

Проблемы синтезирования апертуры на геосинхронной орбите

П.В. Аверьянов¹, С.Э. Зайцев¹, О.А. Карпов², Е.Ф. Толстов²

¹АО «ВПК «НПО Машиностроения», 143966, г. Реутов, Московская обл., ул. Гагарина, 33, e-mail: zaisergei@mail.ru

²АО «Аэрокон», 140180, г. Жуковский, Московская обл., ул. Жуковского, 1, e-mail: karp.smtp@mail.ru, e_tolstov@mail.ru

В докладе рассмотрены возможности космических радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА), функционирующих на геосинхронных орбитах, как одних из перспективных средств радиолокационного картографирования земной поверхности. Обоснованы их функции как инструмента, обеспечивающего ежедневное радиолокационное картографирование важнейших экономических регионов, мониторинг судоходства и движения льдов в пределах Северных морских территорий России. Рассмотрены основные характеристики съёмки при работе РСА X-диапазона в маршрутном и прожекторном режимах.

In report the possibilities of space borne synthetic aperture radar (SAR), operating in geosynchronous orbit, are considered as one of the perspective tool of radar Earth surface mapping. Their functions as the instrument, providing daily radar mapping of the most important economic regions, monitoring of navigation and of ice movement within the Northern sea territories of Russia are proved. The main characteristics of the radar mapping are considered when X-band SAR operates in strip map and spot light modes.

Введение

В настоящее время масштабы работ по созданию и применению космических средств радиолокационного зондирования Земли становятся весьма значительными. На сегодняшний день среди стран, интенсивно использующих и совершенствующих космические радиолокаторы землеобзора, следует отметить США, Канаду, Германию, Италию, Китай, Японию, Индию, Корею и Израиль. Такая тенденция является объективным следствием не только способности этих средств к эффективному использованию независимо от освещенности сюжета и метеоусловий, но и целого ряда других уникальных достоинств [1–4]. К таким достоинствам, прежде всего, надо отнести возможности извлечения обширной дополнительной информации на основе анализа фазы отражённого сигнала и его поляризационных характеристик, проникающей способности длинноволнового зондирующего излучения, а также интерферометрическую обработку [5–9]. Всё это резко расширяет функциональные возможности радиолокационных средств наблюдения и позволяет рассматривать их в качестве незаменимого инструмента эффективного решения множества задач гражданского характера [10–12].

Значение этих достоинств особенно велико применительно и к задачам мониторинга большей части территории России [4]. Высокая доля времени, в течение которого здесь имеют место неблагоприятные условия освещенности и облачности (около 75% в среднем по стране, до 90% в арктическом регионе) и длительность непрерывных периодов существования таких условий, не позволяют эффективно использовать оптическую аппаратуру наблюдения при решении обширного круга актуальных задач различных отраслей. В связи с этим особенно актуальным становится использование космических радиолокаторов на геосинхронных орбитах, которые дают возможность существенно сократить периодичность наблюдения. Это, в свою очередь, позволит ежедневно картографировать большую часть территории России, наблюдать

движение судов и льдов в пределах Северного морского пути, районы Дальнего востока, а также важнейшие экономические регионы, включая центральную и северную части Европейского континента, Скандинавию и значительную часть океанических водных пространств.

В качестве прототипа геосинхронного РСА для расчёта энергетических характеристик был принят РСА космического аппарата (КА) «Кондор-ФКА-М» (РСА-М), являющийся следующим поколением РСА с гибридной антенной системой [6,7]. Достоинством этого прототипа является корректное и подробное исследование как его антенной системы, так и основных характеристик РСА в целом.

Основным объектом исследований является космический аппарат, оснащённый РСА традиционного моностатического типа. Предполагается, что КА функционирует на квазисинхронной круговой орбите с высотой $H_{КА} = 36000$ км над поверхностью Земли.

Целью доклада является изучение комплекса вопросов, связанных с влиянием траектории движения КА на работу РСА в наиболее востребованных режимах съёмки (маршрутном и прожекторном), с исследованием особенностей организации зондирования и потенциально достижимых характеристик. Важным с точки зрения космических систем радиолокационного мониторинга является также многопозиционное построение комплекса, когда на геосинхронных орбитах располагаются источники зондирующего излучения, а приём отражённого от Земли сигнала производится устройствами, установленными на малых низкоорбитальных КА или авиационных носителях.

