

УДК 621.396

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ РАДИОМЕТРА НА ТОЧНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

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

О. Н. Макарова, инженер кафедры РТС РГРТУ; a-o-n@mail.ru

Исследуется влияние характеристик антенной системы на точность восстановления изображений объектов в радиометре. Антенная система представляет собой совокупность приемных элементов, организованных по определенному правилу для съема данных. От организации приемных элементов зависят число каналов обработки принимаемых сигналов и антенные характеристики каналов. Антенная система сканирует область обзора и принимает сигналы в заданном диапазоне частот. По результатам сканирования в одном или двух пространственных каналах формируются матрицы радиометрических наблюдений, отличающиеся антенными характеристиками. Эти матрицы совместно обрабатываются алгоритмом восстановления изображений, основанном на оптимальном матричном методе. Цель работы – сравнить по точности восстановления разные антенные системы, определяющие антенные характеристики. В работе аналитически и экспериментально проводится сравнительный анализ точности восстановления в зависимости от организации приемных элементов при одном и двух каналах обработки. Аналитическое исследование основано на построении ковариационной матрицы ошибок, экспериментальное – на основе моделирования.

Ключевые слова: радиометр, антенная система, двухканальная обработка сигналов, восстановление изображений, антенные характеристики.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-16-20

Введение

Радиометр [1] является удобным средством пассивного наблюдения за объектами в условиях, неблагоприятных для оптических систем. При наблюдении осуществляется построчное сканирование антенной системой радиометра области обзора в угловых координатах угла места θ и азимута φ . Антенная система представляет собой совокупность приемных элементов, организованных по определенному правилу для съема данных. От организации приемных элементов зависят число каналов обработки принимаемых сигналов и антенные характеристики каналов. Антенная система принимает сигналы в заданном диапазоне частот. При непрерывном сканировании по азимуту (вдоль строки) съем данных ведется с шагом дискретизации $\Delta\varphi$. Переход к другой строке осуществляется механически с шагом $\Delta\theta = \Delta\varphi \cdot h$, где h – целое число ($h \geq 1$). При одноканальной обработке формируется одна матрица Y радиометрического наблюдения области обзора с объектами. С помощью оператора R восстановления (Reconstruction), основанном на оптимальном матричном методе [2, 3], находится матрица X искомого радиотеплового изображения объектов на основе известной матрицы A антенных характеристик:

$$X = R[Y, A].$$

Для повышения точности восстановления используются два пространственных канала с различными антенными характеристиками. По результатам обработки сигналов в двух каналах, отличающихся антенными характеристиками A_1 и A_2 , формируются две матрицы наблюдений Y_1 и Y_2 . Эти матрицы совместно обрабатываются оператором R восстановления изображений:

$X = R[Y, A]$, где $Y = (Y_1, Y_2)$, $A = (A_1, A_2)$ – блочные матрицы.

Цель работы – сравнить по точности восстановления разные антенные системы, определяющие антенные характеристики.

Математическая постановка задачи

Модель двухканальных радиометрических наблюдений $Y_1 = \{y_1(i, j)\}$ и $Y_2 = \{y_2(i, j)\}$ задается следующим выражением [3]:

$$y_q(i, j) = \sum_{k=-m}^m \sum_{l=-n}^n \alpha_q(k, l) x(i+k, j+l) + p_q(i, j), \quad (1)$$

где $q = 1, 2$; $y_q(i, j)$ – i -й, j -й элемент матрицы Y_q ; $\alpha_q(k, l)$ – антенная характеристика q -го канала, описывающая действие антенной системы при q -й организации ее приемных элементов и тракта первичной обработки q -го канала; $x(i+k, j+l)$ –

$(i+k)$ -й, $(j+l)$ -й элемент искомой матрицы изображения $\mathbf{X}$; $(2m+1)$ и $(2n+1)$ – размеры области определения функций $\alpha_q(i,j)$ по углу места и азимуту; $p_q(i,j)$ – нормальный шум q -го канала с нулевым средним и дисперсией σ_p^2 .

Задача заключается в нахождении матрицы $\mathbf{X} = \{x(i,j)\}$ по совокупности наблюдений $\mathbf{Y} = (\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2)$ на основе характеристик $\alpha_q(i,j)$, $q = 1, 2$ и оценивании точности восстановления в зависимости от вида функций $\alpha_q(i,j)$.

