

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов

УДК 004.932.4

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-6-18>

## Подавление мультипликативного шума на радиолокационных изображениях

А. А. Тузова<sup>1</sup>, В. А. Павлов<sup>2✉</sup>, А. А. Белов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

✉ [pavit@bk.ru](mailto:pavit@bk.ru)

### Аннотация

**Введение.** Радиолокационное изображение (РЛИ) – это изображение, получаемое зондированием земной поверхности с помощью радиолокационного устройства. РЛИ обладает важной особенностью в виде спекл-шума, который вызывает зернистость фона. Данный шум необходимо фильтровать с целью улучшения качества РЛИ. Фильтры спекл-шума часто имеют в своей структуре один или несколько параметров, которые контролируют уровень сглаживания шума и значения которых приходится подбирать экспериментально. В статьях, посвященных фильтрации спекл-шума, авторы часто не поясняют, как были выбраны значения параметров фильтров.

**Цель работы.** Представление методики для выбора оптимальных в смысле качества получаемого изображения параметров фильтров мультипликативного спекл-шума на РЛИ.

**Материалы и методы.** Рассмотрена разработанная методика поиска оптимальных параметров фильтров спекл-шума применительно к наиболее часто используемым фильтрам. Поиск оптимальных параметров и тестирование работы фильтров проводятся на специально разработанном изображении, содержащем объекты, наиболее часто встречающиеся на РЛИ. Метрикой, оценивающей качество проведенной фильтрации, служил индекс структурного сходства SSIM (Structural Similarity Index Metric).

**Результаты.** После нахождения оптимальных по SSIM параметров рассматриваемых фильтров проведено сравнение работы фильтров с точки зрения обработки РЛИ и найдены наилучшие фильтры для этой задачи. Также работа рассматриваемых фильтров протестирована на изображениях, содержащих различные типы объектов, а именно: большие объекты, мелкие объекты, резкие границы. Зная, какой фильтр наилучшим образом справляется со сглаживанием шума на той или иной области и какие для этого необходимы значения варьируемых параметров, можно использовать полученные результаты для фильтрации радиолокационных изображений. Фильтрация не только улучшает восприятие РЛИ человеком, но и позволяет снизить влияние спекл-шума на дальнейшую автоматизированную обработку РЛИ (детектирование объектов, сегментация областей и др.).

**Заключение.** Предложенный алгоритм позволил найти оптимальные параметры для нескольких фильтров спекл-шума. Качество фильтрации оценивалось экспертным способом (визуально), посредством сравнения изображений до и после фильтрации, разностных изображений и одномерных срезов изображений. Фильтр Фроста и фильтр анизотропной диффузии с оптимальными параметрами показали лучшее качество обработки по SSIM.

**Ключевые слова:** радиолокационное синтезирование апертуры, радиолокационное изображение, спекл-шум, фильтрация спекл-шума, параметры фильтров

**Для цитирования:** Тузова А. А., Павлов В. А., Белов А. А. Подавление мультипликативного шума на радиолокационных изображениях // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 6–18. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-6-18

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.05.2021; принята к публикации после рецензирования 15.06.2021; опубликована онлайн 25.09.2021

© Тузова А. А., Павлов В. А., Белов А. А., 2021



## Reduction of Multiplicative Noise in Radar Images

Anna A. Tuzova<sup>1</sup>, Vitalii A. Pavlov<sup>2✉</sup>, Andrei A. Belov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State Marine Technical University, St Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, St Petersburg, Russia

✉ pavit@bk.ru

### Abstract

**Introduction.** A radar image is an image obtained by remote sensing the earth's surface with a radar device. Radar images are characterized by background graininess caused by speckle noise, which should be filtered to improve the quality of radar images. The structure of speckle noise reduction filters often comprise one or more parameters to control the level of noise smoothing. The values of these parameters have to be selected experimentally. In works devoted to speckle noise filtering, the methods used for selecting filter parameters are rarely clarified.

**Aim.** To present a methodology for selecting the parameters of multiplicative speckle noise filters on a radar image that are optimal in terms of the quality of the resulting image.

**Materials and methods.** The article presents a method for determining the optimal parameters of speckle noise reduction filters. This method was applied to the most conventionally used filters. The search for optimal parameters and testing of the filters were carried out using a specially designed image, which contained the objects most frequently found on radar images. The structural similarity index (SSIM) metric was chosen as a metric that assesses the quality of filtration.

**Results.** After determining the optimal (in terms of SSIM) parameters of speckle noise reduction filters, the filters were compared to select the best filters in terms of the quality of radar image processing. In addition, the operation of the filters under study was tested on images containing various types of objects, namely: large objects, small objects and sharp borders. Knowing which filter copes best with smoothing speckle noise in a particular area and what values of the variable parameters this requires, an optimal quality of radar images can be achieved. Filtering not only improves human perception of radar images, but also reduces the influence of speckle noise during their further processing (object detection, segmentation of areas, etc.).

**Conclusion.** The proposed algorithm allowed optimal parameters for several speckle noise filters to be determined. The quality of filtration was assessed using an expert method (visually) by comparing images before and after filtration, differential images and one-dimensional image slices. The Frost filter and the anisotropic diffusion filter with optimal parameters showed the best processing quality according to the SSIM metric.

**Keywords:** synthetic aperture radar, radar image, speckle noise, speckle noise filtering, filter parameters

**For citation:** Tuzova A. A., Pavlov V. A., Belov A. A. Reduction of Multiplicative Noise in Radar Images. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 6–18. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-6-18

**Conflict of interest.** Authors declare no conflict of interest.

Submitted 11.05.2021; accepted 15.06.2021; published online 25.09.2021

**Введение.** Радиолокационное изображение (РЛИ) – это изображение, получаемое зондированием земной поверхности с помощью радиолокационного устройства. Чаще всего для формирования РЛИ используется синтезирование апертуры [1, 2]. С помощью радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) можно получить изображение подстилающей поверхности вне зависимости от погодных условий и освещения, на большом расстоянии и в широкой полосе. Технологию СА

можно использовать на беспилотных летательных аппаратах, на спутниках, в гидролокации и многих других областях. Метод позволяет решать множество задач – от картографирования местности до обнаружения интересующих объектов, что определяет актуальность исследований по данной тематике.

Однако РЛИ обладает важной особенностью, которую следует учитывать, а именно: на РЛИ наблюдается зернистость (неравномерность) фона.

Такой эффект вызван так называемым спекл-шумом [3, 4], который обусловлен когерентным сложением сигналов, принятых от множества элементарных отражателей, расположенных в пределах одного элемента разрешения поверхности. Данный шум нежелателен, поскольку его наличие при попытках извлечения полезной информации из РЛИ может приводить к ложному обнаружению целей или к их пропуску. Отсюда вытекает необходимость осуществления фильтрации спекл-шума с целью улучшения качества РЛИ и минимизации ошибок детектирования объектов на РЛИ [3, 4].

