

УДК 519.68:15:681.5

В.М. Гриняк, Е.Г. Лаврушина, Т.М. Гриняк
**ВЕРОЯТНОСТНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВОЗДУШНЫХ
ОБЪЕКТОВ ДВУХКООРДИНАТНЫМИ РАДИОЛОКАТОРАМИ
КРУГОВОГО ОБЗОРА**

*Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,
Владивосток, Россия
ООО Тера-Рекон,
Токио, Япония*

Статья посвящена проблеме распознавания маловысотных низкоскоростных воздушных объектов (вертолетов), движущихся в зоне ответственности береговых систем управления движением судов. Основной информационной базой таких систем являются двухкоординатные РЛС кругового обзора. Выделение из массива наблюдаемых ими объектов воздушных целей требует применения специальных процедур обработки информации. В статье сформулирована математическая модель задачи наблюдения воздушных объектов, основанная на уравнениях типа «состояние-измерение» и конечномерных представлениях метода наименьших квадратов. В силу исходной нелинейности задачи предлагается её линеаризация около некоторого опорного решения, характеризующего априорные представления о траектории движения наблюдаемого объекта. Основное внимание в работе уделено вопросу границ разрешимости задачи в условиях инструментальных погрешностей измерений. Приведены результаты численного моделирования для типичных ситуаций. Показано, что предлагаемый алгоритм позволяет принять решение о степени принадлежности объекта к классу воздушных, при этом задача разрешима в диапазонах отношения высота/дальность, приемлемых для широкого круга практических приложений.

Ключевые слова: управление движением, воздушный объект, высота, наблюдение, радар, вероятность.

ВВЕДЕНИЕ.

Основным инструментом организации движения на море являются береговые системы управления движением судов (СУДС). Их главная задача - обеспечение безопасности движения в сложных географических районах, особенно там, где свойственный современному морскому транспорту коллективный характер движения проявляется в наибольшей степени [1]. Такими районами являются проливы с высоким трафиком, акватории морских портов, районы интенсивного рыбного промысла, морской нефте- и газодобычи и т.п.

При решении задач обеспечения навигационной безопасности движения в потоках высокой интенсивности и неоднородности возникает необходимость обладания максимально полной информацией о свойствах движения каждого объекта [2]. Существующие СУДС ориентированы на традиционную работу в двумерном навигационном пространстве. Вместе с тем, в условиях регулярного присутствия над оживленной акваторией

маловысотных низкоскоростных воздушных объектов (вертолетов) обостряется проблема генерации ложных тревог (воздушные объекты принимаются за морские).

Диспетчерскими службами крупных морских портов отмечается значительное повышение интенсивности воздушного движения, осуществляемого средствами малой авиации и связанного с выполнением лоцманских, таможенных и пограничных функций. Указывается на возрастание психологической нагрузки на диспетчерский персонал, вынужденный принимать решения в условиях неопределённости навигационной обстановки, осложняемой вероятностью присутствия воздушных объектов. В обсуждаемом контексте ошибочное заключение судоводителя или оператора СУДС о воздушной цели как о морской (когда их скорости движения сравнимы) может в корне исказить представления о навигационной обстановке и привести к ошибочным управленческим решениям [3].

Обозначенная проблема частично решается применением Автоматической идентификационной системы (АИС) на воздушном объекте: информация АИС позволяет, в том числе, однозначно идентифицировать тип цели [4]. Вместе с тем, транспондерами АИС оснащаются далеко не все воздушные объекты, допускающие полет над акваторией. Рассматриваемый прикладной аспект требует решения задачи селекции воздушных объектов путем расширения навигационных функций систем, образуемых на основе двухкоординатных радаров. Другими словами, актуальна постановка задачи наблюдения трёхмерного навигационного пространства на базе одно- и двух- координатных измерителей (радиолокационных станций – РЛС).

Проблема трехкоординатного наблюдения воздушных объектов двухкоординатными измерителями неоднократно привлекала внимание исследователей [5-13]. Так, в работах [5, 6] рассматривается способ определения высоты объекта по измерениям его дальности и азимута несколькими РЛС путем решения геометрической задачи.

В работе [7] была показана принципиальная возможность (хотя и с ограниченным эффектом) решения трехкоординатной задачи при использовании даже одного двухкоординатного радара. Сущность предлагаемой методики состоит в использовании линейного динамического алгоритма оптимального оценивания, обрабатывающего измерения дальности и азимута объекта последовательно, по мере их поступления и основанном на дискретном фильтре Калмана [8, 9]. Если в системе имеется несколько радаров, то после отдельной обработки измерений каждой РЛС производится дополнительная совместная обработка полученных оценок высоты объекта. При этом используется прямоугольная декартова система координат.

В работе [10] предложен метод определения высоты объекта по измерениям одного двухкоординатного радара путем совместной обработки методом наименьших квадратов измерений дальности и азимута, полученных на конечном интервале времени. Продемонстрировано качество решения задачи в зависимости от дальности объекта и точности измерений.

