Подбор опорного спектра в методе перенормировки с ограничением для уменьшения спекл-шума на изображении, полученном радаром ALOS-1

А.В. Кокошкин

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия E-mail: shvarts65@mail.ru

Рассматривается применение метода перенормировки с ограничением (МПО) к изображениям, полученным с помощью одной из радиолокационных систем с синтезированием апертуры антенны (РСА). Делается это с целью борьбы со спекл-шумом. Возможность существенного снижения уровня спекл-шума появляется вследствие того, что МПО перенормирует спектр исходного изображения к модели опорного спектра, которая является моделью спектра оптического изображения «хорошего» качества. В связи с особенностями методики сбора данных радаром ALOS-1 (англ. Advanced Land Observing Satellite) исследуемое изображение сильно растянуто по одной из координат и сжато по другой. Показано, что эти трансформации приводят к изменениям пространственного спектра, который должен быть использован как опорный в процедуре МПО, поэтому применение классической модели универсального опорного спектра в МПО приводит к неудовлетворительным результатам. Последовательно демонстрируется методика подбора опорного спектра. Установлено, что правильный выбор исходных данных существенным образом влияет на конечный результат. За опорное принимается оптическое аэрокосмическое изображение без искажений (без растяжения и сжатия по осям). Чтобы процедура перенормировки привела к корректным результатам необходимо указанные выше искажения произвести над опорным изображением. То есть изображение хорошего качества для данной конкретной задачи — это опорное оптическое изображение, растянутое и сжатое по осям точно таким образом, как РСА-изображение, построенное по данным радара ALOS-1. Протестировано применение МПО в комбинации с медианной фильтрацией. Показано, что совместное использование МПО с отличным по идеологии методом даёт выигрыш в конечном результате, поскольку возможные потери полезной информации одного из методов будут компенсированы его дублёром.

Ключевые слова: цифровые изображения, дистанционное зондирование, обработка изображений, спекл-шум, опорный спектр, метод перенормировки с ограничением

Одобрена к печати: 10.02.2025 DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-28-41

Введение

Радиолокационные системы с синтезированием апертуры антенны (PCA) чрезвычайно широко используются в различных технологиях дистанционного зондирования Земли. Подобные системы применяют для решения большого количества прикладных задач в таких областях человеческой деятельности, как сельское хозяйство, экология, природные ресурсы, археология, чрезвычайные ситуации, промышленная и оборонная безопасность. При этом в большинстве случаев объектом исследования специалистов являются цифровые изображения. Однако для всех полученных с помощью РСА изображений характерно наличие мультипликативного спекл-шума. Это мешает объективному анализу и интерпретации полученных данных. Спекл-шум возникает из-за интерференции волн, вызванной множественным рассеянием от малых, относительно элемента разрешения, отражателей. Он проявляется в виде ярких точек, случайным образом в большом количестве разбросанных по всему изображению.

Для подавления спекл-шума на PCA-изображениях предложено большое количество алгоритмов цифровой обработки, например медианная фильтрация и локально-усредняющие пространственные фильтры. В других случаях применяют алгоритмы винеровской, калмановской или гомоморфной фильтрации. Особыми направлениями борьбы со спекл-шумом являются методы, использующие вейвлет-преобразование и фрактальное кодирование (Илюшин, 2011; Разманов и др., 2006; Achim et al., 2001; Isar et al., 2011; Ghazel et al., 2003). Недавно разработанный метод перенормировки с ограничением (МПО) создан для решения задач восстановления изображений, искажённых известной аппаратной функцией (АФ), при наличии неизвестных помех и шума (Гуляев и др., 2013; Кокошкин и др., 2015). В работах (Кокошкин, 2020, 2021, 2022; Кокошкин и др., 2021) показано, что МПО существенно снижает спекл-шум на цифровых изображениях.

Целью предложенной работы является показать, что правильный выбор исходных данных для создания модели опорного спектра — необходимое условие для корректной работы МПО.