Фильтры спекл-шума часто имеют в своей структуре один или несколько параметров, контролирующих уровень сглаживания шума, значения которых приходится подбирать экспериментально. В статьях, посвященных фильтрации спекл-шума, авторы часто не поясняют, как были выбраны значения параметров фильтров [5–10]. Существуют статьи, в которых авторы проводят исследования по подбору значений варьируемых параметров фильтров спекл-шума [11–16]. Однако чаще всего в таких статьях происходит подбор только одного параметра (например, размера окна обработки), хотя фильтр может иметь и 3 варьируемых параметра, значения которых должны быть подобраны совместно. Либо же рассматривается выбор значений параметров только одного фильтра. Также имеется несколько работ, в которых авторы указывают на то, что они производили оптимизацию значений варьируемых параметров фильтров, однако алгоритм не раскрыт достаточно подробно и нет возможности повторить его для своих целей [17, 18]. Таким образом, в доступной литературе не был найден метод поиска значений параметров фильтров, удовлетворяющий следующим условиям: четкая формализация, универсальность для разных типов фильтров, учет всех варьируемых параметров фильтра и нахождение в открытом доступе с возможностью свободного использования.

Исходя из изложенного, цель данной работы – представить методику выбора оптимальных в смысле качества получаемого изображения параметров фильтров мультипликативного спекл-шума на РЛИ.

**Спекл-шум и его фильтрация.** Спекл-шум на РЛИ математически может быть смоделирован как

модель мультипликативного шума, которая представляет собой умножение исходного изображения на случайный сигнал [3, 4]. Тогда зашумленное изображение  $I'(x, y)$  описывается формулой

$$I'(x, y) = I(x, y)(1 + n(x, y)), \quad (1)$$

где  $I(x, y)$  – исходное изображение (неискаженное);  $n(x, y)$  – случайный процесс, описывающий спекл-шум.

К наиболее используемым фильтрам спекл-шума относятся локальные фильтры. Обработка изображений при использовании таких фильтров ведется в "скользящем окне", размеры которого намного меньше, чем размер всего изображения. К таким фильтрам относятся:

- медианный фильтр (варьируемый параметр – размер окна обработки) [19];
- фильтр Ли (варьируемый параметр – размер окна обработки) [20];
- фильтр Фроста (варьируемые параметры – размер окна обработки и коэффициент демпфирования ( $D$ ), позволяющий регулировать гладкость фильтра) [21];
- фильтр Куана (варьируемые параметры – размер окна обработки и коэффициент  $A$ , позволяющий регулировать гладкость фильтра) [22];
- билатеральная фильтрация с гауссовским ядром (варьируемые параметры: размер окна обработки и параметры сглаживания  $\sigma_d^2$  и  $\sigma_r^2$ ) [23];
- метод оценки с помощью апостериорного максимума (MAP) (варьируемый параметр – размер окна обработки) [24].

Помимо локальных фильтров можно также выделить фильтр анизотропной диффузии Перона и Малика [25]. Особенность данного фильтра состоит в том, что при сглаживании шума он сохраняет границы на изображении и усиливает их интенсивность. Варьируемыми параметрами фильтра анизотропной диффузии являются шаг по времени  $\Delta t$ , параметр  $k$  и количество итераций  $t$ .

Качество работы фильтров оценивается с использованием математических методов (метрик), например:

- средний квадрат отклонения (Mean Squared Error – MSE) [19];
- пиковое отношение сигнал-шум (Peak Signal-to-Noise Ratio – PSNR) [19];

- индекс структурного сходства (Structural Similarity Index Metric – SSIM) [26];
- универсальный индекс качества изображений (Universal Quality Index – UQI) [27];
- разность модулей градиентов (Gradient Magnitude Similarity Deviation – GMSD) [28].

Авторы данной статьи провели сравнение перечисленных метрик для задач обработки РЛИ [29]. Исходя из полученных в [29] результатов далее будем использовать метрику SSIM для оценки качества изображений после применения к ним фильтров спекл-шума.

**Распределение спекл-шума.** Чтобы оценить качество фильтрации, необходимо иметь следующие изображения: эталонное изображение без шума, зашумленное изображение, изображение после фильтрации. Сравнение эталонного изображения с отфильтрованным позволяет оценить качество фильтрации. Поскольку эталонных РЛИ без влияния спекл-шума не имеется, то необходимо использовать синтетические РЛИ, накладывая по (1) шум на тестовые изображения. Чтобы иметь возможность наложить спекл-шум, необходимо знать, каким распределением вероятностей он описывается на реальных РЛИ и какие это распределение имеет параметры.

Чтобы получить такую информацию, было рассмотрено некоторое количество РЛИ и на каждом изображении были выделены фрагменты с равномерными областями, не содержащими каких-либо объектов. Равномерность области определялась по значению параметра, называемого эквивалентным количеством наблюдений (Equivalent Number of Looks – ENL). Данный параметр равен отношению квадрата среднего значения интенсивности пикселей в рассматриваемом фрагменте к дисперсии интенсивности пикселей в том же фрагменте. Чем выше ENL, тем равномернее считается область.

Далее, предположив, что спекл-шум имеет одинаковое распределение на всех выбранных РЛИ, интенсивности пикселей всех выбранных фрагментов были объединены в одну выборку. Была произведена аппроксимация плотности вероятности полученной выборки плотностью вероятности распределения Рэлея [30–33]. Из аппроксимирующего распределения Рэлея было получено, что параметр масштаба в данном случае равен 0.27. Гипотеза  $H_0$  о том, что рассматриваемая выборка значений спекл-шума принадлежит распределению Рэлея с параметром масштаба 0.27,

была проверена с помощью критерия согласия хи-квадрат (критерий согласия Пирсона) [34, 35]. В итоге получаем, что критерий хи-квадрат не опровергает гипотезу  $H_0$  с уровнем статистической значимости 0.05.

**Выбор оптимальных параметров фильтров спекл-шума.** Была предложена методика, с помощью которой можно определить оптимальные параметры фильтров спекл-шума и затем использовать их для обработки РЛИ. Ранее авторами уже была рассмотрена данная методика в работе [36]. Однако здесь она будет раскрыта более подробно и применена к большему количеству фильтров спекл-шума.

Во-первых, как уже отмечалось, необходимо создать тестовое эталонное изображение, на которое будет накладываться шум, и затем оно будет использовано при поиске оптимальных параметров. Такое тестовое изображение должно содержать в себе наиболее часто встречающиеся на РЛИ объекты: машины, самолеты, дороги, дома, корабли, однородные участки (леса, водоемы, поля) и т. д. При этом, с другой стороны, используемые объекты должны иметь простую геометрическую форму, позволяющую легко оценивать результаты фильтрации визуально. Рассмотрим несколько изображений, содержащих указанные объекты, и найдем относительно простые геометрические формы, способные их аппроксимировать для использования в тестовом изображении.

Изображения, содержащие основные объекты, встречающиеся на РЛИ, и геометрические фигуры, способные аппроксимировать данные объекты, представлены на рис. 1. Видно, что аппроксимировать реальные объекты возможно, заменив машины на прямоугольники и квадраты; самолеты – на треугольники; деревья – на звезды, дороги – на широкую полосу; равномерные участки – на большие фигуры, например на прямоугольники. Таким образом, учитывая полученные результаты, можно создать тестовое изображение, подходящее для поиска оптимальных параметров фильтров спекл-шума (рис. 2). А на рис. 3 представлено это же изображение с наложенным на него с использованием (1) шумом.

