,4}Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Saint Petersburg, Russia

¹vka@mil.ru

Abstract. The work is devoted to the study of the issues of the effectiveness of the functioning of the on-board computer complex of the Earth remote sensing spacecraft in the process of data collection and processing, depending on the phono-target situation.

The issues of choosing the optimal planning of computing resources on the means of the onboard computing complex of the Earth remote sensing spacecraft in conditions of a difficult-to-predict increase in computing load are considered.

In cases where it is necessary to process information about a large number of observed objects, some of them may not be identified. First of all, this is due to the imperfection of

existing information processing algorithms. In some cases, the information frames received for processing have very poor image quality as a result of the influence of various disturbing factors. In this regard, it becomes necessary to use all available computing resources to process information about difficult-to-identify observable objects. With large volumes of input information, as well as when solving a variety of tasks by an on-board computing complex, computing resources can be distributed unevenly. Some of the useful information may be lost, which will lead to a decrease in the reliability of the identification of surveillance objects.

The paper describes a step-by-step method for finding optimal planning of computing resources.

Due to the optimal planning of computing resources, or the redistribution of solved tasks or subtasks between all available computing modules, it is necessary to establish the dependence of the probability of reliable detection of observed objects on the quality and intensity of incoming information for processing.

In the work, the problem is formulated and the method of searching for optimal planning of computing resources is gradually described.

To solve the problem of planning computing resources, a simulation experiment was carried out, which is implemented in the software and algorithmic complex of the functioning of the onboard computer complex of the Earth remote sensing spacecraft in the object-oriented programming language C++.

When planning computing resources, the proposed approach takes into account the dependence of processing time on the number of observed objects received in information

frames with low image quality, which can reduce the loss of useful information and thereby increase the reliability of the identification of observed objects.

After choosing the optimal plan of computing resources, the loss of useful information decreased, as a result of which the percentage of identifiable objects of observation increased.

Keywords: detection equipment, information frame, onboard computer system, observed object

For citation: Popov D.G., Nesterenko O.E., Romanov A.V., Trepkov R.E. The method of optimal planning of computing resources of the onboard computing complex of the spacecraft in the conditions of a difficult-to-predict increase in computing load. *Trudy MAI*, 2023, no. 133. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=177677>

Введение

В настоящее время обработка информации, получаемая космическими аппаратами (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), осуществляется бортовыми вычислительными комплексами (БВК) обработки информации. И уже в обработанном виде передается потребителю. В основном это связано с ограниченной пропускной способностью канала передачи данных между КА и наземными средствами [1]. Исследование возможностей современных космических средств, в том числе и иностранного производства по мониторингу объектов в околоземном космическом пространстве, подробно рассмотрены в работе [2]. В БВК через аппаратуру обнаружения поступает поток информации о разнообразных наблюдаемых объектах (НО). Объем поступившей информации зависит от количества НО, интенсивности поступления данной информации, а также от фоновой

обстановки на текущий момент времени, которая оказывает влияние на качество поступающих информационных кадров. Далее происходит их обработка, включающая этапы определения полезной информации и преобразования ее из аналогового в цифровой формат. В тех случаях, когда необходимо обработать информацию о большом количестве НО, некоторые из них могут быть не идентифицированы. В первую очередь это связано с несовершенством существующих алгоритмов обработки информации. Эффективность работы различных систем идентификации объектов наблюдения описаны в работах [3-6]. В некоторых случаях информационные кадры, поступающие на обработку, имеют очень низкое качество изображения в результате воздействия различных возмущающих факторов. В связи с этим возникает необходимость задействовать все имеющиеся вычислительные ресурсы для обработки информации о сложно идентифицируемых НО. При больших объемах входной информации, а также при решении БВК множества задач вычислительные ресурсы могут распределяться неравномерно. Часть полезной информации может быть потеряна, что приведет к снижению достоверности идентификации НО. Для космических систем исследования Земли, мониторинга процессов, происходящих в околоземном пространстве, понятие достоверность фактически может служить мерой качества их выходной информации [7]. В связи с этим возникает необходимость оптимального планирования вычислительных ресурсов для различных сценариев поступления информации. Для решения этой задачи успешно используется имитационное моделирование [8]. При проектировании модульно-целевой аппаратуры (МЦА) КА имитационное

моделирование может позволить определить количество задействованных вычислительных ресурсов необходимых для обработки большого объема входящей информации. Обработка информационных кадров без потери полезной информации позволит повысить эффективность функционирования БВК КА при идентификации большого количества сложно наблюдаемых объектов [9]. Построение оптимального планирования вычислительных ресурсов БВК КА можно интерпретировать как задачу математического программирования. Почти все используемые при этом модели можно отнести к одному из двух типов: детерминированные модели, которые исследуются методами теории расписаний [10-12] и вероятностные модели, которые исследуются методами теории массового обслуживания [13-15].

