

## АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ РАДИОМЕТРИЧЕСКОМ НАБЛЮДЕНИИ

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

*Макарова О.Н., инженер РГРТУ;*

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

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

## ALGORITHM OF THE OBJECTS THERMAL IMAGE FORMATION AT RADIOMETRIC OBSERVATION

*Klochko V.K., Makarova O.N., Gudkov S.M., Koshelev A.A.*

*The algorithm of joint processing of radiometric and optical images allowing to receive the radio thermal image of objects with the spatial resolution corresponding to the size of the required image element of sampling is offered. The results of pilot study showing a possibility of formation of the thermal objects image on the area by means of the offered algorithm are given.*

**Key words:** radiometer, radiometric image, optical image, resolution.

**Ключевые слова:** радиометр, радиометрическое изображение, оптическое изображение, разрешающая способность.

### Введение

Современные системы пассивного наблюдения объектов на местности с целью формирования их теплового изображения активно используют тепловизоры [1]. В тепловизоре оптические линзы проецируют поток электромагнитного излучения инфракрасного диапазона длин волн на матрицу светочувствительных элементов. В результате получается матрица амплитудного (теплового) изображения участка местности, в которой амплитуды, пропорциональные значениям температуры, переводятся в уровни цветности. Данная матрица имеет пространственное разрешение, близкое к разрешению оптического изображения. Однако в инфракрасном диапазоне электромагнитная волна обладает меньшей проникающей способностью, чем волна миллиметрового радиолокационного диапазона, используемая в сканирующих радиометрах [2]. В отличие от тепловизоров, принимающих излучение поверхностного слоя земной поверхности, радиометры позволяют фиксировать радиотепловое излучение объектов, скрытых под поверхностным слоем [3], и в меньшей степени подвержены атмосферным влияниям. Однако пространственная разрешающая способность радиометрических систем значительно уступает разрешающей способности тепловизионных и оптических систем.

Целью работы является разработка алгоритма формирования теплового изображения объектов на местности в радиолокационном миллиметровом диапазоне длин волн с повышенным пространственным разрешением.

Цель достигается за счет совместной обработки радиометрического и оптического изображений. Для разработки алгоритма используются следующие модели изображений.

*Предложен алгоритм совместной обработки радиометрических и оптических изображений, позволяющий получать радиотепловое изображение объектов с пространственным разрешением, соответствующим размеру элемента дискретизации искомого изображения. Приводятся результаты экспериментального исследования, показывающие возможность формирования теплового изображения объектов на местности с помощью предложенного алгоритма.*

### Модель радиометрического изображения

Антенна радиометра построчно сканирует зону обзора. Съём данных в каждой строке производится с шагом дискретизации  $\Delta\varphi$  по азимуту (по  $j$ ) и переход к другой строке осуществляется с шагом  $\Delta\theta$  по углу места (по  $i$ ). Принятый на каждом  $i$ -м,  $j$ -м шаге сканирования сигнал после прохождения тракта первичной обработки регистрируется в цифровой форме величиной  $y(i, j)$ , подчиненной модели радиометрического изображения (РИ):

$$y(i, j) = \mu \sum_{i_1=-m}^m \sum_{j_1=-n}^n \alpha(i_1, j_1) x(i+i_1, j+j_1) + p(i, j), \quad (1)$$

$$i = \overline{1, M}, \quad j = \overline{1, N},$$

где  $Y = \{y(i, j)\}$  –  $M \times N$ -матрица РИ области  $D$  обзора;  $\mu$  – коэффициент радиометрического преобразования;  $\alpha(i, j)$  – аппаратная функция (АФ) радиометра в  $i$ -х,  $j$ -х элементах дискретизации угла места  $\theta_i$  и азимута  $\varphi_j$ , учитывающая действие диаграммы направленности антенны (ДНА) и тракта первичной обработки радиометра на входной сигнал;  $x(i, j)$  – элементы искомого теплового изображения, представляющие интенсивность электромагнитного поля излучения в  $i$ -м,  $j$ -м угловом направлении в температурной шкале;  $p(i, j)$  – шумы аппаратуры;  $2m+1$  и  $2n+1$  – соответственно ширина ДНА по углу места и азимуту в количестве элементов дискретизации; числа  $M$  и  $N$  определяют размеры области  $D$  в

количестве строк и столбцов искомой матрицы  $X = \{x(i, j)\}$ ,  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ .

Задача заключается в оценивании матрицы  $X$  по наблюдениям (1).

