

АЛГОРИТМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ОТ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА НАЗЕМНЫЕ СТАНЦИИ

Павлов Д. А.¹, канд. физ.-мат. наук, доцент, ✉ dapavlov@etu.ru

Кодуков А. В.¹, Магистрант, akodukovich@mail.ru

Субботин М. О.¹, Магистрант, maksim@entroforce.ru

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, 5, корп. 3, 197022, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Рассмотрена задача планирования расписания работы космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ). Особенностью данной задачи является то, что КА может в каждый момент времени осуществлять съёмку земной поверхности или передачу данных на станцию на Земле, но не может снимать и передавать одновременно. В работе предложены два подхода к решению задачи: «жадный» алгоритм и комбинаторный метод булевой оптимизации с ограничениями. Работа выполнялась в рамках конкурса «Лидеры цифровой трансформации», организованного правительством Москвы. Задача была предложена компанией «Спутникс» (дочернее предприятие АО «Ситроникс») с целью применения в будущей системе из 200 КА и 14 наземных станций.

Ключевые слова: комбинаторная оптимизация, теория расписаний.

Цитирование: Павлов Д. А., Кодуков А. В., Субботин М. О. Алгоритмы планирования передачи данных от космических аппаратов на наземные станции // Компьютерные инструменты в образовании. 2025. № 1. С. 108–117. doi:10.32603/2071-2340-2025-1-108-117

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России есть планы создания крупных орбитальных группировок для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ, федеральный проект «Сфера», развиваемый госкорпорацией «Роскосмос»; частный проект АО «Ситроникс»). При количестве космических аппаратов (КА) в этих группировках, исчисляемом сотнями, становится нетривиальной задачей составление расписания передачи данных на наземные станции. При неоптимальном планировании возникнет проблема расходования ресурсов КА «впустую» (съёмка данных, которые впоследствии не будут переданы или, наоборот, недостаток данных для передачи при вхождении КА в зону видимости наземной станции). Это ведёт к снижению оперативности и возрастанию финансовых издержек. В этой связи востребована разработка алгоритма планирования съёмки и передачи данных с учетом периодов видимости территории с КА и периодов вхождения КА в зоны видимости станций.

В данной работе исследована и решена задача, соответствующая проектируемой спутниковой группировке АО «Ситроникс», состоящей из 200 КА, находящихся на низких околоземных солнечно-синхронных орбитах: по 10 равноудалённых КА в каждой из 20 плоскостей, равномерно разнесённых по долготе восходящего узла. Орбиты круговые с высотой 600 км; один виток вокруг Земли занимает около 6000 с, из которых в среднем 500 с КА находится над территорией России.

Технические параметры КА, релевантные для настоящей задачи, приведены в таблице 1. Для приёма данных планируется использовать 14 наземных станций, перечисленных в таблице 2.

Таблица 1. Параметры КА

Наименование КА	Киносат	Зоркий
Количество КА	50	150
Скорость записи в бортовое ЗУ	4 Гбит/с	4 Гбит/с
Объём бортового ЗУ	1 ТБ	0.5 ТБ
Скорость передачи данных	1 Гбит/с	0,25 Гбит/с

Таблица 2. Местоположение приёмных станций

Населённый пункт	Количество станций
Москва	1
Мурманск	2
Дудинка (Норильск)	1
Иркутск	1
Магадан	2
Анадырь	2
Новосибирск	1
Кейптаун (ЮАР)	1
Дели (Индия)	1
о. Суматра (Индонезия)	1
Рио-Гальегос (Аргентина)	1

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Требуется разработать алгоритм составления оптимального расписания сеансов передачи данных со спутниковой группировки на наземные станции по данным интервалов видимостей спутников каждой станцией и интервалов накопления данных спутниками. Оптимизируемой величиной является объём переданной со спутников информации.

