

Оптимизация режима Staring Spotlight TerraSAR-X и глобальные прогнозы производительности

Томас Краус, Бенджамин Брёйтигам, Йозеф Миттермайер, Штеффен Вольштадт и Христо Григоров

Аннотация

Для миссии TerraSAR-X был реализован новый режим staring spotlight (пристального прожектора), обеспечивающий очень высокое разрешение по азимуту. Проведены детальные анализы производительности для оптимизации командных параметров этого режима. По сравнению с ранее доступными режимами съемки TerraSAR-X, staring spotlight требует работы инструмента с минимальными запасами и на границе спецификаций, для которых был разработан радар. Поэтому в процессе операционализации введен дополнительный этап - глобальное моделирование и анализ съемок - для обеспечения пригодности полученных командных параметров в глобальном масштабе. В данной статье представлен обзор анализов производительности РСА, проведенных для оптимизации и этапов внедрения режима, а также представлен новый подход к глобальной оценке производительности, который в целом применим для верификации операционных режимов РСА. Кроме того, показаны результаты измерений и примеры съемок.

Ключевые слова - Высокое разрешение, staring spotlight, синтезированная апертура радара (SAR), TerraSAR-X.

I. ВВЕДЕНИЕ

В 2013 году портфель режимов радиолокационной съемки миссии TerraSAR-X был существенно расширен. С момента запуска TerraSAR-X в 2007 году операционно доступны четыре режима РСА-съемки (см. Таблицу I). Они варьируются от режимов скользящего прожектора, называемых spotlight (SL) и high-resolution spotlight (HS) с разрешением по азимуту до 1,1 м, через stripmap (SM), до режима scanSAR (SC) с четырьмя лучами с покрытием по дальности 100 км. Для обеспечения доступа к новым приложениям были разработаны два новых режима, которые стали операционно доступны с осени 2013 года [1], [2]. Это режим широкого ScanSAR с покрытием по дальности более 200 км для обнаружения судов и мониторинга морского льда, и режим staring spotlight (ST) с разрешением по азимуту 24 см для приложений, таких как наблюдение за

аэродромами и мониторинг критической инфраструктуры. Этот режим позволяет идентифицировать даже мелкомасштабные объекты и облегчает визуальную интерпретацию РСА-изображений.

Режимы прожектора в целом обеспечивают повышенное разрешение по азимуту по сравнению со съемками в режиме полосы. Луч отклоняется назад относительно направления полета для увеличения времени апертуры и, таким образом, полосы пропускания азимутального сигнала каждого целевого объекта в сцене.

Разрешение по азимуту определяется выражением:

$$\rho_{az} = \frac{L_a}{2}$$

где (L_a) — длина антенны. В режиме прожектора разрешение улучшается за счет увеличения эффективной апертуры:

$$\rho_{az,spotlight} = \frac{L_a}{2} \cdot \frac{1}{k_{spotlight}}$$

где $(k_{spotlight} > 1)$ — коэффициент улучшения разрешения в режиме прожектора.

Увеличенная полоса пропускания улучшает разрешение по азимуту по сравнению со съемкой в режиме полосы. Азимутальная полоса пропускания связана с временем синтеза апертуры (T_{synth}) :

$$B_{az} = \frac{2V_s \sin(\Delta\theta)}{L_a}$$

где (V_s) — скорость космического аппарата, $(\Delta\theta)$ — угол отклонения антенны. Однако в режимах скользящего прожектора (например, SL и HS) главный лепесток диаграммы направленности азимутальной антенны все еще движется вперед по сцене в азимутальном направлении, хотя и медленнее, чем в режиме полосы. Это показано слева на рис. 1. В режиме staring spotlight цель управления антенной заключается в поддержании центра сцены в центре главного лепестка азимутального луча в течение всего времени апертуры, как показано справа на рис. 1. В отличие от режимов скользящего прожектора, луч антенны в режиме staring spotlight направлен непосредственно на центр сцены в течение всего времени сбора данных. Это максимизирует азимутальную полосу пропускания цели для заданной длительности съемки и приводит к максимально возможному разрешению по азимуту за счет меньшего размера сцены по азимуту [3].

Для режима staring spotlight TerraSAR-X угол отклонения азимутальной антенны значительно больше, чем для режимов скользящего прожектора, что обеспечивает более высокое разрешение изображений, но вызывает значительно увеличенную миграцию ячеек дальности (RCM).