При этом следует заметить, что результаты работы алгоритма в любом случае будут в той или иной мере зависеть от выбранного тестового изображения. В связи с этим приведенные далее результаты могут отличаться от полученных при другом

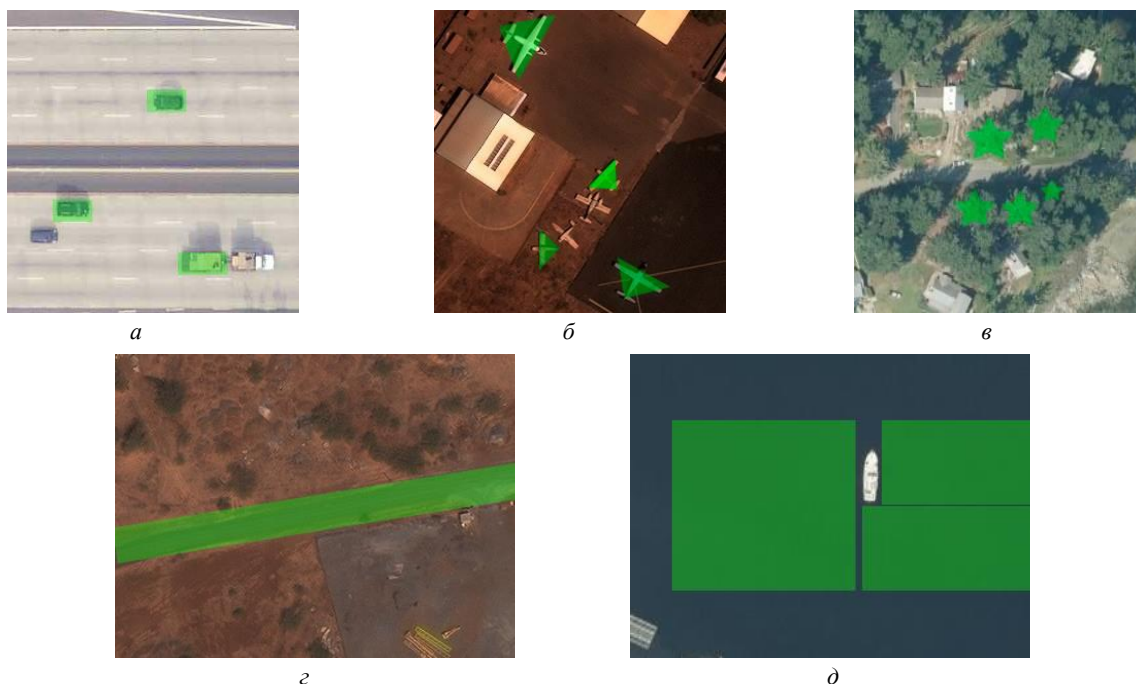


Рис. 1. Изображения, содержащие основные объекты, встречающиеся на РЛИ, и наложенные на них геометрические фигуры, способные аппроксимировать данные объекты: *а* – изображение, содержащее машины; *б* – изображение, содержащее самолеты; *в* – изображение, содержащее деревья; *г* – изображение, содержащее дорогу; *д* – изображение, содержащее равномерные участки (вода)

*Fig. 1.* Images containing objects typically found on radar images with superimposed geometric figures capable of approximating these objects: *a* – an image containing cars; *б* – an image containing planes; *в* – an image containing trees; *г* – an image containing a road; *д* – an image containing uniform areas (water)

выбранном тестовом изображении. Таким образом, желательно для каждой конкретной задачи создавать индивидуальное тестовое изображение, учитывающее возможные особенности, которые могут повлиять на результат.

Итак, имея эталонное тестовое изображение и изображение с наложенным шумом, можно приступить к поиску оптимальных параметров, который представляет собой итерационный оптимизационный процесс. Количество итераций зависит от коли-

чества варьируемых параметров у фильтра. Рассмотрим этапы оптимизации для указанных ранее фильтров:

1. Медианный фильтр, фильтр Ли и МАР-фильтр имеют только один варьируемый параметр (размер окна обработки  $m$ ), поэтому оптимизационный процесс по поиску наилучшего значения данного параметра проводится за один этап и представляет собой построение зависимости значений метрики, оценивающей степень различий

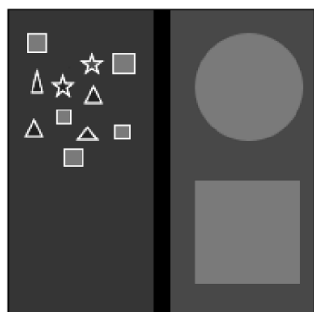


Рис. 2. Разработанное тестовое эталонное изображение

*Fig. 2.* The developed test reference image

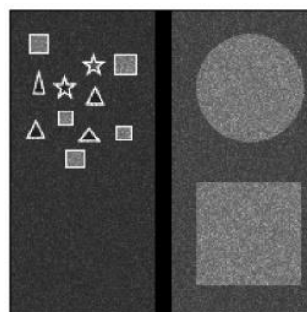


Рис. 3. Тестовое изображение с наложенным спекл-шумом

*Fig. 3.* The test image with superimposed speckle noise

между эталонным и отфильтрованным изображениями (в данной работе используется SSIM), от различных значений  $m$ . Из полученной зависимости определяется оптимальное значение параметра по максимуму SSIM.

2. Фильтр Фроста и фильтр Куана имеют по 2 варьируемых параметра (размер окна обработки и коэффициент, который позволяет регулировать гладкость фильтра). В данном случае оптимизационный процесс будет состоять из трех этапов:

– на первом этапе выбирается и фиксируется некое значение окна обработки и строится зависимость значений метрики от различных значений коэффициента, определяющего степень гладкости фильтра. Из полученной зависимости определяется начальное оптимальное значение коэффициента гладкости по максимуму SSIM;

– на втором этапе фиксируется начальное оптимальное значение коэффициента гладкости, найденное ранее, и строится зависимость значений метрики от различных значений размера окна обработки. Из данной зависимости определяется оптимальное значение размера окна обработки по максимуму SSIM;

– на третьем этапе повторяется процесс первого этапа с уточненным значением размера окна обработки, полученным на втором этапе.

Описанный процесс может повторяться до стабилизации результатов оптимизации

Билатеральный фильтр обладает тремя варьируемыми параметрами (размер окна обработки и 2 параметра сглаживания). Процесс оптимизации в данном случае аналогичен процессу оптимизации для фильтров Фроста и Куана, за исключением того, что вместо одного параметра сглаживания рассматриваются сразу два (строятся семейства зависимостей).

Фильтр анизотропной диффузии имеет 3 варьируемых параметра (шаг по времени  $\Delta t$ , параметр  $k$  и количество итераций  $t$ ), среди которых нет размера окна обработки. В данном случае процесс оптимизации аналогичен процессу оптимизации для билатерального фильтра с отличием в том, что вместо окна обработки используется шаг по времени  $\Delta t$ .

**Результаты.** Были найдены оптимальные по метрике SSIM параметры рассматриваемых фильтров с использованием описанного алгоритма. Для фильтров, имеющих варьируемый размер окна обработки, начальный размер данного параметра был выбран  $11 \times 11$ . Полученные оптимальные параметры фильтров представлены в табл. 1.

Тестовое изображение и разностные изображения после использования фильтров с оптимальными параметрами представлены на рис. 4. В отфильтрованное тестовое изображение включен небольшой фрагмент исходного зашумленного изображения для сравнения (обведен в синюю рамку).

Для визуализации работы фильтров можно использовать одномерные срезы изображений. Пример одномерных срезов для всех исследуемых фильтров представлен на рис. 5. Графики на рис. 5, б разнесены для удобства визуализации, чтобы они не накладывались друг на друга. Введенный между кривыми интервал равен 0.9.