Для разработки облика геосинхронного РСА и проведения числовых расчётов приняты следующие параметры: 1) полоса рабочих частот составляет от 9300 МГц до 9900 МГц с центральной частотой 9600 МГц; 2) площадь апертуры антенного устройства (АУ) РСА составляет 150 м^2 , при этом базовый вариант АУ предполагает равные геометрические размеры апертуры в направлении вдоль и поперёк вектора скорости полёта КА – носителя РСА; 3) в РСА обеспечивается возможность использования внутриимпульсной модуляции зондирующего сигнала (либо линейной частотной модуляции – ЛЧМ, либо фазовой кодовой манипуляции – ФКМ).

1. Траектория движения геосинхронного РСА и полосы захвата

Отметим, что основой для определения облика геосинхронного РСА (полосы обзора и захвата, состава характеристик и параметров режима съёмки) могут служить данные, включающие в себя вид орбиты (геосинхронная круговая), ее наклонение ($i = 45^\circ \dots 60^\circ$) и диапазон изменения углов падения зондирующего сигнала на земную поверхность ($\eta_{\min} = 20^\circ \leq \eta \leq \eta_{\max} = 55^\circ$).

Эти данные путем баллистического расчёта позволяют получить:

- изменение координат (долготы $\Lambda(t)$ и широты $\Phi(t)$) подспутниковой точки на поверхности Земли в течение суток (проекцию маршрута съёмки на поверхность Земли);
- изменение путевой (относительно земной поверхности) скорости КА $W(t)$ в процессе движения по маршруту;
- изменение наклонной дальности до ближней $R_{\min}(t)$ (угол падения на земной эллипсоид $\eta_{\min} = 20^\circ$) и дальней $R_{\max}(t)$ (угол падения $\eta_{\max} = 55^\circ$) кромки полосы обзора.

В большинстве космических РСА обзор поверхности в каждом сеансе съёмки ведется при ориентации механической оси антенной системы (по факту – самого КА) в плоскости нулевой доплеровской частоты отраженного сигнала, а не по нормали к

плоскости орбиты. Плоскость нулевой доплеровской частоты примерно перпендикулярна к вектору путевой скорости КА $W(t)$. Отличие состоит в небольшом угле, компенсирующем вертикальную составляющую земной скорости. Такая ориентация позволяет получить оптимальные условия для синтезирования искусственной апертуры антенны, минимизировать время когерентного накопления сигнала, ослабить требования к навигационно-баллистическому обеспечению и пропускной способности канала передачи данных.

Теоретически синтезирование апертуры антенны возможно при любой ориентации реальной антенны РСА, за исключением направления по вектору земной скорости, однако на практике это приводит к существенным издержкам в плане потенциально достижимых характеристик качества РЛИ.

С учетом сказанного выше, а также выбранных для анализа исходных данных, для наклонения орбиты $i = 60^\circ$ были рассчитаны дальности от КА до границ зоны съёмки $R_{\min}(t)$, $R_{\max}(t)$ и построена конфигурация зоны обзора на земной поверхности при долготе восходящего узла $\Lambda_0 = 60^\circ$ (рис. 1). Как следует из анализа рис. 1, в северном полушарии зона обзора захватывает весь Ледовитый океан, Гренландию, северное побережье Канады. Вместе с тем основная территория России, включая Москву и большую часть Северного морского пути, оказывается не охваченной съёмкой. Изменение долготы восходящего узла приводит к сдвигу зон обзора вдоль экватора и не способствует качественному изменению картины. В связи с этим можно признать, что наклонение орбиты $i = 60^\circ$ для геосинхронного радиолокатора является не совсем удачным для решения национальных целевых задач.

