

УДК 621.396.96:629.054

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-1-76-82

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОДАВЛЕНИЯ СПЕКЛА В РАДИОЛОКАТОРЕ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ

Р.Н. АКИНШИН<sup>1</sup>, В.Л. РУМЯНЦЕВ<sup>2</sup>, А.В. ПЕТЕШОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Секция прикладных проблем при Президиуме Российской академии наук, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> АО «Центральное конструкторское бюро аппаратостроения», г. Тула, Россия

<sup>3</sup> Череповецкое высшее военное инженерное училище радиоэлектроники, г. Череповец, Россия

Недостатком получаемых одноканальной радиоэлектронной станцией (РЭС) радиолокационных изображений является наличие спекла, который приводит к вспышкам интенсивности, увеличивающим число ложных тревог при обнаружении точечных целей. Поэтому обнаружение и различение целей по их отражательной способности (с использованием энергетических характеристик сигнала) является недостаточно эффективным. В поляриметрических РЭС формирование каждого элемента изображения осуществляется по выходным сигналам четырех приемных каналов. Совместная обработка этих сигналов позволяет минимизировать спекл без снижения разрешающей способности. В работе приведены результаты компьютерного моделирования методов подавления спекла изображений, получаемых в поляризационной РЭС с синтезированной апертурой антенны. Первый использует в качестве параметра интенсивности отраженного от  $i$ -го элемента разрешения сигнала норму его матрицы обратного рассеяния. Во втором производится некогерентное сложение интенсивностей, полученных при последовательном обзоре пространства несколькими лучами. Оба этих метода могут быть применены совместно. Приведена блок-схема такой обработки для одной полосы дальности. Проведено компьютерное моделирование «трехлучевого» метода подавления спекла изображений, получаемых в РЭС с синтезированной апертурой антенны. В качестве модели отражающей поверхности выбрана случайная дифракционная решетка, образованная совокупностью независимых отражателей, расположенных в узлах регулярной прямоугольной сетки с шагом 1 м. При этом изображение решетки сформировано как некогерентная сумма трех изображений, полученных под разными углами. Результаты показывают, что спекл-эффект уменьшается уже при угловых отворотах порядка единиц градусов.

**Ключевые слова:** эффективная поверхность рассеяния, изображение объекта, алгоритм, синтезированная апертура.

### ВВЕДЕНИЕ

Обработка данных радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) позволяет получать изображения с высоким разрешением, но качество изображений в значительной степени зависит от так называемого спекла, обусловленного когерентным сложением сигналов от небольшого числа отдельных рассеивателей, находящихся в элементе разрешения. Спекл приводит к периодической пространственно-временной нестационарности сигнала и, как результат, – к пятнистой структуре изображения с яркими вспышками интенсивности, которые могут быть приняты за отражения от целей.

В обзорах адаптивных фильтров снижения спекла<sup>1</sup> [1, 2, 3] показано, что лучший из них фильтр Ли сохраняет среднее значение однородной области в рамках  $\sim 0,1$  дБ, однако не способен хорошо адаптироваться к наличию точечной цели. Эти фильтры работают, рассчитывая локальную статистику маленьких участков радиолокационных изображений (РЛИ), и заменяя их некоторым новым значением, выбранным в соответствии со своим алгоритмом.

Представляет интерес использование в усреднении полных по разрешению РЛИ, полученных поляризационной радиоэлектронной станцией (РЭС). Значительным преимуществом подхода

<sup>1</sup> Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник / под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Маквис, 1998. 828 с.

является то, что при этом уменьшение пространственного разрешения не происходит. Поэтому в работе приведены результаты компьютерного моделирования метода подавления спекла изображений, получаемых в поляризационной РЛС с синтезированной апертурой антенны.

### МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ СПЕКЛА В РЛИ

Для фиксированной длины зондирующей волны и интервала синтезирования апертуры РСА существует два физических аспекта, определяющих два основных метода снижения спекл-эффекта без практически значимых потерь в пространственном разрешении [4–6].

Метод 1. Использование в качестве параметра интенсивности  $J_i$  отраженного от  $i$ -го элемента разрешения сигнала норму его матрицы обратного рассеяния.  $J \sim k \|S_i\| = (\sum |S_{ij}|^2)^{1/2}$  ( $k$  – коэффициент пропорциональности). В силу того, что спекл-картины изображений РЛИ<sub>ij</sub>, полученных в четырех каналах согласованного фильтра, в общем случае частично-коррелированы, суммирование интенсивностей этих изображений РЛИ<sub>ij</sub> приводит к уменьшению контраста спекл-картины в суммарном изображении РЛИ<sub>Σ</sub> =  $(\sum |РЛИ_{ij}|^2)^{1/2}$ .

