УДК 621.391

ОБНАРУЖЕНИЕ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ ПАССИВНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ

© **В. К. Клочко**

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

Решается задача обнаружения и оценивания пространственных координат движущихся объектов в пассивной сканирующей системе видения. Предлагаются алгебраический и алгоритмический подходы к определению пространственных координат и параметров движения объектов, различающиеся учётом скорости объектов при поиске сопряжённых векторов направлений на них. Разработанные на основе подходов алгоритмы показывают преимущество учёта параметров движения — повышение точности оценок координат и увеличение вероятности обнаружения всех объектов.

Ключевые слова: пассивная система, сканирование, движущиеся объекты, сопряжённые векторы, оценки координат, обнаружение объектов.

DOI: 10.15372/AUT20190110

Введение. Задача обнаружения объектов хорошо известна при построении пассивных систем вторичной обработки изображений объектов в последовательности видеокадров [1]. Как правило, она решается методом пространственно-временной обработки наблюдений путём анализа последовательности двумерных кадров на основе модели движения объектов. Требования построения трёхмерных изображений объектов привели к созданию систем компьютерного стереозрения на базе двумерных изображений, полученных в системе пространственно распределённых наблюдателей [2]. Такие методы основаны на поиске сопряжённых векторов направлений на объекты в стереопаре приёмников, записи условия сопряжения в виде системы уравнений и её решении в матричной форме.

В оптических системах видимого и инфракрасного диапазонов длин волн кадры изображений при фиксированном положении приёмников формируются со скоростью работы цифровых устройств и моменты времени образования сопряжённых векторов в стереопаре практически одинаковы. Однако для сканирующих систем, меняющих положение линии визирования приёмников в процессе сканирования зоны обзора, например радиометрических систем [3, 4], указанные моменты времени различаются. Для движущихся объектов это приводит к нарушению условия сопряжения за счёт смещения одного вектора по отношению к другому и соответственно снижению точности оценок пространственных координат и вероятности обнаружения объектов. Требуется поиск новых подходов к поиску сопряжённых пар векторов, учитывающих параметры движения обнаруживаемых объектов.

Задача обнаружения движущихся объектов в радиометрической системе рассматривалась в [4]. Однако алгоритмы решения задачи не были опубликованы, и задача не получила развития. В настоящее время внимание к пассивным радиометрическим системам обнаружения объектов возобновилось в силу их применимости в условиях, неблагоприятных для оптических систем. Исследования, направленные на повышение эффективности обнаружения объектов в таких системах, вновь представляются актуальными.

Известен подход [5] определения параметров движения объектов в радиометрической системе, основанный на пространственно-временной обработке наблюдений в последовательности периодов сканирования. Но в [5] не учитываются параметры движения объектов при поиске сопряжённых пар векторов, что не позволяет эффективно решать задачу.

Цель исследования — разработка подходов к решению задачи обнаружения движущихся объектов в пассивной сканирующей системе, в том числе радиометрической, и создание на основе этих подходов алгоритмов, позволяющих повысить эффективность работы системы за счёт параметров движения при поиске сопряжённых пар направляющих векторов.

Формализация задачи. Пусть n ($n \geqslant 2$) приёмных сканирующих устройств (приёмников) ориентированы в пространстве с помощью базовых векторов $b_k = (b_{kx}, b_{ky}, b_{kz})^\top$, $k = \overline{2,n}$, соединяющих центры k-х систем координат с центром первого приёмника, и матриц P_k, $k = \overline{2,n}$, поворота осей координат k-й системы относительно первой ($\top$ — символ транспонирования). Сканирование осуществляется изменением углового положения линии визирования приёмника в построчном телевизионном режиме.

