

АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ В РАДИОМЕТРЕ С ДВУМЯ АНТЕННАМИ

*Клочко В.К., д.т.н., зав. кафедрой Рязанского государственного радиотехнического университета (РГРТУ),
e-mail: klochkovk@mail.ru;*

Гудков С.М., инженер-конструктор 2 кат. Рязанской радиоэлектронной компании (РРК);

Кошелев А.А., ведущий инженер-программист РРК.

ALGORITHMS OF OBJECTS IMAGES FORMATION IN THE RADIOMETER WITH TWO ANTENNAS

Klochko V.K., Gudkov S.M., Koshelev A. A.

Algorithms of joint array processing of radiometric observation in the radiometer with two antennas accepting signals in two frequency ranges are offered. Application of algorithms allows to create two image matrixes in the form of the selected segments of objects image with the best spatial resolution in this mode of observation array processing. Amplitudes of the selected segments contain information on the objects radio brightness temperature in two frequency ranges. Operability of algorithms is confirmed by results of a full-scale experiment.

Key words: radiometer, radiometric image, segmentation, Winer's filter, resolution capability, radio brightness temperature.

Ключевые слова: радиометр, радиометрическое изображение, сегментация, фильтр Винера, разрешающая способность.

Введение

Радиометр активно применяется для дистанционного измерения температуры объектов, излучающих электромагнитные волны в разных частотных диапазонах. Также радиометр является удобным всепогодным средством наблюдения за наземными объектами в режиме сканирования антенны [1, 2]. В результате сканирования формируется матрица радиометрического наблюдения (в дальнейшем – матрица наблюдений). Амплитуды элементов матрицы несут информацию о температуре излучающих элементов земной поверхности в данном частотном диапазоне, а в совокупности дают изображение объектов на местности. Объектом изучения в данной работе является сканирующий радиометр с двумя совмещенными антеннами, принимающими сигналы в двух разных частотных диапазонах. Одна антенна, имеет широкую диаграмму направленности (ДНА), вторая антенна – более узкую ДНА. Наличие двух антенн определяется необходимостью исследования излучающих свойств объектов в разных частотных диапазонах.

При одновременном сканировании антенн по азимуту съем данных осуществляется с определенным шагом дискретизации, определяющим количество элементов в строке формируемых матриц наблюдения. Переход к другой строке производится, как правило, изменением угла места на величину большую, чем шаг дискретизации по азимуту. Этим достигается увеличение скорости формирования матриц изображения в двух каналах первичной обработки принимаемых сигналов. Две матрицы получаются с пропусками строк (прореженные вдоль строк) и имеют одинаковые размеры, но отличаются пространственным разрешением (в дальнейшем –

Предложены алгоритмы совместной обработки матриц радиометрического наблюдения в радиометре с двумя антеннами, принимающими сигналы в двух частотных диапазонах. Применение алгоритмов позволяет формировать две матрицы изображения в виде выделенных сегментов изображения объектов с наилучшим пространственным разрешением в данном режиме обработки матриц наблюдения. Амплитуды выделенных сегментов содержат информацию о температуре объектов в двух частотных диапазонах. Работоспособность алгоритмов подтверждается результатами натурного эксперимента.

просто разрешением), зависящим от ширины ДНА. Пропущенные строки учитываются при синтезе алгоритмов восстановления изображений или заполняются методом интерполяции [3].

Разрешение матрицы наблюдения с широкой ДНА в несколько раз хуже, чем разрешение матрицы с узкой ДНА. Поэтому возникает необходимость повысить разрешение матрицы с широкой ДНА до разрешения матрицы с узкой ДНА, сохранив температурные характеристики частотных диапазонов. Повысить разрешение можно за счет оптического изображения контролируемого участка местности, как эталонного изображения [4]. Однако это не всегда возможно из-за плохих погодных условий и темного времени суток. Для радиометра с двумя антеннами эталонное изображение можно получить путем обработки матрицы наблюдения, сформированной для узкой ДНА.

Цель работы – разработка алгоритмов повышения разрешения матрицы наблюдения, полученной для широкой ДНА, до разрешения матрицы, полученной для узкой ДНА, с сохранением температурных характеристик объектов в двух частотных диапазонах.