Выбор метода оптимального планирования вычислительных ресурсов бортового вычислительного комплекса КА ДЗЗ

На данный момент решение задачи целочисленной оптимизации осуществляется большим разнообразием методов, которые можно классифицировать как методы отсечения, комбинаторные методы и приближенные методы. Несмотря на большое количество методов, в первую очередь необходимо определить критерий оптимизации [16-17].

При планировании вычислительных ресурсов БВК КА особое внимание необходимо обратить на время обработки информационных кадров, зависящее от их качества. Также необходимо учитывать количество задач стоящих перед БВК, которые могут быть как основными, так и дополнительными. Ограничения на ресурсы и время делают задачу оптимального планирования вычислительных

ресурсов комбинаторной и многокритериальной [18]. Для решения данной задачи, являющейся NP-сложной [19], могут применяться как точные методы, так и эвристические.

Для эффективного функционирования БВК КА ДЗЗ рассматриваются различные методические подходы [20-22], но они только косвенно затрагивают вопросы оптимизации планирования ресурсов БВК. Для планирования вычислительных ресурсов требуется обеспечить управление информационными потоками больших объемов в условиях ограниченности временных и технологических ресурсов. Важнейшей функцией управления является планирование, которое может обеспечить на заданном интервале времени достижение поставленных целей.

Наиболее популярным методом для решения задач планирования с ограниченными ресурсами является метод ветвей и границ.

Исходя из того, что данная задача принадлежит к группе сложных комбинаторных задач, следует отметить, что метод ветвей и границ может оказаться единственной техникой, позволяющей найти оптимальный план вычислительных ресурсов БВК КА [23].

Если подходящее решение будет достигнуто в течение поиска и его целевое значение меньше или равно верхней границе каждого промежуточного узла i , тогда решение будет являться оптимальным и больше не потребуются никакого ветвления из данного узла. Из этого следует, что для решения комбинаторной задачи, метод ветвления и границ является оптимальным.

Для нахождения оптимального плана вычислительных ресурсов БВК КА с помощью данного метода необходимо внести ряд ограничений, которые позволят найти оптимальное решение в процессе ветвления. Основным ограничением является время, за которое обрабатывается информационный кадр. Необходимо учитывать тот факт, что вычислительные ресурсы БВК КА имеют небольшие емкости памяти и являются ограниченными, так как задействованы в решении дополнительных задач. Оптимальным будет такое планирование вычислительных ресурсов, которое позволит, с учетом вводимых ограничений, идентифицировать наибольшее количество НО.

Постановка задачи оптимального планирования вычислительных ресурсов БВК КА ДЗЗ

Исходными данными для выбора оптимального варианта планирования вычислительных ресурсов БВК КА ДЗЗ являются:

$$V_{ik}^{\text{обп}} = f(R_k, b_i, g_i) \quad (1)$$

где $V_{ik}^{\text{обп}}$ – объем i –й части обрабатываемого информационного кадра;

R_k – свободные вычислительные ресурсы;

b_i – количество наблюдаемых объектов (НО) в обрабатываемой части кадра;

g_i – степень искажения информационного кадра.

$$V_i^{\text{обп}} = \sum V_{ik} \quad (2)$$

$$P_{\text{обн}}(D_i \geq D_{TR}) = \frac{V_i^{\text{обп}}}{V_i} P_i^{\text{обп}}, \quad (3)$$

где $P_i^{\text{обп}}$ – общая вероятность обработки от 100% НО. ($P_i^{\text{обп}} \geq 0,9$);

$P_{ik}^{\text{обп}}$ – вероятность обработки от 100% НО на k -м вычислительном модуле ВМ;

$P_{\text{обн}}$ – вероятность идентификации НО;

D_i – достоверность идентификации НО;

D_{TR} – требуемая достоверность идентификации НО.

