

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.10>

УДК: 621.397

## МОДИФИКАЦИЯ ФИЛЬТРА ВИНЕРА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ОПОРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

А.В. Кокошкин, Е.П. Новичихин

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал  
141190, Фрязино, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 17 июля 2024 г.

**Аннотация.** Целью работы является модификация фильтра Винера для его использования при наличии спектрально-локальных помех. Спектрально-локальными помехами называются искажения спектра изображения, которые занимают ограниченные области пространственного спектра. Причем уровни амплитуд гармоник спектра этих помех существенно превосходят близлежащие амплитуды спектра неискаженного (идеального) изображения. Модификация сделана на основе адаптивного метода опорного изображения. Это расширяет возможности фильтра Винера восстанавливать искаженные изображения с неизвестными аддитивными шумами и помехами.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, обработка изображений, фильтр Винера, спектрально-локальные помехи, адаптивный метод опорного изображения.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

**Автор для переписки:** Кокошкин Александр Владимирович, [shvarts65@mail.ru](mailto:shvarts65@mail.ru)

## Введение

Дистанционное зондирование в различных диапазонах электромагнитных волн, в большом количестве практических приложений, предполагает получение изображений. При этом аппаратная функция (АФ) регистрирующей системы вносит искажения в конечный результат [1,2,3]. Диаграмма направленности антенны приемного устройства вносит изменения в пространственный спектр изображения. Кроме того, воздействие шумов и помех различного происхождения оказывает негативное влияние на качество данных. Решение практических задач по реконструкции искаженных изображений при наличии дополнительных шумов и помех предполагает использование тех или иных методов регуляризации (регуляризация по Тихонову, фильтр Винера (ФВ), метод опорного изображения (МОИ), метод перенормировки с ограничением (МПО)) [1-7]. Для исследователей всегда актуальным является расширение инструментария и повышение эффективности уже существующих способов восстановления изображений, полученных с помощью дистанционного зондирования.

В предлагаемой работе проводится модификация фильтра Винера на основе адаптивного метода опорного изображения. Целью работы является модификация фильтра Винера для его использования при наличии спектрально-локальных помех. Спектрально-локальными помехами называются искажения спектра изображения, которые занимают ограниченные области пространственного спектра. Причем уровни амплитуд гармоник спектра этих помех существенно превосходят близлежащие амплитуды спектра неискаженного (идеального) изображения. Причиной подобных помех могут быть как особенности записывающей данные аппаратуры (в том числе сбои в ее работе), так и атмосферные явления (дождь, снег, неоднородность атмосферы). В некоторых задачах спектрально-локальными помехами могут являться даже особенности самого объекта наблюдения (преимущественно ориентированные или периодически повторяемые элементы изображения).

## 1. Фильтр Винера

Пространственный спектр  $J(\vec{f})$  изображения на выходе системы выражается через спектр исходного неискаженного изображения  $J_0(\vec{f})$ , спектр АФ  $A(\vec{f})$  и спектр  $N(\vec{r})$  – аддитивного шума:

$$J(\vec{f}) = A(\vec{f})J_0(\vec{f}) + N(\vec{f}). \quad (1)$$

Оценку решения (3) относительно  $J_0(\vec{f})$  можно получить с помощью инверсной фильтрации, разделив обе части (1) на  $A(\vec{f})$ . В отсутствии шума формула (1) превращается в:

$$J_0(\vec{f}) = \frac{J(\vec{f})}{A(\vec{f})}. \quad (2)$$

Инверсная фильтрация обладает низкой помехоустойчивостью. Для компенсации влияния шума  $N(\vec{f})$  и ошибок в определении параметров АФ можно использовать метод Винера [1]. Фильтр Винера значительно менее, чем инверсная фильтрация, подвержен влиянию помех (шума), т.к. при его синтезе наряду с аппаратной функцией, используется информация о энергетических спектрах исходного изображения  $|J_0(\vec{f})|^2$  и шума  $|N(\vec{f})|^2$ . Частотная характеристика восстанавливающего фильтра Винера имеет вид [1]:

$$J_0(\vec{f}) = \left( \frac{1}{A(\vec{f})} \cdot \frac{|A(\vec{f})|^2}{|A(\vec{f})|^2 + \frac{|N(\vec{f})|^2}{|J_0(\vec{f})|^2}} \right) \cdot J(\vec{f}) \quad (3)$$

