

# МНОГОЦЕЛЕВОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ОДНОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЕ РАДИОМОНИТОРИНГА ВОЗДУШНОГО БАЗИРОВАНИЯ

Б. В. Белик, С. Г. Белов

АО «Концерн радиостроения «Вега», 121170, г. Москва, Кутузовский проспект, д.34

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2017 г.

**Аннотация.** Осуществлена постановка задачи многоцелевого трассового сопровождения источников радиоизлучения с использованием однопозиционных систем радиомониторинга воздушного базирования. Проведен синтез алгоритма многоцелевого трассового сопровождения воздушных маневрирующих источников радиоизлучения на основании измерений их азимутов и углов места. Проведено имитационное моделирование работы разработанного алгоритма, по итогам которого сделаны выводы о его эффективности.

**Ключевые слова:** многоцелевое сопровождение, источники радиоизлучения, система радиомониторинга, пеленгация, фильтр Калмана.

**Abstract.** Processing of signals from radio emission sources in airborne monostatic radio monitoring systems requires solving the problems of its identification and estimation of the state coordinates. The radio emission sources identification is understood as establishing a correspondence between separate signals detected by radio monitoring system and radio-emission source specimens. The estimation is understood as forming optimal estimates of the state coordinates of tracking radio-emission source. The algorithm of multitarget route tracking of radio-emission sources using monostatic air-borne radio monitoring system is developed in the article. Developed algorithm includes three stages: the formation of hypotheses about identification, estimation of the state coordinates of all objects for each hypothesis and the choice of the most plausible hypothesis. Radio monitoring systems specificity is that there is no possibility for directly measuring of radio emission source range. In this conditions methods of its indirect estimation based on angle measurements are

used for estimation of state coordinates of the tracking objects. In the article an algorithm of estimation of the state coordinates of tracking objects was based on extended Kalman filter. Based on the simulation, the efficiency of the developed algorithms was investigated.

**Key words:** multitarget tracking, radio emission sources, radio monitoring system, angular position measurement, Kalman filter.

## 1. Введение

В современном мире одним из наиболее интенсивно развивающихся видов радиомониторинга окружающего пространства является контроль электромагнитной обстановки, необходимость которого обусловлена возрастанием числа функционирующих радиоэлектронных систем [1].

Радиомониторинг, проводимый с борта летательных аппаратов (ЛА), позволяет контролировать излучение ИРИ в различных диапазонах частот, различных стандартов, включая излучение бортовых радиолокационных станций (БРЛС), а также постановщиков активных помех размещенных на ЛА.

С учетом меняющейся радиоэлектронной обстановки в районе мониторинга решение задачи многоцелевого сопровождения ИРИ должно осуществляться в масштабе времени, близком к реальному, что предполагает использование последовательных процедур обработки регистрируемых измерений по мере их поступления.

В аппаратной части систем радиомониторинга измеряются параметры сигналов от ИРИ, на основании которых в системе обработки данных радиомониторинга решаются задачи отождествления ИРИ по принимаемым сигналам и оценивания их координат состояния. При этом под отождествлением понимается установление соответствия между отдельными регистрируемыми в системе радиомониторинга измерениями сигналов и конкретными экземплярами ИРИ. Под оцениванием понимается формирование оптимальных оценок координат состояния экземпляров ИРИ [2].

Особенностью систем радиомониторинга является то, что в них невозможно непосредственное измерение дальности до ИРИ. В такой ситуации для определения координат состояния ИРИ используются методы их косвенного оценивания на основании измерений их угловых координат [3,4].

В работе исследуется применимость алгоритмов оптимальной нелинейной фильтрации для решения задачи многоцелевого трассового сопровождения воздушных маневрирующих ИРИ на основании измерений их азимутов и углов места.

## 2. Постановка задачи

На рис. 1 представлена геометрия решаемой задачи.  $OXYZ$  – наземная неподвижная прямоугольная система координат, с осью  $OX$  направленной на север.

Положение перемещающейся в пространстве системы радиомониторинга, размещенной на ЛА, в момент  $t_k$  определяется вектором состояния  $\mathbf{x}_c = [x_c, y_c, z_c]^T$ . Местоположение цели определяется вектором состояния  $\mathbf{x} = [x, y, z]^T$ .

С выхода системы радиомониторинга поступают измерения азимута  $\alpha$  и угла места  $\beta$  одного из наблюдаемых объектов.

