

УДК 621.391

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ В ПАССИВНЫХ СИСТЕМАХ РАДИОВИДЕНИЯ

В. К. Клочко, С. М. Гудков

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1  
E-mail: klochkov@mail.ru*

Предложены концепция и методы пространственно-временной обработки радиоизображений малоразмерных объектов в многопозиционной системе радиометров, позволяющие повысить эффективность функционирования данной системы. Пространственная обработка осуществляется в каждом цикле обзора сканирующих радиометров в целях определения пространственных координат объектов и взаимной ориентации систем координат. Временная обработка выполняется в последовательности циклов обзора радиометров для определения траекторных параметров меняющих взаимное положение объектов.

*Ключевые слова:* пространственно-временная обработка, многопозиционная система, радиометры, радиоизображения, взаимная ориентация, траекторная обработка.

DOI: 10.15372/AUT20180405

**Введение.** В настоящее время для наблюдения за малоразмерными объектами в неблагоприятных условиях активно используются системы тепловидения (тепловизоры), а также пассивные системы радиовидения миллиметрового диапазона длин волн (сканирующие радиометры) [1, 2]. Для данных систем справедливы общие математические модели наблюдений, на основе которых разрабатываются новые алгоритмы пространственно-временной обработки изображений объектов.

Пространственно-временная обработка осуществляется в последовательности циклов обзора сканирующих радиометров. При этом решаются следующие задачи: оценивание дальностей до объектов в каждом цикле сканирования, поиск сопряжённых пар векторов направлений на объекты, взаимная ориентация систем координат наблюдателей, нахождение траекторных параметров объектов в последовательности циклов сканирования.

Цель данного исследования — создание концепции и методов пространственно-временной обработки изображений объектов в системе радиовидения на базе сканирующих радиометров, позволяющих повысить точность оценок пространственных координат объектов и их траекторных параметров, а также надёжность функционирования системы в целом.

**Модель наблюдений и метод оценивания дальностей.** Для оптических систем с фокусным расстоянием [3] точечный объект — источник излучения, представленный точкой (вектором)  $M$  в трёхмерном пространстве, отображается в плоском кадре  $k$ -го наблюдателя ( $k = 1, 2$ ) как точка  $V_k = (x_k, y_k)$  с координатами  $x_k, y_k$ . Точки  $V_k$  и  $M$  соединяются лучом, проходящим через оптический центр линзы — точку  $O_k$ . Орты  $a_k$  и векторы  $M_k = (X_k, Y_k, Z_k)^T$  направлений на точку  $M$  в прямоугольных системах координат  $\{O_k, X_k, Y_k, Z_k\}$   $k$ -х наблюдателей определяются с учётом фокусного расстояния  $k$ -й линзы  $f_k$  как

$$a_k = (1/\sqrt{x_k^2 + y_k^2 + f_k^2})(-x_k, -y_k, f_k)^T; \quad M_k = r_k a_k, \quad k = 1, 2, \quad (1)$$

где  $T$  — символ транспонирования;  $r_k$  — наклонная дальность:  $r_k = O_k M_k$ .

В пассивной системе радиовидения миллиметрового диапазона длин волн [1] антенна сканирует пространство, меняя положение линии визирования по азимуту  $\varphi$  и углу места  $\theta$ . При каждом положении линии визирования принятые по заданному объёму пространства сигналы излучения проходят тракт первичной обработки и в цифровой форме запоминаются в элементах матрицы радиоизображения (РИ). Каждому элементу матрицы РИ соответствуют радиояркость температура (средняя по объёму пространства) и угловые координаты  $\varphi, \theta$  линии визирования в определённый момент времени сканирования. Орты  $a_k$  и векторы  $M_k$  направлений на точку  $M$  в системах координат  $k$ -х наблюдателей (в матрицах РИ) находятся следующим образом:

$$a_k = (x_k, y_k, z_k)^T = (\cos \theta_k \cdot \sin \varphi_k, \sin \theta_k, \cos \theta_k \cdot \cos \varphi_k)^T; \quad M_k = r_k a_k, \quad k = 1, 2. \quad (2)$$

Здесь  $x_k, y_k, z_k$  — координаты орта в местной прямоугольной системе координат  $k$ -го радиометра  $\{O_k, X_k, Y_k, Z_k\}$ ;  $\varphi_k, \theta_k$  — угловые координаты азимута и угла места, отсчитываемые от оси  $O_k Z_k$  и плоскости  $O_k X_k Z_k$  соответственно.

