

ЦЕЛЕВОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С УЧЁТОМ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИОРИТЕТНОСТИ

© 2025

Р. Р. Халилов кандидат технических наук, начальник Центра получения и обработки информации «Самара»;
АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара;
halilovr82@mail.ru

Представлен алгоритм оптимизации целевой работы космического аппарата за счёт включения в алгоритм планирования требований по разграничению потребителей, облачности и динамики изменения приоритетности районов съёмки. Также в статье представлены результаты статистического имитационного моделирования разработанного алгоритма и отмечены ключевые выводы, необходимые для организации работы по развитию коммерческого направления дистанционного зондирования Земли из космоса, а также разработки космических аппаратов на основе группировок малых космических аппаратов.

Целевое планирование; космический аппарат; статистическое имитационное моделирование; группировка малых космических аппаратов

Цитирование: Халилов Р.Р. Целевое планирование работы оптико-электронного космического аппарата с учётом динамики изменения приоритетности // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24, № 2. С. 87-97. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-87-97

Опытно-технологический малый космический аппарат (МКА) «АИСТ-2Д» был запущен 28 апреля 2016 г. с космодрома «Восточный» и является совместной разработкой АО «РКЦ «Прогресс» и Самарского университета имени академика С.П. Королёва. На борту МКА «АИСТ-2Д» размещено оптическое и радиолокационное оборудование дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), научная аппаратура (НА) и высокочастотная радиолиния передачи информации на пункт приёма информации [1; 2].

Вариант логического построения алгоритма целевого планирования, приведённый в настоящей статье, был разработан исходя из опыта работы с МКА «АИСТ-2Д». Прежде всего, представленный алгоритм является необходимым инструментом планировщика для оценки лучшего из вариантов рабочей программы целевой аппаратуры или является основой программного обеспечения, которое решает задачу оптимального составления программы работы целевой аппаратуры космического аппарата (КА) при работе с различными потребителями. В алгоритме отсутствуют ограничения на целевую и обеспечивающую аппаратуру, т.к. техническая невозможность автоматически становится ограничением алгоритмическим, а расширенные возможности одной аппаратуры могут быть компенсацией ограничений, накладываемых на другую.

В настоящее время есть значительное количество работ по целевому планированию съёмки оптико-электронным КА дистанционного зондирования Земли [3 – 8]. В представленных работах в основном решаются задачи выбора того или иного участка земной поверхности либо с точки зрения минимизации времени на съёмку, либо максимизации скорости выполнения задачи с наивысшим приоритетом. Оба подхода имеют свои недостатки: первый не учитывает разграничения потребителей по приоритету, второй практически не даёт возможности для съёмки потребителям с низким уровнем приоритета. При этом не учитывается, что оптическая съёмка зависит от метеорологических условий, создавая дополнительную неопределённость в процессе выбора. К тому же, территория потенциального интереса связана непосредственно с экономической,

экологической, политической и техногенной деятельностью людей, которая также вносит дополнительный элемент неопределённости в выбор наиболее интересного участка для съёмки. При этом очень важно учитывать текущую обстановку для съёмки и планировать работу КА в динамике, т.к. любой самый стройный алгоритм оптимального планирования работы целевой аппаратуры КА, не учитывающий это, будет разрушен одной не отснятой съёмкой. Примеры покрытия съёмками заявленной территории представлены на рис. 1.



Рис. 1. Примеры покрытия съёмками заявленной территории

На рис. 1 территория интереса изображена криволинейной фигурой, а возможные маршруты съёмки четырёхугольниками, закрытие криволинейной фигуры четырёхугольниками показывает за какое количество проходов возможно снять КА территорию интереса, с учётом ограничений, отмеченных в заявке на съёмку и технических возможностей КА. Количество проходов съёмки и их последовательность выбирается из учёта скорейшего выполнения заявки, при этом максимизируется площадь снимаемой территории с учётом всех заявок, представленных на планирование. При этом приоритетность заявки является доминирующим фактором над вероятностным прогнозом облачности. Это приводит, как видно из рис. 1, к необходимости повторения съёмки в случае закрытия облаками снимаемого участка территории интереса. Таким образом, оптимальная рабочая программа, основанная на условиях, описанных выше, разработанная в комплексе планирования, на практике не решает возложенные на неё задачи и приводит к неэффективному использованию ресурса КА.