В каждом периоде сканирования формируются орты $a_k = (a_{kx}, a_{ky}, a_{kz})^\top$, $k = \overline{1,n}$, векторов направлений на объекты (направляющих векторов) $M_k = (x_k, y_k, z_k)^\top$, $k = \overline{1,n}$, в прямоугольных системах координат приёмника. Фиксируются моменты времени образования ортов t_k, $k = \overline{1,n}$, которые в общем случае не совпадают между собой. По результатам первичной обработки принимаемых сигналов определяется нормированная мощность w_k сигнала ($0 \leqslant w_k \leqslant 1$), полученного в момент времени t_k в каждом k-м приёмнике.

В радиометрической системе, состоящей из k-х приёмников, сканирующих в направлении угловых координат азимута φ и угла места θ, при ориентации осей OX, OY в вертикальной плоскости и оси OZ в горизонтальной орты направляющих векторов имеют вид [6]

$$a_k = (x_k, y_k, z_k)^\top = (\cos\theta_k \sin\varphi_k,\ \sin\theta_k,\ \cos\theta_k \cos\varphi_k)^\top.$$

В оптической системе, состоящей из k-х видеоприёмников с фокусным расстоянием f_k, наблюдающих объекты в кадрах видеоизображений в координатах x_k, y_k, орты направляющих векторов определяются как $a_k = (-x_k, -y_k, f_k)^\top / \sqrt{x_k^2 + y_k^2 + f_k^2}$.

Векторы пространственного положения объектов M_k связаны с ортами a_k через наклонные дальности до объектов r_k: $M_k = r_k a_k$. Достаточное условие сопряжения пар векторов M_1, M_k записывается в виде системы уравнений связи координат [2, 6]:

$$M_1 - P_k M_k + \Delta M_{1,k} - b_k = e_k, \qquad k = \overline{2,n}, \tag{1}$$

где в случае линейного движения объекта в одном периоде сканирования величина $\Delta M_{1,k} = V_1\,\Delta t_k$ представляет приращение вектора M_1 вследствие изменения его координат за время $\Delta t_k = t_k - t_1$; $V_1 = (v_{1x}, v_{1y}, v_{1z})^\top$ — вектор скоростей изменения координат объекта в системе первого приёмника на момент времени t_1; $e_k = (e_{kx}, e_{ky}, e_{kz})^\top$ — вектор ошибок сопряжения. С учётом $M_k = r_k a_k$ систему уравнений (1) запишем в виде

$$r_1 a_1 - r_k P_k a_k + V_1\,\Delta t_k - b_k = e_k, \qquad k = \overline{2,n}. \tag{2}$$

При движении объекта с ускорением вектор M_1 получает дополнительное приращение за время $\Delta t_k = t_k - t_1$ и (2) принимает вид

$$r_1 a_1 - r_k P_k a_k + V_1\,\Delta t_k + \dot{V}_1 (\Delta t_k)^2/2 - b_k = e_k, \qquad k = \overline{2,n}, \tag{3}$$

где $\dot{V}_1 = (\dot{v}_{1x}, \dot{v}_{1y}, \dot{v}_{1z})^\top$ — вектор ускорений изменения координат объекта в системе первого наблюдателя на момент времени t_1.

Задача заключается в поиске оценок дальностей до объекта r_k, $k = \overline{1,n}$, на момент времени t_1 и параметров движения — составляющих векторов V_1 и $\dot{V}_1$, которые считаются неизменными за время одного периода сканирования. При наличии нескольких m объектов наблюдения ($m > 1$) требуется распределять орты направляющих векторов $a_{k,j}$, $k = \overline{1,n}$, $j = \overline{1,m}$, по принадлежности к тем или иным j-м объектам.

Алгебраический подход к решению задачи. Векторные уравнения (2) представляют систему $3(n-1)$ уравнений с $n+3$ неизвестными r_k, $k = \overline{1,n}$, v_{1x}, v_{1y}, v_{1z} и при $n \geqslant 3$ могут быть решены алгебраически. Так, при $n = 3$ после обозначения $a'_k = P_k a_k = (a'_{kx}, a'_{ky}, a'_{kz})^\top$, $k = 2, 3$, система (2) записывается в матричной форме:

