

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

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

Метод определения параметров многомаршрутной радиолокационной съёмки района сложной конфигурации из космоса

Бульба К.К., Кудинов К.С.
кандидат технических наук Комраков Д.Н.

Актуальность темы

Исследование 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 изучения 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 полноты охвата. Совместно с геометрией полосы захвата учитываются рельеф местности (зоны радиолокационной тени по цифровой модели рельефа) 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 охвата при контроле его равномерности и минимально необходимом числе маршрутов, с подтверждением работоспособности на модельных и реальных геопространственных и орбитальных данных.

Постановка задачи

Исходные данные:

1. Орбитальная группировка КА: $X_{КА}$ = (TLE; H; θ_{min}, θ_{max}; W), где TLE — двухстрочные элементы орбиты; H — высота орбиты; θ_{min}, θ_{max} — диапазон углов визирования; W — ширина полосы захвата.

2. Район мониторинга: X_{Ω} = (Ω; $\{p_k\}$; ЦМР), где Ω — граница района; $\{p_k\}$ — веса приоритета ячеек сетки; ЦМР — цифровая модель рельефа.

3. Бортовая РСА: $X_{РСА}$ = (v; $L_{аз}$; λ; $k_{амб}$; $V_{бюдж}$), где v — скорость КА; $L_{аз}$ — размер антенны по азимуту; λ — длина волны; $k_{амб}$ — коэффициент запаса; $V_{бюдж}$ — бюджет данных.

4. Требования: $X_{треб}$ = ($K_п^{треб}$; M_{max}; $T_{пл}$) — требуемая полнота охвата, предельное число маршрутов, горизонт планирования.

Показатели эффективности:

$K_п$ — показатель полноты охвата района:

$$K_п = \frac{\Sigma_k p_k \mathbf{1}[n_k \geq 1]}{\Sigma_k p_k}$$

$K_р$ — показатель равномерности охвата района:

$$K_р = 1 - \frac{\sigma_n}{n_{ср}}$$

где p_k — вес приоритета ячейки k; n_k — кратность её покрытия; σ_n, $n_{ср}$ — СКО и среднее значение кратности покрытия.

Требуется:

найти набор маршрутов $\{\theta_m, t_m\}$, $m = 1 \ldots M$, максимизирующий полноту охвата при минимально необходимом числе маршрутов и ограничениях реализуемости:

$$\{\theta_m, t_m\}^* = \arg\max K_п, \quad M \leq M_{max}, \quad PRF_{min} \leq PRF_{max}$$

Останов — при $K_п \geq K_п^{треб}$; равномерность $K_р$ контролируется по итоговому плану.

