

## **Оценка эффективности подавления сигнала неоднозначности по дальности в космических РСА при использовании адаптивного порога в методе двойной фокусировки**

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  
E-mail: kostrov.46@mail.ru

*В работе рассматривается проблема возникновения помех неоднозначности по дальности в радиолокаторах с синтезированием апертуры космического базирования. Выполняется анализ и моделирование алгоритма снижения уровня таких помех, реализующего метод двойной фокусировки. Представлены результаты оценки уровня подавления помех неоднозначности по дальности при использовании адаптивного порога обработки. Получены зависимости коэффициента подавления сигнала неоднозначности и коэффициента ослабления отклика цели в зоне обзора от вероятности ложной тревоги для различных отношений сигнал-шум. Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры, РСА, помехи неоднозначности по дальности, метод двойной фокусировки, радиолокационное изображение, РЛИ, пороговая обработка, адаптация.*

## **Estimation of the efficiency of range ambiguity suppression in space SAR using an adaptive threshold in the double focusing 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"

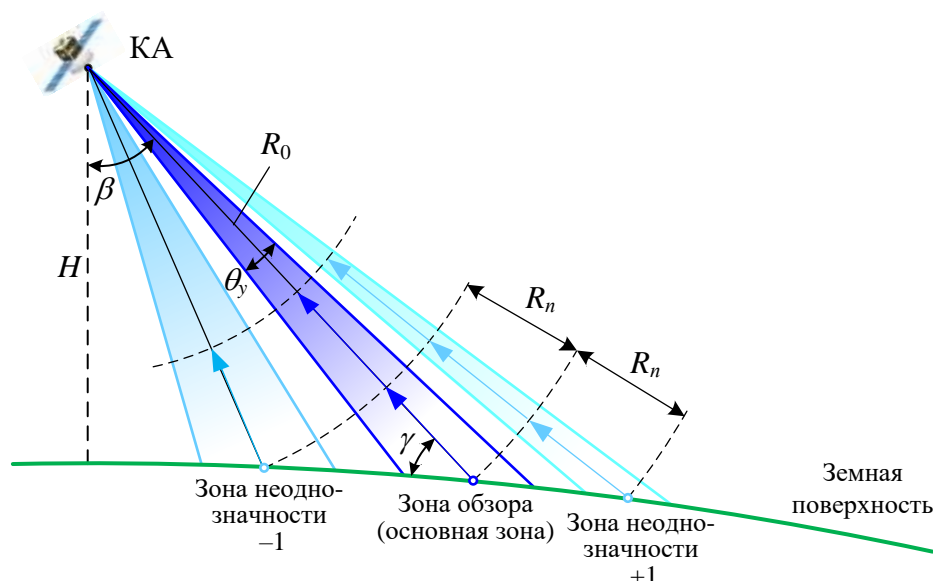
*The paper considers the problem of range ambiguity in space-based synthetic aperture radars. Analysis and modeling of the algorithm for reducing the level of range ambiguity, implementing the double focusing method are performed. The results of estimation of range ambiguity suppression using an adaptive processing threshold are presented. The graphs of the ambiguity signal suppression coefficient and the target response attenuation coefficient vs. the probability of a false alarm for various signal-to-noise ratios are obtained.*

*Key words: synthetic aperture radar, SAR, range ambiguity, double focusing method, radar image, threshold processing, adaptation.*

### **Введение**

Проблема неоднозначностей в радиолокационных системах с синтезированной апертурой (РСА) космического базирования остаётся актуальной, особенно для систем высокого разрешения [1, 2]. Неоднозначность по дальности вызвана тем, что сигналы, отраженные от целей, находящихся за пределами основной полосы обзора, могут попадать в строб приёмника из-за задержек, кратных периоду повторения  $T_n$  зондирующих импульсов [1, 3]. При этом интервал неоднозначности по времени составляет половину расстояния распространения радиоволн за интервал  $T_n$ :  $R_n = cT_n/2$

, где  $c$  – скорость света (рис. 1). Это означает, что уменьшить уровень сигналов неоднозначности можно, ограничивая выбор частоты повторения импульсов при проектировании РСА.