Модель наблюдений и постановка задачи

Модель наблюдений в радиометре с двумя антеннами на выходе двух каналов первичной обработки имеет вид двумерной свертки:

$$y_q(i_q, j_q) = \sum_{i_1=-m_q}^{m_q} \sum_{j_1=-n_q}^{n_q} \alpha_q(i_1, j_1) x_q(i_q - i_1, j_q - j_1) + p_q(i, j), \quad (1)$$

$q = \overline{1, Q}$, $i_q = \overline{m_q + 1, h, M - m_q}$, $j_q = \overline{n_q + 1, h, N - n_q}$, где i и j – номера строки и столбца матрицы наблюдений $Y_q = \{y_q(i, j)\}$, полученной в q -м канале в процессе сканирования антенной радиометра по пространству; $y_q(i, j)$ – i -й, j -й элемент матрицы, представляющий амплитуду сигнала, принятого при i -м, j -м положении антенны и прошедшего тракт первичной обработки; $2m_q + 1$ и $2n_q + 1$ – ширина ДНА по азимуту и углу места q -й антенны (на уровне 0,5 мощности) в количестве строк и столбцов, причем $m_2 < m_1$ и $n_2 < n_1$, то есть первая антенна имеет широкую ДНА, а вторая – узкую; $\alpha_q(i, j)$, $i = \overline{-m_q, m_q}$, $j = \overline{-n_q, n_q}$ – нормированная аппаратная функция q -го канала (АФ), описывающая действие антенны и тракта первичной обработки на искомое изображение; $X_q = \{x_q(i, j)\}$, $i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, N}$ – матрица искомого изображения в M строк и N столбцов в q -м канале, элементы которой $x_q(i, j)$ представляют радиояркостную температуру i -го, j -го излучающего элемента поверхности в q -м диапазоне длин волн; h – шаг сканирования по углу места в q -х каналах в количестве элементов дискретизации, не превышающих ширину узкой ДНА (при $h > 1$ возникает пропуски строк искомой матрицы изображения; шаг сканирования по азимуту составляет 1 элемент дискретизации); $p_q(i, j)$ – шум аппаратуры в виде белого шума; Q – количество каналов ($Q = 1$ или 2) соответственно количеству антенн радиометра.

Формирование матриц Y_q , $q = \overline{1, Q}$, осуществляется одновременно, причем разрешение в матрице Y_2 лучше, чем в матрице Y_1 , в m_1/m_2 раз по строкам и n_1/n_2 по столбцам.

Задача 1 в рамках модели (1) без дополнительных операций обработки матриц наблюдения Y_q заключается в нахождении оценок $X_1^* = \{x_1^*(i, j)\}$ и $X_2^* = \{x_2^*(i, j)\}$ искомых матриц X_1 и X_2 с лучшим разрешением матрицы Y_2 и температурными характеристиками двух частотных диапазонов.

В рамках модели (1) задача заключается в нахождении оценок $X_1^* = \{x_1^*(i, j)\}$ и $X_2^* = \{x_2^*(i, j)\}$ искомых матриц X_1 и X_2 с пространственным разрешением матрицы Y_2 (с более узкой ДНА) и сохранением температурных характеристик двух частотных диапазонов.

Дополнительно повысить разрешение в матрице Y_2 (а также Y_1) можно с помощью алгоритмов восстановления изображений [3], действующих как оператор восстановления R на матрицы Y_q : $Z_q = R[Y_q] =$

$\{z_q(i, j)\}$, $q = \overline{1, Q}$. Результатом являются оценки Z_q искомых изображений X_q с повышенным в несколько раз разрешением (примерно в 3 раза).

Если модель (1) представить в матричной форме, то восстановление осуществляется матричным методом, оптимальным в смысле метода наименьших квадратов, с учетом пропущенных строк [3]. Вид свертки (1) удобен для перехода в область пространственных частот и восстановления изображения с помощью фильтра Винера с заполнением пропущенных строк методом интерполяции [3]. Ограничимся рассмотрением второго подхода к восстановлению изображений с помощью фильтра Винера.

Оценки $z_q(i, j)$, полученные в результате восстановления, удовлетворяют модели, аналогичной (1):

$$z_q(i, j) = \sum_{i_1=-k_q}^{k_q} \sum_{j_1=-l_q}^{l_q} \beta_q(i_1, j_1) x_q(i - i_1, j - j_1) + \varepsilon_q(i, j), \quad (2)$$

$q = \overline{1, Q}$ где $i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, N}$, $\beta_q(i, j)$, $i = \overline{-k_q, k_q}$, $j = \overline{-l_q, l_q}$ ($k_q < m_q$, $l_q < n_q$) – нормированная функция рассеяния в i -й, j -й точке (ФРТ), обусловленная ошибками восстановления; $\varepsilon_q(i, j)$ – остаточный шум. Причем из $m_2 < m_1$, $n_2 < n_1$ следует: $k_2 < k_1$, $l_2 < l_1$.

В силу ошибок восстановления разрешение изображений в матрицах Z_q не достигает разрешения искомых матриц X_q . Тем не менее, матрицу Z_2 с лучшим разрешением можно взять за эталон по отношению к матрице Z_1 .

В рамках модели (2) при наличии операций восстановления задача заключается в нахождении оценок $X_1^{**} = \{x_1^{**}(i, j)\}$ и $X_2^{**} = \{x_2^{**}(i, j)\}$ искомых матриц X_1 и X_2 с разрешением матрицы Z_2 и температурными характеристиками частотных диапазонов матриц X_1 и X_2 .