θ_{ik} - ожидаемые затраты на обработку i -й части обрабатываемого информационного кадра на k -м ВМ ($0 < \theta_{ik} \leq 1$).

Примечание: Затраты включают временные ($t_{\text{обп}} \leq t_{TR}$) ресурсы, и степень искажения ($0 < g_{ik} \leq 1$) i -й части обрабатываемого информационного кадра на k -м ВМ.

Задача планирования сводится к задаче «о выборе вариантов», математическая модель которой представляется в виде:

$$x^* = \arg \max P_{\text{обн}}(t_{\text{обп}}) \quad (4)$$

при условиях

$$t_{\text{обп}} \leq t_{TR}, t_{TR} = 4c \quad (5)$$

$$D_i \geq 0,8 \quad (6)$$

$$x_{ik} = \{0,1\}, i = \overline{1,m}, k = \overline{1,R_k} \quad (7)$$

Неизвестными в ней выступают:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, \text{ если } i\text{-я часть кадра обрабатывается на } k\text{-ом ВМ} \\ 0, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

k – номер ВМ.

Время обработки $t_{\text{обр}}$ рассчитывается в зависимости от качества поступающей информации.

Общий вид функции зависимости времени обработки от качества информации:

$$t = \Phi \left(\frac{m_{uc} + m_x}{2} \sqrt{nk} \right) \quad (8)$$

где t – время обработки информации

n – количество (объем) информации в порции обработки;

k – коэффициент учета вида информации;

m_{uc} – среднее значение ошибки в получаемой информации, обусловленное измерительным средством;

m_x – среднее значение ошибки в получаемой информации, обусловленное влиянием внешних факторов;

Φ – интеграл Лапласа.

Интеграл Лапласа (функция Лапласа):

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-0,5t^2) dt \quad (9)$$

Аналитическая аппроксимация интеграла:

$$\Phi(x) = 0,5(1 + k_x \sqrt{1 - \exp(-0,623x^2)}) \quad (10)$$

$$\text{где } k_x = \begin{cases} -1 & \text{при } x < 0; \\ 1 & \text{при } x \geq 0. \end{cases}$$

Таким образом, общий вид функции зависимости времени обработки от качества информации с реализацией аппроксимации интеграла Лапласа выглядит следующим образом:

$$t_{\text{обр}} = \sqrt{1 - \exp\left(-0,623 * g_j * b_i * \left(\frac{q_\phi + q_{\text{вн}}}{2}\right)^2\right)} \quad (11)$$

где b_i – количество (объем) информации в порции обработки;

g_j – коэффициент качества информации;

q_ϕ – среднее значение ошибки в получаемой информации, обусловленное влиянием внешних факторов (неоднородность среды распространения, флуктуации излученного, отраженного сигнала);

$q_{\text{вн}}$ – среднее значение ошибки в получаемой информации, обусловленное измерительным средством (внутренние факторы).

Оптимальное распределение i -х частей информационного кадра по ВМ представляет собой матрицу $x^* = \|x_{ik}\|_{R \times B}$, где R_{max} – число ВМ, B – количество НО в обрабатываемой части кадра. Приоритетом при планировании ресурсов пользуются НО, если их координаты отличаются от имеющихся в базе данных. X – множество возможных вариантов планирования вычислительных ресурсов БВК КА ДЗЗ, определяемых ограничениями (5–7). Оптимальным будет такой план задействования вычислительных ресурсов, который позволит обработать наибольшее количество НО без потери полезной информации и удовлетворяющий ограничениям (5–7).

Решение задачи оптимального планирования вычислительных ресурсов

БВК КА ДЗЗ

Для решения поставленной задачи необходимо задать последовательность действий в соответствии с целевым назначением, которая представлена на рисунке 1.

