

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.2.9>

УДК: 621.396.965.21

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКИХ РСА В РЕЖИМАХ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

С.Л. Внотченко, М.В. Щетинин

**Научно-исследовательский институт точных приборов
127490, Москва, ул. Декабристов, владение 51**

Статья поступила в редакцию 03 февраля 2022 г.

Аннотация. Анализируются методы увеличения размеров радиолокационного изображения, получаемого космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой в режиме высокого разрешения. Увеличение размеров изображения достигается за счет расширенного сканирования луча антенны в азимутальной плоскости. Основой рассматриваемых методов является классический прожекторный режим. Сравниваются режимы составной (многокадровой) прожекторной съемки и скользящей прожекторной съемки. Оцениваются зависимости азимутального разрешения и размера кадра от величины сектора сканирования. Численные примеры основываются на параметрах радиолокаторов COSMO-SkyMed и TerraSAR-X. Приводится перечень основных способов увеличения сканирования. Даётся краткое описание режима Staring Spotlight, как примера, позволяющего существенно повысить детальность и качество изображений.

Ключевые слова: космические радиолокаторы с синтезированной апертурой, изображение высокого разрешения, прожекторная съемка, многокадровая съемка, скользящая прожекторная съемка.

Abstract. The methods of increasing the size of the radar image obtained by space radars with synthesized aperture in high-resolution mode are analyzed. The image size increase is achieved due to the extended scanning of the antenna beam in the azimuthal plane. The basis of the considered methods is the classical searchlight mode. The modes of composite (multi-frame) searchlight shooting and sliding searchlight shooting are compared. The dependences of azimuthal resolution and frame size on the size of the scanning sector are estimated. Numerical examples are based on the parameters of COSMO-SkyMed and TerraSAR-X radars. A list of the main ways to increase scanning is provided. A brief description of the Staring Spotlight mode is given, as an example, which allows to significantly increase the detail and quality of images.

Key words: space borne synthetic aperture radar, high-resolution images, spotlight mode, multi-frame mode, sliding spotlight mode.

Автор для переписки: Щетинин Михаил Васильевич, m.v.shchetinin@mail.ru

Введение

Космические радиолокаторы с синтезированной апертурой (КРСА) являются эффективным инструментом получения информации о состоянии различных районов Земли независимо от времени суток и метеорологических условий. Дистанционное зондирование Земли посредством КРСА позволяет решать широкий круг прикладных задач в интересах науки, хозяйственной деятельности, при мониторинге чрезвычайных ситуаций, а также для обеспечения государственного суверенитета и безопасности. Во многих областях применения особое значение имеет задача съемки радиолокационных изображений (РЛИ) с очень высокой детальностью.

Реализация эффективных режимов высокодетальной съемки (ВДС) является одной из актуальных и приоритетных задач при проектировании перспективных КРСА [1], основывающихся на технологии активных фазированных антенных решеток (АФАР). В настоящей статье обсуждаются

особенности реализации режимов ВДС применительно к двумерным АФАР, удовлетворяющим повышенным требованиям к размерам кадра и пространственному разрешению в азимутальной плоскости.

Съемка изображений с высокой детальностью (при разрешении 1 м и менее) может быть реализована в X-диапазоне. В настоящее время допустимая полоса частот в верхней части X-диапазона для радиолокационных средств исследования Земли из космоса ограничена величиной 1200 МГц, что обеспечивает разрешение по наклонной дальности вплоть до 0.125 м.

При реальных размерах АФАР, размещаемых на больших и средних космических аппаратах (КА), приемлемое разрешение по азимуту может быть достигнуто с использованием прожекторной съемки либо ее модификаций.

Приводимые далее численные оценки будут выполняться на примере двух КРСА COSMO-SkyMed и TerraSAR-X, использующих технологию АФАР. Некоторые характеристики этих КРСА, включая данные по параметрам антенн [2, 3], приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры антенн космических РСА

Параметры КРСА и АФАР	COSMO-SkyMed (CSM)	TerraSAR-X (TSX)
Высота орбиты, км	619.6	514
Рабочая длина волны, м	0.03123	0.03107
Размеры апертуры антенны, м	5.7×1.4	4.8×0.8
Углы падения/визирования	25° - 50° / 22.7° - 44.3°	20° - 45° / 18.5° - 40.9°
Шаг антенной решетки d , м	0.278*)	0.400
Число элементов решетки N	20	12
Угол отклонения луча $\Delta\alpha_0$, град.	$\pm 2.0^\circ$	$\pm 0.75^\circ$
Полный сектор сканирования (размах) $\Delta\alpha_{ск} = 2 \Delta\alpha_0$	4.0°	1.5°
Угловое положение первого дифракционного лепестка α_1	6.45°	4.45°

*) Расчетная оценка. Соседние элементы смешены на половину длины.

Ниже анализируются два направления совершенствования характеристик получаемых радиолокационных изображений (РЛИ) в азимутальной плоскости:

- увеличение кадра при высоком разрешении;
- улучшение разрешения при приемлемых размерах кадра.

В обоих случаях акцент делается на возможностях расширенного сканирования диаграммы направленности (ДН) антенны по азимуту.

1. Углы сканирования АФАР

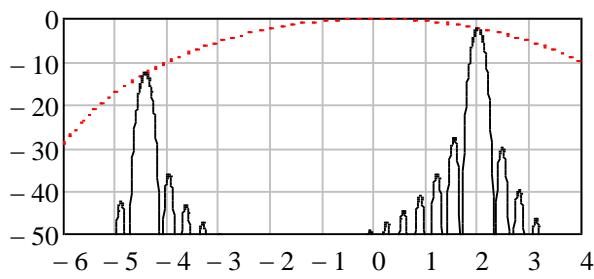
АФАР современных КРСА должны обеспечивать эффективное угловое сканирование в двух плоскостях. Причем при прожекторной съемке наведение ДН антенны должно осуществляться по азимуту в угловом секторе $\pm\Delta\alpha_0$. Для антенных решеток допустимый размах сектора сканирования $\Delta\alpha_{ск} = 2\Delta\alpha_0$ ограничивается наличием дифракционных лепестков.

