

УДК 621.319

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ ПО ПРОРЕЖЕННОЙ МАТРИЦЕ НАБЛЮДЕНИЙ

В. К. Клочко, заведующий кафедрой ЭиММ РГРТУ, д.т.н.; klochkovk@mail.ru

В. П. Кузнецов, доцент кафедры ЭиММ РГРТУ, к.т.н.; klochkovk@mail.ru

Рассматривается задача восстановления изображений объектов по данным радиометра со сканирующей антенной. Шаг сканирования по углу места в несколько раз больше шага сканирования по азимуту, и матрица наблюдений оказывается прореженной вдоль строк – число ее строк в несколько раз меньше числа столбцов. Это приводит к искажению изображений объектов и снижению их разрешающей способности. Целью работы является разработка методов восстановления изображений, позволяющих сохранять сверхразрешение системы наблюдения в условиях прореженной матрицы радиометрических наблюдений. Предлагаются оптимальные матричные методы восстановления для случаев одноканальной и двухканальной обработки матриц наблюдения. Дается модификация метода восстановления с помощью фильтра Винера в области пространственных частот, основанная на интерполяции матрицы наблюдений. Приводятся результаты моделирования работы алгоритмов, основанных на предложенных методах. Показано преимущество по точности восстановления матричного метода, основанного на двухканальной обработке.

Ключевые слова: радиотеплолокация, радиометр, прореженная матрица наблюдений, восстановление изображений, сверхразрешение, матричный метод, итерационный метод, фильтр Винера.

Введение

При наблюдении удаленных объектов, имеющих тепловой контраст на фоне местности, с помощью радиометрической системы [1, 2], работающей в миллиметровом или сантиметровом диапазоне длин волн, возникает необходимость повышения четкости получаемых изображений за счет сверхразрешения [3] системы наблюдения.

Под сверхразрешением здесь понимается получение разрешающей способности системы наблюдения по угловым координатам ниже рэлеевского порога. Такой порог определяется шириной диаграммы направленности антенны (ДНА) на уровне 0,5 мощности.

Традиционно в радиотеплолокации [1] применяется антенна, сканирующая контролируемый участок местности построчно с непрерывным съемом данных с частотой дискретизации.

Скорость сканирования ограничена временем накопления принимаемого сигнала радиометром. Поэтому целесообразно уменьшать количество строк формируемой матрицы радиометрических наблюдений. В этом случае матрица наблюдений, выдаваемая системой первичной обработки на алгоритмы восстановления, полу-

чается прореженной вдоль строк – число ее строк в несколько раз меньше числа столбцов.

Восстановление по прореженной матрице наблюдений приводит к потере точности восстановления и соответственно ухудшению разрешающей способности системы наблюдения, обеспечивающей необходимое сверхразрешение по угловым координатам.

Цель работы

Цель работы заключается в разработке методов восстановления изображений, позволяющих сохранять необходимое сверхразрешение системы наблюдения в условиях прореженной матрицы радиометрических наблюдений.

Под необходимым сверхразрешением понимается разрешающая способность по угловым координатам (азимуту и углу места), достижимая без прореживания матрицы наблюдений.

Система наблюдения

На рисунке 1 представлена структурная схема одного измерительного канала пассивного микроволнового радиометра, принимающего и преобразующего электромагнитные волны излучения в миллиметровом или сантиметровом радиодиапазоне. Источником электромагнитной

энергии являются объект наблюдения и подстилающая поверхность. Антенна радиометра принимает сигнал с определенной поляризацией и преобразует электромагнитные волны в определенные структуры колебаний в волноводах [2]. При этом осуществляется пространственно-угловое сканирование контролируемого участка местности в телевизионном режиме со смещением ДНА на размер элемента дискретизации. В результате сканирования формируется кадр обзора. Угловое разрешение антенны на уровне 0,5 мощности составляет $1^0 - 3^0$.