На основании данных радиомониторинга формируется дискретный случайный процесс, представляющий собой последовательность  $\{\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_k, \dots\}$  векторов измерений  $\mathbf{z}_k$ . Последовательность измерений в моменты времени от первого до  $k$ -го, будем обозначать:

$$\{\mathbf{z}\}_k = \{\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_k\}. \quad (1)$$

где вектор  $\mathbf{z}_k$  измерений образуют угломерные данные системы радиомониторинга:

$$\mathbf{z}_k = [\alpha_k, \beta_k]^T. \quad (2)$$

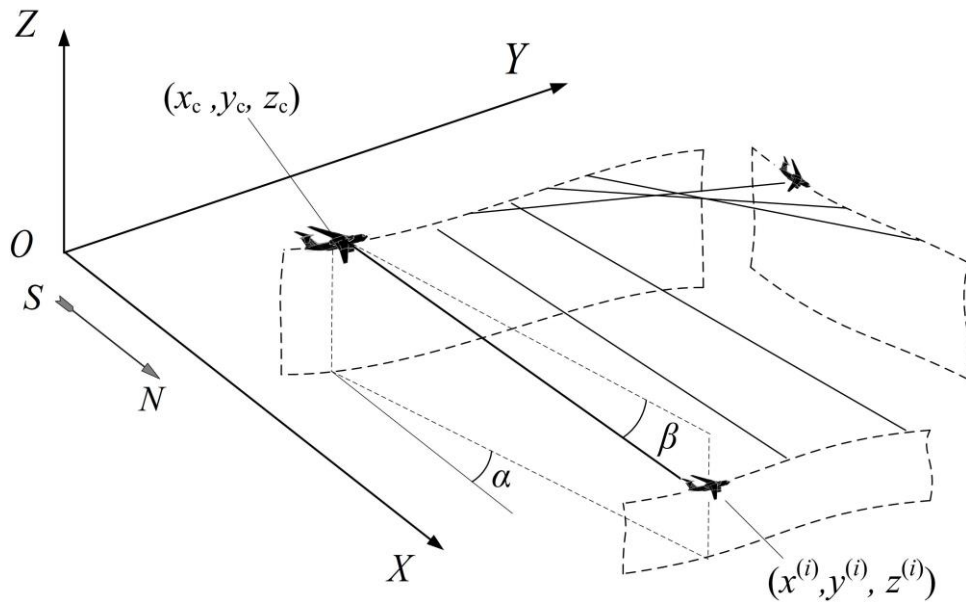


Рис. 1. Геометрия задачи

Модель измерений  $\mathbf{z}_k$  определяется уравнением наблюдения:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}(t_k, \mathbf{x}_k^{(i)}, \mathbf{x}_{ck}) + \xi_{ик}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{h}(t_k, \mathbf{x}_k^{(i)}, \mathbf{x}_{ck})$  – полезный сигнал;  $\xi_{ик}$  – дискретный белый шум нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей  $\mathbf{D}_{ик}$ ;  $\mathbf{x}_k^{(i)}$  – вектор координат состояния  $i$ -го объекта, от которого в момент  $t_k$  поступил сигнал.

При сопровождении маневрирующих ИРИ возникает неоднозначность, связанная с существованием множества различных траекторий, положение ИРИ на которых соответствует одному и тому же пеленгу, измеряемому системой радиомониторинга. Способом решения указанной проблемы является использование априорных моделей состояния сопровождаемых объектов, накладывающих ограничения на возможности их маневрирования.

Разработанная модель состояния предполагает, что ИРИ может совершать маневр только в горизонтальной плоскости, сохраняя постоянную по модулю скорость. При этом вектор состояния и уравнение состояния имеют вид:

$$\mathbf{x}_k = [x_k, y_k, z_k, \theta, \varphi, V]^T, \quad (4)$$

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}, \Delta t_{k|k-1}) + \xi_{xk}, \quad (5)$$

где  $x_k, y_k, z_k$  – координаты ИРИ в системе координат  $OXYZ$ ,  $\theta, \varphi$  – углы

ориентации вектора скорости ИРИ в вертикальной и горизонтальной плоскостях соответственно,  $V$  – модуль скорости ИРИ,  $\Delta t_{k|k-1}$  – интервал между текущим и предыдущим моментами времени,  $\mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}, \Delta t_{k|k-1})$  – векторная переходная функция, которая определяется соотношениями:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}, \Delta t_{k|k-1}) = \begin{bmatrix} x_{k-1} + V_{k-1} \sin \theta_{k-1} \cos \varphi_{k-1} \Delta t_{k|k-1} \\ y_{k-1} + V_{k-1} \sin \theta_{k-1} \sin \varphi_{k-1} \Delta t_{k|k-1} \\ z_{k-1} + V_{k-1} \cos \theta_{k-1} \Delta t_{k|k-1} \\ \theta_{k-1} \\ \varphi_{k-1} \\ V_{k-1} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$\xi_{\mathbf{x}k}$  – вектор белых гауссовских шумов состояния с нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей  $\mathbf{D}_{\mathbf{x}k}$ , который определяет возможность маневра.

