

Фотограмметрическая модель радиолокационной съемки участка земной поверхности в режимах высокого разрешения

К.С. Кудинов, В.В. Зайцев

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13.*

*В работе рассмотрена возможность использования фотограмметрической модели для реализации режимов высокого разрешения в современных космических радиолокаторах с синтезированной апертурой (РСА). Внедрение режимов высокого разрешения в РСА требует учитывать взаимное положение космического аппарата и наземного объекта в пространстве, а также орбитальную механику и геометрические ограничения съёмки. Проведён анализ ключевых параметров, включая угол скоса, наклонную дальность и доплеровскую частоту, с целью определения условий реализации режимов высокого разрешения. Результаты работы могут быть использованы для планирования высокоточных радиолокационных наблюдений в интересах мониторинга инфраструктуры, геодезических измерений и решения других прикладных задач.
Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, планирование съёмки, режимы высокого разрешения*

Photogrammetric Model of High-Resolution Radar Imaging of Earth Surface Areas

K.S. Kudinov, V.V. Zaitsev

A.F. Mozhaysky Military Space Academy

*The paper examines the feasibility of using a photogrammetric model to implement high-resolution modes in modern spaceborne synthetic aperture radar (SAR) systems. Implementing high-resolution SAR modes requires accounting for the relative spatial geometry between the spacecraft and the ground target, as well as orbital mechanics and geometric imaging constraints. An analysis of key parameters—including squint angle, slant range, and Doppler frequency—has been carried out to determine the conditions necessary for achieving high-resolution imaging. The results can be applied to planning high-detail radar observations for infrastructure monitoring, geodetic measurements, and other practical applications.
Keywords: synthetic aperture radar, orbital mechanics, imaging planning, high-resolution modes*

Введение

Современные РСА решают широкий спектр прикладных задач, требующих непрерывного повышения детальности получаемых данных. Для мониторинга критически важных объектов, анализа геологических процессов и решения специальных задач необходимы радиолокационные изображения (РЛИ) с высоким пространственным разрешением.

В настоящее время для достижения высокого разрешения в РСА используется два перспективных режима [1] [2] (табл. 1):

- Улучшенный режим сверхвысокого разрешения (Staring Spotlight)— режим с максимально возможным увеличением времени синтеза апертуры для одной точки на земной поверхности за счёт непрерывного поворота антенны для её точного сопровождения. Обеспечивает наивысшее азимутальное разрешение при минимальном размере кадра (рис.1).

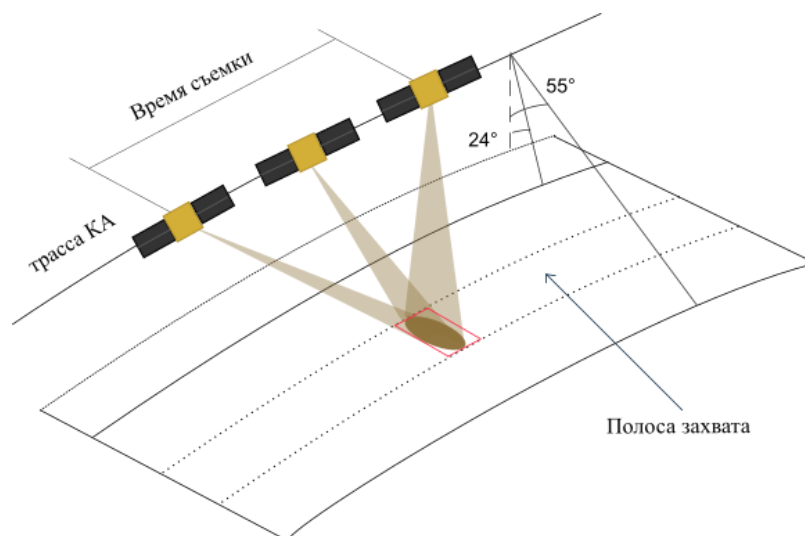


Рис. 1. Принцип радиолокационной съемки в улучшенном режиме сверхвысокого разрешения

- Следящий прожекторный режим (Sliding Spotlight) — компромиссный режим, в котором луч антенны «скользит» с меньшей угловой скоростью, чем в Staring Spotlight. Это позволяет увеличить размер кадра при сохранении высокого (хотя и несколько ухудшенного по сравнению с пристальным режимом) разрешения (рис.2).

