

# Совмещение оптических изображений с радиометрическими и оценка погрешностей

В.К. Ключко<sup>1</sup>, С.М. Гудков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, Гагарина, 59/1, Рязань, 390005, Россия

<sup>2</sup> Рязанская радиоэлектронная компания, Костычева, 11А/Н4, Рязань, 390044, Россия

## Аннотация

Изложен алгоритм совмещения изображений, полученных в совмещенной оптико-радиометрической системе наблюдения за объектом. Алгоритм основан на совмещении матриц оптического и радиометрического изображений, сегментации оптического изображения и передачи радиояркостной температуры радиометрического изображения сегментам оптического изображения. Показан пример совмещения изображений, из которого следует, что совместная обработка оптического и радиометрического изображений позволяет наблюдать тепловое изображение объектов с пространственным разрешением оптического изображения с сохранением радиояркостных характеристик радиометрического изображения миллиметрового диапазона длин волн. Проведен сравнительный расчет погрешностей определения направлений на объект наблюдения. Дана сравнительная оценка погрешностей оптической и радиометрической систем, показывающая, что в условиях рассмотренного примера ошибка определения пространственного положения центра объекта при известной дальности с помощью оптической системы в десятки раз меньше, чем с помощью радиометрической. Предложена концепция совместной работы двух систем наблюдения, позволяющая повысить скорость работы радиометрической системы при формировании изображения объекта за счет определения центра объекта с помощью оптической системы.

## Ключевые слова

Оптическое изображение, радиометрическое изображение, сегментация, совмещение изображений, оценка погрешностей.

# Combining an Optical Image of an Object with a Radiometric one and Errors Estimation

V.K. Klochko<sup>1</sup>, S.M. Gudkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Gagarin, 59/1, Ryazan, 390005, Russia

<sup>2</sup> Ryazan Radioelectronic Company, Kostycheva, 11A/N4, Ryazan, 390044, Russia

## Abstract

An algorithm for combining images obtained in a combined optical-radiometric object observation system is described. The algorithm is based on combination of optical and radiometric image matrices, segmentation of optical image and transmission of radiometric image temperature to the optical image segments. An example of combining images is shown, from which it follows that the joint processing of optical and radiometric images makes it possible to observe the thermal image of objects with the spatial resolution of optical image while preserving the radio brightness characteristics of radiometric image of millimeter wavelength range. A comparative calculation of errors in determining the directions to the object of observation is carried out. A comparative assessment of errors of optical and radiometric systems is given, showing that in the conditions of considered example, the error in determining the spatial position of object's center at a known range using an optical system is ten times less than using a radiometric one. The concept of joint operation

<sup>1</sup>ГрафиКон 2023: 33-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-21 сентября 2023 г., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Россия

EMAIL: klochkovk@mail.ru (В. К. Ключко)

ORCID: 0000-0003-2550-999X (В.К. Ключко)



© 2023 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

of two surveillance systems is proposed, which allows to increase the speed of radiometric system when forming the object's image by determining the object's center by using the optical system.

### Keywords

Optical image, radiometric image, segmentation, image alignment, error estimation.

## 1. Введение

В настоящее время радиометры активно применяются для измерения радиояркостной температуры различных слоев атмосферы [1, 2], что значительно эффективней, чем запуск специальных зондов. Известны разработки по использованию радиометров для обнаружения воздушных объектов [3]. Также имеется опыт радиометрического видения при формировании изображений объектов [4 – 7] в миллиметровом диапазоне длин волн. Изображение объекта формируется в растровом режиме путем сканирования круговой антенны радиометра вдоль изучаемого объекта. Кроме того исследуется возможность применения антенных решеток в радиометрическом видении [4].

Цель работы – показать возможность повышения четкости радиометрических изображений объектов и сохранения при этом их радиояркостной температуры.