В связи с допущением, что ИРИ может маневрировать только в горизонтальной плоскости, корреляционная матрица шумов состояния имеет вид:

$$\mathbf{D}_{\mathbf{x}k} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \left( \frac{\dot{\varphi}_{\max} \Delta t_{k|k-1}}{3} \right)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где  $\dot{\varphi}_{\max}$  – максимально возможная угловая скорость курса ИРИ.

Функция полезного сигнала  $\mathbf{h}(t_k, \mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{ck})$  в уравнении наблюдения (3), зависящая от пространственных координат системы радиомониторинга, для случая векторов наблюдения (2) и состояния (4) имеет вид:

$$\mathbf{h}(t_k, \mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{ck}) = \begin{bmatrix} h_\alpha \\ h_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctg \frac{x_k - x_{ck}}{y_k - y_{ck}} \\ \arctg \frac{z_{ck} - z_k}{\sqrt{(x_k - x_{ck})^2 + (y_k - y_{ck})^2}} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Требуется, опираясь на модель наблюдений (3), (8) и модель состояния (4)-(7), в каждый момент  $t_k$  путем отождествления ИРИ по измерениям определять количество ИРИ и оценивать координаты состояния каждого ИРИ.

### 3. Алгоритм многоцелевого сопровождения

В рамках алгоритма многоцелевого сопровождения на каждом шаге обработки принимается решение о числе объектов и оценках их координат состояния. Это решение принимается в результате выполнения процедуры, включающей три этапа: формирования гипотез об отождествлении, оценивания координат состояния всех объектов для каждой гипотезы и выбора наиболее правдоподобной гипотезы [2].

**Этап 1.** В рамках данного этапа осуществляется формирование гипотез об отождествлении измерения  $\mathbf{z}_k$ , поступившего в момент  $t_k$ , либо с одним из  $I_{k-1}$  сопровождаемых объектов, отождествленных на предыдущих шагах обработки, либо с новым объектом (завязка новой трассы объекта).

**Этап 2.** На данном этапе осуществляется оценивание координат состояния объектов, которое состоит в определении для  $k$ -го момента времени векторов оценок  $\mathbf{x}_k^{(i)}$  и матриц  $\mathbf{D}_k^{(i)}$  апостериорных дисперсий ошибок оценок для каждого  $i$ -го объекта совокупности  $I_k$  сопровождаемых объектов.

Среди объектов, подлежащих оцениванию, могут быть выделены:

- 1) объект, с которым отождествлено текущее  $k$ -е измерение и который на предыдущих шагах уже был отождествлен («старый» отождествленный объект);
- 2) объекты, с которыми не отождествлено текущее  $k$ -е измерение, но которые на предыдущих шагах уже были отождествлены («старые» неоттождествленные объекты).

3) объект, с которым отождествлено текущее  $k$ -е измерение и который на предыдущих шагах не был отождествлен с измерениями («новый» отождествленный объект);

Для «старых» отождествленных объектов вектор  $\hat{\mathbf{x}}_k^{(i)}$  оценки координат состояния и матрица  $\mathbf{D}_k^{(i)}$  апостериорных дисперсий ошибок оценивания формируются с помощью соотношений расширенного фильтра Калмана [5,6]:

$$\begin{aligned}
 \hat{\mathbf{x}}_k^{(i)} &= \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(i)} + \mathbf{K}_{\phi k}^{(i)} \left[ \mathbf{z}_k - \mathbf{h}(t_k, \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(i)}, \mathbf{x}_{ck}) \right], \\
 \mathbf{D}_k^{(i)} &= \mathbf{D}_{k|k-1}^{(i)} - \mathbf{D}_{k|k-1}^{(i)} \left[ \mathbf{J}_k^{(i)} \right]^T \left[ \mathbf{D}_{\Delta z k}^{(i)} \right]^{-1} \mathbf{J}_k^{(i)} \mathbf{D}_{k|k-1}^{(i)}, \\
 \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(i)} &= \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{(i)}, \Delta t_{k|k-1}), \\
 \mathbf{D}_{k|k-1}^{(i)} &= \mathbf{\Phi}_{k|k-1}^{(i)} \mathbf{D}_{k-1}^{(i)} \left[ \mathbf{\Phi}_{k|k-1}^{(i)} \right]^T + \mathbf{D}_{\mathbf{x}k}^{(i)}, \\
 \mathbf{D}_{\Delta z k}^{(i)} &= \mathbf{J}_k^{(i)} \mathbf{D}_{k|k-1}^{(i)} \left[ \mathbf{J}_k^{(i)} \right]^T + \mathbf{D}_{\mathbf{ик}} \quad (9) \\
 \mathbf{K}_{\phi k}^{(i)} &= \mathbf{D}_k^{(i)} \left[ \mathbf{J}_k^{(i)} \right]^T \left[ \mathbf{D}_{\mathbf{ик}} \right]^{-1}, \\
 \mathbf{J}_k^{(i)} &= \frac{\partial \mathbf{h}(t_k, \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(i)}, \mathbf{x}_{ck})}{\partial \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(i)}}, \\
 \mathbf{\Phi}_{k|k-1}^{(i)} &= \frac{\partial \mathbf{f}(t_k, \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(i)}, \mathbf{x}_{ck})}{\partial \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(i)}},
 \end{aligned}$$