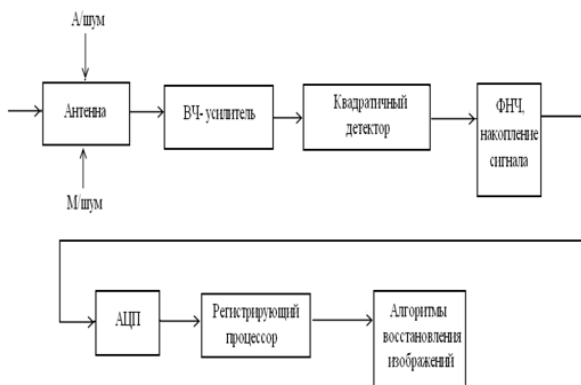


Рисунок 1 – Структурная схема радиометра

Высокочастотный усилитель (ВЧ-усилитель) усиливает принятый антенной сигнал в определенной полосе частот. В тракт первичной обработки вместе с полезным сигналом попадают аддитивный и мультипликативный шумы атмосферы и усилителя. Квадратичный детектор измеряет мощность флуктуирующего шумового сигнала. При квадратичном преобразовании появляется постоянная (полезная) составляющая на нулевой частоте, которая несет информацию о мощности исходного шумового сигнала, и высокочастотная (мешающая) составляющая. Для подавления высокочастотной составляющей используется фильтр низких частот (ФНЧ), требующий определенного времени накопления сигнала (от 0,1 до 1 с). После ФНЧ данные поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), регистрирующее устройство и алгоритмы восстановления изображений. При наличии нескольких антенн тракты первичной обработки строятся параллельно.

Постановка задачи

Радиометрическая система, работающая в миллиметровом или сантиметровом диапазоне длин волн, наблюдает объекты на местности. Объекты излучают поле $X = \{x(\theta_i, \varphi_j)\}$, $i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, N}$, элементы дискретизации которого $x(\theta_i, \varphi_j)$ имеют смысл интенсивности излучения в i, j -м направлении и рассматриваются в системе

угловых координат наблюдателя: θ_i – по углу места и φ_j – по азимуту в i, j -х элементах дискретизации. Числа M и N определяют размеры поля X в числе элементов дискретизации.

Антенна радиометра построочно сканирует зону обзора по азимуту и углу места. При каждом θ_i, φ_j -м угловом положении линии визирования антенны принимаемое поле X усиливается радиометром и после ФНЧ регистрируется в виде напряжения $y(\theta_i, \varphi_j)$. Величина $y(\theta_i, \varphi_j)$ носит интегральный характер и подчинена модели наблюдений в виде свертки:

$$y(\theta_i, \varphi_j) = \iint_{D_{\theta, \varphi}} \alpha(\theta_1, \varphi_1) x(\theta_i - \theta_1, \varphi_j - \varphi_1) d\theta_1 d\varphi_1 + p(\theta_i, \varphi_j), \quad (1)$$

где интегрирование по области $D_{\theta, \varphi}$ ведется в угловых координатах по элементам $x(\theta, \varphi)$ поля X с весовой функцией $\alpha(\theta, \varphi)$, называемой аппаратной. Аппаратная функция (АФ) $\alpha(\theta, \varphi)$ отражает действия ДНА, тракта первичной обработки и атмосферных влияний. Шумы аппаратуры представлены слагаемым $p(\theta_i, \varphi_j)$.

Перейдем от интегральной (1) к суммарной модели наблюдений в i, j -х элементах дискретизации искомого поля изображения объекта $X = \{x(i, j)\}$, $i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, N}$:

$$y(i, j) = \mu \sum_{i_1=-m}^m \sum_{j_1=-n}^n \alpha(i_1, j_1) x(i - i_1, j - j_1) + p(i, j), \quad (2)$$

$$i = m + 1, h, M - m, \quad j = n + 1, N - n,$$

где $2m + 1$ и $2n + 1$ – ширина ДНА соответственно по углу места и азимуту (на уровне 0,5 мощности) в количестве элементов дискретизации; $\alpha(i, j)$ – значения АФ; $p(i, j)$ – белый шум с дисперсией σ_p^2 ; множитель μ символизирует переход от интегральной модели (1) к суммарной (2) и в дальнейшем не рассматривается; $h \geq 1$ – шаг сканирования по углу места.