## 2. Модели изображений и связь координат

Полученное радиояркостное изображение (РИ) объекта и окружающего его фона математически описывается двумерной сверткой

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

где  $y(i, j)$  – амплитуда сигнала, измеренного в  $i$ -м,  $j$ -м угловом направлении угла места  $\theta_i$  и азимута  $\phi_j$  в антенной системе координат и прошедшего тракт первичной обработки;  $\alpha(i, j)$  – аппаратная функция, характеризующая действие диаграммы направленности антенны и ее искажение при обработке принятого сигнала;  $x(i, j)$  – искомое поле по совокупности точек  $X = \{(i, j)\}$ , характеризующее радиояркостную температуру, излучаемую объектом и фоном в  $i$ -х,  $j$ -х угловых направлениях;  $p(i, j)$  – шум аппаратуры. Совокупность  $Y = \{y(i, j)\}$  формирует  $M \times N$ -матрицу РИ. Оптическое изображение (ОИ) объекта, полученное с помощью фото- или видеокамеры, совмещенной с радиометром, дает  $M_1 \times N_1$ -матрицу  $X_1 = \{x_1(i, j)\}$ , элементы  $x_1(i, j)$  которой удовлетворяют модели:

$$x_1(i, j) = \mu_0 x_0(i, j) + \xi(i, j), \quad i = \overline{1, M_1}, \quad j = \overline{1, N_1}, \quad (2)$$

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.

В кадре ОИ центр объекта наблюдается как точка в прямоугольной системе координат  $O_1xy$  кадра изображения. Из известных пропорций следует связь координат  $x, y$  с координатами  $X, Y, Z$  центра объекта в общей прямоугольной системе координат:

$$X = -xZ/f, \quad Y = -yZ/f, \quad (3)$$

где  $f$  – фокусное расстояние оптической линзы.

В радиометрическом приемнике пространственное положение точки измеряется в сферической системе координат  $O, r, \theta, \phi$ , где угол места  $\theta$  отсчитывается относительно горизонтальной плоскости  $OXZ$ , а азимут  $\phi$  – относительно оси  $OZ$ , направленной в сторону объекта, при этом существует связь:

$$X = r \cos \theta \sin \phi, \quad Y = r \sin \theta, \quad Z = r \cos \theta \cos \phi. \quad (4)$$

Из (3) и (4) следует

$$\begin{aligned} X = -xrcos\theta \cos \phi / f = r \cos \theta \sin \phi &\Rightarrow -x/f = \operatorname{tg} \phi, \\ Y = -yrcos\theta \cos \phi / f = r \sin \theta &\Rightarrow -y/f = \operatorname{tg} \phi / \cos \phi. \end{aligned}$$

Окончательно имеем формулы пересчета координат  $(x, y) \rightarrow (\phi, \theta)$ :

$$\phi = \operatorname{arctg}(-x/f), \quad \theta = \operatorname{arctg}(-y/\sqrt{x^2 + f^2}). \quad (5)$$

### 3. Алгоритм совмещения изображений

Совмещение ОИ и РИ проводится с целью повышения четкости РИ. Процедура совмещения следующая.

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

2. С помощью оптической системы получается матрица ОИ  $X_1$  модели (2).

3. Матрица  $X_1$  приводится в соответствие масштабу матрицы  $Y$  пересчетом значений ее элементов по формуле

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

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

4. Матрица  $X_2$  разбивается на  $K$  непересекающихся однородных по амплитуде подобластей  $D_1, D_2, \dots, D_K$  с помощью оператора  $R_S$  сегментации:  $S = R_S[X_2]$ . Например, оператором пороговой обработки с несколькими уровнями и сшиванием граничных областей [5]. 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  $X_2$ .

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

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

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

6. Амплитуда  $\mathfrak{y}_2(s)$  присваивается элементам матрицы  $X_2$  с меткой  $S(i, j) = s$ :  $x_2(i, j) = \mathfrak{y}_2(s)$ ,  $\forall i, j: S(i, j) = s$ , 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 элементов искомой матрицы теплового изображения, амплитуды которых пропорциональны радиометрической температуре  $i$ -х,  $j$ -х элементов изображения объекта.

7. 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 объектов и фона.

Уточним изложенный выше алгоритм совместной обработки РИ и ОИ с использованием формулы (5).

1. Осуществляется совмещение РИ и ОИ по границам зоны обзора так, что устанавливается соответствие между максимальными значениями координат в матрицах РИ и ОИ:  $x_{max}, y_{max} \sim \varphi_{max}, \theta_{max}$ . После этого матрица ОИ  $X_1$  приводится в соответствие масштабу матрицы РИ  $Y$  по формуле п.3 алгоритма, в результате получается матрица ОИ  $X_2$ .