Метод перенормировки с ограничением и модель опорного спектра

В представленной работе изображение определяется как двумерная функция M(x, y), где *x* и *y* — координаты на плоскости. Значение *M* в точке, задаваемой парой координат (*x*, *y*), является условной градацией яркости, принимающей значения от нуля (чёрный цвет) до 255 (белый цвет). Спектр двумерного дискретного преобразования Фурье изображения M(x, y)обозначается как FM(i, j), где *i* и *j* — координаты на плоскости пространственных частот. Все рисунки, изображающие спектры, центрированы, т.е. нулевая пространственная частота (FM(0, 0) — средняя яркость изображения) перенесена в центр (Gonzalez, Woods, 2008).

В работе (Гуляев и др., 2013) была предложена модель универсального опорного спектра (УОС), которая является усреднённой моделью спектра изображения «хорошего» качества. Физический смысл МПО состоит в следующем: процедура перенормирует пространственный спектр после инверсной фильтрации таким образом, чтобы среднее значение восстановленного спектра соответствовало УОС. При этом амплитуда гармоник должна укладываться в заданные пределы вокруг УОС.

Краткое описание алгоритма метода перенормировки с ограничением (Гуляев и др., 2013; Кокошкин и др., 2015):

Сначала вычисляется инверсная фильтрация. То есть спектр исходного искажённого $A\Phi$ и зашумлённого изображения — FM(i, j) — поэлементно делится на спектр этой $A\Phi - Faf(i, j)$.

Затем вычисляется амплитудный спектр исходного изображения, усреднённый по спрайту $(5 \times 5 \text{ пикселей}) - FMs(i, j)$. И делается перенормировка результата инверсной фильтрации на модель УОС – URS(i, j). Алгоритм МПО можно записать в виде следующего выражения:

$$FMp(i,j) = \frac{FM(i,j)}{Faf(i,j)} \cdot \frac{\left|Faf(i,j)URS(i,j)\right|}{FMs(i,j)} \cdot \frac{FMs(0,0)}{URS(0,0)},\tag{1}$$

где FMs(0, 0) и URS(0, 0) — значения соответствующих спектров при нулевой пространственной частоте; FMp(i, j) — перенормированный инверсно отфильтрованный спектр.

Ограничение, заявленное в названии метода, заключается в следующем. Так как в среднем спектр FMp(i, j) должен соответствовать УОС, то превышение преобразованного амплитудного спектра над уровнем УОС более чем в Ur раз интерпретируем как помеху. Это, помимо собственно помех, ограничивает и спектральные артефакты, присущие процедуре инверсной фильтрации, возникающие при операциях, близких к так называемому делению на ноль. Значение Ur обычно выбирается равным 4. В окрестности низких частот (вокруг нулевой пространственной частоты) диаметром 9 пикселей значение спектра не меняем. В этой «неприкосновенной» области остаётся только результат инверсной фильтрации. В конечном итоге с помощью обратного преобразования Фурье спектра FMp(i, j) получим восстановленное изображение.

Поскольку в данной работе предполагается, что какому-либо размытию исходное изображение не подвергалось, то искажающая аппаратная функция принимается игольчатой (шириной много менее 1 пикселя). Таким образом Faf(i, j) (спектр AФ) перестаёт фигурировать в формуле (1). И формула МПО принимает следующий вид:

$$FMp(i,j) = \frac{FM(i,j)URS(i,j)}{FMs(i,j)} \cdot \frac{FMs(0,0)}{URS(0,0)}.$$

Использованное в настоящей работе изображение (*puc. la*) (размером 2000×800 пикселей) создано на основе исходных данных, полученных с помощью японского радара PALSAR-1 (*англ*. Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) (длина волны 24 см) спутника ALOS-1 (*англ*. Advanced Land Observing Satellite). На нём демонстрируется фрагмент города Сан-Франциско в США (https://ietr-lab.univ-rennes1.fr/polsarpro-bio/sample_datasets/).



