

УДК 621.396.96

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ РЛС С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

О. Л. Полончик,

канд. техн. наук, доцент

Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, г. Архангельск

Проанализированы основные направления развития радиолокационных систем контроля земной поверхности космического базирования. Определена предметная область использования радиолокационных технических средств, в том числе и для решения прикладных задач развития экономики северных и арктических регионов России. Выполнена сравнительная оценка существующих способов обзора земной поверхности. Предлагается новый метод построения бортовых радиолокационных систем на базе космических аппаратов со стабилизацией вращением. Рассмотрены пути улучшения технических характеристик бортового радиолокатора.

Ключевые слова — РЛС бокового обзора, диаграмма направленности, механическое сканирование, синтезирование апертуры.

Введение

Современные бортовые радиолокационные средства представляют одно из наиболее интенсивно развивающихся направлений радиоэлектронной техники. Особое место среди них занимают бортовые радиолокаторы с синтезированием апертуры. Данные технические средства производят зондирование земной поверхности в любое время суток, сезона и года, не зависят от климатических условий и наличия облачности, что особенно важно для районов с незначительным количеством солнечных дней в году. В Российской Федерации к ним относятся обширные площади на севере страны и в Арктике, составляющие почти треть территории нашего государства, очень богатую разнообразными полезными ископаемыми, нефтью и газом.

Решение важнейших народнохозяйственных задач, таких как высокоточная оценка рельефа местности, формирование трехмерных изображений земной поверхности, исследование динамических процессов на земной и морской поверхности, возлагается на перспективные средства дистанционного зондирования Земли [1].

Особенно актуальным для решения задач устойчивого развития северных и арктических регионов является получение материалов радиолокационной съемки с высокими измерительными свойствами, обеспечивающих создание и обновление государственных топографических карт,

планов и картографической основы государственного кадастра недвижимости.

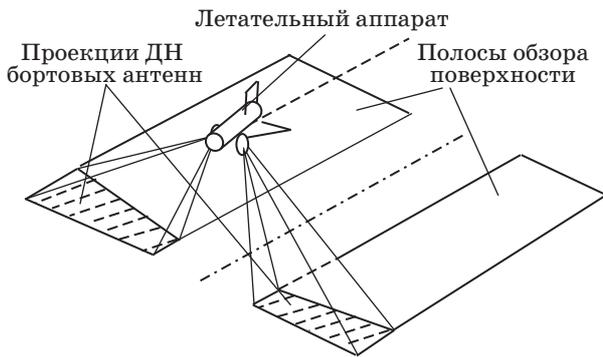
Получение информации о состоянии этих районов представляет задачу исключительной важности и позволит минимизировать материальные потери.

История развития радиолокационных средств дистанционного зондирования Земли

Развитие бортовых радиолокационных станций (РЛС) привело к созданию радиолокационных систем кругового обзора, основным недостатком которых была низкая разрешающая способность. Дальнейшие исследования по совершенствованию РЛС обзора земной поверхности были направлены на преодоление основного ограничения в увеличении разрешающей способности, связанного с размерами антенных устройств.

Детальность радиолокационного изображения зависит от линейной разрешающей способности (разрешающей способности по дальности) радиолокатора, которая в радиальном направлении определяется зондирующим сигналом, в поперечном направлении (тангенциальная разрешающая способность) — шириной диаграммы направленности (ДН) и расстоянием до цели.

Задача увеличения разрешающей способности по дальности решается использованием зондирующих сигналов с малой длительностью им-



■ Рис. 1. Метод бокового обзора

пульсов или переходом к сложным сигналам — частотно-модулированным либо фазоманипулированным.

Повышение тангенциальной разрешающей способности достигается применением в бортовом радиолокаторе антенны, расположенной вдоль фюзеляжа самолета, или синтезированием апертуры антенны при движении летательного аппарата.

Первый путь привел к разработке радиолокаторов бокового обзора [2]. Схема реализации метода представлена на рис. 1. В таких радиолокаторах тангенциальная разрешающая способность тем выше, чем больше продольный размер фюзеляжа летательного аппарата, хотя зависимость от дальности сохраняется.