В радиометрической системе с целью повышения разрешающей способности изображения по угловым координатам матрица  $Y$  может подвергаться операциям восстановления изображения с помощью оператора восстановления  $R_1$  в пространственной или частотной областях, то есть оценивания ненаблюдаемых величин  $x(i, j)$  на основе наблюдений  $y(i, j)$  и известной АФ  $A = \{\alpha(i, j)\}$ :  $X_1 = R_1[Y, A]$ . Результатом восстановления изображения области  $D$  будет  $M \times N$ -матрица  $Y_1 = \{y_1(i, j)\}$  оценок  $y_1(i, j)$  искомых величин  $x(i, j)$ :

$$y_1(i, j) = \mu_1 \sum_{i_1=-m_1}^{m_1} \sum_{j_1=-n_1}^{n_1} \beta(i_1, j_1) x(i+i_1, j+j_1) + \varepsilon(i, j), \quad (2)$$

$$i = \overline{1, M}, \quad j = \overline{1, N}, \quad m_1 < m, \quad n_1 < n,$$

где  $\mu_1$  – коэффициент остаточного радиометрического преобразования;  $\beta(i, j)$  – функция рассеяния точки (ФРТ), описывающая остаточное искажение  $x(i, j)$  в  $(2m_1 + 1) \times (2n_1 + 1)$ -окрестности  $i$ -го,  $j$ -го элемента матрицы  $Y_1$  в силу ограниченной точности восстановления при низком контрасте РИ  $Y$ ;  $\varepsilon(i, j)$  – остаточные шумы.

Задача заключается в оценивании матрицы  $X$  по наблюдениям (2).

### Модель оптического изображения

Оптическое изображение (ОИ) области  $D$ , полученное с помощью фото или видео камеры с учетом геометрических совмещений, дает  $M_1 \times N_1$ -матрицу  $X_1 = \{x_1(i, j)\}$ , элементы  $x_1(i, j)$  которой удовлетворяют модели:

$$x_1(i, j) = \mu_0 x_0(i, j) + \xi(i, j), \quad i = \overline{1, M_1}, \quad j = \overline{1, N_1}, \quad (3)$$

где  $\mu_0$  – коэффициент оптического преобразования;  $x_0(i, j)$  – амплитуда (интенсивность) оптического излучения в  $i$ -м,  $j$ -м угловом направлении;  $\xi(i, j)$  – шум аппаратуры;  $M_1$  и  $N_1$  – размеры матрицы ОИ, в  $k$  раз превышающие размеры  $M$  и  $N$ -матрицы РИ за счет меньшего в  $k$  раз элемента дискретизации:  $M_1 = k \cdot M$ ,  $N_1 = k \cdot N$ ,  $k$  – масштабный множитель.

### Алгоритм совместной обработки РИ и ОИ

Алгоритм сводится к следующим операциям:

1. В результате сканирования антенной радиометра зоны обзора формируется матрица РИ  $Y$  модели (1).

2. Матрица  $Y$  может подвергаться операциям восстановления с помощью оператора восстановления  $R_1$  [4, 5]. В этом случае формируется матрица восстановленного РИ  $Y_1 = R_1[Y, A]$  модели (2).

3. С помощью оптической системы получается матрица ОИ  $X_1$  модели (3).

4. Матрица  $X_1$  приводится в соответствие масштабу матрицы  $Y$  или  $Y_1$  пересчетом значений ее элементов по формуле:

$$x_2(i, j) = (1/k^2) \sum_{i_1=1}^k \sum_{j_1=1}^k x_1(k(i-1)+i_1, k(j-1)+j_1),$$

$$i = \overline{1, M}, \quad j = \overline{1, N}.$$

Получается матрица ОИ  $X_2$  с разрешением искомой матрицы  $X$ .

5. Матрица  $X_2$  разбивается на  $K$  непересекающихся однородных по амплитуде подобластей  $D_1, D_2, \dots, D_K$  с помощью оператора  $R_2$  сегментации [6]:  $S = R_2[X_2]$ . Например, оператором пороговой обработки и сшивания граничных областей с одним уровнем амплитуды [7, 8]. В результате получается матрица меток  $S = \{S(i, j)\}$ ,  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ , где  $S$  – номер сегмента, которому принадлежит  $i$ -й,  $j$ -й элемент матрицы  $X_2$ .

6. Для каждого  $s$ -го сегмента матрицы  $X_2$  вычисляется средняя нормированная радиометрическая амплитуда  $\tilde{y}_2(s)$  усреднением амплитуд соответствующих  $i$ -х,  $j$ -х элементов  $y(i, j)$  матрицы  $Y$  или элементов  $y_1(i, j)$  матрицы  $Y_1$  с теми же метками  $S(i, j)$ :

$$\tilde{y}_2(s) = (1/n_s) \sum_i \sum_j y(i, j), \quad \forall i, j: S(i, j) = s, \quad (4)$$

где  $n_s$  – количество элементов с меткой  $s$ .