$$AX - B = E \quad \Leftrightarrow \quad \begin{bmatrix} a_{1x} & -a'_{2x} & 0 & \Delta t_2 & 0 & 0 \\ a_{1y} & -a'_{2y} & 0 & 0 & \Delta t_2 & 0 \\ a_{1z} & -a'_{2z} & 0 & 0 & 0 & \Delta t_2 \\ a_{1x} & 0 & -a'_{3x} & \Delta t_3 & 0 & 0 \\ a_{1y} & 0 & -a'_{3y} & 0 & \Delta t_3 & 0 \\ a_{1z} & 0 & -a'_{3z} & 0 & 0 & \Delta t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ v_{1x} \\ v_{1y} \\ v_{1z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{2x} \\ b_{2y} \\ b_{2z} \\ b_{3x} \\ b_{3y} \\ b_{3z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{2x} \\ e_{2y} \\ e_{2z} \\ e_{3x} \\ e_{3y} \\ e_{3z} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

По критерию минимума квадрата нормы ошибок сопряжения (метода наименьших квадратов (МНК))

$$J = \|E\|^2 = (AX - B)^\top (AX - B) \quad (5)$$

находится вектор $\hat{X} = (\hat{r}_1,\ \hat{r}_2, \hat{r}_3, \hat{v}_{1x}, \hat{v}_{1y}, \hat{v}_{1z})^\top$ оценок дальностей и скоростей:

$$\hat{X} = (A^\top A)^{-1} A^\top B. \quad (6)$$

Точность оценок (6) характеризуется ковариационной матрицей ошибок оценивания $Q = \sigma_e^2 (A^\top A)^{-1}$, где σ_e^2 — дисперсия ошибки сопряжения по отдельной координате (принимается равенство дисперсий по всем координатам). Структура матрицы A определяет точность оценивания и зависит от взаимного углового положения направляющих векторов, что позволяет выбирать оптимальное расположение приёмников по отношению к объектам.

Для учёта мощностей w_k, $k = \overline{1,n}$, сигналов, принимаемых с разных угловых направлений, в состав показателя (5) следует включить $3(n-1) \times 3(n-1)$-диагональную матрицу весовых коэффициентов W, составленную из w_k, что приведёт к оценкам вида

$$J = \|E\|^2 = (AX - B)^\top W (AX - B) \quad \Rightarrow \quad \hat{X} = (A^\top W A)^{-1} A^\top W B, \quad (7)$$

где $W = \operatorname{diag}(w_1 w_2, w_1 w_2, w_1 w_2, w_1 w_3, w_1 w_3, w_1 w_3)$ для случая $n = 3$. Произведения $w_1 w_k$, $k = 2, 3$, показывают предпочтение той пары приёмников, у которой совместная мощность сигналов (по правилу пересечения — конъюнкции) выше.

При умножении оценки дальности $\hat{r}_1$ на орт a_1 получается оценка вектора пространственного положения объекта $\hat{M}_1 = \hat{r}_1 a_1$, которая вместе с оценкой $\hat{V}_1 = (\hat{v}_{1x}, \hat{v}_{1y}, \hat{v}_{1z})^\top$ даёт описание траекторных параметров объекта на момент времени t_1 в первой системе координат. Оценки $\hat{M}_1$, $\hat{V}_1$ передаются далее на сопровождение объекта и обновляются в последовательности периодов сканирования путём повторения операций (6) или (7).

Для повышения точности оценок (6), (7) предусматривается увеличение числа приёмников. При этом в матрице A выражения (4) появляются дополнительные строки и столбцы, а в векторах X, B и E — дополнительные строки. Так, при $n = 4$ имеем систему из 9 уравнений с 7 неизвестными, а при $n = 5$ систему из 12 уравнений с 8 неизвестными.

Для нахождения оценки вектора ускорения $\dot{V}_1$ движения объекта на основе (3) следует увеличить число сканирующих приёмников как минимум до $n = 5$ и ориентировать их относительно первого наблюдателя с помощью базовых векторов b_4, b_5 и матриц поворота осей P_4, P_5. При этом формируются орты направляющих векторов a_4, a_5 на моменты времени t_4, t_5. При $n = 5$ получается система $3(n-1) = 12$ уравнений с $n+6 = 11$ неизвестными, которая записывается в матричной форме аналогично (4) и решается как (6) или (7).