Для неподвижной точки  $M$  известна связь координат векторов  $M_1$  и  $M_2$ :

$$M_1 = P M_2 + b + e \Rightarrow M_1 - b - P M_2 = e, \quad (3)$$

где  $P = P_z P_y P_x$  — ортогональная матрица поворота вокруг осей  $O_2 X_2, O_2 Y_2, O_2 Z_2$  на углы  $\alpha, \beta, \gamma$  при переходе из системы  $\{O_2, X_2, Y_2, Z_2\}$  в систему  $\{O_1, X_1, Y_1, Z_1\}$ ;  $b = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$  — базовый вектор параллельного переноса, соединяющий центры  $O_1$  и  $O_2$ ;  $e$  — вектор ошибок измерений координат. Векторы  $M_k$  из (1) или (2) при подстановке в (3) дают равенство

$$r_1 a_1 - r_2 P a_2 - b = e, \quad (4)$$

которое является необходимым и достаточным условием сопряжения двух векторов  $a_1$  и  $a_2$  (направления на точку  $M$ ) с точностью до  $e$  при неподвижной точке  $M$ . По критерию минимума квадрата евклидовой нормы вектора ошибок

$$J(r_1, r_2) = \|e\|^2 = (r_1 a_1 - r_2 P a_2 - b)^T (r_1 a_1 - r_2 P a_2 - b), \quad (5)$$

т. е. методом наименьших квадратов (МНК), выполняются стандартные операции минимизации функции  $J(r_1, r_2)$  в (5) по  $r_1$  и  $r_2$ :

$$\partial J / \partial r_1 = 2(r_1 a_1 - r_2 P a_2 - b)^T a_1 = 0^T, \quad \partial J / \partial r_2 = 2(r_1 a_1 - r_2 P a_2 - b)^T (-P a_2) = 0^T,$$

далее после транспонирования и группирования

$$r_1 (a_1^T a) - r_2 (a_1^T P a_2) = a_1^T b; \quad r_1 (a_2^T P^T a_1) - r_2 (a_2^T a_2) = a_2^T P^T b, \quad (6)$$

где в силу ортогональности  $P^T P = I$  ( $I$  — единичная матрица).

Система (6) записывается в матричной форме с учётом  $a_2^T P^T a_1 = a_1^T P a_2$ :

$$AR = B \Leftrightarrow \begin{pmatrix} a_1^T a_1 & -a_1^T P a_2 \\ a_1^T P a_2 & -a_2^T a_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1^T b \\ a_2^T P^T b \end{pmatrix}. \quad (7)$$

С помощью обратной матрицы  $A^{-1}$  из (7) получают оценки дальностей и координат:

$$\hat{R} = A^{-1} B \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \hat{r}_1 \\ \hat{r}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1^T a_1 & -a_1^T P a_2 \\ a_1^T P a_2 & -a_2^T a_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} a_1^T b \\ a_2^T P^T b \end{pmatrix}; \quad \hat{M}_k = \hat{r}_k a_k, \quad k = 1, 2. \quad (8)$$

Для подвижной точки  $M$  в правой части равенства (3) добавляется вектор смещения  $\Delta M$ , обусловленный движением точки  $M$  за время  $\Delta t$  между моментами времени её появления в двух соседних матрицах РИ. Принимается линейное перемещение за время  $\Delta t$ .

**Система наблюдения и критерий сопряжения векторов.** Система из  $L$  пространственно распределённых радиометров одновременно сканирует зону обзора при наличии в этой зоне  $m$  малоразмерных и в общем случае движущихся объектов. По результатам сканирования формируются  $L$  матриц РИ в угловых координатах азимута  $\varphi$  и угла места  $\theta$ . Сканирование периодически повторяется. Дополнительно матрицы РИ обрабатываются алгоритмами восстановления изображений [3, 4] для повышения их чёткости и алгоритмами сегментации, например [5], в целях выделения сегментов изображений объектов.