В работах [11, 12] показан результат решения задачи оценки высоты объекта при переходе к многопозиционному наблюдению (два или несколько радаров). Авторы доказывают перспективность оценки координат объектов методом наименьших квадратов в сферической системе координат φ, λ, R - соответственно, географические широта, долгота и расстояние от центра Земли до объекта. Использование сферической системы координат позволяет избежать проблемы сингулярности задачи в области малых высот и повысить устойчивость оценки высоты объекта. При этом в работе [12] предлагаемый метод сравнивается с известным способом [7], демонстрируется большая эффективность метода [12].

Общей проблемой всех известных способов определения высоты наблюдаемого объекта двухкоординатными измерителями является нерегулярность оценок высоты. Начиная с некоторого расстояния от системы радаров воздушный объект становится (по оценке высоты) неотличимым от морского, что (имея в виду мотивы решения задачи в интересах управления движением судов) не даёт возможности достоверно отнести наблюдаемый объект к тому или иному классу. Поэтому в работе [13] авторы предлагают дополнить задачу оценки высоты оценкой высотного диапазона объектов используя идею алгоритмов с обучением. Похожий путь предлагается и в работе [14]: исследуется возможность использования идей, положенных в основу нейро-нечетких систем.

В связи с многообразием моделей обсуждаемой задачи представляют интерес её некоторые общесистемные свойства, определяющие разрешимость в условиях конечной точности модельных представлений и измерений. В настоящей работе исследуется возможность идентификации воздушных объектов двухкоординатными измерителями в рамках модельных представлений типа «состояние-измерение» и предлагаются инвариантные индикаторы, не только позволяющие оценить вероятность принадлежности объекта к классу воздушных, но и дающие теоретические оценки границ разрешимости задачи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.

При организации СУДС антенны РЛС устанавливаются на высотах в несколько десятков метров над уровнем моря, что обеспечивает вполне надежный контроль морского пространства на дальностях в несколько десятков километров. С учетом этих расстояний и реальных погрешностей

радиолокационных измерений можно пренебречь разницей между ходом радиолуча в атмосфере и геометрической дальностью до наблюдаемого объекта и, кроме того, модельные исследования задачи выполнять в местной декартовой системе отсчета. Пусть xuz – система отсчета, начало которой совмещено с центром антенны одной из РЛС, ось z направлена вертикально вверх по оси вращения антенны, а оси x и y ориентированы соответственно в восточном и северном направлениях. Предполагается, что координаты установки всех антенн РЛС, входящих в сеть наблюдения, известны - (x_i, y_i, z_i) , $i = \overline{1, N}$, где N - количество РЛС в сети.

В условиях внешнего наблюдения и естественного отсутствия какой-либо информации о силах и моментах, действующих на морской объект и обуславливающих его траекторию движения, традиционно принято эволюцию координат объекта описывать простейшими полиномиальными (по времени) моделями [8, 9]. Для маломаневренных на временном интервале обновления информации (его можно отождествлять с периодом вращения антенны РЛС, порядка нескольких секунд) целей обычно ограничиваются полиномами первой степени. Следуя этой вполне обоснованной и оправдавшей себя традиционной практике, модель движения объекта в выбранной системе отсчета представим в следующем дискретном виде:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{s}(k+1) &= \begin{bmatrix} x(k+1) \\ v_x(k+1) \\ y(k+1) \\ v_y(k+1) \\ z(k+1) \\ v_z(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T(k) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T(k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T(k) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ v_x(k) \\ y(k) \\ v_y(k) \\ z(k) \\ v_z(k) \end{bmatrix} + \\
 &+ \begin{bmatrix} \frac{T^2(k)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{T^2(k)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{T^2(k)}{2} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x(k) \\ a_y(k) \\ a_z(k) \end{bmatrix} = \\
 &= \mathbf{\Phi}(k)\mathbf{s}(k) + \mathbf{a}(k), \\
 &\mathbf{s}(0) = \mathbf{s}_0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $x(k)$, $y(k)$, $z(k)$ и $v_x(k)$, $v_y(k)$, $v_z(k)$ - соответственно координаты и компоненты вектора скорости движения объекта, k - индекс момента времени t_k , в который поступает радиолокационная информация об объекте; $T(k) = t_{k+1} - t_k$ - интервал времени обновления информации, (величина в общем случае переменная); $\mathbf{a}(k)$ - вектор нормальных случайных дискретных процессов типа «белый шум», характеризующий не моделируемые возмущения траектории.