При наличии нескольких объектов общим числом m ($m > 1$) алгебраический подход модифицируется. Тогда для случая $n = 3$ формируются j-е группы векторов: $a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, a_{4j}$, $j = \overline{1, m}$, которые представляются двумя частично пересекающимися подгруппами: a_{1j}, a_{2j}, a_{3j} и a_{1j}, a_{2j}, a_{4j}. Если подгруппы j-й группы соответствуют одному и тому же объекту, то полученные для каждой из них согласно (6) или (7) оценки положения и скорости объекта $\hat{X}_{1j}$ и $\hat{X}_{2j}$ будут близки. Степень близости оценок разной размерности разумно характеризовать евклидовой нормой разности векторов положений объекта, найденных для подгрупп и экстраполированных на конец периода сканирования (τ — длительность периода сканирования):

$$I_j = \|M^{\text{э}}_{1j} - M^{\text{э}}_{2j}\|, \qquad M^{\text{э}}_{kj} = \hat{r}_{1kj} a_{1j} + \hat{V}_{1kj}[\tau - t_{1j}], \quad k = 1, 2. \tag{8}$$

Если j-я группа соответствует одному и тому же объекту, то с точностью до предельной абсолютной ошибки экстраполяции γ выполняется неравенство $I_j \leqslant \gamma$. Если $I_j > \gamma$, то j-я группа считается ложной и не рассматривается, что позволяет реализовать направленный перебор более перспективных групп. Прошедшие через порог γ и непересекающиеся группы с наименьшими показателями I_j определяют обнаруженные объекты.

Более экономичным образом (с точки зрения малого количества приёмников) алгебраический подход можно реализовать в системе $n = 2$ приёмников в последовательности нескольких i-х периодов сканирования общим числом N при условии неизменности параметров движения объектов. Так, при $N = 2$ формируется j-я группа ($j = \overline{1, m}$) из векторов первого $a_{1j}(1), a_{2j}(1)$ и второго $a_{1j}(2), a_{2j}(2)$ периодов, которая разделяется на две подгруппы: 1) $a_{1j}(1), a_{2j}(1)$ и $a_{1j}(1), a_{2j}(2)$; 2) $a_{1j}(2), a_{2j}(2)$ и $a_{2j}(1), a_{1j}(2)$. По трём разным векторам каждой подгруппы (аналогично трём приёмникам) в соответствии с (4), (6) вычисляются оценки $\hat{X}_{1j}$ и $\hat{X}_{2j}$. Правдоподобие j-й группы характеризуется показателем вида (8) с отличием экстраполяции на конец второго периода сканирования.

Алгоритмический подход к решению задачи. В качестве альтернативного решения задачи обнаружения объектов рассматривается подход, основанный на идее пространственно-временной обработки радиометрических наблюдений в последовательности периодов сканирования при наличии модели движения объектов [5]. В отличие от алгебраического подхода здесь в каждом периоде сканирования находятся только оценки дальностей до объектов и их пространственные координаты, т. е. оценивается меньшее число параметров.

Предлагается модифицированный подход, когда в последовательности периодов определяются параметры движения объектов, используемые для более точного сопряжения векторов и оценивания координат.

Данный подход реализуется алгоритмами, построенными по принципу завязки траекторий движения объектов на основе показателя правдоподобия [1]. Далее представлен один из таких алгоритмов, учитывающий скорость движения объектов.

1. В первом ($i = 1$) периоде сканирования двух приёмников ($n = 2$) формируются орты k-х направлений a_{1k} для первого приёмника и j-х направлений a_{2j} для второго. Фиксируются моменты времени их образования t_{1k}, t_{2j}, $k = \overline{1, m_{1,1}}$, $j = \overline{1, m_{2,1}}$, где $m_{1,1}$

и $m_{2,1}$ — число ортов в первом и втором приёмниках. При этом выполняются следующие операции.