По результатам сегментации изображений в  $k$ -х матрицах РИ ( $k = \overline{1, L}$ ) в каждом  $n$ -м цикле сканирования ( $n = \overline{1, N}$ ,  $N$  — количество таких циклов) определяются орты  $a_k(i)$  векторов  $M_k(i)$  направлений на центры  $i$ -х сегментов изображений  $m$  объектов с угловыми координатами  $\varphi_i, \theta_i$ :

$$a_k(i) = (x_{ki}, y_{ki}, z_{ki})^T = (\cos \theta_{ki} \cdot \sin \varphi_{ki}, \sin \theta_{ki}, \cos \theta_{ki} \cdot \cos \varphi_{ki}), \quad i = \overline{1, m}.$$

При известной скорости сканирования антенны для каждого  $i$ -го сегмента определён момент времени  $t_k(i)$  образования его центра.

Пусть зафиксирован  $k$ -й радиометр ( $k \in \{1, 2, \dots, L\}$ ), который связан с остальными  $q$ -ми радиометрами ( $q = \overline{1, L}$ ,  $q \neq k$ ) известной взаимной ориентацией — матрицей поворота осей координат  $P_{k,q}$  и базовым вектором  $b_{k,q}$ . При этом в системе координат  $k$ -го радиометра для пары сопряжённых векторов  $a_k(i)$  и  $a_q(j_i)$ , взятых в двух матрицах РИ и направленных к центру одного и того же  $i$ -го объекта, справедливо необходимое и достаточное условие сопряжения, подобное (3):

$$M_k(i) + \Delta M_i - b_{k,q} - P_{k,q} M_q(j_i) = e_i. \quad (9)$$

Здесь  $M_k(i) = r_k(i)a_k(i)$ ;  $M_q(j_i) = r_q(j_i)a_q(j_i)$ ;  $r_k(i)$  и  $r_q(j_i)$  — наклонные дальности до центра объекта в системах координат  $k$ -го и  $q$ -го радиометров;  $j_i$  — номер  $j$ -го орта  $q$ -го радиометра, поставленного в соответствие  $i$ -му орту  $k$ -го радиометра;  $e_i$  — вектор ошибок сопряжения ортов  $a_k(i)$  и  $a_q(j_i)$ , обусловленный ошибками измерения их координат;  $\Delta M_i$  — вектор линейного перемещения объекта на промежутке времени  $[t_k(i), t_q(j_i)]$  в одном цикле сканирования.

Решение задачи оценивания дальностей до  $m$  объектов в каждом цикле сканирования сопровождается определением  $m$  сопряжённых пар ортов векторов направлений на объекты от  $k$ -го и  $q$ -го радиометров ( $q = \overline{1, L}$ ) и выбором того  $q_k$ -го радиометра, который в паре с  $k$ -м радиометром даёт наилучший показатель сопряжения векторов. По результатам сопряжения находятся оценки пространственных координат  $m$  объектов в системе координат  $k$ -го радиометра. В последовательности циклов сканирования вычисляются траекторные параметры.

Показателем правильности сопряжения векторов для  $k$ -го и  $q$ -го наблюдателей (радиометров) принимается сумма квадратов евклидовых норм векторов ошибок сопряжения:

$$I_{k,q} = \sum_{i=1}^m \|e_i\|^2 = \sum_{i=1}^m \|\hat{M}_k(i) + \Delta \hat{M}_i - b_{k,q} - P_{k,q} \hat{M}_q(j_i)\|^2, \quad (10)$$

$$\hat{M}_k(i) = \hat{r}_k(i)a_k(i), \quad \hat{M}_q(j_i) = \hat{r}_q(j_i)a_q(j_i),$$

где оценки дальностей  $\hat{r}_k(i)$  и  $\hat{r}_q(j_i)$  вычисляются в соответствии с (8) для каждой  $i$ -й пары найденных сопряжённых векторов  $a_k(i)$ ,  $a_q(j_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , на этапе пространственной обработки, а оценки смещения  $\Delta \hat{M}_i$  определяются с учётом траекторных параметров движения  $i$ -го объекта на этапе временной обработки.

Наилучшими считаются  $m$  несовпадающих пар векторов  $a_k(i)$  и  $a_q(j_i)$ , для которых показатель (10) принимает наименьшее значение.