Двухкоординатные РЛС кругового обзора, о которых здесь главным образом идет речь, способны измерять азимут и дальность до объекта; в соответствии с этим модель измерения в случае однопозиционного наблюдения ($x_1 = y_1 = z_1 = 0$) может быть представлена в виде:

$$\mathbf{J}(k) = \begin{bmatrix} J_r(k) \\ J_\varphi(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2(k) + y^2(k) + z^2(k)} \\ \arctan(y(k)/x(k)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_r(k) \\ \xi_\varphi(k) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $J_r(k)$, $J_\varphi(k)$ - измеренные значения дальности и азимута в момент времени t_k ; $\xi_r(k)$, $\xi_\varphi(k)$ - инструментальные погрешности измерений. При многопозиционном наблюдении система уравнений (2) расширяется с учётом связей типа $\mathbf{R} = \mathbf{R}_i + \Delta\mathbf{R}_i$, $i = \overline{1, N}$, где $\mathbf{R} = (x, y, z)^T$ - радиус-вектор наблюдаемого объекта, $\mathbf{R}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ - вектор координат i -й антенны РЛС, $\Delta\mathbf{R}_i$ - вектор положения наблюдаемого объекта относительно i -й РЛС.

В свете указанных модельных представлений ставится обратная траекторная задача, описываемая уравнениями (1) и (2), целью решения которой является оценка вектора $\mathbf{s}(k)$ (задача трёхкоординатного наблюдения траектории объекта). В качестве основного результата предлагается исследование реальной разрешимости этой задачи как в случае одно-, так и многопозиционного наблюдения.

Модель поставленной выше задачи является нелинейной, причём нелинейность локализована в уравнениях измерений. Методологически общим при исследовании и решении таких задач является их линеаризация около некоторого опорного решения, характеризующего априорные представления о движении объекта. Линеаризация рассматриваемой задачи для случая минимальной конфигурации системы наблюдения (однопозиционное наблюдение) приводит ее к виду:

$$\begin{aligned} \delta\mathbf{s}(k+1) &= \mathbf{\Phi}(k)\delta\mathbf{s}(k) + \mathbf{a}(k), \\ \delta\mathbf{J}(k) &= \mathbf{H}(k)\delta\mathbf{s}(k) + \xi(k), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\delta s(k)$ - вектор погрешностей модельных представлений о движении объекта, $\delta J(k)$ - вектор невязок измерений, $\mathbf{H}(k)$ - матрица, формируемая согласно равенствам:

$$\begin{aligned}\delta r &= \frac{x}{r} \delta x + \frac{y}{r} \delta y + \frac{z}{r} \delta z, \\ \delta \varphi &= -\frac{y}{\rho^2} \delta x + \frac{x}{\rho^2} \delta y,\end{aligned}\tag{4}$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Отождествляя принципиальную разрешимость задачи (3) относительно вектора δs с наблюдаемостью пары (Φ, \mathbf{H}) , отметим, что эта пара является наблюдаемой. Более того, наблюдаемой будет и пара (Φ, \mathbf{H}^*) , где матрица \mathbf{H}^* образуется удалением из матрицы \mathbf{H} строки, соответствующей измерению углового параметра. Принципиально разрешимой в таком случае, хотя и с оттенком локальности этого свойства, является и исходная задача (1), (2).

Если обратиться к слагаемому $\frac{z}{r} \delta z$ в (4), то можно отметить, что оно является единственным в линеаризованной модели измерений, отвечающим за информацию о погрешности оценки координаты z . Вместе с тем указанное слагаемое при небольших высотах и значительных расстояниях до цели может стать величиной достаточно малой, чтобы нарушить свойство разрешимости задачи, тем более в условиях конечной точности вычислений и измерений. Определенные перспективы в смысле улучшения обусловленности задачи и статистики ее решения открываются при реализации многопозиционного наблюдения объекта – одновременно несколькими двухкоординатными РЛС. Несмотря на известность такого подхода при его реализации главным образом затрагивается статико-статистический аспект наблюдения. Динамический аспект интерпретируется исключительно с позиций сопровождения целей в проекциях на горизонтальную плоскость [5], хотя именно разрешимость трёхкоординатной задачи при однопозиционном наблюдении двухкоординатной РЛС и ее дальнейшая интерпретация в широком смысле этого понятия является наиболее интересной стороной рассматриваемой задачи и здесь следует отметить работу [7], где отмечаемая сторона разрешимости хотя и не обсуждается подробно, но частично обозначена. Вместе с тем, исходное обращение авторов работы [7] к задаче оценивания движения самолетов в ближней зоне навигационного пространства (велико отношение z/r), где традиционно (и целесообразно с позиций обеспечения максимальной безопасности воздушного движения) двухкоординатные РЛС горизонтального обзора применяются в комплексе с

радиолокационными высотомерами (измеряющими дальность и угол места воздушного объекта) заметно ограничило круг проблем, представляющих исследовательский интерес и естественным образом обнаруживаемых при рассмотрении задачи именно идентификации (селекции) воздушных целей, которой главным образом посвящена настоящая работа.

