

## АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

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

*Гудков С.М., аспирант РГРТУ, e-mail: s.m.gudkov@yandex.ru.*

### ALGORITHM OF OBJECTS IMAGES PARAMETERS ESTIMATION ACCORDING TO RADIOMETRIC OBSERVATIONS

*Klochko V.K., Gudkov S.M.*

*The algorithm of segments parameters estimation of several objects images changing in the sequence of the review cycles of the scanning radiometer is offered. The algorithm is based on preliminary segmentation of the radio thermal image matrixes of the review zone in each review cycle with the subsequent classification of segments parameters vectors by accessory to objects and parameters estimation taking into account timepoints of segments formation. The trajectory parameters estimates, based on segments movement model, allow to realize attending of objects. The results of computer simulation confirming operability of an algorithm are given.*

**Key words:** radiometer, radio thermal images, segmentation, classification, model of movement, parameters estimations, trajectory processing.

**Ключевые слова:** радиометр, радиотепловые изображения, сегментация, классификация, модель движения, оценки параметров, траекторная обработка.

#### Введение

В пассивных системах радиовидения миллиметрового диапазона длин волн возникает необходимость обнаружения объектов и определения траекторий их движения в реальном времени [1] по данным радиометрических наблюдений. В системах активной радиолокации задача обнаружения траекторий движения воздушных объектов хорошо известна и предложены различные методы ее решения, например [2 – 4]. Подобная задача возникает и при наблюдении наземных объектов с помощью пассивной радиометрической системы. Особенность такой системы заключается в механическом сканировании антенной радиометра зоны обзора по азимуту и углу места, что занимает определенное время. Моменты времени образования сегментов изображений объектов в одном цикле обзора различаются. В последовательности циклов обзора изображения объектов и их взаимное пространственное положение меняются, что требует использования соответствующих моделей движения с учетом моментов времени образования сегментов.

Цель работы – разработка алгоритма оценивания параметров меняющихся сегментов изображений нескольких объектов в последовательности циклов обзора сканирующей радиометрической системы с учетом моментов времени образования сегментов.

#### Постановка задачи

В последовательности  $i$ -х циклов обзора радиометра ( $i = \overline{1, n}$ ) наблюдаются множества  $j$ -х векторов оценок параметров сегментов изображений  $m$  объектов

*Предложен алгоритм оценивания параметров сегментов меняющихся изображений нескольких объектов в последовательности циклов обзора сканирующего радиометра. Алгоритм основан на предварительной сегментации матриц радиотеплового изображения зоны обзора в каждом цикле обзора с последующей классификацией векторов параметров сегментов по принадлежности объектам и оценкой параметров с учетом моментов времени образования сегментов. Оценки траекторных параметров, основанные на модели движения сегментов, позволяют осуществлять сопровождение объектов. Приводятся результаты компьютерного моделирования, подтверждающие работоспособность алгоритма.*

$Y_{ij} = (t_{ij}, y_k(i, j), k = \overline{1, L}), j = \overline{1, m_i}, i = \overline{1, n}$ , где  $m_i$  – количество векторов, найденных в  $i$ -м цикле обзора в результате сегментации матрицы изображения [4, 5]. В составе векторов присутствуют:  $t_{i,j}$  – моменты времени формирования векторов;  $y_1, y_2$  – оценки координат центров сегментов;  $x_k, k = \overline{3, L}$  – оценки других параметров (амплитуда, площадь в количестве пикселей изображения и др.).

Наблюдаемые оценки параметров  $y_k(i, j_\rho), i = \overline{1, n}, k = \overline{1, L}$ , отнесенные к  $\rho$ -му объекту, связаны с ненаблюдаемыми векторами состояния  $X_k(i, j_\rho)$   $k$ -х параметров  $\rho$ -го объекта моделью измерения вида [4]:

$$y_k(i, j_\rho) = H^\tau X_k(i, j_\rho) + \xi_k(i, j_\rho), k = \overline{1, L}, i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $H^\tau = (1, 0)$ ;  $\tau$  – символ транспонирования;  $X_k(i, j_\rho) = (x_k(i, j_\rho), x'_k(i, j_\rho))^\tau$  – вектор состояния  $k$ -го параметра  $j$ -го вектора, принадлежащего  $\rho$ -му объекту, в  $i$ -м цикле обзора, включающий  $k$ -й параметр  $x_k(i, j_\rho)$  и скорость его изменения  $x'_k(i, j_\rho)$  в момент времени  $t_{i,j_\rho}$ ;  $\xi_k(i, j_\rho)$  – некоррелированные нормальные ошибки

оценивания:  $\xi_k(i, j_\rho) \in N(0, R_k)$ ,  $\forall k$ , с известными дисперсиями  $R_k$ .

