

## **Расширение полосы съемки в космических РСА при использовании метода обзора с периферическим зрением**

К.К. Храмов<sup>1</sup>, В.П. Макаров<sup>1</sup>, В.В. Костров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23  
E-mail: hramovkk@gmail.com

<sup>2</sup> АО «НИИ «Субмикрон»  
124498, Москва, Зеленоград, Георгиевский просп., д. 5, с. 2  
E-mail: kostrov.46@mail.ru

*Представлен новый способ радиолокационного зондирования – режим обзора с периферическим зрением (РПЗ) для космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). В основе нового метода обзора лежит использование зон неоднозначности по дальности, примыкающих к основной зоне съёмки. Это позволяет расширить полосу обзора без значительного роста объема передаваемой информации. Рассмотрены геометрия обзора и временные характеристики РПЗ. Предложена обобщенная структура системы обработки сигналов в данном режиме.*

*Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры, РСА, режим обзора с периферическим зрением, неоднозначность по дальности, полоса обзора, радиолокационное изображение, РЛИ, обработка сигналов.*

## **Expanding the Swath Width in Space-Borne SAR by Utilizing the Peripheral Vision Method**

K.K. Khramov<sup>1</sup>, V.P. Makarov<sup>1</sup>, V.V. Kostrov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Murom Institute of the Vladimir State University

<sup>2</sup> JSC Research Institute "Submicron"

*A novel space-borne synthetic aperture radar (SAR) imaging method – the Peripheral Vision Mode (PVM) – is presented. The technique is based on utilizing range-ambiguous zones adjacent to the main swath. This enables swath width extension without a significant increase in downlink data volume. The imaging geometry and timing characteristics of the PVM are analyzed. A generalized architecture for the signal processing system in this mode is proposed.*

*Keywords: synthetic aperture radar, SAR, peripheral vision mode, range ambiguity, swath width, radar image, signal processing.*

### **Введение**

Космические радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) являются ключевым инструментом всепогодного дистанционного зондирования Земли [1, 2]. Их основное преимущество – оперативный мониторинг обширных территорий с высокой детализацией.

Развитие РСА ориентировано на два ключевых параметра: повышение пространственного разрешения и расширение полосы обзора. Однако увеличение разрешения приводит к росту объема передаваемых данных, что проблематично при ограниченной пропускной способности каналов передачи «космос-Земля». Классический маршрутный режим (StripMap) имеет фундаментальное ограничение по ширине полосы, определяемое антенной. Для его преодоления применяются

специализированные (ScanSAR [1] и TOPSAR [3]), а также гибридные (Sliding Spotlight и Staggered SAR [4]) режимы обзора.

Перспективной платформой являются малые космические аппараты (КА) [5], однако их возможности ограничены, в первую очередь – размерами и технологическими сложностями создания развертываемой антенны.

Таким образом, разработка эффективных РСА для малых КА требует комплексного решения задач по оптимизации режимов обзора, обработки данных и антенных систем.

### **Маршрутный режим обзора**

Маршрутный режим обзора (МРО) является базовым режимом работы космических РСА, обеспечивающим баланс между разрешением и полосой обзора [1, 2]. Требуемая ширина луча  $\theta_{y0}$  в угломестной плоскости должна удовлетворять условиям обеспечения полосы съемки и отстройки от сигналов неоднозначности по дальности [6]. В общем случае, чем уже диаграмма направленности (больше размер антенны), тем меньше уровень сигналов неоднозначности. Для малых космических аппаратов (КА) проектирование антенны РСА требует учета ограничений по массе, габаритам и энергопотреблению. Максимальный размер антенны ограничивается габаритами, энергопотреблением и тепловым режимом малых КА.

Космические РСА сталкиваются с существенными проблемами, связанными с помехами неоднозначности [1, 2]. В случае малых КА проблема усугубляется рядом физических ограничений, включая недостаточную мощность передатчиков, компактные размеры антенных систем и особенности низких орбит, на которых обычно работают такие аппараты. Исследования показывают, что в таких системах уровень помех неоднозначности может достигать значений  $-15...-20$  дБ относительно полезного сигнала [7], что требует разработки специальных методов их подавления.

