УДК 519.68:15:681.5

В.М. Гриняк[1]

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
Владивосток. Россия

Ю.С. Иваненко[2]

Дальневосточный федеральный университет
Владивосток. Россия

О разрешимости задачи наблюдения воздушных объектов двухкоординатными измерителями*

Работа посвящена проблеме построения систем наблюдения на основе двухкоординатных радиолокационных станций кругового обзора. В статье обсуждается постановка задачи наблюдения воздушных объектов, движущихся над морской акваторией. Показано, что принципиально возможно трёхкоординатное наблюдение воздушных объектов уже на базе одной РЛС. Вместе с тем, в силу неполноты информационной базы существуют ненаблюдаемые классы траекторий объектов. Это, прежде всего, области малых высот. Для преодоления этого ограничения рекомендуется переход от модели задачи в декартовых координатах к представлению задачи в сферической (географической) системе координат.

Ключевые слова и словосочетания: управление движением, воздушный объект, радар, измерение, высота объекта.

V.M. Grinyak

Vladivostok State University of Economics and Service
Vladivostok. Russia

Yu.S. Ivanenko

Far Eastern Federal University
Vladivostok. Russia

On observability of airborne target by two-coordinate radar

Current paper is about problem observation system based on two dimensional radar. The paper discusses the formulation of the problem of air surveillance of objects moving over the marine area. It is shown that is possible in principle three dimensional observation aircraft objects already on the basis of a single radar. However, due to incomplete information base paths exist unobserved object classes. This, above all, the area of low altitude. To overcome this limitation, we recommend a transition from a model problem in Cartesian coordinates to the representation problem in the spherical (geographic) coordinate system.

Keywords: traffic control, air target, radar, measurement, target height.

---

[1] Гриняк Виктор Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий и систем, e-mail: Viktor.Grinyak@vvsu.ru.

[2] Иваненко Юрий Сергеевич – студент, e-mail: yurown92@yahoo.com.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект 15-08-00234.

Введение

При решении задач обеспечения навигационной безопасности движения в судопотоках высокой интенсивности и неоднородности возникает необходимость обладания максимально полной информацией о свойствах движения каждого объекта [1, 2]. Существующие системы диспетчеризации движения судов ориентированы на традиционную работу в двухмерном 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.

Указанная проблема частично решается применением Автоматической идентификационной системы (АИС) на воздушном объекте: информация АИС позволяет, в том числе, однозначно идентифицировать тип цели [3, 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 двухкоординатных измерителей.

Проблема трехкоординатного наблюдения воздушных объектов двухкоординатными измерителями неоднократно привлекала внимание исследователей. 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 рассмотренной методики состоит в использовании линейного динамического алгоритма оптимального оценивания, обрабатывающего измерения дальности и азимута объекта последовательно, по мере их поступления и основанного на дискретном фильтре Калмана. Если в системе имеется несколько радаров, то после отдельной обработки измерений каждой РЛС производится дополнительная совместная обработка полученных оценок высоты объекта.

В работах [8–11] была показана характерная особенность задачи – нерегулярность оценок высоты наблюдаемого объекта, затрудняющая принятие решения об отнесении объекта к классу «надводный/воздушный». Были предложены различные варианты доопределения исходной модели задачи как задачи селекции воздушных объектов.

В контексте проблемы обеспечения навигационной безопасности движения представляет интерес аналитическое исследование модельных представлений задачи наблюдения воздушных объектов с помощью одного или нескольких двухкоординатных радаров на предмет принципиальной разрешимости (наблюдаемости). Настоящая статья посвящена теоретическому обоснованию корректности постановки задачи на различных классах траекторий движения объектов.

