

УДК 623.746.4-519 + 533.6.013.622  
EDN TSCBZU

А. С. СОЛОНАР, П. А. ХМАРСКИЙ, С. В. ЦУПРИК

## ТРАЕКТОРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ БОРТОВОЙ ОПТИКО-ЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

*В статье рассматриваются особенности построения траекторных измерителей координат и параметров движения наземных объектов в бортовых оптико-локационных системах. Описывается структура разработанного траекторного измерителя по данным бортовой оптико-локационной системы. Приводятся некоторые результаты компьютерного моделирования предлагаемого траекторного измерителя.*

**Ключевые слова:** оптико-локационная система, автономная система навигации, беспилотный летательный аппарат, траекторный измеритель.

### Введение

Бортовые оптико-локационные системы (БОЛС) получают все большее распространение как в гражданской, так и в специальной сфере [1–5]. Важнейшая задача БОЛС – обеспечение потребителя необходимой визуальной информацией о наблюдаемых объектах [2, 4]. Особую трудность вызывает автономный сбор информации о наземных объектах, когда в качестве носителя БОЛС выступает летательный аппарат [4–7]. Это связано с необходимостью учета собственного движения носителя БОЛС и сложной сигнально-помеховой обстановки. В таком случае возрастает роль алгоритмов интеллектуального анализа данных и набирающих популярность в других областях методов траекторной (межкадровой) обработки данных БОЛС [2, 4, 5–8]. Несмотря на отмеченную актуальность, особенности построения алгоритмов траекторной (межкадровой) обработки данных БОЛС в известной литературе практически не рассматриваются. Авторами настоящей статьи ранее [3] была предложена методика расчета разовых (внутрикадровых) погрешностей оценивания местоположения наблюдаемых наземных объектов в прямоугольной системе координат (СК) по данным БОЛС. Методика позволяет учитывать [3]:

- оценки вектора состояния, определяющего местоположение и параметры движения носителя БОЛС, и расчетные значения соответствующих среднеквадратических погрешностей (СКП);
- оценки вектора состояния, определяющего угловую ориентацию БОЛС, и расчетные значения соответствующих им СКП;
- параметры камеры БОЛС (ширину угла зрения, разрешение оптического изображения).

---

**Солонар** Андрей Сергеевич. Кандидат технических наук, доцент, профессор, Военная академия Республики Беларусь. ORCID 0009-0008-7769-3980.

**Хмарский** Петр Александрович. Кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. ORCID 0000-0003-3404-3917.

**Цуприк** Сергей Викторович. Старший инженер, Военная академия Республики Беларусь. ORCID 0009-0006-0080-4713.

Суть предлагаемого авторами подхода заключается в использовании метода линеаризации для замены нелинейных преобразований в окрестности разовых оценок координат наблюдаемых БОЛС объектов [3]. Этот подход позволяет расширить область применения БОЛС и избавиться от ряда недостатков, возникающих на этапе межкадрового сопровождения наземных объектов. В настоящей статье авторы развивают этот подход и рассматривают особенности построения одной из важнейших частей устройства траекторной (межкадровой) обработки данных БОЛС – траекторных измерителей (фильтров) координат и параметров движения наземных объектов.

Структура предлагаемой статьи следующая. Первый раздел посвящен постановке задачи с указанием систем координат, используемых при обнаружении и отождествлении наземных объектов (траекторий) и решении задачи траекторного измерения параметров их движения. Во втором разделе описываются возможные модели движения объектов. В третьем – структура межкадровой (траекторной) обработки в целом и траекторного измерителя в частности. Здесь же приводится набор фильтров из банка фильтров, используемых для фильтрации (траекторного измерения) координатных параметров наблюдаемых объектов и идентификации модели их движения. В четвертом разделе описываются результаты компьютерного моделирования, анализируется эффективность фильтрации для различных моделей и определяется граница их применимости. Основные выводы приводятся в заключении.

## 1. Описание исходных данных и постановка задачи

Исходные данные. Будем считать, что имеется БОЛС, наблюдающая за наземными объектами. Началом отсчета локальной прямоугольной СК  $O(x_{st}, y_{st}, z_{st})$  является точка старта носителя БОЛС с поверхности Земли (рис. 1, а), при этом ось  $x_{st}$  направлена на Север,  $y_{st}$  – по вертикали места вверх, а  $z_{st}$  – на Восток.