Выделяют два основных типа помех неоднозначности: азимутальную и дальностную. Азимутальная неоднозначность обусловлена конечной частотой повторения импульсов  $PRF$ , которая должна как минимум вдвое превышать максимальную доплеровскую частоту  $F_{d\max}$  отраженного сигнала в пределах ширины диаграммы направленности (ДН) антенны. Неоднозначность по дальности определяется однозначно измеряемым интервалом по дальности  $R_n$ . Например, при  $PRF = 3$  кГц этот интервал составляет  $R_n = 50$  км, что может приводить к наложению сигналов от различных участков земной поверхности, особенно при работе в режимах с широкой полосой обзора.

Для борьбы с помехами неоднозначности в РСА применяются различные методы [8]. Одним из основных подходов является оптимизация параметров зондирования, включающая максимизацию  $PRF$  в пределах энергетического бюджета, и увеличение длины антенны в рамках габаритных ограничений платформы. Цифровые фазированные антенные решетки позволяют осуществлять электронное управление лучом, сужая диаграмму направленности по азимуту и формируя нули в направлениях прихода помех, что значительно улучшает пространственную селективность.

Значительный прогресс в подавлении помех неоднозначности достигнут благодаря развитию цифровых методов обработки сигналов. Адаптивная фильтрация в частотной области, основанная на выделении главного лепестка доплеровского спектра, позволяет улучшить соотношение сигнал-помеха на  $5...10$  дБ. Перспективным направлением является применение многочастотного зондирования с использованием нескольких поддиапазонов (например, комбинации  $X$  и  $Ku$  диапазонов), хотя это требует существенного усложнения аппаратуры и алгоритмов обработки. Также для этих целей применяются комбинации методов на основе разнесения формы сигнала и цифрового

формирования луча. Однако они увеличивают сложность РСА как в аппаратной, так и в программной частях.

### Режим обзора с периферическим зрением

Анализ параметров маршрутного режима съемки дает основание полагать, что участки из соседних зон неоднозначности по дальности также могут быть использованы для извлечения радиолокационной информации. Для этого диаграмма направленности антенны в вертикальной плоскости должна быть расширена так, чтобы кроме основной зоны она охватывала зоны неоднозначности с номерами  $n = \pm 1$ . Геометрия обзора в этом случае будет иметь вид, показанный на рис. 1. Условимся называть такой способ зондирования *режимом обзора с периферическим зрением (РПЗ)*.

