

## МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН.

А.Ю.Зражевский, А.В.Кокошкин, Е.П.Новичихин, С.В.Титов  
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино Московской области

**Аннотация.** Предложен и методом численного моделирования проверен способ улучшения качества радиотепловых изображений ММ диапазона волн, основанный на априорной информации о статистических характеристиках спектров объектов аналогичного класса и известной передаточной функции антенны приемного устройства. Реализуется этот метод как фильтрация ложных выбросов в пространственном спектре улучшаемого радиотеплового изображения. Показано, что пространственное разрешение может быть увеличено в 2-4 раза в зависимости от уровня шумов и точности задания передаточной функции.

### 1. Общие положения.

Из-за относительно небольших размеров антенн, применяемых в системах радиовидения ММ диапазона, пространственное разрешение изображений часто оказывается недостаточным для уверенного распознавания объектов. Поэтому из различных методов восстановления и улучшения изображений [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] в ММ диапазоне в первую очередь необходимы те, которые улучшают пространственное разрешение.

Широко применяемым [1 – 4, 7] методом восстановления изображения является использование двумерного преобразования Фурье. Искажающее влияние антенны, при этом, сводится к модулированию пространственного спектра исходного изображения. Таким образом, зная спектр искаженного изображения и модуляционную передаточную функцию антенны (МПФА), можно восстановить спектр исходного изображения и, следовательно, само неискаженное изображение.

Если известна диаграмма направленности антенны (ДНА)  $\vec{A}(\vec{r})$  и исходное неискаженное изображение  $I_0(\vec{r})$ , искаженное изображение на выходе системы можно записать в виде:

$$I(\vec{r}) = \iint_D A(\vec{r} - \vec{r}') I_0(\vec{r}') ds(\vec{r}'), \quad (1)$$

где  $D$  – область наблюдения,  $ds(\vec{r})$  - элементарная площадка в точке  $(x, y)$ .

На ДНА накладывается условие нормировки  $\iint_D A(\vec{r}) ds(\vec{r}) = 1$ , что обеспечивает сохранение средней яркости изображения.

Если перейти к спектральным представлениям неискаженного и искаженного изображений:

$$\begin{aligned} J_0(\vec{f}) &= \iint_D e^{2\pi i \vec{f} \cdot \vec{r}} I_0(\vec{r}) ds(\vec{r}), \\ J(\vec{f}) &= \iint_D e^{2\pi i \vec{f} \cdot \vec{r}} I(\vec{r}) ds(\vec{r}) \end{aligned} \quad (2)$$

и модуляционной передаточной функции антенны (МПФА)

$$B(\vec{f}) = \iint_D e^{2\pi i \vec{f} \cdot \vec{r}} A(\vec{r}) ds(\vec{r}), \quad (3)$$

то в частотной области пространственный спектр  $J(\vec{f})$  искаженного изображения выражается через спектр неискаженного  $J_0(\vec{f})$  изображения и  $B(\vec{f})$ :

$$J(\vec{f}) = B(\vec{f}) J_0(\vec{f}).$$

Таким образом, если известна модуляционная передаточная функция антенны  $B(\vec{f})$ , спектр неискаженного изображения можно восстановить по формуле:

$$J_0(\vec{f}) = J(\vec{f}) / B(\vec{f}), \quad (4)$$

после чего само неискаженное изображение рассчитывается по формуле обратного Фурье-преобразования:

$$I_0(\vec{r}) = \iint_D e^{-2\pi i \vec{f} \cdot \vec{r}} J_0(\vec{f}) dS(\vec{f}). \quad (5)$$

Расчет двумерных пространственных спектров (2), (3) и обратного Фурье-преобразования (5) не представляет принципиальных трудностей с применением быстрого преобразования Фурье. Однако этого нельзя сказать о расчете спектра неискаженного изображения (4) в высокочастотных областях спектра, поскольку в нем участвует частное двух малых чисел, находящихся на границе погрешности дискретного преобразования Фурье. В конечном итоге эффективность восстановления спектра исходного изображения (4) целиком зависит от удачного способа решения этой задачи.