1.1. Рассматривается k-й, j-й вариант соединения ортов a_{1k} и a_{2j} в пару. Для каждой такой k-й, j-й пары вычисляются: МНК-оценки дальностей $\hat{r}_{1k}$ и $\hat{r}_{2j}$ из решения системы уравнений $r_{1k}a_{1k}-r_{2j}P_2a_{2j}-b_2=e_2$ относительно r_{1k} и r_{2j} в матричной форме (6); оценки векторов $\hat{M}_{1k}=\hat{r}_{1k}a_{1k}$ и $\hat{M}_{2j}=\hat{r}_{2j}a_{2j}$; показатель достаточного условия сопряжения векторов в виде нормы ошибок сопряжения (1) без учёта $\Delta M_{1,2}$: $J_{1kj}=\|\hat{M}_{1k}(i)-P_2\hat{M}_{2j}(i)-b_2\|$.

1.2. Показатель J_{1kj} сравнивается с порогом α_1 допустимых ошибок сопряжения. Если $J_{1kj}>\alpha_1$, то вариант соединения ортов a_{1k}, a_{2j} отвергается.

1.3. Если $J_{1kj}\leqslant\alpha_1$, то k-я, j-я пара считается перспективной. Ей присваивается g-й номер группы пар векторов, к которой будут присоединяться другие пары в последующих периодах сканирования (нумерация g осуществляется в порядке выполнения неравенства, $g=\overline{1,G_1}$, G_1 — число групп, сформированных в первом периоде). Запоминаются: начальное значение показателя правдоподобия $I_1(g)=c_1J_{1kj}$ g-й группы, где c_1 — нормирующий множитель; номера ортов направлений $k_1(g)=k$, $j_1(g)=j$; векторы координат $M_{1,1}(g)=\hat{M}_{1k}$, $M_{2,1}(g)=M_{2j}$; оценки дальностей $R_{1,1}(g)=\hat{r}_{1k}$, $R_{2,1}(g)=\hat{r}_{2k}$; моменты времени образования векторов $T_{1,1}(g)=t_{1k}$, $T_{2,1}(g)=t_{2j}$.

2. Во втором ($i=2$) периоде также формируются орты k-х и j-х направлений a_{1k}, a_{2j} и моменты времени их образования t_{1k}, t_{2j}, $k=\overline{1,m_{1i}}$, $j=\overline{1,m_{2i}}$.

2.1. Каждой g-й группе ($g=\overline{1,G_{i-1}}$), сформированной в $(i-1)$-м периоде, ставятся в соответствие варианты соединения ортов a_{1k}, a_{2j} в пару. Вычисляются экстраполированные оценки векторов координат объектов: $\hat{M}_{1k}=R_{1,i-1}(g)\,a_{1k}$, $\hat{M}_{2j}=R_{2,i-1}(g)\,a_{2j}$ и векторов скоростей изменения координат за период сканирования:

$$\hat{V}_{1k}=(\hat{M}_{1k}-M_{1,i-1}(g))/\tau_1,\qquad \hat{V}_{2j}=(\hat{M}_{2j}-M_{2,i-1}(g))/\tau_2,\tag{9}$$

$$\tau_1=t_{1k}-T_{1,i-1}(g),\qquad \tau_2=t_{2j}-T_{2,i-1}(g).$$

2.2. Вычисляется оценка приращения $\Delta M_{1,2}$ вектора M_{1k}: $\Delta\hat{M}_{1,2}=(t_{2j}-t_{1k})\hat{V}_{1k}$, корректируется вектор $\hat{M}_{1k}$: $M^*_{1k}=\hat{M}_{1k}+\Delta\hat{M}_{1,2}$, и определяется орт скорректированного вектора: $a^*_{1k}=M^*_{1k}/\|M^*_{1k}\|$. Для ортов a^*_{1k} и a_{2j} вычисляются оценки дальностей $\hat{r}_{1k}$ и $\hat{r}_{2j}$ из решения системы уравнений $r_{1k}a^*_{1k}-r_{2j}P_2a_{2j}-b_2=e_2$ в матричной форме (6). Пересчитываются (уточняются) векторы координат $\hat{M}^*_{1k}=\hat{r}_{1k}a^*_{1k}$, $\hat{M}_{2j}=\hat{r}_{2j}a_{2j}$ и векторы скоростей $\hat{V}_{1k}$, $\hat{V}_{2j}$ в соответствии с (9).