2. Прямоугольные координаты  $x, y$  центра каждого элемента матрицы  $X_2$  пересчитываются в угловые координаты вспомогательной матрицы  $X_2^*$  (размера матрицы  $X_2$ ) по формуле (5).

3. Выбирается элемент матрицы  $X_2^*$ , центр которого – ближайший к  $(\varphi, \theta)$ . В данном элементе матрицы  $X_2^*$  запоминается амплитуда соответствующего элемента матрицы  $X_2$ .

4. Если в элемент матрицы  $X_2^*$  пересчитывается более одного элемента матрицы  $X_2$ , то амплитуды пересчитанных элементов усредняются. Если ни одного элемента не пересчитывается, то записывается средняя амплитуда окаймляющих элементов матрицы  $X_2^*$ .

5. Далее выполняются операции пп. 5–7 рассмотренного выше алгоритма с участием матрицы  $X_2^*$  вместо  $X_2$ .

### 4. Пример совмещения изображений

С помощью радиометра в 3 мм диапазоне длин волн наблюдался объект в виде двух щитов на местности на расстоянии 100 м. На рисунке 1а показано видеоизображение наблюдаемого участка местности, приведенное к масштабу искомого теплового изображения – матрица  $X_2$ . На рисунке 1.б – гистограмма амплитудного видеоизображения, используемая для определения порогов при трехуровневой сегментации. На рисунке 1в – отсегментированное видео изображение. На рисунке 1г показано в цвете радиометрическое изображение того же участка

местности – матрица  $Y$ . На рисунке 1д – радиометрическое изображение, приведенное к отсегментированному видео изображению в соответствии с алгоритмом совмещения ОИ и РИ. Видно более четкое тепловое изображение рисунке 1д по сравнению с рисунком 1 г.

Таким образом, совместная обработка ОИ и РИ позволяет наблюдать тепловое изображение объектов с пространственным разрешением оптического изображения с сохранением тепловых характеристик, характерных для миллиметрового диапазона длин волн.

