

Введение

При сопровождении воздушного объекта (ВО) радиолокационной станцией (РЛС) траекторная информация по нему передается в командный пункт (КП). Если, например, один из двух локаторов плохо отъюстирован, информация об одном ВО, поступающая с этих двух РЛС на КП, не объединяется, что приводит к возникновению ложных треков. При передаче информации вектор координат и скоростей ВО пересчитывается из системы координат станции в систему координат КП. В процессе пересчета используется информация по координатам топопривязки станции, азимуту (β_a) и углу места нормали к антенному полотну (ε_a), углам неперпендикулярности продольной и поперечной плоскости (ε, τ). Эти величины измеряются с некоторыми ошибками, которые могут быть уменьшены при проведении процедуры юстировки РЛС по измерениям параметров движения эталонных объектов. Текущие координаты эталонных объектов считаются известными с большой степенью точности. В случае отсутствия точных координат, в качестве эталонных могут быть использованы данные измерений одной из РЛС, как показано в работе [1].

1. Постановка задачи

Имеется N эталонных объектов, известны скорости V_i и координаты R_i каждого объекта, где $i=1, \dots, N$. При передаче информации на КП траекторная информация пересчитывается из системы координат РЛС в систему координат КП:

$$\mathbf{r}_m = \mathbf{A}^T(\varepsilon, \tau, \beta_a) \mathbf{R} \mathbf{p}, \quad (1)$$

где \mathbf{A}^T – матрица перехода из системы координат КП в систему координат РЛС;

$\varepsilon, \tau, \beta_a$ – углы ориентирования РЛС;

$$\mathbf{p} = [\sqrt{1 - \sin^2 \varphi_B - \sin^2 \varphi_H}; \sin \varphi_B; \sin \varphi_H]^T;$$

$R, \sin \varphi_B, \sin \varphi_H$ – координаты объекта в системе координат РЛС.

Углы ориентирования измеряются с некоторыми погрешностями.

Требуется разработать алгоритм компенсации систематических ошибок ориентирования.

2. Описание алгоритма

Для решения задачи компенсации систематических ошибок ориентирования РЛС, предложен алгоритм на основе метода наименьших квадратов. Для отработки алгоритма использовалась модель, структурная схема которой показана на рис. 1.



Рис. 1. Структура модели

2.1. Модель движения ВО

Расчет истинной траектории ВО производится в местной системе координат (МСК). Начало координат O_m находится в точке размещения РЛС, ось $O_m Y$ направлена от центра Земли в точку размещения объекта, ось $O_m X$ направлена вдоль меридиана по направлению на север, ось $O_m Z$ дополняет систему до правой тройки.

Рассматривалось прямолинейное равномерное движение ВО:

$$\mathbf{r}_m = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_m t, \quad (2)$$

$\mathbf{r}_m, \mathbf{v}_m$ – вектор координат и скоростей в МСК соответственно, t – время.

2.2. Модель измерителя

Рассматриваемая РЛС работает в биконической системе координат (БСК) рис. 2. Начало БСК O_a совпадает с фазовым центром антенны. Ось $O_a X_a$ образована нормалью к антенному полотну, $O_a Y_a$ – лежит в вертикальной плоскости антенны. Ориентация антенны, относительно неподвижной части объекта определяется двумя углами: β_a – азимут оси антенны, ε_a – угол наклона оси антенны.

Область определения БСК является $x_a \geq 0$. Все точки в БСК описываются тремя элементами $R, \sin \varphi_B, \sin \varphi_H$:

R – модуль радиус-вектора \mathbf{R} ;

$\sin \varphi_B$ – синус угла между плоскостью $X_a O Z_a$ и радиус-вектором \mathbf{R} ;

$\sin \varphi_H$ – синус угла между плоскостью $X_a O Y_a$ и радиус-вектором \mathbf{R} .