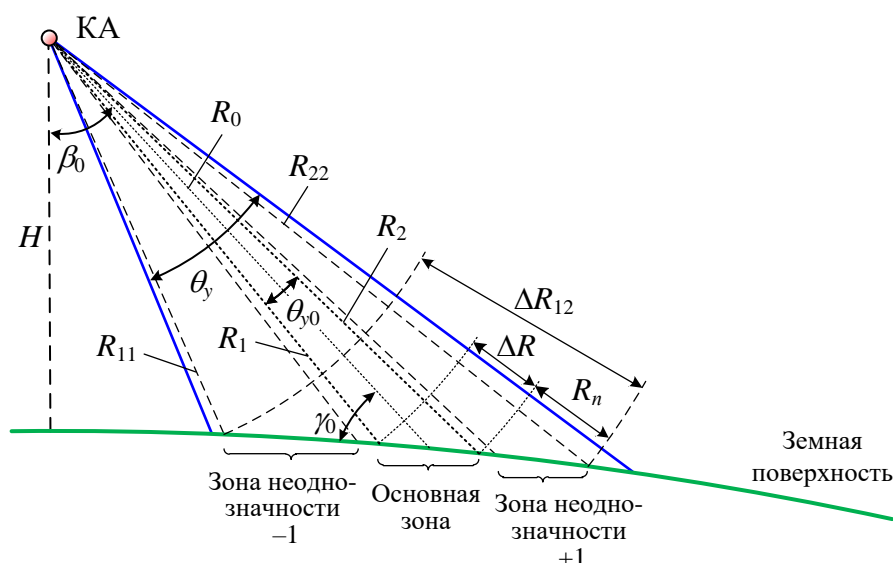


Рис. 1. Геометрия обзора в режиме с периферическим зрением поперек линии пути

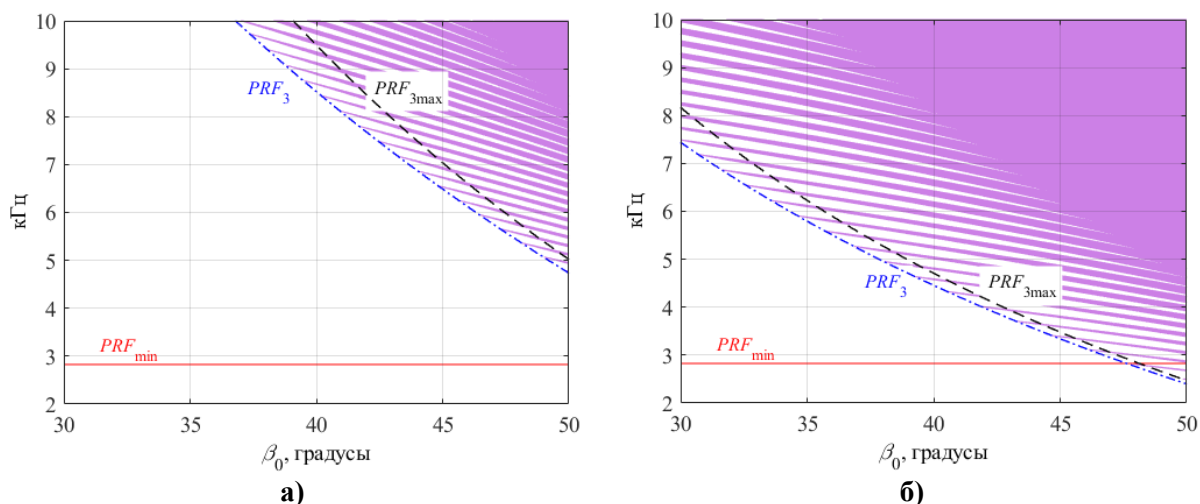
В этом режиме зондирование земной поверхности осуществляется с борта КА, движущегося по орбите высотой  $H$  под углом  $\beta_0$ . Ширина луча диаграммы направленности антенны РСА в угломерной плоскости составляет  $\theta_y$ . Ширина каждой из зон неоднозначности зависит от длительности строка приемника, а зазоры между ними – от длительности зондирующих импульсов и интервалов коммутации. Таким образом, положение зон неоднозначности относительно следа антенны на поверхности Земли определяется частотой повторения и скважностью зондирующих импульсов.

Выполним расчет допустимых значений частоты повторения импульсов (ЧПИ) для параметров РСА, приведенных в таблице 1.

На рис. 2 приведены диаграммы распределения допустимых значений ЧПИ в зависимости от угла визирования  $\beta_0$ , полученные для двух значений ширины  $\theta_y$  главного лепестка ДН антенны в угломерной плоскости. Ограничительные линии  $PRF_{\min}$ ,  $PRF_{3\max}$  и  $PRF_3$  соответствуют минимальной ЧПИ, максимальной ЧПИ и нижнему значению ЧПИ, которое при заданном  $\beta_0$  обеспечит прием траекторных сигналов трех смежных зон неоднозначности. Цветные области на диаграммах соответствуют допустимым значениям частоты повторения импульсов.