Основные модельные представления задачи

Рассмотрим одно- или многопозиционную систему наблюдения, состоящую из радиолокационных станций, обеспечивающих измерение дальности «объект-станция» и пеленга на объект. Введём правую декартову систему координат с осью z, направленной в зенит, осью y, направленной на Север, и осью x, направленной на Восток. Пусть модель движения объекта в выбранной системе координат, отождествляемая далее с моделью движения точки в пространстве, имеет вид:

$$\begin{aligned} x(t) &= x(t_0) + \sum_{i=1}^{N_x} a_i^{(x)} (t-t_0)^i, \\ y(t) &= y(t_0) + \sum_{i=1}^{N_y} a_i^{(y)} (t-t_0)^i, \\ z(t) &= z(t_0) + \sum_{i=1}^{N_z} a_i^{(z)} (t-t_0)^i, \end{aligned} \tag{1}$$

Где N_x, N_y, N_z – порядок полинома, применяемого при описании эволюции координат, $a_i^{(x)}$, $a_i^{(y)}$, $a_i^{(z)}$ – полиномиальные коэффициенты, отождествляемые со скоростями объекта и приведёнными значениями старших производных.

Информационная ситуация, обеспечиваемая системой из J РЛС, описывается следующей моделью измерений:

$$\begin{gathered} z_r^{(j)}(t_k) = \sqrt{(x(t_k)-x^{(j)})^2 + (y(t_k)-y^{(j)})^2 + (z(t_k)-z^{(j)})^2} + \xi_r^{(j)}(t_k), \\ z_\psi^{(j)}(t_k) = arctg[(x(t_k)-x^{(j)})/(y(t_k)-y^{(j)})] + \xi_\psi^{(j)}(t_k), \\ j = \overline{1,J}, \end{gathered} \tag{2}$$

Здесь $z_r^{(j)}(t_k)$, $z_\psi^{(j)}(t_k)$ – показания дальности и азимута до объекта на j-й станции в момент времени t_k; $x(t_k)$, $y(t_k)$, $z(t_k)$ – отнесённые к этому времени координаты объекта; $x^{(j)}$, $y^{(j)}$, $z^{(j)}$ – координаты j-й станции; $\xi_r^{(j)}(t_k)$, $\xi_\psi^{(j)}(t_k)$ – случайные инструментальные погрешности измерений, причем $M[\xi_r^{(j)}(t_k)] = 0$, $M[\xi_r^{(j)}(t_k)\xi_r^{(i)}(t_k)] = D_r^{(j)}\delta_{ij}$, $M[\xi_\psi^{(j)}(t_k)] = 0$, $M[\xi_\psi^{(j)}(t_k)\xi_\psi^{(i)}(t_k)] = D_r^{(j)}\delta_{ij}$, $M[\xi_r^{(j)}(t_k)\xi_\psi^{(j)}(t_k)] = 0$, δ_{ij} – символ Кронекера.

В свете модельных представлений (2) и (3) может быть поставлена обратная задача, целью решения которой является определение вектора

$$s(t_k) = (x(t_k), a_1^{(x)}, a_2^{(x)}, ..., y(t_k), a_1^{(y)}, a_2^{(y)}, ..., z(t_k), a_1^{(z)}, a_2^{(z)}, ...)$$

по измерениям параметров $z_r^{(j)}(t_k)$, $z_\psi^{(j)}(t_k)$.

Допуская наличие опорного решения, характеризующего априорные представления о траектории объекта, будем говорить о сведении исходной задачи к задаче «в малом» с искомым вектором

$$\delta s(t_k) = (\delta x(t_k), \delta a_1^{(x)}, \delta a_2^{(x)}, ..., \delta y(t_k), \delta a_1^{(y)}, \delta a_2^{(y)}, ..., \delta z(t_k), \delta a_1^{(z)}, \delta a_2^{(z)}, ...),$$

характеризующим погрешности априорных представлений. Линеаризация приводит исходную задачу к следующему виду:

$$\begin{gathered} \delta s(t_{k+1}) = \Phi(t_k)\delta s(t_k) + q(t_k), \\ \delta z^{(j)}(t_k) = H(t_k)\delta s(t_k) + \xi^{(j)}(t_k), \\ j = \overline{1, J}, \end{gathered} \tag{3}$$

