

Все эти виды моделирования выполнялись для составной траектории особого вида, чтобы упростить вычисление отклонений. Если целевая траектория задана двумерным массивом координат её точек, то кратчайшие расстояния носовой и кормовой точек ДП судна можно вычислять подбором расстояний до точек этого массива и выбора наименьшего, куда не следует включать весь массив, нужно выбирать некоторый его подмассив, сдвигая его по мере хода судна как некоторое окно. Этот метод следует применять в реальном плавании с использованием электронной картографии, когда заданная траектория, как правило, представлена массивом точек (или массивом отрезков).

Таким образом, на основе проведённых модельных испытаний с двумя различными типами судов в разных условиях плавания можно сделать следующий принципиальный вывод: обычно предложенный способ управления применяется для автоматизированного движения вдоль прямых линий. Подход швартуемого судна к швартуемому судну, например, находящемуся на якорной стоянке, разделяется естественным образом на три этапа с разными способами управления судном. Однако, как было показано, управление судном с формированием управляющего

сигнала с помощью двух отклонений позволяет выполнять движение по сложным траекториям. При этом усложняется только вычислительная часть алгоритма при определении этих отклонений, а суть управления остается неизменной. Это открывает перспективы применения данного метода управления для автоматического движения судна по заданной производной траектории.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антомонов Ю.Г. Расчет систем, оптимальных по быстродействию. – Л.: Судостроение, 1964.
2. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля. – Т. 3/ под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985.
3. Карасев А.В., Лукомский Ю.Л., Мусин Е.А. О критерии оптимального управления курсом судна // Судостроение. – 1967. – № 4. – С. 36 – 40.
4. Пат. 2375246 Российская Федерация, МПК В63Н25/00. Мурманск. гос. техн. ун-т. – 2008126354/11; заявл. 27.06.2008; опубл. 10.12.2009 // БИ. – 2009. – № 15.
5. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения. – Л.: Судостроение, 1976.
6. Управление судном и его техническая эксплуатация / под ред. А.И. Щетининой. – М.: Транспорт, 1975.
7. Фельдбаум А.А. Оптимальные процессы в системах автоматического регулирования // Автоматика и телемеханика. – 1953. – Т. 14. – № 6. – С. 712 – 728.

УДК 621.396.96

## РАСПОЗНАВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ДВУХКООРДИНАТНЫМИ ИЗМЕРИТЕЛЯМИ

*В.М. Гриняк, канд. техн. наук, доц.  
А.С. Девятисильный, д-р техн. наук, проф.*

Рассмотрена система идентификации воздушных объектов, построенная на базе двухкоординатных радаров кругового обзора. С помощью компьютерного моделирования показана конструктивность предлагаемого подхода для типичных ситуаций.

*Ключевые слова:* радар, измерение, воздушный объект, селекция.

The air targets identification system based on two-coordinate radars of circular survey is considered. Computer modeling shows the usability of proposed approach for typical situations.

*Keywords:* radar, measurement, air target, selection.

Современные береговые системы управления движением судов (СУДС) представляют собой наукоемкие и сложные в техническом и организационном отношении средства [1], [2]. В настоящее время под такими системами принято понимать совокупность средств обнаружения, измерения, передачи и обработки данных, анализа, интерпретации, визуализации информации и выработки управляющих решений. При всей многоаспектности проблем, сопутствующих построению современных СУДС, функциональным ядром таких систем являются их навигационные

функции, решающие задачу определения траекторий объектов, находящихся в зоне ответственности. Несмотря на развитость современных средств глобальной спутниковой навигации, главным информационным элементом СУДС на море, способным обеспечить надёжность и автономность их функционирования, являются двухкоординатные радиолокационные станции (РЛС) кругового обзора.

В работе [3] рассмотрена проблема измерения координат воздушных объектов над морской поверхностью с помощью двухкоординатной РЛС,

показана принципиальная возможность (хотя и с ограниченным эффектом) решения пространственной (трехкоординатной) задачи при использовании одного двухкоординатного радара, а также обоснована перспективность перехода к многопозиционному наблюдению при реализации системы нескольких двухкоординатных радаров.