**Рис. 1. Геометрия обзора поперек линии пути КА, иллюстрирующая появление помех неоднозначности по дальности**

Снижение уровня эхо-сигналов из зон неоднозначности по дальности также может быть достигнуто за счёт пространственной селекции, реализуемой путём формирования узкой диаграммы направленности антенны в угломестной плоскости. Однако, несмотря на тщательное проектирование антенной системы, уровень мешающих отражений может оставаться значительным, что приводит к снижению качества радиолокационного изображения (РЛИ). Наибольший вклад в помеховый фон вносят первые зоны неоднозначности (ближайшие к основной полосе обзора) и надирные отражения, которые создают в РСА мощный сигнал.

Для обеспечения соответствия требованиям по уровню помех неоднозначности по дальности был разработан ряд методов их подавления [2-7]. Среди них можно выделить метод двойной фокусировки [8], применяемый на этапе постобработки РЛИ.

### **Метод двойной фокусировки**

Обобщенная схема системы обработки данных при использовании метода двойной фокусировки приведена на рис. 2 [8]. На рисунке обозначены:  $y, x$  – номера отсчетов по дальности и азимуту;  $\dot{U}(y, x)$  – отсчеты входного комплексного сигнала;  $|\dot{\rho}(y, x)|$  – выходное амплитудное РЛИ.

На первом этапе входной необработанный сигнал  $\dot{U}(y, x)$  фокусируется с помощью пространственного фильтра, согласованного с траекторным сигналом, принимаемым из зоны неоднозначности. На следующем этапе осуществляется уменьшение сигнала неоднозначности путем подавления откликов, превысивших некий порог  $th$ . Затем осуществляется обратная фокусировка (расфокусировка) радиолокационного изображения и повторная обработка, согласованная с эхо-сигналом зоны обзора. В итоге на выходе такой системы обработки остаточный сигнал неоднозначности по дальности размывается, интенсивность помех неоднозначности на изображении снижается, четкость и контрастность итогового яркостного РЛИ  $|\dot{\rho}(y, x)|$  повышаются.

Выбор способа формирования порога  $th$  и его значение будет определять уровень подавления помех неоднозначности по дальности и, в конечном счете, предельные возможности алгоритма.

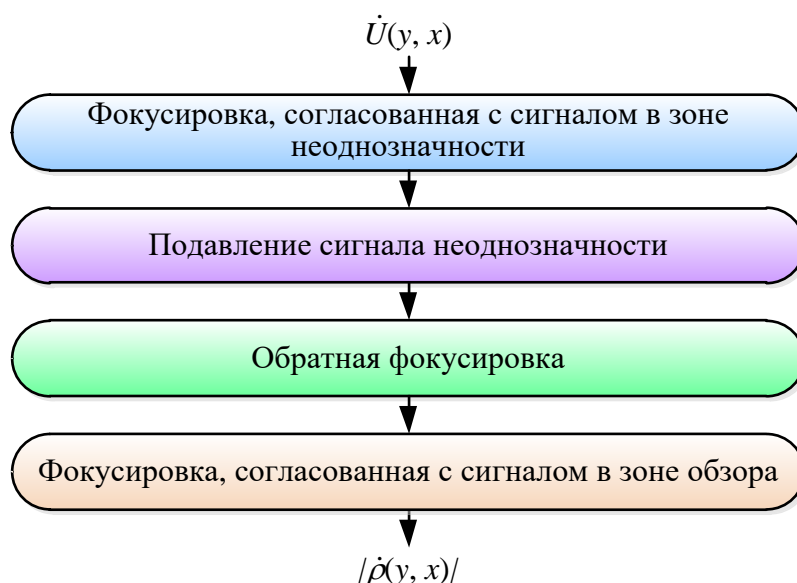


Рис. 2. Блок-схема системы обработки данных с использованием двойной фокусировки

### Подавление сигнала неоднозначности при использовании адаптивного порога

При цифровой обработке радиолокационной информации большое распространение получили алгоритмы обнаружения, обеспечивающие постоянный уровень ложных тревог. Стабилизация вероятности ложной тревоги (ВЛТ)  $P_f$  реализуется через адаптивную пороговую обработку [3, 9]. Традиционная реализация подобных алгоритмов предполагает использование окон анализа, включающих зону анализа фона и шума, зону анализа объекта и защитную зону (рис. 3).

