



Двадцать четвертая международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»

Метод определения параметров многомаршрутной
радиолокационной съемки района сложной
конфигурации

ктн, Д.Н.Комраков, К.К.Бульба, К.С. Кудинов



Актуальность темы

Мониторинг районов сложной конфигурации, проливных зон, изрезанных побережий, горных участков космическими радиолокационными средствами требует построения плана из нескольких маршрутов съёмки. Традиционные подходы к планированию, ориентированные на районы простой формы, приводят к избыточному расходу ресурса космического аппарата либо к пропускам покрытия.

Возрастающие требования к оперативности мониторинга обстановки и усложнение геометрии районов интереса формируют потребность в автоматизированных методах определения параметров многомаршрутной съёмки, совместно учитывающих рельеф местности, ограничения по углам визирования и реальное орбитальное движение космического аппарата.



Идея исследования

Идея исследования состоит в определении параметров многомаршрутной съёмки как задачи покрытия множества: район мониторинга разбивается на сетку ячеек с весами приоритета, а параметры маршрутов (угол визирования, положение полосы захвата) подбираются пошаговым (жадным) алгоритмом, на каждом шаге выбирающим маршрут с максимальным приростом критерия полноты охвата. Совместно с геометрией полосы захвата учитываются рельеф местности (радиолокационная тень и наложение) и реальное орбитальное движение космического аппарата, определяющее физически достижимые моменты и направления пролёта над районом.

Целью исследования является разработка метода и программной реализации, обеспечивающих определение параметров многомаршрутной космической радиолокационной съёмки района сложной конфигурации с максимизацией полноты и равномерности охвата при минимально необходимом числе маршрутов, с подтверждением работоспособности как на модельных, так и на реальных геопространственных и орбитальных данных.



Постановка задачи

Исходные данные:

1. Параметры орбитальной группировки КА:

$X_{КА} = (TLE; H; \theta_{min}, \theta_{max}; W)$, где TLE — двухстрочные элементы орбиты; H — высота орбиты; $\theta_{min}, \theta_{max}$ — диапазон допустимых углов визирования; W — ширина полосы захвата.

2. Параметры района мониторинга:

$X_{\Omega} = (\Omega; \{p_k\}; ЦМР)$, где Ω — полигон, задающий границу района; $\{p_k\}$ — весовые коэффициенты приоритета ячеек сетки; ЦМР — цифровая модель рельефа местности.

3. Параметры бортовой радиолокационной аппаратуры:

$X_{РСА} = (v; L_{аз}; \lambda; k_{амб}; V_{бюдж})$, где v — орбитальная скорость КА; $L_{аз}$ — размер антенны по азимуту; λ — длина волны; $k_{амб}$ — коэффициент запаса; $V_{бюдж}$ — бюджет данных за интервал планирования.

4. Требования к решению:

$X_{треб} = (K_{п_треб}; M_{max}; T_{пл})$, где $K_{п_треб}$ — требуемый уровень показателя полноты охвата; M_{max} — предельное число маршрутов; $T_{пл}$ — горизонт планирования.

Показатели эффективности метода:

$$K_p = (\sum_k p_k \cdot 1[n_k \geq 1]) / (\sum_k p_k), \quad K_r = 1 - (\sigma_n / \bar{n})$$

где p_k — вес приоритета ячейки k ; n_k — кратность покрытия ячейки k выбранными маршрутами; $\sigma_n, \bar{n}$ — среднеквадратическое отклонение и среднее значение кратности покрытия.

Требуется:

найти такой набор маршрутов $\{\theta_m, t_m\}$, $m = 1 \dots M$, при котором обеспечивается существенное повышение полноты и равномерности охвата района мониторинга сложной конфигурации при минимально необходимом числе маршрутов, с соблюдением ограничений на реализуемость ($PRF_{min} \leq PRF_{max}$) и ресурс бортовой аппаратуры:

$$\{\theta_m, t_m\}^* = \arg \max K_p \mid K_p \geq K_{п_треб} \wedge K_r \rightarrow \max \wedge M \leq M_{max}$$



Обобщённая схема метода



Метод объединяет семь укрупнённых шагов: от постановки задачи и сбора исходных данных (район, ЦМР, орбита КА) до формирования итогового плана съёмки. Блок 5 намеренно выделен как predetermined процесс: внутренняя логика жадного алгоритма (выбор маршрутов, критерий остановки) вынесена на отдельную схему, поскольку является самостоятельным элементом метода.

Обозначения:

K_p — показатель полноты охвата района; K_r — показатель равномерности охвата;
 $K_{п_треб}$ — требуемый (целевой) уровень показателя K_p , задаваемый при постановке задачи.
Блок 5 (двойная рамка) — predetermined процесс: детально раскрыт на схеме алгоритма.