Метод 2. Некогерентное сложение изображений (суммирование интенсивностей), полученных с разных ракурсов наблюдения. Для этого метода производится последовательный обзор пространства несколькими лучами, угловое разнесение которых превышает интервал угловой (ракурсной) корреляции диаграммы обратного рассеяния элемента разрешения РСА, образованного большим количеством элементарных, «неразрешаемых» отражателей со случайным коэффициентом отражения, распределенных по площади (объему) элемента разрешения.

При выполнении этих условий в канале каждого из лучей формируются изображения одной и той же зоны пространства с частично-коррелированными спекл-картинами. Некогерентное суммирование этих изображений (при совмещении, учитывающем геометрические поправки, связанные с разным ракурсом наблюдения) приводит к снижению эффекта «зернистости» суммарного изображения.

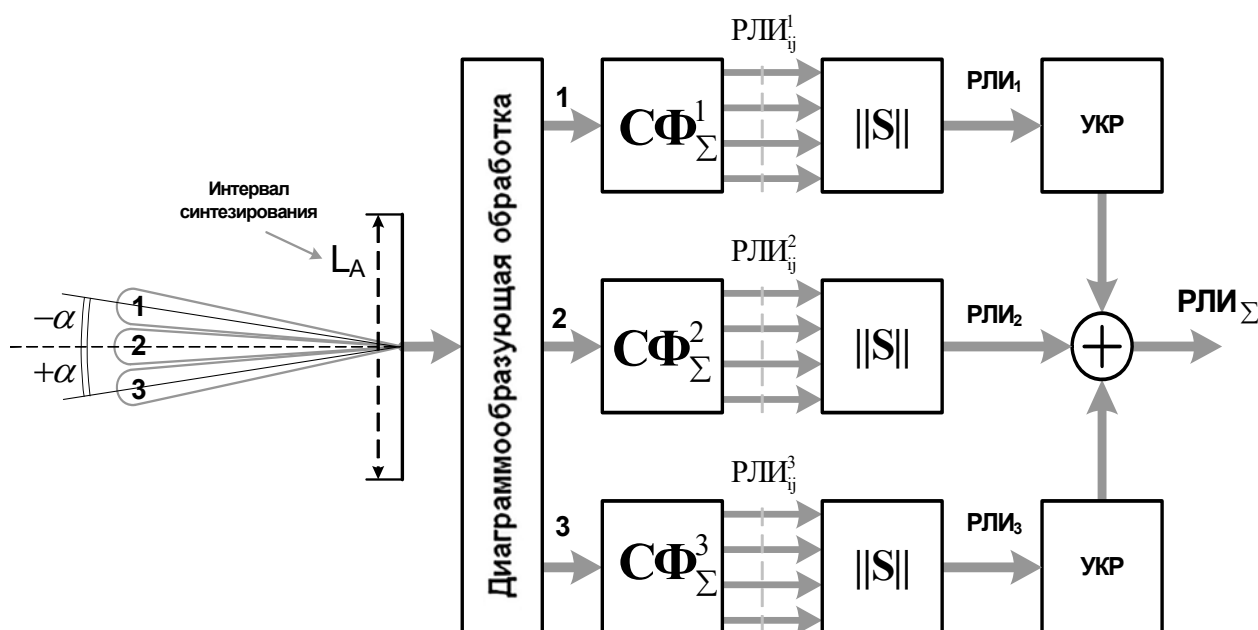


Рис. 1. Иллюстрация принципа формирования РЛИ РСА со сниженным контрастом спекл-картины  
Fig. 1. Illustration of the principle of formation of radar image of the RSA with reduced contrast of the speckle pattern

Очевидно, что оба метода могут быть применены совместно. При этом общая блок-схема такой обработки для одной полосы дальности соответствует рис. 1. Входные данные с выхода приемника в аналоговой либо в цифровой форме поступают на блок диаграммообразующей обработки (ДОО), выполняющей функции подготовки данных для многолучевого (в данном случае 3-лучевого) режима работы РСА. В блоке ДОО, функциональная схема которого приведена на рис. 2, производится сдвиг частоты принимаемого комплексного сигнала на некоторую величину  $\Delta f_i$ , связанную с углом отклонения  $\alpha$  синтезируемого луча соотношением

$$\Delta f_i = \frac{2V_n}{\lambda_0} \cdot \sin \alpha,$$

где величина  $V_n$  – абсолютная скорость носителя,  $\alpha$  – угол отклонения от нормали к вектору абсолютной скорости. Под абсолютной скоростью  $V_n$  понимается скорость относительно Земли при движении носителя параллельно ее поверхности.