Обобщённая схема метода

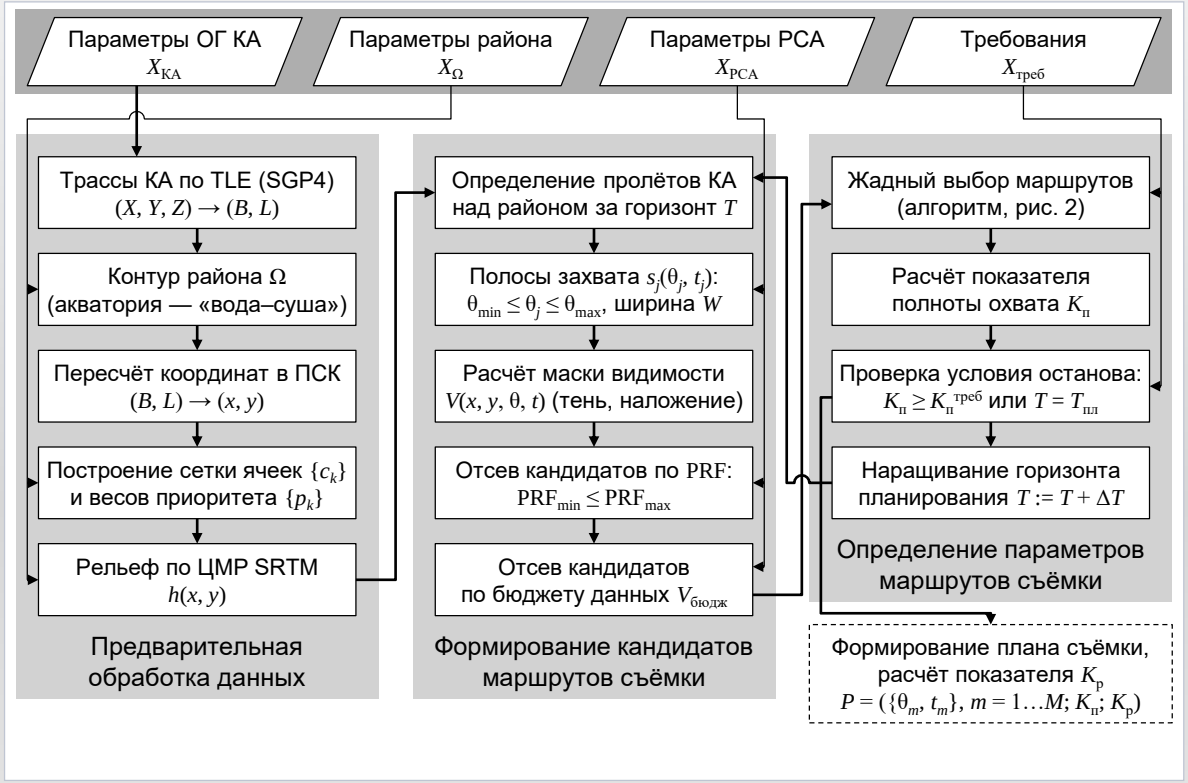

Рис. 1 «Обобщённая схема метода»

Предварительная обработка данных: трассы КА по TLE (модель SGP4 [5]), контур района (для акватории — по линии «вода–суша»), переход в ПСК, сетка ячеек с весами приоритета p_k, рельеф по ЦМР SRTM [6].

Формирование кандидатов маршрутов: полосы захвата по реальным пролётам КА за горизонт T, маска радиолокационной видимости $V(x, y, \theta, t)$, отсев по PRF и бюджету данных.

Определение параметров маршрутов: жадный выбор (рис. 2), наращивание горизонта T до $K_п \ge K_п^{треб}$, план съёмки с показателями $K_п$ и $K_р$.

Схема жадного алгоритма выбора маршрутов

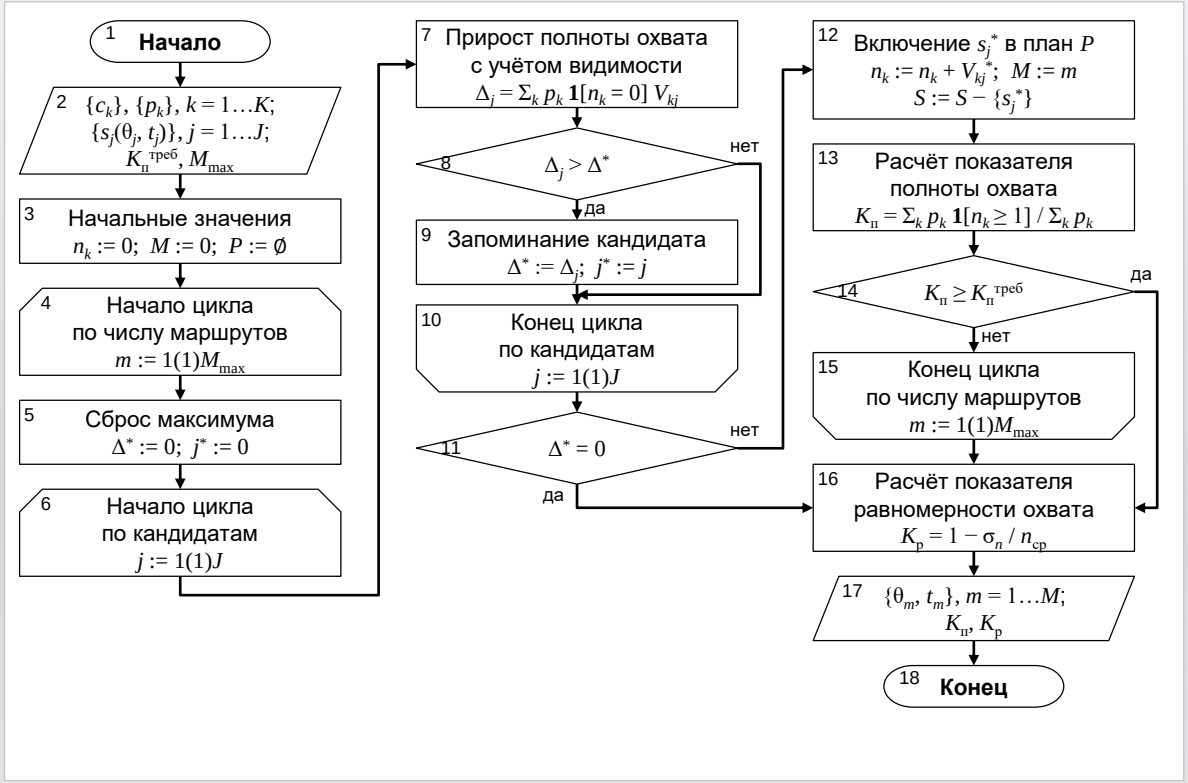

Рис. 2 «Схема жадного алгоритма выбора маршрутов»

Блоки 4–15 — внешний цикл по числу маршрутов: в план включается маршрут с наибольшим приростом полноты охвата.