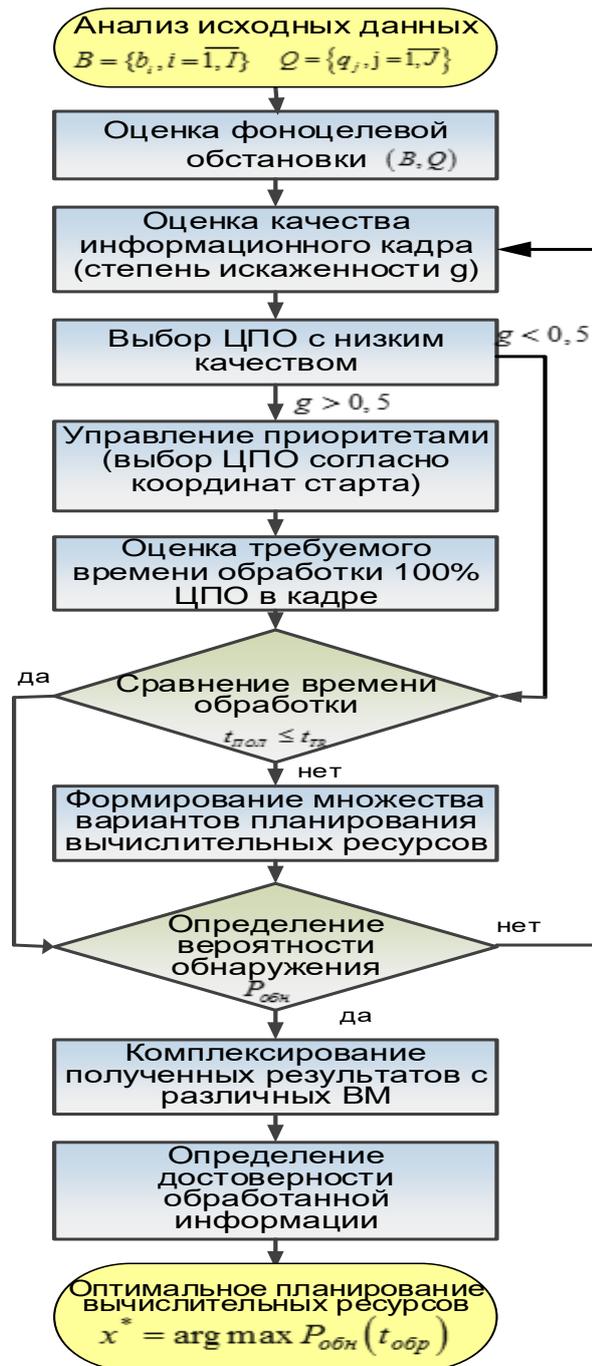


Рис.1 Блок-схема решения задачи планирования

Этапы метода:

Этап 1. Оценка входных информационных потоков (количество НО, качество поступившего для обработки информационного кадра).

Этап 2. Запрос от управляющего приемом информации данных о свободных вычислительных ресурсах.

Этап 3. Сравнение времени обработки 100% НО с требуемым временем одного информационного кадра.

Этап 4. Формирование множества вариантов планирования.

Этап 5. Выбор оптимального плана вычислительных ресурсов.

Этап 6. Определение вероятности обнаружения $P_{\text{обн}}$, которая в общем случае определяется по формуле:

$$P_{\text{обн}} = \ln \left(P \left(\frac{s}{H_1} \right) / P \left(\frac{s}{H_0} \right) \right), \quad (12)$$

где H_1 - наличие объекта наблюдения, H_0 - отсутствие объекта наблюдения.

Этап 7. Комплексование полученных результатов с различных ВМ. Определение достоверности обработанной информации.

Этап 8. При необходимости планирование вычислительных ресурсов может корректироваться (превышение времени обработки, некоторые части информационного кадра не отправлены на обработку в связи с невыполнением критериев алгоритма).

Для сокращения дерева изменений и выбора наилучшего варианта модели разработан эвристический метод, согласно которого требуется выбрать узел, имеющий лучшие оценки. Для этого дерево строится на несколько уровней в глубину, рассчитывается оценочная функция каждого уровня, выбирается узел с лучшей оценкой и выполняется изменение модели. Дополнительно может применяться стратегия поиска в глубину на несколько шагов и выбора из построенного поддеревья лучшей оценки [24].

Этап 9. Выбор оптимального плана вычислительных ресурсов.

Для решения задачи планирования вычислительных ресурсов БВК КА ДЗЗ проводился имитационный эксперимент, который реализован в программно-алгоритмическом комплексе функционирования бортового вычислительного комплекса космического аппарата дистанционного зондирования Земли [25] на объектно-ориентированном языке программирования C++.

При построении всего пути работы метода ветвей и границ фиксировалось время прохождения от начальной вершины и до конечной. Результаты прохождения маршрута для различного количества НО с учетом качества изображения представлены в таблице 1.