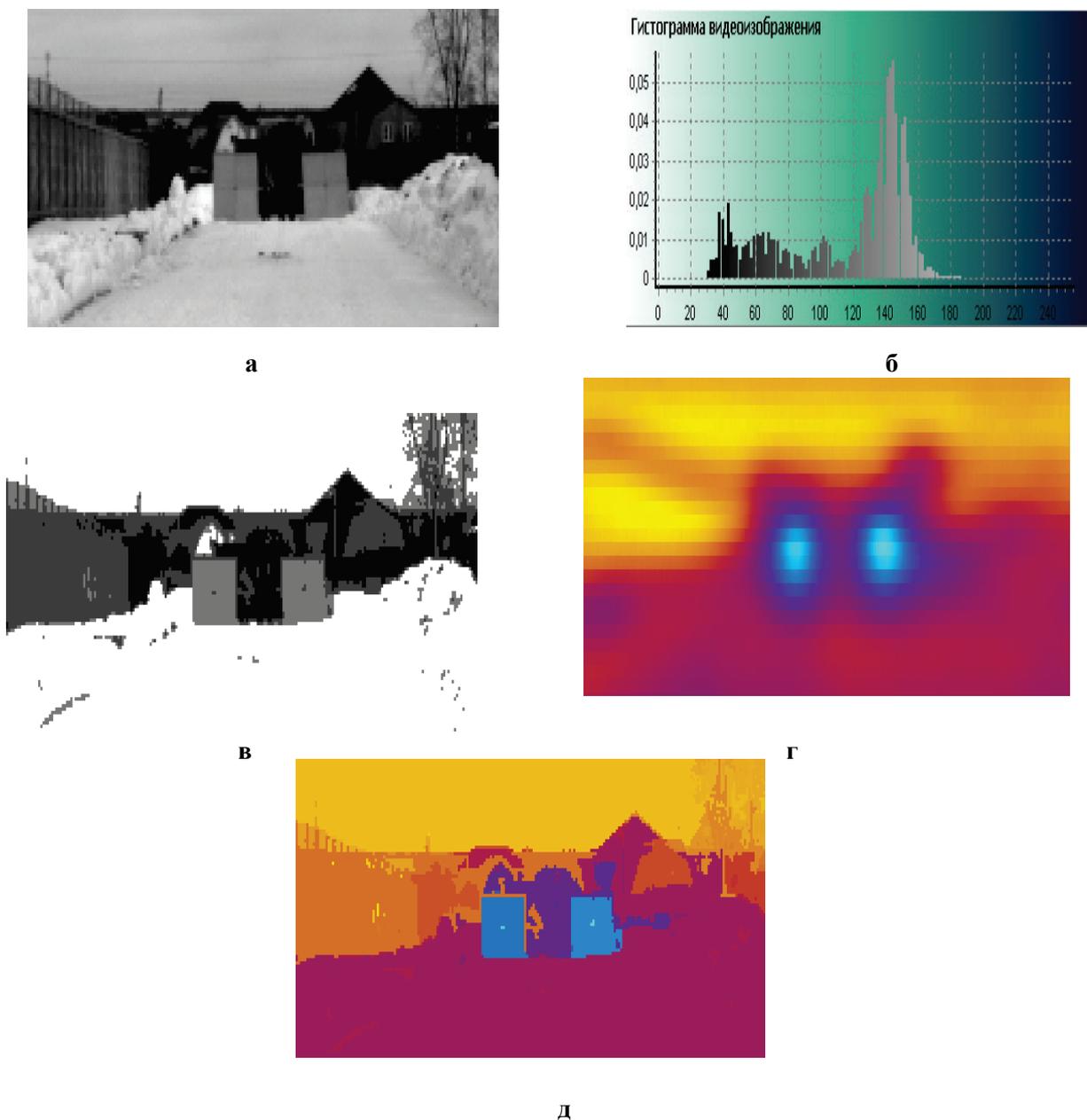


Рисунок 1 – Совместная обработка РИ и ОИ

## 5. Оценка погрешностей

Дадим оценку предельным абсолютным погрешностям определения координат центра объекта, получаемых в оптическом приемнике. В оптическом приемнике с фокусным расстоянием линзы  $f$  точечный объект (или центр протяженного объекта) имеет в системе координат  $O_1, x$ , укадра видео изображения прямоугольные координаты  $x$  и  $y$ . Координаты орта  $a = (a_x, a_y, a_z)$  направления на объект находятся как:

$$a_x = -\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2+f^2}}, \quad a_y = -\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2+f^2}}, \quad a_z = \sqrt{1 - a_x^2 - a_y^2} = \frac{f}{\sqrt{x^2+y^2+f^2}}. \quad (6)$$

Запишем выражение орта  $a$  в матричной форме с учетом (6):

$$a = (a_x, a_y, a_z)^T = (-x, -y, f)^T / \sqrt{x^2 + y^2 + f^2},$$

(7)

где  $T$  – символ транспонирования.

Оценим методическую погрешность определения координат орта (7) в зависимости от инструментальной погрешности измерения координат объекта в видео кадре, определяемой размером пикселя матрицы изображения. Для этого найдем вектор абсолютных приращений координат  $\Delta a = (|\Delta a_x|, |\Delta a_y|, |\Delta a_z|)^T$ , заменив полные приращения  $\Delta a_x, \Delta a_y, \Delta a_z$  функций  $a_x, a_y, a_z$  дифференциалами:

$$\begin{aligned} |\Delta a_x| &\approx |da_x| \leq \left| \frac{\partial a_x}{\partial x} \right| h_{xy} + \left| \frac{\partial a_x}{\partial y} \right| h_{xy} = \frac{|xy|+y^2+f^2}{\sqrt{(x^2+y^2+f^2)^3}} h_{xy} = \Delta_{ax}, \\ |\Delta a_y| &\approx |da_y| \leq \frac{|xy|+x^2+f^2}{\sqrt{(x^2+y^2+f^2)^3}} h_{xy} = \Delta_{ay}, \quad |\Delta a_z| \approx |da_z| \leq \frac{(|x|+|y|)f}{\sqrt{(x^2+y^2+f^2)^3}} h_{xy} = \Delta_{az}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $h_{xy} = |\Delta x| = |\Delta y|$  – инструментальная погрешность определения координат  $x$  и  $y$ , которую примем равной линейному размеру пикселя матрицы видео кадра (пространственному разрешению кадра).