На рис. 2 схематично представлена некоторая территория интереса в моменты времени t_1 и t_2 . Данная территория интереса разделена на районы, на которые гипотетический заказчик устанавливает приоритетность съёмки, этот приоритет отмечен в ячейке первой цифрой. При этом каждый район имеет свою вероятность выполнения заявки на съёмку, влияние на вероятность выполнения в значительной мере оказывает облачность в районе интереса. Значение вероятности выполнения отмечено в каждой ячейке через наклонную черту. Как видно из рис. 2, необходимо учитывать не только приоритетность съёмки, но и возможность её выполнения с учётом смены приоритетов во времени, что приводит к необходимости учитывать как облачность в районе съёмки, так и неизменность приоритета. Примером потребителя данных с высокой динамикой изменения приоритетности может быть Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. С низкой динамикой приоритетности могут быть физические лица, которые заказывают съёмку, например, для решения задач кадастра или представления доказательств хозяйственной деятельности на земельном участке, находящемся в собственности.

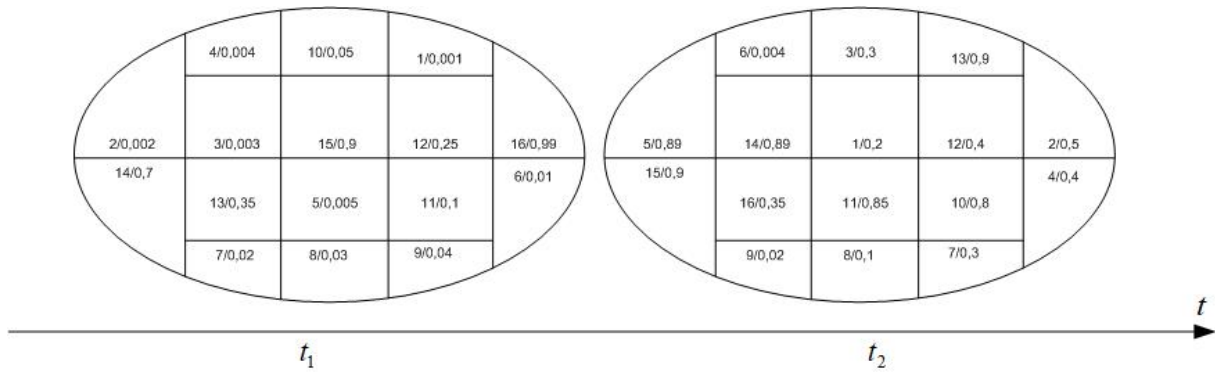


Рис. 2. Динамика изменения приоритетности и вероятности выполнения съёмки

Составим далее алгоритм планирования с ограничениями на планирование и особенности потребителя, учитывая его динамичность в изменении приоритетности заявок на съёмку.

Рассмотрим некоторые варианты постановки задачи на съёмку.

Вариант 1: отсутствуют ограничения съёмки по дате исполнения и ограничения, связанные с работой обеспечивающих систем КА. Оптимальным будет следующий вариант съёмки:

$$\min_i (t_k)_i, \text{ при условии } \sum_j S_{i,k,j} \geq S_{\text{общ}}^i,$$

где i – территория интереса; j – номер съёмки; k – вариант построения целевой задачи на интервале планирования; t_k – время, затрачиваемое на выполнение варианта k ; $S_{\text{общ}}^i$ – общая площадь территории для i -ой территории интереса; $S_{i,k,j}$ – площадь маршрута съёмки для i -ой территории интереса и k .

Вариант 1 постановки задачи на съёмку, наверное, можно назвать идеализированной постановкой задачи, т.к. при реальной постановке задачи всегда есть ограничение съёмки временным периодом, и есть вероятность не снять заявленную территорию в полном объёме, тогда исходное полное покрытие района интереса заменятся максимально возможным в заданном промежутке времени.

