

УДК 621.396.969

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-75-86>

EDN RTWBZR



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

К вопросу выбора критериев качества алгоритмов планирования наблюдений за космическими аппаратами

А.В. Ксендзук ^{1, @},
И.А. Кузнецов ²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел», Москва, 125480 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: ks_alex@mail.ru

• Поступила: 25.02.2025 • Доработана: 31.03.2025 • Принята к опубликованию: 25.07.2025

Резюме

Цели. Одна из важнейших задач мониторинга космического пространства – это планирование наблюдений за космическими аппаратами. От того, насколько хорошо составлен план наблюдений, зависят качество и объем получаемой информации. В настоящее время существует множество различных методов планирования наблюдений за космическими аппаратами, однако единые критерии, которые позволяют сравнить различные алгоритмы планирования, отсутствуют. Цель работы – на основе физических принципов наблюдения радиолокационными, радиотехническими и оптическими средствами мониторинга разработать критерии качества планирования, определить их основные параметры аналитически и проверить численно.

Методы. Предложенные критерии качества – детерминированные, ограниченные по энергии мощностью сигнала и временем наблюдения. Аналитически определены предельные значения критериев качества для фиксированного времени наблюдения. В вычислительном эксперименте для 4 алгоритмов планирования получены значения критериев качества.

Результаты. Для сравнения различных алгоритмов планирования наблюдений, учитывающих приоритет космического аппарата и общее времени его наблюдения, предложен критерий качества «вес – время наблюдения». Для учета структуры общего времени наблюдения введен критерий «вес – структура наблюдения». Аналитически показано, что значения критериев ограничены, а также различаются для разных методов планирования. Выполнен численный эксперимент, который подтвердил характер изменения критериев для различных методов планирования и параметров, входящих в критерии.

Выводы. Предложенные критерии качества планирования наблюдений основаны на физических принципах наблюдения радиотехническими и оптическими средствами и позволяют численно сравнить результаты планирования наблюдений за космическими аппаратами с учетом приоритетности наблюдения, времени наблюдения и его структуры. Вычислительный эксперимент подтвердил возможность применения предложенных критериев «вес – время наблюдения» и «вес – структура наблюдения» для сравнения различных алгоритмов планирования. Предложенные критерии целесообразно использовать для оптимизации алгоритмов планирования или их численного сравнения для различных условий наблюдения за космическими аппаратами.

Ключевые слова: планирование наблюдений, критерий качества, космический аппарат, мониторинг космических аппаратов, конфликтное наблюдение

Для цитирования: Ксэндзук А.В., Кузнецов И.А. К вопросу выбора критериев качества алгоритмов планирования наблюдений за космическими аппаратами. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):75–86. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-75-86>, <https://www.elibrary.ru/RTWBZR>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Optimization criterion for spacecraft observation planning algorithms

Alexander V. Ksendzuk ^{1, @},
Ivan A. Kuznetsov ²

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² MAK Vympel, Moscow, 125480 Russia

@ Corresponding author, e-mail: ks_alex@mail.ru

• Submitted: 25.02.2025 • Revised: 31.03.2025 • Accepted: 25.07.2025

Abstract

Objectives. One of the critical tasks of space monitoring is the planning of observations due to the quality and amount of information obtained depending on how well the observation plan is developed. However, the selection of a method for planning spacecraft observations is hampered by a lack of unified criteria for comparing different planning algorithms. Therefore, the work sets out to develop planning quality criteria on the basis of physical observation principles based on radar, radiotechnical, and optical monitoring approaches in order to analytically determine their main parameters and check these parameters numerically.

Methods. The proposed quality criteria are deterministic, limited in energy by signal strength and observation time. The limiting values of the quality criteria for fixed observation time are analytically determined. In order to obtain the values of the quality criteria for four scheduling algorithms, a computational experiment is carried out.

Results. The proposed “weight–observation time” quality criterion is used to compare different observation planning algorithms that take into account spacecraft priority and total observation time. In order to account for the structure of the total observation time, the “weight–observation structure” criterion is introduced. It is analytically confirmed that the limited criteria values differ for different scheduling methods. The conducted numerical experiment is used to confirm the nature of the change of criteria for different planning methods and parameters included in the criteria.

Conclusions. The proposed observation planning quality criteria, which are based on the physical observation principles by radiotechnical and optical means, are used to numerically compare the results of spacecraft observation planning to take into account the priority of observation, as well as observation time and structure (how many and how long are the intervals into which the total observation time is divided). The possibility of using the proposed “weight–observation time” and “weight–observation structure” criteria to compare different planning algorithms is confirmed by computational experiment. Therefore, it is reasonable to use the proposed criteria for optimization of scheduling algorithms or their numerical comparison for different satellite observation conditions.

Keywords: observation planning, quality criterion, spacecraft, spacecraft monitoring, conflict observation

For citation: Ksendzук A.V., Kuznetsov I.A. Optimization criterion for spacecraft observation planning algorithms. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):75–86. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-75-86>, <https://www.elibrary.ru/RTWBZR>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается значительный рост числа космических аппаратов (КА) и космического мусора при относительно медленном росте количества и качества оптических, радиолокационных и радиотехнических средств мониторинга околоземного космического пространства¹ [1]. В этих условиях особую важность приобретает задача планирования наблюдений средствами мониторинга. Актуальность данной проблемы подтверждают работы [2–8], в которых авторы предлагают различные алгоритмы для планирования наблюдений, в т.ч. за астрономическими объектами [9, 10].

В [2] для оценки эффективности алгоритма планирования, влияние каждого фактора (погодные условия, уровень рассеивания частиц и др.) на итоговый результат распределяется в процентном соотношении, исходя из влияния каждого фактора на качество решения задачи. Каждый параметр оценивается в диапазоне от 1 до 10 баллов, затем значение параметра умножается на соответствующий ему процент важности, и все взвешенные оценки суммируются.

В [3] для планирования наблюдений строят карты эффективности обнаружения КА, используя результирующий коэффициент эффективности, который рассчитывается как произведение критериев (коэффициент экстинкции, угловая скорость и др.), со своим весовым коэффициентом.

В [4] при выборе КА, за которым будет осуществляться наблюдение, используется след ковариационной матрицы, описывающий среднее изменение вклада в измерения. След может быть связан с параметрами информативности, например, изменением дифференциальной энтропии.