Задача заключается в восстановлении ненаблюдаемого поля X на основе наблюдений $Y = \{y(i, j)\}$, подчиненных модели (2).

Данная задача относится к классу некорректно поставленных задач и в указанной постановке при $h = 1$ решается известными методами восстановления полей в пространственной или частотной областях [3 – 5]. Однако случай $h > 1$ в литературе специально не рассматривается, хотя он приводит к изменению структуры алгоритмов восстановления, точности восстановления и в силу этого имеет самостоятельный научный и практический интерес.

Изучим те изменения, к которым приводит увеличение шага h по углу места.

Оптимальный матричный метод Восстановления изображений

Суть метода заключается в матричной форме записи [5] системы уравнений (2):

$$\bar{Y} = A\bar{X} + \bar{P}, \quad (3)$$

где $\bar{Y}$ – $M_1(N-2n)$ -вектор-столбец измерений, полученный считыванием M_1 наблюдаемых строк матрицы $Y = \{y(i, j)\}$ ($M_1 = M-2m$ при $h = 1$ и $M_1 < M-2m$ при $h > 1$); $\bar{X}$ – MN -вектор-столбец искомого поля, представляющий построчную запись матрицы X ; $\bar{P}$ – $M_1(N-2n)$ -вектор-столбец помех; A – $M_1(N-2n) \times MN$ -матрица значений АФ, расположенных по определенному правилу при $h = 1$ [5]. При $h > 1$ это правило усложняется.

Ниже показан пример заполнения предварительно обнуленной матрицы $A = \{a(i, j)\}$ значениями АФ $\alpha(i, j) = \alpha(i - m - 1, j - n - 1)$, $i = \overline{1, 2m+1}$, $j = \overline{1, 2n+1}$, на языке Matlab:

```
i=0; ih=0;
for ii=m+1:h:M-m
    ih=ih+1;
    j0=N*h*(ih-1);
    for jj=1:N-2*n
        i=i+1; j0=j0+1;
        for il=1:2*m+1
            j=j0+N*(il-1);
            for jl=1:2*n+1
                A(i,j)=alfa(il,jl);
                j=j+1;
            end %jl
        end %il
    end %jj
end %ii
```

В соответствии с методом наименьших квадратов (МНК) поиск оценки $\bar{X}$ подчиняем критерию минимума квадрата евклидовой нормы:

$$J = \|\bar{Y} - A\hat{X}\|^2 = (\bar{Y} - A\hat{X})^T (\bar{Y} - A\hat{X}), \quad (4)$$

где “ T ” – символ транспонирования. Из необходимого условия существования экстремума функционала (4) находим МНК-оценки $\hat{X}$:

$$\begin{aligned} \partial J / \partial \bar{X} &= -2(\bar{Y} - A\hat{X})^T A = 0^T, \quad A^T (\bar{Y} - A\hat{X}) = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \hat{X} &= A^+ \bar{Y}, \quad A^+ = (A^T A + \delta \cdot E)^{-1} A^T, \end{aligned} \quad (5)$$

где E – единичная матрица; δ – параметр регуляризации, необходимый для устойчивого обращения матрицы $A^T A$. Матрица A^+ в (5) является псевдообратной для A и может быть найдена также сингулярным разложением A , например, в среде Matlab: $A^+ = \text{pinv}(A, \delta)$.

