

Космические радиолокационные системы с синтезированной апертурой антенны

В.Г. Коберниченко¹ А.В. Сосновский¹

¹ Уральский федеральный университет
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.
E-mail: v.g.kobernichenko@urfu.ru

Рассмотрены методы формирования радиолокационных изображений земной поверхности с высоким пространственным разрешением, этапы развития, характеристики и особенности современных радиолокационных систем космического дистанционного зондирования Земли. Особое внимание уделено вопросам реализации интерферометрического режима обработки данных и развитию радиолокационных малых и микро-спутников.

Ключевые слова: радиолокаторы с синтезированной апертурой, этапы развития, интерферометрическая обработка, радиолокационные мини-спутники

Space radar systems with synthesized antenna aperture

V.G. Kobernichenko¹, A.V. Sosnovsky¹

¹ Ural Federal University.

The basics of radar images of the Earth's surface formation with high spatial resolution, the stages of development, characteristics and features of modern space borne radar systems of remote sensing of the Earth are considered. Particular attention is paid to the implementation of the interferometric data processing and the development of radar small and micro satellites.

Keywords: synthetic aperture radars, stages of development, InSAR processing, Smallsat SARs

Введение

В 2003 г. вышла коллективная монография под ред. Соколова А.В. «Вопросы перспективной радиолокации» [1]. В первой главе авторы попытались сформулировать технологический уровень и приоритетные направления совершенствования принципов и методов радиолокации в первой четверти XXI века. По мнению авторов, к ним, в первую очередь, относятся

- реализация принципов радиовидения на основе синтезированной апертуры антенны;
- использование широкополосных и сверхширокополосных зондирующих сигналов большой мощности;
- построение многопозиционных (распределенных) систем с когерентной обработкой сигналов;
- переход на полностью цифровые методы формирования и обработки сигналов;
- комплексирование (интеграция) радиолокационных средств с системами наблюдения оптического диапазона;
- применение фрактальных методов обнаружения и классификации сигналов.

Большинство из этих направлений было реализовано уже через несколько лет при создании космических радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Поэтому без преувеличения можно утверждать, что космические радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА) являются самыми современными радиолокационными системами.

Ежегодно в мире запускается несколько радиолокационных спутников ДЗЗ гражданского и двойного назначения и число их продолжает расти. По количеству спутников лидерами являются КНР, Италия, США. Свои радиолокационные космические системы имеют Германия, Канада, Финляндия, Индия, Россия, Израиль, Бразилия, Испания, Южная Корея.

Обобщение мирового опыта в области радиолокационных методов дистанционного зондирования Земли из космоса за 30 лет представлено в коллективной монографии под ред. В.С. Вербы [2]. Авторы монографии являются видными специалистами, принимавшими самое активное участие в создании космических радиолокаторов с синтезированной апертурой в России. Книга – по сути дела энциклопедия космической радиолокации.

В настоящей лекции кратко рассмотрены основы формирования радиолокационных изображений (РЛИ) земной поверхности с высоким пространственным разрешением, этапы развития космических РСА, характеристики и особенности современных радиолокационных систем космического ДЗЗ. Особое внимание уделено вопросам реализации интерферометрического режима обработки данных и развитию радиолокационных малых и микро-спутников.

Формирование РЛИ в космических РСА

В космических радиолокационных системах ДЗЗ получаемая информация представляется в виде РЛИ участка поверхности. Регистрируемые РСА характеристики поля отраженных электромагнитных колебаний в СВЧ диапазоне (интенсивность, спектральный состав, поляризация и т.п.) зависят как от параметров, определяемых условиями съемки и характеристиками аппаратуры, так и от параметров, зависящих от физических и геометрических характеристик природных образований и других объектов, а также от характеристик атмосферы.

Зависимость параметров отраженного сигнала от таких характеристик наблюдаемой поверхности как состав почвенного слоя, неровности, уклоны, конфигурация растительного покрова, степень волнения морской поверхности, содержание влаги в почве и растительности и т.п., позволяет дешифровать элементы по характеру и интенсивности отражения радиоизлучения, фиксируемых на РЛИ.

При использовании космических РСА для решения многочисленных тематических задач следует учитывать ряд особенностей формирования РЛИ, к числу которых относятся:

- геометрия бокового обзора (система координат наклонная дальность – путевая дальность, большие углы падения - от 20 до 60 градусов);
- проведение съемки на одной длине волны при когерентном излучении,
- наличие специфических искажений на РЛИ (радиолокационная тень, смещение движущихся объектов и пр.);
- наличие на РЛИ характерной пятнистости (спекл-шума).

Геометрия съемки поверхности при боковом обзоре приведена на рис.1, на котором обозначены: KA – положение космического аппарата на траектории, $ДНА$ — диаграмма направленности антенны; V - вектор путевой скорости, X - проекция траектории на поверхность Земли (путевая дальность), Rr - дальность до отражающего элемента по поверхности Земли, R - наклонная или поперечная дальность, $ΔR$ — полоса обзора; H — высота полета

РЛИ местности в полосе обзора формируется за счет приема сигнала, отраженного от участка поверхности, расположенного в пределах диаграммы направленности реальной антенны (ДНА). Импульс отражается от подстилающей поверхности в

соответствие с коэффициентом и диаграммой обратного рассеяния, характерными для каждого типа поверхности. Изображение формируется в координатах: путевая дальность (азимут) X - наклонная дальность R .

