

УДК 629.7.086 DOI 10.30894/issn2409-0239.2023.10.2.83.88 EDN ZUUNHM

Анализ эффективности алгоритмов перенацеливания наземного радиотехнического измерительного средства при планировании сеансов связи с космическими аппаратами

В. С. Григорьев, *grigorev.vs@phystech.edu*

ПАО «МАК «Вымпел», Москва, Российская Федерация

А. В. Ксендзук, *д. т. н., ks_alex@mail.ru*

ПАО «МАК «Вымпел», Москва, Российская Федерация

Аннотация. При планировании сеансов связи с космическими аппаратами для измерительных средств с конечной скоростью перенацеливания необходимо учитывать время, затрачиваемое на переключение. В работе предложено 2 базовых алгоритма перенацеливания («приоритет текущему», «приоритет следующему»). Проведено сравнение базовых алгоритмов и алгоритма локального среднегеометрического с помощью вычислительного эксперимента: формировалось 100 суточных планов для 100 космических аппаратов связи. Сравнение производилось по метрике среднегеометрического и метрике минимального значения. По результатам эксперимента определено, что лучшим по среднегеометрической метрике является алгоритм «приоритет текущему», по метрике минимального значения — алгоритм локального среднегеометрического.

Ключевые слова: оптимизация сеансов связи, планирование наблюдений, космическое моделирование, космические аппараты

Effectiveness Analysis of Redirection Algorithms for Ground-Based Radio Engineering Instruments in Planning Communication Sessions with Spacecraft

V. S. Grigorev, *grigorev.vs@phystech.edu*

PJSC Vimpel Corporation, Moscow, Russian Federation

A. V. Ksendzuk, *Dr. Sci. (Engineering), ks_alex@mail.ru*

PJSC Vimpel Corporation, Moscow, Russian Federation

Abstract. When planning communication sessions with spacecraft for measuring instruments with a finite redirection speed it is necessary to take into account the time spent on switching. The paper proposes two basic redirection algorithms (“priority to current”, “priority to next”). A comparison of basic algorithms and local average geometric algorithm was performed by a computational experiment: 100 daily plans for 100 communication spacecraft were formed. The comparison was done using the geometric mean metric and minimum value metric. According to experimental results it was determined that the best algorithm by the geometric mean metric is “priority to current”, and the algorithm of local geometric mean metric by the minimal value metric.

Keywords: optimization of communication sessions, observation planning, space simulation, spacecraft

Введение

В настоящее время активно развиваются многоспутниковые системы передачи информации и дистанционного зондирования [1, 2]. Обмен данными с космическими аппаратами в составе таких созвездий предполагает оптимизацию сеансов связи по критериям достаточности и оперативности получения информации, в том числе при ранжировании важности данных, полученных каждым из спутников [3,4]. Такой критерий обеспечивает максимальную информативность полученных данных.

Разработка методов и алгоритмов наведения возможна для случаев мгновенного перенацеливания основного луча антенны линии передачи данных, что соответствует использования фазированных антенных решеток. При этом задача может быть решена без учета угловых расстояний между спутниками.

Более сложный с точки зрения оптимизации сеансов связи случай — это использование антенны с конечной скоростью перенацеливания с текущего спутника на следующий. При этом необходимо учитывать постоянно изменяющееся во времени угловое расстояние между космическими аппаратами, что приводит к существенным изменениям плана сеансов связи по отношению к случаю «мгновенного» перенацеливания луча антенны.

Алгоритмы перенацеливания

В качестве базовых алгоритмов перенацеливания наземного радиотехнического измерительного средства предлагаются следующие: «приоритет текущему» и «приоритет следующему».

На рис. 1 и 2 приведены иллюстрации принципа работы алгоритма «приоритет текущему» и «приоритет следующему». Пусть КА 1 находится в области видимости наземного средства в интервал времени $[t'_1, t'_2]$, а КА 2 — в интервал времени $[t''_1, t''_2]$. Время перенацеливания от КА 1 на КА 2 — T_{switch} , причем t_s — момент начала перенацеливания, t_e — момент окончания перенацеливания.