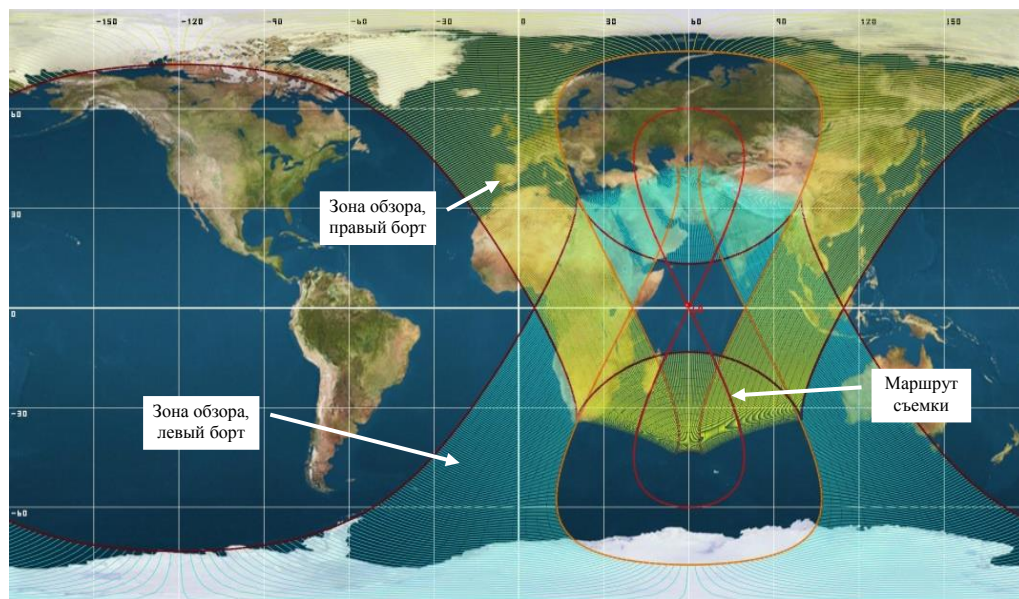


Рис. 1. Конфигурация зоны обзора при $i = 60^\circ$, $\Lambda_0 = 60^\circ$.

Конфигурация зоны обзора в другом варианте наклонения орбиты $i = 45^\circ$ при долготе восходящего узла $\Lambda_0 = 80^\circ$ представлена на рис. 2. Как видим, в этом случае зона обзора в северном полушарии охватывает центральную и северную Европу, включая Италию и Скандинавию, значительную часть территории Российской Федерации, большую часть Северного морского пути и Дальний восток. Поэтому целесообразно выбрать вариант наклонения орбиты $i = 45^\circ$ как наиболее приемлемый.

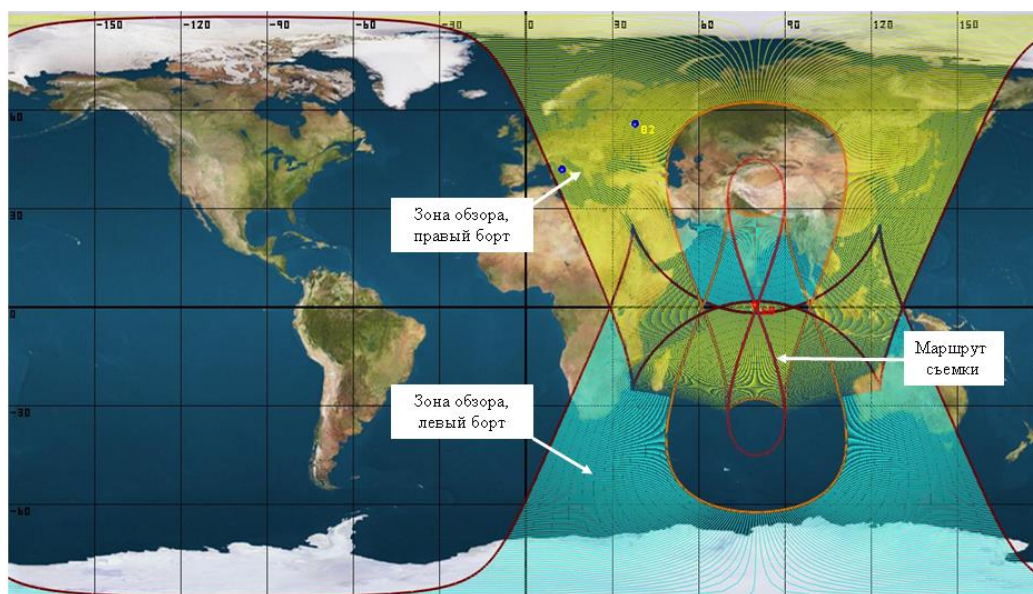


Рис. 2. Конфигурация зоны обзора при $i = 45^\circ$, $\Lambda_0 = 80^\circ$.

В дальнейших расчётах для сравнения параметров режимов будем ориентироваться на два варианта с наклоном орбиты: $i = 45^\circ$ и $i = 60^\circ$. Собственно, основные различия в параметрах съёмки для вариантов $i = 45^\circ$ и $i = 60^\circ$ вызваны отличиями в величине путевых скоростей КА. Графики изменения путевой скорости $W(t)$ по маршруту за сутки для этих двух случаев приведены на рис. 3.

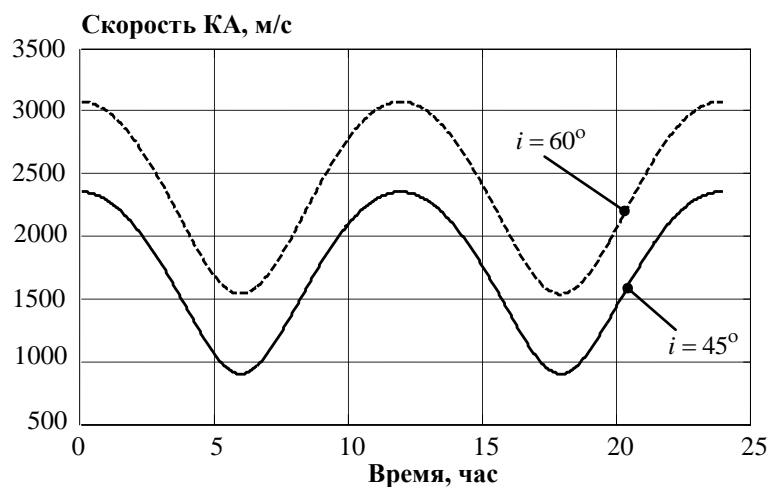


Рис. 3. Изменение путевой скорости КА на маршруте.