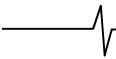
Решение поставленных задач

Алгоритм 1 повышения разрешения матрицы Y_1 без операций восстановления изображения заключается в следующем.

1. В результате сканирования антенны радиометра с широкой ДНА по азимуту и углу места зоны обзора формируется матрица изображения $Y_1 = \{y_1(i, j)\}$ с элементами $y_1(i, j)$, отвечающими модели (1).

2. Одновременно вторая антенна радиометра с узкой ДНА сканирует ту же зону обзора, в результате чего формируется вторая матрица изображения $Y_2 = \{y_2(i, j)\}$ модели (1).

3. Пропущенные при сканировании антенн строки матриц Y_1 и Y_2 заполняются методом интерполяции (линейной, биквадратной или бикубической) путем обработки элементов двух соседних наблюдаемых строк.



4. Матрица Y_2 разбивается на K непересекающихся однородных по амплитуде подобластей D_1, D_2, \dots, D_K с помощью оператора сегментации [5]. В результате получается матрица $S = \{S(i, j)\}$, где $S(i, j)$ – номер сегмента, которому принадлежит i -й, j -й элемент матрицы Y_2 , поставленный в соответствие i -му, j -му элементу матрицы Y_1 .

5. Для каждого s -го сегмента вычисляется средняя радиометрическая амплитуда $\tilde{y}_1(s)$ на основе i -х, j -х элементов матрицы Y_1 с меткой s :

$$\tilde{y}_1(s) = (1/n_s) \sum_i \sum_j y_1(i, j), \quad i, j: S(i, j) = s,$$

где n_s – количество элементов с меткой s .

6. Всем i -м, j -м элементам матрицы Y_1 с меткой s присваивается амплитуда $\tilde{y}_1(s)$, нормированная коэффициентом μ_1 , и запоминается как $x_1^*(i, j) = \mu_1 \cdot \tilde{y}_1(s)$, где μ_1 учитывает связь амплитуды с температурой.

В результате формируется матрица $X_1^* = \{x_1^*(i, j)\}$ изображения с пространственным разрешением матрицы Y_2 и температурными характеристиками матрицы X_1 .

7. Все элементы матрицы Y_2 нормируются коэффициентом μ_2 и запоминаются как $x_2^*(i, j) = \mu_2 \cdot y_2(i, j)$. В результате формируется матрица $X_2^* = \{x_2^*(i, j)\}$ изображения с пространственным разрешением Y_2 и температурными характеристиками матрицы X_2 .

Алгоритм 2 повышения разрешения матрицы Y_1 с учетом операций восстановления изображений в Y_1 и Y_2 отличается от алгоритма 1 следующим.

1-3. Данные пункты совпадают с п.п. 1-3 алгоритма 1 при формировании матриц наблюдения Y_1 и Y_2 .

4. Полученные матрицы Y_1 и Y_2 подвергаются двумерному преобразованию Фурье и получаются спектральные матрицы $Y_{f1} = \{y_{f1}(i, j)\}$ и $Y_{f2} = \{y_{f2}(i, j)\}$.

5. Элементы матриц Y_{f1} и Y_{f2} умножаются на вычисленную передаточную функцию $w_f(i, j)$ восстанавливающего фильтра Винера [4], что приводит к спектральным матрицам оценок $Z_{f1} = \{z_{f1}(i, j)\}$ и $Z_{f2} = \{z_{f2}(i, j)\}$:

$$z_{f1}(i, j) = y_{f1}(i, j) \cdot w_f(i, j),$$

$$z_{f2}(i, j) = y_{f2}(i, j) \cdot w_f(i, j).$$

6. Матрицы Z_{f1} и Z_{f2} подвергаются обратному преобразованию Фурье: и получаются матрицы $Z_1 = \{z_1(i, j)\}$, $Z_2 = \{z_2(i, j)\}$ восстановленного изображения объектов в пространственной области.

7. Матрица Z_2 разбивается на сегменты аналогично п. 4 алгоритма 1.

8. Для каждого s -го сегмента вычисляется средняя радиометрическая амплитуда $\tilde{z}_1(s)$ аналогично п. 5 алгоритма 1.

9. Всем i -м, j -м элементам матрицы Z_1 с меткой s присваивается амплитуда $\tilde{z}_1(s)$, нормированная коэффициентом μ_1 и запоминается как $x_1^{**}(i, j) = \mu_1 \cdot \tilde{z}_1(s)$. В результате формируется матрица $X_1^{**} = \{x_1^{**}(i, j)\}$ изображения с пространственным разрешением матрицы Z_2 и температурными характеристиками матрицы X_1 .