Для алгоритма «приоритет текущему» $t_s = t'_2$, то есть перенацеливание начинается, когда заканчивается сеанс связи с КА 1. Для алгоритма «прио-

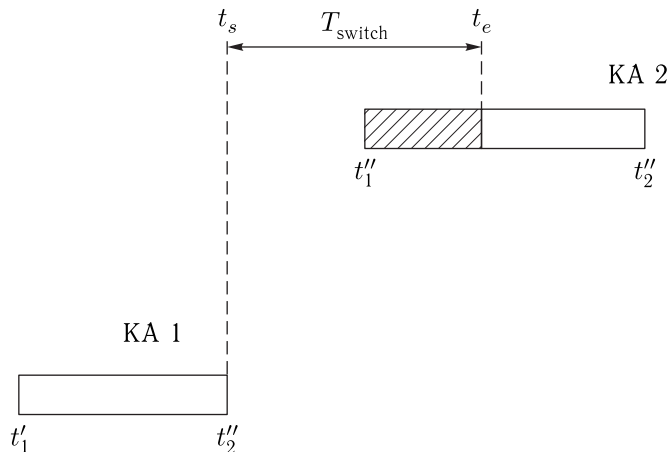


Рис. 1. Иллюстрация алгоритма «приоритет текущему»

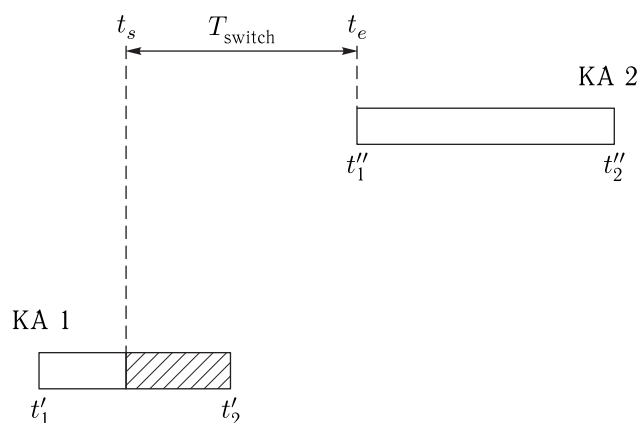


Рис. 2. Иллюстрация алгоритма «приоритет следующему»

ритет следующему» $t_e = t''_1$, то есть перенацеливание должно закончиться до момента, когда начнется сеанс связи с КА 2.

Третий (локальный среднегеометрический) алгоритм перенацеливания описан в [5]:

1 шаг. Фиксируется время начала движения поворотной системы (t_s). Последующие шаги выполняются итеративно.

2 шаг. Рассчитывается время переключения T_{switch} .

3 шаг. По формуле (1) рассчитывается функция стоимости $c(t_s)$.

$$c(t_s) = [T' - \Delta T_1] \cdot [T'' - \Delta T_2], \quad (1)$$

где T' — потенциальная длительность наблюдения КА 1 в течение суток; T'' — потенциальная длительность наблюдения КА 2 в течение суток; ΔT_1 —

время, в которое вместо наблюдения за КА 1 происходит переключение измерительного средства; ΔT_2 — время, в которое вместо наблюдения за КА 2 происходит переключение измерительного средства (см. рис. 3).

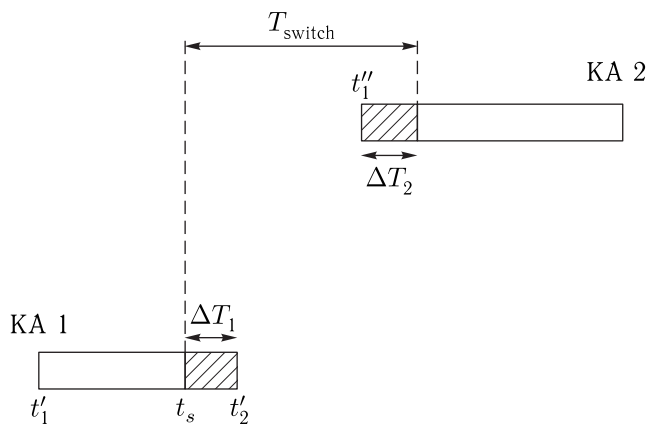


Рис. 3. Иллюстрация локального среднегеометрического алгоритма

4 шаг. Выбирается t_s , обеспечивающий максимум $c(t)$. Осуществляется пересчет T' , T'' .