Обычно имеются приблизительные представления о спектральных характеристиках шума и сигнала. Поэтому часто предполагают, что отношение не зависит от частоты, то есть является константой  $K$ , которую эмпирически

подбирают, исходя из целей восстановления изображения (для получения наилучшего результата по экспертной оценке):

$$J_0(\vec{f}) = \left( \frac{1}{A(\vec{f})} \cdot \frac{|A(\vec{f})|^2}{|A(\vec{f})|^2 + K} \right) \cdot J(\vec{f}) \quad (4)$$

Метод опорного изображения оперирует со спектром после инверсной фильтрации. Чтобы достигнуть цели нашей работы – объединить в одном методе лучшие качества винеровской фильтрации и МОИ, необходимо в формуле (4) выделить инверсную фильтрацию. То есть вынесем  $\left( \frac{1}{A(\vec{f})} \right)$  в формуле (4) за скобки:

$$J_0(\vec{f}) = \left( \frac{|A(\vec{f})|^2}{|A(\vec{f})|^2 + K} \right) \cdot \frac{J(\vec{f})}{A(\vec{f})} \quad (5)$$

## 2. Адаптивный метод опорного изображения

В предлагаемой здесь работе используем упрощенный адаптивный метод опорного изображения (АМОИ) [5], с использованием модели универсального опорного спектра [6]. Его алгоритм работает следующим образом:

- 1) По формуле (2) вычисляем инверсно-отфильтрованный спектр для восстанавливаемого изображения (ИНВ).
- 2) Вычисляем универсальный опорный спектр (УОС) [6].
- 3) Задаем величину окрестности около УОС, то есть задаем  $sA$  и  $sB$  ( $sA$  – величина, во сколько раз амплитуды гармоник спектра после инверсной фильтрации могут быть больше УОС и  $sB$  – величина, во сколько раз они могут быть меньше УОС).
- 4) Попиксельно проверяем, попадает ли каждая амплитуда ИНВ (инверсно-отфильтрованного спектра) в заданную окрестность около УОС. Если нет, то при превышении верхней границы вычисляем спектр АМОИ = УОС  $\times$   $sA$ , а если ИНВ ниже нижней границы, то вычисляем

$АМОИ = УОС / sB$ . В случае соответствия амплитуд ИНВ заданному интервалу  $АМОИ = ИНВ$ .

После выполнения этого алгоритма получается спектр АМОИ, который не выходит за пределы некоторой заданной окрестности вокруг универсального опорного спектра. Обратное преобразование Фурье позволяет получить из этого спектра восстановленное изображение.

### 3. Модификация фильтра Винера с помощью МОИ

В работе [8] было показано что МОИ и АМОИ хорошо справляются с задачей подавления спектрально-локальных помех. В свою очередь, при восстановлении изображений с помощью классического ФВ, борьба со спектрально-локальными помехами принципиально невозможна. Чтобы преодолеть это ограничение в формуле (5) заменим выражение для инверсной фильтрации в отсутствии шума  $\frac{J(\bar{f})}{A(\bar{f})}$  на АМОИ. Таким образом, при сохранении всех возможностей ФВ вводятся ограничения по амплитуде в спектре реконструируемого изображения.

Проиллюстрируем работу модифицированного фильтра Винера на примерах.

Аэрокосмическое изображение [9] рис.1а. Автор [9] искажение в виде наклонных полос называет «периодической несинхронной помехой». Такие помехи зачастую присутствуют на аэрокосмических изображениях, особенно там, где съемочная аппаратура питается от бортовых генераторов, имеющих достаточно высокую переменную частоту [9]. Классический фильтр Винера не может обеспечить подавление такой помехи. На рис. 1б показан амплитудный пространственный спектр рис. 1а. В спектральной области периодическая несинхронная помеха выглядит как гребни гармоник, существенно превышающие уровень гармоник исходного не искаженного изображения. На рис. 1в показано восстановленное модифицированным ФВ изображение рис. 1а. Соответственно пространственный амплитудный

спектр реконструкции изображен на рис. 1г. На нем отфильтрованы превышающие заданный уровень гармоники. Работа АМОИ дает совершенно аналогичные результаты рисунку 1. Голубым цветом на рис. 1 и далее показаны уровни ограничения по амплитуде (на основе УОС) сверху и снизу.