Разрешающая способность у РЛС этого типа была увеличена примерно в 10 раз по сравнению с панорамными РЛС кругового обзора. И все же эти станции по своим возможностям еще существенно уступают оптическим устройствам.

Вторым, более кардинальным путем является создание радиолокаторов с синтезированием апертуры (РСА) при поступательном движении летательного аппарата.

Огромный вклад в развитие теории РСА внесли известные отечественные ученые А. П. Реутов, Г. С. Кондратенков, П. И. Дудник, Ю. Л. Феоктистов, Н. И. Буренин, Ю. А. Мельник, В. А. Потехин и др.

Радиолокаторы с синтезированием апертуры

Сущность метода заключается в излучении РЛС, установленной на подвижном носителе (самолете, космическом аппарате (КА) или беспилотном летательном аппарате), когерентных зондирующих сигналов, приеме соответствующих отраженных сигналов вдоль прямолинейной траектории полета носителя, их запоминании и сложении. В результате сложения принимаемых

сигналов осуществляется сжатие антенного луча и существенно повышается разрешающая способность РЛС вдоль линии пути носителя.

В зависимости от того, компенсируются или нет фазовые набеги при суммировании сигналов, различают сфокусированные и несфокусированные РСА. В первом случае обработка сводится к перемещению антенны, запоминанию сигналов, компенсации фазовых набегов и суммированию сигналов, во втором — к тем же операциям, но без компенсации фазовых набегов.

Потенциальная разрешающая способность таких станций приближается к характеристикам оптических средств наблюдения. Эти РЛС дают возможность реализовать высокую линейную разрешающую способность, независимую от дальности наблюдения и длины волны зондирующего сигнала.

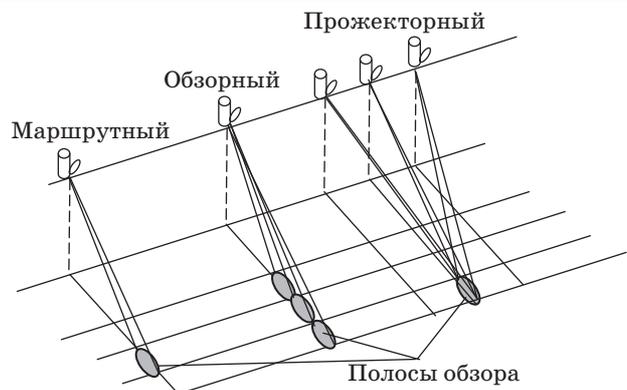
В настоящее время существуют три основных режима съемки земной поверхности (рис. 2): маршрутный, обзорный и прожекторный (детальный) [3].

Современные системы позволяют получать снимки земной поверхности и расположенных на ней объектов с разрешениями порядка 1 м для обзорного и 0,3 м для прожекторного режимов. Существенное влияние на результирующие характеристики РСА оказывают применяемые методы цифровой обработки принятого сигнала [4].

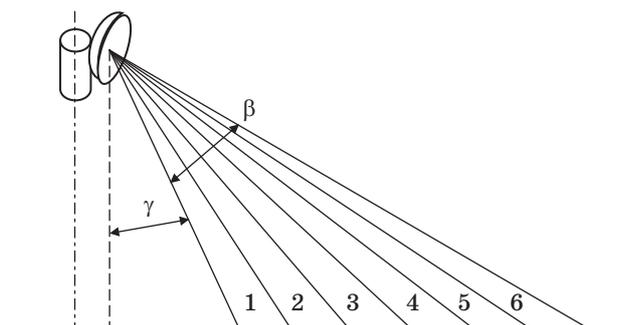
В **маршрутном режиме** съемка земной поверхности производится непрерывно в полосе захвата. Сигнал накапливается в течение времени, равного расчетному интервалу синтезирования апертуры антенны для данных условий полета носителя РЛС.