Сравнение алгоритмов

Для сравнения эффективности алгоритмов перенацеливания наземного радиотехнического измерительного средства при планировании сеансов связи с космическими аппаратами проводился вычислительный эксперимент.

Для формирования траекторий КА использовались орбитальные данные из открытых источников (TLE) и алгоритм расчета орбит SGP4 [6]. При составлении плана наблюдений использовался адаптивный метод случайных блужданий [7]. Планирование осуществлялось для группировки спутников связи, аналогичной «Иридиуму» (100 КА). Для каждого алгоритма перенацеливания формировалось 100 суточных планов. Максимальная скорость вращения измерительного средства считалась равной 5 град/с, ускорение — 1 град/с². Закон движения измерительного средства аналогичен [5]: равноускоренное движение, в том числе в моменты начала и окончания перенацеливания, скорость средства равняется 0. Для оценки качества составленного плана использовались 2 метрики: средняя

геометрическая метрика (формула (2)) и метрика минимального значения (формула (3)):

$$M_{\text{geom}}(t_1, \dots, t_N) = (t_1 \cdot t_2 \dots t_N)^{\frac{1}{N}}, \quad (2)$$

$$M_{\text{min}}(t_1, \dots, t_N) = \min(t_1, \dots, t_N), \quad (3)$$

где t_i — время наблюдения i -го КА за интервал планирования, N — количество КА, для которых осуществлялось планирование.

На рис. 4 и 5 изображены зависимости значения среднегеометрической метрики и метрики минимального значения от номера дня, на который составлялся план.

На рис. 6 изображено распределение среднего времени наблюдения КА в сутки.

В таблице приведены значения параметров анализа: количество планов, для которых среднегеометрическая метрика максимальна для выбранного алгоритма по сравнению с остальными ($N[M_{\text{geom}}]$); аналогично для метрики минимального значения ($N[M_{\text{min}}]$); количество планов, для которых хотя бы один КА не наблюдался (N_{zero}), в соответствии с рис. 3 и 4. В таблице учитывается, что максимальное значение метрики для одного плана может обеспечиваться несколькими алгоритмами планирования, поэтому сумма значений столбцов для $N[M_{\text{geom}}]$ и $N[M_{\text{min}}]$ не равняется 100, т. е. количеству суточных планов.

Т а б л и ц а. Параметры анализа

Алгоритм	$N[M_{\text{geom}}]$	$N[M_{\text{min}}]$	N_{zero}
«Приоритет текущему»	57	25	3
«Приоритет следующему»	43	23	2
Алгоритм локального среднегеометрического	2	56	4

Из таблицы видно, что наилучшим алгоритмом по метрике среднего геометрического является алгоритм «приоритет текущему», а наилучшим алгоритмом по метрике минимального значения — алгоритм локального среднегеометрического. Количество планов, в которых хотя бы один КА не наблюдается для всех алгоритмов, не превышает 4% относительного общего количества сформированных планов.