Рис. 1. Исходное РСА-изображение (a) и результат работы МПО с УОС (б)

При внимательном изучении (см. *рис.* 1) можно заметить, что оно несколько вытянуто по вертикали. Пространственный спектр исходного изображения (FM(i, j)) никаким образом не обнаруживает это искажение (*рис.* 2, см. с. 31). Этот спектр выглядит как зашум-

лённый спектр обычного (неискажённого) изображения. И если для подавления спекл-шума применить процедуру МПО с классической моделью УОС (*URS*(*i*, *j*)) (Гуляев и др., 2013), то результат будет неудовлетворительный (см. *puc. 16*). Несмотря на то, что произошло подавление спеклов, вместе с этим произошло и существенное размытие деталей изображения. Причина такого эффекта заключается в неправильном выборе модели опорного спектра. Универсальный опорный спектр, использованный для получения *puc. 16*, изображён на *puc. 3*.



Рис. 2. Амплитудный пространственный спектр исходного изображения на *рис. 1a* (в логарифмическом масштабе)



Рис. 3. Универсальный опорный спектр (классическая форма), использованный в процедуре МПО при получении *рис. 16* (в логарифмическом масштабе)

Для корректного применения перенормировки нужно знать особенности спектра изображения хорошего качества для данной конкретной задачи. Предположим, что прототипом «идеального» изображения хорошего качества можно считать оптическое изображение этой же самой местности. Таким образом, необходимо найти аэрокосмическое изображение именно этой локации. Результат поиска показан на *puc. 4* (см. с. 32) (использована общедоступная Яндекс-карта), приблизительно подобран соответствующий поворот. Размер в пикселях по вертикали — 464, а по горизонтали — 1226. Следующим шагом, с опорой на реперные точки, производится трансформация изображения на *puc. 4* таким образом, чтобы его размеры по вертикали и горизонтали точно совпали с размером исходного PCA-изображения на *рис. 1а.* В результате этих преобразований получаем изображение (*рис. 5a*) размером 2000×800 пикселей, которое предполагается прототипом идеального изображения хорошего качества для исходного РСА-изображения.



Рис. 4. Фрагмент оптического изображения Сан-Франциско (464×1226 пикселей)



Рис. 5. Прототип идеального изображения хорошего качества для исходного РСА-изображения (*a*); результат применения МПО с опорным спектром на *рис. 7* к исходному РСА-изображению на *рис. 1a* (*б*); результат применения медианной фильтрации к *рис. 1a* (*в*)

Амплитудный пространственный спектр (FS(i, j)) (в логарифмическом масштабе) предполагаемого прототипа показан на *puc.* 6.

При сравнении *puc. 2 и 6* очевидно — они сильно отличаются между собой. Это следствие того, что при создании классической модели УОС предполагалось, что спектр идеального изображения хорошего качества имеет центральную симметрию. Это характерно для обычных оптических изображений. При создании классического УОС по расходящимся от центра кольцам усреднялись сотни спектров изображений, и только потом, на основе достаточно представительной статистики, была предложена эта модель (Гуляев и др., 2013). В решаемой сейчас задаче применять усреднение по кольцам к спектру на *рис. 6* контрпродуктивно. Поскольку в результате получится нечто похожее на классический УОС (см. *рис. 3*).



Рис. 6. Амплитудный пространственный спектр идеального изображения хорошего качества на *рис. 5* (в логарифмическом масштабе)



Рис. 7. Опорный спектр для МПО — усреднённый по спрайту спектр идеального изображения хорошего качества на *рис.* 6 (в логарифмическом масштабе)

Для корректной работы метода перенормировки необходимо сохранить основные особенности спектра изображения хорошего качества. Значит, для создания модели опорного спектра, адекватного именно этой задаче, нужно проводить усреднение спектра идеального изображения (см. *puc. 6*) по спрайтам (плавающим окном). Результат этой операции показан на *puc. 7* (*FRS*(*i*, *j*)).

Спектр на *рис*. 7 готов для использования в качестве опорного в процедуре перенормировки вместо УОС. Он сохраняет основные особенности спектра прототипа изображения хорошего качества и при этом, в отличие от УОС, точно соответствует не только трансформации изображения, но и сохраняет привязку к конкретному рельефу местности. Результат применения МПО с подобранным опорным спектром к исходному РСА-изображению представлен на *рис*. 56.