Как видно из графиков рис. 3, путевая скорость $W(t)$ изменяется в диапазоне от 2353 м/с до 901 м/с для $i = 45^\circ$ и от 3075 м/с до 1537 м/с для $i = 60^\circ$. При этом можно считать, что ширина полосы обзора по наклонной дальности $D_R(t) = R_{\max}(t) - R_{\min}(t)$ одинакова для обоих значений наклона орбиты, практически не изменяется при движении по маршруту и составляет $D_R(t) \approx D_R = 1955$ км при неизменной дальности до дальней кромки полосы $R_{\max}(t) \approx R_{\max} = 38085$ км.

Соответственно дальность до ближней кромки полосы будет равна

$$R_{\min}(t) \approx R_{\min} = R_{\max} - D_R = 36130 \text{ км.}$$

Основные параметры движения КА – носителя геосинхронного РСА, полученные при баллистических расчётах, поясняются рис. 4 и сведены в таблицу 1. На рис. 4 приняты обозначения: R – расстояние от фазового центра антенны до точки съёмки на поверхности Земли; R_Z – радиус Земли; $R_{КА}$ – радиус орбиты КА, отсчитанный от центра Земли; $H_{КА}$ – высота орбиты КА; γ – угол визирования относительно плоскости орбиты; η – угол падения радиоволн на местности относительно зенитного угла.

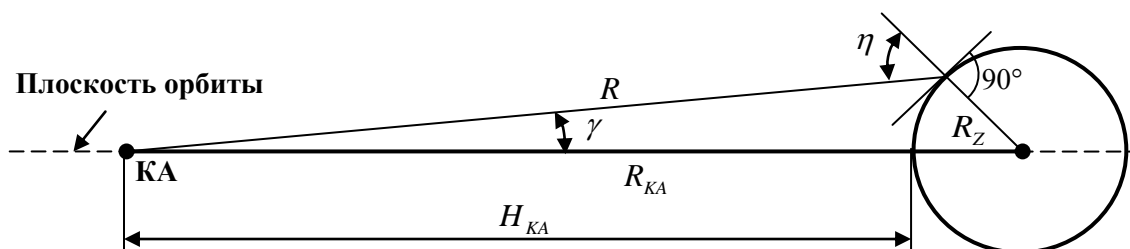


Рис. 4. Основные параметры движения КА по геосинхронной орбите.

Таблица 1. Основные параметры движения КА по геосинхронной орбите и геометрии съёмки.

Параметр	Значение	
Радиус орбиты КА $R_{КА}$, км	42164	
Средняя высота орбиты КА $H_{КА}$, км	35793	
Угол наклона (крен) оси антенны РСА относительно плоскости орбиты при визировании дальней кромки полосы обзора γ_{\max} , градусы	7	
Угол падения радиоволн на дальней кромке полосы обзора η_{\max} , градусы	55	
Дальность до дальней кромки полосы обзора R_{\max} , км	38085	
Угол наклона (крен) оси антенны РСА относительно плоскости орбиты при визировании ближней кромки полосы обзора γ_{\min} , градусы	3	
Угол падения радиоволн на ближней кромке полосы обзора η_{\min} , градусы	20	
Дальность до ближней кромки полосы обзора R_{\min} , км	36130	
Ширина полосы обзора по наклонной дальности D_R , км	1955	
Наклонение орбиты i , градусы	45	60
Путевая скорость КА W , м/с	901,3...2353	1537,5...3075

2. Основные характеристики геосинхронного РСА в маршрутном режиме съёмки

В маршрутном режиме (МР) съёмки луч антенной системы геосинхронного РСА стабилизируется в плоскости нулевой доплеровской частоты отраженного сигнала. В начале сеанса установка луча в эту плоскость производится поворотом КА, далее в процессе съёмки (при необходимости) доворот основного луча диаграммы направленности антенны осуществляется электронным способом.