Пилотажно-навигационный комплекс носителя БОЛС формирует оценки векторов состояния носителя  $\hat{\mathbf{a}}_{инс k}$  (углы ориентации, вырабатываемые инерциальной навигационной системой в связанной прямоугольной СК, оси которой представлены на рис. 1, б) и  $\hat{\mathbf{a}}_{GPS k}$  (координаты положения, вырабатываемые по данным спутниковой навигационной системы в локальной СК, рис. 1, а) и значения матриц ковариации погрешностей их оценивания  $\mathbf{R}_{инс k}, \mathbf{R}_{GPS k}$ :

$$\hat{\mathbf{a}}_{инс k} = \left\| \begin{matrix} \hat{\beta}_k & \hat{\varepsilon}_k & \hat{\gamma}_k \end{matrix} \right\|^T, \quad \hat{\mathbf{a}}_{GPS k} = \left\| \begin{matrix} \hat{x}_k & \hat{y}_k & \hat{z}_k \end{matrix} \right\|^T,$$

$$\mathbf{R}_{инс k} = \left\| \begin{matrix} \sigma_{\beta}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\varepsilon}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\gamma}^2 \end{matrix} \right\|, \quad \mathbf{R}_{GPS k} = \left\| \begin{matrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z^2 \end{matrix} \right\|,$$

где  $\hat{x}_k, \hat{y}_k, \hat{z}_k$  – оценки прямоугольных координат носителя в локальной СК с СКП  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ;  $\hat{\beta}_k, \hat{\varepsilon}_k, \hat{\gamma}_k$  – оценки значений углов рысканья, тангажа и крена с СКП  $\sigma_{\beta}, \sigma_{\varepsilon}, \sigma_{\gamma}$  в связанной СК. Все данные вырабатываются в дискретные моменты времени  $t_k$ , что здесь и далее передается индексом  $k$ .

На выходе БОЛС формируются значения ширины угла зрения в вертикальной плоскости  $\varepsilon_d$ , разрешений цифрового оптического изображения  $X_m, Y_m$ .