Элементы вектора $\hat{X}$ построчно заполняют $M \times N$ -матрицу $\hat{X}$ восстановленного изображения. Точность восстановления определяется ковариационной матрицей ошибок восстановления [5] и имеет определенный предел, зависящий от контраста изображений (как аналога отношения сигнал-шум). Восстановление изображения дает эффект сверхразрешения – возможность понизить рэлеевский порог разрешения по угловым координатам в 2-3 раза (как “обужение” ДНА).

Трудность реализации оптимального алгоритма восстановления в матричной форме (5) заключается в большой размерности матрицы A избыточной структуры. Поэтому применять данный алгоритм целесообразно для выделенных небольших фрагментов матрицы Y .

Преодолеть трудности большой размерности можно с помощью алгоритмов двухэтапного восстановления изображений [5], если АФ разделяется по переменным. Однако асимметричность искажений ДНА в радиометре вследствие движения антенны и большого времени накопления сигнала в ФНЧ приводит к ошибкам такого описания АФ. Исследования показывают, что матричный метод чувствителен к ошибкам АФ и с их увеличением ведет себя неустойчиво.

Другой путь преодоления большой размерности матриц связан с применением градиентных и итерационных методов восстановления [3]. Эти методы работают со скалярной моделью наблюдений (2). При $h > 1$ структура алгоритмов данных методов также требует определенной модификации. Алгоритм итерационного метода выглядит следующим образом на k -й итерации:

$\hat{x}_{k+1}(i, j) = \hat{x}_k(i, j) \cdot \alpha_k(i, j) \otimes y(i, j) / \alpha_k(i, j) \otimes \hat{y}_k(i, j)$,
 $i = \overline{m+1, M-m}, j = \overline{n+1, N-n}, k = \overline{0, K-1}$, где

$$\alpha_k(i, j) \otimes y(i, j) = \sum_{i_1=-m}^m \sum_{j_1=-n}^n \alpha_k(i_1, j_1) y(i-i_1, j-j_1) I(i-i_1)$$

– взвешенная сумма наблюдений, взятых с пропусками строк, $I(i)$ – индикатор i -й строки: $I(i) = 1$ для i -й наблюдаемой строки и $I(i) = 0$ для пропущенной строки, что в программном исполнении означает пропуск строки при суммировании;

$$\alpha_k(i, j) \otimes \hat{y}_k(i, j) = \sum_{i_1=-m}^m \sum_{j_1=-n}^n \alpha_k(i_1, j_1) \hat{y}_k(i-i_1, j-j_1),$$

$$\hat{y}_k(i, j) = \sum_{i_1=-m}^m \sum_{j_1=-n}^n \alpha_k(i_1, j_1) \hat{x}_k(i-i_1, j-j_1)$$

– взвешенная сумма оценок изображений $\hat{x}_k(i, j)$, дающая оценку наблюдений $\hat{y}_k(i, j)$.

Однако выигрыш в размерности сопровождается проигрышем в быстродействии из-за большого числа итераций K , зависящего от точности начальных оценок $\hat{x}_0(i, j)$.

Оптимальная двухканальная обработка

Известно [5], что точность восстановления повышается с увеличением числа измерительных каналов с различным описанием АФ. В этом

плане предлагается новый подход к оптимальному восстановлению в матричной форме, который заключается в следующем.

Вводится второй измерительный канал, работающий одновременно с первым каналом. Антенна второго канала сканирует ту же зону обзора, но в ортогональном направлении по сравнению с первой антенной. В результате параллельной работы двух антенн получаются две матрицы наблюдений: Y_1 и Y_2 . Первая матрица прорежена по строкам, вторая прорежена по столбцам, то есть структура второй матрицы соответствует операции транспонирования. При $m = n$ и $M = N$ матрицы Y_1 и Y_2 последовательно и построчно переписываются в вектор $\bar{Y}$ удвоенной размерности в сравнении с (3). Матрица A принимает еще более сложную структуру. Причем в силу ортогональности сканирований новые и старые строки матрицы A линейно не зависят друг от друга, что повышает точность решения системы уравнений (2) при оценивании X (число наблюдений удваивается при неизменном числе оцениваемых параметров) и устойчивость решения.