На практике исследователь не знает какое конкретное изображение должно получиться после улучшения. Он располагает только радиоизображением  $I(\vec{r})$  (существенно худшего разрешения, чем неискаженное изображение  $I_0(\vec{r})$ ). Предлагается использовать в качестве опорной априорную информацию о статистических характеристиках пространственного спектра объектов подобного класса, основываясь на которой можно отфильтровать ложные выбросы в высокочастотных областях спектра  $J_0(\vec{f})$ , вычисляемого по (4). После такой фильтрации по (5) вычисляется искомое изображение.

## 2. Пример реализации метода для изображений бронетехники.

Для моделирования радиотеплового портрета условного объекта (чьё разрешение мы хотим улучшить) используем исходное фото «Танк Abrams наехал на машину (warinform.ru)» (рис.1).



Рисунок 1. Исходное изображение для моделирования радиотеплового портрета.

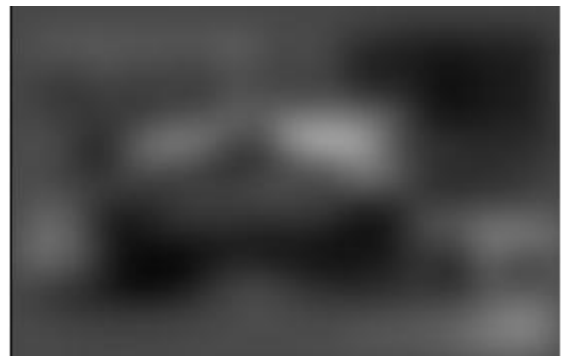


Рисунок 2. Смоделированное радиотепловое изображение.

Задаём ширину диаграммы направленности (ДН) антенной системы с распределением Гаусса, шириной на уровне 0,53 равной 6 пикселям. Формируем оптическое изображение, наблюдаемое с этой ДН по формуле (1) (рис.2).

Изображение такого качества может быть получено пассивной радиометрической системой [8].

Примем за опорное изображение «Танк Тигр ( my-photo.ru Автор Logex78)» (рис.3).



Рисунок 3. Опорное изображение

Вычисляем спектр опорного изображения. Разбиваем пространство частот опорного спектра на 2 области. Первая размером 8x8 пикселей соответствует низким, а вторая содержит все остальные пиксели и соответствует высоким пространственным частотам.

Вторую область разбиваем на окна усреднения (размером 4 на 4 пиксела) и вычисляем для каждого окна статистические характеристики (СКО -  $s$  и среднее -  $m$ ).

Делим спектр смоделированного радиотеплового изображения на нормированный спектр аппаратной функции (диаграммы направленности) формула (4). В результате получаем спектр  $J_0(\vec{f})$ , из которого методом обратного преобразования Фурье по формуле (5) восстанавливаем исходное изображение. Однако, по причине выбросов в области высоких пространственных частот восстанавливаемое изображение разрушается. Это происходит из-за деления в (4) на гармоники, значение которых очень мало.

Производим процедуру фильтрации спектра  $J_0(\vec{f})$  для ликвидации больших значений амплитуд в высокочастотной области, а именно вторую область спектра  $J_0(\vec{f})$  сравниваем с величинами  $n$  опорного спектра, для каждого из окон усреднения, равными  $n = m + a \times s$ , где  $a$  - варьируемый коэффициент. При этом первую (низкочастотную) область спектра  $J_0(\vec{f})$  используем без изменений в составе восстанавливаемого спектра. Как мы видим изображение танка Абрамс (рис.1) существенно отличается от изображения танка Тигр (рис.3), чей спектр принят нами за опорный. Однако, вся главная информация о контурах изображений находится вблизи области низких пространственных частот, назовём её – «неприкосновенная область», она же первая область (см. выше).



Рисунок 4. Восстановленное изображение

Заметим, что при малом размере «неприкосновенной» низкочастотной области нельзя улучшить качество изображения, просто отбросив после деления всю

высокочастотную область пространственного спектра (приравняв нулю все амплитуды вне этой области). В этом случае получим некоторое размытое изображение визуально немного лучше исходного «радиоизображения». Рисунок 4 иллюстрирует изображение, улучшенное предлагаемым нами методом.