Пусть даны N_{sat} спутников и N_{obs} земных станций ($N_{sat} = 200$, $N_{obs} = 14$). Для каждого спутника под номером $isat$ дано множество интервалов времени $Irec_{irec}^{isat}$, в течение которых спутник может записывать данные ДЗЗ. Для каждой пары «спутник-станция» дано множество интервалов времени $Itx_{itx}^{isat,iobs}$, в течение которых спутник $isat$ может передавать данные на станцию $iobs$. Для спутников заданы: объём ЗУ C_{isat} , скорость съёмки R_{isat} и скорость передачи данных T_{isat} . Считается, что скорость передачи данных со спутника на все станции одинакова.

Суммарное количество интервалов I_{tx} составляет около 320000, I_{rec} — около 20000.

Спутник обязан вести съёмку, если находится в допустимом для съёмки интервале и не передаёт данные. Съёмка ведётся даже в том случае, когда ЗУ полностью заполнено (старые данные при этом удаляются из памяти). Изначально ЗУ всех спутников пусты. Спутник не может передавать данные при пустом ЗУ.

Спутник не может одновременно передавать данные на две и более станций. Станция не может одновременно принимать данные с двух и более спутников. Переключение спутника с режима съёмки на режим передачи и обратно можно производить мгновенно в любой момент. Переключение передачи спутника с одной станции на другую также можно производить мгновенно в любой момент. Однако станция $iobs$, начавшая принимать данные со спутника $isat$, не может переключиться на другой спутник до конца соответствующего интервала $I_{tx}^{isat,iobs}$.

Из данных условий следует, что спутник, начавший передавать данные на станцию, не должен до конца соответствующего интервала передавать данные на другие станции, так как это не несёт никакой выгоды: изначальная станция будет в это время «простаивать».

Обозначим поставленную задачу RTX (Recording and Transmission Scheduling).

Заметим, что в настоящей постановке не учитываются некоторые технические особенности работы спутников и станций (например, время, требуемое для перенаведения станции на другой спутник), однако есть основания полагать, что основные алгоритмические решения, рассматриваемые в работе, не претерпят существенных изменений в применении к более детально поставленной задаче.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧИ

Задачи составления расписаний в целом хорошо исследованы; в меньшей степени исследована специфика составления расписаний для передачи данных ДЗЗ со спутников. Приведём в качестве примера две публикации с описанием двух задач, напоминающих RTX:

1. “Integrated Satellite Imaging and Data Transmission Scheduling Problem” (ISIDTSP) [1]. Её отличие от данной задачи заключается в наличии мишеней, которые спутник должен снимать.
2. “Satellite Range Scheduling Problem” [2]. Элементами задачи выступают спутники, станции и зоны видимости станций спутниками.

Публикаций с постановками задачи, в которых бы явно упоминались ограничения на максимальный объём данных и допустимые интервалы съёмки, в открытых источниках обнаружено не было.

Тем не менее, можно сделать выводы о вычислительной сложности поставленной задачи на основе анализа задач, проведённого в данных публикациях. В общем виде задачи ISIDTSP и SRS NP-полные. Задача SRS с некоторыми упрощениями и при фиксированном количестве станций может быть решена полиномиальным алгоритмом со сложностью $O(NI(Nsat+1)^{Nobs})$, что, очевидно, не имеет практического применения при имеющемся количестве спутников и станций.

Поскольку SRS может быть сведена к RTX, можно заключить, что математически оптимальное расписание при данном количестве спутников, станций и допустимых интервалов съёмки и передачи невозможно вычислить за приемлемое время детерминирован-

ным алгоритмом. В работе предложены и сравнены два эвристических метода составления расписания, основанные на следующих принципах:

1. Дискретность (постановка задачи с использованием дискретных, а не непрерывных интервалов съёмки и передачи).
2. Локальность (оптимизация расписания не на всём периоде моделирования, а на небольших последовательных отрезках времени).

4. ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ

Оба предлагаемых метода составления расписания основаны на одинаковой дискретизации заданных непрерывных допустимых интервалов съёмки и передачи. Назовём этот этап сегментацией.

4.1. Сегментация

Создаётся сетка непересекающихся, не считая граничных точек, интервалов времени (будем называть их сегментами), узлами которой являются границы исходных интервалов $\{I_{rec}\}$ и $\{I_{tx}\}$. Считается, что в каждом сегменте каждый спутник может производить лишь какое-то одно действие из следующего перечня:

1. Передача данных на одну из станций (без переключения на другую станцию).
2. Съёмка.
3. Режим ожидания.