Угловые положения α_n дифракционных лепестков с номерами n определяются следующим соотношением:

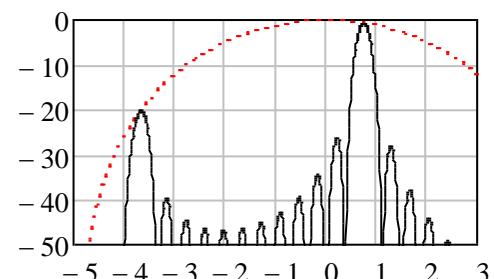
$$\sin \alpha_n = n \frac{\lambda}{d} + \sin \alpha_0, \quad n = \pm 1, \pm 2,$$

где λ – рабочая длина волны; d – расстояния между элементами антенной решетки; α_0 – текущая ориентация главного лепестка ДН решетки. Положение первого лепестка при $n = 1$ и $\alpha_0 = 0$ приближенно равно $\alpha_1 \approx \lambda/d$.

На рисунке 1 представлен примерный вид азимутальных ДН антенн КРСА при максимальном допускаемом отклонении луча в соответствии с таблицей 1.



COSMO-SkyMed



TerraSAR-X

Рис. 1. Азимутальные ДН при максимальном отклонении луча

2. Прожекторная съемка

Прожекторный (телескопический) режим (рисунок 2) предназначен для улучшения азимутального разрешения I_x при кадровой съемке.

Режим реализуется в процессе движения КА путем отслеживания антенным лучом по азимуту точки А, соответствующей центру наблюдаемого кадра, как это показано на рисунке 2.

Здесь приняты следующие обозначения: R – дальность до точки А; $\Delta\alpha$ – ширина азимутальной ДН при двукратном распространении; $L_{\text{синт}}$ – пространственный интервал синтезирования (длина апертуры); $\Delta\alpha_{\text{ск}}$ – полный сектор (размах) азимутального сканирования.

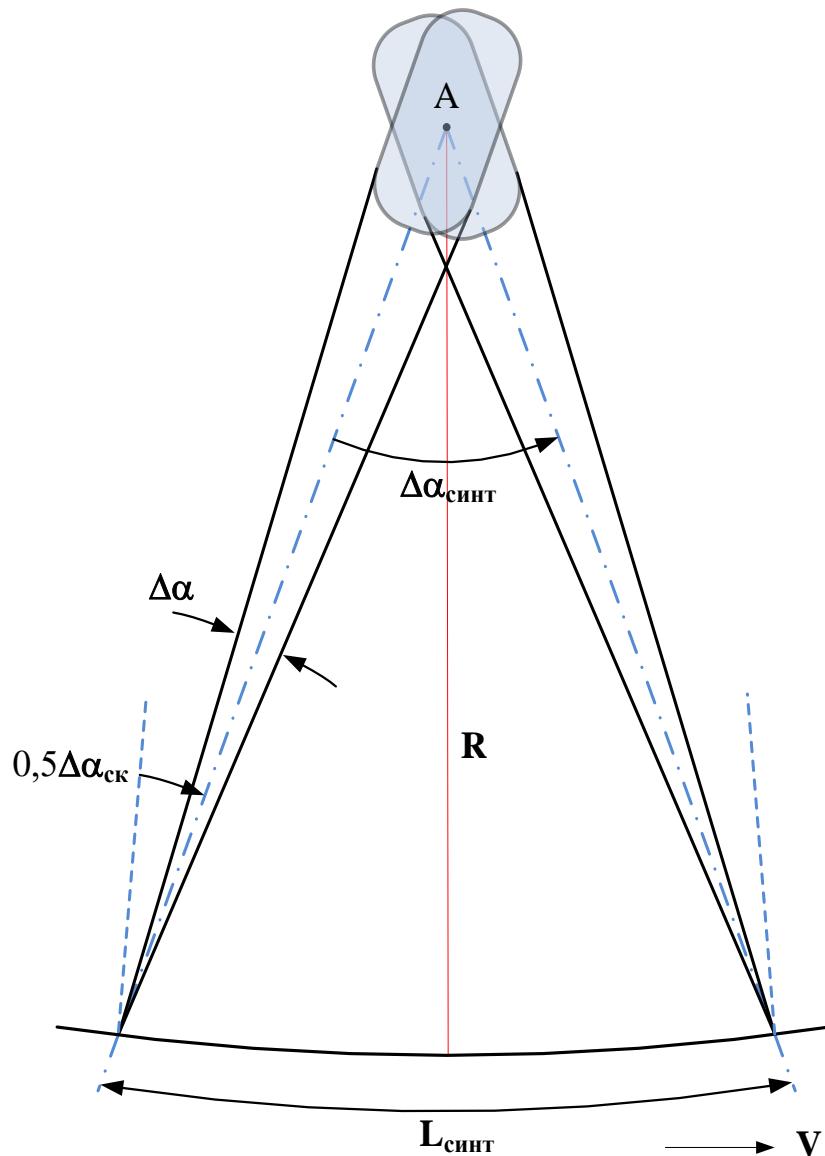


Рис. 2. Схема визирования при прожекторной съемке

Рисунок 2 построен на плоскости, проведенной через три точки: точку вращения (A), а также начальную и конечную точки съемки с орбиты. Именно в этой плоскости находится азимутальное сечение диаграммы направленности антенны (ДНА) и сектор азимутального сканирования КРСА $\Delta\alpha_{ск}$.

Линейное азимутальное разрешение КРСА I_x в общем случае равно

$$I_x = \frac{\lambda R}{2L_{синт}}, \quad (1)$$

где λ – рабочая длина волны; R – наклонная дальность.

При описании условий наблюдения поверхности из космоса используется модель Земли в виде сферы с радиусом $R_s = 6371$ км и предполагается, что КА движется по круговой орбите. В рамках этой модели для расчета геометрических и скоростных параметров введен коэффициент K_s :

$$K_s = \frac{R_s + H}{R_s} = 1 + \frac{H}{R_s}, \quad (2)$$

где $R_s = 6371$ км – средний радиус Земли; H – высота орбиты КА над поверхностью сферы.