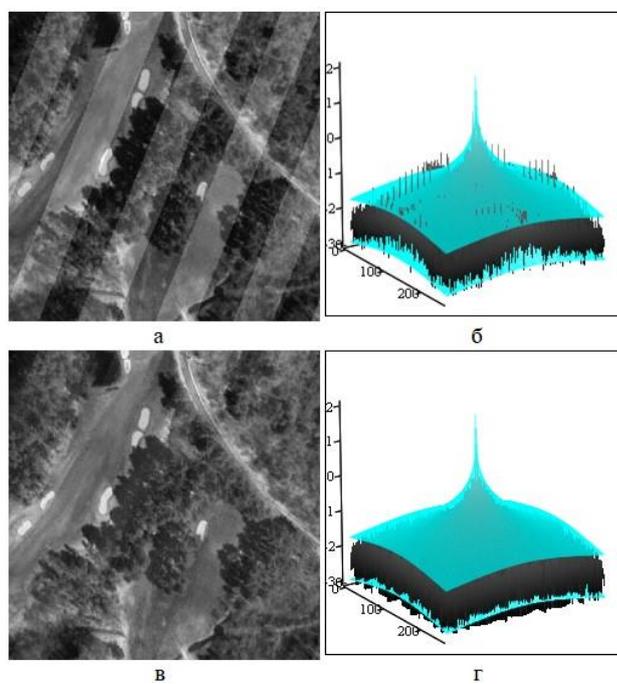


Рис. 1 Исходное аэрокосмическое изображение с периодической несинхронной помехой [9] – а. Спектр рис. 1а в логарифмическом масштабе – б. Рис. 1а восстановленный с помощью модифицированного фильтра Винера – в. Спектр рис. 1в в логарифмическом масштабе – г. Голубым цветом показаны уровни ограничения сверху и снизу по амплитуде (на основе УОС).

Чтобы проверить все возможности предложенной методики усложним задачу. Дефокусируем изображение рис. 1а с помощью аппаратной функции «круглое пятно» радиусом  $S_0 = 6$  пикселей. И дополнительно добавим на изображение равномерный аддитивный шум на 30 Дб меньше максимальной градации яркостей изображения. Рис. 2а демонстрирует результат по описанным выше дополнительным операциям искажения исходного изображения. Рис. 2б показывает пространственный спектр рис. 2а. Рис. 2в изображает результат восстановления рис. 2а с помощью инверсной фильтрации. Рис. 2г – амплитудный пространственный спектр рис. 2в. Рис. 2д показывает восстановление рис. 2а классическим ФВ. Рис. 2е демонстрирует спектр рис. 2д. На рис. 2ж изображен результат

реконструкции рис.2а с помощью модифицированного фильтра Винера.  
Рис. 2з – спектр рис. 2ж.