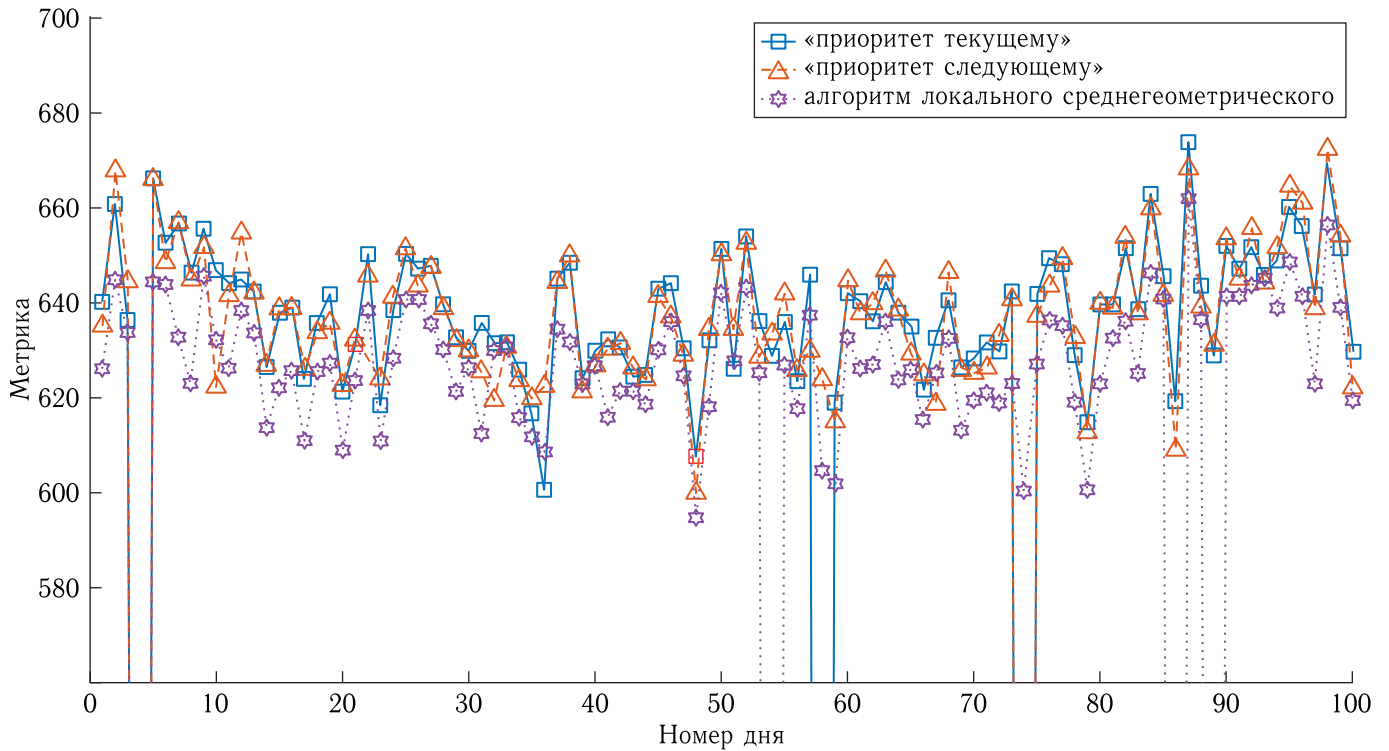


Рис. 4. Зависимость значения среднегеометрической метрики от номера дня, на который составлялся план