Параметр K_s описывает относительную высоту орбиты КА и позволяет в удобном виде рассчитать ряд важных параметров наблюдения. В частности, формула (1) для азимутального разрешения может быть также записана в виде

$$I_x = \frac{\lambda}{2\Delta\alpha_{синт}} = \frac{\lambda}{2K_s\Delta\alpha_{ск}}, \quad (3)$$

где $\Delta\alpha_{синт}$ – угловой сектор синтезирования.

Зависимость $\Delta\alpha_{синт} = K_s \cdot \Delta\alpha_{ск}$ обусловлена движением КА по круговой орбите, что приводит к некоторому увеличению угла синтезирования.

Достоинством прожекторного режима является возможность за счет увеличения сектора сканирования $\Delta\alpha_{ск}$ получать малые размеры элемента азимутального разрешения I_x . В X диапазоне он может составлять порядка десятков сантиметров.

Недостатком прожекторного режима является относительно небольшой размер снимаемого кадра, который определяется величиной следа ДН антенны на земной поверхности. Азимутальный и угломестный размеры следа ДН рассчитываются по формулам:

$$\mathbf{L}_{\text{аз след}} = \mathbf{R} \cdot \Delta\alpha, \quad (4)$$

$$\mathbf{L}_{\text{ум след}} = \mathbf{R}_s [\arcsin(\mathbf{K}_s \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} + 0,5\Delta\varepsilon)) - \arcsin(\mathbf{K}_s \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} - 0,5\Delta\varepsilon)) - \Delta\varepsilon], \quad (5)$$

где $\Delta\alpha$ – азимутальная ширина ДН при двукратном распространении; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – угол визирования; $\Delta\varepsilon$ – угломестная ширина ДН при двукратном распространении.

На рисунке 3 приведены графики зависимости размеров следа ДНА от угла визирования $\boldsymbol{\varepsilon}$.

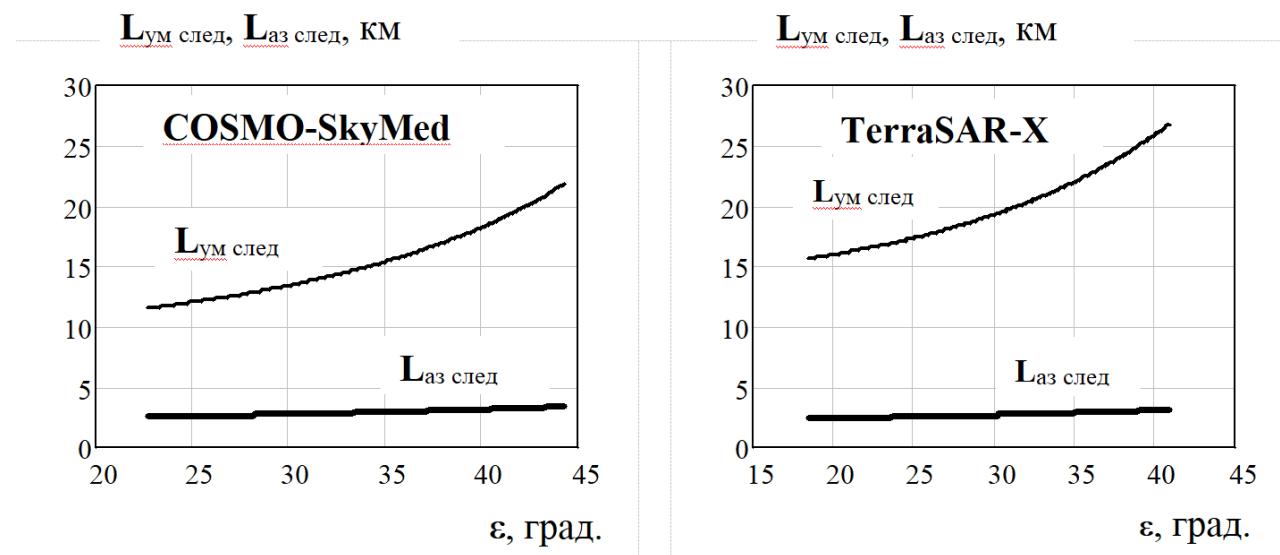


Рис. 3. Графики зависимостей $\mathbf{L}_{\text{ум след}} = f(\boldsymbol{\varepsilon})$, $\mathbf{L}_{\text{аз след}} = f$

Характерной особенностью рассматриваемых КРСА COSMO-SkyMed и TerraSAR-X является достаточно широкий след ДН антенны в угломестной плоскости $\mathbf{L}_{\text{ум след}}$ при относительно узком следе ДН в азимутальной плоскости $\mathbf{L}_{\text{аз след}}$, что обусловлено АФАР, вытянутой вдоль оси движения. В рассмотренных примерах след ДН в азимутальной плоскости $\mathbf{L}_{\text{аз след}}$, составляет примерно 2.4-3.4 км. Для компенсации этого недостатка используются такие методы, как составная прожекторная съемка и скользящая прожекторная съемка.

3. Составная прожекторная съемка

Задача обеспечения требований, предъявляемых к совершенствованию высокодетальной съемки (ВДС), может решаться путем реализации режима, в котором наблюдение заданного участка местности ведется последовательным синтезированием изображений в нескольких примыкающих друг к другу парциальных кадрах, суммарный размер которых будет удовлетворять условию получения формы кадра, близкой к квадрату. Как будет показано ниже, основными ограничениями, накладываемыми на реализацию режима ВДС, является допустимый диапазон углов отклонения луча ДНА по азимуту $\Delta\alpha_{ск}$.

Составной прожекторный режим является модификацией классического прожекторного режима и реализуется путем последовательного формирования n парциальных кадров, прилегающих друг к другу (рисунок 4). Режим обеспечивает увеличение азимутального размера суммарного кадра без больших дополнительных энергетических потерь.