Таблица 1. Параметры РСА для моделирования

Параметр	$\lambda$ , м	$H$ , км	$\delta_y$ , м	$\beta_0$ , градусы	$\theta_y$ , градусы	$\tau$ , мкс	$\tau_1 = \tau_2$ , мкс
Значение	0,03	514	1,8	40	0,33	20	8



**Рис. 2. Диаграммы распределения допустимых значений ЧПИ в зависимости от угла визирования  $\beta_0$ : а) – при  $\theta_y = 4^\circ$ , б) – при  $\theta_y = 8^\circ$**

Анализ приведенных диаграмм позволяет заключить, что при увеличении угла визирования значения  $PRF_{3\max}$ ,  $PRF_3$  и диапазон  $\Delta PRF = PRF_{3\max} - PRF_3$  допустимых значений частоты повторения импульсов уменьшаются. Такая зависимость обусловлена увеличением ширины зон неоднозначности с ростом  $\beta_0$ . При этом величина  $PRF_{\min}$  практически не зависит от угла визирования в пределах снимаемой сцены. Расширение луча ДН антенны в вертикальной плоскости при фиксированном  $\beta_0$  дает возможность вести съемку в более широкой полосе обзора, но требует уменьшения значений  $PRF_{3\max}$ ,  $PRF_3$  и  $\Delta PRF$  (рис. 2,б). Это осложняет выбор ЧПИ, приводит к снижению отношения сигнал-шум на входе приемника и повышению уровня помех неоднозначности по азимуту.

Уменьшение длительности  $\tau$  зондирующих импульсов и интервалов  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  приводит к увеличению значений функции  $PRF_3(\beta_0)$  и пропорциональному сужению диапазона допустимых значений ЧПИ.

### **Сравнительный анализ РПЗ и маршрутного режима**

Введем в рассмотрение безразмерный параметр  $k_{\min}$ , равный отношению разностей максимальной и минимальной наклонных дальностей до полосы съемки в режиме обзора с периферическим зрением  $\Delta R_{12}$  и в маршрутном режиме  $\Delta R$ :

$$k_{\min} = \Delta R_{12} / \Delta R = T_{12} / T_{np},$$

где  $T_{12} = 2\Delta R_{12} / c$  – время зондирования полосы съемки в РПЗ;

$T_{np}$  – длительность строка приемника.

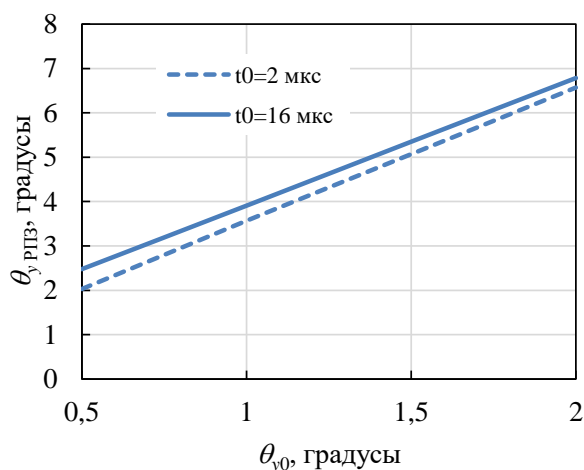
Этот параметр можно использовать для оценки минимального коэффициента расширения ДН антенны РСА в угломестной плоскости, который требуется реализовать при переходе от маршрутного режима с шириной ДН антенны  $\theta_{y0}$  к режиму обзора с периферическим зрением, при условии  $PRF_3 = PRF_{0\max}$ . Здесь  $PRF_{0\max} = 0,5c\Delta R^{-1}$  – максимально возможная частота повторения импульсов маршрутного режима. С учетом построений рис. 1 можно записать:

$$k_{\min} = 3 + 2 \frac{\tau_0}{T_{np}} = 3 + \frac{c\tau_0}{\Delta R}, \quad (1)$$

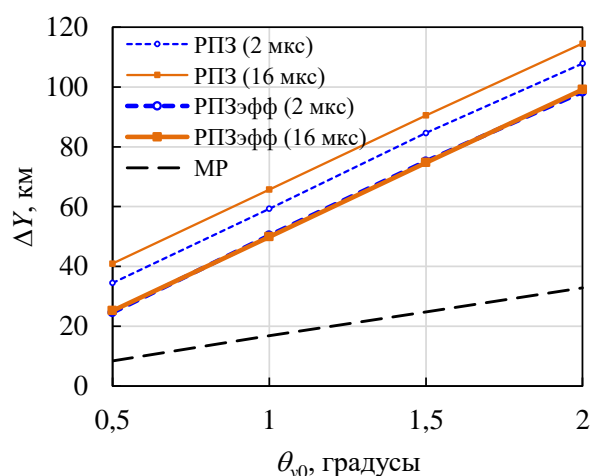
где  $\tau_0 = \tau + \tau_1 + \tau_2$ .