Обзорный режим съемки отличается от маршрутного тем, что съемка непрерывно ведется на всей ширине полосы обзора полосами, равными ширине полосы захвата. Шесть лучей последовательно переключаются по углу места для просмотра всей полосы обзора (рис. 3).

Разделяют боковой и переднебоковой режим в зависимости от ориентации главного лепестка



■ Рис. 2. Виды режимов



■ Рис. 3. Обзорный режим

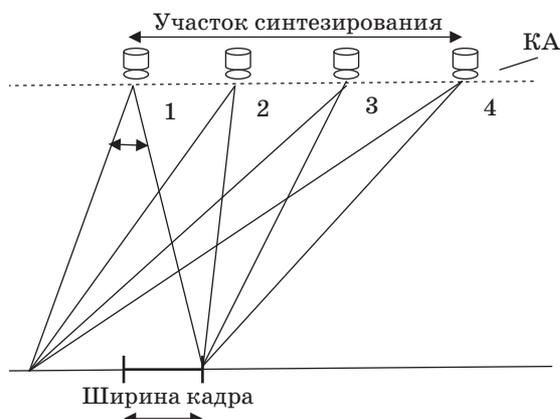
ДН антенны. Накопление сигнала осуществляется в течение времени, равного расчетному интервалу синтеза апертуры антенны для данных условий полета носителя РЛС.

При съемке в **прожекторном режиме** накопление сигнала происходит на увеличенном, по сравнению с обзорным режимом, интервале. Расширение интервала достигается перемещением главного лепестка ДН антенны, а облучаемый участок постоянно находится в зоне съемки. Это перемещение синхронизировано с движением носителя РЛС.

Для удержания пятна ДН на одном и том же участке поверхности четыре луча последовательно переключаются по азимуту (рис. 4).

Таким образом, анализ основных режимов съемки земной поверхности методом РСА показывает, что:

- 1) при методе бокового обзора максимальная ширина полосы просматриваемой подстилающей поверхности аналогична ширине просмотра;
- 2) увеличение линейной разрешающей способности в прожекторном режиме достигается увеличением апертуры, при этом просматриваемая полоса сужается;
- 3) увеличение линейной разрешающей способности в обзорном режиме осуществляется применением совокупности узконаправленных ДН.



■ Рис. 4. Прожекторный режим

Минимальная линейная разрешающая способность по азимуту δx_{\min} для антенн с несфокусированным искусственным раскрывом определяется соотношением

$$\delta x_{\min} = \sqrt{\frac{R_0 \lambda}{2}}$$

Линейное разрешение по азимуту РЛС с фокусированным искусственным раскрывом определяется выражением

$$\delta x = \Theta R_0 = \frac{d_a}{2},$$

где d_a — размер раскрыва антенны в заданной плоскости.

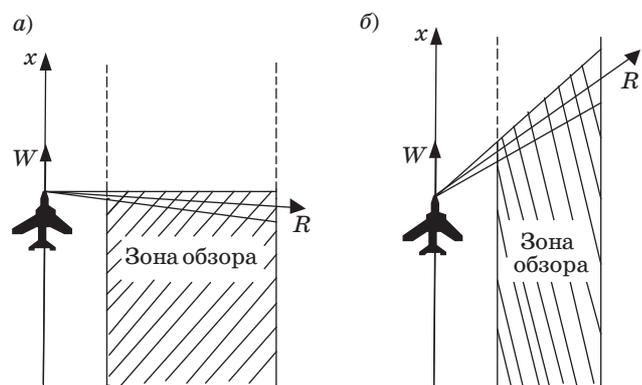
Радиолокационная станция с фокусированным искусственным раскрывом позволяет получить, в отличие от несфокусированного, линейное разрешение по азимуту, не зависящее от дальности и длины волны зондирующего сигнала. Разрешающая способность таких РЛС увеличивается с уменьшением размера реальной антенны. Это является существенным преимуществом РСА по сравнению с другими методами зондирования земной поверхности.

Радиолокаторы бокового обзора. Основные соотношения

Определение местоположения цели при боковом обзоре производится в системе координат: путевая дальность x , наклонная дальность R .

