

## АЛГЕБРАИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПЕЛЕНГАЦИИ ОБЪЕКТОВ В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ПРИЕМНИКОВ

*Клочко В.К., д.т.н., профессор РГРТУ им. В.Ф. Уткина, e-mail: klochkovk@mail.ru*

### ALGEBRAIC APPROACH TO OBJECT DIRECTION FINDING IN MULTI-POSITION RECEIVER SYSTEM

*Klochko V.K.*

*The paper formulates a general algebraic approach to solving the problem of direction finding of objects in a multi-position receiver system. In receivers, angular coordinates of sources of reflection or radiation signals are measured, which are converted into coordinates of direction vectors or to sources. Orts are distributed to objects by means of criterion of sufficient condition of vectors conjugation. Detection of objects is carried out on the basis of a statistical criterion. Estimates of objects position coordinates and velocity vectors are found from the solution of systems of equations in accordance with methods of estimation theory. Analysis of covariance evaluation matrices provides a recommendation for the spatial location of receivers, providing minimum variance of estimates. Based on the general criterion of vectors conjugation, a more accurate mutual orientation of receiver coordinate systems is carried out. The work summarizes the previously obtained results and complements them with the results of experimental studies by computer modeling method. The results of the simulation compared to alternative approaches are presented. There is a plan to continue the work.*

**Key word:** Radar, sonar, optical location, positioning system, object detection, estimates of coordinates and velocity vectors.

**Ключевые слова:** радиолокация, гидролокация, оптическая локация, система позиционирования, обнаружение объектов, оценки координат и векторов скоростей.

#### Введение

Вопросам обнаружения воздушных объектов многопозиционными средствами активной радиолокации посвящены многочисленные исследования, например [1, 2]. В последние десятилетия активно развиваются пассивные многопозиционные радиотехнические средства обнаружения объектов на дальних рубежах, основанные на использовании сигналов «подсвета» от внешних источников излучения, например в [3, 4]. В основе построения таких систем лежит геометрия расположения приемников и техника высокоточного измерения времени задержки сигналов. В настоящее время актуально построение пассивных и полуактивных систем локации на малой дальности (сотни метров и километры) в интересах охраны открытых территорий – стадионов, парков, пляжей, открытых акваторий и др. – от проникновения воздушных, надводных или подводных объектов (дронов, зондов, подводных аппаратов), потенциально несущих опасность. Также актуально построение пассивных или полуактивных систем слежения за объектами в разных спектральных диапазонах с помощью разных технических средств (радио- и гидролокаторы, радиометры, видеокамеры и др.), что позволяет соединять преимущества определенных диапазонов длин волн.

При комплексировании радио-, оптических или гидролокационных средств с тепловыми датчиками дополнительную информацию об источниках излучения в ви-

*Формулируется алгебраический подход к решению задачи пеленгации объектов в многопозиционной системе приемников. В приемниках измеряются угловые координаты источников сигналов отражения или излучения, которые преобразуются в координаты ортов векторов направлений на источники. Орты распределяются по принадлежности объектам с помощью критерия достаточного условия сопряжения векторов. Обнаружение объектов осуществляется на основе статистического критерия. Оценки координат положения и векторов скорости объектов находятся из решения систем уравнений в соответствии с методами теории оценивания. Анализ ковариационных матриц оценок дает рекомендацию пространственного расположения приемников, обеспечивающего минимум дисперсии оценок. Результаты моделирования показывают преимущество предложенного подхода в сравнении с альтернативными. Намечена перспектива работы.*

де радиояркой температуры обеспечивают радиометры, работающие в миллиметровом диапазоне длин волн [5]. Для этого осуществляется наведение с упреждением линии визирования антенны радиометра на направление обнаруженных источников. Упреждение делается с учетом найденных траекторных параметров обнаруженных объектов, что компенсирует большое время накопления сигнала в радиометре. Учет информации о радиояркой температуре объекта повышает вероятность обнаружения и правильной классификации объектов, например при поиске пропавших в снежных заносах. При наблюдении за наземными и воздушными объектами комплексирование видеокамер с тепловизорами позволяет осуществлять локацию по тепловому следу.