Угол отклонения антенны (θ_{steer}) связан с доплеровской частотой (f_D) :

$$\sin(\theta_{\text{steer}}) = \arcsin\left(\frac{\lambda f_D}{2V_s}\right)$$

где λ — длина волны PCA, V_s — скорость космического аппарата.

TerraSAR-X использует активную фазированную антенную решетку с расстоянием между элементами по азимуту d_{az} , превышающим длину волны. Поэтому производительность электронно управляемых (вне оси) азимутальных лучей подвержена влиянию дифракционных лепестков. Условие возникновения дифракционных лепестков:

$$\sin(\theta_{\text{grating}}) = \frac{n\lambda}{d_{\text{az}}}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots$$

Эффект увеличивается для больших углов отклонения [4], как это используется в режиме staring spotlight. Таким образом, производительность азимутальной неоднозначности была определена как определяющий параметр производительности для режима staring spotlight [5], [6].

Азимутальная неоднозначность (AASR - Azimuth Ambiguity to Signal Ratio) определяется как:

$$\text{AASR} = \sum_{n \neq 0} \frac{G(\theta_{\text{steer}} + n \cdot \Delta\theta_{\text{PRF}})}{G(\theta_{\text{steer}})}$$

где $G(\theta)$ — диаграмма направленности антенны, $\Delta\theta_{\text{PRF}}$ — угловое смещение, соответствующее PRF:

$$\Delta\theta_{\text{PRF}} = \arcsin\left(\frac{\lambda \cdot \text{PRF}}{2V_s}\right)$$

Поэтому оптимальный выбор частоты повторения импульсов (PRF) имеет важное значение.

Кроме увеличенного диапазона отклонения антенны по сравнению с режимами скользящего прожектора, используется максимально возможная полоса пропускания чирпа по дальности 300 МГц для максимизации разрешения по дальности насколько это возможно для TerraSAR-X, чтобы быть ближе к высокому разрешению по азимуту. Однако высокая полоса пропускания вызывает высокую скорость передачи данных, что ограничивает длину окна приема эхо-сигналов и, следовательно, размер сцены по дальности из-за ограничений инструмента по длине буфера и ограничений скорости передачи данных [1], [5], [7]. Указанный размер по дальности режима - называемый номинальной шириной полосы обзора - дополнительно ограничен, поскольку необходимы запасы для компенсации вариаций орбиты и неточностей в цифровой модели рельефа (DEM), используемой для генерации команд, а также для потерь из-за коррекции RCM.

Режим staring spotlight TerraSAR-X должен быть операционно доступен для съемок по всему миру. Поэтому командные параметры, и особенно PRF, должны быть оптимизированы, и их пригодность должна быть проверена в глобальном масштабе. Оптимизированные продукты staring spotlight должны дополнять и хорошо отличаться от других хорошо зарекомендовавших себя и признанных продуктов TerraSAR-X. Из-за отклонения азимутальной антенны за пределы проектных

ограничений диапазон PRF, обеспечивающих высокопроизводительные продукты, резко сокращается. Однако для компенсации вариаций высоты спутника и топографии время окна эхосигналов и PRF должны быть адаптированы для каждого индивидуального сценария съемки. Следовательно, после выбора PRF необходим второй этап - доказательство пригодности для командования и соответствия требованиям производительности для съемок по всей Земле.

В данной статье основное внимание уделяется оптимизации режима staring spotlight TerraSAR-X и подходу к прогнозированию производительности на основе моделирования глобально распределенных съемок. Из этапа оптимизации, глобальных симуляций и оценки действительно полученных изображений staring spotlight выводятся спецификации режима. Хотя операционные алгоритмы командования TerraSAR-X включены в среду моделирования, они здесь подробно не рассматриваются. Более подробную информацию об этом можно найти в [8].

Структура статьи следующая. В разделе II рассматриваются ключевые проблемы режима staring spotlight TerraSAR-X и разрабатывается стратегия оптимизации командных параметров. В разделе III представлен новый подход к оценке производительности на основе моделирования съемок в глобальном масштабе. Ожидаемая производительность неоднозначности, а также другие ключевые параметры выводятся из этих симуляций. Оценка изображений TerraSAR-X и примеры съемок представлены в разделе IV. В разделе V представлены выводы.

II. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА STARING SPOTLIGHT

A. Ключевые проблемы

Режим staring spotlight TerraSAR-X требует работы инструмента на границе его спецификаций. Основные проблемы связаны с:

1. **Азимутальная неоднозначность:** из-за большого угла отклонения антенны производительность азимутальной неоднозначности становится критической. Дифракционные лепестки активной фазированной антенной решетки TerraSAR-X с расстоянием между элементами, превышающим длину волны, создают дополнительные неоднозначности при больших углах отклонения.
2. **Миграция ячеек дальности (RCM):** увеличенный диапазон отклонения антенны вызывает значительно увеличенную RCM, что требует более сложной обработки и ограничивает размер сцены по дальности.

Миграция ячеек дальности определяется выражением:

$$\Delta R_{RCM} = R_0 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{V_s T_{synth}}{R_0} \right)^2 \sin^2(\theta_{steer})} - 1 \right]$$

где (R_0) — наклонная дальность до центра сцены, (T_{synth}) — время синтеза апертуры. Для больших углов отклонения это выражение упрощается:

$$\Delta R_{RCM} \approx \frac{(V_s T_{synth})^2 \sin^2(\theta_{steer})}{2R_0}$$

1. **Ограничения скорости передачи данных:** использование максимальной полосы пропускания чирпа 300 МГц приводит к высокой скорости передачи данных, что ограничивает длину окна приема эхо-сигналов.
2. **Глобальная применимость:** режим должен работать для съемок по всему миру с различными высотами орбиты и топографией.

В. Стратегия оптимизации

Стратегия оптимизации включает следующие этапы:

1. **Анализ производительности:** детальный анализ производительности неоднозначности, RCM и других параметров для различных PRF и углов отклонения.
2. **Выбор PRF:** выбор оптимальных PRF, обеспечивающих высокую производительность при сохранении достаточной гибкости для адаптации к различным сценариям съемки.

Требования к PRF определяются несколькими условиями:

- **Условие однозначности по азимуту (Nyquist):** $\text{PRF} \geq \frac{2V_s \sin(\theta_{steer,max})}{\lambda}$
- **Условие однозначности по дальности:** $\text{PRF} \leq \frac{c}{2(R_{max} - R_{min})}$

где (c) — скорость света, (R_{max}) и (R_{min}) — максимальная и минимальная наклонные дальности.

- **Условие отсутствия конфликтов с окном приема:** $\text{PRF} \leq \frac{1}{T_{echo} + T_{guard}}$

где (T_{echo}) — длительность окна приема эхо-сигналов, (T_{guard}) — защитный интервал.

1. **Глобальное моделирование:** моделирование съемок по всему миру для проверки пригодности выбранных PRF для различных условий.
2. **Верификация:** оценка реальных изображений для подтверждения результатов моделирования.

III. ГЛОБАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

A. Подход к моделированию

Для глобальной оценки производительности режима staring spotlight был разработан подход на основе моделирования съемок по всему миру. Этот подход включает:

1. **Глобальная сетка точек:** создание глобальной сетки точек на поверхности Земли для моделирования потенциальных целей съемки.
2. **Моделирование съемок:** для каждой точки моделируется съемка с использованием операционных алгоритмов командования TerraSAR-X.
3. **Анализ производительности:** для каждой смоделированной съемки анализируются параметры производительности, такие как неоднозначность, RCM и другие.
4. **Статистический анализ:** статистический анализ результатов для вывода глобальных характеристик производительности.

B. Результаты моделирования

Результаты глобального моделирования показывают:

1. **Производительность неоднозначности:** ожидаемая производительность азимутальной неоднозначности для различных PRF и условий съемки.

Производительность неоднозначности оценивается через отношение сигнал/неоднозначность (ASR - Ambiguity to Signal Ratio):

$$\text{ASR}_{\text{az}} = 10 \log_{10} \left(\sum_{n \neq 0} \frac{G^2(\theta_{\text{steer}} + n \cdot \Delta \theta_{\text{PRF}})}{G^2(\theta_{\text{steer}})} \right) \quad \text{[дБ]}$$

где суммирование выполняется по всем дифракционным лепесткам $(n = \pm 1, \pm 2, \dots)$.