Вариант 2 от варианта 1 будет отличаться тем, что планирование съёмки ограничено временным интервалом. Оптимальным будет вариант, при котором результат съёмки (площадь отснятой территории) будет максимальным. Площадь покрытия i -ой территории интереса за выделенный интервал времени

$$R_{i,k} = \sum_j S_{i,k,j},$$

тогда решающее правило будет выглядеть следующим образом:

$$R_{\text{общ}} = \max_k \sum_i R_{i,k}. \quad (1)$$

Вариант 2 – это вариант для планирования без учёта приоритетов на съёмку (разграничения потребителей) и облачности в районах съёмки.

Вариант 3 от варианта 2 отличается учётом возможного наличия облаков над территорией интереса, а также учитывает тот факт, что потребители, отправившие заявку на съёмку, имеют разную категорию, которая может ускорить съёмку или отодвинуть заявку в очереди на съёмку. Для категорирования потребителей при планировании введём весовой коэффициент P_i , и введём параметр $C_{i,k,j}$ – коэффициент закрытия обла-

ками района интереса, который изменяется в диапазоне от 0 до 1. Тогда решающее правило для варианта 3 будет выглядеть следующим образом:

$$P_{\text{общ}} = \max_k \sum_i P_i \sum_j S_{i,k,j} C_{i,k,j}, \quad (2)$$

где $P_{\text{общ}}$ – показатель эффективности, выбранный из k вариантов рабочих программ, имеющий физический смысл снимаемой площади. Замена площади на показатель эффективности вводится для того, чтобы разделить понятие максимальной снимаемой площади и максимальной снимаемой площади, которая идёт для дальнейшего целевого применения.

Решающее правило (2) полностью учитывает приоритетность потребителей и возможность выполнения поставленной задачи. Однако вариант 3 и решающее правило (2) не учитывают динамику изменения приоритетности территории, пример которой был рассмотрен при анализе рис. 2. Таким образом, не имея возможности предсказать действия потребителя в конкретной съёмке разумно его действия описать вероятностной оценкой для данной съёмки. Введём вероятность неизменности приоритета $p_i^{\text{неизм}}$, т.е. будет ли интерес к заявленной территории сохраняться с тем же уровнем приоритетности. Чем выше вероятность неизменности приоритета, тем меньше динамика изменения приоритетности, тем стабильнее интерес потребителя к территории. Введя $p_i^{\text{неизм}}$, определим решающее правило для целевого планирования с учётом динамически изменяющихся задач следующим образом:

$$P_{\text{общ}} = \max_k \sum_i P_i p_i^{\text{неизм}} \sum_j S_{i,k,j} C_{i,k,j}. \quad (3)$$

Выражение (3) отражает максимальную величину показателя эффективности от набора съёмок в данной рабочей программе.

Для исследования алгоритма с решающим правилом (3) для формирования съёмочной программы КА было проведено статистическое имитационное моделирование влияния случайного набора параметров, используемых в формуле (3), на принятие решения о выборе набора съёмок в рабочей программе съёмочной аппаратуры, которая закладывается на борт КА. Моделирование проводилось со следующими исходными данными:

- пять вариантов снимаемой площади: 1 км² (номер варианта 1), 10 км² (номер варианта 2), 100 км² (номер варианта 3), 1000 км² (номер варианта 4) и 10 000 км² (номер варианта 5);
- случайные характеристики закрытия облачностью района съёмки;
- приоритетность и неизменность приоритета.

Закон распределения случайных величин был равномерным. Результатом моделирования стал вычисленный показатель эффективности для каждого из пяти значений снимаемой площади. В моделировании не учитывались такие факторы, как сезонность и расположение территории на поверхности Земли, сравнение количества заказчиков с потребностью снять одним маршрутом территорию в 10 000 км², 1 км² или других используемых вариантов, т.к. целью моделирования являлось сравнение рассматриваемых вариантов съёмки в равных условиях.

Сравнение результатов было проведено по двум направлениям:

1. Показатели эффективности сравнивались между собой, и тот, что был больше, выбирался со своим вариантом съёмки, который запоминался в каждом опыте, количество которых составляло 10 000.