В связи с этим возникает необходимость в разработке универсальных подходов к обнаружению объектов,

применимых для любого спектрального диапазона без измерения временной задержки сигналов. В работе развивается алгебраический подход [5-7], который дополняется новыми результатами экспериментальных исследований. Подход основан на решении систем линейных уравнений и отличается от [1, 2], основанных на геометрических построениях, наличием единого критерия обнаружения объектов и оценивания их пространственного положения и векторов скорости. Это позволяет исследовать свойства полученных оценок методами теории оценивания.

**Цель работы** – повышение эффективности функционирования многопозиционных систем пеленгации объектов, потенциально несущих опасность для зон массового отдыха и частных территорий, на основе разработки и исследования общего подхода, применимого для систем разных назначений и спектральных диапазонов.

**Постановка задачи**

Многопозиционная полуактивная система наблюдения за группой  $m$  малоразмерных объектов ( $m \geq 1$ ) состоит из  $n$  локационных приемников ( $n \geq 2$ ), принимающих сигналы отражения от объектов в определенном диапазоне длин волн. Приемники ориентированы в единой системе координат и контролируют общую зону обзора (рис. 1 иллюстрирует наблюдение за воздушными объектами).

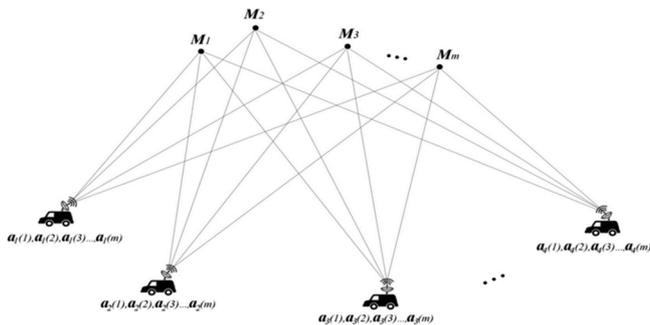


Рис. 1. Многопозиционная система локации

В качестве подсвета используется один или несколько внешних передатчиков волн соответствующего диапазона, ориентированных относительно приемников. В радиодиапазоне длин волн каждый передатчик излучает периодический радио- или эхо-сигнал  $s_0(t) = U_0 e^{j(2\pi f_0 t + \phi_0)}$ , где  $U_0$  – амплитуда;  $f_0$  – несущая частота;  $f_0 = c / \lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны,  $c$  – скорость волны;  $\phi_0$  – начальная фаза;  $t$  – текущее время. Сигнал, отраженный от  $m$  объектов и принимаемый  $q$ -м приемным элементом антенной решетки – AP ( $q = \overline{1, Q}$ ,  $Q$  – число приемных элементов)  $k$ -го приемника ( $k = \overline{1, n}$ ), имеет вид

$$x_{kq}(t) = \sum_{i=1}^{m_k} U_{ki} e^{j\psi_{ki}(t)} + \xi_{kq}(t),$$

где  $m_k$  – число сигналов отражения от объектов, принятых в  $k$ -м приемнике;  $U_{ki}$  и  $\psi_{ki}(t)$  – амплитуда и фаза сигнала отражения от  $i$ -го объекта;  $\xi_{kq}(t)$  – шум прием-

ной аппаратуры. Приемники могут работать в следующих режимах: прием сигналов при сканировании антенны с узкой диаграммой направленности – ДН (порядка  $1^\circ$ ) по угломерному пространству азимута и угла места; прием сигналов широкой ДН (порядка  $30^\circ$ ) при фиксированном положении антенны. Работа приемников и передатчиков синхронизирована. Для обработки сигналов применяется узкополосная фильтрация в спектре доплеровских частот. Объекты разрешаются по угломерному пространству и по доплеровской частоте с помощью известных алгоритмов сверхразрешения.