**Методы взаимной ориентации систем наблюдения.** Точность оценок пространственных координат объектов зависит от точности взаимной ориентации систем координат — матрицы поворота  $P_{k,q}$  и базового вектора  $b_{k,q}$ , которые периодически обновляются в связи с изменением положений наблюдателей. Известен метод взаимной ориентации двух систем координат [3] при наблюдении за  $m$  неподвижными точечными объектами, который в терминах моделей (1), (2) можно интерпретировать следующим образом.

1. Для  $m$  пар ортов  $a_k(i)$  и  $P_{k,q}a_q(j_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , поставленных в соответствие друг другу в системе координат  $k$ -го наблюдателя, составляется матричное равенство

$$\begin{pmatrix} a_k(1) \times P_{k,q}a_q(j_1) \\ \dots \\ a_k(m) \times P_{k,q}a_q(j_m) \end{pmatrix} \tau_{k,q} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \dots \\ \varepsilon_m \end{pmatrix} \Leftrightarrow B\tau_{k,q} = \varepsilon, \quad (11)$$

где элементами  $(m \times 3)$ -матрицы  $B$  являются координаты векторного произведения, которые умножаются скалярно на  $\tau_{k,q}$  — орт базового вектора  $b_{k,q}$ ;  $\varepsilon$  —  $m$ -вектор ошибок смешанных произведений  $\varepsilon_i$ .

При этом показателем необходимого условия сопряжения векторов  $a_k(i)$ ,  $a_q(j_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , выступает минимум суммы квадратов ошибок смешанных произведений:

$$J_{k,q} = e^T e = \tau_{k,q}^T (B^T B) \tau_{k,q}. \quad (12)$$

2. Вычисляется симметричная  $(3 \times 3)$ -матрица  $B^T B$  квадратичной формы (12), зависящая от углов поворота  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  в составе матрицы  $P_{k,q}$ , которая, в свою очередь, находится в составе матрицы  $B^T B$ .

3. Для фиксированной тройки углов  $\alpha, \beta, \gamma$  численным методом рассчитывается минимальное собственное число  $\lambda$  матрицы  $B^T B$  и соответствующий этому числу собственный вектор  $\tau_{k,q}$ , обеспечивающие минимум показателя (12).

4. Численным методом подбора углов  $\alpha, \beta, \gamma$  устанавливается глобальный минимум показателя (12). По определённым  $\alpha, \beta, \gamma$  и  $\tau_{k,q}$  окончательно находятся матрица  $P_{k,q}$  и вектор  $b_{k,q} = |b_{k,q}| \tau_{k,q}$  при известном базовом расстоянии  $|b_{k,q}|$ , которые используются для вычисления оценок дальностей до объектов в соответствии с формулой (8).

Недостатком данного метода является то, что условию компланарности могут отвечать векторы, не являющиеся сопряжёнными, т. е. в нём отсутствует проверка найденного решения на выполнение достаточного условия сопряжения векторов  $a_k(i)$ ,  $a_q(j_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , которое можно контролировать с помощью показателя (10). Также метод требует дополнительных вычислительных затрат на поиск собственных векторов и знания базового расстояния  $|b_{k,q}|$ .

**Модифицированный метод взаимной ориентации.** Для устранения указанных недостатков предлагается модифицированный метод, который сводится к следующему.

1. Для  $m$  пар сопряжённых ортов  $a_k(i)$  и  $P_{k,q}a_q(j_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , поставленных в соответствие друг другу в системе координат  $k$ -го наблюдателя, вычисляется показатель  $J_{k,q}$

необходимого условия сопряжения векторов в виде суммы модулей смешанных произведений  $(a_k(i), P_{k,q}a_q(i), b)$  троек векторов  $a_k(i)$ ,  $P_{k,q}a_q(j_i)$ ,  $b_{k,q}$  при известном базовом векторе  $b_{k,q}$ :

$$J_{k,q} = \sum_{i=1}^m |(a_k(i), P_{k,q}a_q(j_i), b_{k,q})|. \quad (13)$$

2. Численным методом подбора находятся углы  $\alpha, \beta, \gamma$  в составе матрицы  $P_{k,q}$  по критерию минимума показателя (13).