### **3. Результаты по восстановлению смоделированных радиотепловых изображений огнестрельного оружия.**

Применим рассмотренный в разделах 1 и 2 метод к задаче улучшения радиотеплового изображения огнестрельного оружия. За исходное изображение примем фото пистолетак на фоне бронежилета:



Рисунок 5. Исходное изображение для моделирования радиотеплового портрета.

Затем, используя процедуру размытия, смоделируем изображение по пространственному разрешению близкое радиотепловому в ММ диапазоне волн.



Рисунок 6. Смоделированное радиотепловое изображение.



Рисунок 7. Опорное изображение

В качестве опорного изображения примем изображение пистолета другой марки и на белом фоне (рис. 7).

Продлав вышеописанные процедуры, улучшающие качество изображения, получим изображение с улучшенным пространственным разрешением (рис.8).



Рисунок 8. Восстановленное изображение

#### 4. Оценка качества восстановления изображений при различных мешающих факторах.

Для количественной оценки улучшения пространственного разрешения при разных режимах наблюдения и методах фильтрации был разработан специальный шаблон изображения, использующий похожие буквы «Н», «К», «И», равномерно и под разными углами распределенные по полю, от стандартных шрифтов разных размеров. Разрешение определяется по минимальному размеру читаемой буквы. Результат размытия исходного шаблона (шрифт Times New Roman размеры 8-20 (см. рис.9), показан на рис.10.

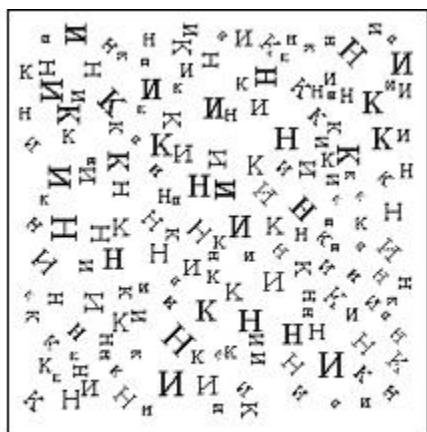


Рисунок 9. Тестовое изображение.

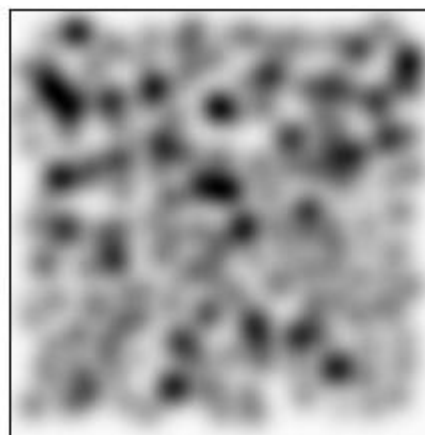


Рисунок 10. Смоделированное изображение.

С помощью шаблона, изображенного на рис.9, оценивалось влияние на пространственное разрешение таких факторов, как неточное знание ширины диаграммы направленности антенны и отношения «сигнал/шум».

Для Гауссовой диаграммы направленности (ДН) варьировалась ее ширина  $\Delta$  относительно исходной  $\Delta_0$ . Для  $\Delta$  в диапазоне  $(1,05 - 0,95)\Delta_0$  визуальные отличия восстанавливаемого изображения от исходного мало заметны.

Получено, что допустимая ошибка в ширине ДН, при которой достижимо восстановление изображения и увеличение его пространственного разрешения, составляет



не более 10%. При  $\Delta$  вне диапазона (1,2– 0,8)  $\Delta_0$  восстановление изображения встречает существенные затруднения.

Влияние отношения «сигнал/шум» на пространственное разрешение восстанавливаемого изображения оценивалось при добавлении на каждый пиксель изображения гауссова шума с варьируемым значением среднеквадратичного отклонения. Получено, что если «сигнал/шум»  $\geq 30$ дБ, то, для предложенной фильтрации, пространственное разрешение возможно существенно улучшить, а при большем уровне шума качество восстанавливаемых изображений ухудшается. Рис.11 иллюстрирует восстановленное изображение размытого шаблона (см. рис.10) при отношении «сигнал/шум», равном 30 дБ.