Рисунок 8 показывает изображения *puc. la*, *5a*, *б* и *в* в объёмном виде. По вертикали отложены условные градации яркости от нуля (чёрный цвет) до 255 (белый цвет), а две других оси представляют собой плоскость изображения 2000×800 пикселей. На *puc. 8a* (*Msar*(*x*, *y*) соответствует исходному PCA-изображению на *puc. la*) виден спекл-шум (многочисленные флуктуации яркости по всему полю изображения). На *puc. 8б* (*Mopt*(*x*, *y*) — это *puc. 5a* в другой проекции) спекл-шум отсутствует. *Рисунок 8в* (*Mcrm*(*x*, *y*)) — это *puc. 5б* в объёмном виде. *Рисунок 8г* (*Mmed*(*x*, *y*)), для сравнения, показывает результат применения медианной фильтрации к исходному PCA-изображению на *puc. 1a*.





Естественным образом возникает вопрос о возможности создать некое подобие универсального опорного спектра для его использования в рассматриваемой задаче. Для этого на общедоступных сайтах в интернет-пространстве найдём ряд тестовых изображений и вырежем из них фрагменты, точно по размерам (464×1226 пикселей) соответствующие опорному оптическому изображению Сан-Франциско на *рис. 4*. Некоторые результаты поиска показаны на *рис. 9*. Слева направо и сверху вниз это: Мона Лиза, лиса, трактор, танк, инфузория, рентген, Вашингтон, Москва, Нью-Йорк, Санкт-Петербург.



Рис. 9. Тестовые изображения размером 464×1226 пикселей

Заметим, что тестовые аэрокосмические изображения сознательно взяты в масштабах, отличных от масштаба *puc. 4*. Кроме того, помимо подобранного идеального, были использованы несколько вариантов исходного оптического изображения Сан-Франциско. В них был осуществлён сдвиг относительно реперных точек и изменён общий контраст. В общей сложности выбрано порядка двух десятков тестовых изображений, существенным образом отличающихся от идеального опорного оптического изображения Сан-Франциско на *puc. 4*. Следующим шагом была трансформация тестовых изображений на *puc. 9* таким образом, чтобы они по размеру стали соответствовать исходному РСА-изображению на *рис. 1a* (2000×800 пикселей). Процедура точно соответствовала способу получения *рис. 5a* из *рис. 4*. Результаты трансформаций тестовых изображений приведены на *рис. 10*.



Рис. 10. Тестовые изображения размером 2000×800 пикселей

Вид всех пространственных спектров изображений на *puc. 10* похож на спектр, представленный на *puc. 6.* Но, естественно, каждый имеет свои небольшие особенности. Чтобы создать опорный спектр для его использования вместо УОС в процедуре МПО, все спектры тестовых изображений на *puc. 10* были усреднены по спрайту. Затем из них был вычислен средний спектр — *FRS20(i, j)* (*puc. 11*, см. с. 37). Именно он будет использоваться в качестве опорного. Как видно из сравнения *puc. 7* и *11*, их форма очень похожа. Только у спектра на *puc. 11* практически нет особенностей, специфических для спектров, вычисленных из отдельных конкретных изображений. Он имеет более гладкую форму, поскольку является усреднением по ряду разнообразных реализаций.



Рис. 11. Опорный спектр для МПО (в логарифмическом масштабе). Среднее по 20 усреднённым по спрайту спектрам оптических изображений хорошего качества (примеры некоторых на *рис. 9*)



Рис. 12. Результат применения МПО с опорным спектром по усреднению набора тестовых спектров (*a*); среднее между *рис. 12а* и медианной фильтрацией *рис. 5в* (б)

Рисунок 12a (см. с. 37) демонстрирует результат применения МПО к исходному РСАизображению на *рис. 1a* с использованием опорного спектра, представленного на *рис. 11*. При внимательном изучении *рис. 56* (МПО с идеально подобранным опорным спектром) и 12a можно заметить небольшое снижение качества восстановленного изображения при использовании усреднённого по многим реализациям опорного спектра. Об этом свидетельствует и некоторое снижение такого объективного показателя, как мера структурного подобия SSIM (*англ.* Structural Similarity Index Measure) (*таблица*).