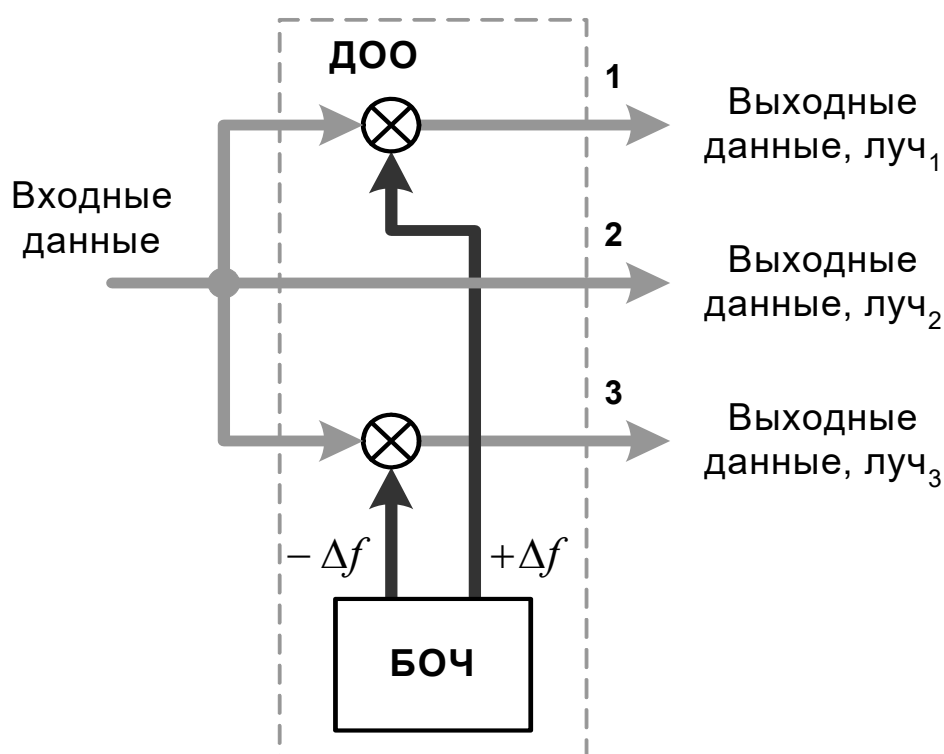


Рис. 2. Функциональная схема устройства диаграммообразующей обработки  
Fig. 2. Functional diagram of the diagram-forming processing device

На рис. 2 показан вариант цифровой реализации ДОО, когда входные данные представлены в виде квадратурных компонент отраженного сигнала, а опорные частоты сдвига могут быть как отрицательными ( $-\Delta f_i$ ), так и положительными ( $+\Delta f_i$ ).

Таким образом, изменяя абсолютную величину сдвига частоты входного комплексного сигнала, можно управлять углом отклонения луча диаграммы направленности синтезируемой антенны. Для относительно небольших (по сравнению с шириной диаграммы направленности первичной антенны РСА) угловых отклонений  $\alpha$  потери в коэффициенте усиления будут незначительными. Для углов, сравнимых с шириной диаграммы направленности первичной антенны, эти потери необходимо учитывать при оценке энергетического потенциала системы и ее

разрешающих свойств. При больших отклонениях луча необходимо производить пространственную фильтрацию углового спектра отраженных волн для его согласования с частотой повторения зондирующего сигнала [7]. Пространственную фильтрацию углового спектра отраженных волн при приеме целесообразно производить при помощи фазированной антенной решетки, что позволяет существенно уменьшить габариты системы по сравнению с вариантом использования нескольких приемных антенн, ориентированных под разными углами [8, 9].

### РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для иллюстрации приведенных выше рассуждений проведено компьютерное моделирование «трехлучевого» метода подавления спекла изображений, получаемых в РЛС с синтезированной апертурой антенны.



Рис. 3. Зависимость величины отношения средней яркости изображения к среднеквадратическому отклонению для различных углов разноса диаграмм направленности трех лучей РСА

Fig. 3. Dependence of the ratio value of the image average brightness to the MSE for different angles of separation of the directivity patterns of SAR three rays

В качестве модели отражающей поверхности выбрана случайная дифракционная решетка, образованная совокупностью независимых отражателей, расположенных в узлах регулярной прямоугольной сетки с шагом 1 м. Разрешение системы автоматизированного распознавания было задано равным  $5 \times 5$  м. Комплексные коэффициенты отражения решетки были заданы случайным образом, при этом «квадратуры» коэффициентов были распределены по нормальному закону с нулевым средним. В результате моделирования были получены тройки яркостных изображений решетки для разных углов визирования. Моделируемая РСА функционировала в соответствии с рис. 1.

