

Обработка изображений движущихся объектов в системе позиционирования оптических приемников

В.К. Клочко¹

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

Аннотация

Решается задача классификации изображений точечных объектов, найденных в системе позиционирования оптических приемников, по принадлежности объектам с определением их пространственных координат. Предложен алгебраический подход к решению данной задачи, основанный на решении систем линейных уравнений с учетом шумов измерения. Подход отличается от работ, основанных на геометрических построениях, наличием единого алгебраического критерия обнаружения объектов в виде достаточного условия сопряжения векторов и оценивания их пространственных координат. Это позволяет исследовать полученные оценки методами теории оценивания и делать выводы о взаимном расположении и структуры системы оптических приемников, при котором обеспечивается наибольшая точность оценок и надежность системы в целом.

Цель работы – повышение эффективности работы системы оптических приемников при обнаружении движущихся объектов с повышенной точностью оценок пространственных координат и надежностью системы. На основе предложенного подхода разработаны алгоритмы решения поставленной задачи для сканирующих систем, в том числе работающих с экстраполяцией и при совместной работе с радиометром, а также несканирующих систем, в которых используется показатель сопряжения векторов в той или иной модификации. Предложена структурная организация системной работы приемников, обеспечивающая повышенную надежность системы.

Ключевые слова

Обработка изображений, движущиеся объекты, оптические приемники, обнаружение, система позиционирования.

Processing Moving Object Images in the Optical Receiver Positioning System

V. K. Klochko¹

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

Abstract

The problem of classifying images of point objects found in the optical receiver positioning system by belonging to objects with determining their spatial coordinates is solved. An algebraic approach to solving this problem is proposed, based on solving systems of linear equations taking into account measurement noise. The approach differs from works based on geometric constructions by the presence of a single algebraic criterion for detecting objects in the form of a sufficient condition for conjugating vectors and estimating their spatial coordinates. This makes it possible to investigate the obtained estimates by the methods of estimation theory and draw conclusions about the mutual location and structure of the optical receiver system, in which the highest accuracy of estimates and the reliability of the system as a whole are ensured.

The purpose of the work is to increase the efficiency of the optical receiver system when detecting moving objects with increased accuracy of spatial coordinate estimates and reliability of the system. On the basis of the proposed approach, algorithms have been developed for solving the presented

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

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

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



© 2022 Copyright for this paper by its authors.

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

problem for scanning systems, including those working with extrapolation and when working together with a radiometer, as well as non-scanning systems, which use an indicator of vector conjugation in a particular modification. A structural organization of the system operation of the receivers is proposed, providing increased reliability of the system.

Keywords

Image processing, moving objects, optical receivers, detection, positioning system.

1. Введение

В настоящее время актуально построение многопозиционных оптических систем слежения за движущимися малоразмерными объектами, например воздушными, в интересах охраны государственных и частных территорий, например [1 – 6]. Такие системы имеют преимущество скрытности по сравнению с активными системами слежения. Вместе с тем активно развиваются пассивные и полуактивные системы слежения за объектами с внешним источником излучения сигналов, например, в работах [7 – 10]. В этих работах рассматривается общий алгебраический подход к обнаружению, оцениванию пространственных координат и траекторных построений нескольких объектов наблюдения в системе радиоприемников. Представляется полезным применить данный подход и для системы оптических приемников. Считаем, что в оптической системе на первом этапе обработки объекты выделены в плоских кадрах оптических приемников, например, путем сегментации изображений, после чего центры сегментов рассматриваются как точечные объекты и подлежат дальнейшей обработке – классификации изображений точечных объектов по принадлежности тем или иным объектам с определением их пространственных координат.

Цель работы – повышение эффективности работы системы оптических приемников при обнаружении движущихся точечных объектов с повышенной точностью оценок пространственных координат и надежностью системы в целом.

2. Модель сигнала в оптическом приемнике и постановка задачи

В оптическом приемнике пространственное положение точки M измеряется в прямоугольной системе координат $OXYZ$, совмещенной по центру с центром оптической линзы, как показано на рисунке 1.