Таблица 1

Количество НО	Коэффициент качества изображения	Сумма всего в пути, мс	Коэффициент качества изображения	Сумма всего в пути, мс
5	<0,5	401,44	>0,5	491,44
10		524,79		624,79
15		570,7		789,7
20		479,29		879,20
25		654,47		954,57
30		892,14		1092,12
35		1164,26		1254,26
40		1199,23		1367,21
45		1289,28		1417,87
50		1402,34		1503,23
75		1834,43		2067,43
90		2040,37		2440,37
100		4226,58		5726,58

На рисунке 2 представлена зависимость времени работы метода от сложности фоноцелевой обстановки.

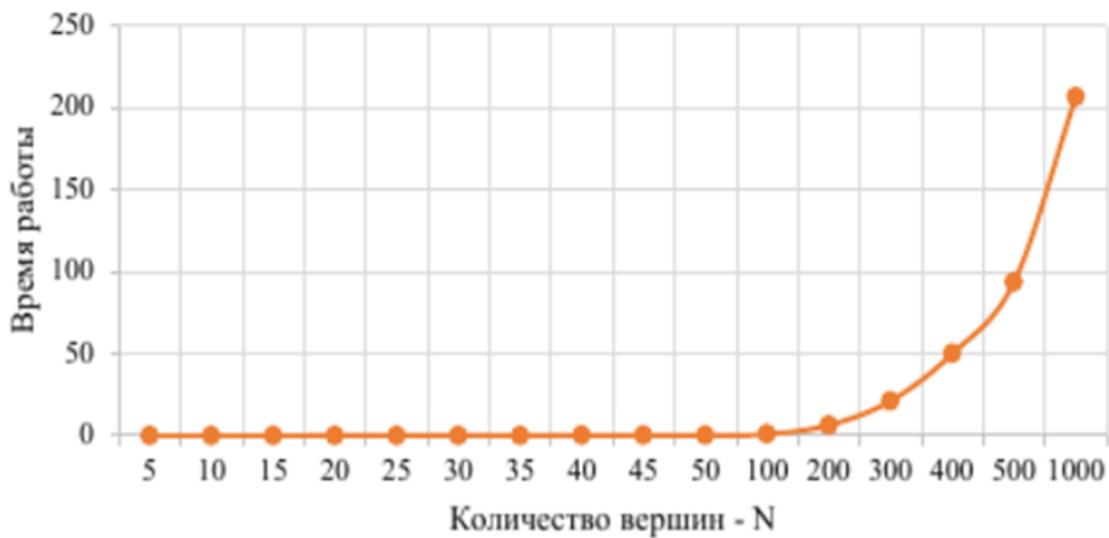


Рис. 2 График зависимости времени работы метода от ФЦО

Рисунок 3 показывает зависимость вероятности обнаружения НО от качества поступающей информации.



Рис 3. Зависимость вероятности обнаружения НО от качества поступающей информации

На рисунке 4 представлены результаты расчета пути с помощью метода ветвей и границ для различного количества НО.