В [5] анализируется эффективность методов «жадной» оптимизации, которые не требуют значительных вычислительных и математических ресурсов. В качестве критерия используется функция стоимости на основе потенциальных наблюдений и того, насколько наблюдения соответствуют поставленной цели, при этом численные и аналитические формулы для вычисления «соответствия» не приводятся.

В [6] оптимизация проводится по времени наблюдения за объектом с учетом времени переключения наблюдения с предыдущего объекта. Таким образом, глобальная оптимизация максимизирует общее время наблюдения КА, при этом приоритет наблюдения КА не учитывается.

В [7] в качестве критерия используется среднее время наблюдения спутников за вычетом отклонения времени наблюдения каждого спутника относительно среднего значения, умноженного на коэффициент Лагранжа. Критерий принимает максимальное значение, когда все спутники наблюдаются одинаковое время.

Таким образом, несмотря на наличие большого количества методов, алгоритмов и программного обеспечения для планирования, отсутствуют общепринятые критерии качества, которые позволяют сравнить эти методы. Следовательно, разработка физически обоснованных критериев является актуальной задачей.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ

При планировании наблюдений за КА одной из основных задач является разрешение конфликтов в случае, когда число (пропускная способность) каналов наблюдения меньше числа одновременно видимых КА, т.е. необходимость выбора, за какими КА необходимо наблюдать [11]. Под видимостью КА понимается возможность его наблюдения в пространстве (геометрическая видимость), по энергетическим параметрам (радиолокационная и радиотехническая видимость) и в частотной области (для радиотехнических средств частота сигнала КА должна находиться в пределах диапазона рабочих частот).

Если бы конфликты отсутствовали, задача по формированию плана наблюдений сводилась бы к последовательному слежению за видимыми КА и, при необходимости экономии ресурса наблюдательных средств, прекращению наблюдений при формировании требуемого объема информации.

В реальных условиях наблюдения присутствует множество конфликтов (видимость нескольких КА одновременно), по каждому из которых необходимо принимать решение, за каким из КА надо наблюдать. Различные методы решения конфликтов приводят к формированию различных планов наблюдения.

¹ <https://www.space-track.org/>. Дата обращения 20.01.2025. / Accessed January 20, 2025.

Исходными данными для планирования являются: матрица видимости КА, приоритетность КА и время, достаточное для получения информации требуемого качества. Для удобства планирования время полагаем дискретным.

В матрице видимости $V(i, t)$ строка i соответствует номеру КА, столбец t – времени, каждая ячейка $V_{i, t}$ показывает видимость КА средством мониторинга. В простейшем случае значения в матрице принимают значения 0 и 1 (видимость исходя из геометрических соотношений). В более сложном варианте в ячейках записана величина, связанная с качеством наблюдения, например, отношение сигнал/шум по мощности или вероятность наблюдения КА. Сумма строк в пределах столбца показывает, сколько КА видны (могут наблюдаться) одновременно.

Вектор приоритетности (весов) КА для каждого спутника определяет вес w_i – целое положительное число, показывающее важность наблюдения КА (чем больше значение, тем выше приоритет и ценность наблюдения за этим КА).

Вектор достаточного (непрерывного) времени наблюдения для каждого i -го КА определяет (непрерывный) интервал времени $T_{\text{suf } i}$, достаточный для получения необходимого объема информации/качества оценок параметров. Требование непрерывности интервала основано на принципах оценки постоянных на интервале наблюдения параметров. Если это требование необязательно, то $T_{\text{suf } i}$ может быть полным временем наблюдения. В случае, когда в матрице наблюдения используется отношение сигнал/шум по мощности, $T_{\text{suf } i}$ определяет энергетическое отношение сигнал/шум, от которого зависит качество оценок [12].

Результат планирования – **матрица наблюдения** $O(i, t)$, размерность которой совпадает с размерностью матрицы видимости. Для каждой i -й строки (номера КА) в момент времени t в ячейке $O_{i, t}$ может быть значение 1 (i -й КА в этот момент времени будет

наблюдаться средством мониторинга) или 0 (КА не будет наблюдаться). В один момент времени t (столбец матрицы) число аппаратов, за которыми ведется наблюдение, должно быть равно числу каналов наблюдательного средства.

Пример, показывающий вид исходных данных для планирования и результата планирования, показан на рис. 1.

2. ЧИСЛЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАБЛЮДЕНИЯ

Численные параметры, которые используются для расчета критерия качества и анализа матриц наблюдения и видимости:

$t = 1 \dots T_{\text{plan}}$, T_{plan} – интервал планирования (промежуток времени, для которого составляется план наблюдений, обычно – сутки).

$i = 1 \dots I_{\text{max}}$ – количество видимых КА на интервале планирования T_{plan} .

$T_{\text{vis } i}$ – время видимости i -го КА, представляет собой сумму его свободного (бесконфликтного) $T_{\text{vis.free } i}$ и конфликтного $T_{\text{vis.conf } i}$ времени видимости $T_{\text{vis } i} = T_{\text{vis.free } i} + T_{\text{vis.conf } i} = \sum_{t=1}^{T_{\text{plan}}} V_{i, t}$. Время видимости показывает потенциальные возможности по наблюдению КА.

$I_{\text{obs}} \leq I_{\text{max}}$ – количество наблюдаемых КА на интервале планирования T_{plan} .

$T_{\text{obs } i}$ – время наблюдения за i -м КА, представляет собой сумму времени бесконфликтного $T_{\text{obs.free } i}$ и конфликтного $T_{\text{obs.conf } i}$ времени наблюдения. Эти величины показывают реализацию конкретного плана наблюдения, причем $T_{\text{obs } i} \leq T_{\text{vis } i}$.

w_i – приоритет (вес) КА, который показывает ценность (вклад) его наблюдения. Приоритет задается целым числом, лежащим в заданном диапазоне $\{w \in \mathbb{N} \mid 1 \leq w_i \leq w_{\text{max}}\}$; чем оно больше, тем выше приоритет КА (в большинстве реальных задач