2. Показатели эффективности по результатам опытов суммировались по всем 10 000 опытам для съёмок площадью 1 км², по 1000 опытам для съёмок площадью 10 км², по 100 опытам для съёмок площадью 100 км², по 10 опытам для съёмок площадью 1000 км², для площади 10 000 км² показатели эффективности были неизменны. Затем сумма показателей эффективности от съёмок в 1 км² сравнивалась с десятью показателями эффективности от суммы съёмок в 10 км², 100 показателями эффективности от суммы съёмок в 100 км², 1000 показателями эффективности от суммы съёмок в 1000 км² и 10 000 показателями эффективности от съёмки в 10 000 км². Показатели эффективности сравнивались между собой, и тот, что был больше, выбирался со своим вариантом съёмки, который запоминался в каждом опыте. Сравнений было 10 000. Результаты статистического имитационного моделирования представлены на рис. 3.

Аналогично было проведено моделирование для алгоритма с решающим правилом (2), получены результаты и для варианта, при котором отсутствует вероятность неизменности приоритета $p_i^{\text{неизм}}$. Полученные результаты представлены на рис. 4.

По варианту снимаемой площади 1 было проведено моделирование для алгоритма с решающим правилом (3) и (2) с расширенным числом сравнений, число которых составляло 10 000 000. Результаты статистического имитационного моделирования для этого эксперимента представлены на рис. 5.

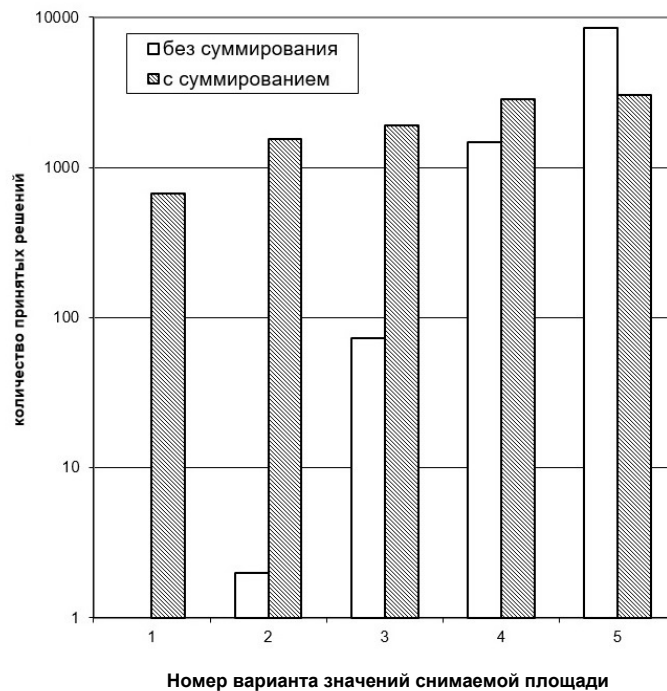


Рис. 3. Распределение количества принятых решений в пользу вариантов при моделировании алгоритма с решающим правилом (3) и числом сравнений 10 000

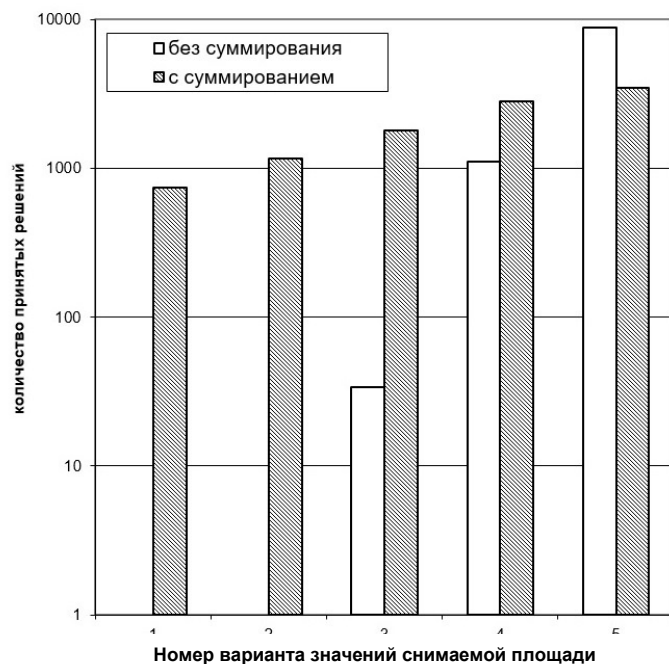


Рис. 4. Распределение количества принятых решений в пользу вариантов при моделировании алгоритма с решающим правилом (2) и числом сравнений 10 000