Схема жадного алгоритма выбора маршрутов

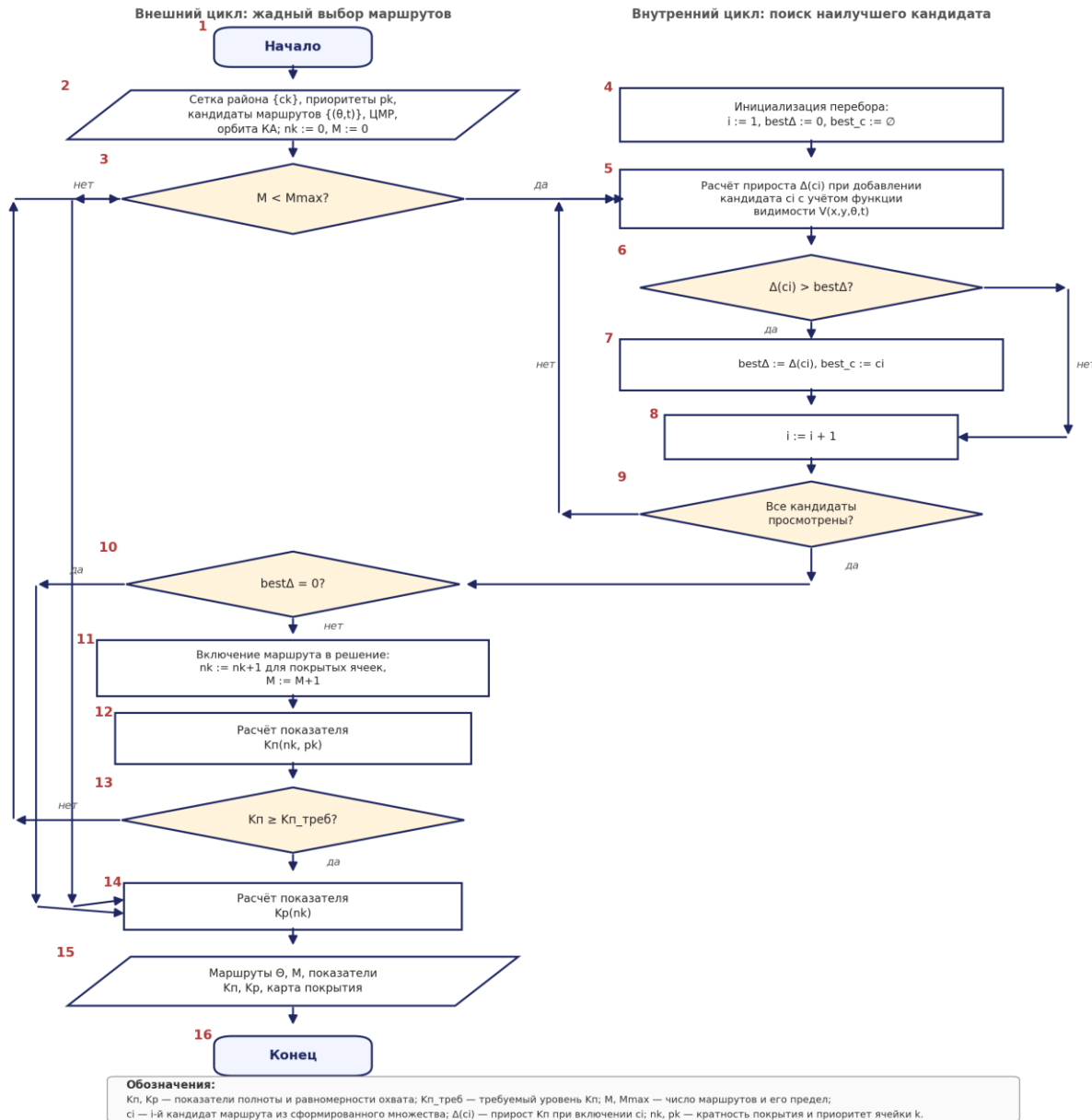


Схема отражает реальную вложенную структуру алгоритма: внешний цикл жадного выбора маршрутов (16 блоков, левая колонка) и внутренний цикл перебора кандидатов для поиска наилучшего прироста показателя Кп (правая колонка).

На каждой итерации внутренний цикл (блоки 4–9) перебирает всех кандидатов и находит маршрут с максимальным приростом Δ показателя Кп. Внешний цикл (блоки 3, 10–13) включает найденный маршрут в решение и проверяет условия остановки: достижение Кп_треб, исчерпание лимита Mmax или отсутствие улучшающих кандидатов ($best\Delta = 0$).



Реальный вид района сложной конфигурации



Рис. 1 «Спутниковый снимок»

Узкая полоса вдоль горного полуострова, острова и изрезанная береговая линия: именно та сложная конфигурация района, для которой разработан метод.