Последовательность векторов состояния  $X_k(i, j_\rho)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , удовлетворяет стохастическому разностному уравнению вида [4]:

$$X_k(i, j_\rho) = F_k(i, j_\rho)X_k(i-1, j_\rho) + W_k(i, j_\rho),$$

$$i = \overline{2, n}, k = \overline{1, L}, \quad (2)$$

где  $F_k(i, j_\rho)$  – известная матрица перехода:

$$F_k(i, j_\rho) = \begin{pmatrix} 1 & t_{i, j_\rho} - t_{i-1, j_\rho} \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$k = \overline{1, 2}, F_k(i, j_\rho) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, k = \overline{3, L}, \quad (3)$$

$W_k(i, j_\rho) = (w_k(i, j_\rho), w'_k(i, j_\rho))^T$  – случайный вектор, описывающий непредвиденное изменение  $k$ -го вектора состояния на промежутке времени  $[t_{i-1, j_\rho}, t_{i, j_\rho}]$ , с гауссовой статистикой:  $W_k(i, j_\rho) \in N(0, Q_k)$ ,  $Q_k$  – ковариационная матрица, которую примем диагональной. Статистику начального вектора  $X_k(1, j_\rho)$  полагаем известной и гауссовой:  $X_k(1, j_\rho) \in N(\bar{X}_k(1, j_\rho), P_k)$  с известным средним  $\bar{X}_k(1, j_\rho)$  и ковариационной матрицей  $P_k$ , которую также примем диагональной.

Задача заключается в выделении из множеств векторов оценок  $Y_{i, j}$ ,  $j = \overline{1, m_i}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $\rho$ -х наиболее правдоподобных последовательностей векторов ( $\rho = \overline{1, m}$ ), принадлежащих  $m$  объектам, с оцениванием параметров, подчиненных моделям (1) – (3).

Для решения данной задачи воспользуемся известными калмановскими оценками параметров  $\hat{X}_k(i, j_\rho)$  векторов  $X_k(i, j_\rho)$ , например [6], вычисляемыми в последовательности  $i$ -х периодов обзора при формировании  $\rho$ -х последовательностей векторов согласно следующему алгоритму классификации и оценивания параметров.

1. В первом цикле обзора после формирования векторов оценок параметров  $Y_{1, j}$ ,  $j = \overline{1, m_1}$ , устанавливаются начальные значения векторов оценок параметров  $\hat{X}_k(1, j)$  с запоминанием моментов времени  $t_{1, j}$  в массиве  $T(1, j) = t_{1, j}$ ,  $j = \overline{1, m_1}$ . Устанавливаются начальные значения показателей  $I(j) = 0$  предполагаемых  $j$ -х последовательностей, а также начальные значения матрицы  $P_k(1, j) = ((P_k^{-1} + HR_k^{-1}H^T)^{-1})$ ,  $k = \overline{1, L}$ ,  $j = \overline{1, m_1}$ . Номера начальных векторов, отнесенных к  $j$ -м последовательностям, запоминаются в массиве  $J(1, j) = j$ ,  $j = \overline{1, M_1}$ ,  $M_1 = m_1$ ,  $M_1$  – количество начальных последовательностей.

2. В последующих  $i$ -х циклах обзора ( $i = \overline{2, n}$ ) выполняется следующее.

2.1. Рассматриваются  $g$ -е последовательности, сформированные в предыдущем  $(i-1)$ -м цикле ( $g = \overline{1, M_{i-1}}$ ). Каждой  $g$ -й последовательности ставятся в соответствие векторы  $Y_{i, j}$ ,  $j = \overline{1, m_i}$ , полученные в текущем  $i$ -м цикле. Для каждого  $j$ -го вектора  $Y_{i, j}$  вычисляется матрица перехода (3) для координат центра ( $k = \overline{1, 2}$ ), где  $t_{i-1, g}$  берется из массива  $T(i-1, g)$ :

$$F(i, j) = \begin{pmatrix} 1 & t_{i, j} - t_{i-1, g} \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

а для остальных параметров ( $k = \overline{3, L}$ ) используется одномерная модель.