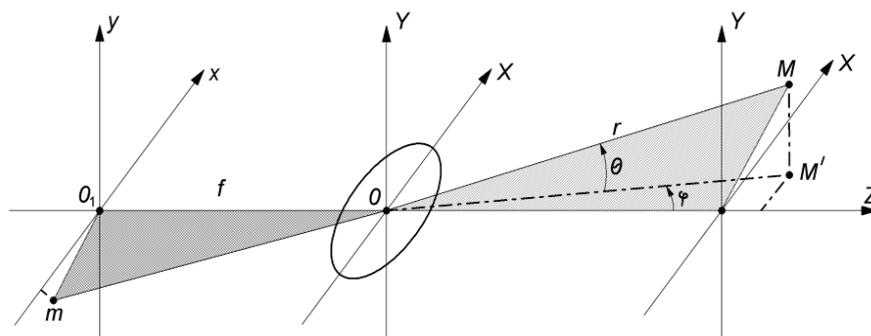


Рисунок 1 – Системы координат в оптическом приемнике

Сигнал отражения от точки M проходит через центр линзы (точка O в плоскости X, Y) и попадает на матрицу светочувствительных элементов в плоскости O_1xy , индуцируя в точке m электрический сигнал. Данный сигнал в цифровой форме представляет амплитуду, характеризующую интенсивность светового потока в угловом направлении (φ, θ) азимута φ и угла места θ . Координаты x, y точки m находятся известными методами обнаружения и оценивания положения точечных объектов или центра тяжести протяженных объектов в видеокдрах.

Из геометрических соображений (рисунок 1) нетрудно выразить координаты орта $\bar{a} = \overline{OM} / |\overline{OM}| = \overline{OM} / r = (a_x, a_y, a_z)$ направления на объект как

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

$$a_z = \sqrt{1 - a_x^2 - a_y^2} = \frac{f}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}.$$

Выражение орта a в матричной форме с учетом (1) имеет вид

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

где "T" – символ транспонирования.

Многопозиционная оптическая система наблюдения за группой m малоразмерных объектов ($m \geq 1$) состоит из n оптических приемников ($n \geq 2$), принимающих сигналы излучения от объектов в оптическом диапазоне длин волн. Приемники ориентированы в единой системе координат и контролируют общую зону обзора.

Результатом k -х наблюдений ($k = \overline{1, n}$) являются координаты ортов направлений на объекты в местных системах координат:

$$a_k(i) = [a_{kx}(i) \quad a_{ky}(i) \quad a_{kz}(i)]^T,$$

определенные выражениями (1) без учета параметров калибровки камеры.

Оптические приемники могут работать в двух режимах: сканирования при большом фокусном расстоянии линзы (малом угле обзора) и не сканирования при малом фокусном расстоянии (большом угле обзора).

Задача заключается в обнаружении объектов и оценивании их пространственных координат вместе с траекторными параметрами движения. Для системы ближнего наблюдения, которая является предметом изучения, эффективен метод стереопары, обычно применяемый для двух оптических приемников. Метод стереопары берется за основу для реализации в системе нескольких приемников, работающих в оптическом диапазоне длин волн.

3. Оценка погрешности направления на точечный объект

Оценим методическую погрешность определения координат орта (2) в зависимости от инструментальной погрешности измерения координат точечного объекта в видеокадре, 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 переменных x, y дифференциалами:

$$|\Delta a_x| \approx |da_x| \leq \left| \frac{\partial a_x}{\partial x} \right| h_{xy} + \left| \frac{\partial a_x}{\partial y} \right| h_{xy} = \frac{|xy| + y^2 + f^2}{\sqrt{(x^2 + y^2 + f^2)^3}} h_{xy} = \Delta_{ax}, \quad |\Delta a_y| \approx |da_y| \leq$$

$$\frac{|xy| + x^2 + f^2}{\sqrt{(x^2 + y^2 + f^2)^3}} h_{xy} = \Delta_{ay}, \quad |\Delta a_z| \approx |da_z| \leq \frac{(|x| + |y|)f}{\sqrt{(x^2 + y^2 + f^2)^3}} h_{xy} = \Delta_{az},$$

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

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

Вектор погрешностей определения пространственных координат объекта M_x, M_y, M_z при известной дальности r в оптическом приемнике составляет

$$\Delta_M = r\Delta_a = (\Delta_{M_x}, \Delta_{M_y}, \Delta_{M_z})^T = r(\Delta_{ax}, \Delta_{ay}, \Delta_{az})^T \sim rh_{xy}(f^{-1}, f^{-1}, 2x_{\max}/f^2)^T.$$

Пусть в видеокадре размером $0,03 \times 0,03$ м с количеством пикселей 300×300 и 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. Тогда предельные абсолютные погрешности измерения координат объекта на дальности $r = 1000$ м составляют $\Delta_M \sim 0,03(1, 1, 0,2)^T$ и модуль вектора погрешностей $|\Delta_M| \sim 0,4$ м.