Теоретически в МР зона захвата по координате путевой дальности ΔX может быть неограниченной длины, однако на практике она ограничена ёмкостью накопителя, пропускной способностью канала передачи данных и заданием на съёмку. Размеры зон

захвата на местности ΔY и по наклонной дальности $\Delta R = \Delta Y_a \operatorname{tg}(\eta) \cong R\theta_u \operatorname{tg}(\eta)$ определяются шириной зоны однозначности по дальности, но не могут превышать размера $Y_a = R\theta_u / \cos \eta$ пятна луча антенны РСА на местности по этой координате (рис. 5). При расчёте Y_a в качестве значения θ_u берётся ширина диаграммы направленности в вертикальной плоскости.

В МР формирование РЛИ осуществляется построчно по мере движения носителя, при этом узкополосный доплеровский фильтр азимутального сжатия (синтезированный луч) попадает в зону однозначности вблизи нулевой доплеровской частоты.

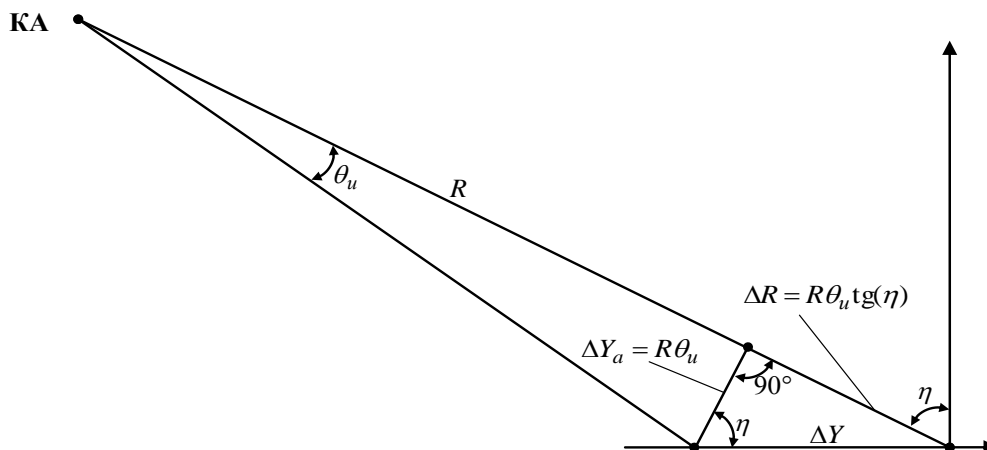


Рис. 5. Геометрия зондирования.

Реализация правильной обработки сигнала, когда направление синтезированного луча совпадает с направлением максимума луча реальной антенны, обеспечивает подавление неоднозначности по азимуту на уровне величины -50 дБ и более. Основные параметры маршрутного режима геосинхронного РСА сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Основные параметры маршрутного режима.

Параметр	Значение	
	$i = 45^\circ$	$i = 60^\circ$
Дальность до дальней кромки полосы обзора R_{\max} , км	38085	
Ширина полосы обзора по наклонной дальности D_R , км	1955	
Ширина полосы захвата по наклонной дальности ΔR , км	32,2 ... 125,1	
Ширина полосы захвата по горизонтальной дальности ΔY , км	94,1 ... 152,7	
Путевая скорость КА, м/с	901,3...2353	1537,5...3075
Частота повторения зондирующих импульсов F_p , Гц	130...340	222...445
Уровень подавления неоднозначности сигналов по наклонной дальности, дБ	> 42	> 35
Уровень подавления неоднозначности сигналов по азимуту, дБ	> 50	> 50
Время синтезирования апертуры антенны, с	37...98	29...57
Разрешающая способность по путевой дальности, Δx , м	6,9	
Разрешающая способность по наклонной дальности, Δr , м	2,36	
Разрешающая способность по горизонтальной дальности, Δy , м	2,88...6,9	
Ширина полосы частот зондирующего сигнала, МГц	63,56	

3. Основные характеристики геосинхронного РСА в телескопическом (прожекторном) режиме съёмки

Расчёт основных характеристик геосинхронного РСА в телескопическом режиме (ТР) начинается с расчёта разрешающей способности по путевой дальности Δx , которая должна быть не хуже разрешения по горизонтальной дальности Δy на дальнем краю зоны обзора. Она, в свою очередь, определяется заданными в исходных данных параметрами: шириной спектра зондирующего сигнала $\Delta f = 600$ МГц и максимальным углом падения $\eta_{\max} = 55^\circ$.