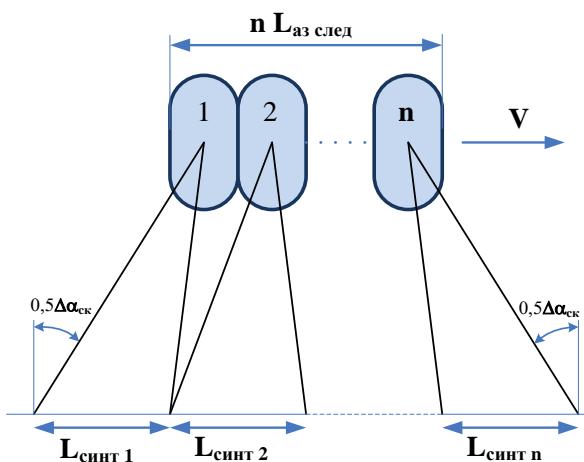


Рис. 4. Схема формирования составного кадра

Формирование суммарного кадра реализуется следующим образом. В начале съемки луч антенны отклоняется вперед на угол $0,5\Delta\alpha_{ск}$ и ориентируется в направлении центра парциального кадра 1. На линейном интервале $L_{синт 1}$ осуществляется синтезирование апертуры первого парциального кадра, для чего осуществляется угловое слежение за его центром. В конце линейного интервала $L_{синт 1}$ антенный луч переориентируется в центр парциального кадра 2. Процесс отслеживания центра парциального кадра повторяется на интервале $L_{синт 2}$.

Аналогичная процедура повторяется для всех последующих парциальных кадров до n -го включительно. В конце формирования n -го кадра луч антенны отклоняется назад на угол не более $0,5\Delta\alpha_{ск}$. Таким образом, протяженность снимаемого участка местности вдоль путевой координаты увеличивается примерно в n раз по сравнению с азимутальным размером следа антенного луча на поверхности Земли.

Возможность реализации n -кадрового режима с точки зрения величины допустимого угла азимутального сканирования $\Delta\alpha_{ск}$ с учетом (1) и (4) можно приближенно оценить следующим образом:

$$\Delta\alpha_{ск} = \frac{n \cdot L_{синт} - n \cdot L_{аз\ след}}{R} = n \cdot \left(\frac{\lambda}{2 \cdot K_s l_x} - \Delta\alpha \right). \quad (6)$$

Суммарный размер кадра $L_{аз\ кадр}$, как следует из рисунка 3, определяется через азимутальный размер следа $L_{аз\ след} = n \cdot L_{аз\ след}$ и с учетом (6) может быть представлен в виде

$$L_{аз\ кадр} = R \Delta\alpha \left[\text{ent} \left(\frac{\Delta\alpha_{ск}}{\left(\frac{\lambda}{2 \cdot K_s l_x} - \Delta\alpha \right)} \right) \right], \quad (7)$$

где $\text{ent}(x)$ – целая часть числа x .

Зависимость величины суммарного размера кадра $L_{аз\ кадр}$ от сектора азимутального сканирования $\Delta\alpha_{ск}$ при $l_x = 1$ м представлена на рисунке 5 (с учетом того, что количество кадров n – целое число). Здесь и далее рабочие зоны для COSMO-SkyMed и TerraSAR-X, определяемые допустимыми значениями $\Delta\alpha_{ск}$, обозначены прямоугольниками розового цвета.

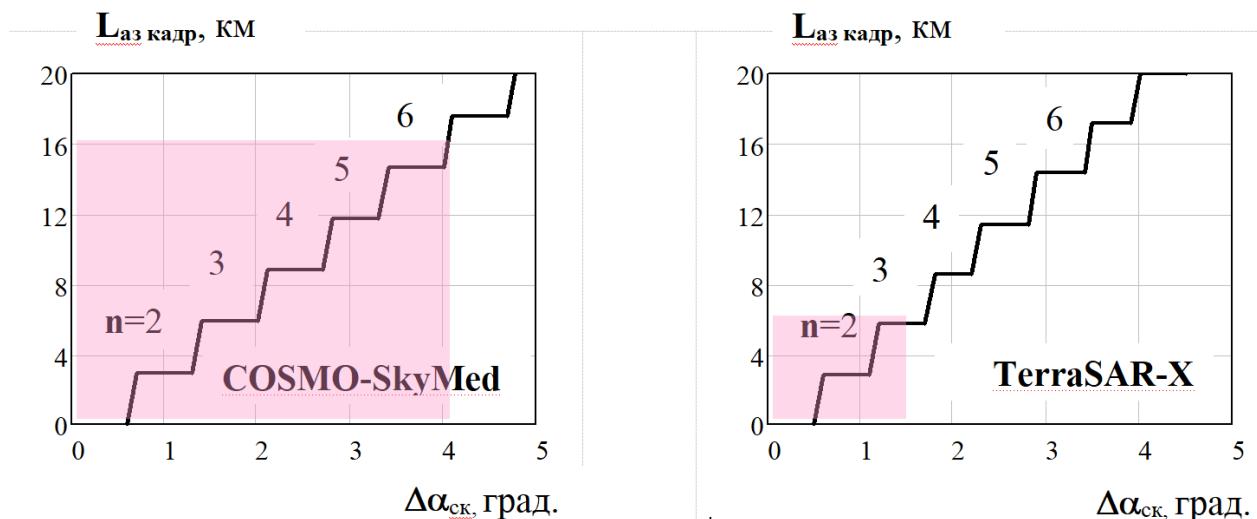


Рис. 5. Зависимости размера кадра $L_{\text{аз кадр}}$ от сектора сканирования $\Delta\alpha_{\text{ск}}$

Чтобы проиллюстрировать влияние $\Delta\alpha_{\text{ск}}$ на разрешение I_x , формулу (6) можно переписать в виде

$$I_x = \frac{\lambda}{2 \cdot K_s \left(\frac{\Delta\alpha_{\text{ск}} + \Delta\alpha}{n} \right)}. \quad (7)$$

На рисунке 6 представлены зависимости азимутального разрешения I_x от сектора сканирования $\Delta\alpha_{\text{ск}}$ при нескольких значениях n .