3. С помощью матрицы  $P_{k,q}$  и вектора  $b_{k,q}$  вычисляются оценки дальностей  $\hat{r}_k(i)$  и  $\hat{r}_q(j_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , до  $i$ -х объектов в соответствии с (8), а также оценки пространственных координат объектов в составе векторов  $\hat{M}_k(i) = \hat{r}_k(i)a_k(i)$  и  $\hat{M}_q(j_i) = \hat{r}_q(j_i)a_q(j_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ .

4. На основе найденных оценок вычисляется показатель  $I_{k,q}$  достаточного условия сопряжения формулы (10), где в первом цикле сканирования вектор смещения  $\Delta M_{i,j_i}$  принимается нулевым, а в последующих циклах рассчитывается с учётом траекторий движения объектов. В первом цикле сканирования показатель  $I_{k,q}$  сравнивается с пороговым значением  $I_{\max} = m\|\Delta M_{\max}\|^2$ , определённым с учётом допустимого перемещения объекта  $\Delta M_{\max}$  за время одного сканирования. В последующих циклах показатель  $I_{k,q}$  сравнивается с пороговым значением  $I_{\min} = m\|e_{\max}\|^2$ , где  $e_{\max}$  — вектор максимально возможных ошибок измерения координат ортов.

5. Если  $I_{k,q} > I_{\max}$ , то данный вариант соединения векторов в  $m$  сопряжённых пар отвергается как маловероятный. Находится вариант, для которого выполняется условие  $I_{k,q} \leq I_{\max}$ . Для такого варианта полученная матрица  $P_{k,q}$  окончательно принимается в качестве матрицы поворота, а оценки пространственных координат объектов в составе векторов  $\hat{M}_k(i)$  и  $\hat{M}_q(j_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , передаются на алгоритм сопровождения.

Преимущество модификации (помимо проверки достаточности) по сравнению с методом [3] заключается в том, что здесь требуется значительно меньшее количество вычислительных операций. А именно при поиске матрицы  $P_{k,q}$  вместо операций нахождения собственных чисел и векторов вычисляется смешанное произведение с помощью определителя, строками которого являются координаты трёх векторов. Недостаток модификации — необходимость знания базового вектора  $b_{k,q}$ .

**Взаимная ориентация систем с учётом измерений дальностей.** При наличии измерений дальностей  $r_k(i)$ ,  $r_q(j_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , до  $m$  контрольных объектов (полученных, например, с помощью лазерного дальномера) поиск матрицы поворота осей координат  $P_{k,q}$  и базового вектора  $b_{k,q}$  значительно упрощается и сводится к следующему.

1. По совокупности  $m$  пар сопряжённых векторов  $a_k(i)$  и  $a_q(j_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , выражение (9) представляется как

$$M_k(i) + \Delta M_i - b_{k,q} = B_{ji}C_{k,q} + e_i, \quad i = \overline{1, m},$$

где  $C_{k,q} = (p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5 \ p_6 \ p_7 \ p_8 \ p_9)^T$  — вектор, составленный построчно из элементов матрицы  $P_{k,q}$ ;  $B_{ji}$  —  $(3 \times 9)$ -матрица, образованная из координат вектора  $M_q(j_i)$ . Из решения векторно-матричного уравнения

$$M_{k,q} = BC_{k,q} + E \Leftrightarrow \begin{pmatrix} M_k(1) + \Delta M_1 - b_{k,q} \\ \cdots \\ M_k(m) + \Delta M_m - b_{k,q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{j1} \\ \cdots \\ B_{jm} \end{pmatrix} C + \begin{pmatrix} e_1 \\ \cdots \\ e_m \end{pmatrix} \quad (14)$$

относительно вектора  $C_{k,q}$  по критерию минимума квадрата евклидовой нормы  $\|E\|^2 = (M_{k,q} - BC_{k,q})^T(M_{k,q} - BC_{k,q})$  находится МНК-оценка вектора  $\hat{C}_{k,q}$  параметров матрицы  $P_{k,q}$  при известном векторе  $b_{k,q}$  для  $m \geq 3$ :

$$\hat{C}_{k,q} = (B^T B)^{-1} B^T M_{k,q}. \quad (15)$$

Затем полученные оценки параметров вводятся в состав матрицы  $P_{k,q}$ .