4. Обнаружение объектов в сканирующей системе

Сканирование в системе оптических приемников осуществляется изменением угловых направлений линий визирования оптических приемников. Так как на перемещение линий визирования затрачивается определенное время, возникает необходимость учета движения объектов за время перемещения линий визирования. При механическом сканировании в случае быстро движущихся объектов возникают ошибки первого рода (пропуска сигнала), когда объект на промежутке времени сканирования не попадает в область видимости всех приемников. А также ошибки второго рода (ложной тревоги), когда объект оказывается в области видимости более одного раза. Заметим, что с увеличением временной задержки Δt возрастают динамические ошибки из-за неучтенного ускорения, а при уменьшении Δt – ошибки решения системы уравнений. На рисунке 2 показаны векторы направлений на движущийся объект в сканирующей системе.

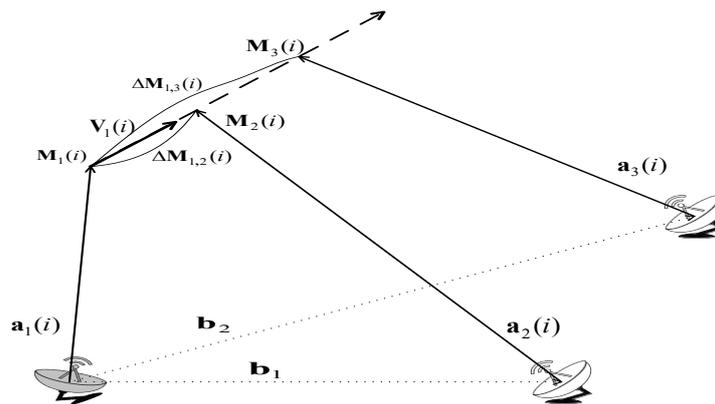


Рисунок 2 – Векторы направлений на движущийся объект

Алгоритм обнаружения объектов сводится к следующему.

1. Оптические приемники общим числом n ($n \geq 3$), ориентируются в пространстве с помощью базовых векторов $b_k = (b_{kx}, b_{ky}, b_{kz})^T$, $k = \overline{1, n}$, соединяющих центры k -х систем координат, $k = \overline{2, n}$, с центром первого приемника, и матриц H_k , $k = \overline{2, n}$, поворота осей координат k -й системы относительно первой. Во время сканирования общей зоны обзора формируются орты $a_k(i) = (a_{kx}, a_{ky}, a_{kz})^T$, $k = \overline{1, n}$, векторов направлений на i -е источники сигналов $M_k(i) = (x_k(i), y_k(i), z_k(i))^T$, $k = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, m}$ (m – число источников), в прямоугольных системах координат приемников. Запоминаются моменты времени образования ортов $t_k(i)$, $k = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, m}$, которые при синхронном сканировании отличаются из-за разной пространственной ориентации приемников.

2. Векторы пространственного положения i -х источников $M_k(i)$ связаны с ортами $a_k(i)$ через наклонные дальности до источников $r_k(i)$: $M_k(i) = r_k(i)a_k(i)$.

Достаточное условие сопряжения пар векторов $M_1(i)$ и $M_k(i)$ представлено в виде уравнений линейной зависимости векторов:

$$M_1(i) - H_k M_k(i) + \Delta M_{1k}(i) - b_k(i) = e_k, \quad k = \overline{2, n}, \quad (3)$$

где в случае движения объекта без ускорения в одном периоде сканирования величина $\Delta M_{1k}(i) = V_1(i) \Delta t_k(i)$ представляет приращение вектора $M_1(i)$ за время $\Delta t_k(i) = t_k(i) - t_1(i)$; $V(i) = (v_{1x}(i) \ v_{1y}(i) \ v_{1z}(i))^T$ – вектор скорости i -го объекта в системе координат первого приемника на момент времени $t_1(i)$; $e = (e_{kx} \ e_{ky} \ e_{kz})^T$ – вектор ошибок сопряжения. С учетом $M_k(i) = r_k(i) a_k(i)$ система уравнений (1) принимает вид

$$r_1(i) a_1(i) - r_k(i) a'_k(i) + V_1(i) \Delta t_k(i) - b_k = e_k, \quad k = \overline{2, n}. \quad (4)$$

$$a'_k(i) = H_k a_k(i) = (a'_{kx}(i) \ a'_{ky}(i) \ a'_{kz}(i))^T.$$

При $n = 3$ векторные уравнения (4) записываются в виде шести уравнений с шестью неизвестными $r_1(i), r_2(i), r_3(i), v_{1x}(i), v_{1y}(i), v_{1z}(i)$ в следующей матричной форме:

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

где символ i -го объекта для удобства записи опущен.