Из последнего уравнения следует, что при уменьшении  $\tau_0$  (уменьшении длительности зондирующих импульсов и интервалов коммутации) значения  $k_{\min}$  будут уменьшаться. При возрастании угла визирования требуется меньшее относительное расширение ДН в вертикальной плоскости. На основе равенства (1) можно заключить, что в режиме обзора с периферическим зрением ДН антенны в угломестном сечении будет как минимум в 3 раза шире, чем в маршрутном режиме.

Рассмотрим, как изменяются основные параметры режима обзора с периферическим зрением (РПЗ) при фиксированном угле визирования и изменении угла  $\theta_{y0}$ . Анализ проведем для различных значений длительности интервалов коммутации  $t_0 = \tau_1 + \tau_2$ . На рис. 3 приведены зависимости ширины диаграммы направленности (ДН) антенны  $\theta_{y, \text{РПЗ}}$  в угломестном сечении в РПЗ от угла  $\theta_{y0}$ , построенные при  $\beta_0 = 40^\circ$  для  $t_0 = 2$  мкс и  $t_0 = 16$  мкс. При малых значениях  $\theta_{y0}$  эти зависимости можно считать линейными. Очевидно, что при уменьшении времени коммутации значения  $\theta_{y, \text{РПЗ}}$  также уменьшаются (пунктирная линия на рис. 3), что требует соответствующего увеличения вертикального размера антенны, а, следовательно, и ее площади. С ростом  $\theta_{y0}$  требуемая площадь антенны уменьшается, а влияние на нее длительности интервалов коммутации  $t_0$  снижается.



**Рис. 3.** Зависимости ширины ДН антенны в угломестном сечении в РПЗ от  $\theta_{y0}$  для различных значений  $t_0$



**Рис. 4.** Ширина полосы обзора в МРО и РПЗ при изменении  $\theta_{y0}$  для различных значений  $t_0$

На рис. 4 приведены графики изменения ширины полосы обзора в маршрутном и периферическом режимах в зависимости от  $\theta_{y0}$  для различных значений длительности интервалов коммутации. Все приведенные зависимости имеют линейный характер в рассматриваемом диапазоне углов  $\theta_{y0}$ . Жирными линиями на рисунке показаны значения эффективной ширины полосы съемки в РПЗ, которые не учитывают «слепые» зоны, соответствующие режимам зондирования и коммутации, и, как следствие, не зависят от  $\tau_0$ . Эффективная площадь кадра (без учета «слепых» зон) в РПЗ в три раза превышает площадь кадра в маршрутном режиме.

На основании полученных результатов можно заключить, что наряду с преимуществами маршрутного режима режим обзора с периферическим зрением позволяет расширить полосу съемки без значительного увеличения объема передаваемой информации. Кроме того, положительным эффектом является

возможность уменьшения вертикального размера антенны. Вместе с тем при реализации рассматриваемого режима обзора основной проблемой станет необходимость разделения траекторных сигналов, поступающих на вход приемника одновременно от трех зон неоднозначности. Основным подходом к подавлению сигналов соседних зон неоднозначности является использование сложных модулированных сигналов с уникальными корреляционными свойствами [9].

### Синтез РЛИ в режиме обзора с периферическим зрением

Рассмотрим вопрос синтеза радиолокационного изображения в режиме обзора с периферическим зрением. Очевидно, что использование траекторных сигналов из трех зон неоднозначности требует специализированных режимов работы и значительно усложняет систему. Угол места для сигналов зон неоднозначности с номерами  $n = \pm 1$  отличается на  $2...5$  градусов, что требует коррекции алгоритмов синтеза апертуры.