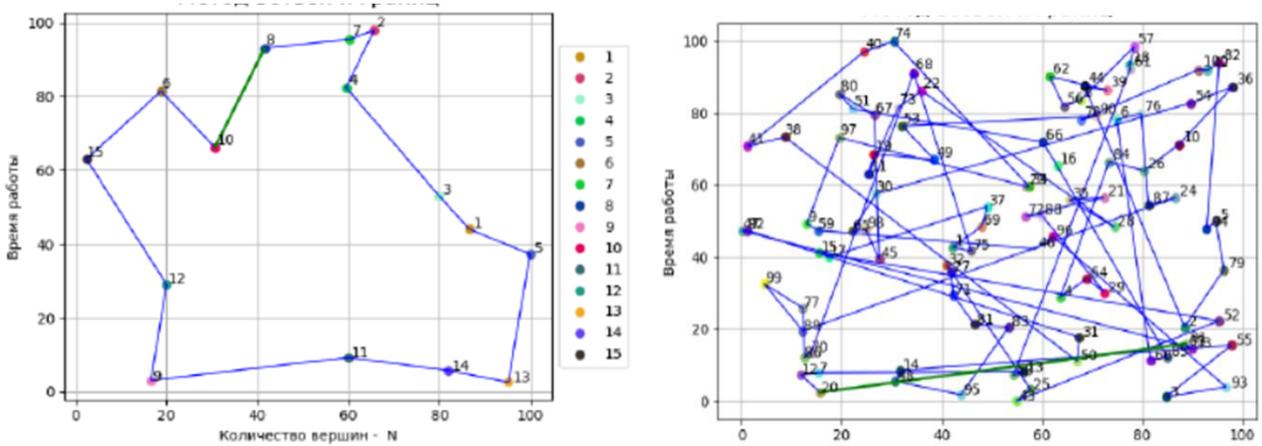


Рис. 4 Расчет пути для 15 и для 100 наблюдаемых объектов

Исходя из результатов эксперимента, можно сделать вывод, что время работы БВК по идентификации НО сильно возрастает с количеством поступающих на обработку элементов наблюдения, а вероятность обнаружения отличается в зависимости от качества изображения.

После выбора оптимального плана вычислительных ресурсов потеря полезной информации уменьшилась, в результате чего процент идентифицируемых НО увеличился в зависимости от количества поступивших на обработку элементов (рисунок 5).

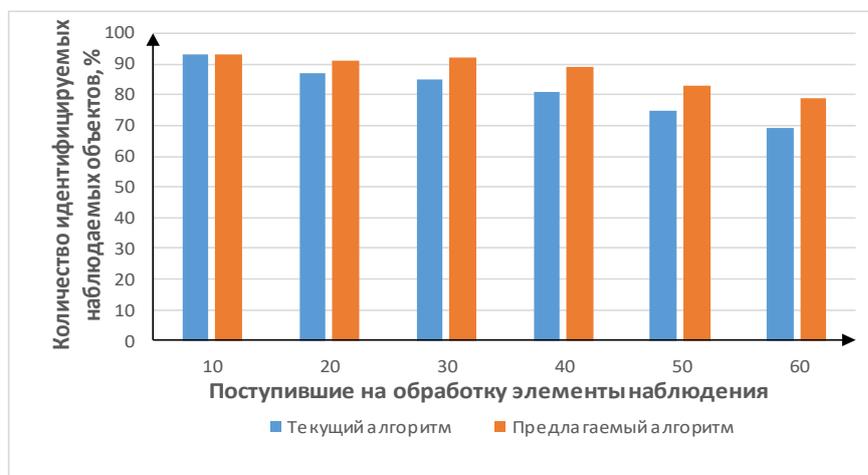


Рис. 5 Сравнительный анализ количества идентифицируемых объектов до и после оптимизации планирования вычислительных ресурсов

Заключение

Разработанный метод позволил установить нелинейную зависимость вероятности обнаружения НО от сложной фоно-целевой обстановки.

При планировании вычислительных ресурсов предложенный подход учитывает зависимость времени обработки от количества наблюдаемых объектов, поступающих в информационных кадрах с низким качеством изображения, что может уменьшить потерю полезной информации и тем самым повысить достоверность идентификации НО.

Такой подход является особенно актуальным при проектировании перспективных БВК КА ДЗЗ, основной задачей которых является достоверность идентифицируемых объектов с высокой долей вероятности.

Список источников

1. Попов Д.Г., Антонов Д.А., Оркин В.В. Моделирование функционирования бортового вычислительного комплекса КА единой космической системы в процессе сбора и обработки данных о групповых массовых стартах в зависимости от фоно-целевой обстановки // Известия Тульского государственного университета. 2023. № 4. С. 80-86.
2. Малетин А.Н., Глущенко А.А., Мишина О.А. Исследование возможностей современных космических средств по мониторингу объектов в околоземном космическом пространстве // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170351>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-21](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-21)