Актуальной для практики представляется интерпретация указанной проблемы как задачи различения (селекции) воздушных и морских объектов в условиях соизмеримости их скоростей. Это вызвано нередкими полетами вертолетов над акваториями портов и, как следствие, появлением неопределенности при оценке навигационной безопасности СУДС, использующих радиолокационную информацию [4], [5].

Суть проблемы состоит в том, что ошибочное заключение о воздушной цели как о морской может полностью исказить представления диспетчера о навигационной обстановке и привести к ошибочным управленческим решениям. Данный прикладной аспект решения задачи селекции требует соответствующего расширения навигационных и сервисных функций действующих СУДС, формируемых на основе двухкоординатных радаров.

В настоящей работе выполнено обоснование возможности создания на базе двухкоординатных радаров информационно-измерительной системы, обеспечивающей достоверную селекцию воздушных объектов.

**Модель измерительной системы.** Обычно антенны радаров береговых систем устанавливаются на высотах несколько десятков метров над уровнем моря, что обеспечивает вполне надежный контроль акватории на дальностях до нескольких десятков километров. С учетом этих расстояний измерения координат объектов могут быть выполнены в сферической системе  $\varphi, \lambda, R$  – соответственно географическая широта, долгота и расстояние от центра Земли до объекта. В качестве модели поверхности Земли с учетом пространственной локальности рассматриваемой задачи, как правило, принимается сфера.

Особенностью внешнего наблюдения, осуществляемого с помощью радара, является отсутствие возможности непосредственного измерения сил и моментов, обуславливающих движение объекта в соответствии с законами ньютоновской механики. Поэтому, оставаясь в рамках традиций, будем описывать эволюцию координат объекта простейшими полиномиальными (по времени) моделями. Для маломаневренных в интервале наблюдения объектов достаточно ограничиться полиномами первой степени для угловых компонентов и нулевой степени (предполагая движение объекта на постоянной высоте) для радиальной:

$$\begin{aligned} \varphi_{k+1} &= \varphi_k + v_\varphi T; \\ \lambda_{k+1} &= \lambda_k + v_\lambda T; \\ R_{k+1} &= R_k, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\varphi_k, \lambda_k, R_k$  – значения соответствующих координат объекта в момент времени  $t_k$ ;

$v_\varphi, v_\lambda$  – значения скоростей изменения угловых координат;

$$T = t_{k+1} - t_k.$$

Измерения, обеспечиваемые многопозиционной системой из  $L$  радаров, описываются следующими уравнениями:

$$z_k^{(j)} = \begin{bmatrix} r^{(j)}(k) \\ \psi^{(j)}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_r^{(j)}(k) \\ \xi_\psi^{(j)}(k) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $z_k^{(j)}$  – вектор  $k$ -го измерения  $j$ -й станцией;  $r^{(j)}(k)$  – дальность от объекта до  $j$ -й станции в момент времени  $t_k^{(j)}$  (время  $k$ -го измерения  $j$ -й станцией);  $\psi^{(j)}(k)$  – азимут объекта по отношению к  $j$ -й станции в момент времени  $t_k^{(j)}$ , при этом соседние моменты времени связаны соотношением  $t_{k+1}^{(j)} - t_k^{(j)} = T^{(j)}$ ,  $T^{(j)}$  – период вращения  $j$ -й станции;  $\xi_r^{(j)}(k), \xi_\psi^{(j)}(k)$  – инструментальные измерительные погрешности (некоррелированные, с нулевым средним);  $j = \overline{1, L}$ .