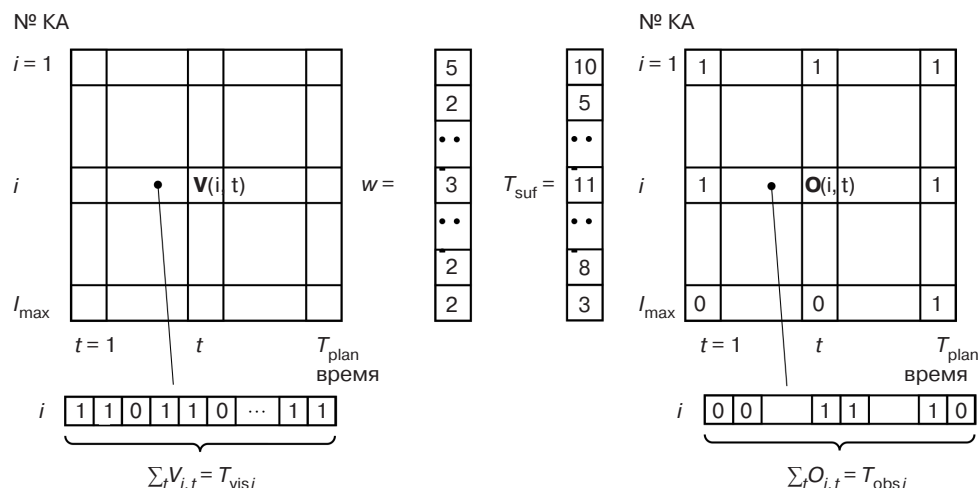


Рис. 1. Вид основных матриц и векторов при планировании наблюдений

достаточно задавать значения w_i от 1 до 5, этот диапазон используется в численных расчетах в данной работе).

$T_{\text{suf } i}$ – достаточное (непрерывное) время наблюдения КА. Определяется для каждого КА в зависимости от задачи наблюдения (обнаружение сигнала, оценка параметров сигнала, оценка параметров передаваемого потока информации и пр.), известных, прогнозируемых или рассчитанных статистических характеристик наблюдения (отношение сигнал/шум, вероятность наблюдения спутника). Наблюдение КА в течение (непрерывного) интервала времени $T_{\text{suf } i}$ обеспечивает с требуемой вероятностью необходимое качество оценки его параметров. Наблюдение на меньшем интервале времени не позволяет получить требуемое качество. Наблюдение на большем интервале избыточно.

$T_{\text{vis.s}}$ – общее (суммарное) время видимости (может наблюдаться хотя бы один из $i = 1 \dots I_{\text{max}}$ КА), определяется по матрице видимости $V(i, t)$:

$$T_{\text{vis.s}} = \sum_{t=1 \dots T} T_{\text{vis.s } t} = \sum_{t=1 \dots T} \text{sign} \left[\sum_{i=1 \dots I_{\text{max}}} V_{i,t} \right]. \quad (1)$$

N_t – количество одновременно видимых КА в момент времени t :

$$N_t = \left[\sum_{i=1 \dots I_{\text{max}}} V_{i,t} \right]. \quad (2)$$

$T_{\text{obs.s}}$ – общее время наблюдения (хотя бы одного из $i = 1 \dots I_{\text{max}}$ КА), определяется по матрице наблюдения $O(i, t)$:

$$T_{\text{obs.s}} = \sum_{t=1 \dots T} T_{\text{obs.s } t} = \sum_{t=1 \dots T} \text{sign} \left[\sum_i O_{i,t} \right]. \quad (3)$$

Анализ матрицы видимости $V(i, t)$ позволяет интегрально определить время свободного и конфликтного наблюдения. Анализ соответствующей ей матрицы наблюдения $O(i, t)$ позволяет определить, как метод планирования перераспределяет это время между КА. В качестве примера на рис. 2 показан результат планирования наблюдений однокабельным средством группировки КА при наличии бесконфликтного и конфликтного наблюдения.

Из показанной на рис. 2 матрицы наблюдений видно, что время свободного наблюдения для всех КА сохранилось. **Время свободного наблюдения** сохраняется, если только не используется **ресурсное ограничение времени наблюдения** $T_{\text{obs.s}} \leq T_{\text{res}}$, $t = 1 \dots T_{\text{plan}}$ для продления срока службы средств мониторинга или для использования части времени в других целях, например, для анализа окружающей обстановки (помеховых излучений – радиотехническими и радиолокационными средствами, астроклимата – оптическими средствами мониторинга). При отсутствии таких ограничений сохранение времени