где $q(t_k)$ – вектор немоделируемых параметров движения, $\xi^{(j)}(t_k)$ – вектор инструментальных погрешностей измерений, $\delta z^{(j)}(t_k)$ – вектор невязок измерений, $\Phi(t_k)$, $H(t_k)$ – матричные коэффициенты (матрицы частных производных), формируемые согласно равенствам:

$$\begin{gathered} \delta x(t) = \delta x(t_0) + \sum_{i=1}^{N_x} \delta a_i^{(x)} (t - t_0)^i, \\ \delta y(t) = \delta y(t_0) + \sum_{i=1}^{N_y} \delta a_i^{(y)} (t - t_0)^i, \\ \delta z(t) = \delta z(t_0) + \sum_{i=1}^{N_z} \delta a_i^{(z)} (t - t_0)^i \end{gathered} \tag{4}$$

и

$$\begin{gathered} \delta z_r^{(j)}(t_k) = \frac{x(t_k) - x^{(j)}}{r^{(j)}(t_k)}\delta x(t_k) + \frac{y(t_k) - y^{(j)}}{r^{(j)}(t_k)}\delta y(t_k) + \frac{z(t_k) - z^{(j)}}{r^{(j)}(t_k)}\delta z(t_k), \\ \delta z_\psi^{(j)}(t_k) = \frac{y(t_k) - y^{(j)}}{(x(t_k) - x^{(j)})^2 + (y(t_k) - y^{(j)})^2}\delta x(t_k) - \frac{x(t_k) - x^{(j)}}{(x(t_k) - x^{(j)})^2 + (y(t_k) - y^{(j)})^2}\delta y(t_k), \\ r^{(j)}(t_k) = \sqrt{(x(t_k) - x^{(j)})^2 + (y(t_k) - y^{(j)})^2 + (z(t_k) - z^{(j)})^2}, \\ j = \overline{1, J}. \end{gathered} \tag{5}$$

Для исследования принципиальной разрешимости (наблюдаемости) задачи (3) сведём её к конечномерному виду и проанализируем матрицу соответствующей системы алгебраических линейных уравнений на предмет вырожденности. Рассмотрим некоторый временной интервал наблюдения $[t_1, t_m]$, за который произведены измерения. Запишем систему уравнений (5) с учётом решения уравнений эволюции погрешностей (4) при начальных условиях $s(t_*)$, особо отмечая при этом, что момент времени t_* может как принадлежать интервалу наблюдения, так и находиться вне его. Таким образом, будем иметь следующую систему уравнений измерений:

$$
\begin{gathered}
\delta z_r^{(j)}(t_k) = \frac{x(t_k) - x^{(j)}}{r^{(j)}(t_k)}\left(\delta x(t_*) + \sum_{i=1}^{N_x} \delta a_i^{(x)}(t_k - t_*)^i\right) + \\
+ \frac{y(t_k) - y^{(j)}}{r^{(j)}(t_k)}\left(\delta y(t_*) + \sum_{i=1}^{N_y} \delta a_i^{(y)}(t_k - t_*)^i\right) + \frac{z(t_k) - z^{(j)}}{r^{(j)}(t_k)}\left(\delta z(t_*) + \sum_{i=1}^{N_z} \delta a_i^{(z)}(t_k - t_*)^i\right) + \xi_r^{(j)}(t_k), \\
\delta z_\psi^{(j)}(t_k) = \frac{y(t_k) - y^{(j)}}{(x(t_k) - x^{(j)})^2 + (y(t_k) - y^{(j)})^2}\left(\delta x(t_*) + \sum_{i=1}^{N_x} \delta a_i^{(x)}(t_k - t_*)^i\right) - \\
- \frac{x(t_k) - x^{(j)}}{(x(t_k) - x^{(j)})^2 + (y(t_k) - y^{(j)})^2}\left(\delta y(t_*) + \sum_{i=1}^{N_y} \delta a_i^{(y)}(t_k - t_*)^i\right) + \xi_\psi^{(j)}(t_k), \\
r^{(j)}(t_k) = \sqrt{(x(t_k) - x^{(j)})^2 + (y(t_k) - y^{(j)})^2 + (z(t_k) - z^{(j)})^2}, \\
j = \overline{1, J}, \\
k = \overline{1.m}.
\end{gathered}
\tag{6}
$$

Последняя система может быть записана компактно в виде

$$Z = \tilde{H}\delta s(t_*) + \tilde{\xi} .$$

В общем случае, в силу линейной независимости системы функций, образующих матрицу системы (6), можно говорить о полноте ранга этой матрицы, а значит, и о возможности наблюдения полного вектора $\delta s(t_*)$. Вместе с тем, следует особо отметить и существование запрещённых (ненаблюдаемых) решений задачи (1), (2), следовательно, и опорных решений задачи (4), (5), приводящих соответствующую матрицу к вырождению. Проводя её аналитическое исследование, можно выделить несколько классов таких ненаблюдаемых решений.