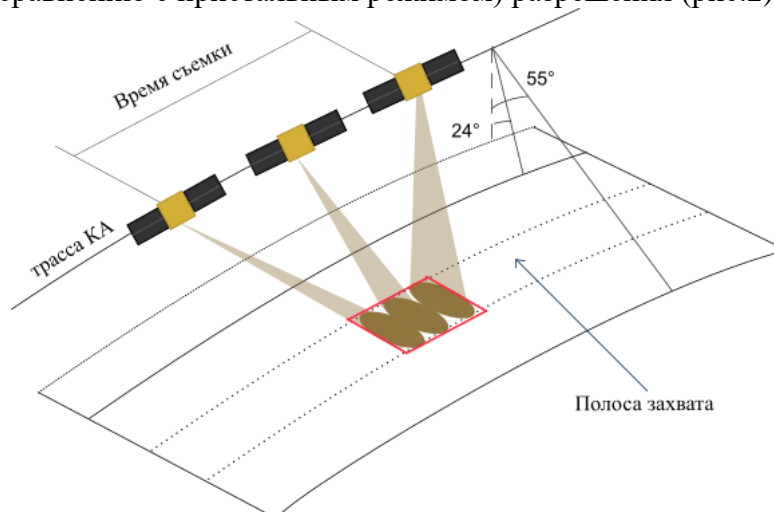


Рис. 2. Принцип радиолокационной съемки в следящем прожекторном режиме

Таблица 1. Параметры режимов сверхвысокого разрешения на КА_TerraSAR-X

Режимы высокого разрешения	Азимутальное разрешение, м	Ширина полосы обзора, км	Время синтеза апертуры, с
Улучшенный режим сверхвысокого разрешения	0,25	4	5-10
Следящий прожекторный режим	1-2	5–10	3-6

Несмотря на успешную реализацию режимов высокого разрешения на зарубежных аппаратах в X и C диапазоне (TerraSAR-X и Gaofen-3 соответственно) [3], в отечественной практике, особенно для PCA в S-диапазоне (длина волны ~ 0.1 м), их применение остается малоизученным. Попытки реализации на КА серии «Кондор-Э» режимов высокого разрешения выявили ряд проблем [4], (искажения сигнала, неточность навигационных данных), которые требуют применения методов автофокусировки и точного учёта миграции по дальности. Заложить решение этих проблем ещё на этапе планирования съёмки позволяет предлагаемая фотограмметрическая модель.

Фотограмметрическая модель для описания геометрии PCA-съёмки и учёта физических ограничений

В основе проектирования и планирования радиолокационных наблюдений Земли из космоса, особенно в режимах высокого пространственного разрешения, лежит строгая фотограмметрическая модель, обеспечивающая однозначное соответствие между координатами объекта на земной поверхности и измерительными параметрами радиолокатора с синтезированной апертурой (PCA) [5]. Данная модель представляет собой комплексный математический аппарат, который формализует геометрические и кинематические соотношения в системе «космический аппарат – вращающаяся Земля – наблюдаемый объект» с учётом орбитальной динамики, формы планеты и принципов радиолокационного синтеза апертуры (рис.3).

