

А. А. Дятко, доцент; С. М. Костромицкий, профессор (КБ «Радар»);
П. Н. Шумский, доцент (КБ «Радар»)

АЛГОРИТМЫ ПРИВЕДЕНИЯ ОТМЕТОК ОБЪЕКТОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ К ЕДИНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

In article algorithms of transformation of coordinates of objects of the radar-tracking supervision received in systems of coordinates local RLS, in system of coordinates of the uniform centre of processing of the information on air conditions are considered. The developed algorithms can be used at designing of the automated systems of processing of the radar-tracking information. The presented algorithms are realised in the form of a package of the applied programs, realising above described matrix transformations, for application at a stage by tertiary processing of the information in systems of radar-tracking supervision over air conditions.

Введение. На этапе первичной и вторичной обработки радиолокационной информации осуществляется ее обработка только от одной радиолокационной станции (РЛС). Для радиолокационного контроля воздушной обстановки над большой территорией необходимо иметь информацию о воздушных объектах в пределах достаточно большого пространства, что не может быть обеспечено одной РЛС. Получение информации возможно только путем создания единого радиолокационного поля с помощью нескольких РЛС. Поэтому возникает задача обработки радиолокационной информации, полученной от нескольких РЛС, с целью формирования общей картины воздушной обстановки. Обработка радиолокационной информации, поступающей от нескольких РЛС, называется третичной обработкой информации [1, 2].

Для выполнения своих задач РЛС располагаются на местности в определенном порядке. Зоны видимости РЛС образуют радиолокационное поле. При этом РЛС могут быть расставлены так, что их зоны видимости будут перекрываться полностью, частично или не перекрываться совсем. Радиолокационные поля с перекрытием зон видимостей обеспечивают лучшие условия для наблюдения за воздушными объектами, однако требуют большего количества радиолокационных средств. При этом сведения об одном и том же объекте могут поступать одновременно от нескольких станций. В идеальном случае такие отметки целей должны накладываться одна на другую. Однако практически совпадения не наблюдаются из-за систематических и случайных ошибок в измерении координат объектов, различного времени локации, а также из-за ошибок, возникающих при учете параллакса между точками стояния РЛС и пунктом третичной обработки при приведении координат целей к единой системе. Последнее является обязательным условием третичной обработки, так как все РЛС определяют координаты целей в своих системах координат, что не позволяет производить объединение информации. В общем случае несовпадение отметок траектории может быть или по причи-

не ошибок измерения координат объектов и различного времени локации, или же потому, что имеется несколько объектов, создающих эти отметки и траектории. Раскрытие этой неопределенности, т. е. решение вопроса, сколько объектов находится в действительности в контролируемой зоне, является главным вопросом третичной обработки.

Для решения задач третичной обработки информации необходим определенный набор сведений, которые предоставляются отдельными РЛС, формирующими радиолокационное поле (локальными РЛС), в распоряжение некоторой системы обработки информации (СОИ), место расположения которой в общем случае имеет географические координаты, отличные от географических координат локальных РЛС. Система обработки информации предназначена для решения вышеупомянутых задач третичной обработки и представления необходимых данных конечному потребителю.

В данной статье рассматривается алгоритм приведения отметок объектов, полученных от различных РЛС наблюдения, к единой системе координат центра обработки информации о воздушной обстановке.

Основная часть. Будем полагать, что для каждой из РЛС, формирующей радиолокационное поле, известны ее географические координаты (широта и долгота), а также географические координаты точки расположения системы обработки информации.

Примем в качестве единой системы координат декартову систему, связанную с местоположением центра обработки информации, и получим выражения для вычисления координат воздушного объекта в ней по данным локальных РЛС. При этом для определения точек расположения локальных РЛС и пункта СОИ будем использовать их геодезические координаты, что позволит учесть кривизну земной поверхности.