Вычисляются ковариационные матрицы ошибок экстраполяции

$$Q_{k, j} = F_k(i, j)P_k(i-1, g)F_k^T(i, j) + Q_k,$$

а также дисперсии ошибок экстраполяции и измерения  $k$ -х параметров на момент времени  $t_{i, j}$ :  $D_{k, j} = H^T Q_{k, j} H + R_k$ .

С помощью дисперсий  $D_{k, j}$  строятся доверительные интервалы по правилу «бета-сигма» для нормальных случайных величин:

$$(x_{k, j}^\ominus - \beta \sqrt{D_{k, j}}, x_{k, j}^\ominus + \beta \sqrt{D_{k, j}}), k = \overline{1, L}, \quad (4)$$

где  $x_{k, j}^\ominus = \hat{x}_k(i-1, g) + x'_k(i-1, g)(t_{i, j} - t_{i-1, g})$ ,  $k = \overline{1, 2}$ , и  $x_{k, j}^\ominus = \hat{x}_k(i-1, g)$ ,  $k = \overline{3, L}$  – экстраполированные значения  $k$ -х параметров на момент времени  $t_{i, j}$ ; параметр  $\beta$  выбирается по правилу «бета-сигма», например  $\beta = 3$ .

2.2. Оценки параметров  $y_k(i, j)$ ,  $k = \overline{1, L}$ , вектора  $Y_{i, j}$  проверяются на попадание в доверительные интервалы. Если выполняется условие:

$$y_k(i, j) \in (x_{k, j}^\ominus - \beta \sqrt{D_{k, j}}, x_{k, j}^\ominus + \beta \sqrt{D_{k, j}}), \forall k = \overline{1, L},$$

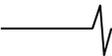
то  $g$ -я последовательность получает подтверждение с  $Y_{i, j}$  и новой нумерацией  $\rho = \overline{1, M_i}$ , где  $M_i$  – количество перспективных последовательностей, сформированных в  $i$ -м цикле. При этом номера  $j$ -х векторов, отнесенных к  $\rho$ -м последовательностям, и соответствующие им моменты времени запоминаются в массивах  $J(i, \rho) = j$  и  $T(i, \rho) = t_{i, j}$ ,  $\rho = \overline{1, M_i}$ . Для каждой  $\rho$ -й подтвержденной последовательности вычисляются и запоминаются в новой  $\rho$ -й нумерации векторы оценок:

$$\hat{X}_k(i, \rho) = F_k(i, j)\hat{X}_k(i-1, g) + B_{k, j}(y_k(i, j) - x_{k, j}^\ominus),$$

$$k = \overline{1, L},$$

где  $B_{k, j} = Q_{k, j} H D_{k, j}^{-1}$ .

Вычисляется показатель правдоподобия  $\rho$ -й последовательности как суммарный нормированный квадрат отклонений наблюдений относительно их экстраполированных значений:



$$I(i, \rho) = I(i-1, g) + \sum_{k=1}^L D_{i,j}^{-1} (y_k(i, j) - x_{k,j}^2)^2$$

и матрица  $P_k(i, \rho) = (Q_{k,j}^{-1} + HR_k^{-1}H^T)^{-1}$ ,  $\rho = \overline{1, M_i}$ .

3. После выполнения операций п. 2 в последнем  $n$ -м цикле (он может быть и текущим циклом) среди  $M_n$  последовательностей выделяются  $m$  последовательностей, которые характеризуются наименьшими значениями показателей  $I(n, \rho_j)$ ,  $j = \overline{1, m}$ , и не имеют общих отметок в массиве  $J(i, \rho)$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $\rho = \overline{1, M_n}$ . Сперва выделяется номер  $\rho_1$  последовательности с наименьшим показателем  $I(n, \rho_1)$ , этот номер исключается из дальнейшего рассмотрения в массивах  $I(n, \rho)$  и  $J(i, \rho)$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $\rho = \overline{1, M_n}$ . Затем выделяется номер  $\rho_2$  и т.д. Допускается возможность выделения последовательностей с допустимым количеством  $\pi$  (например,  $\pi = 1$  или 2) общих векторов ( $j$ -х номеров).