При решении задачи (3) будем рассматривать метод, основанный на алгоритме осреднения по методу наименьших квадратов (МНК) [12, 13] в скользящем временном окне фиксированной длины и в окне с подвижным правым концом (т.е. с накоплением числа измерений). Для оценивания вектора δs методом наименьших квадратов исходная задача декларируется в виде:

$$\delta \tilde{\mathbf{J}} = \tilde{\mathbf{H}} \delta s(j) + \mathbf{q}, \quad (5)$$

где вектор $\delta \tilde{\mathbf{J}}$ составлен из N векторов $\delta \mathbf{J}(k)$, j – индекс момента времени t_j , для которого производится оценка. Матрица коэффициентов $\tilde{\mathbf{H}}$ формируется с учётом того, что

$$\begin{aligned} \delta J_r(k) &= \frac{x(k)}{r(k)} \delta x(j) + \frac{x(k)}{r(k)} (t_k - t_j) \delta v_x(j) + \\ &+ \frac{y(k)}{r(k)} \delta y(j) + \frac{y(k)}{r(k)} (t_k - t_j) \delta v_y(j) + \\ &+ \frac{z(k)}{r(k)} \delta z(j) + \frac{z(k)}{r(k)} (t_k - t_j) \delta v_z(j) + \\ &+ \frac{1}{2} \frac{x(k)}{r(k)} (t_k - t_j)^2 a_x(j) + \frac{1}{2} \frac{y(k)}{r(k)} (t_k - t_j)^2 a_y(j) + \\ &+ \frac{1}{2} \frac{z(k)}{r(k)} (t_k - t_j)^2 a_z(j) + \xi_r(j), \\ \delta J_\varphi(k) &= -\frac{y(k)}{\rho^2(k)} \delta x(j) - \frac{y(k)}{\rho^2(k)} (t_k - t_j) \delta v_x(j) + \\ &+ \frac{x(k)}{\rho^2(k)} \delta y(j) + \frac{x(k)}{\rho^2(k)} (t_k - t_j) \delta v_y(j) + \\ &- \frac{1}{2} \frac{y(k)}{\rho^2(k)} (t_k - t_j)^2 a_x(j) + \frac{1}{2} \frac{x(k)}{\rho^2(k)} (t_k - t_j)^2 a_y(j) + \xi_r(j), \end{aligned}$$

При решении задачи (5) наиболее просто интерпретировать ее процедурной моделью задачи метода наименьших квадратов вида:

$$\tilde{\mathbf{H}}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{H} \delta s(j) = \tilde{\mathbf{H}}^T \mathbf{Q}^{-1} \delta \tilde{\mathbf{J}},$$

где $\mathbf{Q} = M[\mathbf{q}\mathbf{q}^T]$, $M[*]$ – оператор математического ожидания.

РЕЗУЛЬТАТЫ.

Ниже приведены результаты численного исследования рассматриваемой задачи наблюдения. Его главной целью явилась оценка работоспособности алгоритмов оценивания и областей достоверной классификации движущихся объектов как воздушных с учетом качества оценивания их высот (координаты z).

Исследование проводилось на имитационной модели, структура которой включает в себя блок формирования траекторий целей, программный имитатор радиолокационных изображений целей и морского волнения, блок стробирования и обработки радиолокационных изображений в стробе и блок задачи оценивания координат и скоростей движения наблюдаемого объекта, решение которой и является предметом настоящего обсуждения. Приведенные ниже отдельные численные результаты, несмотря на их частный характер, достаточно точно и полно представляют исследуемый феномен задачи идентификации воздушных объектов, что подтвердилось при обзоре всего объема проведенных численных экспериментов.

Укажем некоторые исходные данные, для которых проводилось моделирование. Предполагается, если нет дополнительных оговорок, следующее: объекты движутся постоянными курсами с горизонтальной скоростью, равной 20 м/с, что соответствует скорости катера или судна на подводных крыльях и скорости патрульных и лоцманских вертолетов; оси вращения антенн ортогональны плоскости $xу$, и все антенны вращаются с одной угловой скоростью 20 об/мин; при однопозиционном наблюдении ($N = 1$) начало координатной системы $xуz$ совмещено с антенной РЛС; при многопозиционном наблюдении ($N > 1$) все антенны лежат в плоскости $xу$, причем при $N = 2$ начало системы $xуz$ помещено в центр отрезка длины b (базы наблюдения), соединяющего антенны, а при $N = 3$ равноудалено от всех РЛС с учетом дополнительного предположения о том, что РЛС расположены в вершинах равностороннего треугольника с длиной стороны b ; погрешности измерений азимута и дальности до наблюдаемого объекта распределены равномерно соответственно в интервалах $[-0.03^\circ, 0.03^\circ]$ и $[-6.25, 6.25]$ м.

Рисунки 3 и 4 иллюстрируют работу метода наименьших квадратов во временных окнах длительностью, соответственно, 300с (100 измерений при $N = 1$) и $T=150$ с (по 50 измерений при $N = 2$).