1. **Распределение RCM:** распределение миграции ячеек дальности для различных условий съемки.
2. **Глобальная применимость:** процент съемок, которые могут быть успешно выполнены с выбранными PRF.
3. **Ограничения:** выявленные ограничения и области, где режим может быть менее эффективным.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ПРИМЕРЫ

A. Результаты измерений

Оценка реальных изображений staring spotlight TerraSAR-X подтверждает результаты моделирования. Измеренные параметры производительности соответствуют прогнозируемым значениям, что подтверждает корректность подхода к оптимизации и моделированию.

B. Примеры съемок

Примеры съемок в режиме staring spotlight демонстрируют высокое качество изображений с разрешением по азимуту 24 см.

Теоретическое разрешение по азимуту в режиме staring spotlight определяется как:

$$\rho_{az,ST} = \frac{c}{2B_{az,ST}} = \frac{\lambda}{2 \cdot 2V_s T_{synth} \sin(\theta_{steer}) / L_a}$$

где $B_{az,ST}$ — азимутальная полоса пропускания в режиме staring spotlight. Для TerraSAR-X это дает разрешение приблизительно 0.24 м.

Разрешение по дальности определяется полосой пропускания чирпа B_r :

$$\rho_r = \frac{c}{2B_r}$$

Для максимальной полосы пропускания 300 МГц разрешение по дальности составляет:

$$\rho_r = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 300 \times 10^6} = 0.5 \text{ м}$$

Изображения показывают детализацию, достаточную для идентификации мелкомасштабных объектов и облегчения визуальной интерпретации.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлен обзор оптимизации режима staring spotlight TerraSAR-X и новый подход к глобальной оценке производительности. Результаты показывают, что режим может быть успешно использован для съемок по всему миру с высоким качеством изображений. Разработанный подход к глобальной оценке производительности может быть применен для верификации других операционных режимов РСА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] T. Kraus, B. Bräutigam, J. Mittermayer, S. Wollstadt, and C. Grigorov, "TerraSAR-X staring spotlight mode optimization," in Proc. Asia-Pac. Conf. Synth. Aperture Radar (APSAR), Tsukuba, Japan, 2013, pp. 16-19.
- [2] H. Breit, M. Fischer, U. Balss, and T. Fritz, "TerraSAR-X staring spotlight processing and products," in Proc. Eur. Conf. Synth. Aperture Radar (EUSAR), Berlin, Germany, 2014, pp. 193-196.
- [3] I. Cumming and F. Wong, Digital Signal Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation. Norwood, MA, USA: Artech House, 2005.
- [4] M. Bachmann, M. Schwerdt, and B. Bräutigam, "TerraSAR-X antenna calibration and monitoring based on a precise antenna model," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 48, no. 2, pp. 690-701, Feb. 2010.
- [5] T. Kraus, B. Bräutigam, C. Grigorov, J. Mittermayer, and S. Wollstadt, "TerraSAR-X staring spotlight mode optimization," in Proc. Asia-Pac. Conf. Synth. Aperture Radar (APSAR), Tsukuba, Japan, 2013, pp. 16-19.
- [6] J. Mittermayer et al., "TerraSAR-X system performance characterization and verification," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 48, no. 2, pp. 660-676, Feb. 2010.
- [7] H. Breit et al., "TerraSAR-X SAR processing and products," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 48, no. 2, pp. 727-740, Feb. 2010.
- [8] S. Wollstadt, "TerraSAR-X instrument command generation," in Proc. Eur. Conf. Synth. Aperture Radar (EUSAR), Berlin, Germany, 2014.

Таблица

Операционные режимы съемки TerraSAR-X

Режим	Размер сцены по дальности (км)	Разрешение по азимуту (м)	Размер сцены по азимуту (км)
Staring spotlight	≈ 5	0.24	≈ 2.5
Spotlight (SL/HS)	10	1.7 / 1.1	10 / 5
Stripmap	30	3.3	50
ScanSAR (четыре	100	18.5	150

Режим	Размер сцены по дальности (км)	Разрешение по азимуту (м)	Размер сцены по азимуту (км)
луча)			
ScanSAR (шесть лучей)	≥ 200	40.0	200

Рис. 1. Геометрия съемки РСА, работающего в режиме скользящего прожектора, например, high-resolution spotlight (слева) и в режиме staring spotlight (справа).