Для решения поставленной задачи введем на поверхности Земли две правые декартовы системы координат $X^1Y^1Z^1$ и $X^2Y^2Z^2$ (рис. 1), начала которых имеют географические координаты

наты (широта, долгота) соответственно $(\varphi_1, \varepsilon_1)$ и $(\varphi_2, \varepsilon_2)$. Оси X^1, Y^1 (X^2, Y^2) лежат в плоскостях, касательных к земной поверхности в точках расположения начала координат. Оси Y^1 и Y^2 ориентированы вдоль соответствующих меридианов на север. Оси Z^1 и Z^2 перпендикулярны к соответствующим касательным плоскостям.

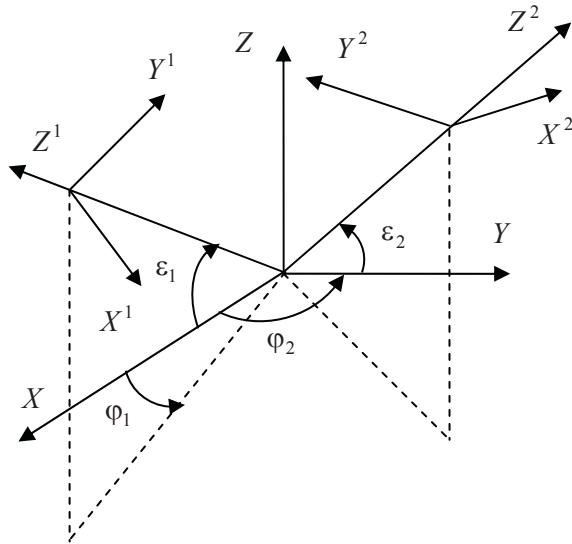


Рис. 1

Введем также декартову систему координат XYZ с началом в центре Земли, как показано на рис. 1, где ось X лежит в плоскости нулевого меридиана, а ось Z указывает на северный полюс.

Свяжем систему координат $X^1Y^1Z^1$ с местом расположения некоторой локальной РЛС, а $X^2Y^2Z^2$ – с точкой, где располагается система обработки информации.

Пусть (x_1, y_1, z_1) – координаты объекта в системе $X^1Y^1Z^1$, а (x_2, y_2, z_2) – координаты того же объекта в системе $X^2Y^2Z^2$. Операция приведения отметок цели к единой системе координат требует пересчета координат цели из одной системы в другую. Для этой цели удобным является подход, когда объект представляется вектором в четырехмерном пространстве с равной единице четвертой координатой [3]. Такая методика будет использована ниже при выводе соответствующих выражений для преобразования координат.

Пусть

$$V_1 = (x_1, y_1, z_1, 1)^T \quad (1)$$

вектор координат объекта в системе $X^1Y^1Z^1$, а

$$V_2 = (x_2, y_2, z_2, 1)^T \quad (2)$$

вектор координат того же объекта в системе $X^2Y^2Z^2$.

Задача заключается в отыскании такого оператора $P = P(\varphi_1, \varepsilon_1, \varphi_2, \varepsilon_2, R)$, что $V_2 = PV_1$, здесь R – эквивалентный радиус Земли.

Очевидно, что оператор P должен представлять собой матрицу, элементы которой зависят от географических координат систем $X^1Y^1Z^1, X^2Y^2Z^2$ и радиуса Земли.

Рассмотрим методику получения матрицы P .

1. Сместим систему координат $X^1Y^1Z^1$ на $\Delta x = 0, \Delta y = 0$ и $\Delta z = -R$ относительно исходного положения (рис. 2).

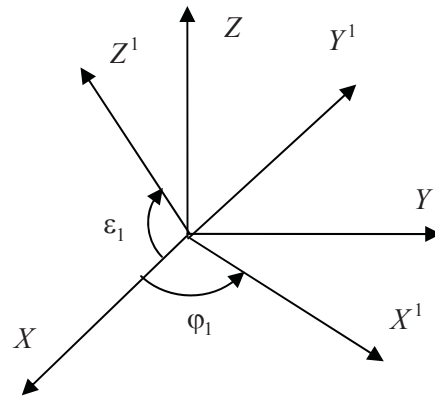


Рис. 2

Вектор координат (1) преобразуется к виду

$$W_1 = T^1 V_1, \quad (3)$$

где матрица преобразования координат T^1 имеет следующий вид [3]:

$$T^1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -\Delta x \\ 0 & 1 & 0 & -\Delta y \\ 0 & 0 & 1 & -\Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

2. Совместим оси Z^1 и Z .