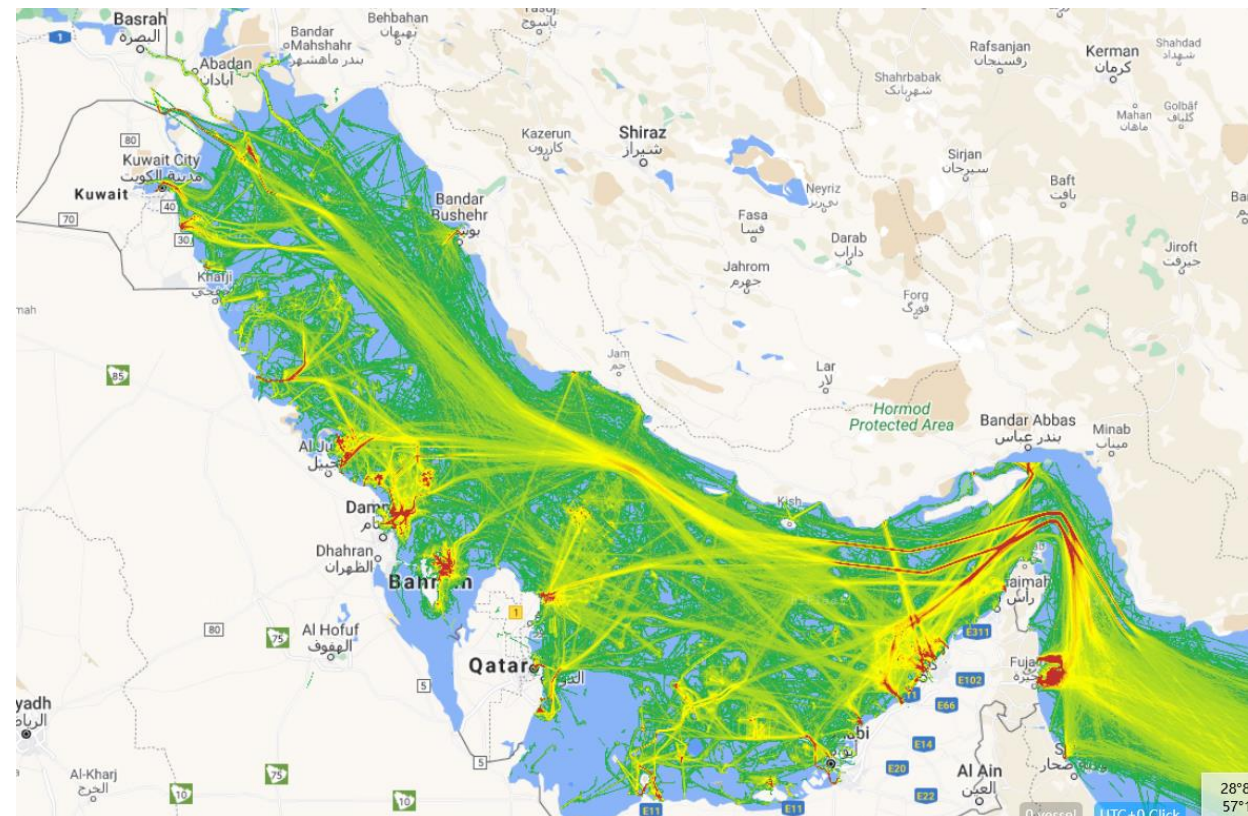


Рис. 2 «Плотность судоходства (AIS)»

Все маршруты судоходства сходятся к одной точке пролива, образуя типичный «узел», охватить который одной полосой захвата физически невозможно.