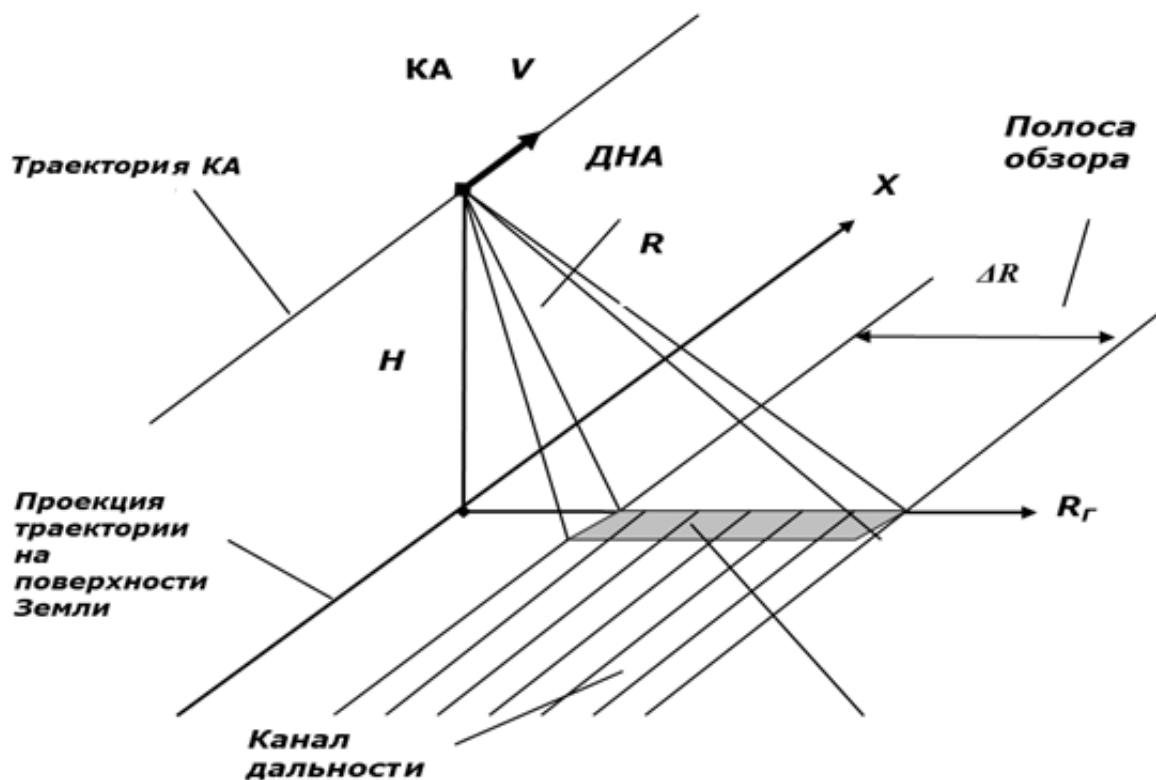


Рис. 1. Система координат при боковом обзоре.

Информационные характеристики формируемого РЛИ, в первую очередь, определяются следующими параметрами РСА: пространственная разрешающая способность, радиометрическое разрешение, динамический диапазон, размер зоны воспроизведения, отношение сигнал/шум, форма диаграммы направленности реальной антенны в угломестной и наклонной плоскостях и ошибки ее ориентации относительно центра кадра, форма функции неопределенности РСА (форма отклика на точечную цель), интервал временной дискретизации сигналов по наклонной и путевой дальности (частота дискретизации по дальности, частота повторения), уровень неоднозначности по дальности и азимуту, создающий дополнительный уровень шумов за счет наложения спектров при дискретизации.

Важнейшей характеристикой РЛС землеобзора является разрешающая способность, определяемая размерами δR и δX разрешаемого участка местности. Разрешение по наклонной дальности δR определяется длительностью сжатого импульса $\tau_{СЖ}$, которая обратно пропорциональна ширине спектра зондирующего сигнала Δf_c :

$$\delta R = \frac{c \tau_{СЖ}}{2} = \frac{c}{2 \Delta f_c} \quad (1)$$

Здесь c – скорость света.

Разрешение поперек линии пути на поверхности Земли (по горизонтальной дальности) определяется пересчетом наклонной дальности в горизонтальную через угол падения γ , отсчитываемый от местной вертикали до линии визирования цели:

$$\delta R_r = \frac{\delta R}{\sin \gamma} = \frac{c}{2\Delta f_c \sin \gamma} \quad (2)$$

Угол падения определяет расстояние до ближней границы полосы обзора. Его минимальное значение определяется допустимым ухудшением горизонтальной разрешающей способности по сравнению с разрешающей способностью по наклонной дальности.

Выбор ширины полосы зондирующего сигнала Δf_c для космического РСА ограничен международным «Регламентом радиосвязи», согласно которому для X-диапазона (3,1 см) максимальная ширина спектра сигнала равна 600 МГц. Это обеспечивает потенциальную разрешающую способность по наклонной дальности, равную 0,25 м.

Получение высокого разрешения по путевой дальности (азимуту) на больших расстояниях при малых размерах антенн достигается в РСА за счет специальных методов пространственно-временной обработки сигналов. В РСА отражённое излучение регистрируется не одномоментно, а накапливается за время пролёта определённого участка орбиты. Тем самым, создаётся виртуальная приёмная антенна (синтезированная апертура) с размером, эквивалентным расстоянию, которое прошёл спутник за время регистрации изображения. Принцип действия РСА основан на запоминании амплитуды и фазы принятых сигналов и последующей обработке, заключающейся в их когерентном суммировании на значительном участке траектории движения с предварительной фазовой коррекцией.

Разрешающая способность по путевой дальности (азимуту) определяется отношением длины волны λ к размеру синтезированной апертуры L_c

$$\delta x = \frac{\lambda}{2L_c} R_o \quad (3)$$

В маршрутном режиме съёмки она ограничена размером физической антенны вдоль траектории

$$\delta x \geq La/2$$

В РСА зондирующий сигнал представляет собой периодическую последовательность когерентных радиоимпульсов. Процессы, характеризующие принимаемые импульсные сигналы, принято описывать и рассматривать отдельно: в пределах каждого периода зондирования T_{Π} и от одного периода к другому. При этом текущее время представляется суммой двух переменных:

$$t = t_r + nT_{\Pi}, \quad 0 \leq t_r \leq T_{\Pi}, \quad -\infty < n < +\infty \quad (4)$$

Процессы внутри каждого периода зондирования описываются зависимостью от «быстрого» времени t_r , отсчитываемого от момента излучения каждого зондирующего импульса [2]. Временные процессы, связанные с движением РСА вдоль линии пути, характеризуются «медленным» временем, измеряемым количеством периодов повторения.

При этом зондирующий сигнал с внутриимпульсной ЛЧМ (в пределах длительности импульса) описывается выражением

$$u_0(t_r) = U_0 \cos \left(\omega_0 t_r + \frac{\mu_r^2}{2} + \varphi_0 \right) = U_0 \cos(\omega_0 t_r + \Phi_{лчм}(t_r)) \quad (5)$$

где закон внутриимпульсной фазовой модуляции

$$\Phi_{лчм}(t_r) = \frac{\mu t_r^2}{2} + \varphi_0 \quad (6)$$

Отраженный от точечной цели сигнал, принятый вдоль траектории, модулирован по амплитуде диаграммой направленности реальной антенны и по фазе в соответствии с изменением текущего расстояния между фазовым центром антенны и элементом поверхности.