Результатом  $k$ -х наблюдений являются угловые координаты  $\varphi_k(i)$  азимута и угла места  $\theta_k(i)$  направлений на  $i$ -е источники сигналов, которые в прямоугольных антенных системах координат пересчитываются в координаты ортов векторов направлений на источники:

$$a_k(i) = [a_{kx}(i) \ a_{ky}(i) \ a_{kz}(i)]^T = [\cos \theta_k(i) \sin \varphi_k(i) \ \sin \theta_k(i) \ \cos \theta_k(i) \cos \varphi_k(i)]^T,$$

где  $i = \overline{1, m}$ ,  $k = \overline{1, n}$ ;  $T$  – символ транспонирования. При этом ось  $OZ$  перпендикулярна к плоскости антенны и направлена в сторону объектов, азимут  $\varphi$  отсчитывается от оси  $OZ$ , угол места  $\theta$  – относительно горизонтальной плоскости  $OXZ$  (рис. 2).

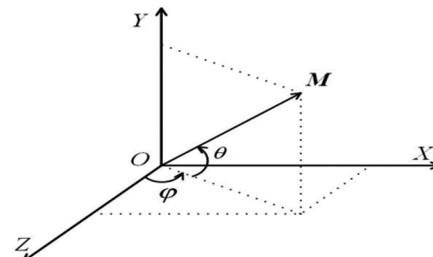


Рис. 2. Антенная система координат приемников

В оптической (в том числе тепловизионной) системе наблюдения  $i$ -е источники сигналов отображаются в плоских видеокадрах  $k$ -х приемников как точечные объекты с прямоугольными координатами  $x_k(i), y_k(i)$ , которые при известном фокусном расстоянии  $f_k$  оптической линзы приемника в системе координат рис. 2 пересчитываются в координаты орта вектора направления на источник. Данный орт без учета параметров калибровки камеры представлен формулой

$$a_k(i) = [a_{kx}(i) \ a_{ky}(i) \ a_{kz}(i)]^T = (-x_k(i), -y_k(i), f_k)^T / \sqrt{x_k(i)^2 + y_k(i)^2 + f_k^2}.$$

Оптические приемники могут работать в 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 зондирования, которая является предметом настоящего исследования, эффективен метод стереопары, обычно применяемый для двух оптических приемников. Метод стереопары берется за основу для реализации в системе нескольких приемников, работающих в определенном диапазоне волн.

## Предлагаемые подходы

Пусть при наблюдении за неподвижными объектами найдены угловые координаты  $\varphi_k(i)$ ,  $\theta_k(i)$  направлений на  $i$ -е источники сигналов в  $k$ -х приемниках и соответствующие орты направления на источники  $a_k(i)$ ,  $k = \overline{1, n}$ ,  $i = \overline{1, m}$ , с привязкой к одному моменту времени образования ортов. Существуют  $S$  вариантов соединения ортов в  $s$ -е группы из  $n$  векторов  $a_1(i_{1s}), a_2(i_{2s}), \dots, a_n(i_{ns})$ ,  $s = \overline{1, S}$ ,  $i_{ks} \in \{1, 2, \dots, m\}$ . Среди этих  $S$  вариантов находятся  $m$  несовпадающих групп ортов  $a_1(i_{1s}^*), a_2(i_{2s}^*), \dots, a_n(i_{ns}^*)$ ,  $s = \overline{1, m}$ , каждая из которых направлена на соответствующий источник сигнала. Для того чтобы выделить из всех вариантов соединения векторов искомые группы, вводится критерий правильности сопряжения.

**Критерий сопряжения и оценки дальностей.** Рассмотрим вариант построения системы, когда первый приемник основной. Остальные ориентированы относительно него матрицей  $H_k$  поворота осей координат и базовым вектором  $b_k$ , соединяющим центры 1-го и  $k$ -го приемников. Сопряжение ( $n - 1$ ) пар ортов, то есть их направление на один и тот же объект, однозначно определяется линейной зависимостью троек векторов:  $M_1 = r_1 a_1$ ,  $M_k = r_k H_k a_k$  и  $b_k$ ,  $k = \overline{2, n}$ , в прямоугольной системе координат 1-го приемника. Обозначим  $e_k$  вектор ошибок сопряжения в  $k$ -й сопряженной паре:

$$e_k = r_1 a_1 - r_k H_k a_k - b_k, \quad k = \overline{2, n}. \quad (1)$$

Оценки  $\hat{r}_1, \hat{r}_2, \dots, \hat{r}_n$  неизвестных дальностей  $r_1, r_2, \dots, r_n$  найдем из условия минимума показателя – суммы квадратов норм векторов ошибок сопряжения (1)

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

Необходимое условие существования экстремума показателя (2)

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

представляет систему  $n$  линейных уравнений с  $n$  неизвестными величинами  $r_1, r_2, \dots, r_n$ , которая в матричном виде записывается как

$$AR = B, \quad (3)$$

где  $A$  –  $n \times n$ -матрица, составленная из скалярных произведений ортов всех приемников в системе координат 1-го приемника;  $R$  – искомый  $n$ -вектор дальностей;  $B$  –  $n$ -вектор скалярных произведений ортов и базовых векторов [8].