где  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(i)}$  и  $\mathbf{D}_{k|k-1}^{(i)}$  – экстраполированные с предыдущего момента времени  $t_{k-1}$  на текущий момент  $t_k$  значения соответственно вектора оценки и матрицы ошибок этой оценки;

$\mathbf{K}_{\phi k}^{(i)}$  – весовая матрица фильтра в момент  $t_k$ ;

$\mathbf{\Phi}_{k|k-1}^{(i)}$  и  $\mathbf{J}_k^{(i)}$  – матрицы производных векторной переходной функции и векторной функции полезного сигнала соответственно, вычисляемые в точке экстраполированной оценки;

$\mathbf{D}_{\Delta z k}^{(i)}$  – корреляционная матрица невязки  $\left[ \mathbf{z}_k - \mathbf{h}(t_k, \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(i)}, \mathbf{x}_{ck}) \right]$

зарегистрированного измерения  $\mathbf{z}_k$  относительно измерения, ожидаемого от  $i$ -го ИРИ;

$\mathbf{D}_{ик}^{(i)}$  – корреляционная матрица шумов измерений;

$\mathbf{D}_{xк}^{(i)}$  – корреляционная матрица шумов состояния.

С учетом **Ошибка! Источник ссылки не найден.** матрица  $\Phi_{k|k-1}^{(i)}$  и ее компоненты определяются соотношениями:

$$\Phi_{k|k-1}^{(i)} = \left. \frac{\partial \mathbf{h}(t_k, \mathbf{x}, \mathbf{x}_{ck})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(i)}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{\partial f_x}{\partial \theta} & \frac{\partial f_x}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_x}{\partial V} \\ 0 & 1 & 0 & \frac{\partial f_y}{\partial \theta} & \frac{\partial f_y}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_y}{\partial V} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{\partial f_z}{\partial \theta} & \frac{\partial f_z}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_z}{\partial V} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(i)}}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_x}{\partial \theta} &= V \cos \theta \cos \varphi \Delta t_{k|k-1}, & \frac{\partial f_x}{\partial \varphi} &= -V \sin \theta \sin \varphi \Delta t_{k|k-1}, & \frac{\partial f_x}{\partial V} &= \sin \theta \cos \varphi \Delta t_{k|k-1}, \\ \frac{\partial f_y}{\partial \theta} &= V \cos \theta \sin \varphi \Delta t_{k|k-1}, & \frac{\partial f_y}{\partial \varphi} &= V \sin \theta \cos \varphi \Delta t_{k|k-1}, & \frac{\partial f_y}{\partial V} &= \sin \theta \sin \varphi \Delta t_{k|k-1}, \\ \frac{\partial f_z}{\partial \theta} &= -V \sin \theta \Delta t_{k|k-1}, & \frac{\partial f_z}{\partial \varphi} &= 0, & \frac{\partial f_z}{\partial V} &= \cos \theta \Delta t_{k|k-1}. \end{aligned} \quad (11)$$

С учетом **Ошибка! Источник ссылки не найден.** и (8) матрица  $\mathbf{J}_k^{(i)}$  и ее компоненты определяются соотношениями:

$$\mathbf{J}_k^{(i)} = \left. \frac{\partial \mathbf{h}(t_k, \mathbf{x}, \mathbf{x}_{ck})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(i)}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_\alpha}{\partial x} & \frac{\partial h_\alpha}{\partial y} & \frac{\partial h_\alpha}{\partial z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial h_\beta}{\partial x} & \frac{\partial h_\beta}{\partial y} & \frac{\partial h_\beta}{\partial z} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^{(i)}}, \quad (12)$$