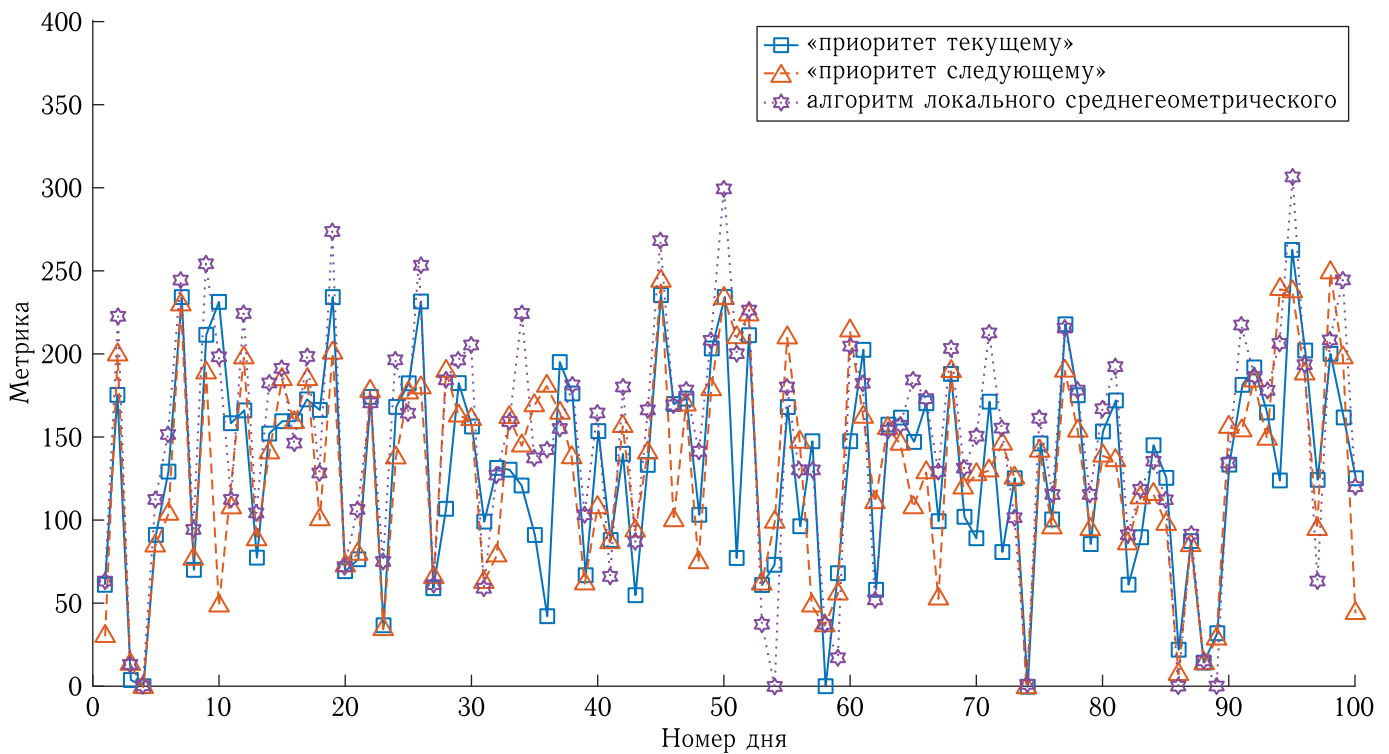


Рис. 5. Зависимость метрики минимального значения от номера дня, на который составлялся план