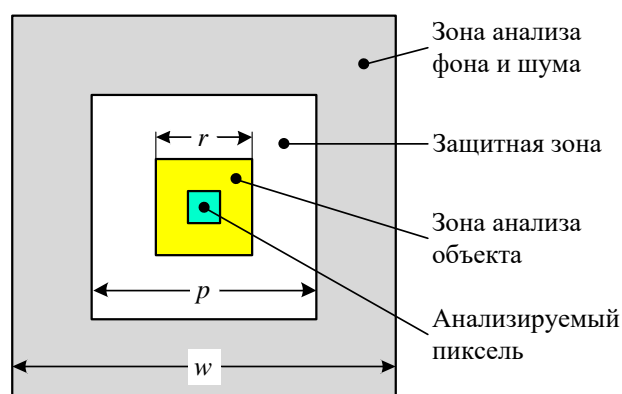


Рис. 3. Области объекта и фона для вычисления статистик

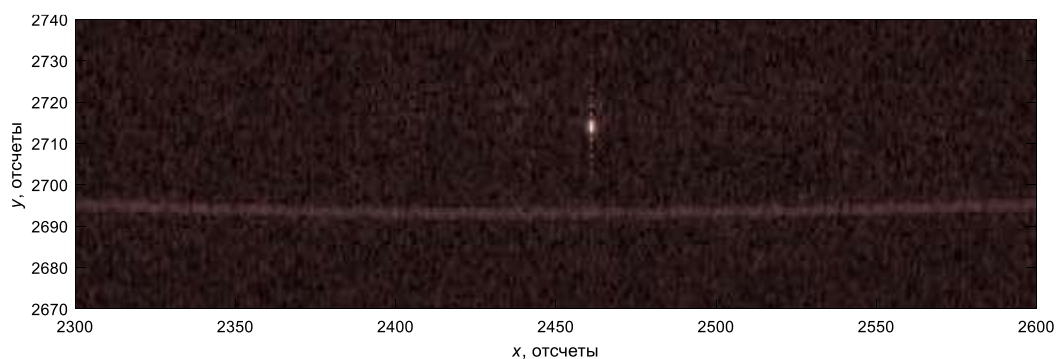
Выполним моделирование сцены, приведенной на рис. 1, при использовании адаптивного формирования порога обработки для следующих параметров окна обработки [9]:  $\{r, p, w\} = \{5, 11, 21\}$ . Зададимся значением вероятности ложной тревоги  $P_f = 10^{-6}$  и выполним анализ работы алгоритма двойной фокусировки при наличии шума и значении отношения сигнал-шум на входе системы обработки  $SNR = 40$  дБ. Определим следующие параметры моделирования: режим съемки – нормальный боковой обзор ( $\theta_n = 90^\circ$ ); обе цели находятся в траверсной плоскости; параметры съемки соответствуют

данным таблицы 1; интенсивности отраженных сигналов от обеих целей приняты одинаковыми (исключено влияние ослабления сигналов зон неоднозначности, обусловленного угломестной диаграммой направленности антенны).

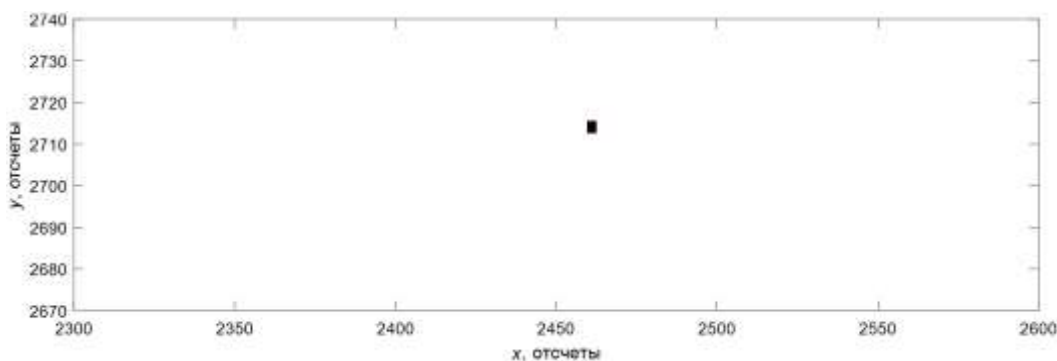
**Таблица 1. Параметры РСА при моделировании**