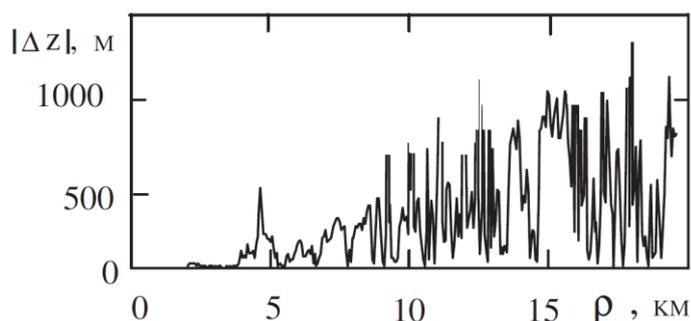


Рисунок 1 – Погрешность оценки высоты наблюдаемого объекта методом наименьших квадратов (скользящее окно) при однопозиционном наблюдении

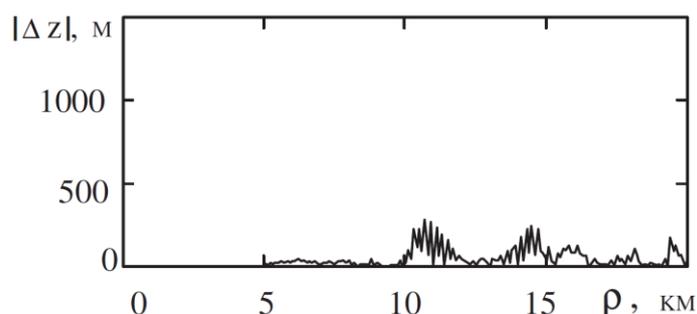


Рисунок 2 – Погрешность оценки высоты наблюдаемого объекта методом наименьших квадратов (скользящее окно) при двухпозиционном наблюдении

В обоих случаях (Рисунки 1 и 2) предполагается, что объект движется в направлении начала координат, причем при $N = 1$ на высоте $z = 500$ м, а при $N = 2$ сначала, до дальности 17 км, на высоте $z = 1100$ м, затем совершает маневр по высоте с вертикальной скоростью $v_z = -3$ м/с до значения $z = 500$ м и далее продолжает движение на этой высоте.

Рисунок 3 иллюстрирует метод наименьших квадратов в расширяющемся окне (с накоплением измерений при $N = 2$), причем в данном случае цель синусоидально меняет свою высоту (около значения $z=500$ м) с амплитудой 100 м и периодом 133,3 с.

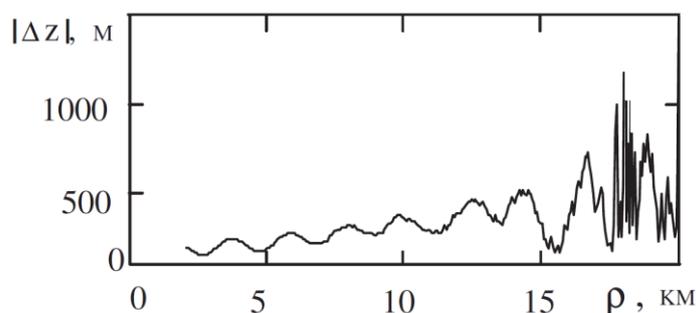


Рисунок 3 – Погрешность оценки высоты наблюдаемого объекта методом наименьших квадратов (расширяющееся окно) при двухпозиционном наблюдении

Обоснование целесообразности использования метода наименьших квадратов в расширяющемся окне было дано выше. Вообще, оценивая Рисунки 1, 2 и 3 отметим обнадеживающие перспективы применения МНК в рассматриваемой задаче. Далее ограничимся анализом применения МНК только в скользящем окне, учитывая, что в случае расширяющегося окна при сохранении равенства всех прочих условий статистика решения будет только улучшаться.

Следующая группа Рисунков - 4, 5, 6 и 7 отражает результаты исследований работы метода наименьших квадратов в скользящем окне со 100 измерениями при однопозиционном наблюдении (графики выполнены штрихпунктирными линиями), с 50 измерениями при $N = 2$ (сплошные линии графиков) и с 33 измерениями при $N = 3$ (штриховые линии графиков). Учитывая, что результат численного эксперимента зависит от направления движения объекта, для каждого типа наблюдения (одно-, двух- и трёхпозиционного) представлены по два (если они не сливаются в один, как при $N = 3$) графика, один из которых соответствует наилучшим условиям наблюдения, другой – наихудшим.

На Рисунке 4 показаны зависимости логарифма спектрального числа обусловленности μ нормированной по столбцам матрицы \tilde{H} от отношения z/ρ (при $\rho = 20$ км и $b = 5$ км).

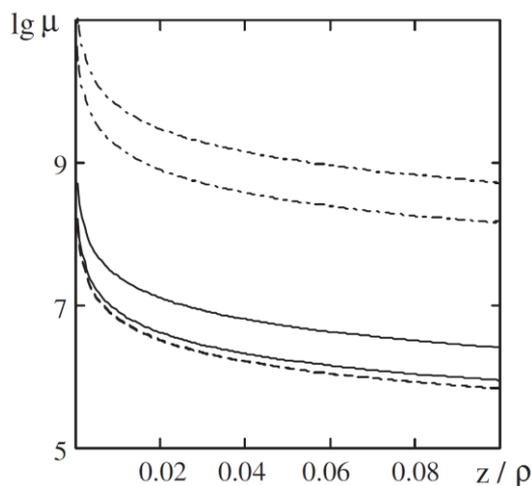


Рисунок 4 – Десятичные логарифмы чисел обусловленности задачи (5)

Следует отметить, что нормирование матрицы \tilde{H} оказалось обязательным условие устойчивого решения задачи, так как в противном случае достигалось значение $\lg \mu > 20$, и имела место вычислительная неустойчивость решения. Как следует из Рисунка 4, переход от однопозиционного наблюдения к многопозиционному способствует значительному повышению уровня численной устойчивости решения задачи, хотя оптимизм в этой части достаточно наглядно ограничивается числом $N = 3$.