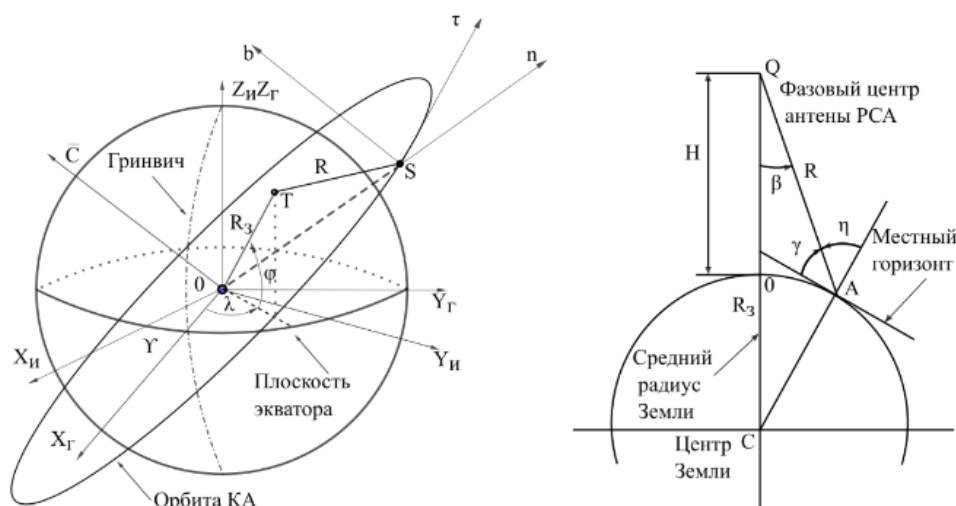


Рис. 3. Геометрическое построение для моделирования радиолокационной съёмки

Сущность модели определяется последовательностью координатных преобразований, связывающих несколько систем отсчёта:

Геодезическая СК (BLH) в которой задаётся положение объекта широтой B , долготой L и высотой H над эллипсоидом.

Гринвичская геоцентрическая СК ($OX_GY_GZ_G$) получаемая преобразованием геодезических координат в прямоугольные с учётом параметров эллипсоида:

$$\begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L, \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L, \\ Z &= [N(1 - e^2) + H] \sin B, \end{aligned} \quad (1)$$

где N – радиус кривизны первого вертикала;

e - эксцентриситет эллипсоида.

Экваториальная инерциальная СК ($OX_uY_uZ_u$) в которой исключается суточное вращение Земли. Переход осуществляется с помощью матрицы поворота $P(t)$, учитывающей звездное время t :

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = P(t) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Орбитальная барицентрическая СК (τ, b, η) жёстко связанная с плоскостью орбиты КА. Её начало находится в центре масс аппарата, ось τ направлена по касательной к орбите, ось η – по нормали к орбитальной плоскости. Эта система наиболее удобна для выражения геометрии визирования.

Последовательное применение этих преобразований позволяет перейти от географического положения цели к её координатам в системе, сопутствующей движению КА. На этой основе модель определяет ключевые радиолокационные параметры.

Наклонная дальность R_0 вычисляется как евклидово расстояние между вектором положения КА R_s и вектором положения цели R_t в инерциальной системе:

$$R_0 = \|R_s - R_t\|, \quad (3)$$

Угол скоса α – угол между вектором скорости КА V_s и вектором наклонной дальности R_0 (рис.4).. Его косинус вычисляется как скалярное произведение этих векторов:

$$\cos \alpha = R_0 \cdot V_s, \quad (4)$$

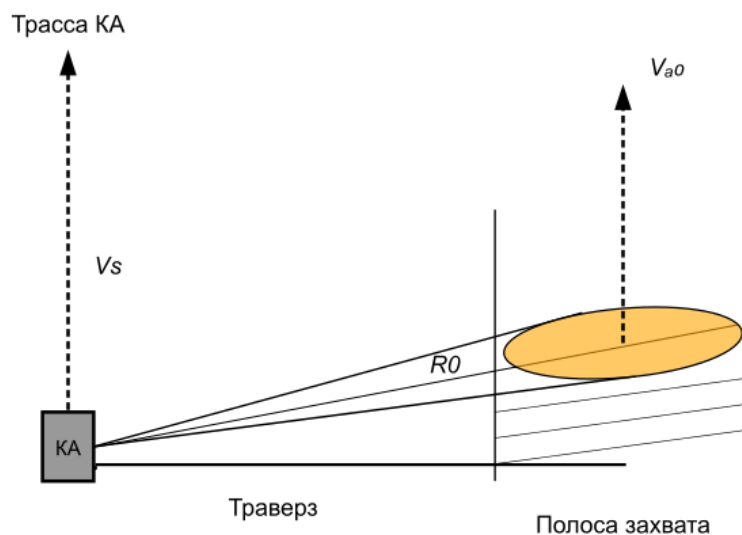


Рис. 4. Общая геометрия съемки при скошенном режиме

Данный угол непосредственно управляет доплеровским центром частоты отражённого сигнала.