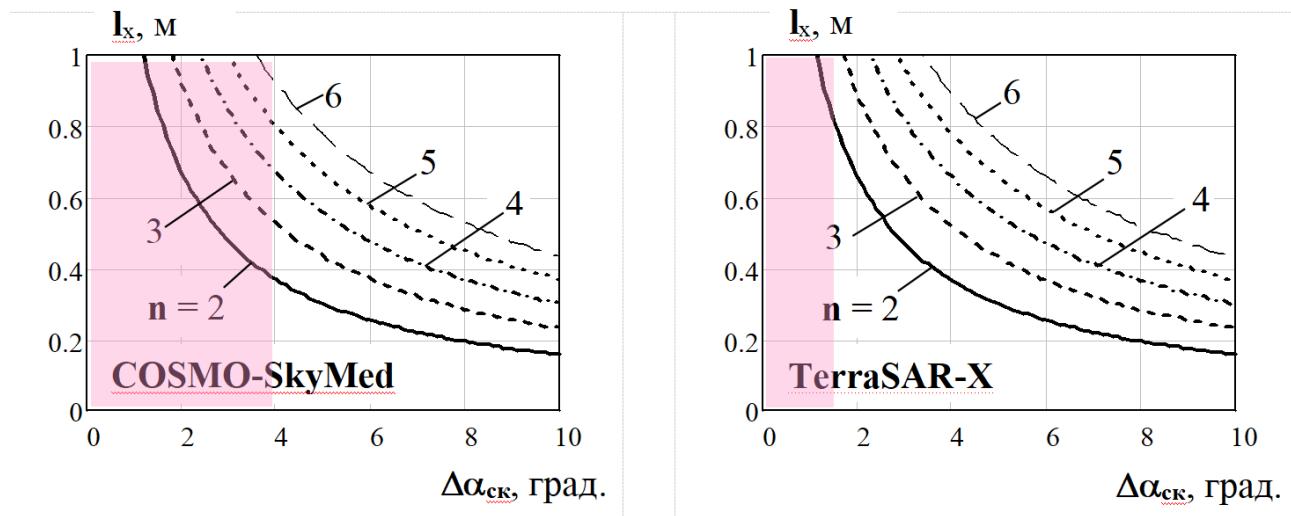


Рис. 6. Графики зависимостей разрешения I_x от сектора сканирования $\Delta\alpha_{\text{ск}}$

Анализ графиков на рисунках 5 и 6 позволяет заключить, что составная прожекторная съемка при достаточной величине $\Delta\alpha_{\text{ск}}$ позволяет решать обе поставленные задачи: как увеличение размера кадра при заданном высоком разрешении, так и улучшение разрешения для приемлемых размеров кадра.

4. Скользящая прожекторная съемка

Другой подход, направленный на увеличение продольного (азимутального) размера кадра $L_{\text{аз кадр}}$ при достаточно высоком азимутальном разрешении I_x и без существенных энергетических потерь – это скользящий прожекторный режим. Он реализуется отслеживанием выбранной специальным образом точки вращения (ТВ), лежащей за пределами наблюдаемого кадра (рисунок 7). Дальность до ТВ, обозначаемая как $R_{\text{ТВ}}$, превышает рабочую дальность наблюдения R . Рисунок 7 построен на плоскости, проведенной через три точки: ТВ, начальную и конечную точки съемки с орбиты.

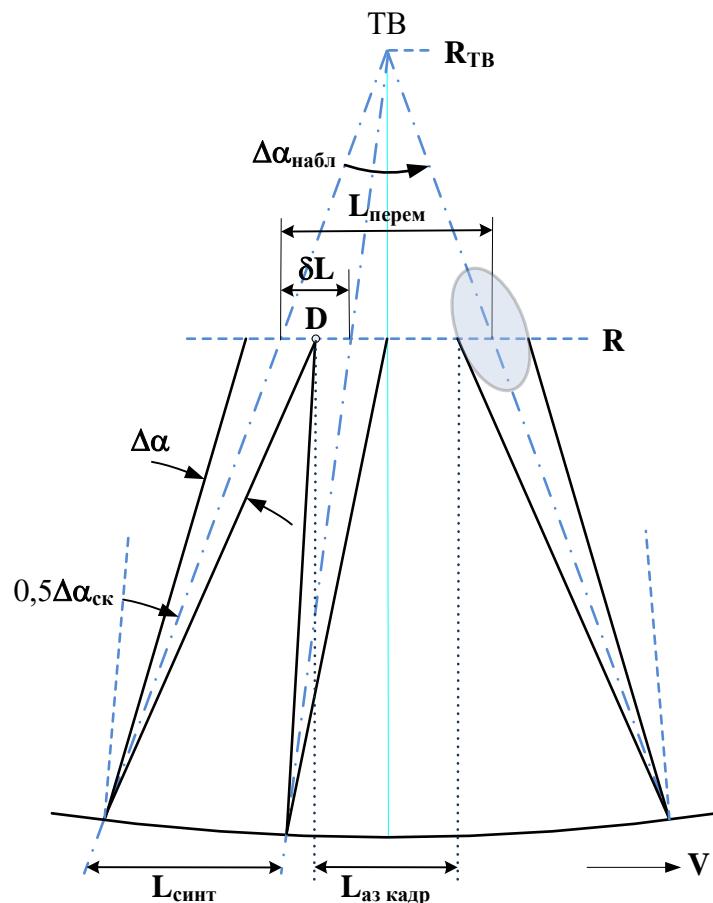


Рис. 7. Схема визирования

Линейное азимутальное разрешение I_x в общем случае определяется формулой (1).