3. По критерию минимума квадрата нормы ошибок сопряжения

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

находится вектор оценок дальностей и скоростей:

$$\hat{X}(i) = (A^T A)^{-1} A^T B, \quad (6)$$

где $\hat{X}(i) = (\hat{\epsilon}_1(i), \hat{\epsilon}_2(i), \hat{\epsilon}_3(i), \hat{\epsilon}_{1x}(i), \hat{\epsilon}_{1y}(i), \hat{\epsilon}_{1z}(i))^T$.

4. При подстановке (6) в (5) получается числовое значение показателя правдоподобия для данного варианта соединения ортов векторов. Перебор вариантов заканчивается выбором $\hat{\mu}$ неповторяющихся вариантов соединения векторов с наименьшими показателями сопряжения. При этом $\hat{\mu}$ является оценкой числа обнаруженных объектов.

Правила обнаружения.

Рассмотрим два правила комбинаторного перебора вариантов соединения векторов. В соответствии с первым правилом осуществляется перебор неповторяющихся вариантов соединения n ортов в m непересекающихся групп, что реализуется с помощью вложенных циклов при известном числе источников m . Второе – упрощенное и более удобное для вычислений правило последовательного выбора $\hat{\mu}$ вариантов соединения ортов в порядке увеличения показателей сопряжения, когда число объектов заранее неизвестно. При этом $\hat{\mu}$ является оценкой неизвестного числа объектов m .

Для учета помех в виде ложных сигналов и соответственно ложных векторов направлений вводится ограничение на показатель сопряжения. Если допустить, что координаты векторов ошибок сопряжения распределены по нормальному закону с нулевым средним и дисперсией σ_e^2 (что практически оправданно), то случайная величина нормированного показателя J / σ_e^2 , где σ_e^2 – дисперсия ошибки сопряжения по отдельной координате, распределена по закону хи-квадрат с $3(n - 1)$ степенями свободы (если не принимать в расчет количество оценок дальностей). Теоретически существует квантиль γ_p распределения Пирсона, взятый с доверительной вероятностью p , такой, что для гипотезы правильного сопряжения $n - 1$ пар векторов выполняется неравенство $J / \sigma_e^2 \leq \gamma_p$. Следует отсеять заведомо ложные группы, для

которых $J_s/\sigma_e^2 > \gamma_p$. На практике порог γ_p выбирается из эмпирических соображений. Прохождение через порог $J/\sigma_p^2 \leq \gamma_p$ дает основание утверждать, что пространственные координаты векторов направлений на s -й источник $M_k(s) = \overline{\epsilon_{ks}} a_{ks}(i)$ и $r_2(i)$, $s = \overline{1, m}$, в k -х, q -х сопряженных парах или векторы, усредненные в единой системе координат:

$$M(s) = [\overline{\epsilon_{ks}}(i) H_k a_{ks}(i) + \overline{\epsilon_{qs}}(j) H_q a_{qs}(j) + b_k + b_q] / 2, \quad s = \overline{1, m},$$

соответствуют \mathcal{M} обнаруженным объектам.

5. Сканирование с упреждением

При непрерывном сканировании появляются ошибки первого и второго рода. Для их уменьшения предлагается следующий алгоритм.

1. Приемники общим числом n ($n \geq 3$), взаимно ориентируются и принимают сигналы отражения или излучения от движущихся объектов. В первом периоде обзора осуществляется обычное сканирование, при этом вычисляются показатели сопряжения векторов направлений на источники, которые сравниваются с порогом обнаружения объектов. По результатам сканирования находятся оценки: $m(1)$ – числа обнаруженных объектов, $M_i(1)$ – вектор пространственных координат i -го объекта, $V_i(1)$ – вектор скорости i -го объекта. Запоминаются моменты времени $t_i(1)$ определения i -х оценок. Запоминается показатель сопряжения $J_i(1)$, $i = \overline{1, m(1)}$, который нормируется как $J_i(1) = k_1 J_i(i)$, k_1 – нормирующий коэффициент. Объекты ранжируются в зависимости от дальности их положения и направления вектора движения.