Доплеровская частота f_d рассчитывается с учётом относительной радиальной скорости аппарата и точки на поверхности вращающейся Земли:

$$f_d = \frac{2V_s \sin \alpha}{\lambda}, \quad (5)$$

где λ – длина волны РСА

Таким образом, фотограмметрическая модель трансформирует задачу планирования съёмки в решение системы уравнений, связывающих прогнозируемые координаты и скорость КА, географические координаты цели и требуемые значения R_0 , a и f_d . Это позволяет решать, как прямую задачу (прогноз параметров сигнала для заданной цели), так и обратную (определение требуемой ориентации антенны и момента времени для получения заданных измерительных условий).

Полученные геометрические и кинематические величины – наклонная дальность R_0 , угол скоса a и доплеровская частота f_d – являются первичными аргументами для расчёта параметров, непосредственно определяющих возможность, качество и реализуемость синтеза апертуры в режимах высокого разрешения. Логическая цепочка расчёта выстраивается следующим образом.

Исходным требованием является заданное азимутальное разрешение I_x . Необходимое время синтеза T_c , в течение которого цель должна оставаться в диаграмме направленности антенны, прямо пропорционально наклонной дальности и длине волны и обратно пропорционально скорости носителя и требуемому разрешению:

$$T_c \approx \frac{R_0 \lambda}{2V_s I_x \cos a}, \quad (6)$$

где λ – длина волны зондирующего импульса;
 V_s – вектор скорости космического аппарата.
 I_x – требуемое азимутальное разрешение.

Это соотношение непосредственно вытекает из геометрии синтеза: для формирования эффективной апертуры длины $L_c = V_s T_c$, требуется, чтобы поперечное смещение КА относительно цели было достаточным.

Изменение угла визирования за время T_c приводит к формированию доплеровской полосы частот Δf_d отражённого сигнала. При использовании фотограмметрической модели ее можно выразить как разность частоты Доплера в начале и в конце съёмки:

$$\Delta f_d = f_{d2} - f_{d1}, \quad (7)$$

Ширина Δf_d накладывает жёсткое ограничение снизу на частоту повторения импульсов (PRF). Для однозначной дискретизации доплеровского спектра должно выполняться условие Найквиста: $PRF > \Delta f_d$. Таким образом, требуемое азимутальное разрешение I_x непосредственно диктует минимально допустимое значение PRF через скорость аппарата.

Другим ключевым следствием изменения наклонной дальности $R_0(t)$ за время синтеза является миграция по дальности (Range Cell Migration, RCM). Максимальная величина миграции ΔR_{max} может быть оценена через доплеровскую полосу:

$$\Delta R_{max} \approx \frac{\lambda^2 R_0 \Delta f_d^2}{8 \|V_s\|^2}, \quad (8)$$

Используя полученную связь $\Delta f_d \approx \|V_s\|/I_x$, выражение для RCM упрощается до формы, явно демонстрирующей его зависимость от разрешения и дальности:

$$\Delta R_{max} \approx \frac{\lambda^2 R_0}{8 I_x^2}, \quad (9)$$

Данная формула показывает, что требования к компенсации RCM ужесточаются квадратично с улучшением разрешения ($I_x \rightarrow 0$) и линейно с увеличением дальности. Необходимость сложной обработки возникает, когда ΔR_{max} превышает размер элемента разрешения по дальности:

$$\Delta R_{max} > c/2B, \quad (10)$$

где B – ширина зондирующего сигнала.

Наконец, размер кадра по азимуту L_{az} в режиме пристального обзора (Staring Spotlight) определяется шириной диаграммы направленности антенны θ_{az} и также зависит от рассчитанной наклонной дальности:

$$L_{az} = R_0 \theta_{az}, \quad (11)$$

Таким образом, представленная фотограмметрическая модель формирует замкнутый расчётный контур. Исходные геодезические координаты цели и баллистические данные КА преобразуются в базовые параметры визирования R_0 , a и f_d . Эти величины, в свою очередь, служат основой для последовательного определения всех характеристик режима съёмки: T_c , Δf_d , требований к PRF, ожидаемого уровня RCM и геометрических размеров кадра.