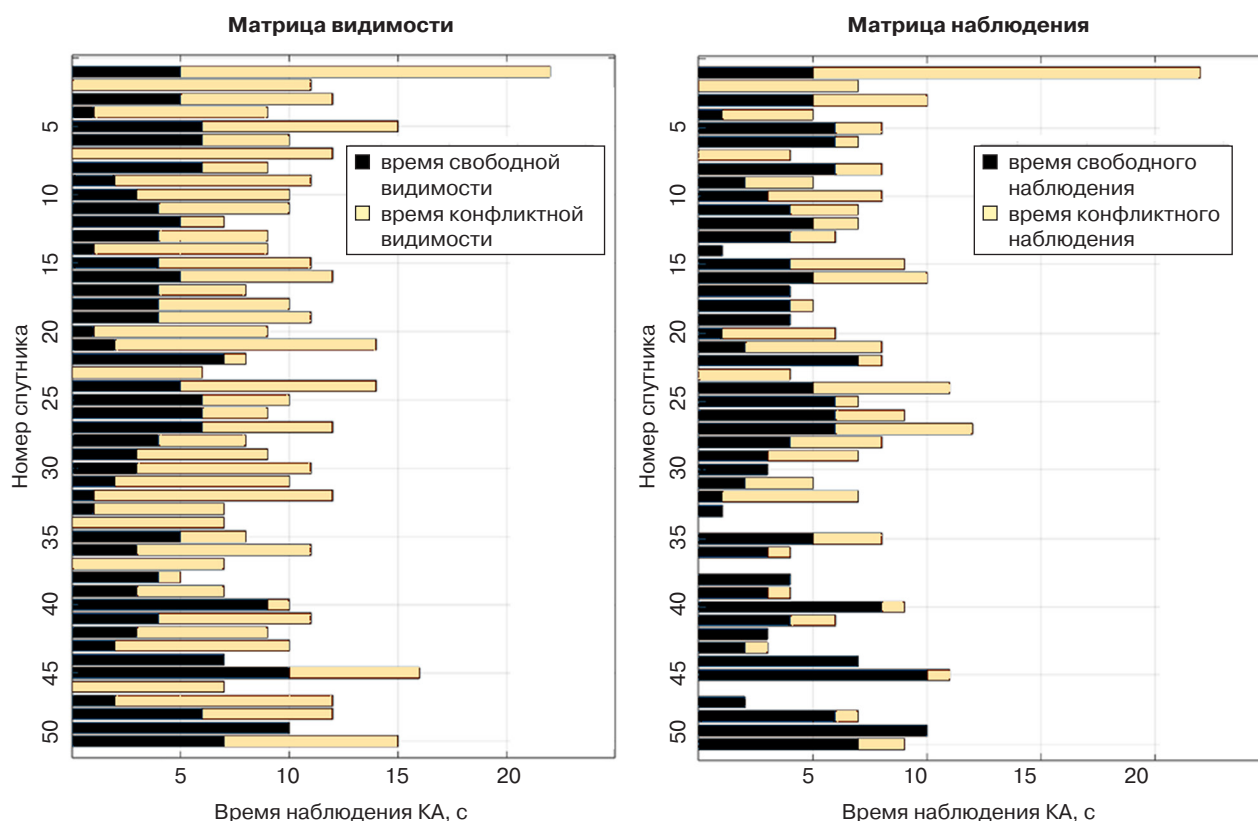


Рис. 2. Пример матрицы видимости (слева) и плана наблюдений (справа)

свободного (бесконфликтного) наблюдения – это один из методов проверки корректности алгоритма планирования $T_{vis, free\ i} = T_{obs, free\ i}$

Время конфликтного наблюдения перераспределяется между КА в соответствии с используемым методом планирования (вплоть до простейшего метода – прекращения наблюдений в случае конфликта). В рассматриваемом на рис. 2 примере приоритет отдается КА в начале списка (используется все возможное время конфликтного наблюдения), для остальных – время перераспределяется.

Общее время наблюдения при отсутствии ресурсного ограничения должно совпадать с общим временем видимости $T_{vis, s} = T_{obs, s}$, что необходимо использовать для проверки корректности алгоритма планирования.

3. КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА НАБЛЮДЕНИЙ

Для сравнения различных методов планирования необходимо ввести численный показатель, основанный на численных, измеряемых параметрах плана наблюдений [13]. Так как в рассматриваемом случае видимость и результат планирования являются детерминированными функциями, качество планирования будем определять без использования вероятностных показателей. Однако учесть вероятностные параметры в рамках предлагаемого подхода несложно – достаточно в качестве значений элементов в ячейках поставить вероятности наблюдения КА, предварительно рассчитанные, либо определенные исходя из статистических данных [14].

3.1. Критерий «вес – время наблюдения»

Первый предлагаемый в работе критерий качества планирования введем с использованием приоритета КА и общего времени его наблюдения (без учета, на какое количество интервалов он разбит). Этот вариант можно использовать для случая, когда одного дискретного интервала во времени достаточно для оценки параметров КА с требуемым качеством. Критерий «вес – время наблюдения» зададим суммой вкладов от наблюдения отдельных КА Q_{wt_i} :

$$Q_{wt} = \frac{1}{I_{\max}} \sum_{i=1}^{I_{\max}} Q_{wt_i} = \frac{1}{I_{\max}} \sum_{i=1}^{I_{\max}} (a_i)^n \ln \left(\frac{T_{obs\ i}}{T_{suf\ i}} + 1 \right), \quad (4)$$

где

- $a_i = w_i / w_{\max}$ – относительный приоритет i -го КА, принимает значения в интервале (0; 1];
- w_i – приоритет i -го КА;
- $w_{\max}$ – максимальный приоритет наблюдения из множества видимых КА;

- n – показатель степени относительного приоритета, позволяет варьировать вклад w_i ; $n = 1$ – линейная зависимость от приоритета КА, $n = 0$ – приоритет КА не учитывается;
- $I_{\max}$ – количество видимых КА;
- $T_{obs\ i}$ – время наблюдения i -го КА, полученное в результате планирования;
- $T_{suf\ i}$ – время, достаточное для получения информации / оценок параметров необходимого качества для i -го КА.

Предложенный критерий «вес – время наблюдения» обладает следующими свойствами:

1. Если i -й КА не наблюдается (т.е. $T_{obs\ i} = 0$) на интервале планирования T_{plan} , но входит в множество видимых спутников $I_{\max}$, вклад от данного КА равен нулю:

$$Q_{wt_i} |_{T_{obs\ i}=0} = \left(\frac{w_i}{w_{\max}} \right)^n \ln(1) = 0. \quad (5)$$

2. Если время наблюдения i -го КА равняется достаточному ($T_{obs\ i} = T_{suf\ i}$), вклад от его наблюдения будет зависеть от приоритета КА:

$$Q_{wt_i} \approx 0.69 \left(\frac{w_i}{w_{\max}} \right)^n, \quad (6)$$

и для КА с максимальным приоритетом вклад будет равен 0.69. Такое же значение Q_{wt_i} будет для спутника с любым приоритетом при $n = 0$ и наблюдении в течение достаточного времени ($T_{obs\ i} = T_{suf\ i}$).

3. Вклад от наблюдения i -го КА имеет максимальное (ограниченное сверху) значение, когда время наблюдения за КА стремится к времени его видимости $T_{obs\ i} \rightarrow T_{vis\ i}$. Предел для постоянно видимых КА равен времени планирования $T_{obs\ i} \rightarrow T_{\text{plan}}$:

$$\max(Q_{wt_i}) = \left(\frac{w_i}{w_{\max}} \right)^n \ln \left(\frac{T_{vis\ i}}{T_{suf\ i}} + 1 \right). \quad (7)$$

Для КА с максимальным приоритетом (или для любого КА при отсутствии учета приоритета наблюдения, $n = 0$) $\max(Q_{wt_i}) = \ln \left(\frac{T_{vis\ i}}{T_{suf\ i}} + 1 \right)$.

График вклада наблюдения КА Q_{wt_i} как функция времени наблюдения $T_{obs\ i}$ относительно достаточного времени наблюдения $T_{suf\ i}$ при различном приоритете ($w_i = 1 \dots 5$) и степени его учета $n = 0, 0.5, 1, 2$ приведен на рис. 3.