$$\begin{aligned}
 \frac{\partial h_\alpha}{\partial x} &= -\frac{y - y_{ck}}{(x - x_{ck})^2 + (y - y_{ck})^2}, \\
 \frac{\partial h_\alpha}{\partial y} &= -\frac{x - x_{ck}}{(x - x_{ck})^2 + (y - y_{ck})^2}, \\
 \frac{\partial h_\alpha}{\partial z} &= 0, \\
 \frac{\partial h_\beta}{\partial x} &= (z - z_{ck})(x - x_{ck}) \times \\
 &\times \frac{1}{\left( (x - x_{ck})^2 + (y - y_{ck})^2 + (z - z_{ck})^2 \right) \sqrt{(x - x_{ck})^2 + (y - y_{ck})^2}}, \\
 \frac{\partial h_\beta}{\partial y} &= -(z - z_{ck})(y - y_{ck}) \times \\
 &\times \frac{1}{\left( (x - x_{ck})^2 + (y - y_{ck})^2 + (z - z_{ck})^2 \right) \sqrt{(x - x_{ck})^2 + (y - y_{ck})^2}}, \\
 \frac{\partial h_\beta}{\partial z} &= -\frac{\sqrt{(x - x_{ck})^2 + (y - y_{ck})^2}}{\left( (x - x_{ck})^2 + (y - y_{ck})^2 + (z - z_{ck})^2 \right)}.
 \end{aligned} \tag{13}$$

Для «старых» неотождествленных объектов оценивание координат состояния в момент  $t_k$  состоит в экстраполяции значений вектора  $\hat{\mathbf{x}}_k^{(i)}$  оценки и матрицы  $\mathbf{D}_k^{(i)}$  апостериорных дисперсий с предыдущего момента времени  $t_{k-1}$  на текущий момент  $t_k$ :

$$\begin{aligned}
 \hat{\mathbf{x}}_k^{(i)} &= \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{(i)}, \Delta t_{k|k-1}), \\
 \mathbf{D}_k^{(i)} &= \mathbf{\Phi}_{k|k-1}^{(i)} \mathbf{D}_{k-1}^{(i)} \left[ \mathbf{\Phi}_{k|k-1}^{(i)} \right]^T + \mathbf{D}_{\mathbf{x}k}^{(i)}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

Для «новых» отождествленных объектов оценивание координат состояния состоит в формировании вектора начальной оценки  $\hat{\mathbf{x}}_{0k}^{(i)}$  и матрицы  $\mathbf{D}_{0k}^{(i)}$  дисперсий ошибок начального оценивания, используемых для завязки трассы конкретного объекта в пространстве состояний. При этом полагается, что вектор начальной оценки  $\hat{\mathbf{x}}_{0k}^{(i)}$  и матрица  $\mathbf{D}_{0k}^{(i)}$  дисперсий формируются на основании данных, полученных от других источников информации, например, из системы активной радиолокации.

**Этап 3.** На данном этапе осуществляется отождествление измерения и объекта. Отождествление состоит в определении наиболее правдоподобной гипотезы из  $I_k$  гипотез, сформированных на этапе 1. Для каждой  $r$ -й гипотезы соответствия измерения одному из сопровождаемых объектов используется гауссовская аппроксимация функции правдоподобия, определяемая выражением [7]:

$$p_r(\mathbf{z}_k) = \exp\left(-1/2 \left[ \mathbf{z}_k - \mathbf{h}(t_k, \hat{\mathbf{x}}_k^{(i)}, \mathbf{x}_{ck}) \right]^T \left[ \mathbf{D}_{\Delta z k}^{(i)} \right]^{-1} \left[ \mathbf{z}_k - \mathbf{h}(t_k, \hat{\mathbf{x}}_k^{(i)}, \mathbf{x}_{ck}) \right] \right), r = \overline{1, I_k - 1} \quad (15)$$

Для гипотезы соответствия измерения «новому» объекту значение функции  $p_r(\mathbf{z}_k)$  правдоподобия задается из экспертных соображений равным постоянной величине  $p_{I_k}$ , которая играет роль пороговой.

Далее среди всех гипотез выбирается та, для которой значение функции правдоподобия является максимальным. При этом перечень объектов, определяемый наиболее правдоподобной гипотезой, а также оценки  $\mathbf{x}_k^{(i)}$  их координат состояния и дисперсии  $\mathbf{D}_k^{(i)}$  ошибок этих оценок являются результатом работы алгоритма на  $k$ -м шаге.

#### 4. Результаты моделирования

На рис. 2 представлены результаты моделирования работы рассмотренного алгоритма многоцелевого сопровождения для случая сопровождения трех подвижных воздушных маневрирующих ИРИ. На рисунке приведены траектории наблюдаемых ИРИ (кривые 1), оценки координат состояния ИРИ, получаемые в процессе их сопровождения (кривые 2), и траектория самолета-носителя системы радиомониторинга (прямая 3). При моделировании на вход алгоритма каждую секунду подавались измерения от одного из наблюдаемых ИРИ. Ошибки измерений угловых координат задавались с помощью средних квадратических отклонений (СКО) и принимались равными  $0,1^\circ$ . СКО начальных оценок, полученных, например, из системы активной радиолокации, составляли: 1000 м – по координатным компонентам,  $5^\circ$  – углам ориентации

вектора скорости в горизонтальной и вертикальной плоскостях, 10 м/с – по модулю скорости.