Правые части неравенств (8) представляют предельные абсолютные погрешности измерения координат орта (7). Соответственно вектор предельных абсолютных погрешностей координат запишется как  $\Delta a = (\Delta_{ax}, \Delta_{ay}, \Delta_{az})^T$ . Из (8) видно, что погрешности зависят от координат объекта  $x, y$ , зафиксированных в кадре изображения. При  $f > x, y$ , например для  $f = 0,2 \div 0,3$  м и максимальных размеров видео кадра  $x_{\max} = y_{\max} = 0,03 \div 0,04$  м приближенно можно принять эквивалентность:

$$\Delta a \sim h_{xy}(f^{-1}, f^{-1}, 2x_{\max}/f^2)^T,$$

из чего следует, что предельные абсолютные погрешности измерения координат орта уменьшаются с увеличением фокусного расстояния.

В радиометрическом приемнике орт вектора пространственных координат объекта с учетом (4) определится как:

$$\vec{a} = (a_x, a_y, a_z) = (X, Y, Z)/r = (\cos\theta\sin\phi, \sin\theta, \cos\theta\cos\phi),$$

или в матричной форме:

$$a = (a_x, a_y, a_z)^T = (\cos\theta\sin\phi, \sin\theta, \cos\theta\cos\phi)^T. \quad (9)$$

где  $\theta$  и  $\phi$  – угловые координаты центра объекта в антенной системе координат, совмещенной по центру с оптической линзой.

Абсолютные приращения координат орта (9) найдутся аналогично (8):

$$\begin{aligned} |\Delta a_x| &\leq \left| \frac{\partial a_x}{\partial \theta} \right| \Delta_{\theta\phi} + \left| \frac{\partial a_x}{\partial \phi} \right| \Delta_{\theta\phi} = (|\sin\theta\sin\phi| + |\cos\theta\cos\phi|)\Delta_{\theta\phi} = \Delta_{ax}, \\ |\Delta a_y| &\leq \left| \frac{\partial a_y}{\partial \theta} \right| \Delta_{\theta\phi} = |\cos\theta|\Delta_{\theta\phi} = \Delta_{ay}, \quad |\Delta a_z| \leq (|\sin\theta\cos\phi| + |\cos\theta\sin\phi|)\Delta_{\theta\phi} = \Delta_{az}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\Delta_{\theta\phi}$  – инструментальная погрешность определения координат  $\theta$  и  $\phi$  (в радианах), которую примем равной ширине ДНА на уровне 0,5 мощности (разрешающей способности антенны). Из (10) получаем вектор абсолютных погрешностей  $\Delta a = (\Delta_{ax}, \Delta_{ay}, \Delta_{az})^T$ , зависящий от угловых координат  $\theta, \phi$ .

При обзоре в пределах  $\pm 30^\circ$  и  $\theta = \phi = 30^\circ$  вектор  $\Delta a$  определится как  $\vec{\Delta a} = \Delta_{\theta\phi}(1, \sqrt{3}/2, \sqrt{3}/2)^T \sim \Delta_{\theta\phi}(1, 1, 1)^T$ , и ошибки будут соизмеримы с шириной ДНА.

## 6. Сравнительная оценка

Рассмотрим вектор погрешностей

$$\Delta_M = r\Delta a = (\Delta_{Mx}, \Delta_{My}, \Delta_{Mz})^T = r(\Delta_{ax}, \Delta_{ay}, \Delta_{az})^T$$

определения пространственных координат центра объекта  $M_x, M_y, M_z$  при известной дальности  $r$  в оптическом и радиометрическом приемниках:

$$1) \Delta_M \sim r h_{xy} (f^{-1}, f^{-1}, 2x_{\max}/f^2)^T; \quad 2) \Delta_M \sim r \Delta_{\theta\phi} (1, 1, 1)^T.$$