Графики Рисунка 5 построены путем вычисления интеграла Лапласа по значениям отношения z/σ_z (где σ_z – среднее квадратичное отклонение погрешности оценивания координаты z) и ординаты графиков соответствуют, таким образом, значениям вероятности P принадлежности объекта к классу «воздушный».

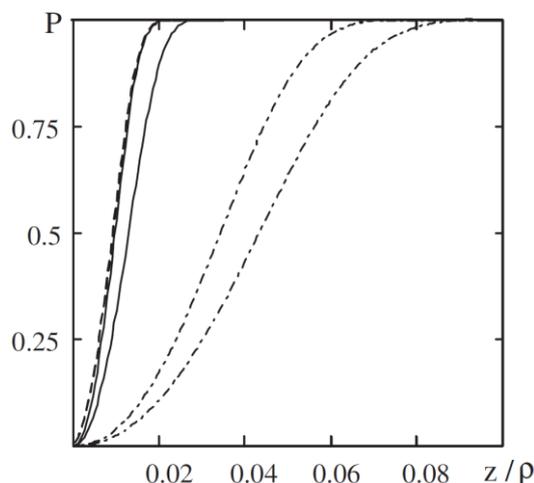


Рисунок 5 – Вероятности принадлежности объекта к классу воздушных

Как видно из графиков, со значением $P \approx 1$ идентификация цели как воздушной на дальности $\rho = 20$ км (и $b = 5$ км) имеет место при $z > 1600$ м в случае $N = 1$ и при $z > 500$ м в случаях $N = 2$ и $N = 3$.

Несколько более подробную картину исследуемого явления при $N = 2$ дают Рисунки 6 (наилучшие условия наблюдения) и 7 (наихудшие условия наблюдения).

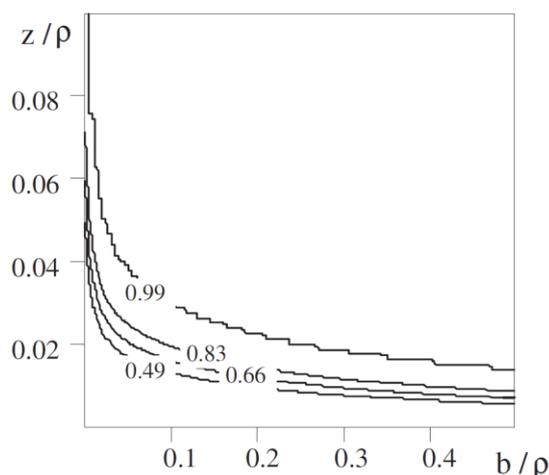


Рисунок 6 – Значения вероятностей принадлежности объекта к классу воздушных при двухпозиционном наблюдении в зависимости от величины базы и удаленности объекта – наилучшие условия наблюдения

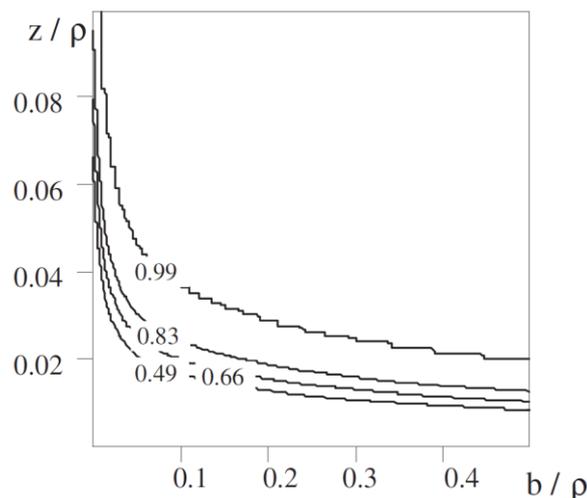


Рисунок 7 – Значения вероятностей принадлежности объекта к классу воздушных при двухпозиционном наблюдении в зависимости от величины базы и удаленности объекта – наихудшие условия наблюдения

На них представлены изолинии значений вероятности P в осях b/ρ и z/ρ . Рассмотрим два «крайних» (для рамок рисунков) примера использования графиков для оценки предельных значений высот цели, классифицируемой с $P > 0.99$. Первый: пусть $\rho = 20$ км и $b/\rho = 0.01$, тогда $b = 0.2$ км и для вероятности $P > 0.99$ имеет место $z/\rho = 0.062 - 0.082$, т.е. высота $z = 1240 - 1640$ м. Второй: пусть $\rho = 20$ км и $b/\rho = 0.5$, тогда $b = 10$ км и для вероятности $P > 0.99$ отношение z/ρ равно от 0.015 до 0.02, т.е. высота $z = 300 - 400$ м.