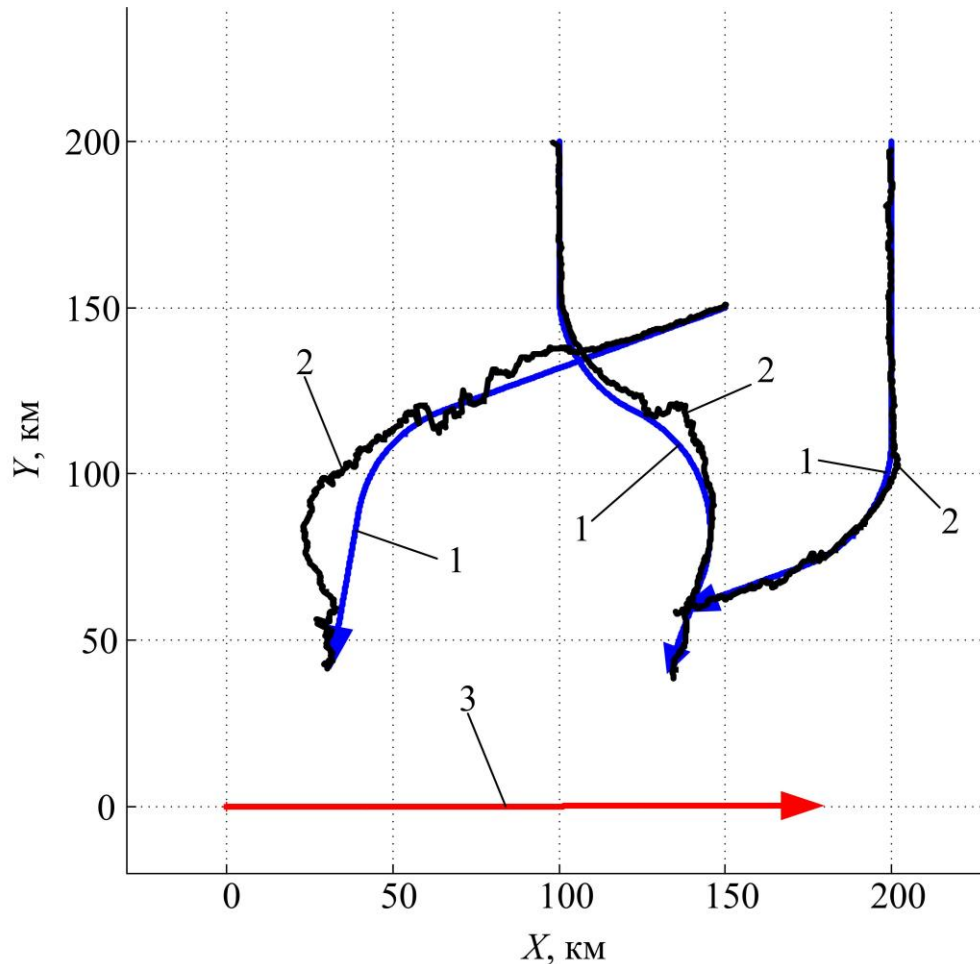


Рис. 2 – Моделирование алгоритма многоцелевого трассового сопровождения воздушных маневрирующих ИРИ

Следует отметить, что при сопровождении подвижных ИРИ важную роль играют траектории взаимного движения самолета-носителя системы радиомониторинга ИРИ. В случае, когда угол  $\psi$  (рис. 3) между направлением на объект и его курсом приближается к  $90^\circ$ , точность сопровождения ухудшается вплоть до срыва. Это связано с тем, что область возможных местоположения ИРИ (изображена на рис. 3 овалами  $\Omega$ ), определяемая на основании ошибок оценки направления движения, в случае, когда  $\psi \approx 90^\circ$ , располагается вдоль линии пеленга (см. рис. 3 а), при этом возможно некорректное уточнение оценки местоположения по поступившему измерению,

что по мере поступлений измерений может привести к формированию ложной траектории и, в конечном счете, к срыву сопровождения.