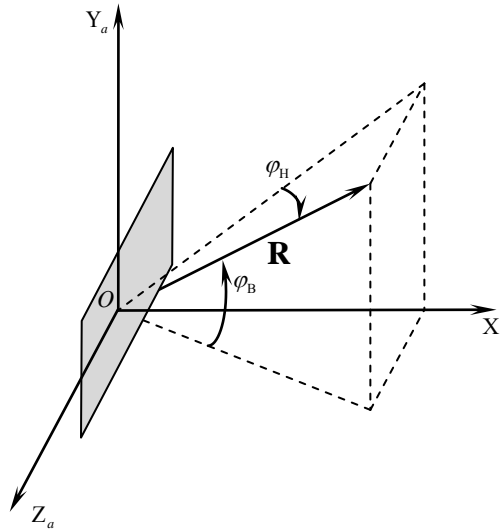


Рис. 2. Биконическая система координат

Для получения измерений РЛС с учетом её ошибок используется следующая упрощенная модель:

$$\begin{aligned} R_{izm} &= R + sigR \cdot rand \\ \sin \varphi_{Bizm} &= \sin \varphi_B + sig \varphi_B \cdot rand, \\ \sin \varphi_{Hizm} &= \sin \varphi_H + sig \varphi_H \cdot rand \end{aligned} \quad (3)$$

где $R_{izm}, \sin \varphi_{Bizm}, \sin \varphi_{Hizm}$ – измеренные координаты объекта;

$R, \sin \varphi_B, \sin \varphi_H$ – истинные координаты объекта;

$rand$ – случайное число со стандартным нормальным законом распределения;

$sigR, sig \varphi_B, sig \varphi_H$ – СКО ошибок измерения станции.

2.3. Фильтр статобработки

Сглаживание результатов измерений производится в системе координат РЛС с помощью алгоритма вторичной обработки, основанному на классическом фильтре Калмана [2, 3]. Для работы фильтра Калмана производится прогноз оценок траекторной информации с предыдущего шага и коррекции результатов измерений РЛС с помощью данных прогноза.

Для прогноза оценки вектора скорости и вектора координат переводятся в МСК. Соответствующие матрицы поворотов на углы $\beta_a, \varepsilon, \varepsilon_a, \tau$ равны:

$$\mathbf{A}_{\beta_a} = \begin{vmatrix} \cos \beta_a & 0 & \sin \beta_a \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_a & 0 & \cos \beta_a \end{vmatrix}, \quad \mathbf{A}_{\varepsilon} = \begin{vmatrix} \cos \varepsilon & \sin \varepsilon & 0 \\ -\sin \varepsilon & \cos \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$\mathbf{A}_{\varepsilon_a} = \begin{vmatrix} \cos \varepsilon_a & \sin \varepsilon_a & 0 \\ -\sin \varepsilon_a & \cos \varepsilon_a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad \mathbf{A}_\tau = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \tau & \sin \tau \\ 0 & -\sin \tau & \cos \tau \end{vmatrix}.$$

Вектор координат ВО пересчитывается в МСК по уравнению (1), со следующей матрицей поворота:

$$\mathbf{A}(\varepsilon, \tau, \beta_a) = \mathbf{A}_{\varepsilon_a} \cdot \mathbf{A}_{\beta_a} \cdot \mathbf{A}_\tau \cdot \mathbf{A}_\varepsilon \quad (4)$$

Пересчет вектора скорости ВО производится с помощью дифференцирования уравнения (1):

$$\dot{\mathbf{r}}_m = \mathbf{A}(\varepsilon, \tau, \beta_a) \cdot \dot{\mathbf{r}}_m' + R' \cdot \mathbf{p}' \quad (5)$$

где $R' = \frac{(\mathbf{r}_m, \mathbf{v}_m)}{R}$;

$\mathbf{r}_m, \mathbf{v}_m$ – вектор координат и скоростей в МСК соответственно.

Обратный пересчет вектора скорости осуществляется с использованием соотношения:

$$\mathbf{p}' = \frac{1}{R} \cdot \mathbf{A}(\varepsilon, \tau, \beta_a) \cdot \mathbf{v}_m - \frac{R'}{R} \mathbf{p} \quad (6)$$

Тогда

$$\begin{bmatrix} R' \\ \sin' \varphi_B \\ \sin' \varphi_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mathbf{r}_m, \mathbf{v}_m) / R \\ \mathbf{p}'[2] \\ \mathbf{p}'[3] \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.4. Процедура юстировки