Максимальная длина отрезка пути ЛА, на котором принимается отраженный сигнал, ограничивается лишь шириной ДН

В предположении, что на этом участке носитель РСА движется равномерно и прямолинейно закон изменения доплеровской частоты можно считать линейным

$$F_d(t) = \pm \frac{2V}{\lambda R_o} X(t) = -\frac{2V^2}{\lambda R_o} t \quad (7)$$

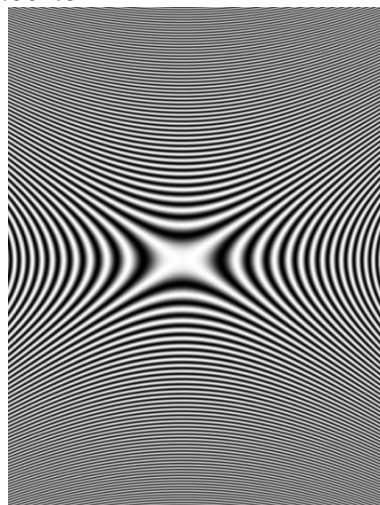
Таким образом, принятый на интервале синтезирования сигнал (траекторный сигнал), отраженный от точечной цели, можно рассматривать как сигнал в виде пачки импульсов с линейной частотной модуляцией (от импульса к импульсу).

Обратим внимание на следующую особенность этого сигнала. Огибающая каждого импульса смещается по задержке за время синтезирования по закону изменения наклонной дальности $R(X)$. При большом интервале синтезирования сигнал от цели может сместиться настолько, что попадет в соседние, более удаленные элементы разрешения. Этот эффект, называемый эффектом миграции дальности или смещения элементов дальности (СЭД), должен учитываться при межпериодной обработке.

Синусная и косинусная компоненты траекторного сигнала выделяются фазовыми детекторами (ФД) приемника РСА. Можно считать, что на выходе фильтров нижних частот ФД формируются действительная и мнимая компоненты комплексной огибающей отраженного сигнала.

Трехмерное представление напряжения на выходе ФД называют радиоголограммой. По сути, она представляет собой пространственное представление закона изменения частоты отраженного сигнала за счет внутриимпульсной модуляции (по наклонной дальности) и доплеровского эффекта (по путевой дальности). Вид радиоголограммы от точечной цели при отсутствии миграции дальности приведен на рис. 2.

Наклонная дальность



Путевая дальность

Рис. 2. Вид радиоголограммы от точечной цели.

Обработка такого сигнала в РСА для получения высокого разрешения вдоль путевой и наклонной дальности производится по классическому принципу оптимальной согласованной фильтрации, заключающейся в вычислении взаимной корреляционной функции принятого сигнала и опорной функции, согласованной с откликом от точечной цели.

Обработка в таком фильтре осуществляется совместно по двум направлениям - вдоль наклонной дальности ("сжатие по дальности") и вдоль путевой дальности (межпериодная компенсация миграции дальности и доплеровской фазы с последующим когерентным суммированием импульсов - "сжатие по азимуту").

Процедура формирования РЛИ включает следующие этапы: сжатие по дальности в каждом периоде зондирования; компенсация эффекта смещения элементов дальности (миграции дальности); сжатие по азимуту (путевой дальности) в двух квадратурных каналах – формирование комплексного РЛИ; вычисление модуля по синфазной и квадратурной составляющим – формирование амплитудного РЛИ. На заключительном этапе может также производиться некогерентное суммирование частных изображений, полученных в нескольких парциальных лучах ДНА, в целях снижения уровня спекл-шума [2].

На первом этапе осуществляется внутрпериодная оптимальная фильтрация каждого импульса, описываемая сверткой с опорной функцией

$$\dot{h}_r(t_r) = e^{-j \cdot \Phi_{лчм}(t_r)} \quad (8)$$

Для выполнения операции сжатия по азимуту необходимо знать закон изменения наклонной дальности, определяющий закон фазовой доплеровской модуляции траекторного сигнала и, следовательно, вид азимутальной опорной функции, а также закон смещения элемента дальности.

$$\dot{h}_a(t) = e^{j \left[\frac{4\pi R(t)}{\lambda} \right]} \quad (9)$$

В общем случае выражение для закона изменения наклонной дальности получают из анализа относительного движения РСА и визируемого участка земной поверхности.

Частота повторения импульсов и размеры антенны.

Частоту повторения импульсов в РСА выбирают из условия однозначного измерения дальности в пределах максимальной полосы захвата (по наклонной дальности) и минимизации неопределенности по азимуту (наложения доплеровского спектра вследствие дискретизации траекторного сигнала):

$$\frac{c}{2\Delta R} > F_{\Pi} > \frac{2V}{La} \quad (10)$$

Для исключения эффекта неопределенности (неоднозначности) по дальности – наложения сигналов, отраженных от разных полос ΔR , полоса захвата (по земной поверхности) должна быть больше следа антенны на земной поверхности. Откуда для вертикального размера антенны Wa получаем

$$Wa > \frac{\lambda R m t g \gamma}{\Delta R} \quad (11)$$

И, наконец, чтобы избежать неопределенности (по азимуту и дальности) и максимизировать ширину полосы захвата, минимальная площадь антенны, являющаяся произведением продольной длины антенны La и поперечной длины Wa , должна быть:

$$A = La Wa > 4 V \lambda R_m t g \gamma / c \quad (12)$$

Разнообразие задач и объектов наблюдения предъявляют к техническим характеристикам космических РСА довольно высокие и, зачастую, противоречивые требования, удовлетворить которые можно только путем применения различных режимов съемки. Последние характеризуются следующим набором варьируемых параметров:

- вид обзора и полоса захвата (съемки),
- разрешающая способность по поперечной и поперечной дальности,
- коэффициент некогерентного накопления, определяющий радиометрическое разрешение.

В современных космических РСА используются следующие основные режимы обзора (рис. 3):

- маршрутный режим непрерывной съемки;
- обзорный широкозахватный режим со сканированием ДНА по углу места (режим ScanSAR);

- прожекторный (или телескопический) режим кадровой съемки.

Остальные режимы являются модификацией и развитием основных.