Аналогично, в каждом сегменте каждая станция может производить лишь одно из двух действий:

1. Приём данных с одного спутника (без переключения на другой).
2. Режим ожидания.

Перечень возможных действий на каждом сегменте однозначно определяется из входных данных.

Единственным исключением из данного правила является ситуация, когда данные в ЗУ спутника закончились в процессе передачи; в таком случае передача прекращается и в оставшееся время данного сегмента спутник либо ведёт съёмку (если в данном сегменте она разрешена), либо бездействует. Сегменты обрабатываются в том порядке, в котором они расположены на шкале времени. Принятие решения о выполнении передачи или съёмки для каждого объекта происходит внутри каждого сегмента на основе доступного набора действий в сегменте и входных параметров:

- количество данных в ЗУ каждого спутника,
- привязка каждой станции к спутнику (если станция получала с этого спутника данные ранее на данном интервале видимости),
- скорость записи данных каждым спутником,
- скорость передачи данных каждым спутником.

Объём данных в ЗУ спутника обновляется по результатам составления расписания на данном сегменте: добавляется объём данных при съёмке (с контролем переполнения) или вычитается объём данных при передаче (с недопущением выхода в отрицательную область). Статус привязки станций к спутникам также обновляется: создаётся (или продолжается) привязка в случае, если станция получает данные со спутника, и удаляется в случае, когда на сегменте становится невозможной передача данных с этого спутника на эту станцию.

Количество сегментов для имеющихся входных данных составило около 500000.

4.2. Оптимизация (жадный алгоритм)

Был реализован алгоритм, сортирующий спутники по некоторой метрике для каждого сегмента. Лучшим спутникам отдаются свободные станции. Система приоритетов спутников (в порядке убывания важности):

1. Спутник, который уже начал передачу в своем интервале видимости станции, приоритетнее спутника, который не начал передачу.
2. Спутник, которому хватает данных для непрерывной передачи в течение 700 секунд (максимумы интервалов передачи имеют близкое значение), приоритетнее спутника, у которого нет такого количества данных.
3. Если предыдущие критерии равны, то вычисляется оценка

$$w_1 \times [1 - (S_i/S)] + w_2 \times (V_i/C_i) + w_3 \times isKinosat,$$

где S_i — количество станций, доступных для передачи данных для i -го спутника; S — количество станций, доступных для передачи данных вообще; V_i — текущий объём данных в ЗУ i -го спутника; C_i — объём ЗУ i -го спутника; $isKinosat = 1$, если i -й спутник является Киносатом, и 0 — если Зорким.

Спутник, у которого эта оценка больше, является более приоритетным.

Для каждого спутника видимые станции сортируются следующим образом (в порядке убывания важности):

1. Станция, уже принимающая данные с этого спутника, имеет приоритет.
2. Станция, которой доступно большее количество спутников, имеет приоритет.

С использованием полуавтоматической процедуры были подобраны веса $w_1 = 0,6$, $w_2 = 0,2$, $w_3 = 0,1$.

4.3. Оптимизация (точный алгоритм на сегменте)

В рамках одного сегмента есть возможность точно решить оптимизационную задачу. Переменные в этой задаче являются булевыми (0 / 1); каждая переменная отвечает за действие какого-то из спутников: передачу данных на какую-то станцию или съёмку.

$Yrec_i$ — переменная, равная 1, если i -й спутник ведёт съёмку на текущем сегменте. Ytx_{ij} — переменная, равная 1, если i -й спутник передаёт данные на j -ю станцию на текущем сегменте.

Соблюдение правил, указанных в постановке задачи, реализовано ограничениями линейного вида, перечисленными в таблице 3.

Оптимизации подлежит линейная функция от всех булевых переменных данного сегмента. Коэффициенты этой функции были подобраны на основе следующих принципов:

1. Должно быть передано как можно больше данных.
2. Спутники, в ЗУ которых осталось мало данных, должны вести съёмку.
3. Спутники, ЗУ которых близко к переполнению, должны вести передачу.