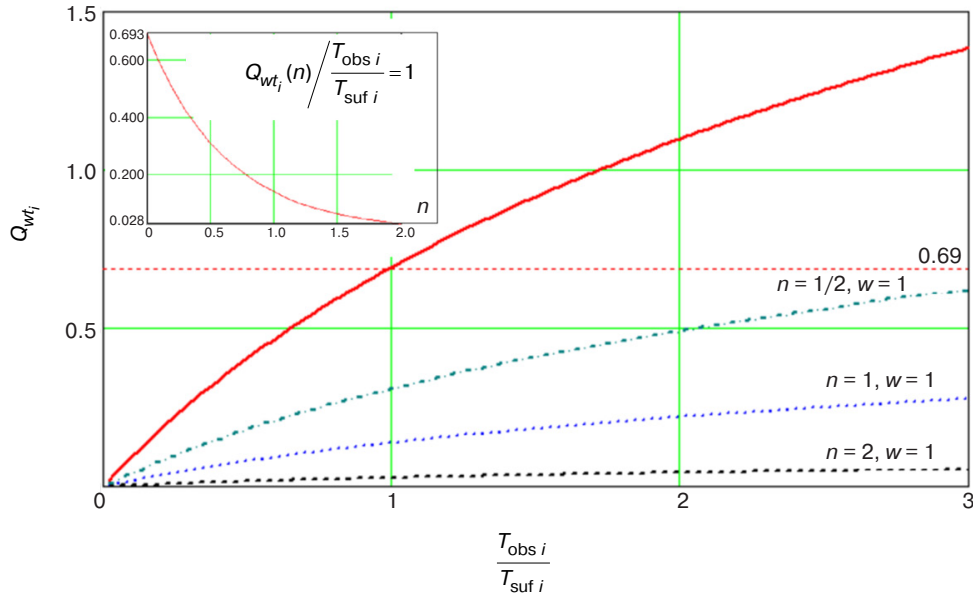


Рис. 3. Значение показателя качества Q_{wt_i} при наблюдении спутника в зависимости от параметров (n, w) и значение $Q_{wt_i}(n; w = 1)$ при $T_{obs_i}/T_{suf_i} = 1$

Анализ результатов численного расчета предложенного критерия «вес – время наблюдения» подтверждает приведенные выше свойства:

- Q_{wt_i} монотонно возрастает при увеличении времени наблюдения;
- при малом времени наблюдения относительно достаточного $T_{obs_i}/T_{suf_i} \rightarrow 0$ критерий «вес – время наблюдения» $Q_{wt_i} \rightarrow 0$;
- для КА с максимальным приоритетом $w_i = 5$ вклад, в зависимости от относительного времени наблюдения T_{obs_i}/T_{suf_i} , растет логарифмически, принимая в точке, где время наблюдения i -го КА равняется достаточному $T_{obs_i} = T_{suf_i}$, значение 0.69. Величина n не влияет на положение этого графика, т.к. $(a_i)^n = \left(\frac{w_{\max}}{w_{\max}}\right)^n = 1$;

- для КА с минимальным приоритетом ($w_i = 1, w_{\max} = 5$) вклад при том же относительном времени наблюдения T_{obs_i}/T_{suf_i} меньше и определяется степенью n , учитывающей вес приоритета КА: чем больше n , тем меньше вклад от наблюдения КА с низким приоритетом. В рассматриваемом примере в точке $T_{obs_i} = T_{suf_i}$ для $n = [0 \dots 2]$, $Q_{wt_i} = [0.69 \dots 0.028]$, график показан на вставке рис. 3.

3.2. Критерий «вес – структура наблюдения»

Для КА, параметры сигналов которых могут меняться с течением времени, большую ценность представляют непрерывные длительные интервалы

наблюдения (например, определить линейно изменяющуюся во времени частоту можно точнее по одному продолжительному временному интервалу, а не по совокупности коротких).

Для того, чтобы учесть структуру времени наблюдения, т.е. на сколько интервалов и какой длительности разбито общее время наблюдения КА T_{obs_i} , предлагается ввести эквивалентное время наблюдения $T_{obs.eq_i}$, которое вычисляется по формуле:

$$T_{obs.eq_i} = \frac{\sum_{k=1}^{K_i} (T_{obs_{ik}})^2}{T_{obs_i}}, \quad (8)$$

где K_i – число несмежных интервалов наблюдения i -го КА за период T_{plan} ; k – номер участка наблюдения i -го КА; $T_{obs_{ik}}$ – время наблюдения на k -м участке.

На рис. 4 показана зависимость значения эквивалентного времени наблюдения произвольного КА $T_{obs.eq}$ от величины непрерывного интервала его наблюдения T_{obs_k} , приведенная к значению относительно полного времени наблюдения этого КА T_{obs_i} .

Свойства эквивалентного времени наблюдения, следующие из выражения (8) и подтверждающиеся графиком на рис. 5:

1. Для одного интервала наблюдения за КА ($K = 1$) эквивалентное время наблюдения равно самому времени наблюдения T_{obs_i} :

$$T_{obs.eq_i} = \frac{(T_{obs_{ik}})^2}{T_{obs_i}} = T_{obs_i}, \quad (9)$$

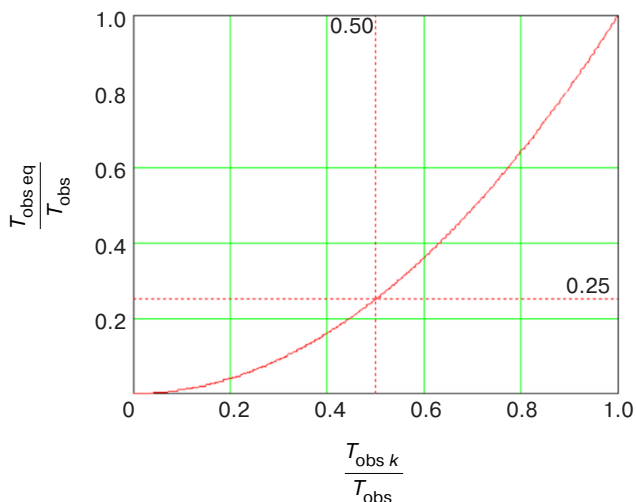


Рис. 4. Зависимость значений $T_{\text{obs eq}}$ от интервала наблюдения $T_{\text{obs } k}$ при нормировке на общее время наблюдения спутника T_{obs}

- При большом количестве временных интервалов наблюдения ($K_i \gg 1$) и одном «длинном» интервале $T_{\text{obs } i_k} \gg T_{\text{obs } i_j}$ эквивалентное время наблюдения КА определяется максимальным по длительности участком $\max(T_{\text{obs } i_k})$.
- При большом количестве участков $K_i \rightarrow \infty$ с одинаковым малым временем наблюдения $T_{\text{obs } i_k}$ эквивалентное время наблюдения стремится к нулю:

$$T_{\text{obs.eq } i} = \frac{\sum_{k=1}^{K_i \rightarrow \infty} (T_{\text{obs } i_k})^2}{T_{\text{obs } i}} \rightarrow 0. \quad (10)$$