Также рассмотрим значение SSIM на конкретных локальных областях, чтобы выделить, с какими типами объектов какой фильтр справляется лучше. Для этого рассмотрим отдельно области с мелкими объектами (примерно  $10 \times 10$  пикселей), с большим объектом (примерно  $150 \times 150$  пикселей) и область, содержащую границу (ширина примерно 10 пикселей). Локальные области до фильтрации представлены на рис. 6. Значения SSIM для локальных областей после фильтрации представлены в табл. 2.

Табл. 1. Найденные оптимальные параметры фильтров спекл-шума

Table 1. Optimal parameters of the speckle noise reduction filters under study

Фильтр	Параметр фильтра	Оптимальное значение параметра	SSIM при оптимальном значении параметров
Медианный	$m$	$7 \times 7$	0.879
Ли	$m$	$5 \times 5$	0.925
Фроста	$m$	$13 \times 13$	0.948
	$D$	10.8	
Куана	$m$	$13 \times 13$	0.893
	$A$	3.1	
Билатеральный	$m$	$9 \times 9$	0.920
	$\sigma_d^2$	2	
	$\sigma_r^2$	0.2	
МАР	$m$	$5 \times 5$	0.944
Анизотропная диффузия при экспоненциальной $g(x)$	$\Delta t$	0.24	0.976
	$k$	0.1	
	$t$	13	
Анизотропная диффузия при квадратичной $g(x)$	$\Delta t$	0.25	0.980
	$k$	0.05	
	$t$	13	



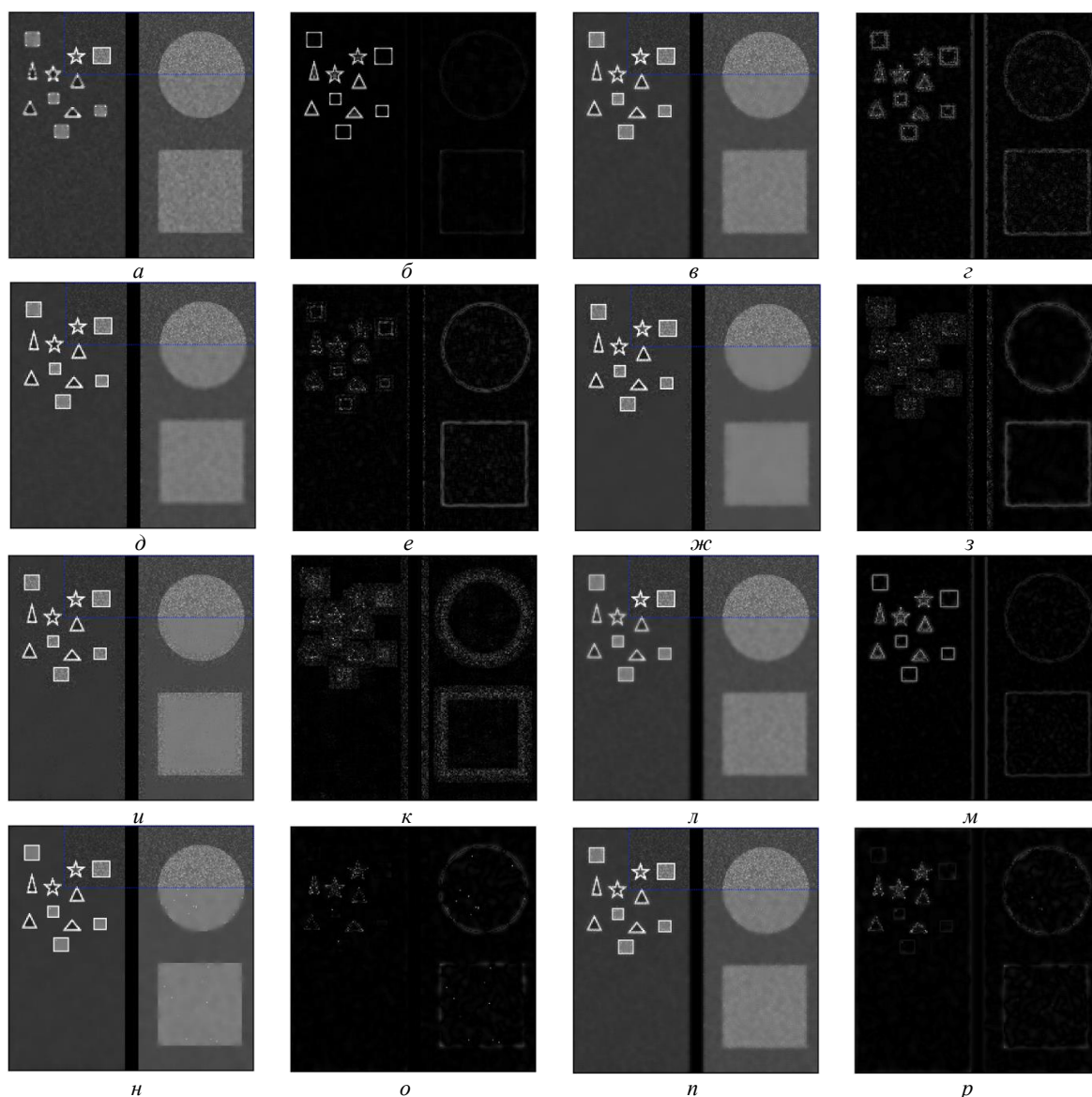


Рис. 4. Тестовое изображение и разностные изображения при использовании фильтров с оптимальными параметрами, найденными по SSIM: *а* – тестовое изображение после медианного фильтра, SSIM = 0.879; *б* – разностное изображение после медианного фильтра; *в* – тестовое изображение после фильтра Ли, SSIM = 0.925; *г* – разностное изображение после фильтра Ли; *д* – тестовое изображение после MAP-фильтра, SSIM = 0.944; *е* – разностное изображение после MAP-фильтра; *ж* – тестовое изображение после фильтра Фроста, SSIM = 0.948; *з* – разностное изображение после фильтра Фроста; *и* – тестовое изображение после фильтра Куана, SSIM = 0.893; *к* – разностное изображение после фильтра Куана; *л* – тестовое изображение после билатерального фильтра, SSIM = 0.920; *м* – разностное изображение после билатерального фильтра; *н* – тестовое изображение после фильтра анизотропной диффузии при экспоненциальной  $g(x)$ , SSIM = 0.976; *о* – разностное изображение после фильтра анизотропной диффузии при экспоненциальной  $g(x)$ ; *п* – тестовое изображение после фильтра анизотропной диффузии при квадратичной  $g(x)$ , SSIM = 0.980; *р* – разностное изображение после фильтра анизотропной диффузии при квадратичной  $g(x)$

Fig. 4. The test image and difference images obtained using filters with optimal parameters found by the SSIM metric: *a* – the test image after median filter, SSIM = 0.879; *б* – the difference image after median filter; *в* – the test image after Lee filter, SSIM = 0.925; *г* – the difference image after Lee filter; *д* – the test image after MAP-filter, SSIM = 0.944; *е* – the difference image after MAP-filter; *ж* – the test image after Frost filter, SSIM = 0.948; *з* – the difference image after Frost filter; *и* – the test image after Kuan filter, SSIM = 0.893; *к* – the difference image after Kuan filter; *л* – the test image after bilateral filter, SSIM = 0.920; *м* – the difference image after bilateral filter; *н* – the test image after anisotropic diffusion filter with exp.  $g(x)$ , SSIM = 0.976; *о* – the difference image after anisotropic diffusion filter with exp.  $g(x)$ ; *п* – the test image after anisotropic diffusion filter with quad.  $g(x)$ , SSIM = 0.980; *р* – the difference image after anisotropic diffusion filter with quad.  $g(x)$