Ненаблюдаемые опорные траектории задачи

Утверждение 1. Если количество станций $J = 1$, а опорное решение в задаче (4), (5) такое, что $z(t_k) - z^{(1)} = 0$ (то есть траектория движения объекта полностью лежит в плоскости вращения антенны РЛС), то соответствующая системе (6) матрица $\tilde{H}$ – вырождена.

Доказательство. Рассмотрим систему уравнений (6). В условиях однопозиционного наблюдения при $z(t_k) - z^{(1)} = 0$ коэффициенты при величинах $\delta z(t_*)$ и $\delta a_i^{(z)}$ всегда будут равны нулю, что с учетом вида второго уравнения системы (6) означает наличие нулевых столбцов в матрице $\tilde{H}$. Такая матрица, очевидно, вырождена.

Утверждение 2. Если количество станций $J = 1$, а опорное решение в задаче (4), (5) такое, что $a_i^{(x)} = 0,\ a_i^{(y)} = 0,\ a_i^{(z)} = 0$ (объект покоится), то соответствующая системе (6) матрица $\tilde{H}$ – вырождена.

Доказательство. Рассмотрим систему уравнений (6). При $a_i^{(x)} = 0,\ a_i^{(y)} = 0,$ $a_i^{(z)} = 0$ имеют место равенства: $x(t_k) = x(t_{k+1}),\ y(t_k) = y(t_{k+1}),\ z(t_k) = z(t_{k+1}),$

что в условиях однопозиционного наблюдения означает линейную зависимость строк соответствующей матрицы $\widetilde{H}$, то есть матрица $\widetilde{H}$ – вырождена.

Утверждение 3. Если количество станций $J = 1$, а опорное решение в задаче (4), (5) такое, что $a_1^{(x)} = const$, $a_1^{(y)} = const$, $a_1^{(z)} = const$, $N_z > 0$ (объект движется по прямой и вертикальная скорость входит в число оцениваемых параметров), то соответствующая системе (6) матрица $\widetilde{H}$ – вырождена.

Доказательство. Рассмотрим систему уравнений (6). Не теряя общности, рассмотрим задачу (4), (5) при $N_x = 1$, $N_y = 1$, $N_z = 1$. При таком составе искомых переменных в случае однопозиционного наблюдения система уравнений (6) имеет вид:

$$\delta z_r^{(1)}(t_k) = \frac{x(t_k) - x^{(1)}}{r^{(1)}(t_k)} \delta x(t_*) + \frac{x(t_k) - x^{(1)}}{r^{(1)}(t_k)} (t_k - t_*) \delta a_1^{(x)} +$$

$$+ \frac{y(t_k) - y^{(1)}}{r^{(1)}(t_k)} \delta y(t_*) + \frac{y(t_k) - y^{(1)}}{r^{(1)}(t_k)} (t_k - t_*) \delta a_1^{(y)} + \frac{z(t_k) - z^{(1)}}{r^{(1)}(t_k)} \delta z(t_*) + \frac{z(t_k) - z^{(1)}}{r^{(1)}(t_k)} (t_k - t_*) \delta a_1^{(z)} + \xi_r^{(1)}(t_k),$$

$$\delta z_\psi^{(1)}(t_k) = \frac{y(t_k) - y^{(1)}}{(x(t_k) - x^{(1)})^2 + (y(t_k) - y^{(1)})^2} \delta x(t_*) + \frac{y(t_k) - y^{(1)}}{(x(t_k) - x^{(1)})^2 + (y(t_k) - y^{(1)})^2} (t_k - t_*) \delta a_1^{(x)} -$$