Для решения задачи в матричной форме модель (1) записывается в виде векторно-матричного выражения [3]:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{p}, \quad (2)$$

где $\mathbf{y}$ – вектор всей совокупности наблюдений $y_q(i,j)$, $q = 1, 2$, записанных построчно из матриц $\mathbf{Y}_1$ и $\mathbf{Y}_2$; $\mathbf{A} = \{a(i,j)\}$ – матрица характеристик, элементы которой $a(i,j)$ получены расположением по определенному правилу функций $\alpha_1(i,j)$ и $\alpha_2(i,j)$ в первоначально обнуленной матрице $\mathbf{A}$ [3]; $\mathbf{x}$ – вектор искомого изображения, полученный построчным переписыванием элементов $x(i,j)$ из матрицы $\mathbf{X}$; $\mathbf{p}$ – вектор шумов, составленный из $p_1(i,j)$ и $p_2(i,j)$.

Оптимальная оценка вектора $\mathbf{x}$ при отсутствии информации относительно $\mathbf{X}$ и $\mathbf{p}$ находится по критерию минимума квадрата евклидовой нормы:

$$\|\mathbf{p}\|^2 = (\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x})^T(\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x}), \quad (3)$$

т.е. методом наименьших квадратов (МНК), T – символ транспонирования.

Необходимое условие существования экстремума функции (3) дает известное выражение вектора оптимальных оценок [3]:

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{A}^+ \mathbf{y}, \quad \mathbf{A}^+ = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \delta \mathbf{E})^{-1} \mathbf{A}^T, \quad (4)$$

где δ – параметр регуляризации (малое положительное число), необходимый для устойчивого обращения $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$; $\mathbf{E}$ – единичная матрица.

Матрица $\mathbf{A}^+$ в (4) является псевдообратной для $\mathbf{A}$ и также может быть найдена сингулярным разложением $\mathbf{A}$, например, в среде Matlab: $\mathbf{A}^+ = \text{pinv}(\mathbf{A}, \delta)$.

Элементы найденного в (4) вектора $\mathbf{x}^*$ построчно заполняют матрицу $\mathbf{X}^*$ восстановленного изображения $\mathbf{X}$.

Организация приемных элементов в антенной системе

Рассмотрим несколько правил организации приемных элементов в антенной системе, определяющих вид матрицы $\mathbf{A}$.

Правило 1. Используется один приемный элемент антенной системы (одна антенна) с уз-

кой круговой диаграммой направленности (ДН). Наблюдение осуществляется построчным сканированием области обзора. Обработка принимаемых сигналов ведется одним приемным каналом.

Правило 2. Используются два приемных элемента антенной системы (две антенны) с разной ДН: один с узкой круговой ДН и второй с широкой круговой ДН. Наблюдение ведется построчным сканированием области обзора одновременно двумя антеннами. Обработка принимаемых сигналов ведется независимо в двух приемных каналах.

Правило 3. Используются два приемных элемента антенной системы (две антенны) с одинаковой узкой круговой ДН. Сканирование области обзора антеннами осуществляется одновременно в ортогональных направлениях [2]: первая антенна сканирует область обзора вдоль строк (по азимуту) и переключается по углу места с шагом $h \geq 1$, вторая – сканирует вдоль столбцов (по углу места) и переключается по азимуту с шагом $h \geq 1$. Обработка принимаемых сигналов ведется независимо в двух приемных каналах.

Полученные в q -х каналах матрицы $\mathbf{Y}_q$ объединяются в векторе $\mathbf{y}$ модели (2). При умножении $\mathbf{y}$ слева на заранее вычисленную матрицу $\mathbf{A}^+$ в соответствии с (4) находится вектор оптимальных оценок $\mathbf{x}^* = \mathbf{A}^+ \mathbf{y}$.

Возможны и другие правила съема данных, например, по правилу формирования суммарного и разностного каналов [4]. В этом случае антенная система состоит из четырех приемных элементов с узкой круговой ДН (четыре антенны), комбинация которых дает два канала обработки данных (суммарный и разностный) с различными антенными характеристиками.

Аналитическое исследование точности восстановления

Точность МНК-оценок $\mathbf{x}^*$ характеризуется ковариационной матрицей $\mathbf{K}$ ошибок оценивания $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x}^* - \mathbf{x}$, которая при малом δ определится как:

$$\mathbf{K} = \sigma_p^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \delta \mathbf{E})^{-1}. \quad (5)$$

Среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибки оценивания амплитуды отдельного элемента матрицы $\mathbf{X}$ найдется по формуле:

$$\sigma_{\Delta x} = \sigma_p (\text{Sp}(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \delta \mathbf{E})^{-1} / L^2)^{1/2}, \quad (6)$$

где Sp – след матрицы; $L \times L$ – размер матрицы $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$. Из (5), (6) следует, что точность восстановления зависит от структуры матрицы $\mathbf{A}$ значений функций $\alpha_q(i,j)$. Так как (4) есть решение системы уравнений (1) на множестве i,j,q , то матрица системы $\mathbf{A}$ определяет свойства решения. Важным свойством является линейная независимость строк матрицы $\mathbf{A}$, которая достигается за

счет различия характеристик в приемных каналах антенной системы.