2.3. Вычисляется показатель достаточного условия сопряжения для k-й, j-й пары векторов с учётом движения объекта: $J_{1kj}=\|\hat{M}^*_{1k}-P_2\hat{M}_{2j}-b_2\|$.

Экстраполируются векторы координат g-й группы, полученные в $(i-1)$-м периоде:

$$M^{э}_{1k}=M_{1,i-1}(g)+\tau_1\hat{V}_{1k},\qquad M^{э}_{2j}=M_{2,i-1}(g)+\tau_2\,\hat{V}_{2j},$$

и вычисляется показатель близости текущих и экстраполированных векторов

$$J_{2kj}=\|\hat{M}^*_{1k}-M^{э}_{1k}\|+\|\hat{M}_{2j}-M^{э}_{2j}\|.$$

2.4. Составляется общий показатель из частных показателей, взятых с нормирующими коэффициентами c_1 и c_2: $J_{kj}=c_1J_{1kj}+c_2J_{2kj}$, который сравнивается с порогом допустимых ошибок α_i. Если $J_{kj}>\alpha_i$, то пара a_{1k}, a_{2j} отвергается.

2.5. Если $J_{kj}\leqslant\alpha_i$, то пара a_{1k}, a_{2j} прикрепляется к g-й группе, давая ей продолжение под новым ρ-м номером (нумерация ρ осуществляется в порядке выполнения неравенства,

$\rho = \overline{1, L_i}$, L_i — число групп, сформированных в i-м периоде). Для ρ-й группы запоминаются: суммарный (по числу периодов) показатель $I_i(\rho) = I_{i-1}(g) + J_{kj}$; номера направлений $k_{1i}(\rho) = k$, $j_{2i}(\rho) = j$; векторы координат $M_{1i}(\rho) = \hat{M}^*_{1k}$, $M_{2i}(\rho) = \hat{M}_{2j}$; оценки дальностей $R_{1i}(g) = \hat{r}_{1k}$, $R_{2i}(g) = \hat{r}_{2j}$; векторы скоростей $V_{1i}(\rho) = \hat{V}_{1k}$, $V_{2i}(\rho) = \hat{V}_{2j}$; моменты времени образования векторов $T_{1i}(g) = t_{1k}$, $T_{2i}(g) = t_{2j}$.

2.6. По окончании операций пп. 2.1–2.5 полученные массивы переписываются в новой g-й нумерации ($g = \overline{1, L_i}$) в порядке увеличения показателей групп $I_i(g)$, $g = \overline{1, L_i}$.

3. В последующих i-х периодах ($i = \overline{3, N}$) формируются орты $a_{1,k}$, $a_{2,j}$ и запоминаются моменты времени их образования t_{1k}, t_{2j}, $k = \overline{1, m_{1i}}$, $j = \overline{1, m_{2i}}$. Выполняются следующие операции.

3.1, 3.2, 3.3. Повторяются операции пп. 2.1–2.3.

3.4. Вычисляются невязки по скорости $\Delta V_{sk} = \hat{V}_{sk} - V_{s,i-1}(g)$, $s = 1,\ 2$, и третий показатель в виде суммы норм невязок $J_{3kj} = \|\Delta V_{1k}\| + \|\Delta V_{2j}\|$. Составляется общий показатель $J_{kj} = c_1 J_{1kj} + c_2 J_{2kj} + c_3 J_{3kj}$, который сравнивается с порогом α_3. Если $J_{kj} > \alpha_i$, то вариант продолжения с парой a_{1k}, a_{2j} отвергается.