ОБСУЖДЕНИЕ.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что рассматриваемая задача трёхкоординатного наблюдения движущихся объектов двухкоординатными измерителями разрешима и её свойства приемлемы для практических приложений. Вообще, рассматриваемая задача потенциально имеет весьма широкий спектр применимости. Она актуальна в свете проблем организации функционирования радиолокационных систем различного назначения и здесь (не теряя общности) следует особо отметить системы управления движением судов.

Так, в статье [12] обосновывается возможность создания на базе двухкоординатных радаров информационно-измерительной системы, обеспечивающей достоверную селекцию воздушных объектов. Предлагается метод такой селекции, основанный на сравнении оценок высоты наблюдаемого объекта с оценками высоты фиктивного надводного объекта, позволяющий оценить вероятность отнесения первого к классу воздушных. Приводятся результаты моделирования задачи, из которых следует что, например, объект, движущийся на высоте 200 м, уверенно выделяется системой из двух радаров как воздушный до дальности, приблизительно, 7 км, а движущийся на высоте 400 м – до дальности 11

км. Это полностью соотносится с данными оценок разрешимости задачи на Рисунки 5-7.

В работе [14] также рассматривается проблема идентификации воздушных объектов измерительными системами, образуемыми на основе двухкоординатных РЛС кругового обзора. Также, как и в настоящей работе, в основу предлагаемого подхода к решению задачи положена оценка высоты наблюдаемого объекта по измерениям дальности и азимута. В дальнейшем полученные оценки обрабатываются нейро-нечеткой системой, определяющей степень принадлежности объекта к классу воздушных. В работе описана конфигурация нейро-нечеткой сети, даются рекомендации по её обучению. С помощью компьютерного моделирования показана конструктивность предлагаемого подхода для типичных ситуаций. Результаты работы [14] также согласуются с данными настоящей работы.

Вообще, главный вывод представленного в настоящей работе исследования состоит в том, что идентификация воздушных целей с вероятностью, близкой к единице, возможна в тех областях навигационного пространства, где, с учетом конфигурации системы наблюдения и погрешностей измерений, достаточно отношение z / ρ . Эту величину можно считать инвариантным индикатором степени разрешимости рассматриваемой задачи идентификации воздушных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В заключение перечислим основные результаты представленной работы. Она посвящена исследованию проблемы наблюдения воздушных объектов двухкоординатными измерителями – радиолокационными станциями кругового обзора, измеряющими азимут и дальность. Модельная интерпретация задачи приводит её к уравнениям типа «состояние-измерение». Базовым методом решения задачи предлагается метод наименьших квадратов.

Исследование разрешимости задачи показало наличие ограничений на конфигурацию системы радаров и возможные траектории движения объекта. Тем не менее, результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что свойства решения задачи вполне приемлемы для некоторых практических приложений. Так, например, отмечается проблема генерации ложных тревог при управлении коллективным движением судов, связанная с присутствием над акваторией воздушных объектов (вертолетов). Для корректной обработки СУДС таких объектов необходимо их идентифицировать.

Предлагаемый алгоритм позволяет принять решение о степени принадлежности объекта к классу воздушных. В целом на основании анализа представленных данных можно сделать вывод о конструктивной

разрешимости рассматриваемой задачи распознавания воздушных объектов. В работе продемонстрированы границы разрешимости задачи для типичных навигационных ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Huges T. When is a VTS is not a VTS // The J. of Navigation, 2009, V62, №3, P. 439-442.
2. Нассер Н.Х. Характеристики моделирования транспортных потоков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2016, №4(15), С. 16.
3. Tam Ch.K., Bucknall R., Greig A. Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships in Close Range Encounters // The J. of Navigation, 2009, V.62, №3, P. 455-476.
4. Сметанин С.И., Игнатюк В.А., Евстифеев А.А. Способ реализации программной веб-части системы спутникового мониторинга // Информационные технологии, 2015, Т.21, №6, С. 448–455.
5. Berle F.J. Multi Radar Tracking and Multi Sensor Tracking in Air Defence Systems // International Radar Symposium, Bangalore, India, October 9-12, 1983, Proceedings (A85-24826 10-32). Bangalore, India, Institution of Electronics and Telecommunication Engineers, 1983, p. 316-321.
6. Hudel P. Dreidimensional arbeitendes Radarsystem: Patent DE 4123898 A1 (Патент DE 4123898 A1, 18.07.91 г. Трёхкоординатная радиолокационная система, ИСМ 85-08-94 г., стр. 8).
7. Naba N., Bishop R. H. Estimate Fusion for 2D Search Sensors // AIAA Guidance, Navigation, and Control Proceedings, AIAA-95-3246-CP, 1995, V.1, P. 677-684.
8. Кузьмин С. 3. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. - М.: Сов. радио, 1974. - 431 с.
9. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. М.: Радио и связь, 1993. 320с.
10. Гриняк В.М. Исследование пространственной задачи навигации в условиях неполной измерительной информации // Дальневосточный математический журнал, 2000, т.1, №1, С. 93-101.
11. Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Гриняк В.М. Способ распознавания удалённых воздушных объектов: Патент №2206104 // Б.И. – 2003. №16.
12. Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Гриняк В.М. Идентификация воздушных объектов двухкоординатными измерителями // Измерительная техника, 2004, №11, С. 19-21.
13. Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Гриняк В.М. Нейроподобные алгоритмы высотной классификации воздушных объектов // Информационные технологии, 2001, №12, С. 45-51.