2. Во втором периоде обзора для каждого i -го ранее обнаруженного объекта ($i = \overline{1, m(1)}$) в порядке ранжирования находится его экстраполированное положение в виде вектора экстраполированных координат

$$M_i^{\exists}(1) = M_i(1) + \tau_i(1) V_i(1)$$

на момент времени $t_i(2) = t_i(1) + \tau_i(1)$, где $\tau_i(1)$ – длительность промежутка времени, необходимого для вывода линий визирования всех приемников в упрежденную точку $M_i^{\exists}(1)$.

3. Перевод линий визирования n приемников в направлении вектора $M_i^{\exists}(i)$. Для j -х объектов, наблюдаемых на момент $t_i(2)$ в зоне видимости всех приемников ($j = \overline{1, m_i}$, m_i – число таких объектов), вычисляются показатели сопряжения векторов направлений на объекты, которые сравниваются с порогом обнаружения. Находятся оценки обнаруженных объектов: вектор пространственного положения $M_j(2)$ и вектор скорости $V_j(2)$ на момент времени $t_i(2)$. Запоминается показатель ошибок сопряжения $J_j(2)$. Оценки $M_j(2)$, $V_j(2)$, а также $t_i(2)$ и $J_j(2)$, полученные во втором периоде обзора, ставятся в соответствие оценкам, полученным в первом периоде. При этом образуются группы оценок

$$M_i(1), V_i(1), t_i(1), M_j(2), V_j(2), t_j(2), \quad i = \overline{1, m(1)}, \quad j = \overline{1, m_i}.$$

4. Для каждой i -й, j -й группы вычисляется показатель ее правдоподобия

$$I_{ij}(2) = I_i(1) + k_1 J_j(2) + k_2 \|M_j(2) - M_i^{\exists}(1)\| + k_3 \|V_j(2) - V_i(1)\|,$$

где k_2 и k_3 – нормирующие коэффициенты.

При сравнении $I_{ij}(2)$ с порогом γ_1 , выбираемым эмпирически, отсеиваются ложные группы. После чего остаются $m(2)$ перспективных групп, для которых $I_{ij}(2) \leq \gamma_1$. Эти группы ранжируются по степени важности и в соответствии с рангом проводится их s -я нумерация:

$$M_s(1), V_s(1), t_s(1), M_s(2), V_s(2), t_s(2), I_s(2), \quad s = \overline{1, m(2)}.$$

5. На третьем и последующих μ -х шагах операции повторяются. Осуществляется экстраполяция:

$$M_s^{\exists}(\mu) = M_s(\mu - 1) + \tau_s(\mu) V_s(\mu - 1), \quad s = \overline{1, m(\mu - 1)},$$

после чего линии визирования антенн n приемников выводятся в направлении $M_s^{\exists}(\mu)$, получаются оценки $M_j(\mu)$, $V_j(\mu)$ на момент времени $t_j(\mu)$ и формируются группы оценок

$$M_s(1), V_s(1), t_s(1), M_s(2), V_s(2), t_s(2), \dots, M_j(\mu), V_j(\mu), t_j(\mu), s = \overline{1, m(\mu)}.$$

прошедшие через порог: $I_{sj}(\mu) \leq \gamma_{\mu}$, где показатель правдоподобия

$$I_{sj}(\mu) = I_s(\mu-1) + k_1 J_j(\mu) + k_2 \|M_j(\mu) - M_s^{\exists}(\mu)\| + k_3 \|V_j(\mu) - V_s(\mu-1)\|.$$

Группы ранжируются, и они получают новую нумерацию.

6. В последнем L -м периоде обзора ($\mu = L$) из всех полученных групп выбирается группа с наименьшим значением показателя $I_1(L)$ и ее оценки принимаются за траекторные параметры первого сопровождаемого объекта. Затем исключаются группы, имеющие общие оценки с первой группой. Из оставшихся групп выбирается следующая группа с наименьшим значением показателя $I_2(L)$ и ее оценки принимают за траекторные параметры второго сопровождаемого объекта. Последняя непересекающаяся с предыдущими группа дает оценки m -го объекта сопровождения.

6. Обнаружение объектов в несканирующей системе

В несканирующей системе не нужно запоминать моменты времени образования ортов направлений на объекты. Все моменты времени привязываются к началу или концу каждого периода обзора. Подход к оцениванию пространственных координат объектов в несканирующей системе сводится к следующему.