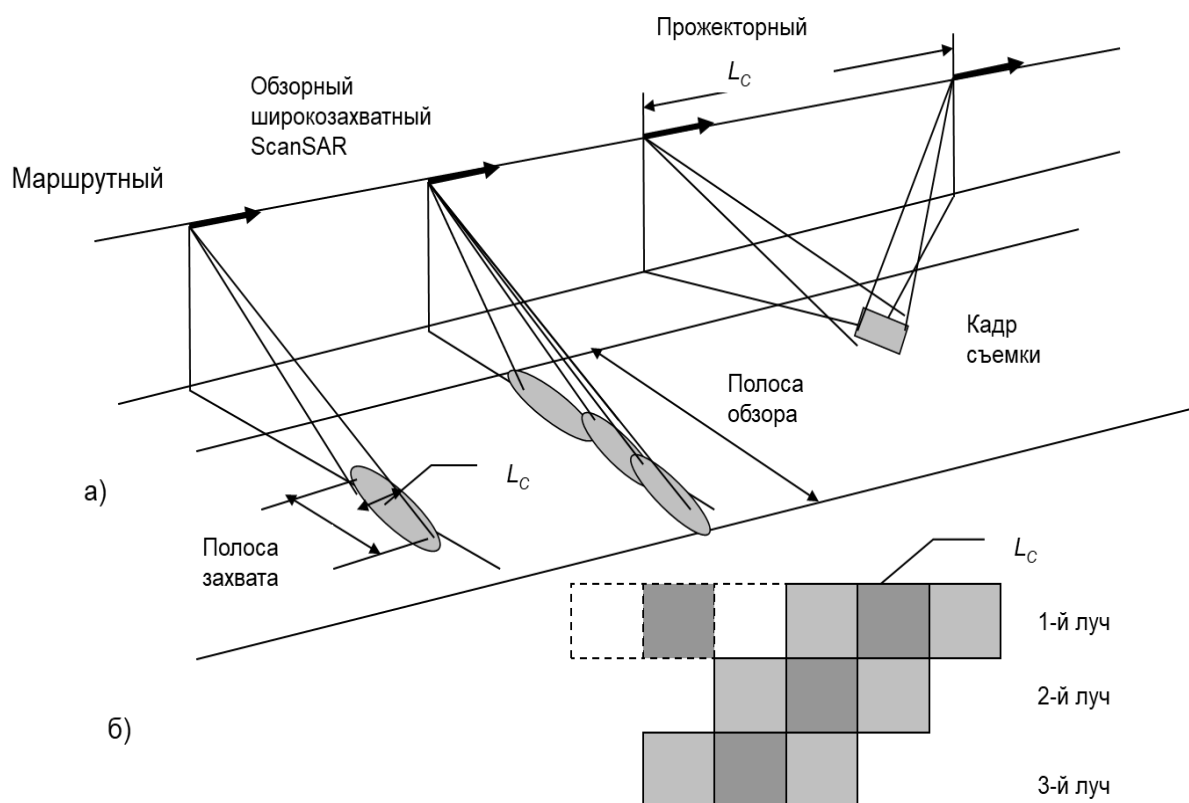


Рис. 3. Основные режимы обзора поверхности в космических РСА (а) и положение интервалов синтезирования в парциальных зонах в режиме ScanSAR (б).

При работе РСА в маршрутном режиме диаграмма направленности антенны постоянно направлена перпендикулярно вектору поперечной скорости КА. Размер полосы съемки по дальности зависит от длительности строка АЦП. Размер сцены в направлении поперечной дальности определяется временем включения и выключения локатора.

В обзорном широкозахватном режиме ScanSAR для расширения полосы съемки используют несколько парциальных лучей диаграммы направленности. Смену

информации осуществляют кадрами с последовательным переключением лучей. Переключение луча от одного угла падения к другому происходит циклично в течение сеанса съёмки. Отраженный от каждой из суб-полос обзора сигнал имеет пачечную структуру, т. е. излучается и принимается некоторое число импульсов, а затем следует пауза, длительность которой определяется периодом сканирования луча по суб-полосам.

При работе РСА в прожекторном режиме увеличение времени наблюдения достигается непрерывным поворотом луча антенны в азимутальной плоскости, так что луч всё время оказывается направленным на один и тот же участок поверхности (центр кадра). С увеличением времени наблюдения длительность траекторного сигнала увеличивается, а полоса доплеровских частот расширяется, что и обуславливает улучшение разрешающей способности по азимуту.

Этапы развития космических РСА

В 40-летней истории детальной радиолокационной космической съёмки Земли можно выделить 4 этапа.

Первым РСА обзора Земли, стал радар, установленный на космическом аппарате SEASAT, запущенном на высоту 800 км в июне 1978 года. Он работал на фиксированной длине волны (23 см) и с фиксированным углом падения (23 градуса от направления в надир), и был в первую очередь предназначен для обзора океанической поверхности и изучения морского волнения. Первое поколение систем, к которым относились также РСА, установленные на космических «челноках» SPACE SHUTTLE IMAGING Radar-A (1981 г.) и SPACE SHUTTLE IMAGING Radar-B (1984 г.) решало задачу оценки потенциальных возможностей РСА космического базирования для решения широкого круга задач, включая видовую разведку, мониторинг морской поверхности, изучение ледового покрова, геологическое и топографическое картографирование.

К этому поколению примыкают также первые российские (советские) космические РСА «Меч-К» и «Меч-КМ» на КА «Космос -1870» и «Алмаз-1» (1987 -1992 гг.). В этих системах использовались оригинальные технические решения, обеспечившие получение уникальных на этот период характеристик РЛИ (разрешение от 8...9 м), превосходивших запущенные позднее РСА второго поколения на КА ERS-1, ERS-2 Европейского космического агентства (ESA). Однако, относительно короткие сроки полетов КА «Космос-1870» и «Алмаз-1», неподготовленность наземного сегмента к оперативной обработке и распространению больших объемов данных, отсутствие достаточных сведений для геометрической и радиометрической коррекции формируемых РЛИ и развитого программного обеспечения для тематической обработки значительно снизили эффективность их использования [2].

В работах по программе «Алмаз» принимал непосредственное участие один из авторов настоящей работы. Научные исследования методов и алгоритмов обработки радиолокационных данных ДЗЗ на кафедре теоретических основ радиотехники Уральского федерального университета (в те годы Уральского политехнического института имени С.М. Кирова) проводились с начала 80-х годов прошлого века. Начало им положили работы, выполненные по заданиям Московского НИИ приборостроения (ныне «Концерн радиостроения «Вега») и НПО Машиностроения (г. Реутов). В этот период в МНИИП велась интенсивная работа по созданию усовершенствованного космического радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) «Меч-КУ» [2]. Результатом работы стало создание программно-алгоритмического обеспечения тракта наземной цифровой обработки сигналов радиолокатора с синтезированной апертурой

«Меч-КУ» космического аппарата «Алмаз-1», успешно функционировавшего на орбите в 1991-1992 г.г. [2, 3]. Пример радиолокационного изображения, синтезированного с использованием разработанного алгоритма, приведен на рис. 4.