При неизвестном векторе  $b_{k,q}$  его параметры включаются в состав вектора  $C_{k,q}$ , а матрицы  $B_{ji}$  дополняются тремя ортонормированными столбцами и система (14) решается относительно  $C_{k,q}$  по формуле (15) при  $m \geq 4$ .

**Концепция пространственно-временной обработки наблюдений.** Для обнаружения и определения траекторных параметров объектов наблюдения предлагается следующая концепция.

1. В первом цикле сканирования фиксируются  $m!$  вариантов соединения ортов направлений на объекты  $a_k(i)$  и  $a_q(j_i)$  в  $m$  неповторяющихся пар. Для каждого варианта определяются оценки дальностей до  $i$ -х объектов  $\hat{r}_k(i)$ ,  $\hat{r}_q(j_i)$  и пространственных координат  $\hat{M}_k(i)$ ,  $\hat{M}_q(j_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , в системе координат  $k$ -го радиометра. Вычисляются значения показателей (10), где в первом цикле сканирования  $\Delta \hat{M}_i$  принимается нулевым. Варианты, в которых значения показателей превышают максимально допустимое значение  $I_{\max} = m \|\Delta M_{\max}\|^2$ , считаются неперспективными и далее не рассматриваются.

2. Во втором цикле сканирования операции п. 1 повторяются и формируются наиболее перспективные варианты соединений ортов направлений на объекты в  $m$  неповторяющихся пар. Определяются для каждого варианта оценки пространственных координат  $\hat{M}_k(i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ . Варианты, полученные во втором цикле, ставятся в соответствие вариантам первого цикла. По каждому такому варианту находятся оценки смещений  $\Delta \hat{M}_i$ ,  $i = \overline{1, m}$ , и сохраняются только те, для которых показатель (10), вычисленный с учётом  $\Delta \hat{M}_i$ , не превышает порогового значения  $I_{\max} = m \|e_{\max}\|^2$ . Векторы координат объектов по каждому перспективному варианту соответствий запоминаются.

3. По такому принципу формируются варианты в последующих циклах сканирования ( $n = 3, \dots, N$ ). По окончании  $N$ -го цикла выбираются  $m$  вариантов последовательных соответствий с неповторяющимися векторами направлений на объекты в  $N$  циклах сканирования и наименьшими значениями суммарных (по числу циклов) показателей сопряжения. Для выбранных вариантов оценки пространственных координат  $m$  объектов используются при определении их траекторных параметров для сопровождения.

**Концепция повышения надёжности системы радиометров.** Для повышения надёжности работы системы наблюдения в целом предлагается следующая концепция.

1. Для системы  $L$  наблюдателей ( $L > 2$ ) одновременно применяются  $L$  схем параллельной обработки информации. При реализации  $k$ -й схемы ( $k = \overline{1, L}$ ) считается, что  $k$ -й наблюдатель является основным, а остальные  $L - 1$  наблюдателей по отношению к нему вспомогательные и пересчитывают свои координаты в систему координат  $k$ -го наблюдателя.

2. В каждой  $k$ -й схеме рассматривается  $L - 1$  пара  $q$ -х наблюдателей по отношению к  $k$ -му основному. В каждой такой паре перебираются варианты формирования сопряжённых пар ортов направлений на объекты. Последовательно выбираются  $m$  наилучших неповторяющихся пар векторов в смысле установленного показателя правильности сопряжения. В процессе вычисления показателя определяются оценки дальностей до  $m$  объектов наблюдения.

3. Из всех  $L - 1$  пар наблюдателей по отношению к  $k$ -му основному выбирается одна пара с наилучшим показателем сопряжения и соответственно с наименьшими ошибками.

Для неё на основе найденных оценок дальностей и ортов направлений на объекты устанавливаются наилучшие по критерию показателя сопряжения пространственные координаты объектов в  $k$ -й системе координат. Значение показателя и координаты объектов запоминаются.

4. После повторения операций пп. 1–3 (операции выполняются параллельно) среди  $L$  схем выбирается схема (и соответственно основной наблюдатель) с наилучшим показателем. Полученные здесь оценки пространственных координат  $m$  объектов считаются наиболее точными и передаются для сопровождения объектов. Если происходит отказ в работе данной схемы, то выбирается следующий основной наблюдатель в порядке улучшения показателя сопряжения.