$$- \frac{x(t_k) - x^{(1)}}{(x(t_k) - x^{(1)})^2 + (y(t_k) - y^{(1)})^2} \delta y(t_*) - \frac{x(t_k) - x^{(1)}}{(x(t_k) - x^{(1)})^2 + (y(t_k) - y^{(1)})^2} (t_k - t_*) \delta a_1^{(y)} + \xi_\psi^{(1)}(t_k),$$

$$r^{(1)}(t_k) = \sqrt{(x(t_k) - x^{(1)})^2 + (y(t_k) - y^{(1)})^2 + (z(t_k) - z^{(1)})^2},$$

$$k = \overline{1.m}.$$

С учётом изучаемых свойств движения имеют место дополнительные условия: $x(t_k) = V_x(t_k - t_*) + x(t_*)$, $y(t_k) = V_y(t_k - t_*) + y(t_*)$, $z(t_k) = V_z(t_k - t_*) + z(t_*)$ при константных значениях скоростей V_x, V_y, V_z.

Для того чтобы показать вырожденность соответствующей матрицы $\widetilde{H}$, докажем линейную зависимость её столбцов в указанных условиях (их количество – 6 в данном случае).

Если столбцы матрицы $\widetilde{H}$ – линейно зависимые, то существуют такие 6 чисел *A, B, C, D, E, F* не равные одновременно нулю, что имеют место равенства (не теряя общности, для простоты будем считать, что $x^{(1)} = 0$, $y^{(1)} = 0$, $z^{(1)} = 0$, $t_* = 0$):

$$AV_x t_k + BV_x t_k^2 + CV_y t_k + DV_y t_k^2 + EV_z t_k + FV_z t_k^2 = 0, \qquad (7)$$

$$AV_y t_k + BV_y t_k^2 - CV_x t_k - DV_x t_k^2 = 0.$$

Чтобы эти два равенства были верны для любых t_k, необходимо и достаточно одновременное выполнение следующих условий:

$$BV_x + DV_y + FV_z = 0,$$

$$AV_x + CV_y + EV_z = 0,$$

$$BV_y - DV_x = 0,$$

$$AV_y - CV_x = 0.$$

Очевидно, что этим условиям могут удовлетворить бесконечное множество значений *A, B, C, D, E, F*. Таким образом, при заданных свойствах наблюдения и движения существует континуальное множество шестёрок чисел *A, B, C, D, E, F*, обращающих (7) в верное равенство (то есть линейная комбинация столбцов соответствующей матрицы $\widetilde{H}$ обращается в 0), а, значит, соответствующая матрица $\widetilde{H}$ – вырождена.

Аналогичным путём (правда, несколько усложнив выражения) можно показать вырожденность $\widetilde{H}$ и при $x^{(1)} \neq 0$, $y^{(1)} \neq 0$, $z^{(1)} \neq 0$, $t_* \neq 0$. При более высоких размерностях задачи $\widetilde{H}$ будет также, очевидно, вырождена, так как у неё будут линейно зависимы уже рассмотренные 6 столбцов.

Утверждение 4. Если количество станций $J > 1$, а опорное решение в задаче (4), (5) такое, что $z(t_k) - z^{(j)} = 0$ для всех j (все станции расположены на одной высоте и траектория объекта полностью лежит в плоскости вращения их антенн), то соответствующая системе (6) матрица $\widetilde{H}$ – вырождена.

Доказательство. Рассмотрим систему уравнений (6). При указанной конфигурации системы при $z(t_k) - z^{(j)} = 0$ коэффициенты при величинах $\delta z(t_*)$ и $\delta a_i^{(z)}$ всегда будут равны нулю, что с учётом вида второго уравнения системы (6) означает наличие нулевых столбцов в соответствующей матрице $\widetilde{H}$. Такая матрица, очевидно, вырождена.

Несмотря на рассмотренные ограничения, система (6) остаётся невырожденной для достаточно широкого класса решений (траекторий), характерных для реальных ситуаций (например, при движениях объекта в рамках модели (1) вне плоскости вращения антенн). Исходя из этого, можно сделать вывод, что постановка задачи наблюдения в виде (1), (2) правомерна с точки зрения её принципиальной разрешимости.