3. Разиньков С.Н., Жидко Е.А. Эффективность коллективной идентификации объектов при неточно заданных значениях однотипных параметров // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. Т. 16. № 8. С. 64–68.
4. Разиньков С.Н., Сирота А.А. Оценка эффективности первичной и вторичной обработки импульсных радиосигналов в системах пассивной радиолокации // Измерительная техника. 2004. № 2. С. 53–59.
5. Мельников Ю.П., Попов С.В. Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников радиоизлучения. - М.: Радиотехника, 2008. - 432 с.
6. Гуров Г.Б., Поздышев В.Ю., Тимошенко А.В., Разинькова О.Э. Идентификация маневрирующих объектов при структурно-системном контроле воздушного пространства // Вычислительные технологии. 2021. № 26 (4). С. 16–26. DOI: [10.25743/ICT.2021.26.4.003](https://doi.org/10.25743/ICT.2021.26.4.003)
7. Зозуля Ю.Т., Саранченков В.А., Столяров О.И. Достоверность информации космических систем наблюдения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2022. № 4. С. 80–90. DOI: [10.38013/2542-0542-2022-4-80-90](https://doi.org/10.38013/2542-0542-2022-4-80-90)
8. Altiok T., Melamed B. Simulation modeling and analysis with Arena. Burlington, Elsevier Inc., 2007, 440 p.
9. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. – М.: Радиотехника, 2009. – 392 с.
10. Теория расписаний и вычислительные машины // Под ред. Коффмана Э.Г. – М.: Наука, 1984. - 334 с.

11. Гуз Д.С., Красовский Д.В., Фуругян М.Г. Эффективные алгоритмы планирования вычислений в многопроцессорных системах реального времени. – М.: ВЦ РАН, 2004. - 66 с.
12. Голосов П.Е., Козлов М.В., Малашенко Ю.Е., Назарова И.А., Ронжин А.Ф. Модель системы управления специализированным вычислительным комплексом: Сообщения по прикладной математике. – М.: ВЦ РАН, 2010. - 43 с.
13. Яшков С.Ф. Математические вопросы теории систем массового обслуживания с разделением процессора // Итоги науки и техники. Серия: Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика. 1990. № 29. С. 3–82.
14. Borst S., Voxma O., Groote J. F., Mauw S. Task allocation in a multi-server system // Journal of Scheduling, 2003, vol. 6, pp. 423–436. DOI: [10.1023/A:1024840405535](https://doi.org/10.1023/A:1024840405535)
15. Ross K.W. Multiservice Loss Models for Broadband Telecommunication Networks, Springer Verlag, 1995, 343 p.
16. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 312 с.
17. Федоров В.В. Численные методы построения оптимальных планов для регрессионных экспериментов // Кибернетика. 1975. № 1. С. 124-130.
18. Князева М.В. Метод ветвей и границ для решения задачи сетевого планирования с ограниченными ресурсами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 7 (108). С. 78-84.
19. Blazewicz J., Lenstra J., Kan A. Scheduling Subject to Resource Constraints: Classification and Complexity // Discrete Applied Mathematics, 1983, vol. 5, pp. 11–24. DOI: [10.1016/0166-218X\(83\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0166-218X(83)90012-4)

20. Овакимян Д.Н., Зеленский В.А., Капалин М.В., Ерескин И.С. Исследование методов и разработка алгоритмов комплексирования навигационной информации // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176849>
21. Минаков Е.П., Александров М.А., Данилюк Б.А., Вербин А.В. Методический подход к оцениванию эффективности применения орбитальных средств контроля зон безопасности критически значимых космических аппаратов на основе дискретных цепей Маркова // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176858>
22. Акентьев А.С., Фокина А.А., Макаров Д.К. Механический анализ оптической ретрорефлекторной антенной системы для высокоорбитального космического аппарата // Труды МАИ. 2023. № 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174597>. DOI:[10.34759/trd-2023-130-02](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-02)
23. Demeulemeester E.L., Herroelen W.S. Project Scheduling: A Research Handbook. Department of Applied Economics Katholieke Universiteit, Leuven, 2002, 712 p.
24. Оркин В. В. Метод адаптивного перераспределения информационно-вычислительных ресурсов в автоматизированной системе управления при потере производительности в узлах сетевой инфраструктуры // Т-Comm Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 2. С. 52-59.
25. Попов Д.Г. Программно-алгоритмический комплекс функционирования бортового вычислительного комплекса космического аппарата дистанционного зондирования Земли // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663452, 2023, опубликовано 07.07.2023.