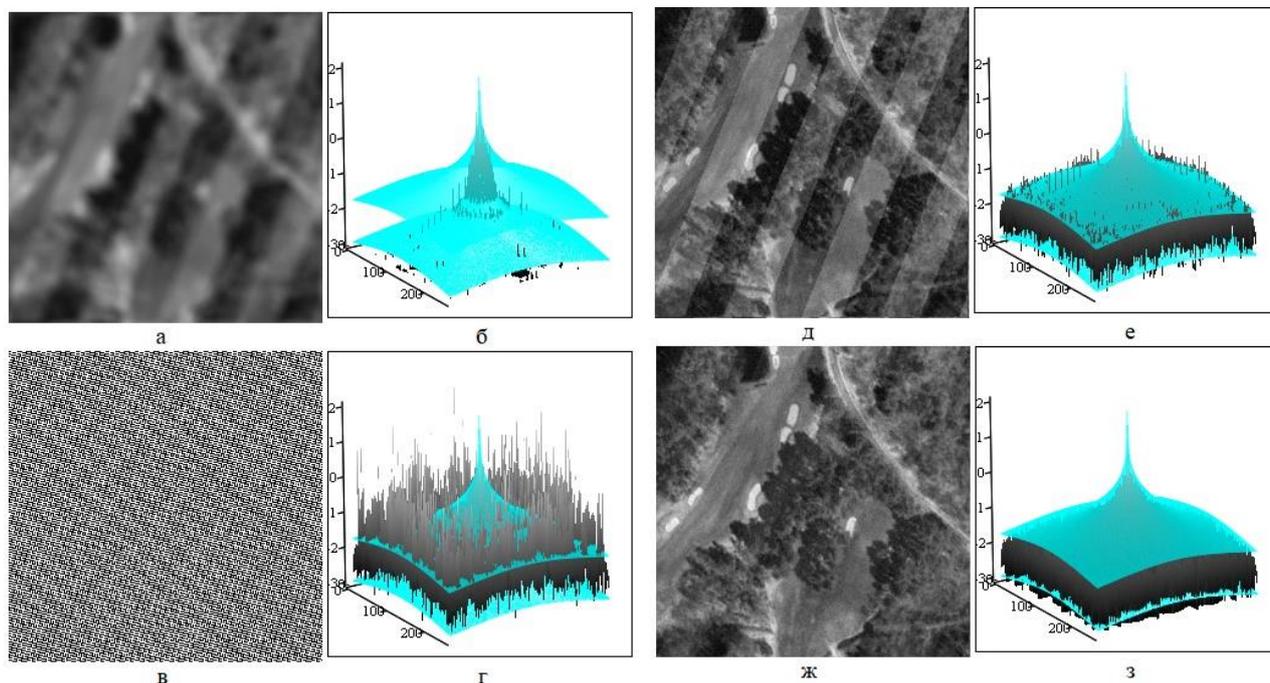


Рис. 2. Левый столбец – изображения, правый столбец – соответствующие им амплитудные спектры в логарифмическом масштабе. Изображение рис. 1а дефокусированное АФ «круглое пятно» радиусом  $S_0 = 6$  пикселей изображение, с равномерным аддитивным шумом 30 Дб – а. Восстановление рис. 2а инверсной фильтрацией – в. Восстановление рис. 2а классическим фильтром Винера – д. Восстановление рис. 2а модифицированным фильтром Винера – ж.

Из рисунка 2 видно, что, как и ожидалось, при наличии дополнительного шума инверсная фильтрация перестает работать (рис. 2в, рис. 2г). Классический фильтр Винера хорошо справляется с шумами и успешно реконструирует рис. 2а при известной искажающей АФ, но ничего не может сделать со спектрально-локальной помехой (рис. 2д). Это видно по спектру рис. 2е, на котором остались гармоники этой помехи, превышающие допустимый уровень. Что касается модифицированного ФВ, то он очень уверенно подавляет спектрально-локальную помеху. Это хорошо видно по спектру (рис. 2з), на котором амплитуды всех гармоник восстановленного изображения (рис. 2ж) находятся не выше верхней допустимой границы универсального опорного спектра.

На практике, в большинстве случаев, спектрально-локальные помехи накладываются на уже искаженное аппаратной функцией изображение. Обусловлено это тем, что аэрокосмические изображения в различных диапазонах электромагнитных волн формируются антенной системы дистанционного зондирования, диаграмма направленности которой, в зависимости от длины волны используемого сигнала, в большей или меньшей степени «размывает» изображение. И только потом, из-за особенностей конструкции регистрирующей аппаратуры, или из-за эффектов турбулентности на трассе распространения радиоволн добавляются спектрально-локальные помехи. Смоделируем такую ситуацию. В качестве исходного идеального (не искаженного) аэрокосмического изображения возьмем рис.3 а. – самолеты на аэродроме. Дефокусируем его искажающей аппаратной функцией «круглое пятно» радиусом  $S_0 = 6$  пикселей – рис. 3б.