Отмеченная сингулярность построенной модели вблизи точки $z(t_k) - z^{(j)} = 0$, приводящая к обнулению соответствующего коэффициента в первом уравнении системы (6), отвечающего за определение координаты z наблюдаемого объекта, способна существенно ограничить эффективность моделей такого типа, особенно в области малых отношений «высота/дальность». Определённые перспективы в этом направлении может дать переход в модели (1), (2) от прямоугольных координат к сферическим.

Переход к сферическим координатам

Рассмотрим уравнение движения объекта в сферической системе координат φ, λ, R – соответственно: географические широта, долгота и расстояние до объекта от центра Земли. В качестве модели поверхности Земли, несущественно нарушая общность модельных представлений (с учётом пространственной локальности рассматриваемой задачи), примем сферу. Эволюцию координат будем описывать моделью следующего полиномиального вида:

$$\varphi(t) = \varphi(t_0) + \sum_{i=1}^{N_\varphi} a_i^{(\varphi)} (t - t_0)^i,$$
$$\lambda(t) = \lambda(t_0) + \sum_{i=1}^{N_\lambda} a_i^{(\lambda)} (t - t_0)^i, \quad (8)$$
$$R(t) = R(t_0) + \sum_{i=1}^{N_R} a_i^{(R)} (t - t_0)^i,$$

где N_φ, N_λ, N_R – порядок полинома, применяемого при описании эволюции координат, $a_i^{(\varphi)}$, $a_i^{(\lambda)}$, $a_i^{(R)}$ – полиномиальные коэффициенты, отождествляемые со скоростями объекта и приведёнными значениями старших производных.

Имея в виду уравнения измерений (2), преобразованные к новым переменным согласно правилам

$$x = -X \sin\lambda_0 + Y \cos\lambda_0,$$
$$y = -Y \sin\lambda_0 \sin\varphi_0 - X \cos\lambda_0 \sin\varphi_0 + Z \cos\varphi_0,$$
$$z = Z \sin\varphi_0 + Y \sin\lambda_0 \cos\varphi_0 + X \cos\lambda_0 \cos\varphi_0 - R_0,$$
$$X = R \cos\varphi \cos\lambda,$$
$$Y = R \cos\varphi \sin\lambda,$$
$$Z = R \sin\varphi,$$

где $\varphi_0, \lambda_0, R_0$ – координаты начала отсчёта системы *xyz* в системе $\varphi\lambda R$, будем говорить о постановке обратной задачи с искомым вектором

$$s^{(\varphi\lambda R)}(t_k) = (\varphi(t_k), a_1^{(\varphi)}, a_2^{(\varphi)}, \ldots, \lambda(t_k), a_1^{(\lambda)}, a_2^{(\lambda)}, \ldots, R(t_k), a_1^{(R)}, a_2^{(R)}, \ldots).$$

Линеаризация задачи приводит её к виду:

$$\delta s^{(\varphi\lambda R)}(t_{k+1}) = \Phi^{(\varphi\lambda R)}(t_k) \delta s^{(\varphi\lambda R)}(t_k) + q^{(\varphi\lambda R)}(t_k),$$
$$\delta z^{(j)}(t_k) = H^{(\varphi\lambda R)}(t_k) \delta s^{(\varphi\lambda R)}(t_k) + \xi^{(j)}(t_k), \quad (9)$$
$$j = \overline{1, J}$$

с искомым вектором

$$\delta s^{(\varphi\lambda R)}(t_k) = (\delta\varphi(t_k), \delta a_1^{(\varphi)}, \delta a_2^{(\varphi)}, \ldots, \delta\lambda(t_k), \delta a_1^{(\lambda)}, \delta a_2^{(\lambda)}, \ldots, \delta R(t_k), \delta a_1^{(R)}, \delta a_2^{(R)}, \ldots),$$

где $q^{(\varphi\lambda R)}(t_k)$ – вектор немоделируемых параметров движения, $\xi^{(j)}(t_k)$ – вектор инструментальных погрешностей, $\delta z^{(j)}(t_k)$ – вектор невязок измерений, $\Phi^{(\varphi\lambda R)}(t_k)$ и $H^{(\varphi\lambda R)}$ – матричные коэффициенты (матрицы частных производных), формируемые согласно равенствам

$$\delta\varphi(t) = \delta\varphi(t_0) + \sum_{i=1}^{N_\varphi} \delta a_i^{(\varphi)} (t - t_0)^i,$$
$$\delta\lambda(t) = \delta\lambda(t_0) + \sum_{i=1}^{N_\lambda} \delta a_i^{(\lambda)} (t - t_0)^i,$$
$$\delta R(t) = \delta R(t_0) + \sum_{i=1}^{N_R} \delta a_i^{(R)} (t - t_0)^i$$

и (5), приведённых к координатам $\varphi\lambda R$.