References

1. Popov D.G., Antonov D.A., Orkin V.V. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2023, no. 4, pp. 80-86.
2. Maletin A.N., Glushchenko A.A., Mishina O.A. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170351>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-21](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-21)
3. Razin'kov S.N., Zhidko E.A. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy*, 2018, vol. 16, no. 8, pp. 64–68.
4. Razin'kov S.N., Sirota A.A. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2004, no. 2, pp. 53–59.
5. Mel'nikov Yu.P., Popov S.V. *Radiotekhnicheskaya razvedka. Metody otsenki effektivnosti mestoopredeleniya istochnikov radioizlucheniya*. (Radio engineering intelligence. Methods for assessing the effectiveness of locating radio sources), Moscow, Radiotekhnika, 2008, 432 p.
6. Gurov G.B., Pozdyshev V.Yu., Timoshenko A.V., Razin'kova O.E. *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2021, no. 26 (4), pp. 16–26. DOI: [10.25743/ICT.2021.26.4.003](https://doi.org/10.25743/ICT.2021.26.4.003)
7. Zozulya Yu.T., Saranchenkov V.A., Stolyarov O.I. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz – Antei»*, 2022, no. 4, pp. 80–90. DOI: [10.38013/2542-0542-2022-4-80-90](https://doi.org/10.38013/2542-0542-2022-4-80-90)
8. Altiok T., Melamed B. *Simulation modeling and analysis with Arena*, Burlington, Elsevier Inc., 2007, 440 p.
9. Vasil'ev V.I., Il'yasov B.G. *Intellektual'nye sistemy upravleniya. Teoriya i praktika* (Intelligent control systems. Theory and practice), Moscow, Radiotekhnika, 2009, 392 p.

10. Koffman E.G. *Teoriya raspisaniy i vychislitel'nye mashiny* (Theory of schedules and computing machines), Moscow, Nauka, 1984, 334 p.
11. Guz D.S., Krasovskii D.V., Furugyan M.G. *Effektivnye algoritmy planirovaniya vychisleniy v mnogoprotsessornykh sistemakh real'nogo vremeni* (Effective algorithms for planning computations in real-time multiprocessor systems), Moscow, VTs RAN, 2004, 66 p.
12. Golosov P.E., Kozlov M.V., Malashenko Yu.E., Nazarova I.A., Ronzhin A.F. *Model' sistemy upravleniya spetsializirovannym vychislitel'nym kompleksom: Soobshcheniya po prikladnoi matematike* (Model of a control system for specialized computing kompleksom: Messages on applied mathematics), Moscow, VTs RAN, 2010, 43 p.
13. Yashkov S.F. *Itogi nauki i tekhniki. Seriya: Teoriya veroyatnostei. Matematicheskaya statistika. Teoreticheskaya kibernetika*, 1990, no. 29, pp. 3–82.
14. Borst S., Boxma O., Groote J. F., Mauw S. *Task allocation in a multi-server system // Journal of Scheduling*, 2003, vol. 6, pp. 423–436. DOI: [10.1023/A:1024840405535](https://doi.org/10.1023/A:1024840405535)
15. Ross K.W. *Multiservice Loss Models for Broadband Telecommunication Networks*, Springer Verlag, 1995, 343 p.
16. Fedorov V.V. *Teoriya optimal'nogo eksperimenta* (Theory of optimal experiment), Moscow, Nauka, 1971, 312 p.
17. Fedorov V.V. *Kibernetika*, 1975, no. 1, pp. 124-130.
18. Knyazeva M.V. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 7 (108), pp. 78-84.

19. Blazewicz J., Lenstra J., Kan A. Scheduling Subject to Resource Constraints: Classification and Complexity, *Discrete Applied Mathematics*, 1983, vol. 5, pp. 11–24. DOI: [10.1016/0166-218X\(83\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0166-218X(83)90012-4)
20. Ovakimyan D.N., Zelenskii V.A., Kapalin M.V., Ereskin I.S. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176849>
21. Minakov E.P., Aleksandrov M.A., Danilyuk B.A., Verbin A.V. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176858>
22. Akentyev A.S., Fokina A.A., Makarov D.K. *Trudy MAI*, 2023, no. 130. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174597>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-02](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-02)
23. Demeulemeester E.L., Herroelen W.S. *Project Scheduling: A Research Handbook*, Department of Applied Economics Katholieke Universiteit, Leuven, 2002, 712 p.
24. Orkin V.V. *T-Comm Telekommunikatsii i transport*, 2019, vol. 13, no. 2, pp. 52-59.
25. Popov D.G. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2023663452*, 2023, 07.07.2023.

Статья поступила в редакцию 16.11.2023

Одобрена после рецензирования 27.11.2023

Принята к публикации 25.12.2023

The article was submitted on 16.11.2023; approved after reviewing on 27.11.2023; accepted for publication on 25.12.2023