Из этих параметров вытекают значения разрешающей способности по наклонной Δr , горизонтальной Δy и путевой Δx дальностям соответственно

$$\Delta r = \frac{c}{2\Delta f} = 0,25 \text{ м}, \quad (1)$$

$$\Delta y = \frac{\Delta r}{\sin \eta_{\max}} = 0,3 \text{ м}, \quad \Delta x = \Delta y. \quad (2)$$

При телескопическом обзоре луч реальной антенны отслеживает выбранную точку – центр зоны картографирования (формируемого кадра РЛИ). При этом процедура сжатия по координате путевой дальности (азимуту) осуществляется покадровым способом, когда из сигнала, набранного на одном интервале синтезирования T_c , формируется полный кадр изображения. Таким образом, азимутальный размер кадра (зоны захвата по путевой дальности) ΔX определяется интервалом однозначности по этой координате, но не может превышать ширины пятна луча РСА на земной поверхности $X_a = R\theta_u$.

Размер зоны захвата (кадра) по наклонной дальности ΔR в ТР также определяется шириной зоны однозначности по дальности и, соответственно, не может превышать размера Y_a пятна луча антенны РСА по этой координате. В целом размер зоны однозначности по обеим координатам и размер кадра $\Delta X \times \Delta Y$ зависит от выбора частоты повторения.

При заданных параметрах площади апертуры антенны ($S = 150 \text{ м}^2$) и для обеспечения максимального подавления неоднозначности по дальности частоту повторения F_p в ТР целесообразно выбирать так, чтобы зона захвата располагалась вблизи первого нуля диаграммы направленности реальной антенны, т.е.

$$F_p = \frac{c}{k_u \cdot 2 \cdot Y_a} = \frac{c}{2k_u R \theta_u \operatorname{tg} \eta} = \frac{cd}{2k_u R \lambda \operatorname{tg} \eta}, \quad (3)$$

где $k_u = 1$ – коэффициент избыточности по дальности,

$d = 13,82$ м – диаметр антенны.

Наклонная дальность $R_{\min} \leq R \leq R_{\max}$ изменяется в пределах полосы обзора, а угол падения можно вычислить по формуле (рис. 4)

$$\eta = \arcsin \left(\frac{R_{KA}}{R_Z} \sin \gamma \right) = \arccos \left(\frac{R_{KA}^2 - R_Z^2 - R}{2R_Z R} \right),$$

где R_{KA} – локальный радиус орбиты КА на интервале съёмки,

$R_Z = a_e \sqrt{1 - e_e^2} / \sqrt{1 - e_e^2 \cos^2 \varphi_0}$ – локальный радиус Земли в центре зоны картографирования с широтой φ_0 .

Здесь $a_e = 6378136$, $b_e = 6356751$ и $e_e = \sqrt{(a_e^2 - b_e^2)/a_e^2} = 0,08181979739$ – большая полуось, малая полуось и первый эксцентриситет земного эллипсоида.

Графики изменения размеров зон захвата по наклонной дальности ΔR и на местности ΔY от изменения наклонной дальности (расстояния от фазового центра антенны до центра зоны картографирования) представлены на рис. 6.

Следует отметить, что при выборе коэффициента избыточности по дальности $k_u = 1$ предъявляются достаточно жесткие требования к ориентации луча реальной антенны в угломестной плоскости, т.е. к установке заданного угла крена КА. Допустимой можно считать ошибку не более десятой части ширины луча реальной антенны $0,1 \cdot \theta_u = 0,013^\circ \approx 8'$. Превышение этой ошибки уже нельзя компенсировать обработкой сигнала (устранением средней доплеровской частоты), как в случае маршрутного режима.

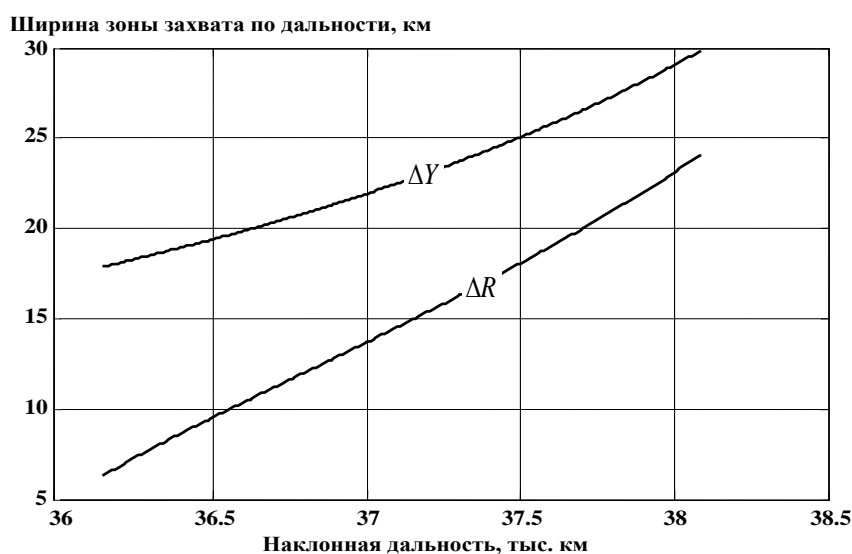


Рис. 6. Изменение ширины зоны захвата по наклонной (ΔR) и горизонтальной (ΔY) дальностям ТР в полосе обзора.