Моделирование и оценка параметров радиолокационной съёмки высокого разрешения

Для численной верификации разработанного математического аппарата и оценки реализуемости режимов высокого разрешения на отечественных платформах был создан специализированный программный комплекс. Моделирование проводилось для низкоорбитального космического аппарата, параметры которого соответствуют перспективным отечественным системам ДЗЗ S-диапазона. Такой выбор обусловлен необходимостью адаптации алгоритмов съёмки сверхвысокого разрешения к реальным конструктивным и энергетическим ограничениям целевых платформ.

Методика моделирования реализует последовательный вычислительный контур, основанный на представленной фотограмметрической модели. Для заданной точки земной поверхности и расчётного интервала времени выполняется:

- Баллистический прогноз траектории КА с использованием модели SGP4.
- Для каждого дискретного момента времени в течение орбитального цикла рассчитывается взаимное положение КА и цели в соответствии с цепочкой координатных преобразований, описанной в разделе 2.
- На основе полученных векторов положения и скорости вычисляются ключевые геометрические и кинематические параметры съёмки: наклонная дальность R_0 , угол скоса a , доплеровская частота f_d , угол визирования относительно траверсной плоскости.
- Используя зависимости, связывающие базовые параметры с характеристиками синтеза апертуры, определяются производные величины: необходимое время синтеза T_c для достижения целевого азимутального разрешения I_x , соответствующая длина синтезированной апертуры L_c , ширина доплеровской полосы Δf_d и ожидаемый уровень миграции по дальности ΔR_{max} .
- Для каждого потенциального окна наблюдения проводится анализ на соответствие физическим ограничениям режима, включающий проверку условия $R_{min} \leq R_0 \leq R_{max}$, оценку азимутальных неоднозначностей путём сравнения Δf_d с заданной частотой повторения импульсов (PRF), а также анализ критичности миграции по дальности путём сопоставления ΔR_{max} с размером дальностного элемента разрешения.

В качестве исходных данных для моделирования были приняты параметры, характерные для перспективного низкоорбитального носителя PCA [6] (табл. 2). Геометрические ограничения, такие как сектор электронного сканирования луча и диапазон углов визирования, соответствуют техническим возможностям активной фазированной решётки.

Таблица 2. Основные геометрические параметры съемки и характеристики КА

Параметр	Значение
Высота орбиты, км	518,833
Длина волны, м	0,1
Размер антенны, м	6
Ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ	1
Сектор электронного сканирования луча в азимутальной плоскости, град	4,1
Диапазон углов визирования, град	24-55
Минимальное время переключения, с	66
Ширина полосы сигнала (В), МГц	200

В результате моделирования для выбранного района интереса (Санкт-Петербург) в течение 16-суточного цикла было идентифицировано 26 временных окон, пригодных для проведения съёмки. Агрегированные геометрические характеристики этих окон представлены в табл. 3. Полученный диапазон наклонных дальностей и значений угла скоса позволяет провести сравнительный анализ влияния геометрии визирования на параметры синтеза.

Таблица 3. Геометрические параметры режима съемки

Параметр	Значение
Наклонная дальность до объекта, км	561-964
Средняя длительность окна, с	14,6
Минимальная продолжительность, с	11,9
Максимальная продолжительность, с	17,5

Для детальной оценки реализуемости целевого режима Staring Spotlight с азимутальным разрешением $I_x = 0,75$ м было проведено углублённое моделирование для трёх характерных окон, соответствующих минимальной, средней и максимальной наклонной дальности в полученном диапазоне. Результаты пошагового расчёта ключевых параметров режима для этих случаев сведены в табл. 4.