Пусть первый приемник принимается за основной. Остальные $n-1$ приемников ориентируются относительно него матрицами H_k поворота осей координат и базовыми векторами b_k , соединяющим центры 1-го и k -го приемников.

Оценки $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ неизвестных дальностей r_1, r_2, \dots, r_n находятся из условия минимума показателя – суммы квадратов норм векторов ошибок сопряжения:

$$\begin{aligned} J &= \sum_{k=2}^n \|e_k\|^2 = \sum_{k=2}^n \|r_1 a_1 - r_k H_k a_k - b_k\|^2 = \\ &= \sum_{k=2}^n (r_1 a_1 - r_k H_k a_k - b_k)^T (r_1 a_1 - r_k H_k a_k - b_k). \end{aligned} \quad (7)$$

Из необходимого условия существования экстремума показателя (7)

$$\partial J / \partial r_1 = 0, \quad \partial J / \partial r_2 = 0, \quad \dots, \quad \partial J / \partial r_n = 0$$

составляется система n линейных уравнений с n неизвестными дальностями $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$, которая в матричном виде записывается как

$$AR = B \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} (n-1)a_1^T a_1 & -a_1^T H_2 a_2 & -a_1^T H_3 a_3 & \dots & -a_1^T H_n a_n \\ a_1^T H_2 a_2 & -a_2^T a_2 & 0 & \dots & 0 \\ a_1^T H_3 a_3 & 0 & -a_3^T a_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1^T H_n a_n & 0 & 0 & \dots & -a_n^T a_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \dots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^T \sum_{k=2}^n b_k \\ a_2^T H_2^T b_2 \\ a_3^T H_3^T b_3 \\ \dots \\ a_n^T H_n^T b_n \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где матрица A и векторы R, B определены в (8). При записи матрицы A учитываются ортогональность матрицы H_k : $H_k^T H_k = I$, где I – единичная матрица, и равенство

$$a_k^T H_k^T a_1 = a_1^T H_k a_k.$$

Методом обратной матрицы находится вектор \hat{R} оценок дальностей:

$$\hat{K} = (\hat{\epsilon}_1, \hat{\epsilon}_2, \hat{\epsilon}_3, \dots, \hat{\epsilon}_n)^T = A^{-1}B. \quad (9)$$

При этом обращение матрицы в (9) устойчиво и не требуется процедура регуляризации, как в случае модели (4).

При подстановке оценок (9) в (7) получается показатель сопряжения данного варианта комбинации направляющих векторов.

Перебор вариантов при обнаружении объектов производится в соответствии с вышеизложенным для сканирующей системы.

7. Сопровождение объектов при совместной работе с радиометром

Точность оценок, полученных в стереопарах оптических приемников, бывает недостаточна. Для повышения точности оценок требуется дополнительная информация об объектах. Такой информацией является радиояркая температура, измеряемая с помощью радиометра, работающего в миллиметровом диапазоне длин волн. Вместе с тем радиометры не предназначены для наблюдения за движущимися объектами из-за большого времени накопления сигнала (от долей секунды до секунды). Однако имеется возможность использования радиометров в режиме управления положением линии визирования антенны радиометра с учетом траекторий движения объектов в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Размещаются n оптических приемников ($n \geq 2$), ориентированных относительно первого приемника, и принимаются в них сигналы отражения или излучения от движущихся объектов. Совмещается с первым приемником радиометр с управляемой антенной.

2. На первом этапе обработки принятых сигналов вычисляются оценки дальностей (9) и показатели сопряжения векторов направлений на объекты (7) с выбором неповторяющихся вариантов соединения векторов. Тем самым обнаруживаются объекты и находятся оценки их пространственных координат. Запоминаются: m – число обнаруженных объектов, M_i – вектор оценок пространственных координат i -го объекта ($i = \overline{1, m}$) в момент времени t_i образования i -х оценок.

3. Вычисляются векторы скорости $V_i, i = \overline{1, m}$, обнаруженных объектов в системе координат первого приемника. Поиск векторов скорости осуществляют по совокупности ортов векторов направлений на объекты, зафиксированных в разные моменты времени, или по последовательности периодов наблюдения. Объекты ранжируются по степени важности в зависимости от дальности и направления вектора скорости.