Можно предложить следующий вариант обобщенной структуры декодирования и обработки сигналов в РПЗ (рис. 5). Схема содержит приемник, который принимает, переносит на промежуточную частоту и оцифровывает траекторный сигнал трех зон неоднозначности, три блока синтеза РЛИ, согласованного с сигналом одной из зон, и блок объединения парциальных РЛИ.

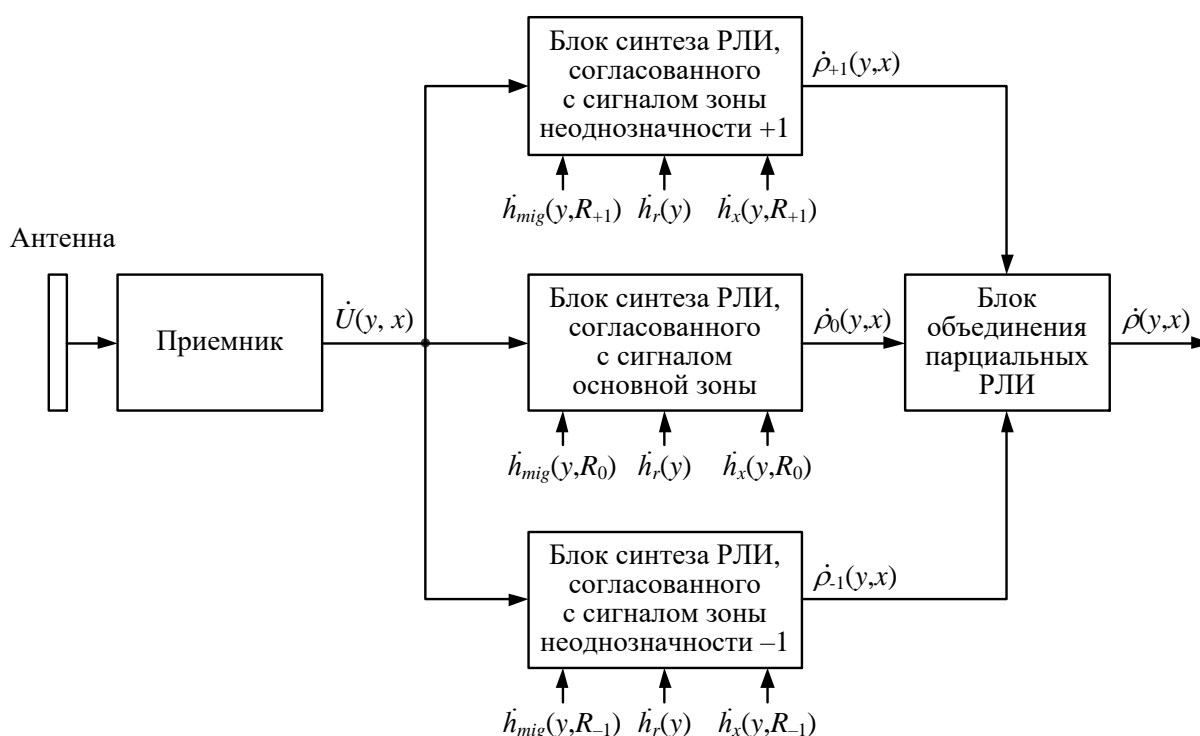


Рис. 5. Обобщенная структура декодирования и обработки сигналов в РПЗ

На рис. 5 введены следующие обозначения:  $y, x$  – номера отсчетов по дальности и азимуту;  $\dot{U}(y, x)$  – комплексные отсчеты входного сигнала (радиоголограмма), поступающие на входы блоков синтеза РЛИ. На другие их входы подаются функции, которые зависят от наклонных дальностей  $R_{-1}$ ,  $R_0$ ,  $R_{+1}$  и зондирующих сигналов смежных зон неоднозначности:  $\dot{h}_{mig}$  – функции, используемые для устранения миграции сигнала по каналам дальности,  $\dot{h}_r$  – опорные функции сжатия сигнала по дальности,  $\dot{h}_x$  – опорные функции сжатия сигнала по азимуту. Парциальные

комплексные РЛИ  $\dot{\rho}_{-1}(y, x)$ ,  $\dot{\rho}_0(y, x)$ ,  $\dot{\rho}_{+1}(y, x)$  смежных зон неоднозначности объединяются и образуют выходное комплексное РЛИ  $\dot{\rho}(y, x)$  полосы съемки.