Функция имеет следующий вид (суммирование идёт по всем спутникам):

$$f = \sum (D_i) + W \sum (P_i \times (F - V_i/C_i)),$$

где P_i — объём отснятого на сегменте материала i -м спутником, V_i — текущий объём данных в ЗУ i -го спутника, C_i — объём ЗУ i -го спутника, D_i — объём переданных на станцию

Таблица 3. Ограничения при решении комбинаторной задачи

Условие	Ограничение
Станция не может принимать данные с более чем одного спутника.	Сумма соответствующих переменных не превосходит 1.
Станция, привязанная на этом сегменте к спутнику, не может получать данные с других спутников.	Сумма переменных, соответствующих передаче данных с других спутников, равна 0.
Спутник не может передавать данные на более чем одну станцию. (Случай, когда к спутнику не привязана станция и он не может снимать).	Сумма переменных, соответствующих передаче с этого спутника на все доступные станции, не превосходит 1.
Спутник, не может передавать данные на более чем одну станцию и должен снимать, если не передаёт данные (Случай, когда к спутнику не привязана станция и он может снимать).	Сумма переменных, соответствующих передаче с этого спутника на все доступные станции, и переменной, соответствующей ведению съёмки данным спутником, равна 1.
Спутник должен передавать данные только к той станции, к которой привязан.	Сумма переменных, соответствующих передаче данных с этого спутника на другие станции, равна 0.
Спутник, должен снимать, если не передаёт данные. (Случай, когда к спутнику привязана станция и он может снимать).	Сумма двух переменных, соответствующих съёмке данных спутником и передаче данных с него на данную станцию, равна 1.

данных i -м спутником (не превышает текущего количества данных в ЗУ). $W = 20, F = 0,8$. P_i и D_i являются линейными функциями от булевых переменных (суммирование идёт по булевым переменным):

$$P_i = \sum Yrec_i \times L \times R_i, \quad D_i = \sum Ytx_{ij} \times \min(V_i, L \times T_i).$$

Первое слагаемое отвечает за совокупность переданных данных, второе слагаемое отвечает за соблюдение 2-го и 3-го вышеуказанных принципов. Это слагаемое имеет важное значение: при его отсутствии нередки ситуации, когда спутник передаёт данные во время пролёта над Россией, а на следующем витке бездействует, так как летит уже не над Россией с пустым ЗУ. Напротив, при заполнении ПЗУ более чем на 80 % спутник получает приоритет для передачи данных. Числовые параметры W и F были подобраны экспериментально.

Количество булевых переменных и ограничений варьируется между сегментами и при имеющихся входных данных составляет около 120 переменных и около 215 ограничений. Поставленная оптимизационная задача может трактоваться как задача целочисленного программирования или как задача булевой оптимизации с ограничениями. Были рассмотрены следующие солверы (решатели) подобных задач с открытым исходным кодом:

- Cbc: <https://github.com/coin-or/Cbc>
- GLPK: <https://www.gnu.org/software/glpk/>
- LPSolve: <https://lpsolve.sourceforge.net/>
- SCIPopt: <https://www.scipopt.org/>
- HiGHS: <https://github.com/ERGO-Code/HiGHS>
- Or-tools: <https://developers.google.com/optimization>

Была выбрана библиотека or-tools на основании хороших отзывов о её эффективности, а также по той причине, что эта библиотека содержит модуль, предназначенный для

решения задач именно булевой оптимизации (CP-SAT Solver); тогда как большая часть других библиотек предназначена для решения более общей задачи целочисленного программирования (integer programming) или смешанно-целочисленного (mixed integer programming).

Примечания:

1. Оптимизируемая функция в выбранном солвере может быть только целочисленной; по этой причине величины, используемые в вышеприведённых уравнениях, были умножены на 1000 и округлены до целых.

2. Один из подходов к решению задачи ISIDTSP заключается в сведении к задаче целочисленного программирования. Частично этот подход воплотился в решении задачи RTXS.