С увеличением числа каналов (измерений) повышается устойчивость обращения $A^T A$.

Замечание. Следует отметить, что результат вычислений по формулам (5) и (6) существенно зависит от параметра δ . Поэтому эти формулы применимы только для сравнительного анализа.

Зададимся для определенности нормированной функцией $\alpha_q(i, j)$ вида:

$$\alpha_q(i, j) = \exp\{-k_q(i^2 + j^2)\}, \quad (6)$$

где $k_1 = 0,3$ для узкой ДН и $k_2 = 0,1$ для широкой.

Ограничимся областью определения функции: $2m+1 = 2n+1 = 7$. Определим размер матрицы X искомого изображения: 21×21 и вектора x : 441×1 . Тогда размер матрицы Y_q в соответствии с (1) составит 15×15 . Соответственно размер вектора наблюдений y для одного канала при $h = 1$ будет: 225×1 и для двух каналов: 450×1 . Размер матрицы A для одного канала при $h=1$ составит 225×441 и для двух каналов 450×441 . При $h > 1$ количество измерений (элементов вектора y) уменьшается из-за прореживания строк (или столбцов) матриц Y_1 и Y_2 .

Ниже в таблице 1 представлены результаты сравнительного расчета СКО по формуле (5) в зависимости от шага сканирования h для трех указанных правил заполнения матрицы A , полученные при $\delta = 0,01$.

Таблица 1 – Результаты расчетов

h	1	2	3	4
Правило1	0,40 σ_p	0,43 σ_p	0,49 σ_p	0,50 σ_p
Правило2	0,34 σ_p	0,38 σ_p	0,44 σ_p	0,46 σ_p
Правило3	0,40 σ_p	0,41 σ_p	0,46 σ_p	0,48 σ_p

Видна тенденция увеличения СКО с увеличением h . Теоретически некоторое преимущество имеет правило 2.

Экспериментальное исследование

Моделирование в одном частотном диапазоне. В таблице 2 даны оценки СКО ошибки восстановления, найденные по результатам моделирования. Моделировалось изображение объекта в форме рамки, которое наблюдалось в матрицах Y_q в соответствии с моделью (1) и восстанавливалось матричным методом (4) для трех указанных правил при отношении сигнал-шум = 50 (с малым разбросом оценок).

Таблица 2 – Результаты моделирования

h	1	2	3	4
Правило 1	0,89	1,48	2,38	2,77
Правило 2	0,59	1,20	1,70	1,71
Правило 3	0,89	0,86	1,08	1,56

Видно, что наименьшую точность восстановления имеет правило 1 (один измерительный канал). При $h = 1$ преимуществом обладает правило 2 в силу отличия характеристик двух каналов. При $h > 1$ преимущество имеет правило 3, в котором при $h > 1$ также начинают проявляться различия характеристик двух каналов.

Обращает внимание разный приоритет правил 2 и 3 при $h > 1$, установленный аналитически с помощью ковариационной матрицы (таблица 1) и экспериментально при моделировании частного случая изображения (таблица 2). Это можно объяснить тем, что критерий МНК, удобный для математических преобразований, слабо отражает текстуру изображений и на практике применяется совместно с другими показателями качества [5].

Для наглядности на рисунке 1 показаны слева направо: моделируемое изображение X , наблюдаемое изображение Y и восстановленное изображение X^* для правила 1 при $h = 3$. На рисунках 2 и 3 показаны матрицы: Y_1 , Y_2 и X^* , полученные для правил 2 и 3 в тех же условиях моделирования. Видно более высокое качество восстановленного изображения правила 3.

Моделирование правила формирования суммарного и разностного каналов показало результаты, близкие к правилу 2.