При боковом обзоре ДН антенны перпендикулярна вектору путевой скорости носителя. Определение положения целей на местности осуществляется в прямоугольной системе координат xR . Зона обзора представляет собой полосу, параллельную траектории полета носителей (рис. 5, а). Ширина полосы определяется дальностью действия РЛС.

Возможна ориентация ДН антенны под углом к вектору путевой скорости, отличным от $\pi/2$.



■ Рис. 5. Схема бокового обзора в прямоугольной (а) и косоугольной (б) системе координат

При этом сужается зона обзора, цели могут обнаруживаться с упреждением (рис. 5, б). В этом случае обзор местности осуществляется в косоугольной системе координат.

Известно, что разрешающая способность РЛС обзора земной поверхности по горизонтальной дальности непосредственно под носителем ухудшается по сравнению с предельной, определяемой длительностью зондирующего импульса [5]. Поэтому за ближайшую границу полосы обзора, где разрешающая способность по дальности ухудшается несущественно, обычно принимают высоту полета носителя.

Метод описывается следующими характеристиками:

- временем облучения;
 - дальностью радиолокационного обнаружения;
 - разрешающей способностью.
- Время облучения

$$\tau_{\text{обл}} = \frac{R\Theta}{W},$$

где Θ — угловая ширина ДН антенны РЛС в горизонтальной плоскости; W — проекция скорости по направлению пути.

Характерной чертой метода бокового обзора является однократное облучение целей. При направлении наблюдения, перпендикулярном вектору путевой скорости, изображение формируется только на траверзе траектории полета.

Второй чертой является увеличение времени облучения цели пропорционально дальности. Это приводит к тому, что энергия отраженных от целей сигналов возрастает с увеличением дальности цели.

Определим дальность радиолокационного обнаружения для случая бокового обзора.

Известно, что дальность обнаружения цели (фона местности) R_0 с эффективной отражающей поверхностью σ при использовании одной приемопередающей антенны имеет вид

$$R_0 = 4 \sqrt{\frac{\dot{Y} G^2 \sigma \lambda^2}{64 \pi^2 k_{\text{ш}} k T_0 \eta}},$$

где \dot{Y} — энергия облучения цели; G — коэффициент направленного действия антенны; λ — длина волны передатчика РЛС; $k_{\text{ш}}$ — коэффициент шума приемного устройства; k — постоянная Больцмана; T_0 — абсолютная температура (обычно 280 К); $\eta = \dot{E}_{\text{с min}}/N_{\text{ш}}$ — требуемое значение коэффициента различимости приемного устройства РЛС. Здесь $\dot{E}_{\text{с min}}$ — пороговое значение энергии принимаемого отраженного сигнала, характеризующее чувствительность приемного устройства РЛС; $N_{\text{ш}}$ — спектральная плотность шума на входе приемника: $N_{\text{ш}} = k_{\text{ш}} k T_0$.

Энергия облучения цели (элемента местности) определяется соотношением

$$\dot{Y} = E_{\text{нб}} \tau_{\text{обл}},$$

где $P_{\text{ср}}$ — средняя мощность излучаемого сигнала.

С учетом соотношения для энергии облучения цели получаем формулу для дальности в методе бокового обзора

$$R_0 = 3 \sqrt{\frac{P_{\text{нб}} \Theta_0 G^2 \sigma \lambda^2}{64 \pi^2 W k_{\text{ш}} k T_0 \eta}}.$$

Анализ выражения показывает наличие возможности увеличить радиус дальности действия рассмотренного метода по сравнению с круговым обзором.

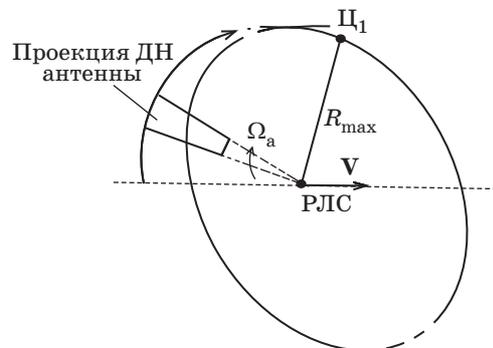
РЛС кругового обзора с синтезированием апертуры на базе КА со стабилизацией вращением. Основные соотношения

Для реализации такого метода просмотра земной поверхности необходимы КА со стабилизацией вращением, РЛС с параболической антенной. ДН антенны имеет относительно местной вертикали угол наклона.