Вектор  $\hat{R}$  оценок дальностей находится из (3) методом обратной матрицы:

$$\hat{R} = [\hat{r}_1 \quad \hat{r}_2 \quad \hat{r}_3 \quad \dots \quad \hat{r}_n]^T = A^{-1} B. \quad (4)$$

При этом показатель правильности сопряжения векторов вычисляется по формуле (2), где вместо дальностей

стей  $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$  подставляются их оценки  $\hat{r}_1, \hat{r}_2, \hat{r}_3, \dots, \hat{r}_n$ , найденные по формуле (4).

**Обнаружение объектов.** Предлагаются 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  $\hat{m}$  непересекающихся вариантов соединения ортов в порядке увеличения показателей сопряжения, когда число объектов заранее не известно. При этом число  $\hat{m}$  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  $\sigma_e^2$  (что практически оправданно), то случайная величина нормированного показателя  $J_s / \sigma_e^2$ , где  $\sigma_e^2$  – 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  $\gamma_p$  распределения Пирсона, взятый с доверительной вероятностью  $p$  такой, что для гипотезы правильного сопряжения  $n - 1$  пар векторов выполняется неравенство  $J_s / \sigma_e^2 \leq \gamma_p$ . Следует отсеять заведомо ложные группы, для которых  $J_s / \sigma_e^2 > \gamma_p$ . На практике порог  $\gamma_p$  выбирается из эмпирических соображений. Прохождение через порог  $\gamma_p$  дает основание утверждать, что пространственные координаты векторов  $M_1 = r_1 a_1$ ,  $M_k = r_k H_k a_k$ ,  $k = \overline{2, n}$ , соответствуют  $\hat{m}$  обнаруженным объектам.

**Ковариационная матрица ошибок.** Точность оценок (4) определяется ковариационной матрицей  $K_{\Delta R}$  ошибок  $\Delta R$  оценок, которая при центрированных некоррелированных ошибках  $e_k$ ,  $k = \overline{2, n}$ , для случаев  $n = 2$  и  $n = 3$  с учетом свойств скалярного произведения ортов раскрывается как

$$K_{\Delta R} = \frac{\sigma_e^2}{\sin^2 \alpha} \begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha \\ \cos \alpha & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$K_{\Delta R} = \frac{\sigma_e^2}{\sin^2 \alpha + \cos^2 \beta} \begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha & \cos \beta \\ \cos \alpha & 1 + \sin^2 \beta & \cos \alpha \cos \beta \\ \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta & 1 + \sin^2 \alpha \end{bmatrix},$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – углы между ортами  $a_1, a_2$  и  $a_1, a_3$ .

Из (5) видно, что диагональные элементы матрицы  $K_{\Delta R}$  – дисперсии оценок дальностей зависят от взаимного углового положения ортов, что позволяет выбирать правильное взаимное угловое положение линий визирования антенн приемников, близкое к ортогональному.

Заметим, что величина  $\sigma_e^2$  тем меньше, чем меньше дисперсия ошибок измерения координат ортов направлений на источники. Сама оценка дальности  $\hat{r}$ , как модуль вектора оценок координат  $\hat{M} : |\hat{M}| = \hat{r} |a| = \hat{r}$ , распределена по закону Максвелла.

**Учет вектора скорости.** Использование модели (1) для медленно сканирующей системы в случае быстро движущихся объектов приводит к появлению динамических ошибок. Чтобы этого избежать, фиксируются моменты времени образования ортов  $t_k(i)$ ,  $k = \overline{1, n}$ ,  $i = \overline{1, m}$ , которые в общем случае отличаются в силу различия пространственной ориентации приемников. На рис. 3 показаны векторы направлений.