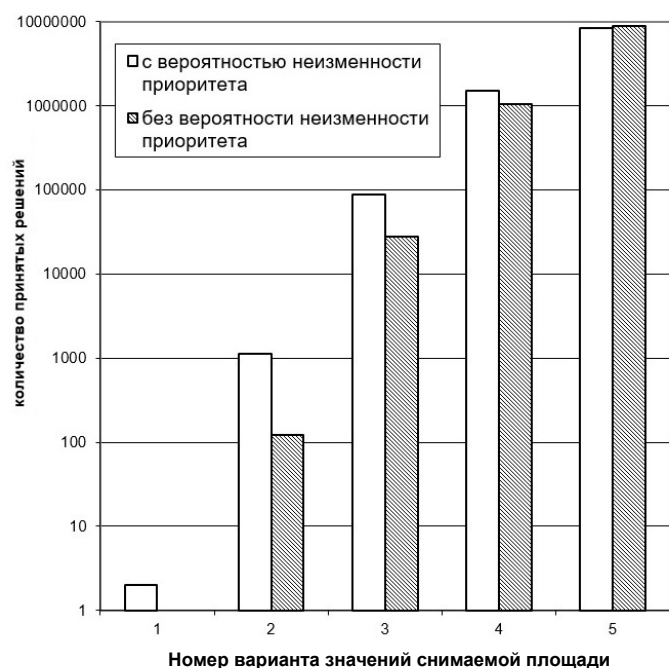


Рис. 5. Распределение количества принятых решений в пользу вариантов при моделировании алгоритма с решающим правилом (3) и числом сравнений 10 000 000

Из анализа диаграмм, представленных на рис. 3 – 5, можно сделать следующие выводы:

– максимизация площади съёмки без учёта облачности и вероятности неизменности приоритета не обеспечит эффективного использования КА при съёмке территорий, т.к. значительная облачность в районе съёмки сделает полученную информацию непригодной для целевого использования, а смена приоритета за время отработки заявки на съёмку сделает съёмку ненужной потребителю;

– совокупный набор съёмки может иметь показатель эффективности в ряде случаев больший, чем у одной большой территории, т.е. при планировании может быть ситуация, в которой планирование малых по площади территорий будет эффективнее планирования большой территории.

Необходимо отметить, что моделирование проводилось при условии, что разница по площади между вариантами отличалась порядками, при этом по условиям планирования расположение территории и сезонность не учитывались. Для сопоставления результатов моделирования с возможностями реального КА приведём используемые в моделировании площади к возможностям съёмки МКА «АИСТ-2Д». Минимальная снимаемая площадь МКА «АИСТ-2Д» составляет 400 км^2 , это определяется шириной полосы захвата в 40 км при съёмке в надир [1]. Тогда анализируемые варианты будут различаться следующим образом: 400 км^2 (номер варианта 1), 4000 км^2 (номер варианта 2), $40\,000 \text{ км}^2$ (номер варианта 3), $400\,000 \text{ км}^2$ (номер варианта 4) и $4\,000\,000 \text{ км}^2$ (номер варианта 5). Вариант 5 практически невозможно отснять одним маршрутом, в том числе несколькими за сутки, а вариант 4 трудно отснять. Тем не менее вариант 1 при моделировании мог конкурировать с вариантами 4 и 5, что говорит о необходимости учитывать все представленные в формуле (3) значения для точного составления программы съёмки КА в рабочей программе.

Для демонстрации закрытия облаками районов съёмки представлены рис. 6 – 11. На рисунках в левой части изображён маршрут съёмки над потенциальной территорией интереса, а в правой он же, но с добавлением уровня облачности. Данные получены с помощью специального программного обеспечения наземных средств управления, приёма и обработки информации МКА «АИСТ-2Д» [1]. Из рисунков видно, что увеличение полосы захвата не приведёт к получению большей информации о снимаемой территории. На всех континентах встречается ситуация, при которой съёмка маршрута широкой полосой захвата и узкой не будет значительно отличаться по объёму полученной для целевого использования информации, т.к. облачность на маршруте не позволяет получить информацию о состоянии подстилающей поверхности Земли.