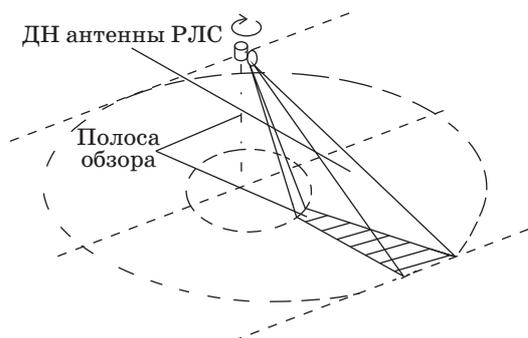
Антенна РЛС за счет кругового вращения корпуса КА, к которому она жестко прикреплена, сканирует подстилающую земную поверхность. Вид проекции ДН антенны в азимутальной и угломестной плоскости на земную поверхность представлен на рис. 6 и 7.

Энергетика РЛС в методе лучше по сравнению с РСА, так как используется более узкая ДН смещенной антенны. Она определяется выбором минимального и максимального угла места наклона ДН антенны.

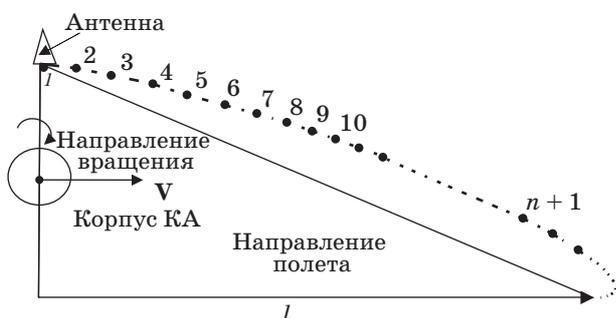
Рассмотрим положение антенны РЛС в различные моменты времени (рис. 8). Антенна при



■ Рис. 6. Вид проекций ДН антенны РЛС на земную поверхность в азимутальной плоскости: Ω_a — угловая скорость вращения антенны РЛС КА в азимутальной плоскости; R_{max} — максимальное расстояние до цели Π_1 ; \mathbf{V} — скорость движения КА



■ Рис. 7. Просмотр полосы обзора антенной РЛС КА



■ Рис. 8. Положения антенны РЛС КА в плоскости вращения в различные моменты времени с учетом поступательного движения и вращения: l — расстояние, которое пролетает КА за полпериода вращения

вращения вокруг местной вертикали с учетом путевой скорости последовательно занимает эти положения (точки 1, 2, 3 и т. д.). Радиус вращения антенны незначителен (порядка нескольких метров). КА движется с первой космической скоростью, и кривая движения антенны превращается практически в прямую за временной промежуток, равный половине периода вращения.

В каждой точке этой кривой электрическая ось антенны будет перпендикулярна к ней. Появляется возможность синтезировать искусственную апертуру.

Местоположение определяется в полярной системе координат. Измеряются дальность R и азимут β . Высота полета H и угол места γ определяются. Азимут цели отсчитывается от направления движения (см. рис. 6).

Радиолокационное наблюдение производят в определенной области пространства, которая называется рабочей зоной, или зоной обзора РЛС. Размеры рабочей зоны определяются интервалами обзора по дальности $R_{\max} - R_{\min}$, азимуту $\alpha_{\max} - \alpha_{\min}$, углу места $\beta_{\max} - \beta_{\min}$ и радиальной скорости $V_{R\max} - V_{R\min}$. Протяженность каждого указанного интервала определяется числом содержащихся в нем элементов разрешения РЛС по соответствующей координате.