Параметр	Значение
Высота орбиты космического аппарата, $H$ , км	510
Угол падения электромагнитной волны на объект съемки, $\gamma$ , градусы	40
Ширина луча ДН антенны, $\theta_x = \theta_y$ , градусы	1
Зондирующий сигнал	ЛЧМ
Длина волны зондирующего сигнала, $\lambda$ , см	9,4
Длительность зондирующих импульсов, $\tau$ , мкс	20

Результаты обработки голограммы с фокусом в зоне неоднозначности показаны на рис. 4. Карта обнаружений для приведенного РЛИ изображена на рис. 5, откуда видно, что алгоритм обработки выделил 9 пикселей, соответствующих сигналу неоднозначности.



**Рис. 4. РЛИ после фокусировки, согласованной с сигналом в зоне неоднозначности, при  $SNR=40$  дБ**

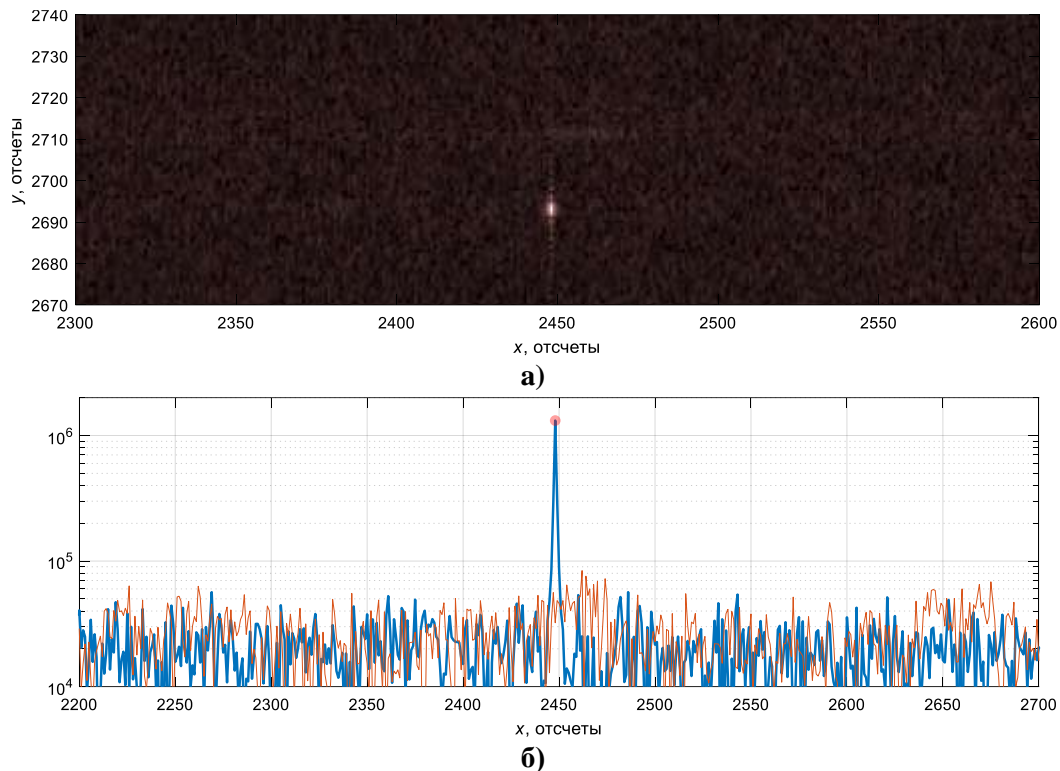


**Рис. 5. Карта обнаружений при  $P_f=10^{-6}$**

На рис. 6 приведено РЛИ после фокусировки, согласованной с сигналом в зоне обзора, и азимутальные сечения этого РЛИ. Коэффициент подавления отклика неоднозначной цели, определяемый отношением максимального значения  $A_{n \max}$  отклика сигнала неоднозначности до подавления к его остаточному уровню  $A_n$  на РЛИ после подавления

$$K_n = 20 \cdot \lg(A_{n \max} / A_n),$$

составляет около  $K_n = 23$  дБ.