Для компенсации систематических ошибок рассогласования применяется метод наименьших квадратов по сглаженным оценкам измерений ВО. Поиск поправок к углам ориентирования РЛС осуществляется путем минимизации следующего функционала:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left\| \mathbf{r}_m^{ij} - \mathbf{r}_{m_ist}^{ij} \right\|^2 \rightarrow \min_{\Delta \varepsilon, \Delta \tau, \Delta \beta_a} \quad (8)$$

где N – количество ВО;

M – количество измерений траектории ВО;

\mathbf{r}_{m_ist} – вектор истинных координат ВО в МСК;

\mathbf{r}_m – вектор координат ВО в МСК;

$\Delta \varepsilon, \Delta \tau, \Delta \beta_a$ – поправки к измеренным углам ориентирования РЛС.

Для решения задачи (8) был выбран алгоритм безусловной оптимизации функции от нескольких переменных, именуемый методом Нелдера-Мида [4]. Суть метода состоит в последовательном перемещении симплекса (n-мерного тетраэдра) вокруг точки экстремума. Алгоритм не использует производную (градиенты) функции, что позволяет избежать громоздких вычислений.

3. Результаты

Результаты работы фильтра статобработки представлены на рис. 3.

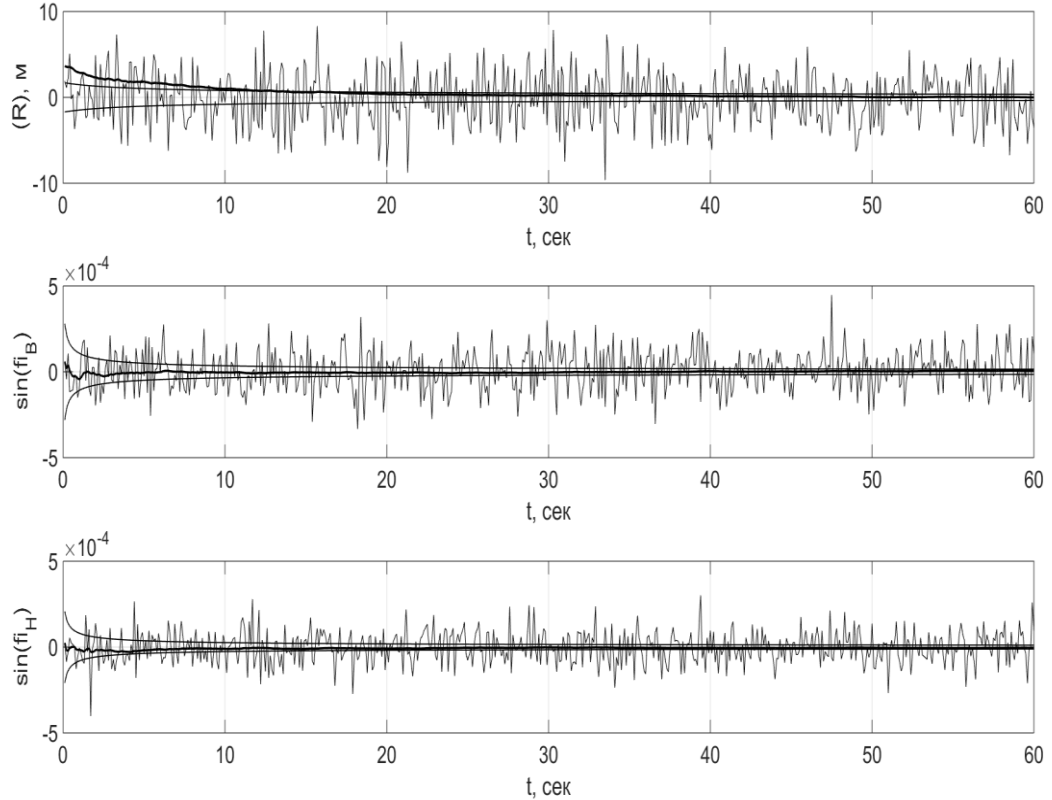


Рис.3. Результаты сглаживания измерений РЛС дальности и двух углов в зависимости от времени

По результатам исследования работы алгоритма компенсации систематических ошибок ориентирования РЛС была получена зависимость оценок СКО ошибок оценки углов «невертикальности» и азимута от времени сопровождения РЛС (рис. 4).