Анализ принципиальной разрешимости задачи (9) показывает, что переход к новым переменным позволяет несколько сузить класс характерных ненаблюдаемых траекторий, в частности, исключает сингулярность модели (при опорных движениях объекта согласно уравнениям (8)) в области малых высот. Кроме того, сферическая модель претендует на лучшую физическую корректность, обусловленную учетом проявления влияния кривизны земной поверхности при навигации движущихся объектов с использованием больших интервалов наблюдения, а также загоризонтных целей.

Заключение

Приведённое исследование даёт возможность выбора того или иного типа модели решения пространственной задачи навигации в различных реальных ситуациях. Показано, что оценка высоты маловысотных объектов является трудноразрешимой задачей при использовании измерительной информации от одной РЛС, и для улучшения качества такого наблюдения необходимо расширение информационной базы. Вместе с тем, существует довольно большой класс наблюдаемых траекторий движения объектов, существенно расширяемый с учетом моделирования задачи сферическими (географическими) координатами.

1. Дмитриев, В.И. Автоматизированное рабочее место судоводителя – настоящее и будущее / В.И. Дмитриев, О.В. Соляков, Н.В. Турецкий // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. – 2014. – № 4. – С. 42–47.
2. Усов, А.В. Роль государственной морской спасательной службы в обеспечении морской безопасности России (1991–2014 гг.) / В.А. Усов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2015. – № 6. – С. 26–32.
3. Игнатюк, В.А. Способ организации расширенной системы спутникового GNSS-мониторинга / В.А. Игнатюк, С.И. Сметанин, В.С. Марус // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2015. – №1. – С. 72–79.

4. Сметанин, С.И. Способ реализации программной веб-части системы спутникового мониторинга / С.И. Сметанин, В.А. Игнатюк, А.А. Евстифеев // Информационные технологии. – 2015. – № 6. – С. 448–455.
5. Berle, F.J. Multy radar tracking and multy sensor tracking in air defense systems / F.J. Berle // Electronic Technologies. – 1984. – V.28, № 4.
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. Nabaa, N. Estimate Fusion for 2D Search Sensors / N. Nabaa, R.H. Bishop // AIAA Guidance, Navigation, and Control Proceedings. – 1995. – V. 1. – P. 677–684.
8. Гриняк, В.М. Исследование пространственной задачи навигации в условиях неполной измерительной информации / В.М. Гриняк // Дальневосточный математический журнал. – 2000. – Т. 1, № 1. – С. 93–101.
9. Гриняк, В.М. Модель задачи оценки высотного диапазона движущихся объектов двухкоординатными измерителями / В.М. Гриняк // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2013. – №4. – С. 281–293.
10. Девятисильный, А.С. Идентификация воздушных объектов двухкоординатными измерителями / А.С. Девятисильный, В.М. Дорожко, В.М. Гриняк // Измерительная техника. – 2004. – № 11. – С. 19–21.
11. Девятисильный, А.С. Нейроподобные алгоритмы высотной классификации воздушных объектов / А.С. Девятисильный, В.М. Дорожко, В.М. Гриняк // Информационные технологии. – 2001. – № 12. – С. 45–51.

Для цитирования: Гриняк, В.М. О разрешимости задачи наблюдения воздушных объектов двухкоординатными измерителями / В.М. Гриняк, Ю.С. Иваненко // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2016. – № 3. – С. 109–118.

For citation: Grinyak, V.M. On observability of airborne target by two-coordinate radar / V.M. Grinyak, Y.S. Ivanenko // The Territory Of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service. – 2016. – № 3. – P. 109–118.

Дата поступления: 11.05.2016.