Алгоритмом оценивания X для матричной формы (3) по-прежнему является формула (5). Ниже показан пример (первый столбец и затем второй столбец программы) заполнения матрицы A на языке Matlab, где $M_2 = N_2$ – номер последней наблюдаемой строки и наблюдаемого столбца в матрицах Y_1 и Y_2 ($M_2 = M - m$ при $h = 1$ и $M_2 \leq M - m$ при $h > 1$):

```
i=0; ih=0;                jh=0;
for ii=m+1:h:M-m          for jj=n+1:h:N-n
    ih=ih+1;              jh=jh+1; i0=0;
    j0=N2*h*(ih-1);       for ii=1:M2-2*m
    for jj=1:N2-2*n        i=i+1; i0=i0+1;
        i=i+1; j0=j0+1;    j0=N2*(i0-1);
        for i1=1:2*m+1    for i1=1:2*m+1
            j=j0+N2*(i1-1); j=j0+N2*(i1-1)+h*(jh-1);
            for j1=1:2*n+1 for j1=1:2*n+1
                j=j+1;      j=j+1;
                A(i,j)=alfa(i1,j1); A(i,j)=alfa(i1,j1);
            end %j1        end %j1
        end %i1          end %i1
    end %jj              end %jj
end %ii                  end %jj
```

Субоптимальный метод фильтра Винера

В инженерной практике при решении задач восстановления изображений широкое распространение получил фильтр Винера, работающий в области пространственных частот [4-6]. При $h = 1$ фильтр Винера работает оптимально, обеспечивая минимум дисперсии ошибки восстановления при известном отношении $s_p(i, j)/s_x(i, j)$

спектральных плотностей шумового поля P и искомого поля X в каждой i, j -й точке.

Особенность применения фильтра Винера заключается в том, что матрица наблюдений Y и матрица изображения X должны иметь одинаковые размеры. При $h > 1$ данное условие нарушается. Предлагается следующая процедура заполнения матрицы Y :

1. Элементы матрицы Y , расположенные по периметру поля X , заполняем нулями: $y(i, j) = 0$, $i = \overline{1, m}$, $i = \overline{M - m + 1, M}$, $j = \overline{1, n}$, $j = \overline{N - n + 1, N}$.

2. Между остальными соседними строками прореженной матрицы Y помещаем $h - 1$ строк по числу $h - 1$ недостающих элементов дискретизации угла места, а элементы этих строк находим линейной интерполяцией соответствующих элементов i -й и $(i+1)$ -й строк матрицы Y по формуле:

$$\Delta y = (y(i+h, j) - y(i, j)) / h, y(i+i_1, j) = y(i, j) + \Delta y \cdot i_1, \\ i_1 = \overline{1, h}, i = \overline{1, h, M - h}, j = \overline{1, N}.$$

3. В результате получаем заполненную матрицу наблюдений $Y = \{y(i, j)\}$, $i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, N}$, такого же размера, как матрица X .

Если число пропущенных строк отвечает размерам ДНА, то интерполированные строки матрицы Y несут в себе информацию о пропущенных строках. Однако при обработке интерполированной матрицы Y уже нельзя утверждать об оптимальности работы фильтра Винера. С увеличением h информация о пропущенных строках теряется и точность восстановления падает.

Алгоритм восстановления в частотной области сводится к умножению спектра $y_f(i, j)$ наблюдений на заранее вычисленную передаточную функцию $h_f(i, j)$ восстанавливающего фильтра:

$$\hat{x}_f(i, j) = y_f(i, j) \cdot h_f(i, j), i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N},$$

$$h_f(i, j) = a_f^*(i, j) / (|a_f(i, j)|^2 + c \cdot \sigma_p^2 / |y_f(i, j)|^2),$$

где $a_f(i, j)$ – спектр $M \times N$ -матрицы $\{a(i, j)\}$, представляющей пространственное периодическое продолжение АФ $\alpha(i, j)$ [6]; “*” – символ комплексного сопряжения.