Информацию о наличии целей в различных элементах разрешения рабочей зоны получают в процессе обзора (просмотра) этих элементов. Очередность и время просмотра различных элементов, а также интенсивность сигналов, излучаемых РЛС при просмотре каждого элемента, определяются используемым способом (программой) обзора рабочей зоны.

Обзор элементов рабочей зоны может производиться последовательно во времени или одновременно.

При последовательном обзоре не всегда может быть обеспечен необходимый темп получения информации о наличии и координатах целей в зоне обзора. Это связано с тем, что время облучения цели T должно превышать максимальное время запаздывания сигнала τ_{\max} :

$$T > \tau_{\max} = 2R_{\max} / c,$$

где R_{\max} — максимальная дальность действия РЛС; c — скорость света.

Время однократного обзора всей зоны T_0 должно удовлетворять условию

$$T_0 = TN_{\alpha, \beta} > (2R_{\max} / c) N_{\alpha, \beta},$$

где $N_{\alpha, \beta}$ — число элементов разрешения по направлению.

При круговом обзоре с синтезированием апертуры должно выполняться определенное соотношение

$$T_0 = 2\pi / \Omega_a.$$

Число импульсов, отраженных целью за это время, составит

$$n = TF_e = \Theta F_e / \Omega_a,$$

где F_e — частота следования импульсов в пачке.

Период обзора рабочей зоны определяет темп поступления информации о наличии цели в зоне и не может превышать некоторого допустимого значения $T_{0\max}$. Если эта величина задана, то

$$\Omega_a \geq 2\pi / T_{0\max}.$$

Это соотношение определяет минимальную угловую скорость вращения ДН антенны РЛС при круговом обзоре с синтезированием апертуры.

Выбором скорости вращения добиваются просмотра земной поверхности без пропусков.

Основные характеристики метода кругового обзора с синтезированием апертуры:

- время облучения цели;
- период обзора и число циклов обзора, приходящихся на каждую цель.

Сравнение метода кругового обзора с синтезированием апертуры с другими методами позволяет сделать следующие выводы.

1. Сканированием ДН приемной антенны обеспечивается просмотр всей подстилающей зем-

ной поверхности без пропусков. При этом угловая разрешающая способность получаемого изображения будет сопоставима с разрешающей способностью РСА в прожекторном режиме.

2. Время облучения практически не зависит от дальности цели.

3. Просмотр подстилающей земной поверхности за один период вращения происходит дважды и зависит от угловой скорости, определяющей количество циклов.

4. Энергетика РЛС значительно выше по сравнению с методом РСА, так как используется более узкая ДН. Цель (элемент местности) находится на направлении наблюдения, перпендикулярном вектору угловой скорости.

5. Выбором угла наклона антенны исключается обзор земной поверхности по горизонтальной

дальности непосредственно под носителем, где разрешающая способность РЛС крайне низкая.

Заключение

В данной работе рассмотрены основные направления развития радиолокационных систем контроля земной поверхности космического базирования и история создания этих средств. Проанализированы существующие методы, выполнена сравнительная оценка основных технических характеристик. Предложен метод синтеза апертуры на основе кругового перемещения приемной антенны с использованием КА со стабилизацией вращением. Определены пути улучшения технических характеристик бортового радиолокатора для решения прикладных задач.

Литература

1. Соллогуб А. В. и др. Оценка эффективности кластера малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли по показателям оперативности и надежности выполнения функциональных задач // Информационно-управляющие системы. 2012. № 5(60). С. 24–28.
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. Виноградов М. Возможности современных РЛС с синтезированием апертуры антенны // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 2. С. 52–56.
4. Сесин А. Е., Шепета Д. А. Математическая модель эхо-сигналов морской поверхности, наблюдаемых бортовыми локаторами летательных аппаратов // Информационно-управляющие системы. 2010. № 2. С. 21–25.
5. Захарова Л. Н. и др. Совместный анализ данных оптических и радиолокационных сенсоров: возможности, ограничения и перспективы // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56. № 1. С. 5–19.