**Рис. 4. РЛИ РСА «Меч-КУ».
Нефтяные вышки и разливы нефти у побережья Калифорнии.**

Системы второго поколения (SAR КА ERS-1, ERS-2, JERS-1, SIR-C/X-SAR многоцветного космического корабля Space Shuttle) уже представляли собой космические РСА, долговременно работавшие в штатном эксплуатационном режиме и обеспеченные наземной инфраструктурой обработки и распространения информации для широкого круга пользователей. Съемка проводилась, как правило, в одном режиме.

Начало третьему поколению космических РСА фактически положил запуск в 1995 г. разработанного Канадским космическим агентством многорежимного радиолокатора КА RADARSAT-1. Проработавший на орбите до 2013 г., он до настоящего времени остается наиболее удачной коммерческой космической радиолокационной системой. К третьему поколению относятся также поляриметрический РСА ASAR ENVISAT-1 и многорежимный поляриметрический РСА PALSAR КА ALOS (Япония).

На первых этапах внимание привлекали такие преимущества РЛИ, как независимость от метеоусловий и естественной освещенности, широкая полоса обзора и возможность наблюдения объектов, невидимых в оптическом диапазоне волн. Уделялось внимание особенностям формирования РЛИ, анализу и устранению специфических искажений.

В настоящее время на первый план выходят возможности построения высокодетальных цифровых моделей местности (ЦММ) и оценки смещений земной поверхности с сантиметровой точностью – развитие метода космической радиолокационной интерферометрии.

Большим достижением космических РСА третьего поколения явилась успешная реализация программы SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), в ходе которой с помощью радиолокационного комплекса SIR-C/X-SAR, дополненного интерферометрическими каналами с использованием второй антенны на выдвижной штанге длиной 60 м, была проведена топографическая съемка 80% земной поверхности. Результатом этой съемки стала трехмерная цифровая модель рельефа (ЦМР) с дискретностью 30 м.

На этом этапе определились основные тенденции в построении современных систем радиолокационной космической съемки:

- увеличение разрешающей способности до 1 м и выше за счет применения прожекторного режима, реализация которого требует осуществления сканирования ДНА по углу места и азимуту;
- проведение съемки в широкой полосе обзора за счет быстрого переключения антенного луча в угломестной плоскости (так называемый режим ScanSAR);
- одновременная радиолокационная съемка на различных поляризациях (полная поляриметрическая обработка сигналов);
- реализация интерферометрической обработки сигналов, в том числе за счет создания спутниковых группировок;
- проведение съемки в различных частотных диапазонах (многочастотные РСА).

Кроме работы на одной поляризации, горизонтальной (H) или вертикальной (V), в современных РСА применяют режимы работы с двумя или четырьмя поляризациями. В режиме двух поляризаций излучают одну (вертикальную или горизонтальную) а принимают одновременно две поляризации: совпадающую и ортогональную (кроссполяризацию). В режиме четырех поляризаций (полностью поляриметрический режим) в процессе обзора, разделяя по времени, излучают то вертикальную, то горизонтальную поляризации, каждый раз с приемом обеих поляризаций. Обычно разделение по времени реализуют работой на удвоенной частоте повторения с чередованием поляризаций через период или же путем покадровой работы и чередованием пачек зондирований с паузами.

Эти тенденции полностью реализованы в современных космических системах четвертого поколения, типичными представителями которых относятся РСА TerraSAR-X, TanDEM-X, Cosmo-SkyMed-1/4, SAR Lupe, TecSAR, Sentinel-1, Radarsat-2, Кондор-Э и др. Их основные характеристики приведены в (табл. 1).

Созданные и разрабатываемые космические РСА позволяют получать информацию о земной поверхности в различных диапазонах волн: 3 см (X - диапазон), 5,6 см (C - диапазон), 9,6 см (S - диапазон), 23 см (L - диапазон) и в перспективе - 70 см (P - диапазон).

Таблица 1. Характеристики космических РСА четвертого поколения

Параметр	TerraSAR-X, Tandem-X	CosmoSkyMed-1/4	Sentinel-1A,B	Стриж, Кондор-Э
Длина волны, см	3,1	3	5,6	9
Поляризация	HH, VV	HH, VV, HV, VH	HH, HV, VV, VH	HH, VV
Полоса обзора/ захвата, км	350, 370 10, 30, 100	2x600 10, 100-200	400 20, 80, 400	2x500 8, 10, 120
Разрешение, м	1, 2, 3, 15	1, 30	3, 5, 20	1, 3, 30
Масса КА, кг	1230	1700	2280	1150

В ближайшей перспективе перед космическими радиолокаторами ставятся еще более амбициозные задачи. Так создаваемый в ЦСКБ «Прогресс» КА «Обзор-Р» с РСА «Касатка-Р» (АФАР, X диапазон) будет обеспечивать съемку 2 раза в сутки в двух поляризациях, в полосе от 20 до 750 км с разрешением от 1 до 200 м (5 режимов съемки). Создаваемая Канадой система радиолокационного космического наблюдения RADARSAT Constellation Mission (RCM) кроме трех спутников будет включать комплекс автоматизированного дешифрирования снимков. Система должна обнаруживать и идентифицировать морские суда по всему Мировому океану практически в реальном масштабе времени.

Радиолокационная космическая интерферометрия

В последние годы построение цифровых моделей рельефа (ЦМР) и карт смещений рельефа стало одной из основных задач, решаемых на основе обработки данных современных радиолокационных систем ДЗЗ. Метод космической радиолокационной интерферометрии, основанный на совместной обработке фазовых полей, полученных съемкой одного и того же участка местности одновременно двумя антенными системами, либо одной антенной на двух витках орбиты, сочетает высокую точность фазового метода измерения дальности с высокой разрешающей способностью космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) [2,4, 5].

Исходными данными для интерферометрической обработки являются два комплексных радиолокационных изображения (КРЛИ) одной и той же области поверхности, полученных с разных ракурсов наблюдения (рис. 5). На первом этапе корреляционным или иным способом производится совмещение этих изображений. Затем путем поэлементного перемножения двух КРЛИ фазовые составляющие полученных изображений вычитаются, в результате формируется интерферограмма – разностно-фазовая картина поверхности.