Для этой цели повернем систему координат $X^1Y^1Z^1$ вокруг оси X^1 по часовой стрелке (в отрицательном направлении) на угол $\varphi = -\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon_1\right)$ (рис. 3).

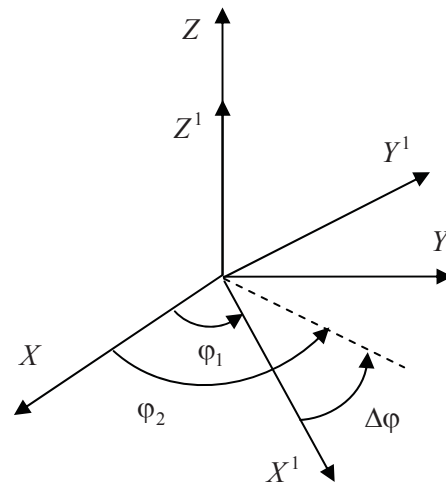


Рис. 3

Вектор координат (3) преобразуется к виду

$$W_2 = R_{X^1}^1 W_1 = R_{X^1}^1 T^1 V_1, \quad (5)$$

где матрица преобразования координат $R_{X^1}^1$ имеет следующий вид [3]:

$$R_{X^1}^1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \left[-\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon_1 \right) \right] & \sin \left[-\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon_1 \right) \right] & 0 \\ 0 & -\sin \left[-\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon_1 \right) \right] & \cos \left[-\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon_1 \right) \right] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

3. Совместим долготу φ_1 и φ_2 .

Для этого повернем систему координат $X^1 Y^1 Z^1$ вокруг оси Z^1 на угол $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ (рис. 4).

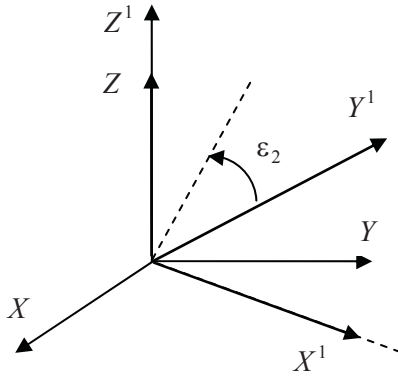


Рис. 4

Вектор координат (5) преобразуется к виду

$$W_3 = R_{Z^1} W_2 = R_{Z^1} R_{X^1}^1 T^1 V_1, \quad (7)$$

где матрица преобразования координат R_{Z^1} имеет следующий вид [3]:

$$R_{Z^1} = \begin{pmatrix} \cos \Delta\varphi & \sin \Delta\varphi & 0 & 0 \\ -\sin \Delta\varphi & \cos \Delta\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) & \sin(\varphi_2 - \varphi_1) & 0 & 0 \\ -\sin(\varphi_2 - \varphi_1) & \cos(\varphi_2 - \varphi_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

4. Совместим широту ε_1 и ε_2 .

Для этого повернем систему координат $X^1 Y^1 Z^1$ вокруг оси X^1 на угол $\varphi = \frac{\pi}{2} - \varepsilon_2$ (рис. 5).

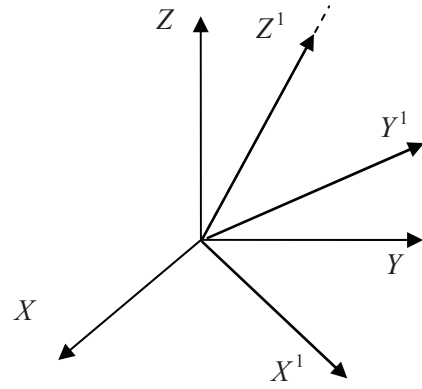


Рис. 5

Вектор координат (7) преобразуется к виду

$$W_4 = R_{X^1}^2 W_3 = R_{X^1}^2 R_{Z^1} R_{X^1}^1 T^1 V_1, \quad (9)$$

где матрица преобразования координат $R_{X^1}^2$ имеет следующий вид [3]:

$$R_{X^1}^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon_2 \right) & \sin \left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon_2 \right) & 0 \\ 0 & -\sin \left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon_2 \right) & \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon_2 \right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

5. Совместим системы координат $X^1 Y^1 Z^1$ и $X^2 Y^2 Z^2$.