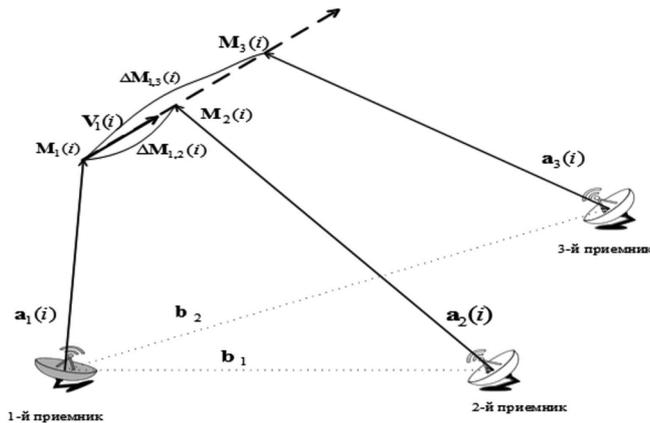


Рис. 3. Векторы направлений на объекты в сканирующей системе

С учетом скорости движения объектов уравнение (1) записывается как

$$r_1(i)a_1(i) - r_k(i)a'_k(i) + V_1(i)\Delta t_k(i) - b_k = e_k, \quad k = \overline{2, n}, \quad (6)$$

где  $\Delta t_k(i) = t_k(i) - t_1(i)$ ;  $V_1(i) = [v_{1x}(i) \ v_{1y}(i) \ v_{1z}(i)]^T$  – вектор скоростей изменения координат  $i$ -го объекта в системе первого приемника на момент времени  $t_1(i)$ .

При  $n = 3$  векторные уравнения (6) раскрываются в виде шести уравнений с шестью неизвестными в матричной форме, и по критерию минимума квадрата нормы ошибок сопряжения находится вектор оценок дальностей и скоростей по данным одного периода сканирования

$$\hat{X}(i) = [\hat{r}_1(i), \hat{r}_2(i), \hat{r}_3(i), \hat{v}_{1x}(i), \hat{v}_{1y}(i), \hat{v}_{1z}(i)]^T.$$

При этом правило обнаружения объектов соответствует изложенному ранее.

Обнаружение с оцениванием положения и скорости можно осуществлять при наличии двух приемников ( $n = 2$ ) по данным двух и более периодов сканирования. В этом плане разработаны способы и алгоритмы классификации наиболее правдоподобных непересекающихся групп векторов направлений на объекты в последовательности периодов сканирования с нахождением траекторных параметров объектов – пространственных координат положения и вектора скорости.

**Вектор скорости при доплеровской обработке.** В доплеровской системе вектор скорости обнаруженного объекта предлагается находить следующим образом.

Для каждого  $i$ -го объекта запоминаются на этапе нахождения его угловых координат доплеровские сдвиги частот  $f_{\Delta k}$ , измеренные в  $k$ -х приемниках ( $k = \overline{1, n}$ ):

$$f_{\Delta k} = f_0(v_0 + v_k)/c,$$

где  $v_0 = \text{pr}_{\vec{a}_0} \vec{v}$  и  $v_k = \text{pr}_{(-\vec{a}_k)} \vec{v}$  – соответственно проекции вектора скорости  $\vec{v}$  на направления от передатчика ( $\vec{a}_0$ ) и от объекта к  $k$ -му приемнику ( $-\vec{a}_k$ ), или

$$\lambda f_{\Delta k} = v_0 + v_k, \quad \lambda = c / f_0, \quad (7)$$

где с помощью скалярных произведений векторов, представленных в системе координат 1-го приемника, справедливы равенства

$$v_0 = \vec{v} \cdot \vec{a}'_0 = v_x a'_{0x} + v_y a'_{0y} + v_z a'_{0z},$$

$$v_k = \vec{v} \cdot \vec{a}'_k = v_x a'_{kx} + v_y a'_{ky} + v_z a'_{kz}, \quad (8)$$

где  $v_x, v_y, v_z$  – координаты вектора скорости в системе координат 1-го приемника;  $a'_0 = H_0 a_0$  – орт вектора направления на объект в системе координат передатчика, пересчитанный в систему координат 1-го приемника с помощью матрицы поворота осей  $H_0$  в матричной форме;  $a'_k = -H_k a_k$ ,  $k = \overline{1, n}$ , – орты векторов направлений от объекта к приемникам, пересчитанные в систему координат 1-го приемника с помощью матриц поворота осей  $H_k$  ( $H_1 = I$ ,  $I$  – единичная матрица).