Добавим, что в основе работы блоков синтеза лежат известные алгоритмы фокусировки радиолокационных изображений. В простейшем случае их можно реализовать в виде последовательности одномерных сверток, вычисляемых по алгоритмам быстрой свертки [2]. При синтезе высокодетальных РЛИ могут быть использованы различные методы компенсации миграции сигналов по каналам дальности [1, 2], например, алгоритм «Дальность-Доплер», в котором осуществляется выпрямление путевых спектров.

### Заключение

В работе выполнен анализ маршрутного режима обзора, на основании которого предложен новый способ зондирования для РСА космического зондирования – режим обзора с периферическим зрением. В этом режиме для извлечения радиолокационной информации используются зоны неоднозначности по дальности, примыкающие к основной зоне. Наряду с преимуществами маршрутного режима такой подход позволяет расширить полосу съемки без значительного увеличения объема передаваемой информации, а также уменьшить вертикальный размер антенны. Серьезной проблемой при реализации рассматриваемого режима обзора является необходимость разделения траекторных сигналов, поступающих на вход приемника одновременно от трех зон неоднозначности.

Рассмотрена геометрия обзора в РПЗ. Проведенные расчеты показали, что увеличение угла визирования и уменьшение длительности зондирующих импульсов и интервалов коммутации приводит к сужению диапазона допустимых значений ЧПИ. Получено, что в режиме обзора с периферическим зрением требуется диаграмма направленности антенны в угломестном сечении как минимум в три раза шире, чем в маршрутном режиме. При этом эффективная площадь кадра (без учета «слепых» зон) в РПЗ в три раза превышает площадь кадра в маршрутном режиме.

Предложена структура декодирования и обработки сигналов в РПЗ, включающая в себя три блока синтеза парциальных РЛИ.

### Литература

1. Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013). "A tutorial on synthetic aperture radar". *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(1), 6-43. DOI: 10.1109/MGRS.2013.2248301.
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. F. De Zan and A. Monti Guarnieri, "TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 9, pp. 2352-2360, Sept. 2006, doi: 10.1109/TGRS.2006.873853.
4. M. Villano, G. Krieger and A. Moreira, "Staggered SAR: High-Resolution Wide-Swath Imaging by Continuous PRI Variation," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 7, pp. 4462-4479, 1 July 2014, doi: 10.1109/TGRS.2013.2282192.
5. E. Makas and A. R. Aslan, "Trends in SAR Satellite Design: From Tons of Mass to Hundreds of Kilograms in Designing SAR Satellite," 2023 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST), Istanbul, Turkiye, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/RAST57548.2023.10197877.

6. Храмов К.К., Костров В.В., Макаров В.П. Помехи неоднозначности сигналов космических РСА при использовании круглой зеркальной антенны. // Журнал радиоэлектроники. 2024. №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.28>.
7. Петров А.С., Прилуцкий А.А., Волченков А.С. Угломестная и азимутальная неоднозначности сигнала, принимаемого аппаратурой космического радиолокатора с синтезированной апертурой // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2019. №1. С. 39–47.
8. Храмов К.К., Макаров В.П., Костров В.В. Методы и алгоритмы снижения помех неоднозначности в космических РСА // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2025: Сборник трудов VIII Международного научно-технического форума. В 10-ти томах, Рязань, 04–06 марта 2025 года. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, 2025. С. 59-64.
9. Jeon S-Y., Glatz F., Villano M.A. “Waveform-Encoded SAR Implementation Using a Limited Number of Cyclically Shifted Chirps,” Remote Sensing. 2021. Vol. 13(15). No. 3038. DOI: 10.3390/rs13153038.