В свете описанных модельных представлений (1) и (2) может быть поставлена обратная траекторная задача, решением которой является вектор  $s_k = (\varphi_k, v_\varphi, \lambda_k, v_\lambda, R)^T$ , определяемый по измерениям  $z_k^{(j)}$ ,  $j = \overline{1, L}$ ,  $k = \overline{1, m}$ ,  $m$  – число измерений. Для нахождения оценки данного вектора  $\hat{s}_k = (\hat{\varphi}_k, \hat{v}_\varphi, \hat{\lambda}_k, \hat{v}_\lambda, \hat{R})^T$  прибегнем к традиционному методу решения задач типа (1), (2) – линейаризации с представлением их в виде, характерном для задач метода наименьших квадратов [6]:

$$\begin{aligned} \delta z_k^{(j)} &= \frac{\partial z_k^{(j)}}{\partial \varphi_k} \delta \varphi_k + \frac{\partial z_k^{(j)}}{\partial v_\varphi} \delta v_\varphi + \frac{\partial z_k^{(j)}}{\partial \lambda_k} \delta \lambda_k + \\ &+ \frac{\partial z_k^{(j)}}{\partial v_\lambda} \delta v_\lambda + \frac{\partial z_k^{(j)}}{\partial R} \delta R + \xi_k^{(j)}; \\ j &= \overline{1, L}, \quad k = \overline{1, m} \end{aligned}$$

(здесь понимается покомпонентное дифференцирование вектора  $z_k^{(j)}$ ),

или в общем виде

$$Z = H \delta s_k + q, \quad (3)$$

где  $Z$  – полный вектор невязок измерений на интервале наблюдения;  $\delta s_k = (\delta\varphi_k, \delta v_\varphi, \delta\lambda_k, \delta v_\lambda, \delta R)^T$  – вектор погрешностей априорных представлений о векторе  $s_k$ ;  $H$  – матричный коэффициент (матрица частных производных);  $q$  – вектор, описывающий немоделируемые параметры задачи (вектор приведённых погрешностей измерений).

Отождествляя принципиальную разрешимость задачи, представленной уравнениями (1), (2), с невырожденностью системы уравнений (3), отметим, что она является разрешимой уже для одного радара ( $L=1$ ) при  $v_\varphi$  и  $v_\lambda$ , не равных одновременно нулю, и для нескольких радаров ( $L > 1$ ) при любых возможных параметрах движения наблюдаемого объекта [3], [7].

Центральным свойством рассматриваемой задачи, выраженной уравнениями (1), (2), является нерегулярность оценок радиальной координаты (особенно хорошо просматриваемая для маловысотных удаленных объектов), обусловленная исходной нелинейностью задачи и конечной точностью измерений [3], [7], [8], не позволяющая однозначно отнести наблюдаемый объект к тому или иному высотному классу. Сущность предлагаемого метода селекции воздушных объектов заключается в сравнении оценок высоты наблюдаемого объекта  $\hat{h} = \hat{R} - R_3$  ( $R_3$  – радиус Земли) с оценками высоты объекта, заведомо не являющегося воздушным.

Введем для каждого наблюдаемого объекта соответствующий ему фиктивный объект с вектором навигационных параметров  $s_k^*$ , при этом  $\varphi_k^* = \hat{\varphi}_k$ ,  $v_\varphi^* = \hat{v}_\varphi$ ,  $\lambda_k^* = \hat{\lambda}_k$ ,  $v_\lambda^* = \hat{v}_\lambda$ ,  $R^* = R_3 + h^*$ , где  $h^*$  – высота объекта, не считающегося воздушным (было принято  $h^* = 15$  м). Пусть  $z_k^{(j)*}$  – вектор фиктивного  $k$ -го измерения  $j$ -й станцией, формируемый с учетом  $s_k^*$  и известных статистик инструментальных радиолокационных измерительных погрешностей  $\xi_r^{(j)}$ ,  $\xi_\psi^{(j)}$ . Назовем вектор  $\hat{s}_k^* = (\hat{\varphi}_k^*, \hat{v}_\varphi^*, \hat{\lambda}_k^*, \hat{v}_\lambda^*, \hat{R}^*)^T$ , получаемый посредством решения задачи, представленной уравнениями (1) и (2), для фиктивного объекта, т.е. на базе вектора фиктивных измерений  $z_k^{(j)*}$ , вектором оценки состояния фиктивного объекта, а  $\hat{h}^* = \hat{R}^* - R_3$  – вектором оценки высоты фиктивного объекта.