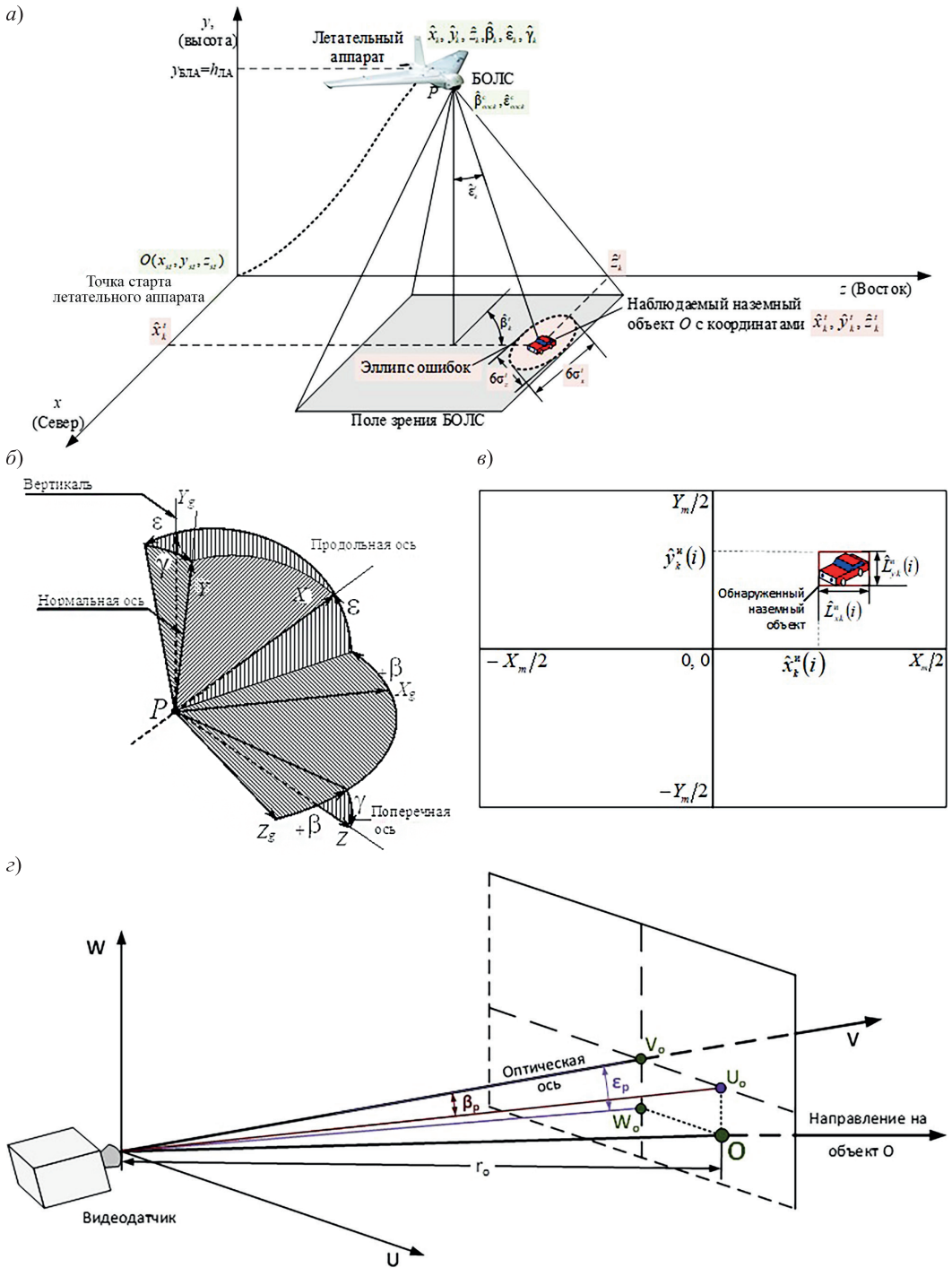


Рис. 1. Системы координат: локальная с центром в точке старта (а); связанная с центром масс  $P$  летательного аппарата – носителя бортовой оптико-локационной системы (б); дискретизованного изображения (в); визирования WUV (з)

Датчики БОЛС формируют оценки вектора состояния угловой ориентации камеры БОЛС и соответствующие им матрицы ковариаций погрешностей  $\hat{\mathbf{a}}_{\text{олск}}^c, \mathbf{R}_{\text{олск}}^c$ :

$$\hat{\mathbf{a}}_{\text{олск}}^c = \left\| \hat{\beta}_{\text{олск}}^c \quad \hat{\varepsilon}_{\text{олск}}^c \right\|^T, \quad \mathbf{R}_{\text{олск}}^c = \left\| \begin{array}{cc} \sigma_{\beta_{\text{олск}}^c}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\varepsilon_{\text{олск}}^c}^2 \end{array} \right\|,$$

где  $\hat{\beta}_{\text{олск}}^c, \hat{\varepsilon}_{\text{олск}}^c$  – оценки углов ориентации камеры БОЛС в вертикальной и горизонтальной плоскостях и в связанной СК с СКП  $\sigma_{\beta_{\text{олск}}^c}^c, \sigma_{\varepsilon_{\text{олск}}^c}^c$ .

На выходе блока внутрикадровой обработки формируются  $N$  разовых оценок (полученных по результатам обработки одного кадра) векторов наблюдения обнаруженных наземных объектов  $\hat{\theta}_k^n(i), i = \overline{1, N}$  (где  $N$  – количество обнаруженных объектов в кадре) и значения матриц ковариаций их погрешностей  $\mathbf{R}_{\theta_k^n}^n(i)$  в СК дискретизованного изображения (рис. 1, в):

$$\hat{\theta}_k^n(i) = \left\| \hat{x}_k^n(i) \quad \hat{y}_k^n(i) \quad \hat{L}_{xk}^n(i) \quad \hat{L}_{yk}^n(i) \right\|, \quad \mathbf{R}_{\theta_k^n}^n(i) = \left\| \begin{array}{cccc} \sigma_x^{n2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^{n2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Lx}^{n2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{Lz}^{n2} \end{array} \right\|,$$

где  $\hat{x}_k^n(i), \hat{y}_k^n(i)$  – оценки координат обнаруженного  $i$ -го объекта в СК дискретизованного изображения;  $\hat{L}_{xk}^n(i), \hat{L}_{yk}^n(i)$  – оценки линейных размеров обнаруженного  $i$ -го объекта в СК дискретизованного изображения (рис. 1, в);  $\sigma_x^n, \sigma_y^n, \sigma_{Lx}^n, \sigma_{Lz}^n$  – разовые СКП оценивания координат обнаруженного объекта и его линейных размеров в СК дискретизованного изображения.