Отличие состоит в том, что при неизвестной спектральной плотности предлагается отношение $s_p(i, j)/s_x(i, j)$ заменить на $c \cdot \sigma_p^2 / |y_f(i, j)|^2$, а коэффициент c подбирать эмпирически.

Найденные в частотной области оценки $\hat{x}_f(i, j)$ переводятся в пространственную об-

ласть и дают матрицу оценок $\hat{X} = \{\hat{x}(i, i)\}$ искомого изображения X .

Результаты моделирования

На рисунке 2,а показано изображение объекта в элементах дискретизации поля X .

Антенна с косинусной ДНА шириной 3° по азимуту и углу места (на уровне 0,5 мощности) сканировала искомое поле X с шагом дискретизации $\Delta\varphi = (1/16)^\circ$ по азимуту и шагом $\Delta\theta = 1^\circ$ по углу места. Полученное на выходе радиометра изображение объекта в составе прореженной матрицы наблюдений Y с шагом $h = 16$ показано на рисунке 2,б. После интерполяции недостающие строки матрицы Y заполнялись и изображение объекта принимало вид, показанный на рисунке 2,в. Изображение объекта $\hat{X}$, восстановленное фильтром Винера, показано на рисунке 2,г.

Видна характерная полосатость изображения, обусловленная интерполяцией и шумами. Невысокое качество полученного изображения говорит о необходимости уменьшения шага сканирования h или применения оптимальных методов восстановления X без интерполяции Y .

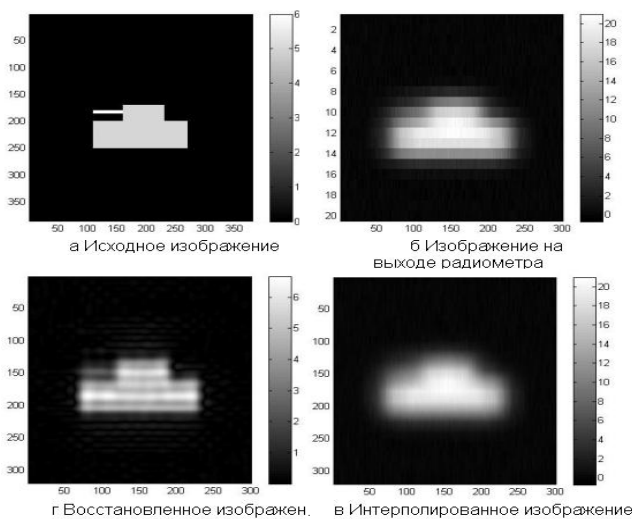


Рисунок 2 – Восстановление изображения по интерполированной матрице наблюдений

Следует отметить, что алгоритмы, основанные на матричном и итерационном методах и работающие в пространственной области с интерполированной матрицей Y , показали худшие результаты в одинаковых условиях моделирования по сравнению с фильтром Винера.

Исследование алгоритмов, основанных на оптимальных матричных методах, отражено в таблицах 1 и 2. При моделировании ширина ДНА составляла $(2m+1) \times (2n+1) = 7 \times 7$, отношение сигнал-шум $q = 20 \lg(U / \sigma_p) = 30$ и 50 при максимальной амплитуде $U = 5$, шаг сканирования $h = 1, 2, 3$, размер объекта наблюдения 5×5 .

АФ задавалась экспонентой с квадратичным показателем степени. Дополнительно небольшим порогом снимались шумовые эффекты на восстановленном изображении.