Опорный спектр	Оптическое изображение (опорное, хоро- шего качества)	Исходное РСА- изображение (со спекл-шумом)	Обработка МПО исходного РСА- изображения	Медианная филь- трация исходного РСА-изображения	Среднее между МПО и медиан- ной фильтрацией
Идеальный	1	0,338	0,414	0,427	0,481
Усреднение по набору тесто- вых спектров			0,347		0,473

Мера структурного подобия (SSIM) с опорным оптическим изображением (хорошего качества)

В *таблице* сравнение как исходного PCA-изображения, так и результатов его обработки разными способами проводится с выбранным в качестве опорного оптического изображения хорошего качества *puc. 5a*. Сравнение с самим собой опорного изображения даёт 100%-е соответствие SSIM = 1. Изображение PCA подобно по структуре опорному изображению примерно на 34 % (SSIM = 0,338). Для восстановления изображения PCA с помощью МПО при идеальном опорном спектре (см. *puc. 7*) SSIM = 0,414 и SSIM = 0,347 при усреднённом опорном спектре.

Рисунок 13 демонстрирует рис. 12, но в объёмных изображениях: МПО с опорным спектром по усреднению набора 20 тестовых спектров — Mcrm20(x, y), а также среднее между рис. 12а и медианной фильтрацией рис. 5в (Mmeam(x, y)).



Рис. 13. Объёмные изображения, соответствующие *рис. 12: а* — МПО с опорным спектром по усреднению набора тестовых спектров; *б* — среднее между *рис. 12а* и медианной фильтрацией *рис. 5в*

На *рис. 5в* и *8г* (*Mmed*(x, y)) для сравнения с предложенным методом показан результат медианной фильтрации исходного PCA-изображения. Этот метод достаточно хорошо справляется с поставленной задачей, SSIM = 0,427. По этому критерию медианная фильтра-

ция выглядит лучше, чем МПО. Однако, как известно, при некоторых условиях медианная фильтрация может удалить и часть полезной информации на обрабатываемом изображении. Особенно на высококонтрастных изображениях.

В свою очередь МПО (как уже было сказано выше) разрабатывался для восстановления изображений, искажённых известной АФ, при наличии неизвестных помех и шума. И он (МПО) как инструмент, претендующий на универсальность, имеет свои ограничения и особенности. Например, использование усреднённого опорного спектра всегда хуже, чем применение идеального, поскольку это приводит к некоторому размытию результата обработки. Тем не менее МПО может быть полезен, поскольку его использование в комбинации с отличным по идеологии методом даст выигрыш в конечном результате. На *рис. 126* показано совместное применение МПО (опорный спектр усреднённый) и медианной фильтрации к исходному РСА-изображению (попиксельно вычислено среднее значение между *рис. 5в* и *12а*). По экспертной оценке очевидно, что на *рис. 126* произошло улучшение различимости деталей изображения по сравнению с *рис. 12а*. Это подтверждается данными *таблицы* (правый столбец). Улучшение меры структурного подобия происходит и относительно медианной фильтрации. Методы работают в разных областях: МПО — в частотной, медианная фильтрация — в пространственной. Поэтому можно быть уверенными в том, что возможные потери полезной информации одного из методов будут компенсированы его дублёром.

Поскольку правильный подбор модели опорного спектра под конкретную решаемую задачу является необходимым условием для получения корректных результатов, то в работе (Кокошкин, 2020) для применения МПО проводилось преобразование ультразвукового изображения из секторального вида в прямоугольный.

Необходимо заметить, что изображения из открытых источников в той или иной степени могут подвергаться изменениям (либо издателем, либо авторами публикаций). Это замечание не касается как используемого здесь материала, так и гидролокационного изображения из работы (Кокошкин и др., 2021), полученного непосредственно в процессе эксперимента сотрудниками Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. В случае с гидролокатором изображение не подвергалось трансформации по осям (растяжению и сжатию). Поэтому в процедуре перенормировки с ограничением использовался классический вариант универсального опорного спектра.

С целью выявления всего потенциала МПО приглашаются к сотрудничеству все заинтересованные лица и организации, оперирующие с исходными цифровыми изображениями. Тем более что целесообразность применения тех или иных методов обработки изображений, в соответствии с конкретными целями и задачами, следует оценить именно профессионалам в своих областях научно-технической деятельности.