**Рис. 6. Результаты фокусировки, согласованной с сигналом в зоне обзора, при  $SNR=40$  дБ:**  
**а) – РЛИ с подавленным сигналом неоднозначности, б) – сечения РЛИ по азимуту**

### Результаты моделирования

С учетом сказанного выше выполним качественный и количественный анализ алгоритма подавления сигнала неоднозначности при использовании адаптивного порога обнаружения.

На рис. 7 приведены зависимости коэффициента подавления сигнала неоднозначности  $K_n$ , полученные при использовании адаптивного порога и окна анализа с параметрами  $\{r, p, w\} = \{5, 11, 21\}$ , от логарифма вероятности ложной тревоги (ВЛТ). Из приведенных графиков следует, что при  $SNR = \text{const}$  коэффициент подавления сигнала неоднозначности практически не меняется при изменении порога, который зависит только от  $P_f$ . При этом уменьшение уровня шума способствует более высокому подавлению сигнала неоднозначности.

Когда порог обработки становится ниже уровня расфокусированного отклика цели основной зоны, обнулению подвергаются отсчеты полезного сигнала. Это приводит к уменьшению энергии и частичному подавлению последнего. Так, небольшое увеличение  $K_n$  при  $P_f > 10^{-4}$ , наблюдаемое на рис. 7, сопровождается ослаблением отклика цели в зоне обзора. Оценить степень нежелательного подавления отклика полезного сигнала можно с помощью коэффициента ослабления, равного отношению амплитудного значения  $A_0$  отклика на РЛИ к его максимально возможному значению  $A_{0\max}$ , которое имеет место при отсутствии подавления:

$$K_0 = 20 \cdot \lg(A_0 / A_{0\max}).$$

На рис. 8 приведены зависимости коэффициента ослабления отклика цели в зоне обзора от ВЛТ для различных  $SNR$ . Из графиков следует, что при уменьшении отношения сигнал-шум наблюдается снижение коэффициента ослабления отклика цели в зоне обзора.

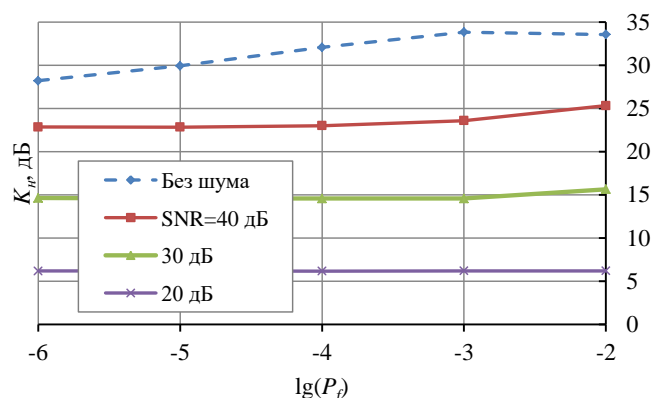


Рис. 7. Зависимости коэффициента подавления сигнала неоднозначности от ВЛТ для различных SNR

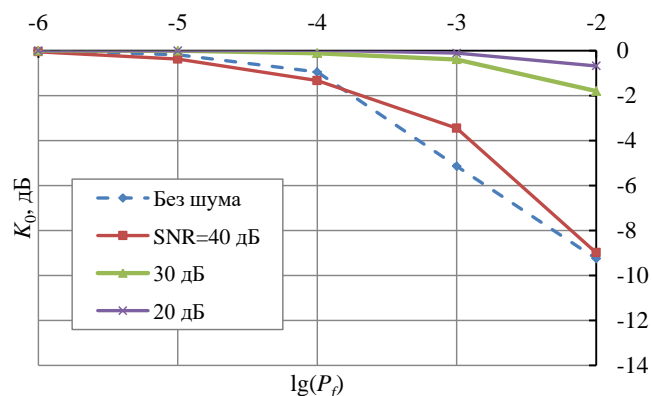


Рис. 8. Зависимости коэффициента ослабления отклика цели в зоне обзора от ВЛТ для различных SNR