Из результатов моделирования и данных, полученных с помощью специального программного обеспечения наземных средств управления, приёма и обработки информации МКА «АИСТ-2Д», можно сделать следующий вывод: алгоритм планирования с решающим правилом (3) работоспособен и адаптивен для планирования съёмки для различных групп потребителей в различных условиях съёмки. При этом группировка нескольких КА с малой полосой захвата, суммарно совпадающей с одним КА с широкой полосой захвата при одинаковом пространственном разрешении и других одинаковых параметрах обеспечивающего и целевого оборудования, с учётом планирования съёмки по (3), может быть эффективнее одного КА с широкой полосой захвата.



6



6



6

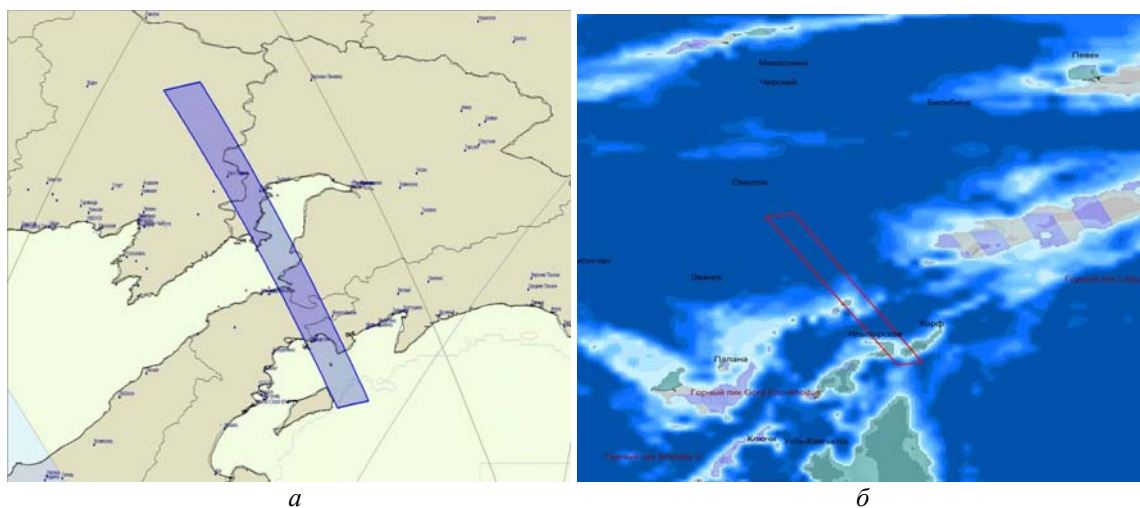


Рис. 9. Маршрут съёмки над территорией Дальнего Востока:
а – без облачности; б – с учётом облачности

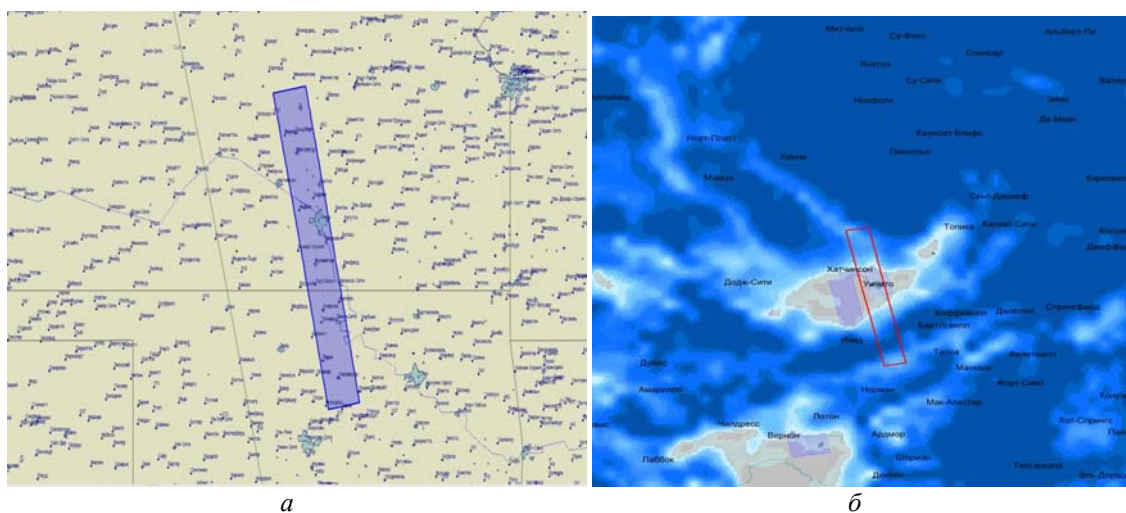


Рис. 10. Маршрут съёмки над территорией Северной Америки:
а – без облачности; б – с учётом облачности