По исходным данным ( $\hat{\mathbf{a}}_{\text{инск}}, \mathbf{R}_{\text{инск}}, \hat{\mathbf{a}}_{\text{GPSk}}, \mathbf{R}_{\text{GPSk}}, \hat{\mathbf{a}}_{\text{олск}}^c, \mathbf{R}_{\text{олск}}^c, \hat{\theta}_k^n(i), \mathbf{R}_{\theta_k^n}^n, \varepsilon_{dp}, X_m, Y_m$ ) для момента времени  $t_k$  в режиме реального времени производится пересчет совокупности  $N$  разовых оценок векторов наблюдения обнаруженных наземных объектов  $\hat{\theta}_k^t(i)$  и значений ковариационных матриц (КМ) погрешностей их оценивания  $\mathbf{R}_{\theta_k^t}^t(i)$  в местную прямоугольную СК:

$$\hat{\theta}_k^t(i) = \left\| \hat{x}_k^t(i) \quad \hat{z}_k^t(i) \quad \hat{L}_{xk}^t(i) \quad \hat{L}_{zk}^t(i) \right\|, \quad \mathbf{R}_{\theta_k^t}^t(i) = \left\| \begin{array}{cccc} \sigma_x^{t2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^{t2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Lx}^{t2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{Lz}^{t2} \end{array} \right\|,$$

где в локальной СК  $\hat{x}_k^t(i), \hat{z}_k^t(i)$  – разовые оценки координат обнаруженного  $i$ -го объекта;  $\hat{L}_{xk}^t(i), \hat{L}_{zk}^t(i)$  – оценки линейных размеров обнаруженного  $i$ -го объекта;  $\sigma_x^t, \sigma_y^t, \sigma_{Lx}^t, \sigma_{Lz}^t$  – разовые СКП оценивания координат обнаруженного объекта и их линейных размеров.

Принято, что высота всех наблюдаемых объектов  $\hat{z}_k^t(i)$  в местной прямоугольной СК постоянна и равна высоте точки старта носителя БОЛС  $y_{st}$  [3].

Пересчет оценок векторов наблюдения обнаруженных наземных объектов и значений матриц ковариации их погрешностей в локальную прямоугольную СК осуществляется в 4 этапа [3].

На первом этапе производится пересчет из СК дискретизованного изображения (в пикселях, см. рис. 1, *в*) в СК визирования (в угловых координатах, относительно центра ориентации оптической камеры; см. рис. 1, *з*):

$$\hat{\varepsilon}_{pk}(i) = \arctg\left(\frac{-\hat{x}_k^n(i)}{\left(R_{opt} \cos(\hat{\varepsilon}_{олс k}^c) - \hat{y}_k^n(i) \sin(\hat{\varepsilon}_{олс k}^c)\right)}\right) + \hat{\varepsilon}_{олс k}^c X_m / Y_m,$$

$$\hat{\beta}_{pk}(i) = \arcsin\left(\frac{\left(R_{opt} \sin(\hat{\varepsilon}_{олс k}^c) + \hat{y}_k^n(i) \cos(\hat{\varepsilon}_{олс k}^c)\right)}{\sqrt{R_{opt}^2 + (\hat{x}_k^n(i))^2 + (\hat{y}_k^n(i))^2}}\right),$$

$$\mathbf{R}_{\theta k}^B(i) = \mathbf{H}^n \mathbf{R}_{\theta k}^n(i) (\mathbf{H}^n)^T \left\| \begin{matrix} m_\Gamma & 0 \\ 0 & m_B \end{matrix} \right\| + \left\| \begin{matrix} \sigma_{\beta_{олс k}^c}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\varepsilon_{олс k}^c}^2 \end{matrix} \right\|, \quad \mathbf{H}^n = \left\| \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{matrix} \right\|,$$

где  $R_{opt} = Y_m / (2 \tan(\varepsilon_d))$  – расстояние от центра оптической оси до центра оси дискретизованного изображения;

$\mathbf{R}_{\theta k}^B(i)$  – КМ погрешностей измерения при переходе из СК дискретизованного изображения в СК визирования;

$m_\Gamma = \varepsilon_d / X_m$ ,  $m_B = m_\Gamma Y_m / X_m$  – линейные коэффициенты преобразования погрешностей измерения;

$\mathbf{H}^n$  – вспомогательная матрица.