Получаем из (7) и (8) с учетом ошибок  $\Delta f_k$  измерения доплеровского сдвига частоты систему  $n$  уравнений  $\lambda f_{\Delta k} = \vec{v} \cdot (\vec{a}'_0 + \vec{a}'_k) + \lambda \Delta f_k$ ,  $k = \overline{1, n}$ ,

$$\lambda f_{\Delta k} = \vec{v} \cdot (\vec{a}'_0 + \vec{a}'_k) + \lambda \Delta f_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (9)$$

которая решается в матричной форме  $A \cdot V = \lambda F_0 + \lambda \Delta F$  методом наименьших квадратов (МНК) относительно  $V = [v_x \ v_y \ v_z]^T$  – вектора скорости движения объекта в системе координат 1-го приемника:

$$\hat{V} = \lambda (A^T A)^{-1} A^T F_0. \quad (10)$$

Среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки отдельной координаты вектора скорости (10) на основе ковариационной матрицы несмещенных оценок находится как

$$\sigma[\Delta v_{x,y,z}] = \lambda \sigma_{\Delta f} \sqrt{(1/n) \text{Tr}(A^T A)^{-1}},$$

где  $\sigma_{\Delta f}$  – СКО ошибки измерения доплеровского сдвига частоты;  $\text{Tr}$  – след матрицы.

Данный подход обобщается на случай работы нескольких передатчиков, которые посылают сигналы на одной частоте или разных частотах последовательно во времени при согласовании с приемниками. При этом за короткое время посылки зондирующих сигналов скорость объектов практически не меняется. Надежность и точность работы системы повышается при использовании нескольких передатчиков.

**Взаимная ориентация приемников.** Проблема при обнаружении объектов возникает в том случае, когда матрица  $H$  поворота осей и базовый вектор  $b$  неизвестны или требуют уточнения из-за сбоев навигационной системы и дислокации приемников на местности. Предложен подход к оцениванию параметров матрицы  $H$ ,

вектора  $b$  и оценок дальностей до объектов, основанный на решении матричных уравнений [5-7]. Он отличается тем, что позволяет находить параметры матрицы  $H$  и оценки дальности одновременно с поиском сопряженных пар векторов направлений на объекты по критерию достаточного условия сопряжения направляющих векторов. Подход реализуется для  $n \geq 2$  приемников при наличии  $m \geq 3$  контрольных объектов и имеет преимущество в точности оценок матрицы  $H$  по сравнению с известным подходом, основанным на необходимом условии сопряжения векторов – их компланарности.

### Результаты моделирования

На рис. 4 показаны результаты моделирования в ситуации, когда два приемника ( $n = 2$ ), разнесенные по координате  $X$  на 300 м, по координатам  $Y$  и  $Z$  – на 2 и 3 м, наблюдали несколько объектов. Из рис. 4 видно, что наименьшее СКО оценок дальностей получается при ортогональном положении векторов направлений на объект. Это даёт рекомендацию правильного расположения приёмников в пространстве и позволяет снизить погрешность до 4-х раз в условиях моделирования.



Рис. 4. Зависимость СКО оценок дальностей от угла между ортами

На рис. 5 показано, что при увеличении дальности до объектов возрастает СКО оценок пространственных координат объектов вследствие уменьшения отношения сигнал-шум и увеличения СКО оценок координат ортов.

В следующем эксперименте три приемника ( $n = 3$ ), разнесенные по координате  $X$  на 200 м, по координатам  $Y$  и  $Z$  – на 2 и 3 м, наблюдали объекты, удаленные на 400 – 500 м. Скорости движения объектов в пространстве трех координат выбирались как [1-5 м/с]. Результаты моделирования алгоритма оценивания пространственных координат объектов с учетом скорости и без учета скорости показаны на рис. 6.