Второй предлагаемый в работе критерий качества планирования «вес – структура наблюдения» использует в (4) вместо полного времени наблюдения i -го КА $T_{\text{obs } i}$ его эквивалентное время наблюдения $T_{\text{obs.eq } i}$:

$$\begin{aligned} Q_{ws} &= \frac{1}{I_{\text{max}}} \sum_{i=1}^{I_{\text{max}}} Q_{ws_i} = \frac{1}{I_{\text{max}}} \sum_{i=1}^{I_{\text{max}}} (a_i)^n \ln \left(\frac{T_{\text{obs.eq } i}}{T_{\text{suf } i}} + 1 \right) = \\ &= \frac{1}{I_{\text{max}}} \sum_{i=1}^{I_{\text{max}}} \left(\frac{w_i}{w_{\text{max}}} \right)^n \ln \left(\frac{\sum_{k=1}^K (T_{\text{obs } i_k})^2}{T_{\text{obs } i} T_{\text{suf } i}} + 1 \right), \quad (11) \end{aligned}$$

где учитывается относительный приоритет i -го КА $a_i^n = (w_i / w_{\text{max}})^n$ и отношение эквивалентного времени наблюдения i -го КА $T_{\text{obs.eq } i}$ к достаточному для получения оценок требуемого качества непрерывному интервалу $T_{\text{suf } i}$.

Критерий «вес – структура наблюдения» Q_{ws} обладает такими же свойствами, как и критерий «вес – время наблюдения» Q_{wt} с точностью до того, что время наблюдения необходимо заменить эквивалентным.

4. ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА ПЛАНИРОВАНИЯ

Для того чтобы оценить возможность применения предложенных критериев качества, используем несколько алгоритмов планирования, которые существенно различаются и для которых можно логически предсказать поведение предложенных критериев Q_{wt} (4) и Q_{ws} (11). Для этих алгоритмов планирования используем одну и ту же матрицу видимости, для которой рассчитаем матрицу наблюдения и предложенные критерии качества. Результаты поведения критериев, соответствие их логическим предположениям и достаточный численный разброс для различных алгоритмов планирования подтвердят возможность применения предложенных критериев качества.

Алгоритм 1 («первый по списку»)

В случае конфликтного наблюдения осуществляется безусловный переход к наблюдению за КА, который находится первым в списке. Очевидно, что такой алгоритм даст малое время (непрерывного) наблюдения за КА в конце списка. Если там расположены КА с высоким приоритетом, качество планирования по критерию Q_{wt} будет низким. Величина критерия будет существенно зависеть от того, КА с каким приоритетом расположены первыми в списке.

Для того, чтобы такой простой и нетребовательный к вычислительным ресурсам алгоритм планирования имел практический смысл, необходимо составлять список КА, помещая наиболее приоритетные с минимальным общим временем наблюдения вверх по списку.

Алгоритм 2 («безынерционный переход на приоритетный спутник»)

В случае конфликтного наблюдения (коллизии) осуществляется безусловный переход к наблюдению за КА, который имеет больший приоритет независимо от времени его наблюдения. Фактически, это «жадный» алгоритм, который максимизирует критерий качества на каждом шаге [15]. Очевидно, что такой алгоритм даст большее (по сравнению с алгоритмом 1) качество наблюдения для критерия (4) Q_{wt} «вес – время наблюдения»; для критерия Q_{ws}

вклад КА с меньшим приоритетом будет низким, т.к. при конфликтном наблюдении будут наблюдаться КА с высоким приоритетом. При одинаковом приоритете всех КА критерий Q_{ws} (11) «вес – непрерывное время наблюдения» будет таким же, как и для алгоритма 1.

Алгоритм 3 («инерционный переход на спутник с большим весом»)

Модификация алгоритма 2 учитывает время наблюдения i -го КА путем расчета коэффициента, равного отношению приоритета КА к времени, которое он уже наблюдался ($w_i/T_{obs\ i}$). В отличие от алгоритма 2, переход к наблюдению за новым, более приоритетным j -м КА, может не произойти, если время $T_{obs\ j} \gg T_{obs\ i}$. То есть формируется «инерция» наблюдения за КА, которая уменьшается при увеличении времени его наблюдения. Такой критерий должен привести к уменьшению коротких интервалов наблюдения за счет инерционности и к увеличению критерия качества (6) по сравнению с алгоритмами 1 и 2.

Алгоритм 4 («выравнивание времени наблюдения»)

В этом случае прекращается слежение за КА, если время его наблюдения превышает аналогичный параметр другого спутника. Алгоритм старается «выровнять» время наблюдения всех КА.

Для определения максимальных достижимых на матрице видимости показателей целесообразно использовать метод полного перебора по всем возможным вариантам решения задачи планирования. Однако для реальных условий (план на сутки, более

10000 пролетов КА) решение может быть получено только с применением квантовых вычислений [16]. Ограничение перечня спутников до наблюдаемых радиотехническими средствами РТУ МИРЭА [17], позволяет найти такое решение.

Иллюстрация принципа работы алгоритмов 1–4, для которых рассчитывается критерий качества планирования, показана на рис. 5.

В таблице приведены результаты расчета по предложенным критериям качества. В качестве исходных данных была сгенерирована матрица видимости КА, состоящая из 50 КА на дискретный интервал планирования $T_{plan} = 500$. Для столбцов таблицы курсивом выделены минимальные значения критериев качества, жирным – максимальные.