На втором этапе определяются прямоугольные координаты наблюдаемых объектов в СК визирования  $WUV$  (см. рис. 1, *з*) и КМ погрешностей их измерений:

$$\hat{r}_{ok}(i) = \hat{y}_k / \cos(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)), \quad \hat{W}_{ok}(i) = \hat{r}_{ok}(i) \sin(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)), \quad \hat{U}_{ok}(i) = \hat{r}_{ok}(i) \sin(\hat{\theta}_{pk}(i)),$$

$$\hat{V}_{ok}(i) = \hat{r}_{ok}(i) \sqrt{\cos^2(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) - \sin^2(\hat{\theta}_{pk}(i))},$$

$$\mathbf{R}_B^{WUV}(i) = \mathbf{H}_B^{WUV}(i) \left\| \begin{matrix} \mathbf{R}_{\theta k}^B(i)_{0,0} + \sigma_y^2 \hat{r}_{ok}(i) & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_{\theta k}^B(i)_{1,1} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{R}_{\theta k}^B(i)_{2,2} \end{matrix} \right\| \left( \mathbf{H}_B^{WUV}(i) \right)^T,$$

$$\mathbf{H}_B^{WUV}(i) = \left\| \begin{matrix} \cos(\hat{\theta}_{pk}(i)) \sin(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) & -\hat{r}_{ok}(i) \sin(\hat{\theta}_{pk}(i)) \cos(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) & \hat{r}_{ok}(i) \cos(\hat{\theta}_{pk}(i)) \cos(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) \\ \sin(\hat{\theta}_{pk}(i)) \sin(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) & \hat{r}_{ok}(i) \cos(\hat{\theta}_{pk}(i)) \sin(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) & \hat{r}_{ok}(i) \sin(\hat{\theta}_{pk}(i)) \cos(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) \\ \cos(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) & 0 & -\hat{r}_{ok}(i) \sin(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) \end{matrix} \right\|,$$

где  $\hat{r}_{ok}(i)$  – дальность до  $i$ -го наблюдаемого объекта;

$\mathbf{R}_B^{WUV}(i)$  – КМ погрешностей разового оценивания координат  $i$ -го наблюдаемого объекта в СК визирования.

На третьем этапе производится пересчет через оценки  $\hat{\alpha}_{инс k} = \left\| \hat{\alpha}_k \quad \hat{\beta}_k \quad \hat{\gamma}_k \right\|^T$  и  $\hat{\alpha}_{олс k}^c = \left\| \hat{\beta}_{олс k}^c \quad \hat{\varepsilon}_{олс k}^c \right\|^T$  в локальную СК согласно функциональным преобразованиям:

$$\hat{\theta}_k^c(i) = \left\| \hat{x}_k^c(i) \quad \hat{y}_k^c(i) \quad \hat{z}_k^c(i) \right\| = \mathbf{B}^T(\alpha, \beta, \gamma) \mathbf{D}^T(\varepsilon_{олс}, \beta_{олс}) \left\| \hat{W}_{ok}(i) \quad \hat{U}_{ok}(i) \quad \hat{V}_{ok}(i) \right\|^T,$$

$$\mathbf{B}(\alpha, \beta, \gamma) = \left\| \begin{matrix} \cos(\hat{\gamma}) & 0 & -\sin(\hat{\gamma}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\hat{\gamma}) & 0 & \cos(\hat{\gamma}) \end{matrix} \right\| \left\| \begin{matrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\hat{\beta}) & \sin(\hat{\beta}) \\ 0 & -\sin(\hat{\beta}) & \cos(\hat{\beta}) \end{matrix} \right\| \left\| \begin{matrix} \cos(\hat{\alpha}) & \sin(\hat{\alpha}) & 0 \\ -\sin(\hat{\alpha}) & \cos(\hat{\alpha}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix} \right\|,$$