14. Гриняк В.М., Девятисильный А.С. Нечеткая система распознавания воздушных объектов // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2013, №7, С. 9-14.

V.M. Grinyak, E.G. Lavrushina, T.M. Grynyak
**PROBABILITY IDENTIFICATION OF AIR TARGETS S BY TWO-
COORDINATE RADAR**

*Vladivostok State University of Economics and Service
Vladivostok, Russia,
JSC TeraRecon inc.,
Tokyo, Japan*

The paper is devoted to the problem of recognizing low-altitude low-speed air targets (helicopters) moving in the area of responsibility of onshore ship traffic control systems. The main information base of such systems is the two-coordinate radar of the circular survey. Separation from the array of observable objects of air targets requires the use of special procedures for processing information. In the paper, a mathematical model of the problem of observing air objects is formulated, based on equations of the "state-measurement" type and finite-dimensional representations of the least squares method. In view of the initial nonlinearity of the problem, it is proposed to linearize it about some support solution that characterizes the a priori ideas about the trajectory of the observed object. The main attention is paid to the problem of the boundaries of the solvability of the problem under conditions of instrumental measurement errors. The results of numerical simulation for typical situations are presented. It is shown that the proposed algorithm makes it possible to decide on the degree of belonging of the object to the air class, while the problem is solvable in ranges of height / range ratio that are acceptable for a wide range of practical fields.

Keywords: traffic control, air target, altitude, observation, radar, probability.

REFERENCES

1. Huges T. When is a VTS is not a VTS // The J. of Navigation, 2009, Vol.62, No.3, pp. 439-442.
2. Nasser N.H. The features of modeling of traffic flows // Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionniye tehnologii. 2016. Is. 4(15). p. 16.
3. Tam Ch.K., Bucknall R., Greig A. Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships in Close Range Encounters // The J. of Navigation, 2009, V.62, Vol.3, P. 455-476.
4. S.I. Smetanin, V.A. Ignatuk, A.A. Evstifeev Implementation of the Software Part of the System of Satellite Monitoring // Information technologies, 2015, Vol.21, Is.6, pp. 448–455.
5. Berle F.J. Multi Radar Tracking and Multi Sensor Tracking in Air Defence Systems // International Radar Symposium, Bangalore, India, October 9-12, 1983, Proceedings (A85-24826 10-32). Bangalore, India, Institution of Electronics and Telecommunication Engineers, 1983, p. 316-321.

6. Hudel P. Dreidimensional arbeitendes Radarsystem: Patent DE 4123898 A1 (Patent DE 4123898 A1, 18.07.91 g. Trekhkoordinatnaya radiolokatsionnaya sistema, ISM 85-08-94 g., p. 8).
7. Nabaa N., Bishop R. H. Estimate Fusion for 2D Search Sensors // AIAA Guidance, Navigation, and Control Proceedings, AIAA-95-3246-CP, 1995, Vol.1, pp. 677-684.
8. Kuzmin S. C. Osnivy teorii tsifrovoy obrabotki radiolokatsionnoy informatsii. - M.: Sov. radio, 1974. - 431 p.
9. Farina A., Studer F. Tsifrovaya obrabotka radiolokatsionnoy informatsii. Soprovozhdeniye tseley. M.: Radio i svyas, 1993. 320p.
10. Grinyak V.M. Spatial navigation problem under incomplete measuring information conditions // Dalnevostochniy matematicheskiy zhurnal, 2000, Vol.1, Is.1, pp. 93-101.
11. Devyatisilnyi A.S., Dorozhko V.M., Grinyak V.M. Sposob raspoznavaniya udalennikh vozdushnikh objektov: Patent RU 2206104, 2003.
12. Devyatisilnyi A.S., Dorozhko V.M., Grinyak V.M. Identifying airborne objects with two-coordinate meters // Measurement Techniques. 2004. No.11. Vol. 47. Pp.1061-1064
13. Devyatisilnyi A.S., Dorozhko V.M., Grinyak V.M. Neiropodobnye algoritmy vysotnoy klassifikatsii vozdushnikh objektov // Information technologies, 2001, Is. 12, pp. 45-51.
14. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S. Fuzzy Logic System for Air Target Identification // Vestnik komputernykh i informatsionnykh tekhnologiy, 2013, Is.7, pp. 9-14.