3. Решение оптимизационной задачи в совокупности на всех сегментах, или на значительном их количестве, было бы возможным при наличии солвера, способного работать с системой, содержащей миллионы переменных (лучшим из известных коммерческих солверов является Gurobi), и соответствующих аппаратных ресурсов. В данной работе было принято решение обойтись свободно доступным солвером и более скромными ресурсами.

4.4. Валидация

Валидация является опциональным, но тем не менее важным этапом составления расписания, так как позволяет выявить технические ошибки в программе, которые затруднительно обнаружить иным способом. Были выполнены проверки на отсутствие:

- пересекающихся временных интервалов для одного объекта,
- нулевых интервалов,
- интервалов передач, в которых станция взаимодействует с двумя спутниками одновременно,
- интервалов съёмки, где это не разрешено исходным графиком спутника,
- интервалов передачи, где это не разрешено исходным графиком станций.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

5.1. Основные показатели

В таблице 4 приведены результаты, полученные на единственном доступном множестве входных данных двумя методами (жадный алгоритм и точный алгоритм оптимизации на сегменте). На рисунке 1 приведено количество переданных данных за каждый из 13 дней моделирования.

Таблица 4. Основные показатели

Показатель	Жадный алгоритм	Точный алгоритм на сегменте
Объём переданных данных	6089299 Гбит = 761162 ГБ = 743.322 ТБ	6525123 Гбит = 815640 ГБ = 796.523 ТБ
Время работы программы	Около 1 минуты*	Около 20 минут*
Валидация	Пройдена	Пройдена

* На процессоре Intel Core i5-11600 @ 2.80GHz

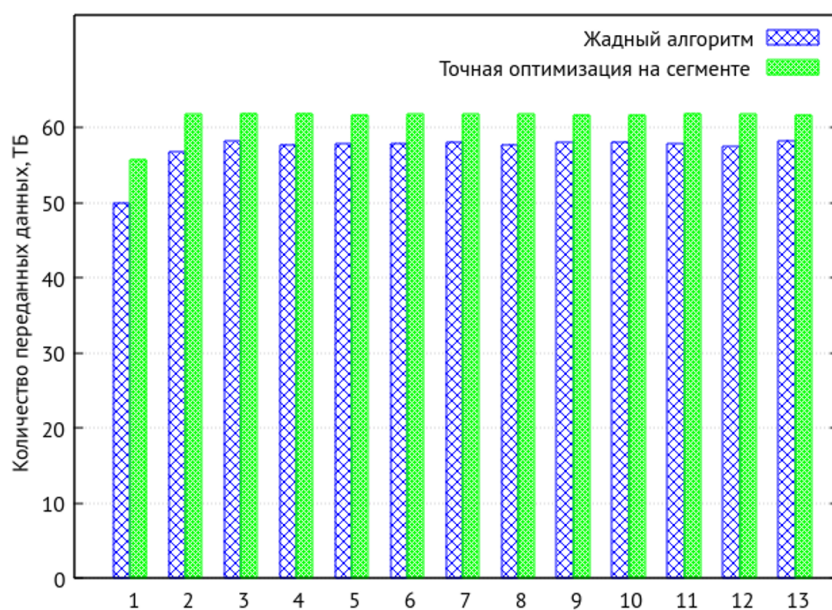


Рис. 1. Количество переданных данных по дням

5.2. Графическое представление расписания

На рисунках 2 и 3 приведены карты расписаний, полученных вторым методом. По оси абсцисс отложено время (в часах), по оси ординат — порядковый номер спутника. Толстые серые отрезки — интервалы видимости России. Яркие зелёные отрезки — съёмка. Тонкие отрезки — интервалы радиовидимости станций (каждой из 14 станций назначен свой цвет). Толстые цветные отрезки — передача данных на станцию соответствующего цвета.