Заключение

Эта работа посвящена тестированию применения метода перенормировки с ограничением (МПО) к цифровым изображениям с целью повышения их качества. Применение МПО к изображениям меняет их пространственную структуру. Метод перенормировки с ограничением, по своей сущности, перенормирует спектр обрабатываемого изображения к модели опорного спектра. Опорный спектр, в свою очередь, является моделью спектра оптического изображения хорошего качества (Гуляев и др., 2013; Кокошкин и др., 2015). Показано, что правильный подбор модели опорного спектра под конкретную решаемую задачу — необходимое условие для получения корректных результатов. Всё вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что применение МПО к цифровым изображениям позволяет существенно повысить их качество.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

- 1. *Гуляев Ю. В.*, *Зражевский А. Ю.*, *Кокошкин А. В.*, *Коротков В. А.*, *Черепенин В. А.* Коррекция пространственного спектра, искаженного оптической системой, с помощью метода опорного изображения. Часть 3. Универсальный опорный спектр // Журн. радиоэлектроники. 2013. № 12. 16 с. http://jre.cplire.ru/jre/dec13/3/text.html.
- 2. Илюшин С. В. Подавление спекла на медицинских ультразвуковых изображениях при помощи фрактального кодирования // Т-Сотт. 2011. № 3. С. 22–26.
- 3. *Кокошкин А. В.* Применение метода перенормировки с ограничением к обработке медицинских ультразвуковых изображений // Журн. радиоэлектроники. 2020. № 10. 12 с. https://doi. org/10.30898/1684-1719.2020.10.1.
- 4. *Кокошкин А. В.* Применение метода перенормировки с ограничением к изображениям дистанционного зондирования, полученным с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой // Журн. радиоэлектроники. 2021. № 3. 12 с. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.4.
- 5. *Кокошкин А. В.* Особенности применения метода перенормировки с ограничением к изображениям со спекл-шумом // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67. № 12. С. 1167–1178. DOI: 10.31857/S0033849422120075.
- 6. Кокошкин А. В., Коротков В. А., Коротков К. В., Новичихин Е. П. Использование метода перенормировки с ограничением для восстановления искаженных изображений при наличии помех и шума с неизвестными параметрами // Журн. радиоэлектроники. 2015. № 7. 11 с. http://jre.cplire.ru/jre/jul15/4/text.html.
- 7. Кокошкин А. В., Новичихин Е. П., Смольянинов И. В. Применение методов спектральной и пространственной обработки к изображениям, полученным с помощью гидролокатора // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2021. Т. 13. № 3. С. 377–382. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.377.
- 8. *Разманов В. М., Кривцов А. П., Долотов С. А.* Особенности измерений рельефа морского дна интерферометрическим гидролокатором бокового обзора // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 1. С. 58–64.
- 9. Achim A., Bezerianos A., Tsakalides P. Novel Bayesian multiscale method for speckle removal in medical ultrasound images // IEEE Trans. Medical Imaging. 2001. V. 20. Iss. 8. P. 772–783. DOI: 10.1109/42.938245.
- 10. *Isar A., Firoiu I., Nafornita C., Moga S.* SONAR images denoising // Sonar Systems / ed. Kolev N.Z. 2011. DOI: 10.5772/19190.
- 11. *Ghazel M., Freeman G. H., Vrscay E. R.* Fractal image denoising // IEEE Trans. Image Processing. 2003. No. 12. P. 1560–1578.
- 12. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital image processing. 3rd ed. Pearson Prentice Hall, NJ, 2008. 976 p.

Selection of reference spectrum in the constrained renormalization method to reduce speckle noise in an ALOS-1 radar image

A.V. Kokoshkin

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch Fryazino, Moscow Region 141190, Russia E-mail: shvarts65@mail.ru