Блоки 6–10 — внутренний цикл по кандидатам, построенным по реальным пролётам КА; $V_{kj} = V(x_k, y_k, \theta_j, t_j)$ — видимость ячейки k с маршрута j с учётом рельефа.

Блоки 11, 14 — останов: прироста нет ($\Delta^* = 0$) или $K_п \geq K_п^{треб}$.

$K_п$ — монотонная субмодулярная функция набора маршрутов, поэтому жадный выбор гарантирует не менее $(1 - 1/e) \approx 63\ \%$ оптимума [7]. На контрольной задаче: жадный — $K_п = 0{,}9645$ за 0,02 с, генетический — 0,9616 за 0,23 с, случайный выбор — $0{,}54 \pm 0{,}15$.

Реальный вид района наблюдения сложной конфигурации

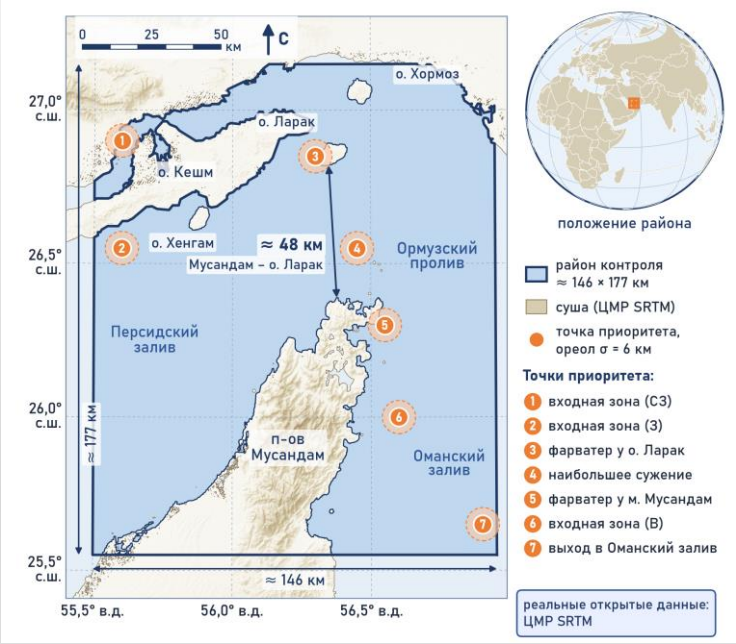

Рис. 3 «Район наблюдения: Ормузский пролив»

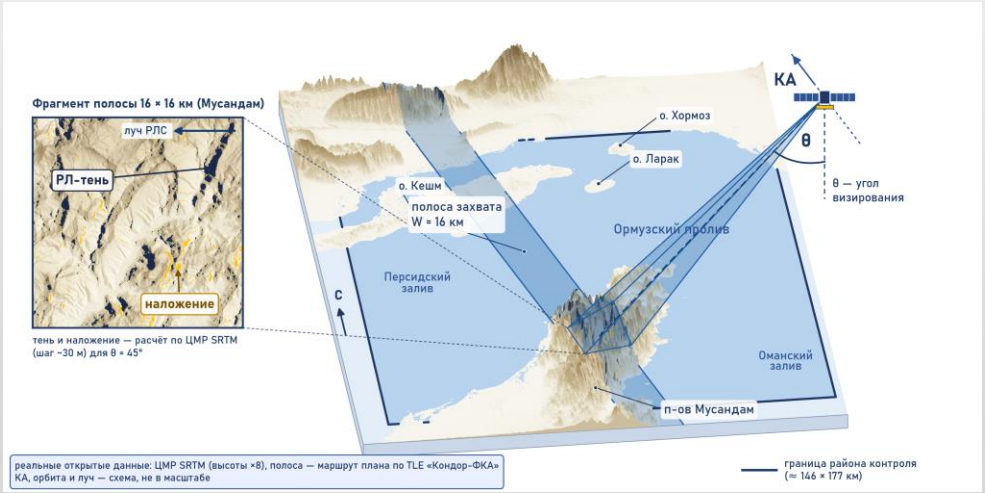

Рис. 4 «Рельеф района и радиолокационная тень (ЦМР SRTM)»

Узкий пролив, острова и горный полуостров Мусандам: район ≈ 146 × 177 км не охватить одной полосой захвата 16 км, а горы создают зоны радиолокационной тени и наложения.