3.5. Если $J_{kj} \leqslant \alpha_i$, то повторяются операции п. 2.5 с тем отличием, что вместо векторов оценок скоростей $\hat{V}_{1k}$, $\hat{V}_{2j}$ запоминаются их рекуррентно-усреднённые значения в последовательности периодов $V_{si}(\rho) = V_{s,i-1}(g) + (\hat{V}_{sk} - V_{s,i-1}(g))/(i-1)$, $s = 1,\ 2$.

3.6. Повторяются операции п. 2.6.

4. Если g-я группа не получает подтверждения в i-м периоде, то фиксируется пропуск наблюдений и группа проверяется на подтверждение в следующем $(i+1)$-м периоде. При этом используется определённая логика сброса неподтверждённых групп. Пара a_{1k}, a_{2j}, не вошедшая в состав подтверждённых групп, рассматривается как начальные данные для вновь появляющихся объектов. Для них выполняются операции п. 1 и осуществляется анализ на подтверждение в последующих периодах сканирования.

5. По окончании операций последнего N-го периода среди L_N g-х групп ($g = \overline{1, L_N}$), запомненных в порядке увеличения показателя, выделяются $\hat{m}$ групп, которые характеризуются наименьшими значениями суммарных показателей $I_N(g_i)$, $i = \overline{1, \hat{m}}$, и не имеют общих номеров векторов в массивах $k_{1i}(g)$ и $j_{2i}(g)$, $i = \overline{1, N}$, $g = \overline{1, L_N}$. Допускается выделение групп с минимальным количеством π общих векторов (например, $\pi = 1$).

6. Для $\hat{m}$ выделенных групп номера векторов направлений $k_{1i}(g_s)$, $j_{2i}(g_s)$ и оценки координат $M_{1i}(g_s)$, $M_{2i}(g_s)$, $i = \overline{1, N}$, $s = \overline{1, \hat{m}}$, передаются на алгоритм сопровождения $\hat{m}$ обнаруженных объектов ($\hat{m}$ — оценка числа m).

Замечание. Проверка условий $J_{kj} \leqslant \alpha_i$ в алгоритме не является обязательной, так как при допустимом числе групп $G_{\max}$ при выполнении операций пп. 2.5 и 3.5 можно сохранять не более $G_{\max}$ групп с наименьшими показателями J_{kj}.

Результаты моделирования. При моделировании алгебраического подхода рассматривались два варианта расположения трёх приёмников ($n = 3$). В первом варианте приёмники находились на расстоянии 5–10 м друг от друга по оси OX в пределах 1–3 м по другим осям с поворотом осей на десятые доли градуса. Точечный объект двигался по линейному закону в направлении приёмников, сокращая расстояние от 100 до 50 м за время одного периода сканирования $\tau = 20$ с. Шаг дискретизации по времени составлял $2 \cdot 10^{-3}$ с (2 мс). При сканировании в телевизионном режиме линия визирования приёмников меняла своё положение от 0 до 30° по азимуту и углу места с шагом 0,03°, формируя матрицу изображения 100×100. При встрече линий визирования с угловыми координатами изображения объекта формировались орты векторов направлений на объект и запоминались моменты времени их образования. Погрешность в оценке пространственного положения объекта определялась по норме разности векторов моделируемых и найденных координат.

L	m			
	2	3	4	5
5	1	1	0,97	0,93
10	1	1	1	1

При близком расположении приёмников результаты моделирования оказались неудовлетворительными.

Во втором варианте моделирования приёмники ($n = 3$ при $N = 1$ и $n = 2$ при $N = 2$) располагались на окружности с радиусом 50 м со взаимным поворотом на 90°. Погрешность оценок дальности и пространственного положения объекта при оценивании шести параметров (три дальности и координаты скорости) составила около 0,3 м при погрешности определения угловых координат объекта 0,03°. При оценивании трёх параметров (без учёта скорости) — около 3 м. Таким образом, эффективность работы системы наблюдения существенно зависит от направлений ортов, а точность определения координат объектов — от учёта скорости.