На рисунке 7 показан интервал синтезирования апертуры $L_{\text{синт}}$ в случае скользящей прожекторной съемки для крайней левой точки кадра D . Исходя из подобия треугольников, можно приближенно записать:

$$\frac{\mathbf{R}_{\text{TB}}}{\mathbf{R}_{\text{TB}} - \mathbf{R}} = \frac{\mathbf{L}_{\text{синт}}}{\delta \mathbf{L}}, \quad (8)$$

где $\delta \mathbf{L}$ – перемещение следа ДН, соответствующее интервалу синтезирования, причем $\delta \mathbf{L} = \mathbf{R} \cdot \Delta \alpha$; $\Delta \alpha$ – азимутальная ширина ДН.

С учетом (8) интервал синтезирования равен

$$\mathbf{L}_{\text{синт}} = \frac{\mathbf{R}_{\text{TB}} \cdot \mathbf{R}}{\mathbf{R}_{\text{TB}} - \mathbf{R}} \cdot \Delta \alpha. \quad (9)$$

После подстановки $\mathbf{L}_{\text{синт}}$ (9) в формулу (1) для разрешения \mathbf{l}_x получается

$$\mathbf{l}_x = \frac{\lambda}{2\Delta \alpha} \left(1 - \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{R}_{\text{TB}}} \right) = \frac{\lambda}{2\Delta \alpha} (1 - \xi). \quad (10)$$

Величина отношения $\xi = \mathbf{R} / \mathbf{R}_{\text{TB}}$ для конкретного режима съемки может быть определена исходя из требуемого азимутального разрешения

$$\xi = 1 - \frac{2\Delta \alpha \cdot \mathbf{l}_x}{\lambda}. \quad (11)$$

Значения величины ξ для нескольких азимутальных разрешений \mathbf{l}_x приведены в таблице 2.

Таблица 2. Значения величины отношения ξ от разрешения \mathbf{l}_x

Разрешение \mathbf{l}_x	COSMO-SkyMed	TerraSAR-X
1.0 м	0.7575	0.7120
0.5 м	0.8787	0.8560
0.25 м	0.9394	0.9280

Как и ранее, оценка азимутального размера кадра основывается на использовании геометрических соотношений для сферической модели Земли. В частности, связь между углами $\Delta \alpha_{\text{набл}}$ и $\Delta \alpha_{\text{ск}}$ имеет вид:

$$\Delta \alpha_{\text{набл}} = \Delta \alpha_{\text{ск}} \cdot \mathbf{K}_s. \quad (12)$$

В соответствии с рисунком 7 и формулой (12) перемещение центра антенного луча по поверхности Земли определяется как

$$\mathbf{L}_{\text{перем}} = 2(\mathbf{R}_{\text{TB}} - \mathbf{R}) \cdot \tan\left(\frac{\Delta \alpha_{\text{набл}}}{2}\right) \approx (\mathbf{R}_{\text{TB}} - \mathbf{R}) \cdot \Delta \alpha_{\text{ск}} \cdot \mathbf{K}_s. \quad (13)$$

Тогда размер снимаемого кадра может быть представлен в виде:

$$L_{\text{аз кадр}} = L_{\text{перем}} - \mathbf{R} \cdot \Delta\alpha = (\mathbf{R}_{\text{TB}} - \mathbf{R}) \cdot \Delta\alpha_{\text{ск}} \cdot \mathbf{K}_s - \mathbf{R} \cdot \Delta\alpha, \quad (14)$$

или после преобразований

$$L_{\text{аз кадр}} = \mathbf{R} \cdot \left[\left(\frac{1}{\xi} - 1 \right) \cdot \Delta\alpha_{\text{ск}} \mathbf{K}_s - \Delta\alpha \right]. \quad (15)$$

Откуда следует, что размер кадра тем больше, чем больше сектор азимутального сканирования $\Delta\alpha_{\text{ск}}$.

Для дальнейшего анализа размера кадра целесообразно величину ξ выразить относительно разрешения I_x с использованием формулы (11)

$$L_{\text{аз кадр}} = \mathbf{R} \left[\left(\frac{2\Delta\alpha I_x}{\lambda - 2\Delta\alpha I_x} \right) \cdot \Delta\alpha_{\text{ск}} \mathbf{K}_s - \Delta\alpha \right]. \quad (16)$$

На рисунке 8 представлены зависимости $L_{\text{аз кадр}}$ от сектора сканирования $\Delta\alpha_{\text{ск}}$ для трех значений азимутального разрешения I_x . Размер кадра $L_{\text{аз кадр}}$ увеличивается пропорционально величине сектора сканирования практически линейно, а разрешение I_x определяет наклон этой зависимости. Причем с уменьшением I_x быстро сокращается размер кадра, что указывает на ограниченные возможности скользящей прожекторной съемки при значениях разрешения $I_x < 1.0$ м.