Для того чтобы сравнить оценки высот наблюдаемого и соответствующего ему фиктивного объекта, сформируем в каждый момент времени  $t_k$  по  $N$

векторов фиктивных измерений  $z_k^{(j)*}$  и выполним оценку высоты фиктивного объекта  $\hat{h}^*$  для каждого из них, после чего определим среднее значение оценок высот:

$$\hat{h}_{\text{cp}}^*(t_k) = \sum_{i=1}^N \hat{h}_i^*(t_k) / N.$$

Принимая во внимание ранее изложенное, можно предположить, что если наблюдаемый объект – воздушный, то оценки его высоты  $\hat{h}(t_k)$  будут устойчиво попадать в область

$$\hat{h}(t_k) > \hat{h}_{\text{cp}}^*(t_k). \quad (4)$$

Таким образом, если для наблюдаемого объекта в процессе решения рассматриваемой задачи, представленной уравнениями (1) и (2), частота выпадения оценок высоты  $\hat{h}(t_k)$ , удовлетворяющих условию (4), будет превышать некоторое пороговое значение  $P^*$ , то данный объект можно считать воздушным.

**Результаты численного моделирования.** Численное моделирование задачи выполнялось для случая системы наблюдения, состоящей из двух радаров, отстоящих друг от друга на 5 км и расположенных на высоте, равной высоте фиктивного объекта (15 м). Каждый радар характеризуется погрешностями измерения дальностей  $\xi_r^{(j)}(k)$  и азимутов  $\xi_\psi^{(j)}(k)$ , равномерно распределенных, соответственно, в интервалах  $[-6; 6]$  м и  $[-0,06; 0,06]^\circ$  с периодом вращения антенны  $T = 3$  с. Наблюдаемый объект движется на высоте  $h$  со скоростью 20 м/с из точки, проекция которой на земную поверхность совпадает с проекцией середины отрезка, соединяющего радары, в направлении, перпендикулярном этому отрезку. Число измерений от каждого радара  $m$ , участвующих в решении задачи, представленной уравнениями (1) и (2), равно десяти.

Результаты решения рассматриваемой задачи идентификации воздушных объектов приведены на рис. 1, где  $r$  – расстояние от точки проекции на земную поверхность середины отрезка, соединяющего радары до проекции на земную поверхность наблюдаемого объекта. Так, на рис. 1 а показаны оценки высоты наблюдаемого объекта  $\hat{h}(t_k)$  (сплошная линия) для случая, когда его высота  $h = 200$  м и средние значения оценок высоты фиктивного объекта  $\hat{h}_{\text{cp}}^*(t_k)$  (точки) вычислены при  $N = 400$ ; то же показано на рис. 1 б для случая высоты наблюдаемого объекта  $h = 400$  м.

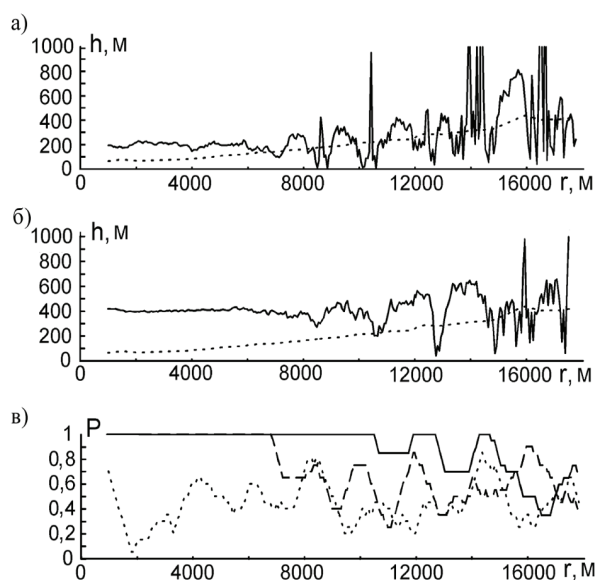


Рис. 1. Результаты численного моделирования задачи идентификации воздушных объектов