The application of the constrained renormalization method (CRM) to images obtained using one of synthetic-aperture radar (SAR) systems is considered. This is done in order to combat speckle noise. The possibility of a significant reduction in the speckle noise level appears due to the fact that the CRM renormalizes the spectrum of the source image to the reference spectrum model, which is a model of the spectrum of an optical image of good quality. Due to peculiarities of the ALOS-1 (Advanced Land Observing Satellite) radar data collection technique, the image under study is strongly stretched along one of the coordinates and compressed along the other. It is shown that these transformations lead to changes in the spatial spectrum that should be used as a reference in the CRM procedure, therefore, the application of the classical model of universal reference spectrum in CRM

leads to unsatisfactory results. The method of selecting the reference spectrum is demonstrated step by step. It has been established that correct choice of the initial data significantly impacts the final result. An optical aerospace image without distortion (without stretching and compression along the axes) is taken as the reference image. In order for the renormalization procedure to lead to correct results, it is necessary to produce the above distortions over the reference image. That is, an image of good quality, for this particular task, is this optical reference image stretched and compressed along the axes in exactly the same way as the SAR image constructed from ALOS-1 radar data. The use of CRM in combination with median filtering has been tested. It is shown that the combined use of CRM with a method that is different in ideology gives a gain in the final result, since possible loss of useful information by one of the methods will be compensated by its backup.

Keywords: digital images, remote sensing, image processing, speckle noise, reference spectrum, constrained renormalization method

Accepted: 10.02.2025 DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-28-41

References

- 1. Gulyaev Yu.V., Zrazhevsky A.Yu., Kokoshkin A.V., Korotkov V.A., Cherepenin V.A., Correction of the spacial spectrum distorted by the optical system using the reference image method. Part 3. General-purpose reference spectrum, *J. Radio Electronics*, 2013, No. 12, 16 p. (in Russian), http://jre.cplire.ru/jre/dec13/3/text.html.
- 2. Ilyushin S.V., Speckle suppression in medical ultrasound images using fractal coding, *T-Comm*, 2011, No. 3, pp. 22–26 (in Russian).
- 3. Kokoshkin A.V., Using the method of renormalization with limitation for medical ultrasound image processing, *J. Radio Electronics*, 2020, No. 10, 12 p. (in Russian), https://doi. org/10.30898/1684-1719.2020.10.1.
- 4. Kokoshkin A. V., Application of the method of renormalization with limitation to remote sensing images obtained with synthetic aperture radars, *J. Radio Electronics*, 2021, No. 3, 12 p. (in Russian), https://doi. org/10.30898/1684-1719.2021.3.4.
- 5. Kokoshkin A.V., Features of an application of the constrained renormalization method to images with speckle noise, *J. Communications Technology and Electronics*, 2022, V. 67, No. 12, pp. 1419–1429, DOI: 10.1134/S1064226922120075.
- 6. Kokoshkin A. V., Korotkov V. A., Korotkov K. V., Novichihin E. P., Using the method of renormalization limited to restore the distorted image in the presence of interference and noise with unknown parameters, *J. Radio Electronics*, 2015, No. 7, 11 p. (in Russian), http://jre.cplire.ru/jre/jul15/4/text.html.
- Kokoshkin A. V., Novichihin E. P., Smolyaninov I. V., Application of spectral and spatial processing methods to sonar images, *Radioelektronika*, *Nanosistemy*, *Informacionnye Tehnologii*, 2021, V. 13, No. 3, pp. 377– 382 (in Russian), DOI: 10/17725/rensit.2021.13.377.
- 8. Razmanov V. M., Krivtsov A. P., Dolotov S. A., Specific features of measuring seafloor topography with an interferometric side-looking sonar, *J. Communications Technology and Electronics*, 2006, V. 51, No. 1, pp. 52–58, https://doi.org/10.1134/S1064226906010074.
- 9. Achim A., Bezerianos A., Tsakalides P., Novel Bayesian multiscale method for speckle removal in medical ultrasound images, *IEEE Trans. Medical Imaging*, 2001, V. 20, Iss. 8, pp. 772–783, DOI: 10.1109/42.938245.
- 10. Isar A., Firoiu I., Nafornita C., Moga S., SONAR images denoising, In: *Sonar Systems*, Kolev N. Z. (ed.), 2011, DOI: 10.5772/19190.
- 11. Ghazel M., Freeman G. H., Vrscay E. R., Fractal image denoising, *IEEE Trans. Image Processing*, 2003, No. 12, pp. 1560–1578.
- 12. Gonzalez R.C., Woods R.E., *Digital image processing*, 3rd ed., Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2008, 976 p.