На рис. 3 приведена зависимость величины отношения средней яркости получаемого изображения моделируемой решетки к среднеквадратическому отклонению (СКО) этой яркости от углового разнесения трех диаграмм каждого из каналов РСА. При этом изображение решетки сформировано

как некогерентная сумма трех изображений, полученных под углами  $\varphi$ ,  $0^0$ ,  $-\varphi$  соответственно. Результаты получены для разрешения РСА  $5 \times 5$  м и длины волны зондирующего сигнала 3 см.

Как следует из рис. 3, дисперсия яркости изображения заметно падает (т. е. спекл-эффект уменьшается) уже при угловых отворотах порядка единиц градусов. Для угловых отворотов более  $2,5^0$  спеклы трех изображений становятся некоррелированными, и при дальнейшем угловом разnose дисперсия яркости не уменьшается. Дальнейшее снижение спекла возможно при увеличении числа каналов углового разноса.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Vasile G.** Intensity-driven adaptive-neighborhood technique for polarimetric and interferometric SAR parameter estimation / E. Trouve, J.S. Lee, V. Buzuloiu // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 44, June, № 6. Pp. 1609–1621.
2. **Lee J.S.** Scattering model based speckle filtering of polarimetric SAR data / D.L. Schuler, M.R. Grunes, E. Pottier, L. Ferro Famil // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2006. Vol. 44, January, № 1. Pp. 176–187.
3. **Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А.** Поляризация радиоволн. Кн. 3. Радиополяриметрия сложных по структуре сигналов. М.: Радиотехника, 2008. 688 с.
4. **Акиншин Н.С., Румянцев В.Л., Хомяков А.В.** Алгоритмы обнаружения объектов в поляризационных РЛС // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. 2016. Вып. 2. С. 14–21.
5. **Giuli D., Fossi M., Facheris L.** Radar target scattering matrix measurement through orthogonal signals // IEE Proceedings F – Radar and Signal Processing. 1993. Vol. 140, August, № 4. Pp. 233–242.
6. **Cloude S.R., Pottier E.** An entropy-based classification scheme for land applications of polarimetric SAR // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1997. Vol. 35, January, № 1. Pp. 68–78.
7. **Freeman A.** Classification or multi-frequency. Multi-temporal polarimetric SAR images of natural vegetation / J. Saillard, E. Pottier, W.-M. Boerner / Eds. Proc. JIPR-2. 1992 Sept. 8–10. IRESTE. U. Nantes. Brelagne. France. Pp. 272–288.
8. **Акиншин Н.С., Вареница Ю.И., Хомяков К.А.** Совместная оценка координатных и поляризационных параметров радиолокационных объектов // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. 2016. Вып. 2. С. 3–14.
9. **Вареница Ю.И., Румянцев В.Л.** Оценка достоверности модельной реконструкции изображения точечных объектов методом прямолинейного синтеза апертуры // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. 2016. Вып. 7, Ч. 1. С. 184–191.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Акиншин Руслан Николаевич**, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Секции прикладных проблем при Президиуме Российской академии наук, rakinshin@yandex.ru.

**Румянцев Владимир Львович**, доктор технических наук, профессор, заместитель начальника отдела АО Центрального конструкторского бюро аппаратостроения, cdbae@cdbae.ru.

**Петешов Андрей Викторович**, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры Череповецкого высшего военного инженерного училища радиоэлектроники, D-john\_post@mail.ru.

## SIMULATION RESULTS OF SPECKLE SUPPRESSION IN RADAR WITH SYNTHETIC APERTURE

Ruslan N. Akinshin<sup>1</sup>, Vladimir L. Rumyantsev<sup>2</sup>, Andrey V. Peteshov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Section of Applied Problems at the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>JSC Central Design Bureau of Apparatus Engineering, Tula, Russia

<sup>3</sup>Cherepovets Higher Military Engineering School of Radio Electronics, Cherepovets, Russia