### Заключение

В работе рассмотрен алгоритм обработки радиолокационных изображений, реализующий метод двойной фокусировки. Выполнена оценка уровня подавления помех неоднозначности по дальности при использовании адаптивного порога обработки. Получены зависимости коэффициента подавления сигнала неоднозначности  $K_n$  и коэффициента ослабления отклика цели в зоне обзора  $K_0$  от вероятности ложной тревоги для различных отношений сигнал-шум SNR на входе системы обработки. Показано, что наличие шума снижает эффективность алгоритма. Например, при  $SNR = 30$  дБ получено значение  $K_n = 16$  дБ. Другой особенностью применения адаптивного порога является снижение коэффициента  $K_0$  при уменьшении SNR.

При использовании адаптивного порога с постоянным значением отношения сигнал-шум коэффициент  $K_n$  практически не меняется при изменении порога, который зависит только от ВЛТ.

Кроме этого в докладе:

- рассматривается обобщенный количественный показатель – относительный коэффициент подавления сигнала неоднозначности  $K$ , позволяющий оценить эффективность алгоритма с учетом ослабления отклика цели в зоне обзора;
- приводятся значения коэффициентов  $K_n$ ,  $K_0$  и  $K$ , полученных при использовании окон анализа с другими параметрами;

- сравниваются уровни подавления помех неоднозначности по дальности, полученные при использовании адаптивного и фиксированного (общего для всего РЛИ) порога обработки;
- проводится сравнительный анализ полученных значений подавления сигналов неоднозначности по дальности с результатами, полученными для других методов;
- показаны пути повышения эффективности рассматриваемого алгоритма за счет использования поимпульсного кодирования зондирующих сигналов.

### **Литература**

1. 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.
2. Wang H., Zhang Y., Xu J., Liao G., Zeng C. "A novel range ambiguity resolving approach for high-resolution and wide-swath SAR imaging utilizing space-pulse phase coding," *Signal Processing*. 2020. Vol. 168. No. 107323. DOI: 10.1016/j.sigpro.2019.107323.
3. Wen X., Qiu X., Han B., Ding C., Lei B., Chen Q. "A Range Ambiguity Suppression Processing Method for Spaceborne SAR with Up and Down Chirp Modulation," *Sensors* 2018, 18, 1454; Pp.1-15. DOI: 10.3390/s18051454.
4. Карпов О.А., Рабочий А.Н., Толстов Е.Ф., Фёдоров В.С., Костров В.В. Проблемы неоднозначности в космических РСА и коды Голда // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: Всероссийские открытые Армандовские чтения. Материалы Всероссийской открытой научной конференции, Муром, 27-29 июня 2023 года. Муром: МИ ВлГУ. 2023. С. 375-384. <https://doi.org/10.24412/2304-0297-2023-1-375-384>.
5. Савостьянов В.Ю. Применение ортогональных ФКМ сигналов для устранения в РСА неоднозначности по дальности // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2024, №1. С.13-18. DOI 10.24412/2221-2574-2024-1-13-18.
6. 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
7. Guo, Y., Wang, Y., Liao, G., and Li, J. "Mitigating Range Ambiguity Method Based on DDMA for SAR Systems," *Remote Sensing*. 2022, 14(21):5485, <https://doi.org/10.3390/rs14215485>.
8. M. Villano, G. Krieger and A. Moreira, "Waveform-Encoded SAR: A Novel Concept for Nadir Echo and Range Ambiguity Suppression," *EUSAR 2018; 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Aachen, Germany, 2018, pp. 1-6.
9. V. Kostrov, E. Tolstov and K. Khramov, "Automatic Detection of Thread-like Objects in SAR Using a Modified Radon Transform," 2024 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/DSPA60853.2024.10510127.