Видно (рис. 6), что алгоритмы с учетом движения объектов позволяют снизить СКО оценок пространственных координат объектов до 2-х раз.

По результатам моделирования рис. 6 отмечают преимущество учета скорости и чувствительность алгоритма оценивания координат объектов к ошибкам измерения координат ортов. Для повышения точности оценок следует увеличивать точность измерения угловых направлений на объекты.

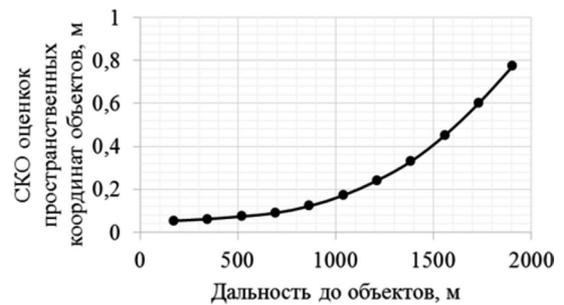


Рис. 5. Зависимость СКО оценок координат объектов от дальности до объектов

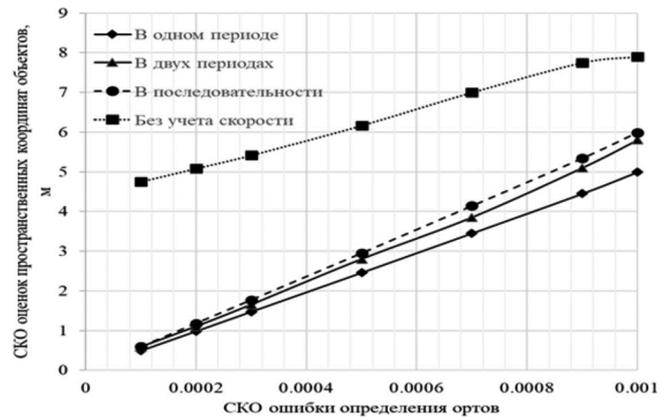


Рис. 6. Зависимость СКО оценок пространственных координат объектов от СКО ошибки определения координат ортов в разных алгоритмах

Расчет СКО  $\sigma[\Delta v_x]$  оценок координат вектора скорости от числа передатчиков  $m$  показан на рис. 7. Отмечается, что переход от 1-го к 2-м передатчикам снижает СКО оценок координат вектора скорости в 2,5 раза, а переход от 1-го к 4-м передатчикам снижает СКО в 5 раз.

Увеличение числа приемников от 2 до 4 (при разном числе передатчиков) снижает СКО от 15 % до 60 %. С увеличением дальности с  $R = 100$  м до  $R = 200$  м СКО возрастает примерно в 2 раза. С увеличением длины волны с  $\lambda = 0,1$  м до  $\lambda = 0,3$  м СКО возрастает примерно в 1,5 раза.

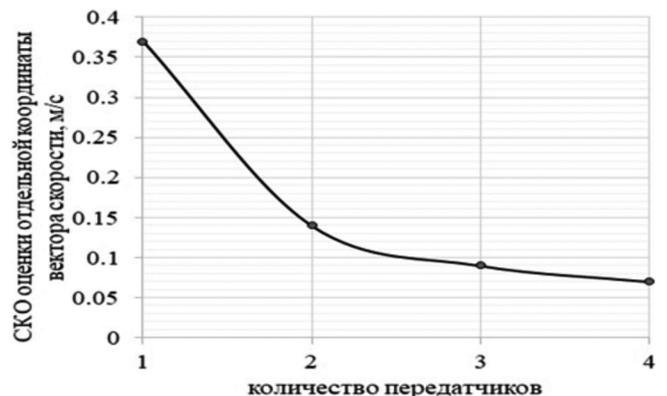


Рис. 7. Зависимость СКО оценок координат вектора скорости от числа передатчиков

Дополнительно проводился эксперимент по нахождению оценок параметров взаимной ориентации систем координат. Результаты моделирования отражены на

рис. 8 в зависимости от числа контрольных объектов. Видно (рис. 8), что за счет более точной взаимной ориентации приемников удается снизить СКО оценок пространственных координат объектов в среднем в 3 раза по сравнению с альтернативным алгоритмом нахождения параметров ориентации, основанным на необходимом условии сопряжения.