Результаты оценки частоты выпадения двадцати последних (по времени) оценок высоты  $\hat{h}(t_k)$ , удовлетворяющих условию (4) для  $h = 15$  м (точки),  $h = 200$  м (пунктир) и  $h = 400$  м (сплошная линия), даны на рис. 1 а, откуда видно, что для объекта, не являющегося воздушным ( $h = 15$  м), значения  $P$  не превышают 0,9, что дает основание установить пороговое значение  $P^* = 0,9$ . Объект, движущийся на высоте 200 м (в данной конкретной реализации), уверенно выделяется как воздушный до дальности приблизительно 7 км, а движущийся на высоте 400 м – до даль-

ности 11 км. В целом, на основании анализа представленных данных, можно сделать вывод о конструктивной разрешимости рассматриваемой здесь задачи идентификации воздушных объектов. Следует отметить, что приведенные оценки ее разрешимости являются вполне приемлемыми для эксплуатационной практики многопозиционных систем наблюдения, образуемых на базе двухкоординатных радаров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Модеев Р.Н.* СУДС – ядро информационной системы порта // *Морские порты.* – 2010. – № 8. – С. 27 – 29.
2. ОАО Норфес [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.norfes.ru/>.
3. *Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Гриняк В.М.* Нейроподобные алгоритмы высотной классификации движущихся объектов // *Информационные технологии.* – 2001. – № 12. – С. 45 – 51.
4. *Смоленцев С.В.* Формализация задачи расхождения судов в море на основе теории мультиагентной системы // *Эксплуатация морского транспорта.* – 2011. – № 2. – С. 19 – 24.
5. *Гриняк В.М., Головченко Б.С., Малько В.Н.* Распознавание опасных ситуаций системами управления движением судов // *Транспорт: наука, техника, управление.* – 2011. – № 8. – С. 42 – 45.
6. *Годунов С.К.* Современные аспекты линейной алгебры. – Новосибирск: Научная книга, 1997.
7. *Гриняк В.М.* Исследование пространственной задачи навигации в условиях неполной измерительной информации // *Дальневосточный математический журнал.* – 2000. – Т. 1. – № 1. – С. 93 – 101.
8. *Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Гриняк В.М.* Способ распознавания удалённых воздушных объектов: Патент № 2206104 // Б.И. – 2003. – № 16.

УДК 621.396.96

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВ РЕЖИМА НАЛОЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В РЛС/САРП ПРИ СИЛЬНОМ ВОЛНЕНИИ МОРЯ

*В.В. Афанасьев*, канд. техн. наук, доц.,  
*А.Н. Маринич*, канд. техн. наук, доц.,  
*А.В. Припотнюк*, инж.,  
*Ю.М. Устинов*, д-р техн. наук, проф.

Показано, что при сильном волнении моря на шкалах малой дальности, когда экран РЛС/САРП засвечен помехами моря, задачу обнаружения целей решает режим работы overlay.

*Ключевые слова:* РЛС/САРП, помехи от волнения моря, разрешающая поверхность, совместное отображение целей, мощность сигналов, помеха, усиление, фильтрация.

It is shown that at high seas the overlay mode allows to observe targets at a small range scale when the RADAR/ARPA screen is hindered by clutters

*Keywords:* RADAR/ARPA, sea clutters, resolving area, associated display target, signals power, interference, gain, filtration.

При непогоде – сильном волнении моря, когда надежная работа электронных средств навигации судна особенно важна, обнаружение с помощью РЛС/САРП целей, находящихся на малом удалении,

затрудняется. Влияние на обнаружение целей дождя, снежной метели и тумана рассмотрено в статьях [1], [2]. Выполним анализ мешающего действия помех на работу РЛС/САРП из-за волнения моря.