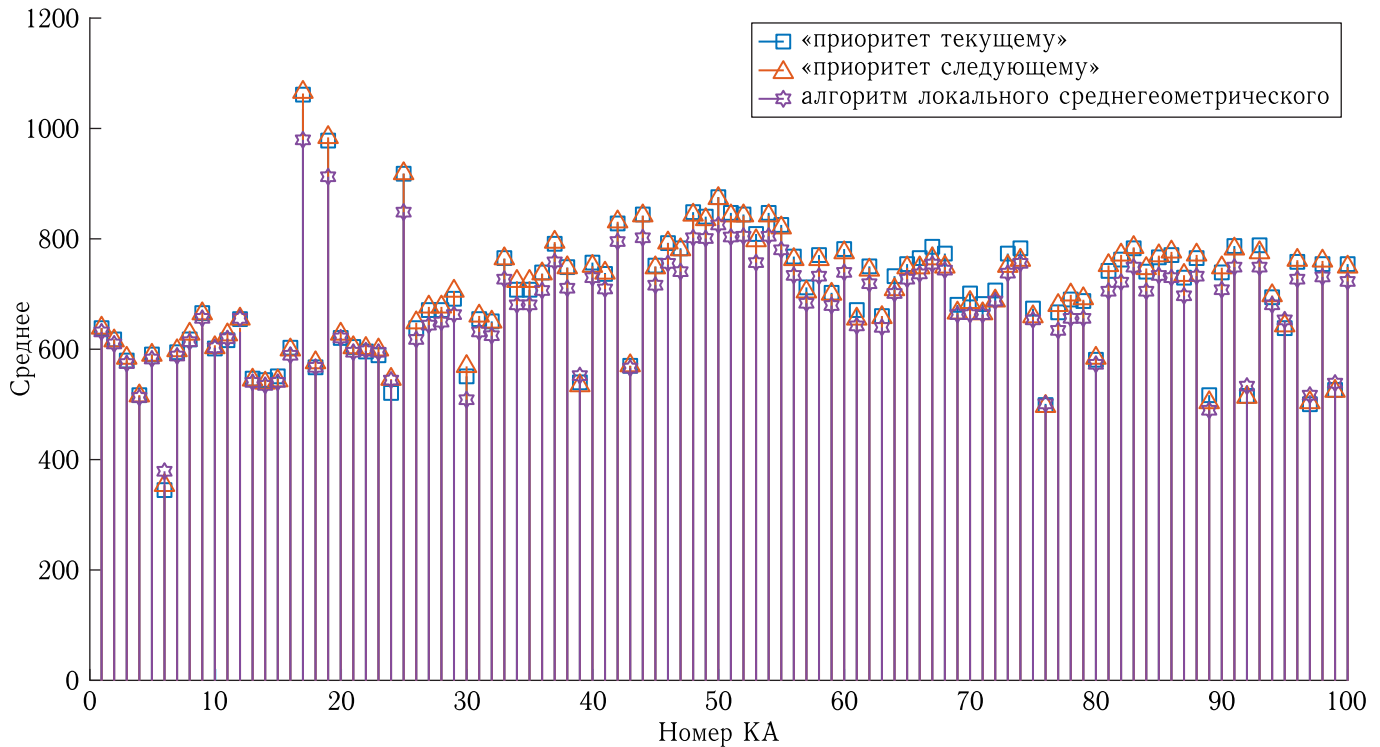


Рис. 6. Распределение усредненного за 100 суток времени наблюдения по КА

Согласно рис. 6 для алгоритма «приоритет текущему» максимум по среднему времени наблюдения обеспечивается в 47 случаях, для алгоритма «приоритет следующему» — в 45 случаях, для алгоритма локального максимума — в 8 случаях. Среднее по средним временам наблюдения КА максимально для алгоритма «приоритет текущему».

Заключение

В работе предложено 2 алгоритма переключения измерительного средства при планировании сеансов связи с космическими аппаратами многоспутниковой группировки при ограниченном времени их наблюдения: «приоритет текущему» и «приоритет следующему».

Выполнено сравнение 3 алгоритмов: «приоритет текущему», «приоритет следующему» и алгоритм выравнивания локального среднего геометрического [5]. Сравнение проводилось по 2 метрикам: среднегеометрическая метрика и метрика минимального значения.

Результаты численного расчета значений метрик при проведении сеансов связи с группировкой, аналогичной «Иридиуму», в течение 100 дней показали, что по метрике среднего геометрического лучшим алгоритмом является «приоритет текущему», а по метрике минимального значения — алгоритм выравнивания локального среднего геометрического.

Дальнейшим развитием планирования сеансов связи с космическими аппаратами многоспутниковой группировкой может быть оптимизация выбора количества, положения и характеристик наземных станций связи. Это позволит обеспечить для конкретной группировки (группировок) требуемую информативность при обмене данными.

Список литературы

1. Пехтерев С. В., Макаренко С. И., Ковальский А. А. Описательная модель системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности, 2022, № 4. С. 190–255.

2. Пантенков Д.Г., Гусаков Н.В., Ломакин А.А. Обзор современного состояния орбитальных группировок космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и космических ретрансляторов // Известия вузов. Электроника, 2022, т. 27, № 1. С. 120–149.
3. Ananasso F. et al. Gateway Earth Stations for Future LEO Communications Satellite Systems // Mobile and Personal Satellite Communications: Proceedings of the 1st European Workshop on Mobile/Personal Satcoms (EMPS'94). Springer London, 1995. P. 156–173.
4. Petelin G., Antoniou M., Papa G. Multi-objective approaches to ground station scheduling for optimization of communication with satellites // Optimization and Engineering, 2021. С. 1–38.
5. Григорьев В.С. Алгоритм переключения наземного измерительного средства при составлении расписания наблюдений за космическими аппаратами // Труды МФТИ, 2023, т. 15, № 1. С. 3–9.
6. Vallado D., Crawford P. SGP4 orbit determination // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, 2008. С. 6770.
7. Григорьев В.С., Ксендзук А.В. Планирование наблюдений за космическими аппаратами. адаптивный метод случайных блужданий // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2022»), 2022. С. 67–71.

Дата поступления рукописи
в редакцию 14.04.2023
Дата принятия рукописи
в печать 26.05.2023