Апробация метода на реальных геопространственных данных

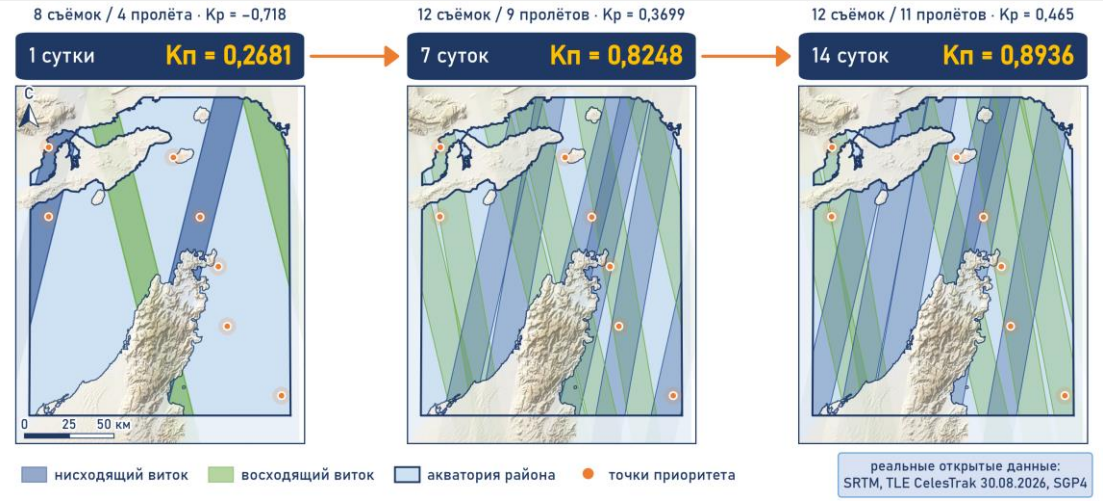

Рис. 5 «Покрытие района за 1, 7 и 14 суток: ЦМР SRTM, TLE «Кондор-ФКА» № 1, № 2, модель SGP4»

Метод применён к реальным данным без изменения алгоритма: ЦМР SRTM, орбиты КА «Кондор-ФКА» № 1 и № 2 (TLE CelesTrak, SGP4).

За 1 сутки над районом 4 пролёта: метод задействовал все 8 доступных съёмок, $K_п$ = 0,27 — предел задаёт геометрия трасс, а не алгоритм выбора.

При горизонте 7 суток $K_п$ = 0,82, 14 суток — 0,89.

Второй КА пары почти не добавляет охвата (0,265 → 0,268 за сутки): плоскости орбит разнесены лишь на 8,9°.

Заключение

Разработан метод определения параметров многомаршрутной космической радиолокационной съёмки района сложной конфигурации: задача сведена к взвешенному покрытию сетки ячеек, маршруты выбираются жадным алгоритмом по приросту полноты охвата с учётом рельефа (ЦМР) и реальных пролётов КА (TLE, SGP4). На условной модели района полнота охвата выросла с 0,72 до 0,96 при пяти маршрутах, время расчёта — 0,02 с.

На реальных данных по Ормузскому проливу метод работает без изменения алгоритма: $K_п$ = 0,27 за 1 сутки и 0,89 за 14 суток. Достижимую полноту ограничивают горизонт планирования и разнесение орбитальных плоскостей группировки, а не алгоритм выбора. Программная реализация (приложение с онлайн- и офлайн-режимом) может применяться при планировании съёмки и обосновании состава группировок КА радиолокационного наблюдения.

Литература

1. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М. : Радиотехника, 2010. – 680 с.

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. Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M., Krieger G., Hajnsek I., Papathanassiou K.P. A tutorial on synthetic aperture radar // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013, № 1, p. 6–43.

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.

7. Nemhauser, G. L. An analysis of approximations for maximizing submodular set functions – I / G. L. Nemhauser, L. A. Wolsey, M. L. Fisher // Mathematical Programming. – 1978. – Vol. 14. – P. 265–294.