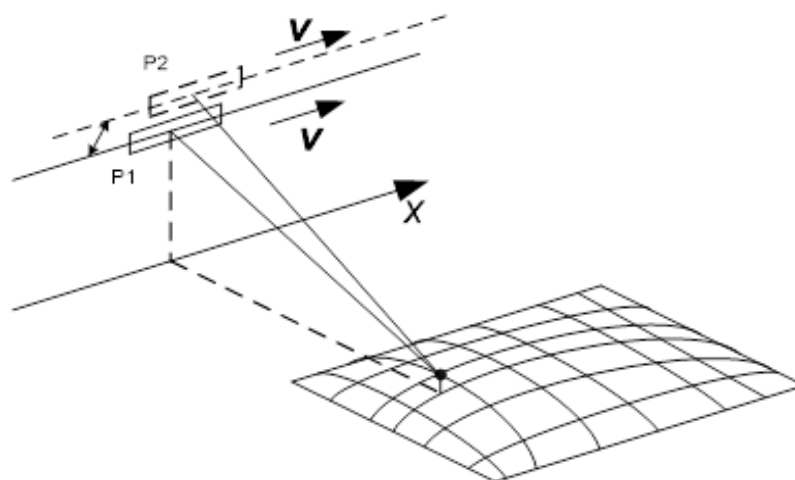


Рис. 5. Интерферометрическая съемка.

Результирующая разность фаз в каждом элементе изображения определяется рельефом облучаемой поверхности («топографическая» составляющая фазы), смещением поверхности в период между съемками, а также случайными изменениями при отражении от поверхности и прохождении волны через атмосферу. Топографическая фаза определяется разностным расстоянием от фазовых центров антенн до элементов поверхности. Таким образом, разность фаз колебаний (интерферометрическая фаза $\Delta\Phi$), отраженных от точки С (рис. 6) и принятых

антеннами с расположением фазовых центров в точках P_1 и P_2 , состоит из следующих составляющих

$$\Delta\Phi = \psi + \psi_{\text{диф}} + \psi_{\text{АТМ}} + \psi_{\text{ш}} \quad (13)$$

где ψ — фазовый набег за счет обзора поверхности под двумя разными углами («топографическая фаза»); $\psi_{\text{диф}}$ — фазовый набег за счет смещения поверхности в период между съемками («дифференциальная топографическая фаза»); $\psi_{\text{АТМ}}$ — фазовый набег за счет изменения коэффициента преломления при распространении сигнала в атмосфере; $\psi_{\text{ш}}$ — изменение фазы в результате воздействия электромагнитного шума (фазовый шум).

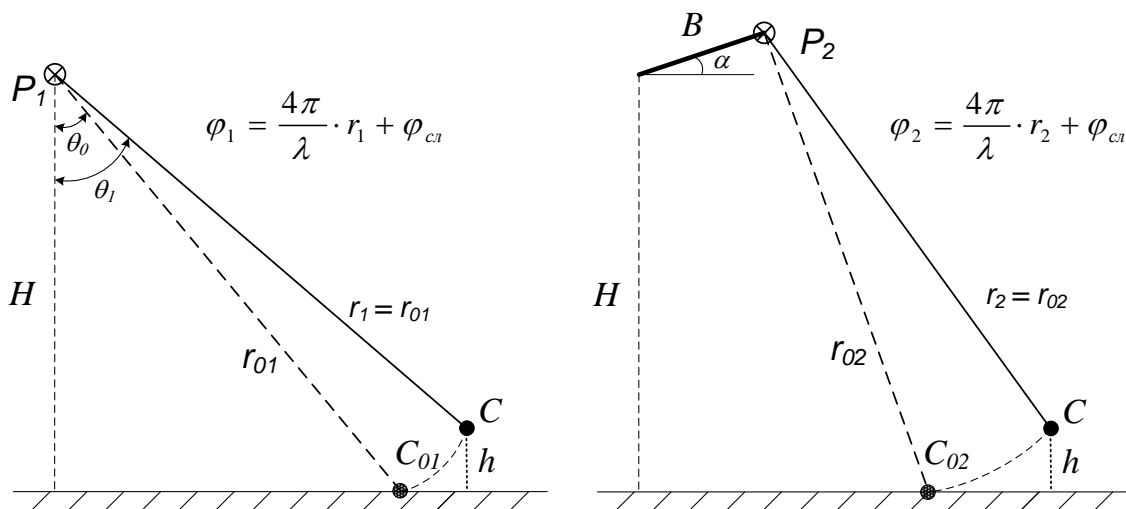


Рис. 6. Геометрия интерферометрической съемки в вертикальной плоскости

Топографическая фаза пропорциональна разности хода лучей от фазовых центров антенн P_1 и P_2 до элемента поверхности $\Delta r = r_2 - r_1$ и равна

$$\psi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (14)$$

Значение разности фаз ψ для точки поверхности, находящейся на расстоянии r_1 от первой антенны, позволяет определить отклонение высоты рельефа от средней поверхности. Высота рельефа h связана с топографической фазой следующими соотношениями:

$$h = \frac{(\Psi - \Psi_{\text{оп}}) \cdot \lambda r_1 \sin \theta_0}{4\pi B \cos(\theta_0 - \alpha)} \quad (15)$$

где H — высота фазового центра антенны над опорной поверхностью, B и α — длина и угол наклона базы интерферометра в вертикальной плоскости, а $\Psi_{\text{оп}}$ — ожидаемая разность фаз от опорной поверхности

$$\Psi_{\text{оп}} = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_0 - \alpha) \quad (15)$$

Интерферометрическая обработка данных космических РСА включает следующие этапы (рис. 7): синтез пары комплексных радиолокационных изображений (КРЛИ) одной и той же области поверхности, пространственное их совмещение (т.н. «амплитудная корегистрация») с формированием интерферограммы путем поэлементного комплексного перемножения двух КРЛИ; компенсация фазового набega

от опорной поверхности («выравнивание»); фильтрации фазового шума на полученной интерферограмме; устранения фазовой неоднозначности («развертывание фазы»); геокодирование (пересчет значений развернутой фазы в значения высот рельефа), формирование ЦМР (переход от полетной системы координат к какой-либо картографической проекции). На этапе фильтрации также производится построение поля коэффициента когерентности обрабатываемого изображения [5, 6, 7].