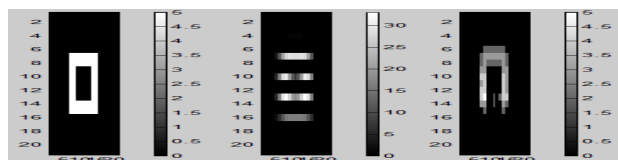


Рисунок 1 – Восстановление (правило 1)

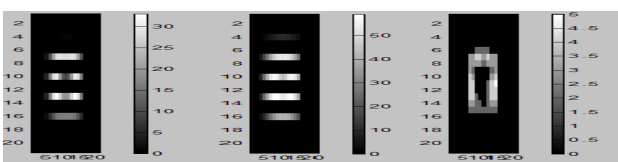


Рисунок 2 – Восстановление (правило 2)

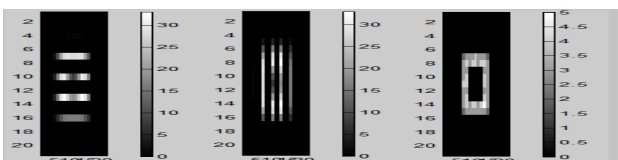


Рисунок 3 – Восстановление (правило 3)

Моделирование в разных частотных диапазонах. Практически интересен случай, когда сигналы в q -х каналах принимаются в разных частотных диапазонах. При этом температурные характеристики объектов наблюдения в q -х каналах отличаются. Также по-разному может восприниматься их геометрическая форма. Ограничимся рассмотрением объектов, которые

сохраняют свою геометрическую форму в разных частотных диапазонах, но имеют разные температурные характеристики. Для таких объектов модель наблюдений (1) в общем случае не верна, но имеет определенные условия применимости. Это иллюстрируется данными моделирования, полученными следующим образом.

Моделировалось изображение X_1 объекта в форме рамки с амплитудой A_1 для узкой ДН ($k_1 = 0,3$) в первом канале и изображение X_2 объекта в форме той же рамки с амплитудой A_2 для широкой ДН ($k_2 = 0,1$) во втором канале. При шаге сканирования $h = 1$ изображение объекта восстанавливалось по правилу 2 для разных значений $\Delta A = A_2 - A_1$ при $A_1 = 5$, $A_2 > 5$ или $A_2 = 5$, $A_1 > 5$. Восстановленное изображение X^* нормировалось делением всех элементов матрицы X^* на максимальный элемент и умножением на A_1 , после чего сравнивалось с моделируемым изображением X_1 . Это давало возможность оценить по амплитуде четкость изображения, что соответствовало и визуальной оценке четкости.

В таблице 3 представлены оценки СКО, полученные при разных значениях ΔA . В сравнении с оценкой СКО = 0,89, полученной правилом 1 для одного канала при $h = 1$, преимущество двухканальной обработки (в условиях моделирования) видится при разности амплитуд $\Delta A = 0, 1, 2, 3$.

Таблица 3 – Результаты моделирования

ΔA	-2	-1	0	1
СКО	1,14	0,72	0,51	0,35
ΔA	2	3	4	5
СКО	0,42	0,49	0,72	0,80

В целом различие амплитуд искомого изображения в двух каналах снижает качество (четкость) изображения и эффективность применения двухканальной обработки.

Для сохранения эффективности двухканальной обработки сигналов, принятых в разных частотных диапазонах, предлагается следующее:

1. С помощью коэффициентов μ_1 и μ_2 устанавливается равенство

$$\mu_1 X_1 = \mu_2 X_2 = X, \quad (7)$$

где X – гипотетическое изображение, которое в разных частотных диапазонах воспринимается как X_1 или X_2 .

2. Равенство (7) с точки зрения модели (1) означает, что в предположении существования X наблюдения Y_1 и Y_2 следует брать с коэффициентами

$$\lambda_1 = 1/\mu_1 \text{ и } \lambda_2 = 1/\mu_2, \text{ т.е. } \lambda_1 Y_1 \text{ и } \lambda_2 Y_2.$$

3. При $\lambda_1 = 1$ корректировке подлежит Y_2 с коэффициентом $\lambda = \lambda_2$: λY_2 , где λ находится по

критерию качества восстановления X , например, по минимуму оценки СКО ошибки восстановления или экспертно.

4. В общем случае подбираются два параметра λ_1 , λ_2 и по оценке X^* определяются искомые оценки $X_1^* = \lambda_1 X^*$, $X_2^* = \lambda_2 X^*$.

Для экспериментальной проверки указанного предложения для разных значений $\Delta A = A_2 - A_1$ подбирался параметр λ в условиях моделирования таблицы 3 по качеству восстановленного изображения X^* . Оптимальным значениям λ соответствовала минимальная оценка СКО на уровне 0,35–0,37 при $\Delta A > 0$ и на уровне 0,4 – 0,5 при $\Delta A < 0$.