Надёжность такой системы с параллельной обработкой информации определяется тем, что при вероятности  $p$  безотказной работы каждого наблюдателя хотя бы два из  $L$  наблюдателей будут надёжными. С применением формулы Бернулли получаем вероятность  $P_L$  безотказной работы системы:

$$P_L = 1 - \sum_{k=0}^1 C_L^k p^k (1-p)^{L-k} = 1 - (1-p)^L - Lp(1-p)^{L-1},$$

которую при  $L > 2$  можно сравнить с вероятностью  $P_2 = p^2$ . Так, при  $p = 0,9$  и  $L = 5$  имеем  $P_5 = 0,99954$  в сравнении с  $P_2 = 0,81$ , при  $p = 0,8$  имеем  $P_5 = 0,9904$  и  $P_2 = 0,64$ .

Вместе с повышением надёжности увеличивается точность определения координат объектов в силу выбора наилучших вариантов сопряжения по достаточному признаку.

**Результаты моделирования.** Для всех рассмотренных методов разрабатывались соответствующие алгоритмы. В частности, для концепции пространственно-временной обработки был создан алгоритм обнаружения неизвестного числа объектов в последовательности циклов сканирования с определением пространственных координат объектов и их траекторных параметров. В алгоритме учитывалось возможное появление ложных сегментов. Алгоритм определял оценку числа объектов и находил траекторные параметры каждого обнаруженного объекта на основе калмановской фильтрации [6].

Результаты моделирования работы алгоритмов приводят к следующим выводам.

1. Алгоритм модифицированного метода оценивания матрицы  $P_{k,q}$  в сравнении с алгоритмом известного метода [3] позволил в условиях моделирования повысить не менее чем в 3 раза точность оценок координат объектов (понижить СКО ошибок оценок координат) и сократить время вычислительных операций.

2. Алгоритм оценивания матрицы  $P_{k,q}$  с учётом измерений дальности позволил дополнительно понизить время вычислительных операций при сохранении точности оценок координат.

3. Алгоритм, основанный на концепции пространственно-временной обработки, показал возможность обнаружения всех  $m$  удалённых объектов с вероятностью, близкой к 1, и оценивания траекторных параметров объектов, которые удалены на 50 м, с точностью до 0,5 м в условиях действия ошибок измерения ортов направлений на объекты.

**Заключение.** Предложены концепции и методы пространственно-временной обработки радиоизображений движущихся объектов в последовательности циклов сканирования системы позиционирования нескольких радиометров, позволяющие повысить эффективность функционирования данной системы. Результатом работы алгоритмов, реализующих эти методы, являются оценки траекторных параметров объектов, необходимые для их сопровождения. Алгоритмы могут найти применение в существующих пассивных радиометрических системах, а также в системах оптического тепловидения [7].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пассивная** радиолокация: методы обнаружения объектов /Под ред. Р. П. Быстрова, А. В. Соколова. М.: Радиотехника, 2008. 318 с.
2. **Клочко В. К.** Методы формирования трехмерных изображений поверхности в бортовых системах радиовидения // Автометрия. 2009. **45**, № 1. С. 23–33.
3. **Грузман И. С., Киричук В. С., Косых В. П. и др.** Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.
4. **Клочко В. К., Кузнецов В. П.** Методы восстановления изображений и оценивания аппаратной функции по прореженной матрице наблюдений // Автометрия. 2016. **52**, № 6. С. 12–21.
5. **Клочко В. К., Ермаков А. А.** Алгоритмы фильтрации и сегментации трехмерных радиолокационных изображений поверхности // Автометрия. 2002. **38**, № 4. С. 41–48.
6. **Клочко В. К.** Обнаружение движущихся изображений точечных и протяженных объектов в последовательности телевизионных кадров // Автометрия. 1993. № 1. С. 40–47.
7. **Клочко В. К.** Формирование трехмерного изображения поверхности Земли бортовым радиотеплолокатором // Автометрия. 2009. **45**, № 2. С. 29–35.

*Поступила в редакцию 11 октября 2017 г.*

---