Основные параметры телескопического режима геосинхронного РСА для двух вариантов наклона орбиты сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Основные параметры телескопического режима для двух вариантов наклона орбиты КА.

Параметр	Значение	
	$i = 45^\circ$	$i = 60^\circ$
Дальность до дальней кромки полосы обзора R_{\max} , км	38085	
Ширина полосы обзора по наклонной дальности D_R , км	1955	
Ширина полосы захвата по наклонной дальности ΔR , км	6...25	
Ширина полосы захвата по горизонтальной дальности ΔY , км	17...30,5	
Ширина полосы захвата по азимуту (путевой дальности) ΔX , км	83...88	
Путевая скорость КА, м/с	901,3...2353	1537,5...3075
Частота повторения зондирующих импульсов, F_p Гц	500...2300	500...1500
Уровень подавления неоднозначности сигналов по наклонной дальности, дБ	> 50	> 50
Уровень подавления неоднозначности сигналов по азимуту, дБ	> 42	> 35

Параметр	Значение	
	$i = 45^\circ$	$i = 60^\circ$
Время синтезирования апертуры антенны T_c , мин	13...37	11...22
Число зондирующих импульсов на интервале синтезирования N_c , тыс.	1000...2000	760...1520
Длина интервала синтезирования X_c , км	1930...2030	
Угловой размер синтезированной апертуры Ω_c , градусы	3	
Разрешающая способность по поперечной дальности, Δx , м	0,3	
Разрешающая способность по наклонной дальности, Δr , м	0,25	
Разрешающая способность по горизонтальной дальности, Δy , м	0,3...0,73	
Ширина полосы частот зондирующего сигнала, МГц	600	

Заключение

Таким образом, анализ расчётных данных позволяет сделать вывод, что наиболее целесообразным вариантом выбора геосинхронной орбиты КА – носителя РСА представляется следующий:

- 1) высота орбиты 36000 км;
- 2) наклонение орбиты 45° ;
- 3) долгота восходящего узла 80° .

Такие параметры орбиты позволят ежесуточно картографировать регионы, включающие Европейский континент, значительную часть территории России, а также наблюдать движение судов и льдов в пределах Северного морского пути.

Расчёты показали, что геосинхронный РСА при традиционных требованиях для шумового эквивалента (-20 дБ) и радиометрического разрешения ($1,5...2,0$ дБ) в районе максимума диаграммы направленности удовлетворяет требованиям большинства потребителей при следующих характеристиках: 1) скважность равна 10; 2) средняя мощность излучения 1 кВт для маршрутного режима и 10 кВт для телескопического или прожекторного режима.

Вместе с тем, анализ возможностей геосинхронного РСА показал, что:

1. Главным отличием процедур синтезирования апертуры антенны геосинхронных РСА от традиционных не только космических, но и авиационных, являются гигантские времена синтезирования апертуры антенны и большие длины интервалов синтезирования. Речь идёт о переходе от времени синтезирования, измеряемого секундами, к времени синтезирования, измеряемого минутами и, соответственно, от длин интервалов синтезирования, измеряемых десятками километров, к интервалам синтезирования, измеряемых тысячами километров. Это, в свою очередь, приводит к высоким требованиям по обеспечению когерентности обрабатываемых сигналов и точности всех расчётов. Возможным выходом из положения при решении подобных задач может быть разработка комплексного алгоритма, в котором объединяются все достоинства совместного использования данных баллистики, навигации и адаптации в области радиолокации.

2. В геосинхронном РСА обзор поверхности целесообразно вести при ориентации механической оси антенной системы в плоскости нулевой доплеровской частоты, отражённого от земной поверхности сигнала. Такая ориентация позволяет получить оптимальные условия для синтезирования искусственной апертуры антенны и минимизировать время когерентного накопления сигнала, ослабить требования к навигационно-баллистическому обеспечению и пропускной способности канала передачи данных. При необходимости дополнительный доворот антенны на нужный угол осуществляется электронным способом.

3. При высоте круговой геосинхронной орбиты 35793 км путевая скорость КА в неподвижной относительно Земли (например, гринвичской) системе координат изменяется по маршруту его движения в пределах 901,3...2353 м/с для наклона $i = 45^\circ$ или 1537,5...3075 м/с для наклона $i = 60^\circ$. Существенные изменения путевой скорости КА по маршруту должны учитываться при расчёте параметров режимов съёмки, в частности, частоты повторения зондирующих импульсов. Ширина полосы обзора геосинхронного РСА при заданных углах падения радиоволн на земную поверхность ($20...55^\circ$) составляет 1955 км при дальности до дальней кромки полосы 38085 км.