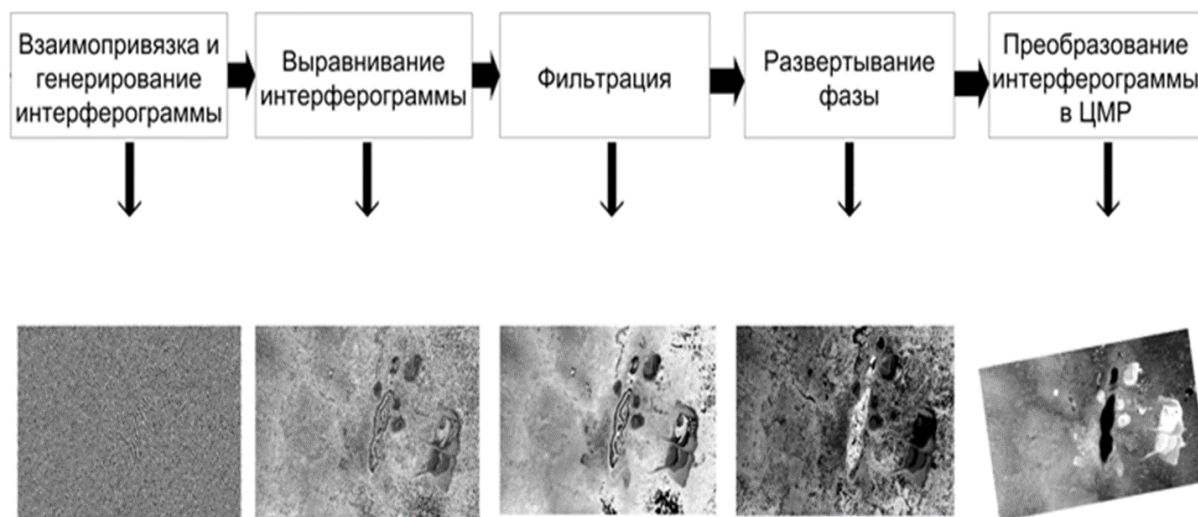


Рис. 7. Этапы интерферометрической обработки.

Поскольку топографическая фаза имеет, как правило, большой интервал корреляции, то для подавления слабокоррелированного фазового шума можно применять обычные алгоритмы низкочастотной фильтрации, например – усреднение в локальном окне. Однако особенность фильтрации интерферограмм состоит в том, что содержащиеся в них интерференционные полосы при фильтрации не должны размываться (а по возможности, наоборот, подчеркиваться). Поэтому для фильтрации фазового шума применяются адаптивные фильтры, как пространственные, так и работающие в частотной области.

Для осуществления операции **развертывания интерферометрической фазы**, т.е. устранения перескоков фазы на 2π разработано несколько десятков алгоритмов [5,8]. Большинство из них связано с операцией интегрирования фазового градиента, однако данный подход справедлив, если выполняется условие гладкости фазы, которое в условиях данной задачи эквивалентно условию потенциальности поля градиента фазы (т.е. фактически – гладкости рельефа).

Подходы к задаче развертывания фазы, базируются на аппарате из различных областей современной математики: от теории векторных полей (метод Гольдштейна, метод функций Грина) и теории оптимизации (метод целочисленной оптимизации, метод оптимизации сетевых потоков) до теории фильтрации (метод фильтрации Калмана, нелинейная стохастическая фильтрация и др.) и генетических алгоритмов, нейронных сетей и т.п. Строгая классификация методов развертывания фазы на сегодняшний день отсутствует, есть довольно условное их разделение на глобальные и локальные (вычисляющие статистику в локальном окне малых размеров). Кроме того, применяются различные комбинации алгоритмов.

На заключительном этапе обработки производится **построение цифровой модели местности** – пересчет абсолютной (развернутой) интерферометрической фазы в высоты рельефа и геокодирование (переход от полетной системы координат к какой-либо картографической проекции). Для пересчета абсолютных фазовых значений в

абсолютные значения высоты необходимо указать несколько точек, высоты в которых достоверно известны. Желательно, чтобы контрольные точки были равномерно распределены по изображению.

Результатом обработки является трехмерный массив: широта-долгота-высота над опорным эллипсоидом, представляющий собой цифровую модель рельефа (рис. 8).

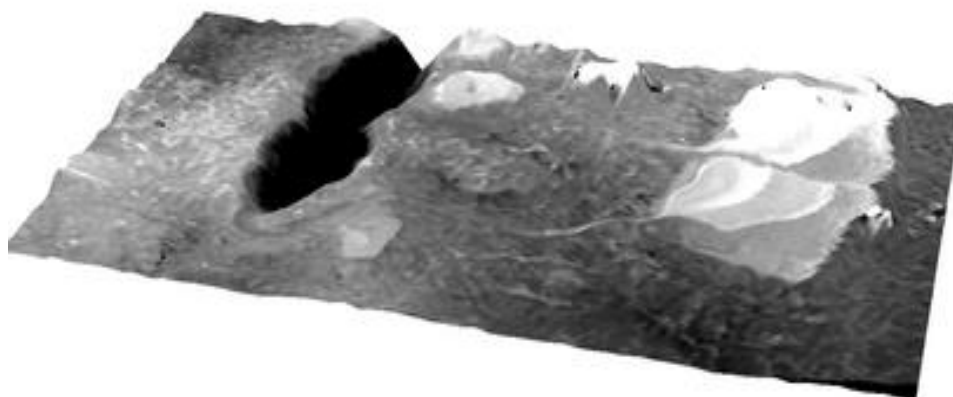


Рис. 8. Цифровая модель местности, построенная по результатам интерферометрической обработки материалов радиолокационной космической съемки

Основные этапы и алгоритмы интерферометрической обработки реализованы в специализированных программных комплексах обработки данных ДЗЗ, таких как SARscape, IMAGINE Radar Mapping, Photomod Radar и ряде других.

Характеристики радиолокационных мини- и микро-спутников

По весовым характеристикам космические аппараты (КА) ДЗЗ классифицируются на: пико- (до 1кг), нано- (1-10 кг), микро- (10-100 кг), мини- (100-500 кг), малые (500-1000 кг) и большие (более 1000 кг). В соответствии с этой классификацией все рассмотренные выше радиолокационные космические системы четвертого поколения относятся к большим КА. Их разработка и создание стоят несколько сот миллионов долларов. Заметной тенденцией последнего десятилетия стала активная разработка, запуск и эксплуатация радиолокационных микро- и мини-спутников ДЗЗ [10].

Физика процессов, лежащая в основе выбора параметров космических РСА, одинакова, как для больших, так и для малых КА. Поэтому при проектировании малых космических РСА (Smallsat SAR) приходится решать следующие основные проблемы:

- масса и объем (размеры антенны);
- мощность передатчика, потребляемая мощность и проблемы терморегулирования;
- оптимизация скорости передачи данных.