7. Амплитуда  $\tilde{y}_2(s)$  присваивается элементам матрицы  $X_2$  с меткой  $S(i, j) = s$ :  $x_2(i, j) = \tilde{y}_2(s)$ ,  $\forall i, j: S(i, j) = s$ , то есть каждой подобласти матрицы  $X_2$  присваивается средняя радиометрическая амплитуда. Получается матрица  $X_2 = \{x_2(i, j)\}$ ,  $i = \overline{1, M}$ ,  $j = \overline{1, N}$ , с пространственным разрешением, равным размерам искомой матрицы теплового изображения, амплитуды элементов которой соответствуют радиометрической температуре  $i$ -х,  $j$ -х элементов местности.

8. Амплитуды элементов  $x_2(i, j)$  полученной матрицы  $X_2$  переводятся в уровни цветности. В результате получается цветное изображение контролируемого участка местности с информацией о температуре излучающих элементов поверхности.

### Замечание

Возможна другая реализация п. 4 алгоритма, а именно:

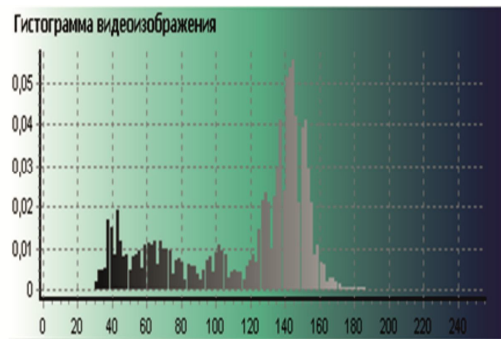
4. Матрица  $Y$  или  $Y_1$  приводится в соответствие масштабу матрицы  $X_1$  включением в их состав дополнительных строк и столбцов. Получается матрица  $Y = \{y(i, j)\}$  или  $Y_1 = \{y_1(i, j)\}$ ,  $i = \overline{1, M_1}$ ,  $j = \overline{1, N_1}$ . Элементы дополнительных строк и столбцов вычисляются с помощью линейной интерполяции соответствующих элементов соседних строк и столбцов. При дальнейшей обработке формируется тепловое изображение  $X_2$  с разрешающей способностью оптического изображения  $X_1$ .

### Результаты экспериментального исследования

Натурные испытания проводились с помощью радиометра в 3 мм диапазоне длин волн при наблюдении объектов на местности на расстоянии 100 м. На рис. 1,а показано видео изображение наблюдаемого участка местности, приведенное к масштабу искомого теплового изображения – матрица  $X_2$ . На рис. 1.б – гистограмма амплитудного видео изображения, используемая для определения двух порогов при трехуровневой сегментации. На рис. 1,в – отсегментированное видео изображе-



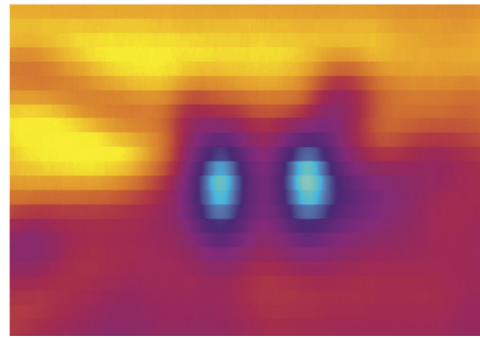
а)



б)



в)



а)



д)

Рис. 1. Результаты экспериментального исследования

ние. На рис. 1,г показано в цвете радиометрическое изображение того же участка местности – матрица  $Y$ . На рис. 1,д – радиометрическое изображение, приведенное к отсегментированному видео изображению в соответствии с предложенным алгоритмом. Видно более четкое тепловое изображение на рис. 1,д по сравнению с тепловым изображением на рис. 1,г.

### Заключение

Предложенный алгоритм, в отличие от существующих алгоритмов формирования тепловых изображений, позволяет наблюдать тепловое изображение объектов на отсегментированном видео изображении, отвечающее радиолокационному миллиметровому диапазону длин волн. Это дает дополнительную информацию о тепловых свойствах объектов в указанном диапазоне.

Проводятся дополнительные исследования, направленные на повышение разрешающей способности тепловых изображений, а также формирование тепловых изображений объектов, скрытых на местности.

### Литература

1. Обработка изображений в геоинформационных сис-

темах: учеб. пособие / В.К. Злобин, В.В. Еремеев, А.Е. Кузнецов. Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2006. 264 с.

2. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. / Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.

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

4. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. 304 с.

5. Ключко В.К., Кузнецов В.П. Восстановление изображений объектов по прореженной матрице наблюдений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 55. С. 111-117.

6. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006. 616 с.

7. Математические методы восстановления и обработки изображений в радиотеплооптоэлектронных системах / В.К. Ключко; Ряз. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2009. – 228 с.

8. Обработка изображений и управление в системах автоматического сопровождения объектов: учеб. пособие / Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин; Ряз. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2011. 236 с.