Таблица. Результаты численного моделирования

Название алгоритма	Q_{wt}		Q_{ws}	
	$n = 0$	$n = 1$	$n = 0$	$n = 1$
Алгоритм 1	0.382	0.255	0.219	0.148
Алгоритм 2	0.576	0.404	0.321	0.210
Алгоритм 3	0.618	0.530	0.370	0.295
Алгоритм 4	0.480	0.309	0.258	0.189

Результаты численного моделирования, подтверждают аналитические выводы и логические предположения:

- критерии Q_{wt} и Q_{ws} принимают максимальные значения для алгоритма 3 как при учете $n = 1$, так и без учета $n = 0$ приоритета КА, т.к. по своему принципу он обладает инерционностью, приводящей к формированию более длительных участков наблюдения, что подтверждается рис. 5;
- критерии Q_{wt} и Q_{ws} принимают минимальные значения для алгоритма 1 как при учете $n = 1$, так и без учета $n = 0$ приоритета КА, т.к. он позволяет наблюдать за спутниками в начале списка без учета их приоритета (в рассматриваемом случае он низкий), что подтверждается рис. 5;
- отношение минимального и максимального значения критериев Q_{wt} составляет 2.078 при учете приоритета КА $n = 1$ и 1.617 без учета приоритета $n = 0$, соответственно. Следовательно, учет приоритета увеличивает различие максимального и минимального значений критерия «вес – время наблюдения»;
- отношение минимального и максимального значения критериев Q_{ws} составляет 1.993 при учете приоритета КА и 1.689 без учета приоритета. Аналогично критерию Q_{wt} учет приоритета увеличивает различие максимального и минимального значений критерия «вес – структура наблюдения».

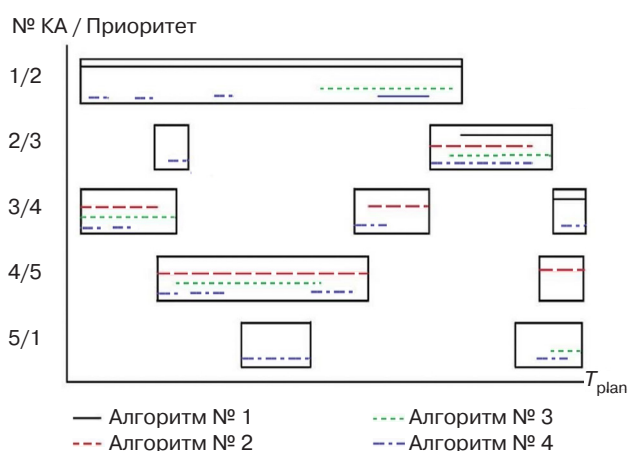


Рис. 5. Пример работы алгоритмов 1–4 на интервале планирования T_{plan} для 5 КА с заданным временем видимости и различным приоритетом наблюдаемости a_i

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В объективных условиях динамики вывода спутников на орбиту по отношению к увеличению количества и возможностей средств их мониторинга особенную важность приобретает задача планирования наблюдений. Для сравнения различных методов планирования наблюдений за КА в работе предложены 2 критерия качества: «вес – время наблюдения» и «вес – структура наблюдения». Критерии основаны на формировании величины, связанной с энергетическим отношением сигнал/шум, определяющей качество оценок параметров, учитывают приоритет спутников, а также структуру общего времени наблюдения (количество интервалов).

Для проверки используются 4 алгоритма планирования, которые дают предсказуемый результат относительного качества планирования по введенным критериям. Численные расчеты критериев качества подтвердили сделанные теоретически

предположения. Для одних и тех же условий наблюдения КА критерии качества плана, полученного 4 различными алгоритмами планирования, различаются более чем в 1.5 раза.

Дальнейшим развитием критериев является их конкретизация, например, для радиотехнических средств мониторинга, имеющихся в «Космоцентре» РТУ МИРЭА синтез оптимальных методов планирования наблюдений и их экспериментальное подтверждение.

Вклад авторов

А.В. Ксэндзук – постановка задачи; разработка критериев, основных соотношений и выводов.

И.А. Кузнецов – разработка программного обеспечения для проверки расчетов, анализ результатов моделирования.

Authors' contributions

A.V. Ksendzук – formulating the problem; developing the criteria, key relationships, and conclusions.

I.A. Kuznetsov – developing the software for verification of calculations; analysis of simulation results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu J., Yang X., Cheng H., et al. Progress of China's Space Debris Research. *Chinese J. Space Sci.* 2022;42(4):824–829. <https://doi.org/10.11728/cjss2022.04.yg26>
2. Cowles K. Site selection criteria for the optical atmospheric visibility monitoring telescopes. *The Telecommunications and Data Acquisition Report (TDA Progress Rep.)*. 1989;42–99:235–239.
3. Еленин Л.В., Молотов И.Е., Боровин Г.К. Эффективное планирование наблюдений космических объектов на орбитах различных типов. *Препринты Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН*. 2018;72. 18 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2018-72>
4. Fedeler S.J., Holzinger M.J., Whitacre W. Optimality and Application of Tree Search Methods for POMDP-based Sensor Tasking. In: *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS)*. Maui, Hawaii, USA. 2020. 24 p. URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2020/Poster/Fedeler.pdf>
5. Schubert M., Kerschull C., Gelhaus J., et al. Evaluating sensor tasking strategies for object cataloging in GEO. *Acta Astronautica*. 2024;228:7–16. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.11.026>
6. Dhingra N.K., DeJac C., Herz A., et al. Space domain awareness sensor scheduling with optimality certificates. In: *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. 2023. 15 p. URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2023/SDA/Dhingra.pdf>
7. Ksendzук A., Grigorev V. Satellite Radio Monitoring Stations Observation Planning: Time Alignment Observation Algorithm. In: *2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)*. IEEE; 2021. P. 2–6. <https://doi.org/10.1109/EnT50460.2021.9681763>
8. Tian M., Ma G., Huang P., et al. Optimizing satellite ground station facilities scheduling for RSGS: a novel model and algorithm. *Int. J. Digital Earth*. 2023;16(1):3949–3972. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2259870>
9. Garcia-Piquer A., Morales J.C., Ribas I., et al. Efficient scheduling of astronomical observations—Application to the CARMENES radial-velocity survey. *Astronomy & Astrophysics*. 2017;604:A87. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628577>
10. Johnston M.D. Scheduling tools for astronomical observations. In: Boroson T.A., Davies J.K., Robson I. (Eds.). *New Observing Modes for the Next Century. Astronomical Society of the Pacific Conference Series (ASP)*, 1996;87:62–71. URL: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1996ASPC...87...62J/ADS_PDF
11. Григорьев В.С., Ксэндзук А.В. Оптимизационные методы составления расписания наблюдений за космическими аппаратами в околоземном пространстве наземными радиотехническими измерительными средствами. *Журнал радиоэлектроники*. 2023;7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.1>
12. *Теоретические основы радиолокации*; под ред. В.Е. Дулевича. М.: Сов. радио; 1978. 607 с.
13. Фалькович С.Е., Хомяков Э.Н. *Статистическая теория измерительных радиосистем*. М.: Радио и связь; 1981. 965 с.
14. Fürbacher A., Fruth T., Weibigke A., et al. Concept for generic agile, reactive optical link planning. *CEAS Space J.* 2025. 10 p. <https://doi.org/10.1007/s12567-025-00592-0>
15. García A. Greedy algorithms: a review and open problems. *ArXiv Prepr*. arXiv:2408.08935 (2024). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.08935>