В таблице 1 даны оценки среднеквадратического отклонения (sq1) ошибки восстановления, полученные для оптимального матричного метода, работающего с прореженной матрицей Y при наличии одного измерительного канала. Здесь же для сравнения даны оценки sq2, полученные для субоптимального метода фильтра Винера, работающего с интерполированной матрицей Y в одноканальной системе.

Таблица 1

q	30			50		
h	1	2	3	1	2	3
sq1	1,07	1,56	2,42	0,89	1,48	2,36
sq2	1,06	1,73	2,76	0,87	1,67	2,74

Видно незначительное преимущество оптимального метода для $h > 1$ при одноканальной обработке матрицы Y .

В таблице 2 даны оценки sq3, полученные в аналогичных условиях моделирования оптимальным матричным методом при совместной обработке двух прореженных матриц Y_1 и Y_2 .

Таблица 2

q	30			50		
h	1	2	3	1	2	3
Sq3	1,02	1,03	1,22	0,86	0,89	1,08

Видно значительное уменьшение ошибки восстановления (sq3 в сравнении с sq1) за счет двухканальной обработки.

Разрешающая способность методов, зависящая от точности восстановления, оценивалась нахождением минимального расстояния $d_{\min}$ в количестве строк между объектами, при котором они четко различались на восстановленном изображении. Сверхразрешение $d_{\min} = 2$, соответствующее 1/2 ширины ДНА, сохранялось для одноканальных методов (матричный и Винера) при шаге $h \leq 2$, для двухканального – при шаге $h \leq 3$.

На рисунке 3 слева направо показаны: матрицы наблюдений Y_1 , Y_2 и восстановленное изображение X объекта в виде рамки для двухканального метода при шаге сканирования $h = 3$.

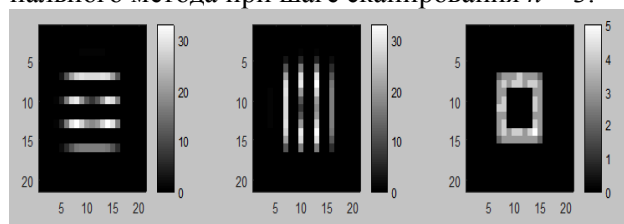


Рисунок 3 – Восстановление изображения в двухканальной системе

Выводы

Исследование показывает преимущество оптимального матричного метода восстановления изображений в двухканальной системе, позволяющего сохранять сверхразрешение с большим шагом сканирования, чем методы одноканальной обработки. Однако применение метода ограничено небольшими фрагментами матрицы изображения. Возможна совместная работа: локализация изображения объекта с помощью фильтра Винера и последующая обработка локальной области матричным методом.

Небольшой эффект сверхразрешения в 2 раза (в условиях моделирования) говорит о необходимости исследования потенциальной возможности и повышения разрешающей способности радиометрических изображений [7]. В плане повышения это может быть многоканальность с применением антенных решеток [8].

Предложенные методы могут найти применение в существующих сканирующих системах наблюдения микроволнового диапазона [9], а также в системах оптического и инфракрасного диапазонов.

Работа выполнена при поддержке Гранта ведущим научным школам Российской Федерации (НШ-7116.2016.8)

Библиографический список

1. Николаев А. Г., Перцов С. В. Радиотеплолокация (пассивная радиолокация). М.: Сов. радио, 1964, 335 с.
2. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. / Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014, 544 с.
3. Пирогов Ю. А., Тимановский А. Л. Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения миллиметрового диапазона // Радиотехника, 2006. № 3. С. 14 – 19.
4. Василенко Г. И., Тараторин А. М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986, 304 с.
5. Клочко В. К. Математические методы восстановления и обработки изображений в радиотеплооптоэлектронных системах. Рязань: РГРТУ, 2009. 228 с.
6. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006, 616 с.
7. Клочко В. К. Потенциальные возможности получения трехмерного изображения поверхности на базе бортового радиотеплолокатора // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2008. № 24. С. 49 – 55.
8. Клочко В. К., Чураков Е. П. Алгоритм формирования трехмерного изображения земной поверхности с помощью антенной решетки // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 4-2 (46). С. 3 – 6.
9. Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов / под ред. Р. П. Быстрова и А. В. Соколова. М.: Радиотехника, 2008, 320 с.