При моделировании алгоритмического подхода рассматривался первый (неблагоприятный) вариант линейного расположения двух приёмников ($n = 2$) на небольшом расстоянии друг от друга. Матрицы изображения формировались в последовательности $N = 5{-}10$ периодов сканирования. Объекты общим числом $m = 2{-}5$, взаимно разнесённые в пространстве на несколько метров, двигались в сторону приёмников по линейному закону со случайно выбранными параметрами траекторий. Алгоритм выдавал оценку $\hat{m}$ числа объектов с указанием номеров всех пар ортов направлений на соответствующие объекты. На множестве реализаций эксперимента вычислялась оценка вероятности $P(m)$ обнаружения всех m объектов. Объект считался обнаруженным, если найденные алгоритмом векторы направлений на объекты в N периодах соответствовали моделируемым векторам направлений. В таблице представлены оценки вероятности $P(m)$ в зависимости от N и m. Погрешность определения положения объектов при этом составляла 1–3 м. При взаимном удалении двух приёмников по дуге окружности погрешность снижалась до 0,3 м.

Заключение. Предложены два подхода к решению задачи обнаружения объектов в пассивной сканирующей системе. Первый, алгебраический, позволяет без построения сложных алгоритмов оценивать параметры движения объектов в пределах одного периода сканирования за счёт решения системы уравнений. Однако для его реализации требуется наличие не менее трёх приёмников, расположенных на окружности, и сканирование в направлениях, близких к ортогональным. При этом сбой в работе хотя бы одного из приёмников приводит к сбою всей системы. Кроме того, для реализации алгебраического подхода необходимо, чтобы все объекты наблюдались в зоне перекрытия диаграмм направленности всех приёмников (без пропусков наблюдений), что не всегда возможно.

Как альтернатива предложен второй, алгоритмический подход, основанный на идее пространственно-временной обработки наблюдений в последовательности периодов сканирования двух приёмников, отличающийся от известного аналогичного подхода учётом параметров движения объектов при проверке правильности сопряжения векторов. Алгоритм учитывает пропуски изображений объектов, а также выход объектов из зоны видимости и появление новых объектов по аналогии с алгоритмами завязки траекторий. При этом допускается построение системы из нескольких независимо работающих стереопар приёмников, что обеспечивает высокую надёжность функционирования системы в целом [6]. Разработанный алгоритм показал хорошие результаты по обнаружению объектов при моделировании как в благоприятных, так и в неблагоприятных условиях наблюдения.

Предложенные подходы могут найти применение при разработке радиометрических сканирующих систем пассивного видения [4, 6], а также в оптических сканирующих системах, например [7], для дистанционного обнаружения движущихся объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Клочко В. К.** Обнаружение движущихся изображений точечных и протяженных объектов в последовательности телевизионных кадров // Автометрия. 1993. № 1. С. 40–47.
2. **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.
3. **Пирогов Ю. А., Тимановский А. Л.** Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения миллиметрового диапазона // Радиотехника. 2006. № 3. С. 14–19.
4. **Пассивная** радиолокация: методы обнаружения объектов / Под ред. Р. П. Быстрова, А. В. Соколова. М.: Радиотехника, 2008. 320 с.
5. **Клочко В. К., Гудков С. М.** Алгоритм оценивания параметров изображений объектов по данным радиометрических наблюдений // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 4. С. 20–22.
6. **Клочко В. К., Гудков С. М.** Пространственно-временная обработка изображений объектов в пассивной системе радиовидения // Автометрия. 2018. **54**, № 4. С. 35–42.
7. **Киричук В. С., Шакенов А. К.** Алгоритм восстановления изображений в задаче обнаружения объектов при круговом микросканировании // Автометрия. 2016. **52**, № 1. С. 15–21.

Поступила в редакцию 12.10.2018
После доработки 13.11.2018
Принята к публикации 26.11.2018