### ABSTRACT

The disadvantage of (RLI) radar images obtained with a single-channel radar station is the presence of speckle that leads to intensity flashes increasing the number of false alarms when detecting point targets. Therefore, the detection and target distinguishing by their reflective capability (using the energy characteristics of the signal) is not effective enough. In polarimetric radar stations the formation of each image element is carried out by the output signals of four receiving channels. Joint processing of these signals allows minimizing speckle without reducing the resolution capability. The paper presents the results of the computer simulation of the suppression methods of the image speckle obtained in the polarized radar stations with the synthesized antenna aperture. The first one uses the norm of the backscattering matrix as a parameter of the intensity of the reflected signal resolution from the  $i$ -th element. The incoherent addition of the intensities obtained by sequential overview of the space with several rays is carried out in the second one. Both of these methods can be applied together. The block diagram of such processing for one strip of range is given. The computer simulation of the three-rayed suppression method of the image speckle obtained in the radar stations with the synthesized antenna aperture is carried out. As a model of the reflecting surface a random diffraction grating formed by a set of independent reflectors located at the nodes of a regular rectangular grid with a step of 1 m is chosen. In this connection the image of the grating is formed as an incoherent sum of three images obtained at different angles. The results show that the speckle effect reduces even at angular changes of the order of degree units.

**Key words:** effective surface of scattering, the image of the object, the algorithm, synthesized aperture.

### REFERENCES

1. Vasile, G., Trouve, E., Lee, J.S. and Buzuloiu, V. (2006). *Intensity-driven adaptive neighborhood technique for polarimetric and interferometric parameter estimation*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 44, no. 6, June, pp. 1609–1621.
2. Lee, J.S., Schuler, D.L., Grunes, M.R., Pottier, E. and Ferro Famil, L. (2006). *Scattering model based speckle filtering of polarimetric SAR data*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 44, no. 1, January, pp. 176–187.
3. Kozlov, A.I., Logvin, A.I. and Sarychev, V.A. (2008). *Polyarizatsiya radiovoln. Kn. 3 Radiopolarimetriya slozhnykh po strukture signalov* [Polarization of radio waves. V. 3. Radiopolarimetry of complicated structure signals]. Moscow: Radiotekhnika, Radio Engineering, 688 p. (in Russian)
4. Akinshin, N.S., Rumyantsev, V.L. and Khomyakov, V.A. (2016). *Algoritmy obnaruzheniya obyektov v polarizatsionnikh RLS* [Algorithms of object detection in the polarized radars]. *Izvestiya TulGU. Ser. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of the Tula State University. Ser. Engineering Sciences], iss. 2, pp. 14–21. (in Russian)
5. Giuli, D., Fossi, M. and Facheris, L. (1993). *Radar target scattering matrix measurement through orthogonal signals*. IEE Proceedings F – Radar and Signal Processing, vol. 140, no. 4, August, pp. 233–242.
6. Claude, S.R. and Pottier, E. (1997). *An entropy-based classification scheme for land applications of polarimetric SAR*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 35, no. 1, pp. 68–78.

7. Freeman, A., Saillard, J., Pottier, E. and Boerner, W.M. (1992). *Classification or multi-frequency. Multi-temporal polarimetric SAR images of natural vegetation*. Eds. Proc. JIPR-2. 1992 Sept. 8–10. IRESTE. U. Nantes, Brelagne, France, pp. 272–288.

8. Akinshin, N.S., Varenitsa, Y.I. and Khomyakov, K.A. (2016). *Sovmestnaya otsenka koordinatnikh i polarizatsionnikh parametrov radiolokatsionnikh obyektov* [Joint estimation of the coordinate and the polarized parameters of radar objects]. *Izvestiya TulGU. Ser. Tekhnicheskiye nauki* [Izv. The Tula State University. Ser. Technical Sciences], iss. 2, pp. 3–14. (in Russian).

9. Varenitsa, Y.I. and Rummyantsev, V.L. (2016). *Otsenka dostovernosti modelnoy rekonstruktsii izobrazheniya tochechnikh obyektov metodom pryamolineynogo sinteza apertury* [Assessment of the reliability of the model image reconstruction of point objects by the method of straight-line aperture synthesis]. *Izvestiya TulGU. Ser. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of the Tula State University. Ser. Engineering Sciences], iss. 7, part 1, pp. 184–191. (in Russian).

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ruslan N. Akinshin**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Section of Applied Problems, Presidium of the Russian Academy of Sciences [rakinshin@yandex.ru](mailto:rakinshin@yandex.ru).

**Vladimir L. Rummyantsev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of Department of JSC CDBAE, [cdbae@cdbae.ru](mailto:cdbae@cdbae.ru).

**Andrey V. Peteshov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the CWWIURE Chair, Cherepovets Higher Military Engineering School of Radio-Electronics, [D-john\\_post@mail.ru](mailto:D-john_post@mail.ru).

Поступила в редакцию 11.05.2018  
Принята в печать 17.01.2019

Received 11.05.2018  
Accepted for publication 17.01.2019