Пусть в видео кадре размером  $0,03 \times 0,03$  м с количеством пикселей  $300 \times 300$  размером пикселя  $h_{xy} = 0,03/300 = 10^{-4}$  м фиксируются координаты объекта  $x = y = 0,03$  м при фокусном расстоянии  $f = 0,3$  м. Для сравнения ширина ДНА радиометрического приемника равна  $\Delta_{\theta\phi} = 1^\circ (0,017 \text{ рад})$ . Тогда предельные абсолютные погрешности измерения координат объекта в соответствии с (11) на дальности  $r = 100$  м составят:

$$1) \Delta_M \sim 0,03(1, 1, 0,2)^T; \quad 2) \Delta_M \sim 1,7(1, 1, 1)^T.$$

Соответственно модули векторов погрешностей будут:

$$1) |\Delta_M| \sim 0,04 \text{ м}; \quad 2) |\Delta_M| \sim 2,94 \text{ м}.$$

Отсюда заключаем, что в условиях данного примера ошибка определения пространственного положения центра объекта при известной дальности с помощью оптического приемника в 74 раз меньше, чем с помощью радиометрического.

Кроме того, радиометрический приемник существенно проигрывает по скорости слежения за объектом и формирования его изображения из-за необходимости накопления сигнала при сканировании. Так, для сектора обзора в  $\phi_{\max} = 30^\circ$  по азимуту при шаге сканирования  $\phi_{\max}/100 = 0,3^\circ$  и времени накопления сигнала  $0,1$  с формируется строка изображения в 100 элементов за 10 с. Соответственно матрица РИ  $100 \times 100$  формируется за 17 мин. Для оптической системы видимого и инфракрасного диапазонов длин волн накопление сигнала отсутствует, и изображение сектора обзора формируется за доли секунды.

## 7. Концепция совместной работы

Необходимость повышения быстродействия формирования РИ в системе совмещенных оптических и радиометрических приемников приводит к следующей концепции совместной работы приемников при наблюдении за объектом.

1. В оптическом приемнике формируется оптическое изображение сектора обзора (видео кадр).

2. По результатам обработки полученного видео кадра определяются прямоугольные координаты  $x, y$  центра объекта в системах координат оптического приемника.

3. Координаты  $x, y$  пересчитываются по формулам (4):

$$\phi = \arctg(-x/f), \quad \theta = \arctg(-y/\sqrt{x^2 + f^2}).$$

в угловые координаты  $\phi, \theta$ , которые передаются радиометрическому приемнику, совмещенному с оптическим приемником.

4. Линия визирования радиометрического приемника выводится в направлении  $\phi, \theta$ , после чего антенна радиометра сканирует в малой окрестности переданных угловых координат  $\phi, \theta$ .

5. По результатам сканирования формируется радиотепловое (амплитудное) изображение объекта в координатах  $\theta, \phi$  радиометрического приемника, которые несут дополнительную информацию о свойстве объекта, скрытого камуфляжем. Или измеряется амплитуда (температурная характеристика) объекта в направлении  $\theta, \phi$ .

## 8. Заключение

Рассмотрен алгоритм совмещения ОИ и РИ объекта, основанный на передаче РИ сегментам ОИ. В результате получается РИ объекта с четкостью ОИ, показывающее радиояркую температуру. Представлены результаты натурального эксперимента по совмещению изображений. Дан расчет погрешностей определения направлений на объект в двух системах и показано преимущество оптической системы. На основе этого сформулирована концепция совместной работы двух систем с целью повышения быстродействия формирования РИ. Результаты могут быть использованы в системах наблюдения за объектами и при создании их радиоярких эталонных изображений.

## 9. СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Кутуза Б. Г., Данилычев М. В, Яковлев О. И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. Москва.: Изд. ЛЕНАНД. 2015. 333 с.
- [2] Кадыгров Е. Н., Кузнецова И. Н. Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном слое микроволновыми профиломерами: теория и практика. Долгопрудный.: Издание «Физматкнига», 2015, 171 с.
- [3] Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов / под ред. Р. П. Быстрова и А. В. Соколова. М.: Радиотехника, 2008. 320 с.
- [4] Тимановский А.Л., Порогов Ю.А. Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения: монография. М.: Радиооехника, 2017. 160 с.
- [5] Математические методы восстановления и обработки изображений в радиотеплоопто-электронных системах / В.К. Клочко. Рязань: РГРТУ, 2009. 228 с.
- [6] Математические методы пространственно-временной обработки сигналов в радио- и оптико-электронных системах: монография / В. К. Клочко. Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2020. 164 с.
- [7] Методы обработки изображений точечных и протяженных объектов в оптических и радиометрических системах: учеб. пособие / В. К. Клочко. Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2022. 84 с.