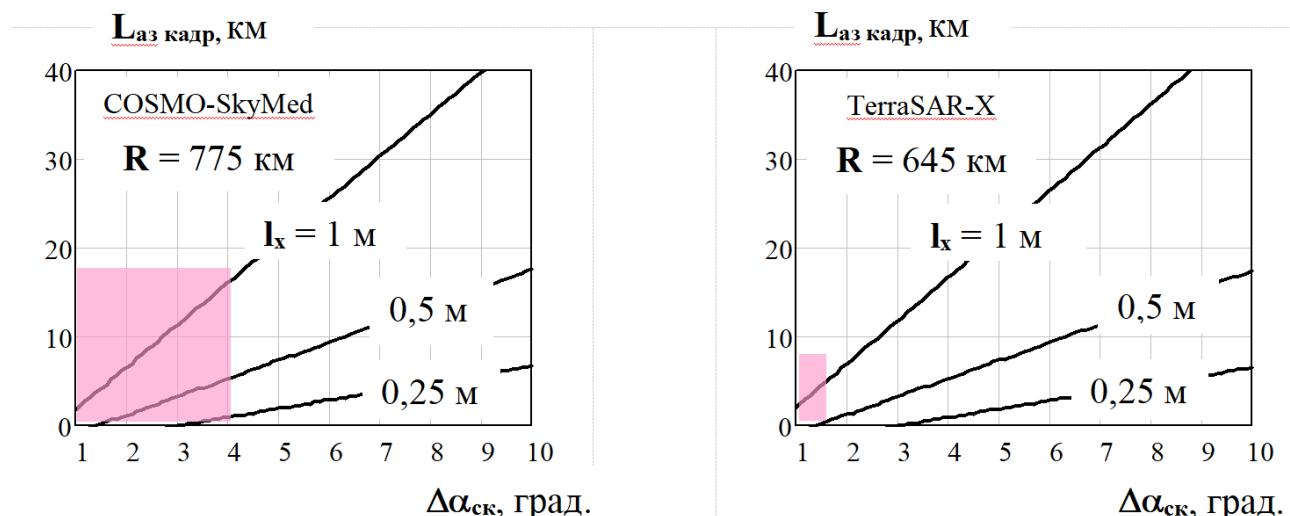


Рис. 8. Азимутальный размер кадра

5. Сравнение вариантов съемки

Каждый из рассмотренных методов высокодетальной съемки (составной прожекторный и скользящий прожекторный) обеспечивает рост размера кадра в азимутальной плоскости L_{az} кадр, сохраняя при этом высокое азимутальное разрешение. Для их сравнения на рисунке 9 приведены совмещенные графики зависимости L_{az} кадр от угла сканирования при азимутальном разрешении $I_x = 1$ м. Ступенчатая зависимость отвечает составному прожекторному методу, пунктирная прямая – скользящему прожекторному методу.

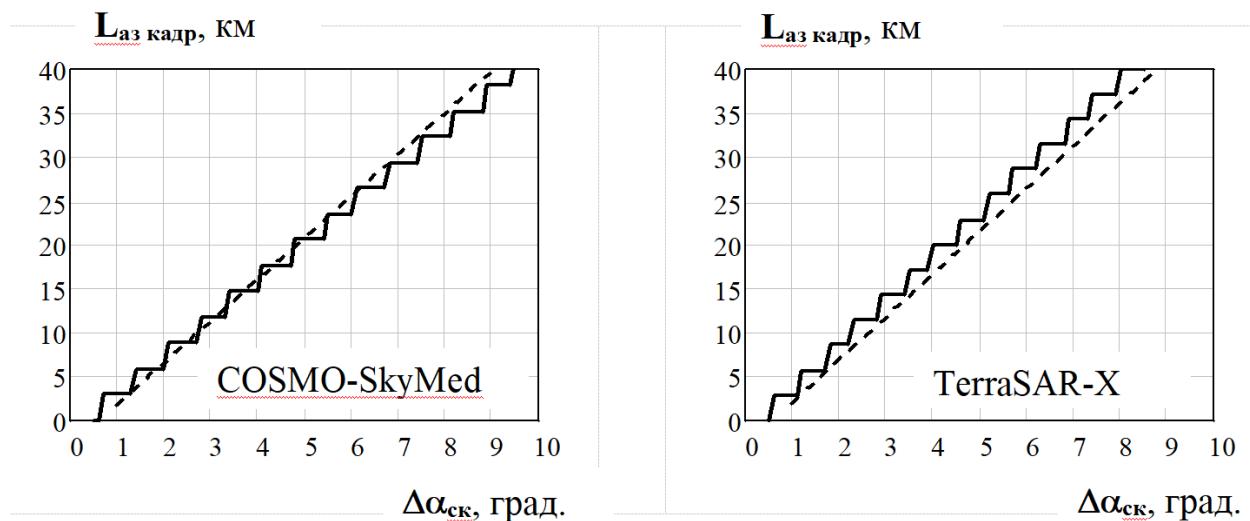


Рис. 9. Сравнение азимутального размера кадра

В целом можно констатировать, что достигаемые двумя рассмотренными методами значения L_{az} кадр весьма близки, особенно при небольших значениях $\Delta\alpha_{ск}$. Некоторые отличия связаны с особенностями конкретного радиолокатора, что указывает на необходимость сравнительного анализа этих методов при проектировании новых КРСА.

Недостатком составной прожекторной съемки является наличие яркостной модуляции РЛИ, обусловленное изменением уровня ДН (0-3 дБ) в пределах каждого парциального кадра.

Скользящая прожекторная съемка свободна от указанного недостатка, однако при азимутальных разрешениях $I_x < 1.0$ м она имеет несколько худшие показатели размера L_{az} кадр.

Следует подчеркнуть, что рассмотренные в качестве примера КРСА COSMO-SkyMed и TerraSAR-X имеют существенные отличия в реализации АФАР, но при этом обладают схожими характеристиками. Графики зависимостей для COSMO-SkyMed и TerraSAR-X на рисунках 5 и 8 очень близки. Однако из-за различия в допустимых значениях сектора азимутального сканирования $\Delta\alpha_{ск}$, рабочие зоны (отмечены розовыми прямоугольниками на графиках) отличаются значительно. Из этого следует, что параметр $\Delta\alpha_{ск}$ является наиболее важным для реализации высокодетальных режимов съемки. Методы увеличения сектора сканирования сводятся к следующим основным направлениям.

1) Размещение излучателей АФАР в сетке, отличающейся от прямоугольной. Например, смещение соседних линеек АФАР, как это было принято в КРСА COSMO-SkyMed, а также оптимизация и расстановка излучателей по различным законам, включая неэквидистантное размещение. Эти методы при прочих равных дают относительно небольшое увеличение параметра $\Delta\alpha_{ск}$, но одновременно приводят к некоторому усложнению алгоритмов управления фазовращателями.

2) Уменьшение шага между излучателями АФАР в азимутальной плоскости. Метод эффективный, хотя и достаточно затратный. Требует увеличения числа приемопередающих модулей, что приводит к росту массы аппаратуры, ее энергопотребления и стоимости. В то же время для больших и средних КА такой подход может оказаться оправданным.

3) Использование угловых разворотов КА, благодаря чему могут быть осуществлены широкие углы механического сканирования, в том числе азимутального. Однако такая возможность реализуема далеко не во всех КА. Данный подход наибольшее распространение получил для РСА, размещаемых на микроспутниках (Capella, QPS-SAR и т.п.), хотя используется и для более крупных КРСА (SAR-Lupe).