10. Все элементы матрицы Z_2 нормируются коэффициентом μ_2 и запоминаются как $x_2^{**}(i, j) = \mu_2 \cdot z_2(i, j)$. В результате формируется матрица $X_2^{**} = \{x_2^{**}(i, j)\}$ изображения с пространственным разрешением Z_2 и температурными характеристиками X_2 .

Алгоритм 3 повышения разрешения матрицы Y_1 с учетом операций восстановления изображения только в матрице Y_2 отличается следующим.

С целью повышения быстродействия алгоритма 1 целесообразно использовать алгоритм 3, в котором операции восстановления осуществляются только над матрицей Y_2 при формировании матрицы Z_2 . 1-3. Данные пункты алгоритма 3 совпадают с п.п. 1-3 алгоритмов 1 и 2 при формировании матриц наблюдения Y_1 и Y_2 .

4-7. В данных пунктах операции выполняются только над матрицей Y_2

8-10. Данные пункты совпадают с п.п. 8-10 алгоритма 2 с тем отличием, что под символом Z_1 понимается Y_1 .

Результаты эксперимента

Натурные испытания проводились с применением радиометра с двумя антеннами: первая антенна с шириной ДНА в 3° принимала сигналы в 8 мм диапазоне длин волн при наблюдении объектов на местности на расстоянии 30 м, вторая антенна – с шириной ДНА в 1° , совмещенная с первой антенной, одновременно принимала сигналы в 3 мм диапазоне. Шаг сканирования по углу места и пропуск строк соответствовали 1° . На рис. 1 показано видео- изображение наблюдаемого участка местности с тремя объектами в виде щитов.



Рис. 1. Видеоизображение наблюдаемого участка местности

На рис. 2 слева направо – изображение в матрице Y_1 , соответствующее 8 мм диапазону, до и после фильтра Винера. На рис. 3 – изображение в матрице Y_2 , соответствующее 3 мм диапазону, до и после фильтра Винера. На рис. 4 – тепловое изображение в цвете (по трем уровням) после сегментации в матрице Y_2 и тепловое изображение в сегментах матрицы Y_1 , полученные алгоритмом 1 без фильтра Винера. На рис. 5 – тепловое изображение в цвете после сегментации в матрице Z_2 и тепловое изображение в сегментах матрицы Z_1 , полученные алгоритмами 2 и 3 с фильтром Винера.

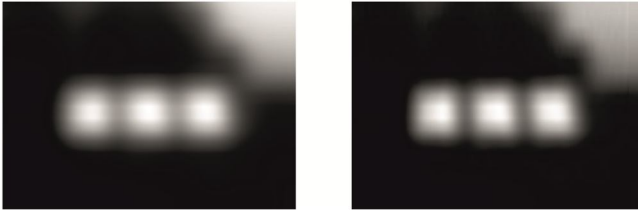


Рис. 2. Видеоизображение в матрице Y_1 , соответствующее 8 мм диапазону, до и после фильтра Винера

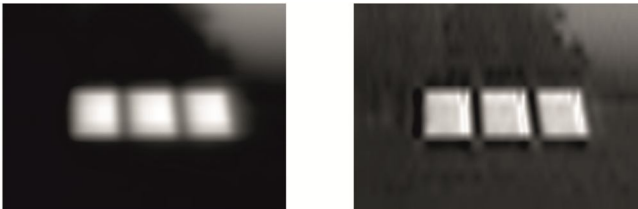


Рис. 3. Видеоизображение в матрице Y_2 , соответствующее 3 мм диапазону, до и после фильтра Винера



Рис. 4. Тепловое изображение в цвете (по трем уровням) после сегментации в матрице Y_2 и тепловое изображение в сегментах матрицы Y_1 , полученные алгоритмом 1 без фильтра Винера



Рис. 5. Тепловое изображение в цвете после сегментации в матрице Z_2 и тепловое изображение в сегментах матрицы Z_1 , полученные алгоритмами 2 и 3 с фильтром Винера

Заключение

Изображения объектов на рис. 4 и 5 в виде выделенных сегментов, полученные с помощью предлагаемых алгоритмов, соответствуют наилучшему разрешению в данном режиме обработки матриц наблюдения в сравнении с изображениями объектов на рис. 2 и 3, а амплитуды выделенных сегментов содержат информацию о температуре объектов в двух частотных диапазонах.

Литература

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. Ключко В.К., Кузнецов В.П. Методы восстановления изображений и оценивания аппаратной функции по прореженной матрице наблюдений // Автометрия. 2016. Т. 52, № 56. – С. 12 – 21.
4. Ключко В.К., Макарова О.Н., Гудков С.М., Кошелев А.А. Алгоритм формирования теплового изображения объектов при радиометрическом наблюдении // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 3. – С. 34 – 36.
5. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006. – 616 с.