Для этой цели сместим систему координат $X^1 Y^1 Z^1$ на $\Delta x = 0$, $\Delta y = 0$ и $\Delta z = R$ относительно текущего положения (рис. 6).

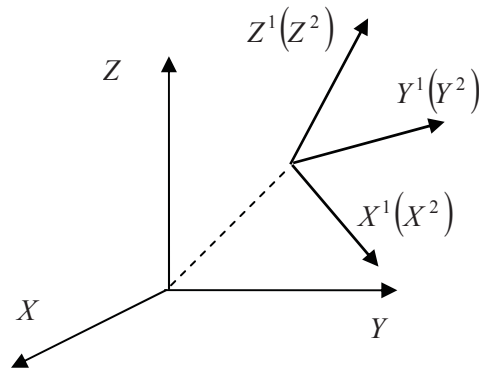


Рис. 6

Вектор координат (9) преобразуется к виду

$$V_2 = T^2 W_4 = T^2 R_{X^1}^2 R_{Z^1} R_{X^1}^1 T^1 V_1 = P V_1, \quad (11)$$

где матрица преобразования координат T^2 имеет следующий вид [3]:

$$T^2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -\Delta x \\ 0 & 1 & 0 & -\Delta y \\ 0 & 0 & 1 & -\Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Из (11) следует, что искомая матрица

$$P = T^2 R_{X^1}^2 R_{Z^1} R_{X^1}^1 T^1. \quad (13)$$

Поскольку оператор P найден, то можно пересчитать из системы координат $X^1 Y^1 Z^1$ в $X^2 Y^2 Z^2$ и вектор скорости наблюдаемого объекта.

Пусть

$$V_1^v = (v_x^1, v_y^1, v_z^1, 1)^T - \quad (14)$$

вектор скорости некоторого объекта в системе координат $X^1 Y^1 Z^1$, а

$$V_2^v = (v_x^2, v_y^2, v_z^2, 1)^T - \quad (15)$$

вектор скорости этого же объекта в системе координат $X^2 Y^2 Z^2$. При этом полагаем, что начало вектора скорости (14) находится в начале системы координат $X^1 Y^1 Z^1$, т. е. имеет координаты

$$V_{10}^v = (0, 0, 0, 1)^T, \quad (16)$$

а начало вектора скорости (15) находится в начале системы координат $X^2 Y^2 Z^2$, т. е. имеет координаты

$$V_{20}^v = (0, 0, 0, 1)^T. \quad (17)$$

Тогда преобразование координат вектора (14) из системы координат $X^1 Y^1 Z^1$ в $X^2 Y^2 Z^2$ выполняется в соответствии с соотношением

$$V_2^v = P V_1^v - P V_{10}^v = P(V_1^v - V_{10}^v). \quad (18)$$

Заключение. В работе получены алгоритмы преобразования координат объектов радиолокационного наблюдения, полученных в системах координат локальных РЛС, в систему координат единого центра обработки информации о воздушной обстановке. Разработанные алгоритмы могут быть использованы при проектировании автоматизированных систем обработки радиолокационной информации.

Авторами разработан пакет прикладных программ, реализующий вышеописанные алгоритмы, для применения на этапе третичной обработки информации в системах радиолокационного наблюдения за воздушной обстановкой.

Литература

1. Крылович, А. П. Теория обработки радиолокационной информации в АСУ: учеб. пособие / А. П. Крылович, А. П. Янцев. – Минск: МВИЗРУ ПВО, 1974. – 216 с.

2. Сколник, М. Справочник по радиолокации: в 3 т. / М. Сколник; пер. с англ.; под ред. К. Н. Трофимова. – М.: Сов. радио, 1976. – Т. 1. – 456 с.

3. Порев В. Н. Компьютерная графика / В. Н. Порев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 428 с.