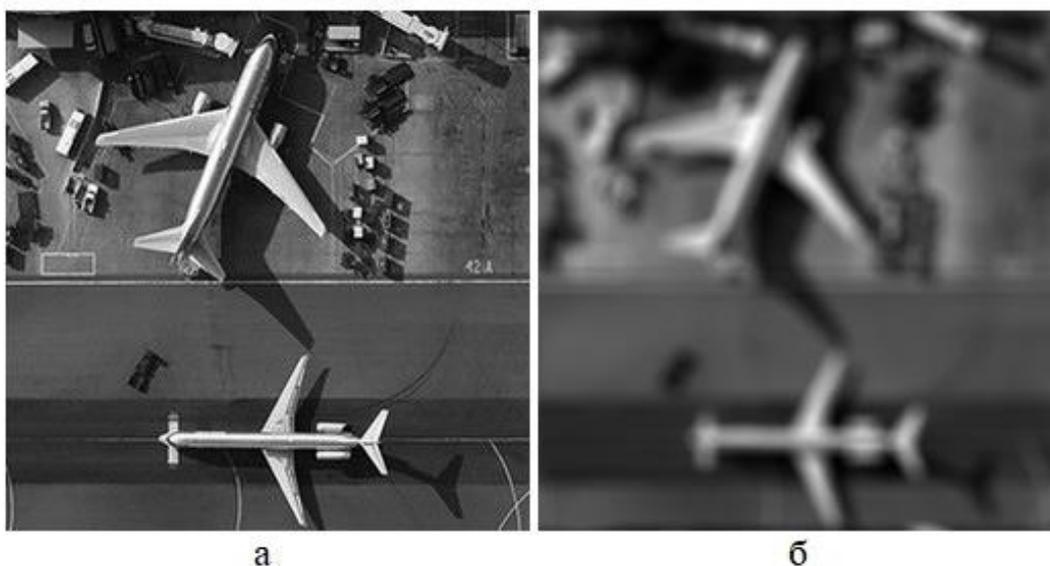


Рис. 3. Исходное идеальное (не искаженное) аэрокосмическое изображение – а. Дефокусированное искажающей АФ «круглое пятно» радиусом  $S_0 = 6$  пикселей изображение рис. 3а – б.

Следующим шагом наложим на рис. 3б спектрально-локальную помеху подобную той, которая была в предыдущем примере и равномерный аддитивный шум 30 Дб – рис. 4а. Спектр рис. 4а показан на рис. 4б. Применение инверсной фильтрации в этом случае не приводит к успешной реконструкции (рис. 4в, рис. 4г). Использование для восстановления классического ФВ тоже нельзя

признать удовлетворительным (рис. 4д, рис. 4е). Обычный фильтр Винера в данном случае работает еще хуже, чем в предыдущем примере, где было реконструировано все кроме спектрально-локальной помехи. Наиболее адекватно работает модифицированный ФВ (рис. 4ж, рис. 4з).