$$\mathbf{D}(\alpha_{\text{олс}}, \beta_{\text{олс}}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\hat{\varepsilon}_{\text{олс}k}) & \sin(\hat{\varepsilon}_{\text{олс}k}) \\ 0 & -\sin(\hat{\varepsilon}_{\text{олс}k}) & \cos(\hat{\varepsilon}_{\text{олс}k}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\hat{\beta}_{\text{олс}k}) & \sin(\hat{\beta}_{\text{олс}k}) & 0 \\ -\sin(\hat{\beta}_{\text{олс}k}) & \cos(\hat{\beta}_{\text{олс}k}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \hat{y} = \hat{y}_k,$$

$$\hat{\beta} = \hat{\beta}_k, \hat{\alpha} = \hat{\alpha}_k.$$

Оценка КМ погрешностей измерений в локальной СК производится с помощью метода линеаризации нелинейного функционального преобразования СК визирования в локальную СК (рис. 1, а и з) с учетом погрешностей измерения  $\mathbf{R}_{\text{инск}}$  согласно выражениям:

$$\mathbf{R}_k^c(i) = \mathbf{H}_k^c(i) \mathbf{R}_B^{WUV}(i) (\mathbf{H}_k^c(i))^T + \begin{bmatrix} \sigma_{\beta}^2 \hat{r}_{\text{ок}}^2(i) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\alpha}^2 \hat{r}_{\text{ок}}^2(i) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\gamma}^2 \hat{r}_{\text{ок}}^2(i) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_k^c(i) = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\gamma})\cos(\hat{\alpha}) - \sin(\hat{\gamma})\sin(\hat{\beta})\sin(\hat{\alpha}) & -\cos(\hat{\beta})\sin(\hat{\alpha}) & \sin(\hat{\gamma})\cos(\hat{\alpha}) - \cos(\hat{\gamma})\sin(\hat{\beta})\sin(\hat{\alpha}) \\ \cos(\hat{\gamma})\sin(\hat{\alpha}) + \sin(\hat{\gamma})\sin(\hat{\beta})\cos(\hat{\alpha}) & \cos(\hat{\beta})\sin(\hat{\alpha}) & \sin(\hat{\gamma})\sin(\hat{\alpha}) - \cos(\hat{\gamma})\sin(\hat{\beta})\cos(\hat{\alpha}) \\ -\sin(\hat{\gamma})\cos(\hat{\beta}) & \sin(\hat{\beta}) & \cos(\hat{\gamma})\cos(\hat{\beta}) \end{bmatrix}.$$

На четвертом этапе производится пересчет в локальную СК путем переноса:

$$\hat{\theta}_k(i) = \begin{bmatrix} \hat{x}_k^c(i) & \hat{y}_k^c(i) & \hat{z}_k^c(i) \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} \hat{x}_k & \hat{y}_k & \hat{z}_k \end{bmatrix}^T - \begin{bmatrix} x_{st} & y_{st} & z_{st} \end{bmatrix}^T.$$

В КМ погрешностей измерения  $\hat{\theta}_k(i)$  аддитивно добавляются КМ погрешностей измерений  $\mathbf{R}_{\text{GPSk}}$ :  $\mathbf{R}_{\theta k}(i) = \mathbf{R}_k^c(i) + \mathbf{R}_{\text{GPSk}}$ . Для учета искажений вносимых в оценку линейных размеров наблюдаемых объектов вычисления производятся для четырех точек  $(\hat{x}_k^u(i), \hat{y}_k^u(i), (\hat{x}_k^u(i) + \hat{L}_{xk}^u, \hat{y}_k^u(i)), (\hat{x}_k^u(i) + \hat{L}_{xk}^u, \hat{y}_k^u(i) - \hat{L}_{yk}^u))$  и  $(\hat{x}_k^u(i), \hat{y}_k^u(i) - \hat{L}_{yk}^u)$ , после чего определяются значения ширины и высоты в локальной СК.