16. Сигов А.С., Андрианова Е.Г., Жуков Д.О., Зыков С.В., Тарасов И.Е. Квантовая информатика: обзор основных достижений. *Russian Technological Journal*. 2019;7(1):5–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-5-37>
17. Ксендзук А.В., Замуруев С.Н. Перспективы создания радиотехнического комплекса мониторинга космического пространства на базе космоцентра МИРЭА. В сб.: *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («РАДИОИНФОКОМ-2022»): Сб. научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции*. М.: РТУ МИРЭА; 2022. С. 72–75. <https://www.elibrary.ru/knywzk>

REFERENCES

1. Liu J., Yang X., Cheng H., et al. Progress of China's Space Debris Research. *Chinese J. Space Sci.* 2022;42(4):824–829. <https://doi.org/10.11728/cjss2022.04.yg26>
2. Cowles K. Site selection criteria for the optical atmospheric visibility monitoring telescopes. *The Telecommunications and Data Acquisition Report (TDA Progress Rep.)*. 1989;42–99:235–239.
3. Elenin L.V., Molotov I.E., Borovin G.K. Effective planning of observations of space objects on different types of orbits. *Preprinty Instituta prikladnoi matematiki im. M.V. Keldysha RAN = Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics*. 2018;72. 18 p. (in Russ.). <https://doi.org/10.20948/prepr-2018-72>
4. Fedeler S.J., Holzinger M.J., Whitacre W. Optimality and Application of Tree Search Methods for POMDP-based Sensor Tasking. In: *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS)*. Maui, Hawaii, USA. 2020. 24 p. Available from URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2020/Poster/Fedeler.pdf>
5. Schubert M., Kechsull C., Gelhaus J., et al. Evaluating sensor tasking strategies for object cataloging in GEO. *Acta Astronautica*. 2024;228:7–16. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.11.026>
6. Dhingra N.K., DeJac C., Herz A., et al. Space domain awareness sensor scheduling with optimality certificates. In: *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. 2023. 15 p. Available from URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2023/SDA/Dhingra.pdf>
7. Ksendzuk A., Grigorev V. Satellite Radio Monitoring Stations Observation Planning: Time Alignment Observation Algorithm. In: *2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)*. IEEE; 2021. P. 2–6. <https://doi.org/10.1109/EnT50460.2021.9681763>
8. Tian M., Ma G., Huang P., et al. Optimizing satellite ground station facilities scheduling for RSGS: a novel model and algorithm. *Int. J. Digital Earth*. 2023;16(1):3949–3972. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2259870>
9. Garcia-Piquer A., Morales J.C., Ribas I., et al. Efficient scheduling of astronomical observations – Application to the CARMENES radial-velocity survey. *Astronomy & Astrophysics*. 2017;604:A87. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628577>
10. Johnston M.D. Scheduling tools for astronomical observations. In: Boroson T.A., Davies J.K., Robson I. (Eds.). *New Observing Modes for the Next Century. Astronomical Society of the Pacific Conference Series (ASP)*. 1996;87:62–71. Available from URL: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1996ASPC...87...62J/ADS_PDF
11. Grigorev V.S., Ksendzuk A.V. Optimization methods for scheduling observations of spacecraft by ground-based radio measuring instrument. *Zhurnal Radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2023;7 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.1>
12. Dulevich V.E. (Ed.). *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii (Theoretical Foundations of Radar)*. Moscow: Sovetskoe Radio; 1978. 607 p. (in Russ.).
13. Fal'kovich S.E., Khomyakov E.N. *Statisticheskaya teoriya izmeritel'nykh radiosistem (Statistical Theory of Measurement Radio Systems)*. Moscow: Radio i svyaz'; 1981. 965 p. (in Russ.).
14. Fürbacher A., Fruth T., Weibigke A., et al. Concept for generic agile, reactive optical link planning. *CEAS Space J.* 2025. 10 p. <https://doi.org/10.1007/s12567-025-00592-0>
15. García A. Greedy algorithms: a review and open problems. *ArXiv Prepr.* arXiv:2408.08935 (2024). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.08935>
16. Sigov A.S., Andrianova E.G., Zhukov D.O., Zykov S.V., Tarasov I.E. Quantum informatics: Overview of the main achievements. *Russian Technological Journal*. 2019;7(1):5–37 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-5-37>
17. Ksendzuk A.V., Zamuruev S.N. Prospects for the creation of a radio engineering complex for monitoring outer space on the basis of the MIREA Space Center. In: *Actual Problems and Prospects of Development of Radio Engineering and Information Communication Systems (RADIOINFOCOM-2022): Proceedings of the 6th Scientific and Technical Committee*. Moscow: RTU MIREA; 2022. P. 72–75 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/knywzk>

Об авторах

Ксендзук Александр Владимирович, д.т.н., заведующий кафедрой № 346 – радиоэлектронных систем, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ks_alex@mail.ru. Scopus Author ID 56628472300, SPIN-код РИНЦ 2389-6036, <https://orcid.org/0009-0001-7084-1433>, <https://www.researchgate.net/profile/Alexander-Ksendzuk-2>

Кузнецов Иван Алексеевич, аспирант, ПАО «МАК «Вымпел» (125480, Россия, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 10, к. 1). E-mail: 0601ivankuznetsov@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0009-0045-6626>

About the Authors

Alexander V. Ksendzuk, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Radioelectronic Systems, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ks_alex@mail.ru. Scopus Author ID 56628472300, RSCI SPIN-code 2389-6036, <https://orcid.org/0009-0001-7084-1433>, <https://www.researchgate.net/profile/Alexander-Ksendzuk-2>

Ivan A. Kuznetsov, Postgraduate Student, Public Joint Stock Company VYMPEL Interstate Corporation (10-1, Geroyev Panfilovtsev ul., Moscow, 125480 Russia). E-mail: 0601ivankuznetsov@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0009-0045-6626>