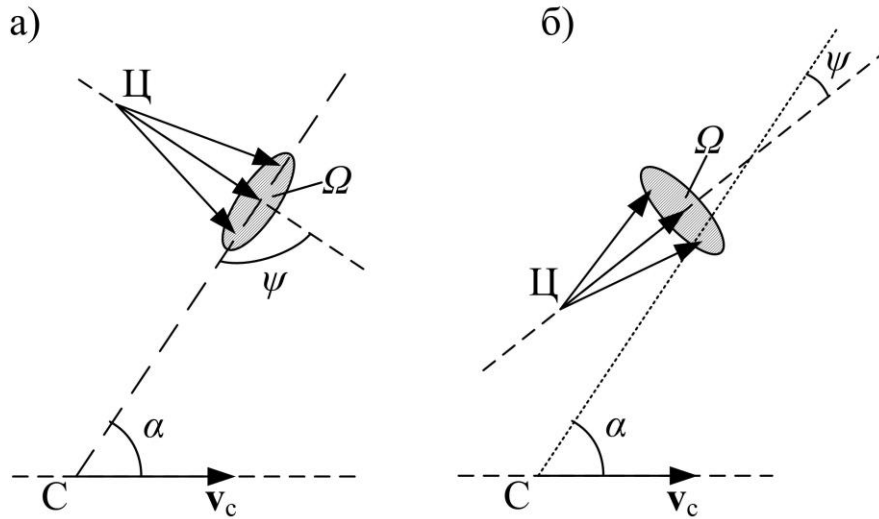


Рис. 3 – Геометрия взаимного движения самолета-носителя системы радиомониторинга и сопровождаемого объекта

Для иллюстрации описанного случая на рис. 4 представлены результаты моделирования. На рисунке отмечены истинная траектория наблюдаемых ИРИ (кривая 1), оценки координат состояния ИРИ, получаемые в процессе сопровождения (кривая 2), и траектория самолета-носителя системы радиомониторинга (прямая 3). Из рисунка видно, что имеет место срыв сопровождения, что связано с упомянутыми выше причинами.

На рис. 5 (а) представлены зависимости азимута ИРИ от времени (красная линия – значения азимута ИРИ, вычисленные на основании оцененных координат ИРИ, черная линия – истинные значения азимута). На рисунке рис. 5 (б) представлена зависимость угла  $\psi$  между направлением на ИРИ и направлением его скорости от времени. Из рис. 5 можно видеть, что угол  $\psi$  после 300 с приближается к значению  $90^\circ$ , что соответствует моменту, когда наступает срыв сопровождения, который можно видеть на рис. 4, при этом значения азимутов для истинной и оцененной траекторий ИРИ совпадают.

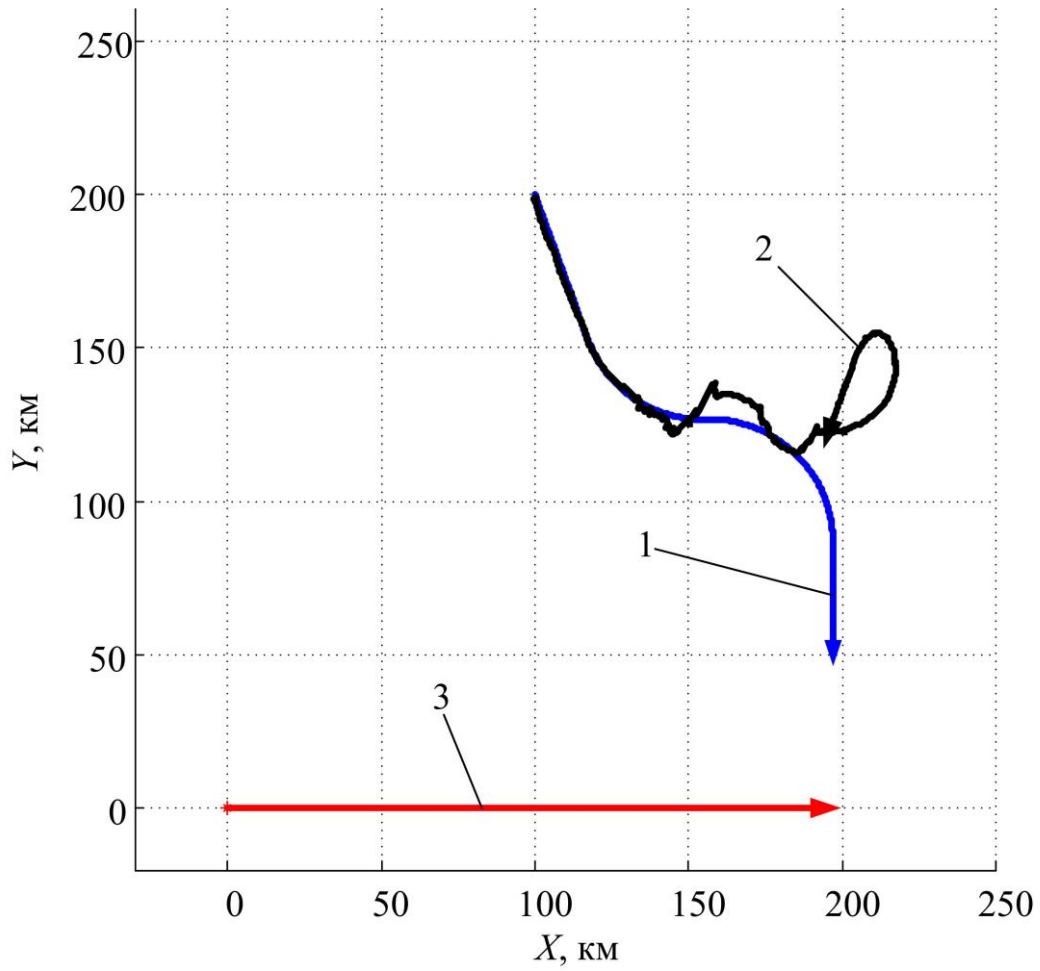


Рис. 4 – Моделирование алгоритма сопровождения подвижного воздушного ИРИ, для случая срыва сопровождения