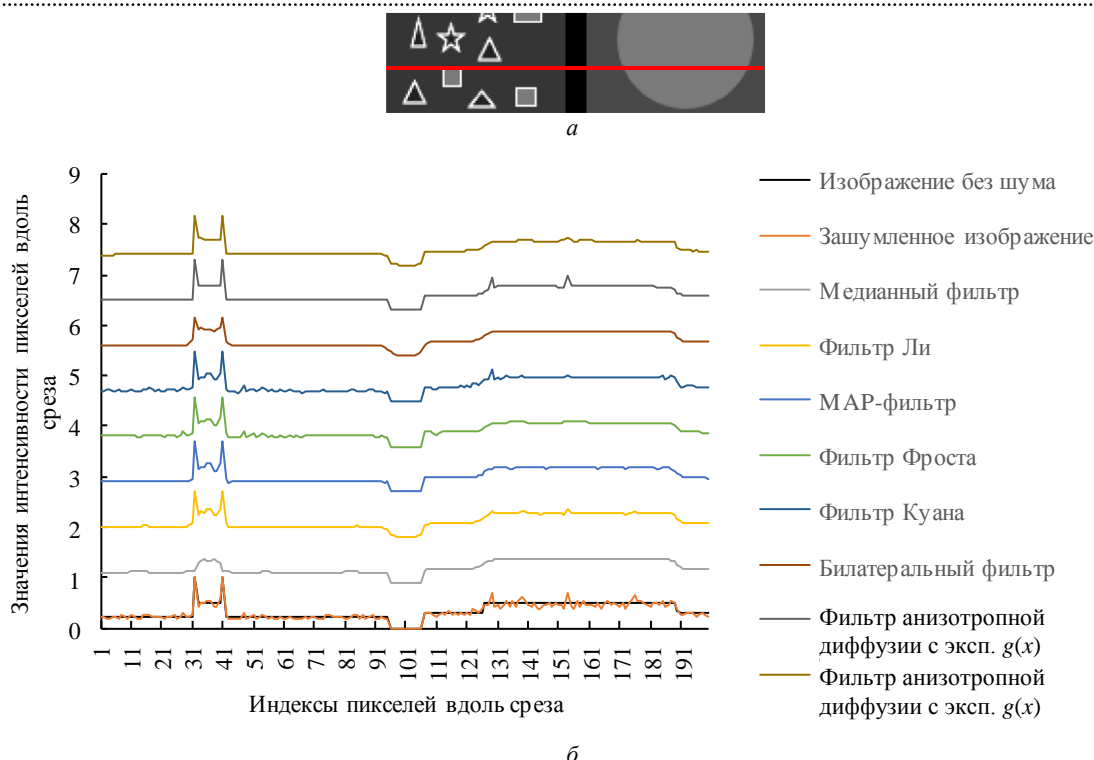


Рис. 5. Одномерные срезы при использовании всех фильтров с оптимальными параметрами, полученными с использованием SSIM: *a* – изображение без наложения шума с указанием линии среза; *б* – значения интенсивности пикселей вдоль среза для изображения до и после фильтрации различными методами

Fig. 5. One-dimensional slices using all filters with optimal parameters found by the SSIM metric: *a* – the image without speckle noise with the slice line position; *б* – the pixel intensity values along a slice before and after filtering by various methods

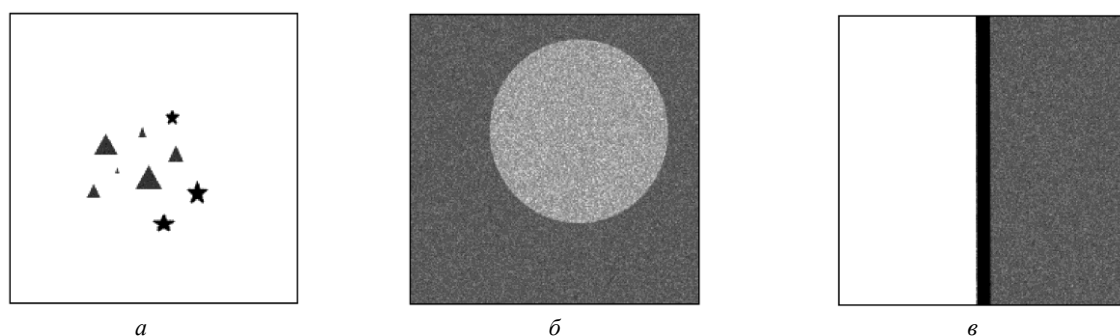


Рис. 6. Локальные области с наложенным на них спекл-шумом: *a* – мелкие объекты; *б* – большой объект; *в* – граница

Fig. 6. Local areas with superimposed speckle noise: *a* – small objects; *б* – a large object; *в* – a border

Анализ рис. 4, 5 и табл. 2 позволит сделать следующие выводы по каждому из фильтров:

– к положительным сторонам медианного фильтра можно отнести хорошее качество сглаживания шума на равномерных областях, а к негативным особенностям – сильное искажение мелких объектов. Поскольку РЛИ часто содержат большое количество малоразмерных объектов, медианный фильтр нецелесообразно использовать при обработке РЛИ;

– фильтр Ли, МАР- и билатеральный фильтры дают близкие результаты. Их можно использовать для обработки РЛИ, однако следует учитывать, что эти фильтры не так хорошо сглаживают зернистость на крупных объектах и однородных областях;

– фильтр Фроста хорошо сглаживает шум на однородных областях и крупных объектах, но оставляет небольшую зернистость по краям объектов. Может быть рекомендован для обработки РЛИ;



Табл. 2. Значения SSIM при фильтрации области с мелкими объектами (примерно  $10 \times 10$  пикселей), с большим объектом (примерно  $150 \times 150$  пикселей) и области, содержащей границу (ширина границы примерно 10 пикселей)

Table 2. SSIM values when filtering the area with small objects (approximately  $10 \times 10$  pixels), with a large object (approximately  $150 \times 150$  pixels) and the area containing a border (a width of approximately 10 pixels)

Фильтр	SSIM при фильтрации области с мелкими объектами	SSIM при фильтрации области с большим объектом	SSIM при фильтрации области, содержащей границу
Медианный	0.942	0.966	0.995
Ли	0.983	0.947	0.956
Фроста	0.993	0.980	0.989
Куана	0.970	0.895	0.968
Билатеральный	0.971	0.956	0.952
MAP	0.995	0.899	0.972
Анизотропная диффузия при экспоненциальной $g(x)$	0.998	0.957	0.984
Анизотропная диффузия при квадратичной $g(x)$	0.997	0.962	0.986

– фильтр Куана оставляет заметный подавленный шум по краям объектов. Не рекомендуется для обработки РЛИ;

– фильтр анизотропной диффузии с квадратичной и экспоненциальной функцией  $g(x)$  достаточно хорошо сглаживает шум, а также выделяет границы объектов. Может быть рекомендован для обработки радиолокационных изображений.

**Заключение.** В статье представлен автоматизированный метод для поиска оптимальных значений параметров фильтров спекл-шума на РЛИ. Метод основан на знании вида распределения спекл-шума и его параметров и использовании тестового изображения, которое специально создается с учетом особенностей выполняемой задачи. Оптимальность параметров фильтров определяется с помощью метрики оценки качества обработанного изображения SSIM. Поиск оптимальных параметров фильтров спекл-шума представляет собой итерационный оптимизационный процесс. Количество итераций зависит от количества варьируемых параметров фильтра.