4) Азимутальное отклонение антенного луча в АФАР сверх обычного допустимого значения. Метод был впервые использован в TerraSAR-X [4-6] и

позволил существенно (до 5 раз) повысить азимутальное разрешение. Реализация его сравнительно сложная и требует некоторых пояснений.

6. Режим съемки Staring SpotLight

Данный режим предназначен для повышения азимутального разрешения, а также для улучшения качества РЛИ за счет некогерентного накопления. Название режима Staring SpotLight переводится как «пристальный прожекторный». В соответствии с [5] реализация данного режима основывается на следующих операциях:

1) Полный сектор (размах) сканирования антенного луча установлен на уровне $\Delta\alpha_{ск} = 4.4^\circ$. При этом в крайних положениях ($\pm 2.2^\circ$) главный лепесток и первый дифракционный лепесток будут иметь одинаковую амплитуду.

2) Для подавления боковых лепестков на длине накапливаемой пачки используется весовая функция Хемминга с параметром $\beta = 0.6$.

3) В процессе сканирования мощность отражений от цели почти не меняется, тогда как мощность отражений, принимаемых по боковым лепесткам, из-за изменения азимутального угла изменяется значительно. Надлежащим выбором частоты повторения зондирующих импульсов можно дополнительно уменьшить мощность помех неоднозначности, принимаемых по боковым до уровня лучше, чем -17 дБ.

4) Наблюдаемый участок поверхности по азимуту ограничивается 75% от протяженности азимутального следа $L_{аз\ след}$. В результате азимутальный размер участка в диапазоне дальностей составляет от 2.4 км до 3.4 км, т.е. несколько меньше, чем реализуется в обычном прожекторном режиме.

Таким образом, с помощью TerraSAR-X в режиме Staring SpotLight можно получать РЛИ с разрешением по азимуту порядка 20 см, а также высокодетальные изображения с некогерентным накоплением, значительно снижающим спекл-шум. Экспериментальные радиолокационные изображения [4-6] продемонстрировали не только принципиальную осуществимость данного режима, но и его эффективность. Детальный анализ «пристального»

прожекторного режима показал необходимость оптимизации параметров управления КРСА в зависимости от угла падения. Причем особое внимание должно уделяться выбору частоты повторения зондирующих импульсов при поиске компромисса между уровнем неоднозначности по азимуту и по дальности. Подобная работа [5, 6] была проведена по введению «пристального» прожекторного режима в эксплуатацию.

Режим Staring SpotLight вызвал большую заинтересованность у разработчиков КРСА. Например, появились работы, посвященные использованию этого режима в других КРСА [7], а также совершенствованию этого режима за счет использования иных весовых функций (например, Кайзера) и применения нелинейной частотной модуляции зондирующего сигнала [8]. Представляется также целесообразным исследовать возможности режима Staring SpotLight применительно к проектам отечественных КРСА.

Заключение

Рассмотрены способы улучшения характеристик космических РСА на основе АФАР в режимах высокого разрешения. Проанализированы методы увеличения азимутальных размеров РЛИ на основе составной (многокадровой) прожекторной съемки и скользящей прожекторной съемки.

Численные оценки, основывавшиеся на параметрах классических радиолокаторов COSMO-SkyMed и TerraSAR-X, показали, что азимутальный размер кадра практически линейно зависит от азимутального сектора сканирования. При этом методы составной прожекторной и скользящей прожекторной съемки дают примерно одинаковые результаты. Однако следует отметить, что у составной прожекторной съемки имеет место яркостная модуляция по азимуту, тогда как скользящая прожекторная съемка свободна от этого недостатка. Окончательный вариант режима съемки должен определяться с учетом параметров проектируемого КРСА и с использованием примененной выше методики.

В целом можно сделать вывод, что для проектируемых КРСА с приоритетным значением высокодетальной съемки полный сектор азимутального сканирования желательно выбирать не менее 4.0-5.0.

Автор для переписки: Щетинин Михаил Васильевич, m.v.shchetinin@mail.ru

Литература

1. Внотченко С.Л., Коваленко А.И., Риман В.В., Шишанов А.В. Технический облик многоапертурного космического радиолокатора с синтезированной апертурой на основе АФАР X-диапазона. *Всероссийские радиофизические научные чтения-конференции памяти Н.А. Арманда. Секция 2: Радиолокационные системы с синтезированной апертурой.* Муром. 2010. С.91-95.
2. Capice P. Active SAR Antennas: Design, Development and Current Programs. *International Journal of Antennas and Propagation.* 2009. <https://doi.org/10.1155/2009/796064>
3. Stangl M., Werninghaus R., Zahn R. The TerraSAR-X active phased array antenna. *2003 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology.* 2003. P.70-75. <https://doi.org/10.1109/PAST.2003.1256959>
4. Mittermayer J., Wollstadt S., Prats P., Scheiber R. Staring Spotlight Imaging With TerraSAR-X. *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* 2012. P.1606-1609. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6350809>
5. Mittermayer J., Wollstadt S., Prats-Iraola P., Scheiber R., Koppe W. The TerraSAR-X Staring Spotlight Mode Concept. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2014. V.52. №6. P.1-12. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2013.2274821>
6. 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. V.9. №3. P.1015-1027. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2431821>

7. Biondi Filippo. COSMO-SkyMed Staring Spotlight SAR Data for Micro-Motion and Inclination Angle Estimation of Ships by Pixel Tracking and Convex Optimization. *Remote Sensing*. 2019. №11(7). P.766. <https://doi.org/10.3390/rs11070766>
8. Wei Xu, Lu Zhang, Chonghua Fang, Pingping Huang, Weixian Tan, Yaolong Qi. Staring Spotlight SAR with Nonlinear Frequency Modulation Signal and Azimuth Non-Uniform Sampling for Low Sidelobe Imaging. *Sensors*. 2021. V.21(19). P.6487. <https://doi.org/10.3390/s21196487>

Для цитирования:

Внотченко С.Л., Щетинин М.В. Улучшение характеристик космических РСА в режимах высокого разрешения. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.2.9>