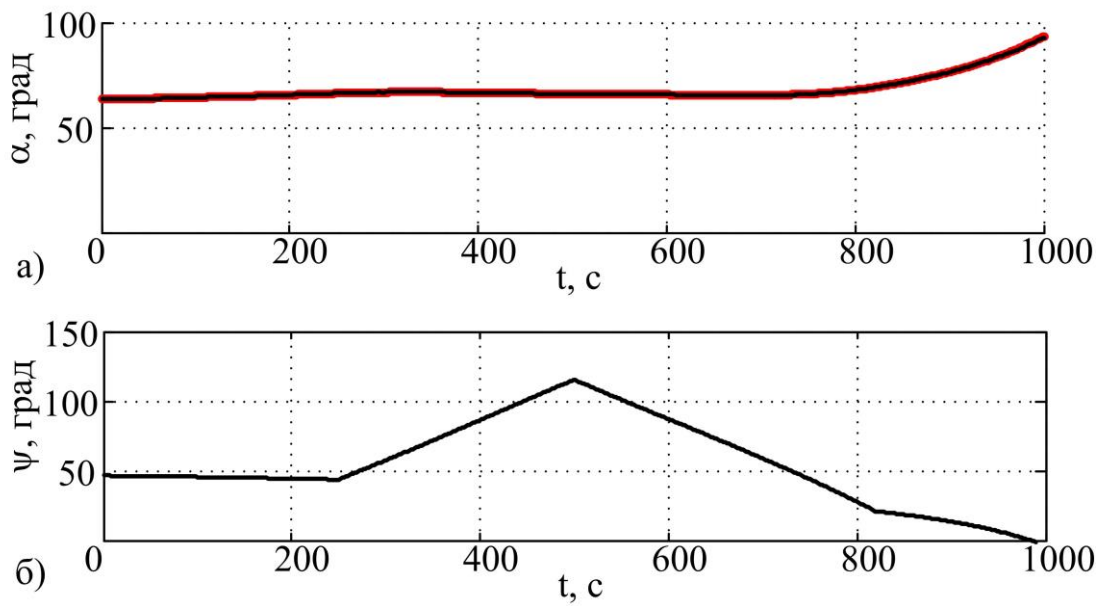


Рис. 5 – Зависимость угла между направлением на ИРИ и его курсом от времени

## 5. Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) Разработанный алгоритм позволяет осуществлять уверенное многоцелевое трассовое сопровождение воздушных маневрирующих ИРИ при наличии начальных оценок их координат состояния;

2) Устойчивое сопровождение воздушных маневрирующих ИРИ возможно, когда угол между направлением на объект и вектором его скорости отличен от  $90^\circ$  по крайней мере на  $10-20^\circ$ .

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №15-08-04000-а).

## Литература

1. В.С. Верба, В.И. Меркулов. Проблемы разработки мобильных многодатчиковых систем мониторинга окружающего пространства. // Полёт. 2015. №5.
2. Верба В.С., Меркулов В.И., Белов С.Г., Белик Б.В. и др. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Состояние и перспективы. Монография. Книга 2. / Под ред. Вербы В.С. М.: Радиотехника, 2016.
3. Авиационные системы радиуправления: учебник для военных и гражданских ВУЗов и научно-исследовательских организаций. / В.И. Меркулов, В.С. Чернов, В.А. Гандурин, В.В. Дрогалин, А.Н. Савельев. Под ред. В.И. Меркулова. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 2008.
4. Верба В.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В. и др. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Ч.3. / Под ред. В.С. Вербы и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника. 2010.
5. Белик Б.В., Белов С.Г. Использование калмановской фильтрации для слежения за источниками радиоизлучения в системе радиомониторинга воздушного базирования // Динамика сложных систем. 2016. №3.

6. Бар-Шалом Я. Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы: в 2 ч. / Я. Бар-Шалом, Х.-Р. Ли; [пер. с англ. Д.Д. Дмитриева]. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 239 с.
7. Ярлыков М.С., Богачев А.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Т.1. / Под ред. М.С. Ярлыкова. М.: Радиотехника. 2012.

**Ссылка на статью:**

Б. В. Белик, С. Г. Белов. Многоцелевое сопровождение источников радиоизлучения в однопозиционной системе радиомониторинга воздушного базирования. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/3/text.pdf>