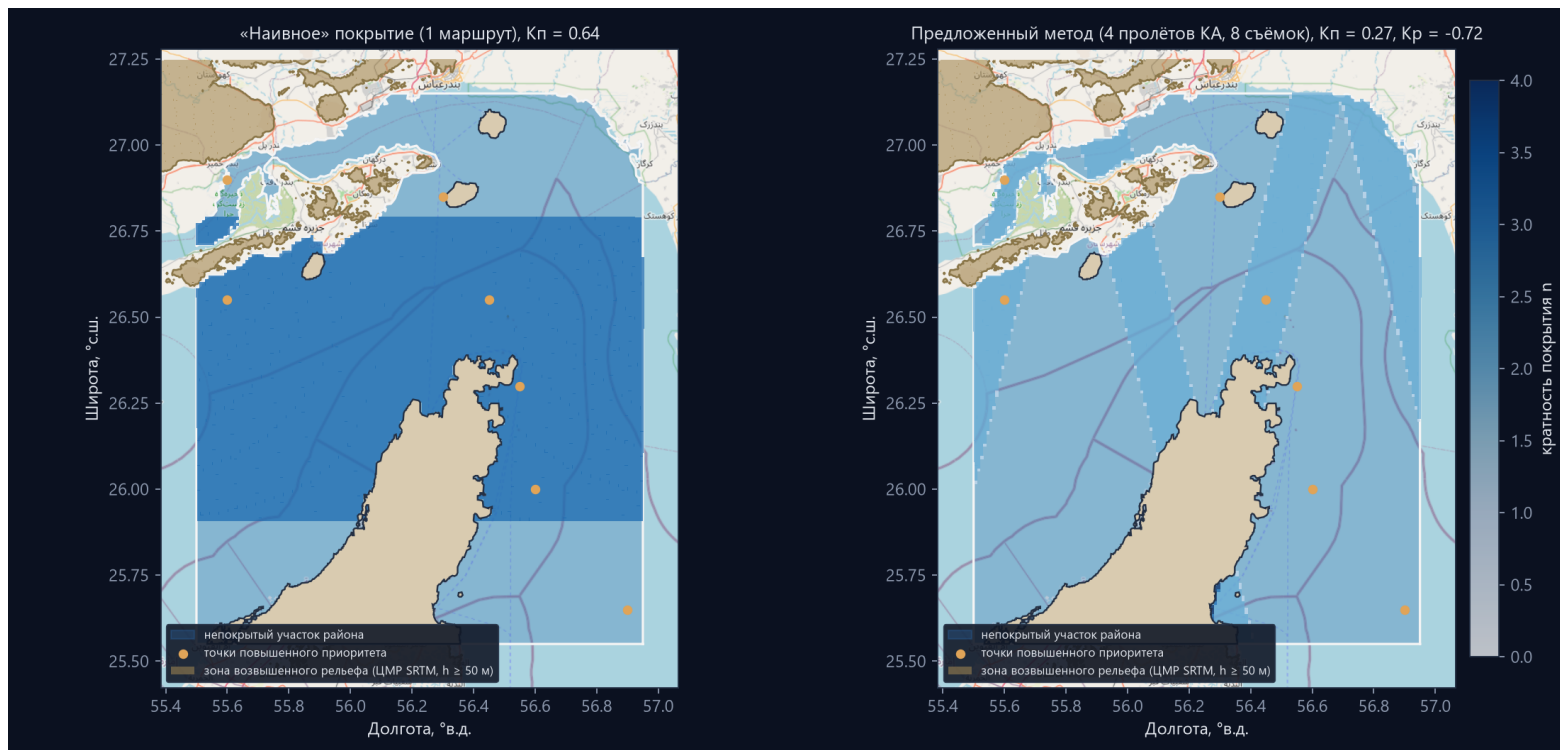


Рис. 3 «Покрытие на реальной карте: наивный вариант и метод»

Апробация на реальной ЦМР и реальных орбитальных данных без изменения алгоритма показала: полнота охвата зависит не только от числа маршрутов, но и от геометрии реальных пролётов относительно формы района. За 1 сутки планирования $K_p = 0,27$ (4 пролёта, 8 съёмки); при расширении горизонта до 14 суток $K_p = 0,89$. Жадный алгоритм кардинально превосходит случайный выбор маршрутов.



Таким образом, в результате проведённого исследования разработан метод определения параметров многомаршрутной космической радиолокационной съёмки района сложной конфигурации, основанный на жадном алгоритме выбора маршрутов с совместным учётом рельефа местности и орбитального движения космического аппарата. Метод верифицирован контрольными тестами и сопоставлен с альтернативными стратегиями выбора маршрутов.

Полученные результаты подтверждены не только на условной модели района, но и на полностью реальных геопространственных данных (цифровая модель рельефа, орбитальные данные космического аппарата), включая апробацию на нескольких реальных районах различной конфигурации. Разработанная программная реализация может быть использована при планировании применения орбитальной группировки космических аппаратов радиолокационного наблюдения для мониторинга районов сложной конфигурации.



1. Эльясберг, П. Е. Введение в теорию полёта искусственных спутников Земли. – М.: Наука, 1965.
2. Охоцимский, Д. Е. Основы механики космического полёта / Д. Е. Охоцимский, Ю. Г. Сихарулидзе. – М.: Наука, 1990.
3. Верещака, А. И. Космические системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Изд-во МАИ, 2002.
4. Curlander, J. C. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing / J. C. Curlander, R. N. McDonough. – New York: John Wiley & Sons, 1991. – 672 p.
5. Hoots, F. R. Spacetrack Report No. 3: Models for Propagation of NORAD Element Sets / F. R. Hoots, R. L. Roehrich. – Colorado Springs: ADCOM, 1980. – 91 p.
6. Farr, T. G. The Shuttle Radar Topography Mission / T. G. Farr [et al.] // Reviews of Geophysics. – 2007. – Vol. 45, No. 2. – P. 1–33.



Спасибо за внимание