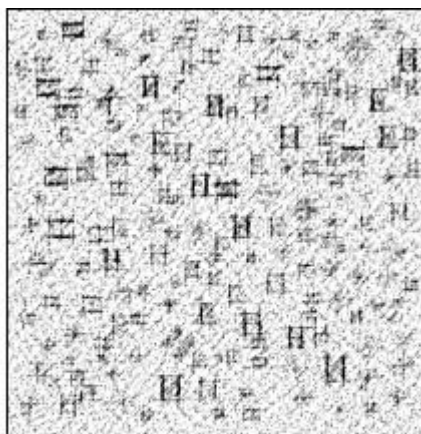


Рисунок 11. Восстановленное изображение при отношении «сигнал/шум» = 30 дБ.

Исследовалось влияние изменения масштаба опорного изображения на качество восстанавливаемого. Выяснено, что, если изменения масштаба находятся внутри диапазона 0,3 – 1,5, то пространственное разрешение восстановленных изображений меняется несущественно, наблюдается только изменение их контрастности.

Численное моделирование показало, что фильтрация паразитных частот в двумерном пространстве восстанавливаемого спектра, использующая «опорный» спектр перед процедурой восстановления изображения, при известной (с точностью не хуже 10%) аппаратной функцией прибора, позволяет улучшить пространственное разрешение изображения, полученного с отношением «сигнал/шум», большим 25 дБ. Предлагаемая фильтрация изображения практически полностью устраняет муар и улучшает качество изображения.

Если под качеством изображения (применительно к задачам радиовидения) понимать совокупность его свойств, позволяющих обнаруживать и идентифицировать объекты, то оно может оцениваться количественно посредством вероятности их правильного опознавания, которая, как показано в [5], в свою очередь, определяется отношением сигнал/шум и количеством разрешаемых строк на критический размер объектов. Последнее определяется, очевидно, соотношением реализуемого углового разрешения системы радиовидения и угловым размером объектов. Таким образом, улучшение пространственного разрешения радиоизображений, достигаемое предлагаемым нами методом, помогает существенно улучшать качество изображений и тем самым, повышает возможности практического использования радиоизображений с относительно небольшим пространственным разрешением. Что, в свою очередь, позволит существенно снизить требования к аппаратной части систем радиовидения в ММ диапазоне волн.

## Литература

1. Р. Гонсалес, Р. Вудс. Цифровая обработка изображений. М. «Техносфера» , 2005, 1071 стр.
2. А.Ю.Зражевский, В.А.Голунов, С.С.Гапонов, Е.П.Новичихин, Е.Б.Терентьев, А.П.Чернушич. Особенности и возможности поляризационного стереорадиовидения в ММ диапазоне волн. Радиотехника, №5, 2006 г., с.19-29.
3. А.Ю.Зражевский, А.В.Кокошкин, Е.П.Новичихин, XVI Международная конференция «Радиолокация и радиосвязь», Москва, 2008, Тезисы доклада. «Моделирование метода улучшения пространственного разрешения радиотепловых портретов различных объектов в ММ диапазоне волн», стр.280-285.
4. А.Ю.Зражевский, А.В.Кокошкин, Е.П.Новичихин, Всероссийский семинар по радиопрозрачности миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 2009, «Метод улучшения пространственного разрешения радиотепловых портретов в миллиметровом диапазоне волн», стр.92.
5. Infrared and Millimeter Waves. v.4 Millimeter Systems. Edited by J. Button, J.S. Wilts. 1981, Academic Press, New York.
6. Пирогов Ю.А., Гладун В.В., Тищенко Д.А., Тимановский А.Л., Шлемин И.В, Джен С.Ф., // Журнал радиоэлектроники (<http://jre.cplire.ru>), 2004, №3.
7. Бейтс Р. Мак-Доннел М. Восстановление и реконструкция изображений. /Пер. с англ.к. ф-м н. Б.С. Кругликова и С.Л. Ярославского под редакцией д. ф-м н. Л.П. Ярославского. М.: «Мир», 1989, 487с.
8. В.А. Голунов, Г.К.Загорин, А.Ю. Зражевский, Б.А. Розанов, А.В. Соколов, Л.Ф. Черная. Пассивная радиолокация на миллиметровых волнах. В кн. Вопросы перспективной радиолокации. М., Изд. «Радиотехника», 2003, с. 393-463.