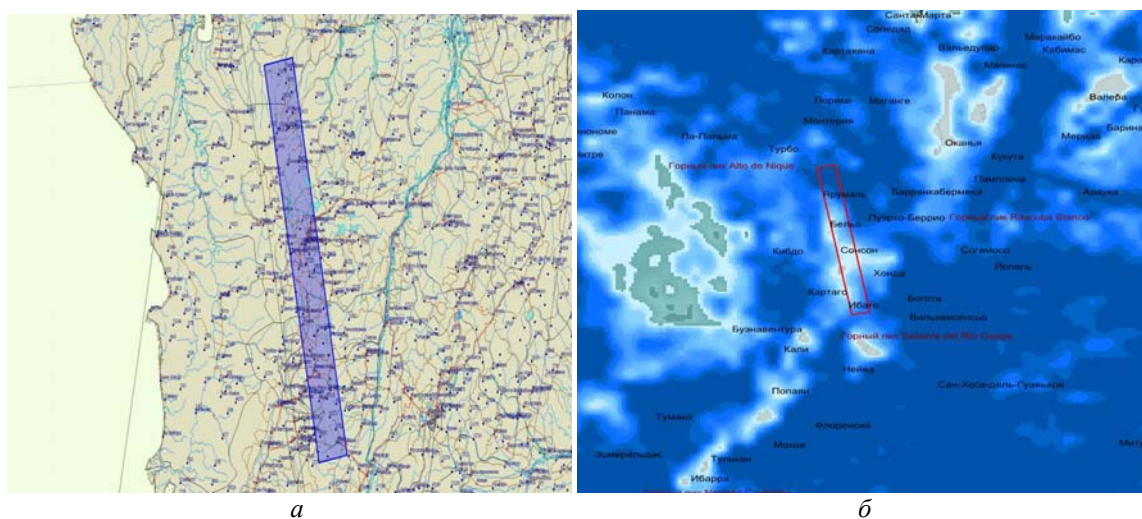


Рис. 11. Маршрут съёмки над территорией Южной Америки:
а – без облачности; б – с учётом облачности

Исходя из решающего правила (3) и результатов моделирования, можно сделать следующие выводы.

1. Алгоритм планирования с решающим правилом (3) эффективен при планировании съёмки для различных групп потребителей в различных условиях съёмки.

2. При реализации заявок низкоприоритетных потребителей алгоритм планирования по формуле (3) позволит более эффективно использовать возможности КА, особенно это важно для коммерческого использования.

Библиографический список

1. Кирилин А.Н., Аншаков Г.П., Шахматов Е.В., Ткаченко С.И., Бакланов А.И., Салмин В.В., Сёмкин Н.Д., Ткаченко И.С., Горячкин О.В. Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д». Самара: СамНЦ РАН, 2017. 324 с.

2. Ахметов Р.Н., Стратилатов Н.Р., Абрашкин В.И., Халилов Р.Р., Ткаченко С.И., Космодемьянский Е.В., Борисов М.В., Ткаченко И.С., Вагнер О.И., Нураева С.П., Власенко О.В. Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д». Первые результаты и перспективы // Сб. материалов XIII Научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли» (12-18 сентября 2016 г., Сочи). Калуга: Манускрипт, 2016. С. 23-27.

3. Sun K., Li J., Chen Y., He R. Multi-objective mission planning problem of agile Earth observing satellites // Proceedings of the 12th International Conference on Space Operations (June, 11-15, 2012, Stockholm, Sweden). 2012. DOI: 10.2514/6.2012-1294148

4. Малышев В.В., Бобронников В.Т., Дарнопов В.В., Шидловский А.В. Планирование целевого функционирования спутниковых систем мониторинга: учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 2002. 79 с.