С использованием предложенного алгоритма были найдены оптимальные параметры для нескольких фильтров спекл-шума. Качество фильтрации также оценивалось экспертным способом (визуально), посредством сравнения изображений до и после фильтрации, разностных изображений и одномерных срезов изображений. Фильтр Фроста и фильтр анизотропной диффузии с оптимальными параметрами показали лучшее качество обработки по SSIM. Программа для поиска оптимальных параметров реализована в среде MatLab и может быть доступна по ссылке на GitHub [37]. Основной код программы, позволяющий выбрать настройки и запустить все необходимые расчеты, содержится в файле FilteringSpeckleNoise\_main\_script.m.

## Список литературы

1. Тузова А. А., Павлов В. А., Белов А. А. Применение платформы Jetson TX1 для реализации алгоритмов формирования радиолокационных изображений радиолокатора с синтезированной апертурой // Неделя науки СПбПУ 2019: материалы науч. конф. с международным участием. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. С. 26–29.
2. Pavlov V. A., Belov A. A., Tuzova A. A. Implementation of Synthetic Aperture Radar Processing Algorithms on the Jetson TX1 Platform // IEEE Intern. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), St Petersburg, 2019. P. 90–93. doi: 10.1109/EExPolytech.2019.8906850
3. Волков В. Ю. Адаптивное выделение мелких объектов на цифровых изображениях // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 1. С. 17–28.
4. Fursov V., Zherdev D., Kazanskiy N. Support subspaces method for synthetic aperture radar automatic

target recognition // Intern. J. of Advanced Robotic Systems. 2016. Vol. 13, iss. 5. P. 1–11. doi: 10.1177/1729881416664848

5. Domg Y., Milne A. K., Forster B. C. Toward edge sharpening: a SAR speckle filtering algorithm // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Apr. 2001. Vol. 39, № 4. P. 851–863. doi: 10.1109/36.917910

6. Yongjian Yu., Acton S. T. Speckle reducing anisotropic diffusion // IEEE Transactions on Image Processing. 2002. Vol. 11, № 11. P. 1260–1270. doi: 10.1109/TIP.2002.804276

7. A New Image Quality Index for Objectively Evaluating Despeckling Filtering in SAR Images / L. Gomez, M. E. Buemi, J. C. Jacobo-Berlles, M. E. Mejail // IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. Vol. 9, № 3. P. 1297–1307. doi: 10.1109/JSTARS.2015.2465167

8. Speckle Reduction of Reconstructions of Digital Holograms Using Gamma-Correction and Filtering / X. Huang, Z. Jia, J. Zhou, J. Yang, N. Kasabov // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 5227–5235. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2751540
9. Старовойтов В. В. Методика выбора фильтра для сглаживания спекл-шума радарных изображений с синтезированной апертурой // Информатика. 2015. № 2. P. 5–11.
10. Исследование методов удаления спекл-шумов на ультразвуковых изображениях / А. Бобкова, С. Поршнева, В. Зюзин, В. Бобков // The 23<sup>rd</sup> Intern. Conf. on Computer Graphics and Vision, Vladivostok, Sept. 2013. P. 244–246.
11. Touzi R. A review of speckle filtering in the context of estimation theory // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2002. Vol. 40, iss. 11. P. 2392–2404. doi: 10.1109/TGRS.2002.803727
12. Aja-Fernandez S., Alberola-Lopez C. On the estimation of the coefficient of variation for anisotropic diffusion speckle filtering // IEEE Transactions on Image Processing. 2006. Vol. 15, № 9. P. 2694–2701. doi: 10.1109/TIP.2006.877360
13. Oriented Speckle Reducing Anisotropic Diffusion / K. Krissian, C. Westin, R. Kikinis, K. G. Vosburgh // IEEE Transactions on Image Processing. 2007. Vol. 16, № 5. P. 1412–1424. doi: 10.1109/TIP.2007.891803
14. Improved Sigma Filter for Speckle Filtering of SAR Imagery / Jong-Sen Lee, Jen-Hung Wen, T. L. Ainsworth, Kun-Shan Chen, A. J. Chen // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009. Vol. 47, № 1. P. 202–213. doi: 10.1109/TGRS.2008.2002881
15. FPGA-Based Adaptive Speckle Suppression Filter for Underwater Imaging Sonar / S. Karabchevsky, D. Kahana, O. Ben-Harush, H. Guterman // IEEE J. of Oceanic Engineering. 2011. Vol. 36, № 4. P. 646–657. doi: 10.1109/JOE.2011.2157729
16. Spatial filtering strategies on deforestation detection using SAR image textures / X. Dong, D. Zhang, K. Cui, C. Hu, X. Lv // CIE Intern. Conf. on Radar (RADAR), Guangzhou, China, 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/RADAR.2016.8059472
17. Anisotropic Diffusion Filter With Memory Based on Speckle Statistics for Ultrasound Images / G. Ramos-Llordén, G. Vegas-Sánchez-Ferrero, M. Martín-Fernández, C. Alberola-López, S. Aja-Fernández // IEEE Transactions on Image Processing. 2015. Vol. 24, № 1. P. 345–358. doi: 10.1109/TIP.2014.2371244
18. Paul A., Mukherjee D. P., Acton S. T. Speckle Removal Using Diffusion Potential for Optical Coherence Tomography Images // IEEE J Biomed Health Inform. 2019. Vol. 23, iss. 1. P. 264–272. doi: 10.1109/JBHI.2018.2791624
19. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. 2<sup>nd</sup> ed. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., USA, New Jersey 07458, 2001. 191 p.
20. Lee Jong-Sen Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1980. Vol. PAMI-2, № 2. P. 165–168. doi: 10.1109/TPAMI.1980.4766994
21. A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise / V. S. Frost, J. A. Stiles, K. S. Shanmugan, J. C. Holtzman // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1982. Vol. PAMI-4, № 2. P. 157–166. doi: 10.1109/TPAMI.1982.4767223
22. Adaptive restoration of images with speckle / D. Kuan, A. Sawchuk, T. Strand, P. Chavel // IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1987. Vol. 35, № 3. P. 373–383. doi: 10.1109/TASSP.1987.1165131
23. Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images // Sixth Intern. Conf. on Computer Vision (IEEE Cat. No.98CH36271), Bombay, India, 1998. P. 839–846. doi: 10.1109/ICCV.1998.710815
24. Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images / A. Lopes, E. Nezry, R. Touzi, H. Laur // Intern. J. of Remote Sensing. 1993. Vol. 14, iss. 9. P. 1735–1758. doi: 10.1080/01431169308953999
25. Perona P., Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1990. Vol. 12, iss. 7. P. 629–639. doi: 10.1109/34.56205
26. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity / Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli // IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Vol. 13, iss. 4. P. 600–612. doi: 10.1109/TIP.2003.819861
27. Wang Z., Bovik A. C. A universal image quality index // IEEE Signal Processing Lett. 2002. Vol. 9, iss. 3. P. 81–84. doi: 10.1109/97.995823
28. Gradient magnitude similarity deviation: A highly efficient perceptual image quality index / W. Xue, L. Zhang, X. Mou, A. C. Bovik // IEEE Transactions on Image Processing. 2014. Vol. 23, iss. 2. P. 684–695. doi: 10.1109/TIP.2013.2293423
29. Comparison of Image Quality Assessment Metrics for Evaluation of Performance of Anisotropic Diffusion Filter for SAR Images / A. A. Tuzova, V. A. Pavlov, A. A. Belov, S. V. Volvenko // IEEE Intern. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EEEPolytech), St Petersburg, 2020. P. 176–179. doi: 10.1109/EEEPolytech50912.2020.9243957
30. Methods for Blind Estimation of Speckle Variance in SAR Images: Simulation Results and Verification for Real-Life Data / S. Abramov, V. Abramova, V. Lukin, N. Ponomarenko, B. Vozel, K. Chehdi, K. Egiastian, Ja. Astol // Computational and Numerical Simulations. 2014. Ch. 24. P. 303–327. doi: 10.5772/57040
31. Choi H., Jeong J. Speckle noise reduction technique for SAR images using statistical characteristics of speckle noise and discrete wavelet transform // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, iss. 1184. P. 1–27. doi: 10.3390/rs1101184