Расчеты проводились для четырех произвольно взятых ВО, которые выбирались в диапазоне дальностей от 35 до 75 км. Темп работы станции составляет 10 Гц. Истинные значения систематических ошибок ориентирования РЛС: $\Delta\varepsilon = 100.152''$, $\Delta\tau = -50.565''$, $\Delta\beta\alpha = -415.685''$.

Отметим, что данные, представленные на рис. 4 качественно совпадают с данными из работы [1].

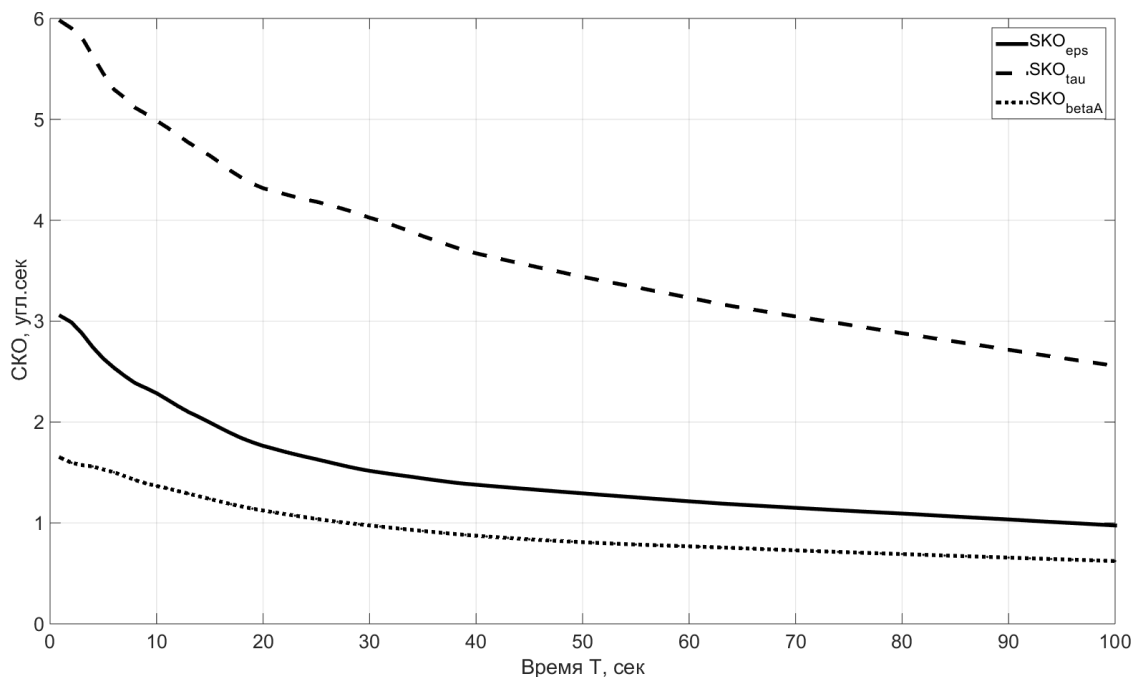


Рис.4. Оценка СКО ошибки ориентации для трех углов ориентирования в зависимости от времени

Заключение

Предложен метод компенсации систематических ошибок ориентирования РЛС, основанный на сравнении данных замеров станции с эталонными значениями координат воздушных объектов. Предложенный алгоритм позволяет до двух раз сократить ошибки рассогласования РЛС. Точность определения углов ориентирования зависит от числа воздушных объектов и количества замеров их параметров движения, а также от точности работы фильтра статобработки.

Литература

1. Вакуленко Н.Н., Жирков В.М., Мачулин В.М. Компенсация ошибок топопривязки и ориентирования трехкоординатных источников радиолокационной информации // Радиосистемы: конфликтно-устойчивые радиоэлектронные системы, 2002, №8, стр. 33-36.
2. Никитина А. А., Грицык П. А. Сопровождение маневрирующей цели // Антенны, 2013, №1 (188), стр.25-29.
3. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей / пер. с англ. М.: Радио и связь. 1993.
4. Lagarias, J.C., J. A. Reeds, M. H. Wright, and P. E. Wright, "Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions," SIAM Journal of Optimization, Vol. 9 Number 1, pp. 112-147, 1998.