Анализ результатов моделирования, представленных в таблице 4, позволяет сделать следующие выводы:

1. Подтверждение теоретических зависимостей: Рост времени синтеза T_c и, как следствие, длины апертуры L_c и миграции по дальности ΔR_{max} с увеличением наклонной дальности R_0 полностью соответствует уравнениям (3) и (5) представленной фотограмметрической модели. Это служит верификацией её адекватности.

2. Доминирующее ограничение по PRF: Значение доплеровской полосы $\Delta f_d \approx \|V_s\|/I_x$, (и, соответственно, минимально требуемой PRF ~ 10.15 кГц) остаётся постоянным для всех окон. Это является прямым следствием фундаментального соотношения Δf_d и подтверждает, что в режиме Staring Spotlight основным фактором, определяющим требования к частоте повторения импульсов, являются скорость носителя и целевое разрешение, а не геометрия конкретного сеанса.

3. Критическая необходимость компенсации RCM: Рассчитанная миграция по дальности ΔR_{max} (1.31 – 1.93 км) превышает ширину дальностного канала (0.5 м). Это однозначно указывает на то, что для достижения заданного разрешения 0.75 м обязательным является применение точных алгоритмов обработки сигналов, таких как RMA (Range Migration Algorithm) или CSA (Chirp Scaling Algorithm), для компенсации данного эффекта [7].

4. Реализуемость и оптимальные условия: Сравнение времени синтеза T_c (5.14–7.62 с) с длительностью доступных окон (11.9–17.5 с) показывает достаточный временной ресурс для выполнения съёмки. Наиболее сбалансированными с точки зрения компромисса между временем синтеза и уровнем геометрических искажений являются окна со средней наклонной дальностью (~600–850 км).

Таблица 4. Расчетные параметры пристального прожекторного режима для различных дальностей

Параметр	Окно 1 ($R_0=587$ км)	Окно 2 ($R_0=815$ км)	Окно 3 ($R_0=874$ км)
Время синтеза, с	5,14	7,13	7,62
Длина синтеза апертуры, км	39,12	54,27	57,98
Доплеровская полоса, КГц	10,2	10,2	10,2
Требуемая PRF, КГц	10,2	10,2	10,2
Ширина дальностного канала, м	0,75	0,75	0,75
Размер кадра по азимуту, км	10,24	14,2	15,18
Максимальная миграция по дальности RCM ΔR_{max} , км	1,3	1,8	1,93

Таким образом, проведённое моделирование не только подтверждает принципиальную возможность реализации режима Staring Spotlight с разрешением 0.75 м для перспективных отечественных платформ S-диапазона, но и формирует конкретные инженерные требования: необходимость обеспечения PRF не ниже 10.2 кГц и обязательное использование алгоритмов компенсации миграции по дальности высокой точности в тракте обработки данных.

Литература

1. Костров В. В., Толстов Е. Ф. Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения // VII Всероссийские Арmandовские чтения: Молодая школа. — Муром, 2017. — С. 76–113.
2. Внотченко, С. Л., Улучшение характеристик космических РСА в режимах высокого разрешения / С. Л. Внотченко, М. В. Щетинин // Журнал радиоэлектроники. — 2022. — № 2.
3. Kraus T., Bräutigam B., Mittermayer J., Wollstadt S., Grigorov C. TerraSAR-X Staring Spotlight Mode Optimization and Global Performance Predictions // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. — 2016. — Vol. 9, № 3. — P. 1015–1027. — DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2431821
4. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В., Неронский Л.Б., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Итоги и уроки лётных

испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Молодая школа. — Муром, 2017. — С. 16–36.

5. Зайцев В. В., Расчет длительности наблюдения при радиолокационной съемке // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2022. — Т. 65, № 9. — С. 685–695.

6. Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми космической системой «Кондор-ФКА» / Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос»; Акционерное общество «Военно-промышленная корпорация „Научно-производственное объединение машиностроения“». — Версия 1. — М., 2023. — 112 с.

7. Дровосекова Т. Н. Анализ методов и алгоритмов фокусировки изображений [Электронный ресурс] / Т. Н. Дровосекова ; представлено: канд. техн. наук, доц. Р. П. Богуш. — 2021. — 4 с.