В космических РСА снижение общей массы космических аппаратов является очень сложной задачей, главным образом, из-за больших размеров антенны и требуемой высокой мощности передатчика. Кроме этого, при проектировании мини-спутников жестко ограничены потребляемая мощность, терморегулирование и скорость передачи данных. Первым приоритетом является уменьшение размера антенны до минимально возможных размеров [11]. Также должна быть тщательно обоснована, скорость передачи данных, чтобы максимизировать время включения РСА на съемку. В РСА мини-спутников обычно сводят к минимуму количество режимов наблюдения и поляризационных каналов, чтобы удовлетворить конструктивным ограничениям.

Разработкой и запуском малых спутников занимаются появившиеся в последние

несколько лет компании-стартапы. Такие компании, как ICEYE (Финляндия), Capella Space (США), Synspective (Япония) начали развертывание крупных группировок радиолокационных спутников.

В настоящее время у компании Iceye на орбите работают 4 спутника, предоставляющие радиолокационные изображения (РЛИ) поверхности Земли с разрешением лучше 1 м. Планируется запуск еще 14 КА в течение следующих двух лет. Когда на орбите будет находиться 18 КА Iceye, они смогут выполнять повторную съемку одного и того участка поверхности Земли каждые три-четыре часа. Каждые восемь часов один из спутников будет иметь возможность производить съемку с точно такой же геометрией [12]

Capella Space также эксплуатирует 4 спутника. Capella-3 и Capella-4 в марте 2021 г. представили космические РЛИ с самым высоким разрешением (50 x 50 см), доступным сегодня на рынке. Планируется создание группировки из 36 спутников, которая будет обеспечивать повторную съемку каждый час.

Группировка радарных спутников StriX компании Synspective будет включать 25 КА. Первый демонстрационный спутник StriX- alpha. запущен 15 декабря 2020 г. К концу 2020-х годов полностью развернутая группировка обеспечит ежедневный мониторинг всех крупных городов мира.

Отметим, что все мини-спутники запущены на солнечно-синхронную круговую орбиту с высотой порядка 500 км. РСА работают в X- диапазоне, они являются многорежимными радарными с высоким, средним и низким пространственным разрешением, широкими и узкими полосами захвата. Вместе с тем количество режимов съемки разумно ограничено. Радарный спутник StriX работает в двух режимах: маршрутном («StripMap») с полосой обзора 30 км и разрешением 3 м и прожекторном («Sliding Spotlight») с полосой обзора 10 км и разрешением 1 м. РСА ICEYE позволяет осуществлять правый и левый обзор и получать РЛИ Земли в маршрутном, прожекторном и ScanSAR режимах съемки с разрешением от 1 м до 20 м [12].

РСА спутников Capella формируют РЛИ в 4-х режимах: стандартном маршрутном, маршрутном многополосном (multi-swath stripmap), прожекторном (staring spotlight) и скользящим прожекторном (sliding spotlight) Для большинства режимов пользователь может выбрать размер изображения и обменять разрешение на качество изображения. В прожекторном режиме возможно некогерентное накопление до 30 изображений (multi-looked) с целью снижения спекл-шума. Максимальное азимутальное разрешение 0,3 м и 1 м [13]

Анализ показывает, что существующие группировки радиолокационных мини-спутников работают в моностатическом режиме, реализуя основное преимущество - оперативность повторной съемки. В перспективе - развитие группировок малых радиолокационных КА до многопозиционных радиолокационных систем.

Выводы

Системы космического ДЗЗ на базе РСА в настоящее время стали общепризнанным инструментом для решения таких задач, как контроль чрезвычайных ситуаций, экологический и сельскохозяйственный мониторинг, контроль состояния лесных массивов, нефте- и газопроводов, обеспечение судоходства в полярных широтах, контроль рыболовных промыслов. Космические РСА являются уникальным инструментом, обеспечивающим построение детальных цифровых моделей рельефа местности и оценки его смещений.

Создание группировок мини- спутников, способствуют снижению затрат и повышают оперативность повторной съемки.

В перспективе - развитие группировок радиолокационных мини- спутников до многопозиционных радиолокационных систем

Литература

1. Вопросы перспективной радиолокации: Коллективная монография / Под ред. А.В. Соколова – М.:Радиотехника, 2003. – 508 с.
2. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы – М.: Радиотехника, 2010.- 680 с.
3. Неронский Л.Б., Коберниченко В.Г., Зраенко С.М. Цифровое синтезирование радиолокационных изображений земной поверхности в радиолокаторе с синтезированной апертурой космического аппарата «Алмаз-1» // Исследования Земли из космоса. 1993. №4. с.33-43.
4. Коберниченко В.Г. Радиоэлектронные системы дистанционного зондирования Земли [учебное пособие] / В.Г. Коберниченко. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 220 с.
5. Hanssen, R.F. Radar interferometry. Data interpretation and error analysis. Dordrecht: Kluwer academic publishers, 2002. 308 p.
6. Коберниченко В.Г., Сосновский А.В. Интерферометрическая обработка данных космической радиолокационной съемки высокого разрешения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, т.15, №3,2012, с.75-83.
7. Коберниченко В.Г., Сосновский А.В. Особенности построения цифровых моделей рельефа на основе метода космической радиолокационной интерферометрии / Тр. СПИИРАН, вып. 28 (2013). С. 194–208.
8. Сосновский А.В., Коберниченко В.Г. Исследование алгоритмов развертывания фазы при формировании цифровых моделей местности методом космической радиолокационной интерферометрии // Известия вузов России. Радиоэлектроника. Специальный выпуск. 2012. С. 84-92.
9. Сосновский А.В., Коберниченко В.Г. О точности цифровых моделей рельефа, полученных методом космической радиолокационной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, т. 9, №2, 2012. С. 122 -129.
10. Freeman A. Design Principles for Smallsat SARs// 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites 2018At: Logan UtahVolume: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2018/all2018/280/>
11. Paek S , Balasubramanian S., Kim S, Weck O. Small-Satellite Synthetic Aperture Radar for Continuous Global Biospheric Monitoring: A Review//Remote Sens. 2020, 12, 2546; doi:10.3390/rs12162546 www.mdpi.com/journal/remotesensing
12. ICEYE SAR Product Guide. Режим доступа: <https://www.iceye.com/hubfs/Downloadables/ICEYE-SAR-Product-Guide-2019.pdf>. (дата обращения: 30.11.2020).
13. Capella X-SAR (Synthetic Aperture Radar) Constellation. Режим доступа: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satelliteemissions/content/-/article/capella-x-sar#PZYbR130eHerb> (дата обращения: 0.11.2019)