32. Xie Hua, Pierce L. E., Ulaby F. T. Statistical properties of logarithmically transformed speckle // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2002. Vol. 40, iss. 3. P. 721–727. doi: 10.1109/TGRS.2002.1000333

33. Singh P., Pandey R. Speckle noise: Modelling and implementation // Intern. J. of Circuit Theory and Applications. 2016. Vol. 9, iss. 17. P. 8717–8727.

34. Herman C., Lehmann E. L. The use of maximum likelihood estimates in  $\chi^2$  tests for goodness of fit // Ann. Math. Statist. 1954. Vol. 25, iss. 3. P. 579–586. doi: 10.1214/aoms/1177728726

35. Pearson K. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably sup-

posed to have arisen from random sampling // Breakthroughs in Statistics: Methodology and Distribution / eds. S. Kotz, N. L. Johnson. New York: Springer New York, 1992. P. 11–28. doi: 10.1007/978-1-4612-4380-9\_2

36. Belov A. A., Pavlov V. A., Tuzova A. A. A Method of Finding Optimal Parameters of Speckle Noise Reduction Filters // Internet of Things, Smart Spaces and Next Generation Networks and Systems, Springer Intern. Publishing, 2020. P. 133–141. doi: 10.1007/978-3-030-65729-1\_12

37. Тузова А. А. Проект по поиску оптимальных параметров фильтров спекл-шума. Файл FilteringSpeckleNoise\_main\_script.m. URL: <https://github.com/AnnaTuzova/Speckle-noise-project> (дата обращения 25.04.2021)

## Информация об авторах

**Тузова Анна Андреевна** – магистр (2020, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)), инженер (2021, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет). Автор 6 научных публикаций. Сфера научных интересов – обработка сигналов, обработка изображений, обработка радиолокационных изображений.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПбГМТУ), ул. Лощманская, д. 3, Санкт-Петербург, 190121, Россия

E-mail: [tuzova@corp.smtu.ru](mailto:tuzova@corp.smtu.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-8471-450X>

**Павлов Виталий Александрович** – кандидат технических наук (2020, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)), ассистент (2020, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого). Автор 30 научных публикаций. Сфера научных интересов – обработка сигналов, обработка изображений, компьютерное зрение, машинное обучение, глубокое обучение, обработка радиолокационных изображений.

Адрес: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

E-mail: [pavlov\\_va@spbstu.ru](mailto:pavlov_va@spbstu.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-0726-6613>

**Белов Андрей Александрович** – специалист (1989, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)), ведущий инженер (2018, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)). Автор 15 научных публикаций. Сфера научных интересов – обработка сигналов, обработка изображений, обработка радиолокационных изображений.

Адрес: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

E-mail: [belov@spbstu.ru](mailto:belov@spbstu.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-0617-4514>

## References

1. Tuzova A. A., Pavlov V. A., Belov A. A. *Primenenie plat-formy Jetson TX1 dlya realizacii algoritmov formirovaniya radiolokacionnyh izobrazhenij radiolokatora s sintezirovannoj aperturoj. Nedelja nauki SPbPU 2019: materialy nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. SPb, Izd-vo Politehn. un-ta*, 2019, pp. 26–29. (In Russ.)

2. Pavlov V. A., Belov A. A., Tuzova A. A. Implementation of Synthetic Aperture Radar Processing Algorithms on

the Jetson TX1 Platform. IEEE Intern. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech). St Petersburg, 2019, pp. 90–93. doi: 10.1109/EEExPolytech.2019.8906850

3. Volkov V. Ju. *Adaptivnoe vydelenie melkih ob'ektov na cifrovyyh izobrazhenijah*. Radioelectronics. 2017, no. 1, pp. 17–28. (In Russ.)

4. Fursov V., Zherdev D., Kazanskiy N. Support subspaces method for synthetic aperture radar automatic

target recognition. Intern. J. of Advanced Robotic Systems. 2016, vol. 13, iss. 5, pp. 1–11. doi: 10.1177/1729881416664848

5. Domg Y., Milne A. K., Forster B. C. Toward edge sharpening: a SAR speckle filtering algorithm. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Apr. 2001, vol. 39, no. 4, pp. 851–863. doi: 10.1109/36.917910

6. Yongjian Yu., Acton S. T. Speckle reducing anisotropic diffusion. IEEE Transactions on Image Processing. Nov. 2002, vol. 11, no. 11, pp. 1260–1270. doi: 10.1109/TIP.2002.804276

7. Gomez L., Buemi M. E., Jacobo-Berlles J. C., Mejail M. E. A New Image Quality Index for Objectively Evaluating Despeckling Filtering in SAR Images. IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016, vol. 9, no. 3, pp. 1297–1307. doi: 10.1109/JSTARS.2015.2465167

8. Huang X., Jia Z., Zhou J., Yang J., Kasabov N. Speckle Reduction of Reconstructions of Digital Holograms Using Gamma-Correction and Filtering. IEEE Access. 2018, vol. 6, pp. 5227–5235. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2751540

9. Starovoitov V. V. A method for selecting a filter for smoothing the speckle noise of radar images with a synthesized aperture. Computer science. 2015, no. 2, pp. 5–11. (In Russ.)

10. Bobkova A., Porshnev S., Zjuzin V., Bobkov V. *Isledovanie metodov udalenija spekl-shumov na ul'trazvukovyh izobrazhenijah*. The 23<sup>rd</sup> Intern. Conf. on Computer Graphics and Vision, Vladivostok, Sept. 2013, pp. 244–246. (In Russ.)