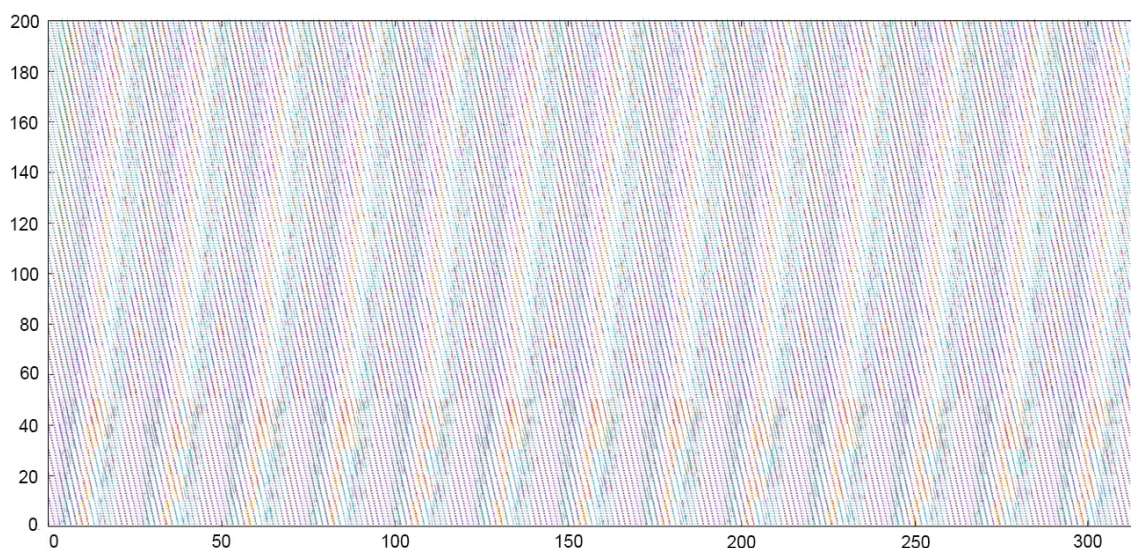


Рис. 2. Расписание для всех спутников на весь период моделирования

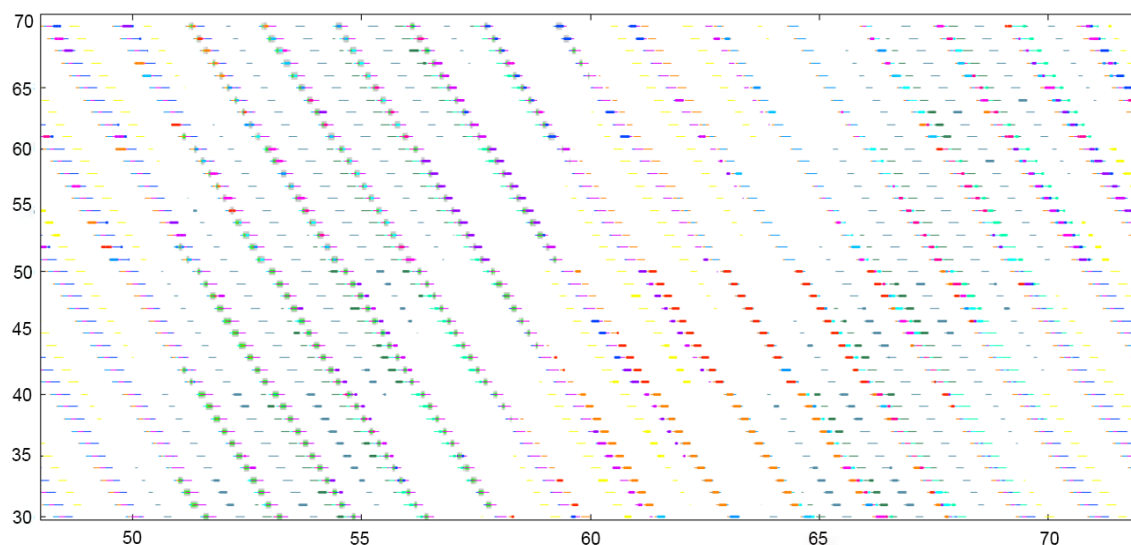


Рис. 3. Фрагмент: расписание для 20 Кинопутников и 20 Зорких на третьи сутки

6. ВЫВОДЫ

Впервые (на основании сведений, имеющих у авторов) была рассмотрена задача составления расписания работы КА, включающая одновременно два режима работы КА (съёмка и передача). Предложены два метода составления расписания, оперирующие дискретными сегментами, на которые разбиваются исходные доступные интервалы съёмки и передачи. Оба метода локально оптимизируют решения на сегменте: первый метод использует «жадный» алгоритм, второй — точный алгоритм целочисленной оптимизации с ограничениями.