4. В порядке ранжирования находится упрежденное положение каждого объекта в виде вектора экстраполированных координат

$$M_i^{\text{э}} = M_i + \tau_i V_i$$

на момент времени $t_i + \tau_i$, где τ_i – длительность промежутка времени, необходимого для вывода линии визирования радиометра в упрежденную точку $M_i^{\text{э}}$. Осуществляется перевод линии визирования антенны радиометра с угловой скоростью движения объекта по траектории (относительно радиометра) в направлении $M_i^{\text{э}}$. Для этого определяется угол между ортами векторов направлений на текущее и экстраполированное положения объекта (с помощью скалярного произведения векторов) и делится угол на время движения объекта из текущего в упрежденное положение. Принимается прямолинейное движение объекта за время накопления сигнала радиометром, не превышающее секунды или долей секунды.

5. Измеряется с помощью радиометра радиояркая температура объекта за время его перемещения в упрежденное положение и запоминается. Подобные операции измерения радиояркой температуры повторяются для каждого объекта в порядке ранжирования.

Тем самым повышается вероятность правильной классификации объектов по принадлежности их тому или иному типу на этапе сопровождения объектов.

8. Повышение надежности системы приемников

Многопозиционная система наблюдения за группой m малоразмерных объектов ($m \geq 1$) состоит из N приемников ($N \geq 3$). Приемники ориентированы в единой системе координат и контролируют общую зону обзора. Результатом наблюдения являются орты направляющих векторов $a_k(i) = (a_{kx}(i), a_{ky}(i), a_{kz}(i))^T$, $i = \overline{1, m}$, $k = \overline{1, N}$, найденные в системах координат k -х приемников; i – номер орта в k -м приемнике; m – число источников (объектов). По совокупности найденных векторов $a_k(i)$, $i = \overline{1, m}$, $k = \overline{1, N}$, обнаруживаются объекты и оцениваются их пространственные координаты. Для повышения надежности работы системы предлагается следующий алгоритм.

1. Из N приемников составляются n пар ($2 \leq n \leq N$) так, чтобы взаимные положения ортов $a_1(i)$ и $a_2(j)$ векторов i -х и j -х направлений на объекты в зоне видимости каждой k -й пары приемников ($k = \overline{1, n}$) с номерами k и q ($k, q \in \{1, 2, \dots, N\}$, $k \neq q$) были близки к ортогональным. Это достигается расположением приемников на линии окружности или поверхности сферы с определенным радиусом, зависящим от дальности наблюдения. Например, для $N = 4$ приемников, равномерно расположенных на окружности, образуются k -е, q -е пары: 1–2, 2–3, 3–4, 4–1.

2. В каждой паре k -го и q -го приемников определяют орты $a_1(i)$ и $a_2(j)$ векторов i -х и j -х направлений на источники сигналов в местных системах координат, после чего координаты ортов пересчитывают в единую систему координат. Получаются векторы $a'_1(i) = H_{k1}a_1(i)$ и $a'_2(j) = H_{k2}a_2(j)$.

3. Для каждой i -й, j -й пары ортов $a'_1(i) = (a'_{1x}, a'_{1y}, a'_{1z})^T$ и $a'_2(j) = (a'_{2x}, a'_{2y}, a'_{2z})^T$ записывается условие сопряжения векторов $M_1(i) = r_{k1}(i)a'_1(i)$ и $M_2(j) = r_{k2}(j)a'_2(j)$ и находятся оценки $\hat{\kappa}_k(i)$ и $\hat{\kappa}_q(j)$ дальностей.

4. В k -х парах приемников ($k = \overline{1, n}$) выбираются m_k неповторяющихся пар векторов $a_1(i)$ и $a_2(j_i)$, $i = \overline{1, m_k}$, где номер j_i поставлен в соответствие номеру i , с наименьшими значениями показателей сопряжения $\mathcal{F}(i) = \|\mathcal{E}(i, j_i)\|^2 = \mathcal{E}^T(i, j_i)\mathcal{E}(i, j_i)$. Тем самым обнаруживаются объекты. Для обнаруженных m_k объектов вычисляются векторы усредненных оценок пространственных координат.

5. Координаты объектов, обнаруженных во всех стереопарах приемников, подвергаются операциям кластеризации. В результате выделяются \mathcal{K} кластеров (\mathcal{K} – оценка числа m) и координаты их центров передаются на сопровождение объектов.

6. Если происходит отказ в работе отдельного приемника в какой-либо паре, то продолжают работать остальные пары. Оставшийся в неработающей паре второй приемник соединяется с другим приемником из состава работающих пар с учетом ортогональности направлений на объекты. Тем самым образуется новая пара. Подобным образом продолжается образование новых пар в случае новых отказов.