5. Галузин В.А., Симонова Е.В. Планирование съёмки площадных объектов наблюдения группировкой космических аппаратов // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20, № 6-2 (86). С. 344-351.

6. Скобелев П.О., Скимунт В.К., Симонова Е.В., Жилев А.А., Травин В.С. Планирование целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с использованием мультиагентных технологий // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 10 (171). С. 60-70.

7. Горелов Ю.Н., Юрин В.Е. Об оптимальном многомаршрутном сканировании для космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15, № 6. С. 140-147.

8. Емельянов А.А., Малышев В.В., Смольянинов Ю.А., Старков А.В. Формализация задачи оперативного планирования целевого функционирования разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ. 2017. № 96. <https://trudymai.ru/published.php?ID=85921&mobile=Y>

EFFECTIVE TARGETED PLANNING OF OPTOELECTRONIC SPACECRAFT OPERATION

© 2025

R. R. Khalilov

Candidate of Science (Engineering), Head of the “Samara” Processing and Distribution Center;
Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress, Samara, Russian Federation;
khalilovr82@mail.ru

The article presents an algorithm for optimizing targeted operation of spacecraft by including in the planning algorithm the requirements for distinguishing consumers, clouds and dynamics of changing the priority of survey areas. The article also presents the results of statistical simulation of the developed algorithm and highlights the key conclusions necessary for the organization of work on the development of commercial remote sensing of the Earth from space, as well as the development of spacecraft based on constellations of small spacecraft.

Target planning; spacecraft; statistical simulation; constellation of small spacecraft

Citation: Khalilov R.R. Effective targeted planning of optoelectronic spacecraft operation. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2025. V. 24, no. 2. P. 87-97. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-87-97

References

1. Kirilin A.N., Anshakov G.P., Shakhmatov E.V., Tkachenko S.I., Baklanov A.I., Salmin V.V., Semkin N.D., Tkachenko I.S., Goryachkin O.V. *Opytno-tekhnologicheskii malyy kosmicheskii apparat «AIST-2D»* [Experimental and technological small spacecraft AIST-2D]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2017. 324 p.
2. Akhmetov R.N., Stratilatov N.R., Abrashkin V.I., Khalilov R.R., Tkachenko S.I., Kosmodem'yanskiy E.V., Borisov M.V., Tkachenko I.S., Vagner O.I., Nuraeva S.P., Vlasenko O.V. *Opytno-tekhnologicheskii malyy kosmicheskii apparat «AIST-2D». Pervye rezul'taty i perspektivy. Sb. Materialov XIII Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii «Sistemy Nablyudeniya, Monitoringa i Distantionnogo Zondirovaniya Zemli» (September, 12-18, 2016, Sochi)*. Kaluga: Manuscript Publ., 2016. P. 23-27. (In Russ.)
3. Sun K., Li J., Chen Y., He R. Multi-objective mission planning problem of agile Earth observing satellites. *Proceedings of the 12th International Conference on Space Operations (June, 11-15, 2012, Stockholm, Sweden)*. 2012. DOI: 10.2514/6.2012-1294148
4. Malyshev V.V., Bobronnikov V.T., Darnopykh V.V., Shidlovskiy A.V. *Planirovanie tselevogo funktsionirovaniya sputnikovykh sistem monitoringa: ucheb. posobie* [Planning targeted functioning of satellite monitoring systems]. Moscow: MAI Publ., 2002. 79 p.
5. Galuzin V.A., Simonova E.V. Planning the surveying of area observation objects by a group of spacecrafts. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2018. V. 20, no. 6-2 (86). P. 344-351. (In Russ.)
6. Skobelev P.O., Skirmunt V.K., Simonova E.V., Zhilyaev A.A., Travin V.S. Planning for target application of a group of earth remote sensing satellites using multi-agent technologies. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2015. No. 10 (171). P. 60-70. (In Russ.)
7. Gorelov Yu.N., Yurin V.E. About the optimal multiroute sensing problem for the earth remote'sensing satellites. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2013. V. 15, no. 6. P. 140-147. (In Russ.)
8. Emelyanov A.A., Malyshev V.V., Smolyaninov Yu.A., Starkov A.V. Formalization of the problem of operative target functioning of diverse spacecraft for remote Earth probing. *Trudy MAI*. 2017. No. 96. (In Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=85921&mobile=Y>