UDC 621.319

RECOVERY OF OBJECT IMAGES WITH EXPANDED SUPERVISION MATRIX

V. K. Klochko, Head of the Department, Ph.D, (technical sciences), RSREU, Ryazan; klochkovk@mail.ru
V. P. Kuznetsov, Ph.D. (technical sciences); Ph.D., associate professor, RSREU, Ryazan; klochkovk@mail.ru

The problem of objects images recovery based on data of radiometer with scanning antenna is considered. The step of scanning in a place corner is several times more than the step of scanning in an azimuth, and the matrix of supervision is thinned out along lines – the number of its lines is several times less than the number of columns. It leads to distortion of images and decrease in their resolution. The purpose of the work is the development of image recovery methods allowing to keep superpermission of supervision system in conditions of thinned-out matrix of radiometric supervision. Optimal matrix methods of restoration for cases of single-channel and two-channel processing of supervision matrixes are offered. The modification of restoration method by means of Winer's filter in the spatial frequencies field based on interpolation of supervision matrix is given. Results of algorithms work modeling based on the offered methods are given. The advantage on the accuracy of matrix restoration method based on two-channel processing is shown.

Keywords: radio heat-location, radiometer, thinned-out matrix of supervision, images recovery, super-permission, matrix method, iterative method, Winer's filter.

References

1. **Nikolaev A.G., Pertsov S. V.** *Radioteplolokacija (passivnaja radiolokacija)* (Radio heat-location (passive radar-location)), Moscow: Sov. radio, 1964, 335 p. (in Russian).
2. **Sharkov E.A.** *Radioteplovoe distancionnoe zondirovanie Zemli: fizicheskie osnovy: v 2 t. T. 1.* (Radio thermal remote sensing of Earth: physical bases: in 2 t. / T. 1). Moscow: IKI Russian Academy of Sciences, 2014, 544 p. (in Russian).
3. **Pirogov Y. A., Timanovsky A.L.** Sverhrazreshenie v sistemah passivnogo radiovidenija millimetrovogo diapazona. *Radio engineering*, 2006, no. 3, pp. 14 – 19 (in Russian).
4. **Vasilenko G. I., Taratorin A.M.** *Vosstanovlenie izobrazhenij* (Recovery of images). Moscow: Radio and communication, 1986, 304 p. (in Russian).
5. **Klochko V. K.** *Matematicheskie metody vosstanovlenija i obrabotki izobrazhenij v radioteploopto-jelektronnyh sistemah* (Mathematical methods of restoration and images processing in radio heat-opto-electronic systems). Ryazan: RGRTU, 2009, 228 p. (in Russian).
6. **Gonsalez R., Woods R., Eddins. S.** *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij v srede MATLAB* (Digital processing of images in the environment of MATLAB). Moscow: Technosphere, 2006, 616 p. (in Russian).
7. **Klochko V. K.** Potencial'nye vozmozhnosti poluchenija trehmernogo izobrazhenija poverhnosti na baze bortovogo radioteplolokatora. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2008, no. 24, pp. 49 – 55 (in Russian).
8. **Klochko V. K., Churakov E.P.** Algoritm formirovanija trehmernogo izobrazhenija zemnoj poverhnosti s pomoshh'ju antennoj reshetki. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2013, no. 4-2 (46), pp. 3 – 6 (in Russian).
9. *Passivnaja radiolokacija: metody obnaruzhenija ob'ektov / pod red. R.P. Bystrova i A.V. Sokolova* (Passive radar location: methods of objects detection / Under editorship of R.P. Bystrov and A.V. Sokolov). Moscow: Radio engineering, 2008, 320 p. (in Russian).