4. Выходом алгоритма являются векторы оценок параметров изображений объектов  $\hat{X}_k(n, \rho_j)$ ,  $k = \overline{1, L}$ ,  $j = \overline{1, m}$ , причем первые два вектора ( $k = \overline{1, 2}$ ) передаются далее на алгоритм сопровождения  $m$  объектов.

5. Возможно усложнение алгоритма по аналогии с известными алгоритмами траекторной обработки нескольких движущихся объектов [2 – 4]. Это учет возможного выхода объектов из поля видимости и появления новых объектов.

**Замечание.** Вместо доверительного интервала в п. 2.2 можно использовать более мягкое правило – сравнивать значение показателя правдоподобия, вычисленного для вектора  $Y_{i,j}$ , с порогом, установленным как квантиль хи-квадрат распределения [4]. Возможен также упрощающий вариант алгоритма – привязка к  $g$ -й последовательности одного вектора  $Y_{i,j}$ , прошедшего доверительный интервал, с наименьшим значением показателя.

## Результаты моделирования

Моделирование осуществлялось наблюдением  $m = 3$  радиотепловых изображений объектов с разными температурами (амплитудами), движущихся в последовательности  $n = 10$  циклов обзора. Размер зоны обзора по азимуту и углу места составлял  $30^\circ \times 30^\circ$ . Центры объектов менялись в соответствии с уравнением движения (2) с пересечением своих траекторий. При классификации векторов учитывались три параметра сегментов: координаты центра и амплитуды. Время одного цикла обзора занимало 5 мин.

В таблице в зависимости от среднеквадратического отклонения (СКО) ошибок оценивания координат центра и амплитуд представлены:  $d_{cp}$  – среднее значение удаления  $d$  оценок центра объектов (по евклидову расстоянию в долях градуса), полученных в последнем цикле

обзора, относительно моделируемых центров;  $\sigma[d]$  – оценка СКО случайной величины  $d$ ;  $P_{об}$  – оценка вероятности обнаружения всех  $m$  объектов. Данные получены с применением двух алгоритмов. Алгоритм 1 соответствует представленному выше описанию, он основан на рассмотрении всех продолжений последовательностей векторов, удовлетворяющих доверительным интервалам (4), что приводит к разветвлению последовательностей. Алгоритм 2 основан на привязке к каждой ранее образованной последовательности одного вектора, прошедшего доверительный интервал, с наименьшим значением показателя. Из-за отсутствия разветвления быстрое действие алгоритма 2 на порядок выше, чем алгоритма 1.

Таблица – Результаты моделирования

	Алгоритм 1			Алгоритм 2		
	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5
СКО	0,12	0,32	0,51	0,17	0,38	0,53
$d_{cp}$	0,06	0,18	0,28	0,11	0,19	0,31
$\sigma[d]$	1	1	1	1	1	0,9

## Заключение

Предложен алгоритм траекторной обработки при наблюдении сегментов изображений объектов в последовательности циклов обзора сканирующего радиометра. Алгоритм позволяет определить параметры меняющихся во времени изображений объектов и в частности параметры траекторий движения объектов, вычисляемые с учетом моментов времени образования сегментов. Алгоритм может найти применение в существующих сканирующих радиометрических системах дистанционного зондирования объектов земной поверхности.

## Литература

1. Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов / Под ред. Р.П. Быстрова и А.В. Соколова. М.: Радиотехника, 2008. 320 с.
2. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Радио и связь, 1986. 352 с.
3. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей: пер. с англ. / Под ред. А.Н. Юрьева, А.М. Бочкарева. М.: Радио и связь, 1993. 319 с.
4. Математические методы восстановления и обработки изображений в радиотеплооптоэлектронных системах / В.К. Ключко. Рязань: РГРТУ, 2009. 228 с.
5. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.
6. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Пер. с англ. под ред. Б.Р. Левина. М.: Связь, 1976. 496 с.