Надежность такой системы определяется вероятностью того, что при вероятности p безотказной работы каждого приемника хотя бы 2 из N приемников будут работать надежно. С применением формулы Бернулли получаем вероятность p_N безотказной работы системы:

$$p_N = \sum_{k=2}^n p_N(k) = 1 - p_N(0) - p_N(1) = 1 - (1-p)^N - Np(1-p)^{N-1},$$

что в сравнении с $N = 2$ дает очевидное преимущество: $p_N > p^2$ при $N \geq 3$.

Наблюдение за полусферой.

Для наблюдения за полусферой предлагается следующий подход.

1. Располагают n пар оптических приемников на прямой линии AB с расстояниями $d_1 > d_2 > \dots > d_n$ симметрично относительно точки O – центра AB , при этом линии визирования

приемников пересекаются в контролируемых точках областей полусферы (областей возможного проникновения объектов) заданных радиусов $R_k = d_k / 2$, $k = \overline{1, n}$, опирающихся на линию AB как на диаметр полусферы. В силу законов геометрии линии визирования приемников будут ортогональны. Центр охраняемой зоны соответствует точке O .

2. Выполняются операции обнаружения для каждой k -й стереопары.

3. Координаты обнаруженных в парах приемников объектов переводят в общую систему координат, подвергают кластеризации и передают на сопровождение.

4. Предусматривается возможность сканирования линий визирования оптических приемников для расширений зоны контроля.

9. Заключение

1. Предложенные подходы к обнаружению нескольких объектов многопозиционными оптическими сканирующими, а также не сканирующими системами и алгоритмы их реализации, как показывают результаты компьютерного моделирования, позволяют снизить СКО оценок пространственных координат объектов за счет учета скорости движения объектов до 2-х раз и дополнительно снизить погрешность до 4-х раз за счет ортогонального расположения линий визирования приемников в условиях моделирования по сравнению с альтернативными подходами и алгоритмами их реализации, не учитывающими скорость или ортогональность.
2. Предложенные структуры многопозиционной системы четырех стереопар позволяют при вероятности отказа каждого приемника 0,1 и 0,5 обеспечить оценки вероятности обнаружения всех объектов соответственно 0,99 и 0,94 в условиях моделирования по сравнению с одной стереопарой.
3. Перспективные исследования направлены на применение полученных результатов в конкретных системах оптической локации. Кроме оптических систем результаты применимы в радиотехнических и акустических системах.

10. Список источников

- [1] Klochko V.K., Alpatov A.B., Smirnov S. A., Ershov M.D., "Detecting and tracking of a group of objects multi-position passive scanning millimeter-wave system," Proc. SPIE 11541, Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology XIII, 1154104 (20 September 2020).
- [2] Klochko V. K., Smirnov S. A. Object tracking algorithm for a passive positioning system // Computer Optics, 2020 / Т. 44 (2). pp. 244 – 249.
- [3] Kim B. V-RBNN based small drone detection in augmented datasets for 3D LADAR system / B. Kim, [et al.] // Sensors. 2018. Vol. 18, Issue 11. 3825.
- [4] Muraviev V. S. Aerial vehicles detection and recognition for AV vision system / V. S. Muraviev, S.A. Smirnov, V.V. Strotov // Computer Optics. 2017. Vol. 41(4). pp. 545-551.
- [5] Laurenzis M. Multi-sensor field trials for detection and tracking of multiple small unmanned aerial vehicles flying at low altitude / M. Laurenzis, S. Hengy, A. Hommes, [etal.] // Proceedings of SPIE. 2017. Vol. 10200.
- [6] Müller T. Robust drone detection for day / night counter-UAV with static VIS and SWIR cameras / T. Müller // Proceedings of SPIE. 2017. Vol. 10190, 1019018.
- [7] Klochko V. K. Detection of moving objects by a passive scanning system / V.K. Klochko // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2019. Vol. 55, Issue 1. P. 59-65.
- [8] Klochko V. K. Space-time processing of object images in passive radio systems / V. K. Klochko, S. M. Gudkov // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 018. Vol. 54, No. 4. pp. 348 – 354.
- [9] Клочко В.К., Нгуен К.Х. Математические методы локации объектов в многопозиционных системах наблюдения: учеб. пособие. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2021. 120 с.
- [10] Клочко В. К. Подходы к локации объектов в системе позиционирования / 27-я Международная конференция "Радиолокация, навигация, связь (Воронеж, 29 – 30 сент.). Т. 2. 2021. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2021. С. 376 – 385.