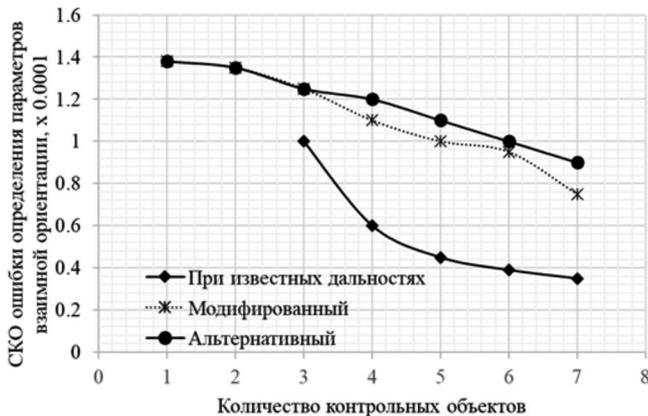


Рис. 8. Зависимость СКО оценок параметров взаимной ориентации от числа контрольных объектов при СКО ошибок координат ортов  $\sigma_a = 0,0005$

## Заключение

Из результатов исследования видно, что в условиях моделирования предложенные подходы позволяют:

- снизить СКО оценок пространственных координат за счет учета скорости движения объектов до 2-х раз и дополнительно снизить СКО оценок до 4-х раз в сканирующей системе за счет ортогонального расположения линий визирования приемников по сравнению с альтернативными подходами, которые не учитывают скорость или ортогональность линий визирования;

- снизить в 1,5 раза СКО оценок координат вектора скорости за счет учета всех его проекций в доплеровской системе и уменьшить СКО оценок примерно в  $N$  раз за счет увеличения числа  $N$  передатчиков;

- снизить СКО оценок пространственных координат объектов в среднем в 3 раза за счет более точной взаимной ориентации приемников с проверкой достаточного условия сопряжения векторов по сравнению с известным подходом, основанным на необходимом условии сопряжения.

Подходы реализуются на базе существующих систем, позволяющих измерять угловые координаты источников сигналов в разных частотных диапазонах. Пер-

спективные исследования направлены на изучение физических особенностей конкретных систем позиционирования и влияния внешних помех на погрешность оценок, в частности на нестабильность доплеровских частот и оптимизацию пространственной структуры системы приемников и передатчиков.

Результаты работы могут найти применение в радиотехнических, гидроакустических, радиометрических и оптических системах пеленгации [8, 9]. Возможно применение в медицинских и робототехнических системах ультразвуковой локации.

## Литература

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: учеб. для вузов. М.: Радиотехника, 2007. 376 с.
2. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
3. Lipsky Stephen E. Microwave passive direction finding. Raleigh, USA: SciTech Publishing, Inc., 2004. 320 p.
4. P. Nomikos, D. Economou, G. Limnaios and K.C. Zikidis. Presentation and feasibility study of passive radars // Air Force Rev Mag (in Greek), 107, (2016). Pp. 86-103.
5. Ключко В.К., Гудков С.М., Нгуен К.Х. Оценивание пространственных координат объектов в системах тепло- и радиовидения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 1. С. 27-33, DOI: 10.21667/1995-4565-2018-63-1-27-33.
6. Ключко В.К., Гудков С.М., Нгуен К.Х. Сравнительный анализ методов оценивания координат объектов в пассивной системе радиовидения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 2. С. 23-28, DOI: 10.21667/1995-4565-2018-64-2-23-28.
7. Ключко В.К., Гудков С.М., Нгуен К.Х. Анализ погрешностей при передаче координат объектов в системе совмещенных приемников // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 69. С. 33-41, DOI: 10.21667/1995-4565-2019-69-33-41.
8. Ключко В.К. Пеленгация движущихся объектов многопозиционной доплеровской системой // Радиотехника. 2020. Т. 84, № 11 (21). С. 5-12, DOI:10.18127/j00338486-202011(21)-01.
9. Охрименко А.Г. Варианты решения задачи отождествления пеленгов в пассивных многопозиционных угломерных системах // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2002. Т. 45, № 6. С. 12-19.