Результаты моделирования $h = 1$ представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты моделирования

ΔA	-2	-1	0	1
λ	1,6	1,4	1,2	0,97
ΔA	2	3	4	5
λ	0,88	0,72	0,64	0,59

Для найденных значений λ искомые амплитудные изображения определялись как $X_1^* = X^*$ и $X_2^* = \lambda X^*$. Для $h > 1$ указанный подход не дал положительных результатов оценивания X .

Заключение

Проведенное исследование точности восстановления изображений по данным радиометрических наблюдений показывает необходимость многоканальной обработки, позволяющей заметно повысить качество восстановленных изображений при определенной организации приемных элементов антенной системы.

По результатам моделирования для двухканальных систем можно рекомендовать антенны с независимым сканированием зоны обзора в ортогональных направлениях.

Известны многолучевые антенные системы [6], позволяющие разнообразить правила организации элементов антенной решетки. Для таких систем перспективна задача оптимизации структуры антенной системы радиометра.

Работа выполнена при поддержке Гранта ведущим научным школам РФ (РШ-7116.2016.8).

Библиографический список

1. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т./ Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.
2. Ключко В. К., Кузнецов В. П. Восстановление изображений объектов по прореженной матрице наблюдений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 55. С. 111–117.

3. Математические методы восстановления и обработки изображений в радиотеплооптоэлектронных системах / **В. К. Ключко**. Рязань: Рязан. госуд. радиотехн. ун-т, 2009. 228 с.

4. **Финкельштейн М. И.** Основы радиолокации: учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1983. 536 с.

5. Цифровая обработка изображений в инфор-

мационных системах: учеб. пособие / И. С. Грузман, В. С. Киричук и др. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.

6. **Кутуза Б. Г., Данилычев М. В., Яковлев О. И.** Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности / М.: Ленард, 2016. 338 с.

UDC 621.396

I INFLUENCE OF ANTENNA CHARACTERISTICS OF THE RADIOMETER ON THE ACCURACY OF IMAGES RECOVERY

V. K. Klochko, head of the department of EIMM, RSREU, Ph.D.(technical sciences); klochkovk@mail.ru

O. N. Makarova, engineer of RTS department; RSREU; a-o-n@mail.ru

*Influence of antenna system characteristics on the accuracy of objects images recovery in the radiometer is researched in the work. Antenna system represents a set of receiving elements organized by a certain rule for data obtaining. The number of accepted signals processing channels and its antenna characteristics depend on the organization of receiving elements. Antenna system scans the area of review and accepts signals in the given range of frequencies. By results of scanning in one or two spatial channels the matrixes of radiometric observations differing in antenna characteristics are created. These matrixes are jointly processed by the algorithm of images recovery, based on the optimum matrix approach. **The work purpose** is to compare different antenna systems defining antenna characteristics on restoration accuracy. In the work analytically and experimentally a comparative analysis of restoration accuracy depending on the organization of receiving elements in case of one and two processing channels is carried out. Analytical research is based on the creation of a covariance matrix of recovery errors, experimental – on the basis of modeling.*

Keywords: radiometer, antenna system, dual-channel signal processing, recovery of images, antenna characteristics.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-16-20

References

1. **Sharkov E. A.** Radioteplovoye distantsionnoye zondirovaniye Zemli: fizicheskiye osnovy. M.: IKI RAN, 2014. Vol. 1. 544 p. (in Russian).

2. **Klochko V. K., Kuznetsov V. P.** Vosstanovleniye izobrazheniy obektov po prerezhennoy matritse nabljudeniy. Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radio-tekhnicheskogo universiteta. 2016. no. 55, pp. 111 – 117. (in Russian).

3. Matematicheskiye metody vosstanovleniya i obrabotki izobrazheniy v radioteplooptoelektronnykh sis-

temah. **V. K. Klochko**; Rjazan. gosud. radiotekhn. un-t. Rjazan, 2009, 228 p. (in Russian).

4. **Finkelstein M. I.** Osnovy radiolokacii: uchebnyy dlja vuzov. M.: Radio i svyaz', 1983. 536 p. (in Russian).

5. Cifrovaya obrabotka izobrazheniy v informacionnykh sistemah: ucheb. posobie. **I. S. Gruzman, V. S. Kirichuk** i dr. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2002. 352 p. (in Russian).

6. **Kutuza B. G., Danilychev M. V., Yakovlev O. I.** Sputnikovyy monitoring Zemli: Mikrovolnovaya radiometriya atmosfery i poverhnosti. M.: Lenard, 2016. 338 p. (in Russian).