11. Touzi R. A review of speckle filtering in the context of estimation theory. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2002, vol. 40, iss. 11, pp. 2392–2404. doi: 10.1109/TGRS.2002.803727

12. Aja-Fernandez S., Alberola-Lopez C. On the estimation of the coefficient of variation for anisotropic diffusion speckle filtering. IEEE Transactions on Image Processing. Sept. 2006, vol. 15, no. 9, pp. 2694–2701. doi: 10.1109/TIP.2006.877360

13. Krissian K., Westin C., Kikinis R., Vosburgh K. G. Oriented Speckle Reducing Anisotropic Diffusion. IEEE Transactions on Image Processing. May 2007, vol. 16, no. 5, pp. 1412–1424. doi: 10.1109/TIP.2007.891803

14. Jong-Sen Lee, Jen-Hung Wen, Ainsworth T. L., Kun-Shan Chen, Chen A. J. Improved Sigma Filter for Speckle Filtering of SAR Imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009, vol. 47, no. 1, pp. 202–213. doi: 10.1109/TGRS.2008.2002881

15. Karabchevsky S., Kahana D., Ben-Harush O., Guterma H. FPGA-Based Adaptive Speckle Suppression Filter for Underwater Imaging Sonar. IEEE J. of Oceanic Engineering. Oct. 2011, vol. 36, no. 4, pp. 646–657. doi: 10.1109/JOE.2011.2157729

16. Dong X., Zhang D., Cui K., Hu C., Lv X. Spatial filtering strategies on deforestation detection using SAR

image textures. 2016 CIE Intern. Conf. on Radar (RADAR), Guangzhou, China, 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/RADAR.2016.8059472

17. Ramos-Llordén G., Vegas-Sánchez-Ferrero G., Martín-Fernández M., Alberola-López C., Aja-Fernández S. Anisotropic Diffusion Filter With Memory Based on Speckle Statistics for Ultrasound Images. IEEE Transactions on Image Processing. Jan. 2015, vol. 24, no. 1, pp. 345–358. doi: 10.1109/TIP.2014.2371244

18. Paul A., Mukherjee D. P., Acton S. T. Speckle Removal Using Diffusion Potential for Optical Coherence Tomography Images. IEEE J Biomed Health Inform. Jan. 2019, vol. 23, iss. 1, pp. 264–272. doi: 10.1109/JBHI.2018.2791624

19. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. 2nd. ed. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., USA, New Jersey 07458. 2001, 191 p.

20. Lee Jong-Sen Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. March 1980, vol. PAMI-2, no. 2, pp. 165–168. doi: 10.1109/TPAMI.1980.4766994

21. Frost V. S., Stiles J. A., Shanmugan K. S., Holtzman J. C. A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. March 1982, vol. PAMI-4, no. 2, pp. 157–166. doi: 10.1109/TPAMI.1982.4767223

22. Kuan D., Sawchuk A., Strand T., Chavel P. Adaptive restoration of images with speckle. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. March 1987, vol. 35, no. 3, pp. 373–383. doi: 10.1109/TASSP.1987.1165131

23. Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images. Sixth Intern. Conf. on Computer Vision (IEEE Cat. No.98CH36271), Bombay, India, 1998, pp. 839–846. doi: 10.1109/ICCV.1998.710815

24. Lopes A., Nezry E., Touzi R., Laur H. Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images. Intern. J. of Remote Sensing. 1993, vol. 14, iss. 9, pp. 1735–1758. doi: 10.1080/01431169308953999

25. Perona P., Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1990, vol. 12, iss. 7, pp. 629–639. doi: 10.1109/34.56205

26. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. IEEE Transactions on Image Processing. 2004, vol. 13, iss. 4, pp. 600–612. doi: 10.1109/TIP.2003.819861

27. Wang Z., Bovik A. C. A universal image quality index. IEEE Signal Processing Lett. 2002, vol. 9, iss. 3, pp. 81–84. doi: 10.1109/97.995823

28. Xue W., Zhang L., Mou X., Bovik A. C. Gradient magnitude similarity deviation: A highly efficient perceptual image quality index. IEEE Transactions on Image Processing. 2014, vol. 23, iss. 2, pp. 684–695. doi: 10.1109/TIP.2013.2293423

29. Tuzova A. A., Pavlov V. A., Belov A. A., Volvenko S. V. Comparison of Image Quality Assessment Metrics for Evaluation of Performance of Anisotropic Diffusion Filter for SAR Images. 2020 IEEE Intern. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EEEPolytech), St Petersburg, 2020, pp. 176–179. doi: 10.1109/EEEPolytech50912.2020.9243957

30. Abramov S., Abramova V., Lukin V., Ponomarenko N., Vozel B., Chehdi K., Egiazarian K., Astol Ja. Methods for Blind Estimation of Speckle Variance in SAR Images: Simulation Results and Verification for Real-Life Data. Computational and Numerical Simulations. 2014, ch. 24, pp. 303–327. doi: 10.5772/57040

31. Choi H., Jeong J. Speckle noise reduction technique for SAR images using statistical characteristics of speckle noise and discrete wavelet transform. Remote Sensing. May 2019, vol. 11, iss. 1184, pp. 1–27. doi: 10.3390/rs11101184

32. Xie Hua, Pierce L. E., Ulaby F. T. Statistical properties of logarithmically transformed speckle. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Mar. 2002, vol. 40, iss. 3, pp. 721–727. doi: 10.1109/TGRS.2002.1000333

33. Singh P., Pandey R. Speckle noise: Modelling and implementation. International Journal of Circuit Theory

and Applications. 2016, vol. 9, iss. 17, pp. 8717–8727.

34. Herman C., Lehmann E. L. The use of maximum likelihood estimates in  $\chi^2$  tests for goodness of fit. Ann. Math. Statist. Sep. 1954, vol. 25, iss. 3, pp. 579–586. doi: 10.1214/aoms/1177728726

35. Pearson K. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. Breakthroughs in Statistics: Methodology and Distribution. Eds. S. Kotz, N. L. Johnson. New York. Springer New York, 1992, pp. 11–28. doi: 10.1007/978-1-4612-4380-9\_2

36. Belov A. A., Pavlov V. A., Tuzova A. A. A Method of Finding Optimal Parameters of Speckle Noise Reduction Filters. 2020 Internet of Things, Smart Spaces and Next Generation Networks and Systems, Springer Intern. Publishing, 2020, pp. 133–141. doi: 10.1007/978-3-030-65729-1\_12

37. Tuzova A. A. The project to find the optimal parameters of speckle noise reduction filters. Filtering-SpeckleNoise\_main\_script.m file. Available at: <https://github.com/AnnaTuzova/Speckle-noise-project> (accessed 25.04.2021)

### Information about the authors

**Anna A. Tuzova**, Master (2020, Peter the Great St Petersburg Polytechnic University (SPbPU)), engineer (2021, St Petersburg State Marine Technical University). Author of 6 scientific publications. Area of expertise: signal processing, image processing, radar image processing. Address: St Petersburg State Marine Technical University (SMTU), 3 Lotsmanskaya St., St Petersburg 190121, Russia E-mail: [tuzova@corp.smtu.ru](mailto:tuzova@corp.smtu.ru) <https://orcid.org/0000-0001-8471-450X>

**Vitalii A. Pavlov**, Ph.D. (2020, Peter the Great St Petersburg Polytechnic University (SPbPU)), assistant (2020, Peter the Great St Petersburg Polytechnic University). Author of 30 scientific publications. Area of expertise: signal processing, image processing, computer vision, machine learning, deep learning, radar image processing. Address: Peter the Great St Petersburg Polytechnic University (SPbPU), 29 Polytechnicheskaya St., St Petersburg 195251, Russia E-mail: [pavlov\\_va@spbstu.ru](mailto:pavlov_va@spbstu.ru) <https://orcid.org/0000-0003-0726-6613>

**Andrei A. Belov**, specialist (1989, Peter the Great St Petersburg Polytechnic University (SPbPU)), Leading Engineer (2018, Peter the Great St Petersburg Polytechnic University (SPbPU)). Author of 15 scientific publications. Area of expertise: signal processing, image processing, radar image processing. Address: Peter the Great St Petersburg Polytechnic University (SPbPU), 29 Polytechnicheskaya St., St Petersburg 195251, Russia E-mail: [belov@spbstu.ru](mailto:belov@spbstu.ru) <https://orcid.org/0000-0003-0617-4514>

---