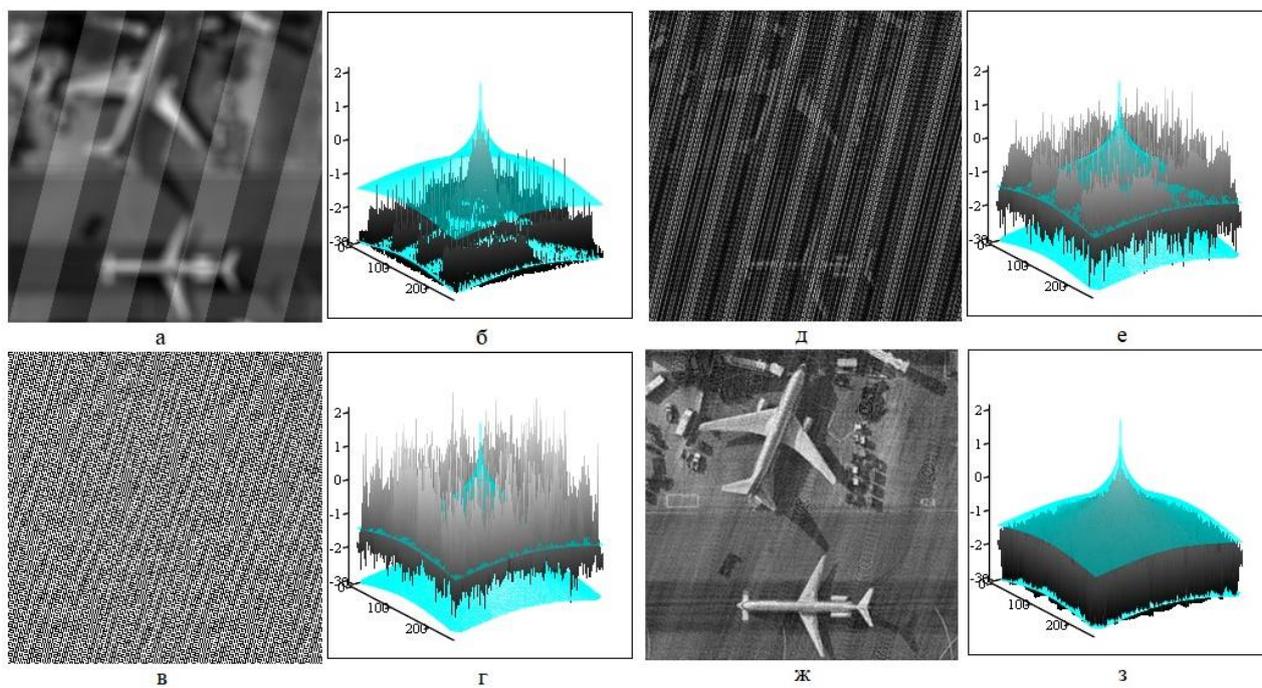


Рис. 4. Левый столбец – изображения, правый столбец – соответствующие им амплитудные спектры в логарифмическом масштабе. Изображение рис. 3а дефокусированное АФ «круглое пятно» радиусом  $S_0 = 6$  пикселей изображение, с равномерным аддитивным шумом 30 Дб – а. Восстановление рис. 4а инверсной фильтрацией – в. Восстановление рис. 4а классическим фильтром Винера – д. Восстановление рис. 4а модифицированным фильтром Винера – ж.

## Заключение

Классический фильтр Винера хорошо справляется с восстановлением изображений искаженных известными аппаратной функцией и шумом. Однако, в случае привнесения спектрально-локальных помех, ФВ перестает быть эффективным. В предлагаемой работе предложена модификация ФВ на основе адаптивного метода опорного изображения. Работа новой методики протестирована на примерах с периодической несинхронной помехой. Модифицированный таким образом фильтр Винера сочетает в себе как свои традиционные возможности, так и новые возможности АМОИ

включая способность подавления спектрально-локальных помех. Наряду с разработанным ранее использованием универсального опорного спектра для оценки отношения шум – сигнал в фильтре Винера [10], предложенный метод может быть добавлен в арсенал инструментов по восстановлению изображений, полученных с помощью дистанционного зондирования. Это расширяет возможности фильтра Винера восстанавливать искаженные изображения с неизвестными аддитивными шумами и помехами.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

### Литература

1. Gonzalez R.C., Woods R.E., Digital Image Processing. NJ. Prentice Hall, International Version 3rd Edition. 2012. 1071p.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. – Методы решения некорректных задач. М.Наука, 1979.
3. Зражевский А.Ю. и др. Повышение качества радиоизображений // Нелинейный мир. – 2010. – №. 9. – С. 582-590.
4. Гуляев Ю.В. и др. Коррекция пространственного спектра, искаженного оптической системой, с помощью метода опорного изображения. Часть 1. Классический метод опорного изображения (МОИ) // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – №. 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec13/1/text.html>
5. Гуляев Ю.В. и др. Коррекция пространственного спектра, искаженного оптической системой, с помощью метода опорного изображения. Часть 2. Адаптивный метод опорного изображения (АМОИ). // Журнал радиоэлектроники – 2013. – №. 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec13/2/text.html>
6. Гуляев Ю.В. и др. Коррекция пространственного спектра, искаженного оптической системой, с помощью метода опорного изображения. Часть 3. Универсальный опорный спектр. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2013. – №. 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec13/3/text.html>

7. Кокошкин А.В. и др. Использование метода перенормировки с ограничением для восстановления искаженных изображений при наличии помех и шума с неизвестными параметрами. // Журнал радиоэлектроники – 2015. – № 7. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul15/4/text.html>
8. Зражевский А.Ю. и др. Влияние спектрально-локальных помех на восстановление изображения методом опорного изображения. // Журнал радиоэлектроники. – 2014. – №. 1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan14/9/text.html>
9. Б.В. Костров «Теория и методология применения секвентного анализа для обработки аэрокосмических изображений». Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Рязань. 2012.
10. А.В. Кокошкин и др. Использование универсального опорного спектра для оценки отношения шум – сигнал в фильтре Винера. // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – №. 7. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul15/6/text.html>

**Для цитирования:**

Кокошкин А.В., Новичихин Е.П. Модификация фильтра Винера на основе метода опорного изображения. // Журнал радиоэлектроники. 2024. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.10>