Репозиторий с исходными кодами программы находится по адресу: <https://github.com/S1ckkick/BulbSchedule>. На тестовых данных, предоставленных АО «Ситроникс», второй метод показал преимущество в итоговом количестве переданных данных на 7 %, в то время как первый метод ожидаемо показал существенно лучшее время работы (1 мин против 20 мин).

Список литературы

1. Zhang J., Xing L. An improved genetic algorithm for the integrated satellite imaging and data transmission scheduling problem // Computers and Operations Research, 2022. Vol. 139. P. 105626. doi:10.1016/j.cor.2021.105626
2. Vazquez Alvarez A. J., Erwin R. S. An Introduction to Optimal Satellite Range Scheduling. New York City, NY, USA: Springer International Publishing, 2015. doi:10.1007/978-3-319-25409-8

Поступила в редакцию 14.01.2025, окончательный вариант — 10.02.2025.

Павлов Дмитрий Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры алгоритмической математики СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ✉ dapavlov@etu.ru

Кодуков Александр Владимирович, Студент программы магистратуры, кафедра алгоритмической математики СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ✉ akodukovich@mail.ru

Субботин Максим Олегович, Студент программы магистратуры, кафедра алгоритмической математики СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ✉ maksim@entroforce.ru

Computer tools in education, 2025

№ 1: 108–117

<http://cte.eltech.ru>

[doi:10.32603/2071-2340-2025-1-108-117](https://doi.org/10.32603/2071-2340-2025-1-108-117)

Scheduling Data Transfer from Spacecraft to Ground Stations

Pavlov D. A.¹, Cand. Sc., Associate Professor, ✉ dapavlov@etu.ru
Kodukov A. B.¹, Master's Degree student, akodukovich@mail.ru
Subbotin M. O.¹, Master's Degree student, maksim@entroforce.ru

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, 5, building 3, Professora Popova st., 197022, Saint Petersburg, Russia

Abstract

We propose solutions to the problem of scheduling the operations of remote sensing spacecraft, with the specific feature that each of the spacecraft can at any moment transfer data to Earth, or perform observations and record data, but cannot record and transfer simultaneously. We compare two approaches: a greedy algorithm and a method based on discrete optimization with constraints. The work was done during a contest, where Sputnik LLC has provided data and problem statement, with the aim to adapt the developed methods for a constellation of 200 satellites which transfer data to 14 ground stations.

Keywords: *Combinatorial optimization, Optimal job scheduling.*

Citation: D. A. Pavlov, A. B. Kodukov, and M. O. Subbotin, "Scheduling Data Transfer from Spacecraft to Ground Stations," *Computer tools in education*, no. 1, pp. 108–117, 2025 (in Russian); [doi:10.32603/2071-2340-2025-1-108-117](https://doi.org/10.32603/2071-2340-2025-1-108-117)

References

1. J. Zhang and L. Xing, "An improved genetic algorithm for the integrated satellite imaging and data transmission scheduling problem," *Computers & Operations Research*, vol. 139, p. 105626, 2022; [doi:10.1016/j.cor.2021.105626](https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105626)
2. A. J. Vazquez Alvarez and R. S. Erwin, *An Introduction to Optimal Satellite Range Scheduling*, New York City, NY, USA: Springer International Publishing, 2015; [doi:10.1007/978-3-319-25409-8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-25409-8)

Received 14-01-2025, the final version — 10-02-2025.

Dmitry Pavlov, Candidate of Sciences (Phys.-Math.), Associate Professor of the Algorithmic Mathematics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University, ✉ dapavlov@etu.ru

Alexander Kodukov, Master's Degree student, Algorithmic Mathematics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University, akodukovich@mail.ru

Maksim Subbotin, Master's Degree student, Algorithmic Mathematics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University, maksim@entroforce.ru