4. Разрешающая способность маршрутного режима по координате путевой дальности определяется размером апертуры реальной антенны по этой координате и при круглой антенне с заданной площадью 150 м^2 составит 6,9 м. Разрешающая способность маршрутного режима по горизонтальной дальности на ближней кромке полосы обзора также составляет 6,9 м. Разрешение по наклонной дальности при этом составит 2,36 м. Для реализации такого разрешения формирователь сигнала РСА должен генерировать зондирующий импульс с шириной полосы $\Delta f = 63,56 \text{ МГц}$.

5. При телескопическом обзоре формирование РЛИ осуществляется покадровым способом, а луч реальной антенны с помощью электронного управления отслеживает центр зоны картографирования. Размеры зоны захвата (формируемого кадра РЛИ) определяются размерами зон однозначного приёма сигнала по азимуту (путевой дальности) и наклонной дальности. При этом разрешающая способность геостационарной РСА составит 0,3 м по путевой дальности и 0,3...0,73 м по горизонтальной дальности. Для достижения таких характеристик время синтезирования апертуры антенны составит десятки минут при пространственной длине интервала до 2000 км.

7. Для обеспечения условий однозначного приёма при заданной площади антенны в телескопическом обзоре приходится работать в зоне первого нуля диаграммы направленности реальной антенны в угломестной плоскости (коэффициент избыточности по дальности $k_u = 1$). При этом размеры зоны захвата по путевой и горизонтальной дальности составляют соответственно 83...88 и 17...30,3 км.

8. Для обеспечения высоких энергетических характеристик маршрутного режима при низких частотах повторения зондирующих импульсов необходимо использовать ФКМ или ЛЧМ зондирующий сигнал с большой базой, а ее изменение от съёмки к съёмке предписывает иметь набор зондирующих сигналов с различной длительностью импульса.

9. Площадь апертуры реальной антенны РСА определяет условия однозначности приёма сигналов по азимуту и дальности. Для наклона $i = 45^\circ$ эти условия обеспечиваются несколько лучше, что обусловлено меньшими значениями путевой скорости КА.

Кроме того, установлено, что для геосинхронного РСА:

1. Современное состояние технологии позволяет реализовать режим бистатического синтезирования апертуры антенны в РСА космического базирования. При этом в процессе организации бистатического режима РСА необходимо решить четыре задачи синхронизации обеих частей РСА: пространственную, временную, фазовую и временных диаграмм. Применительно к геосинхронному РСА возможна организация бистатического режима в составе геосинхронного КА и КА на низковысотной орбите.

2. В качестве режима интерферометрической оценки рельефа местности целесообразно выбрать однопроходную съёмку при скошенном обзоре. Этот вариант

оценки, хотя и уступает по точности ряду других, оказывается наиболее простым в реализации.

3. Наиболее востребованными режимами в ближайшем будущем представляются оценка сдвигов земной поверхности и объектов, а также селекция (идентификация) движущихся целей.

Литература

1. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.И. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др.; Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
3. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е.Жуковского, 2008. – 531 с.
4. 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. – 676 с.
5. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Карпов О.А., Титов М.П. Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // Радиотехника, №7, 2014. С.16-20.
6. 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: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05 – 2.06. 2016 г., Муром). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. – С.16-36.
7. Зайцев С.Э. Космический аппарат – носитель РСА «Кондор-Э» как основа радиолокационной космической системы «Кондор-ФКА» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05 – 2.06. 2016 г., Муром). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. – С.431-442.
8. Титов М.П. Синхронизация периодов зондирования при регистрации сигналов в бистатических РСА // Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО РФ, 2005. – С.199-206.
9. Гуськов Ю.Н., Карпов О.А., Малёв В.И., Титов М.П., Толстов Е.Ф. Формирование радиолокационных изображений в экспериментальном полёте и в наземных условиях при бистатическом синтезировании апертуры антенны // Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО РФ, 2005. – С.215-221.
10. Бабокин М.И. Измерение сдвигов земной поверхности в комплексах дистанционного зондирования Земли // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. № 8. С.25-34.
11. Бабокин М.И., Карпов О.А. Обнаружение сигнала подстилающей поверхности в РЛС с учетом его флуктуаций на интервале синтезирования // Вопросы радиоэлектроники. Серия РЛТ. 2008. №1. С.148-160.
12. Бабокин М.И., Цветков О.Е. Алгоритмы интерферометрической обработки сигналов РСА при идентификации движущихся объектов // Радиотехника. 2012. №10. С.65-72.