Цель работы заключается в получении оценок фильтрации  $\hat{\alpha}_k(j)$  и прогнозирования  $\hat{\alpha}_{\text{ок}}(j)$  векторов состояния наблюдаемых наземных объектов (координат и параметров движения – КиПД) и значений соответствующих им матриц ковариаций  $\mathbf{R}_k(j), \mathbf{R}_{\text{ок}}(j)$  для  $N_{\text{тр}}$  ( $j = 1, N_{\text{тр}}$ ) сопровождаемых траекторий наземных объектов в локальной СК с использованием оценок  $\hat{\theta}_k^t(i)$  и значений матриц ковариации их погрешностей  $\mathbf{R}_{\theta k}^t(i)$ . Под параметрами движения в данном случае понимаются составляющие скорости и ускорения наблюдаемого объекта в прямоугольной СК. Задача фильтрации решается в условиях неопределенности относительно модели движения сопровождаемых наземных объектов. Возможное число гипотез моделей движения наземных объектов считается постоянным и не меняется от кадра к кадру. Фильтрация координат и параметров наземных объектов осуществляется с помощью адаптивного многогипотезного измерителя с межкадровой памятью (Interacting Multiple Model – IMM), т.к. он позволяет минимизировать погрешности фильтрации при смене модели движения без затягивания переходных процессов [17–25]. Число гипотез, формируемых в IMM на каждом шаге измерения, всегда фиксировано благодаря слиянию результатов условной фильтрации в одну результирующую оценку



и учету вероятностей взаимного перехода между гипотезами с предыдущего шага измерения [24]. Задача отождествления уже сопровождаемых траекторий с разовыми оценками считается решенной, сопровождаемый наземный объект наблюдается и обнаруживается в каждом кадре.

## 2. Рассматриваемые модели движения наземных объектов

Наиболее сложным с точки зрения наблюдения является движущийся объект (автомобиль, мотоцикл и т.д.). Всю траекторию движения автомобиля можно разбить на отдельные участки: остановка, движение с постоянной скоростью, разгон, торможение или поворот с практически постоянной перегрузкой. Закономерности изменения координат и параметров наблюдаемого объекта на отдельном участке можно описать моделью задающего воздействия, состоящей из регулярной части и случайной. Последняя соответствует некоррелированным или коррелированным случайным перемещениям объекта, описываемым полиномом на один порядок большим, чем для регулярной части задающего воздействия.

Смена моделей движения описывается марковской цепью из  $N$  возможных моделей, где вероятность наступления каждого события (движения наблюдаемого объекта, описываемое какой-либо моделью) зависит только от состояния, достигнутого в предыдущем событии (модели на предыдущем шаге измерения). Марковская цепь задается матрицей вероятностей переходов  $\|\pi_{ij}\|$  ( $i = 1 \dots N, j = 1 \dots N$ ), учитывающей вероятность перехода модели движения саму в себя (т.е. то, что модель не сменится с текущего шага наблюдения на следующий) и в другие модели. Практические результаты показали: вероятность того, что модель не сменится, равна  $\|\pi_{ii}\| = 0,9$  ( $i = 1 \dots N$ ), а вероятности перехода в любую другую одинаковы и равны  $\|\pi_{ij}\| = 0,1/(N - 1)$  для  $i \neq j$ .

Измерителем, учитывающим  $N$  моделей движения и вероятности перехода  $\|\pi_{ij}\|$  этих моделей друг в друга и в самих в себя, является ИММ-фильтр. В общем случае он представляет собой  $N$  фильтров, настроенных на разные модели движения (порядок фильтра определяется порядком полинома регулярной части модели задающего воздействия) и работающих параллельно. В процессе работы ИММ-фильтра вычисляются апостериорные вероятности каждой модели движения  $p(\mu|\mathbf{f}')$  ( $i = 1 \dots N$ ), формируется результирующая оценка вектора состояния в виде взвешенной с вероятностями  $p(\mu|\mathbf{f}')$  суммы оценок векторов состояния на выходе каждого канала.

Для формирования структуры траекторного измерителя имеет смысл рассмотреть модели движения наземных объектов, которые предполагается задействовать в составе банка фильтров при идентификации каждого конкретного наблюдаемого объекта. Используемые в траекторном измерителе модели движения приведены в табл. 1. Чтобы охватить множество наиболее распространенных типов движения объектов, были выбраны модели неподвижного объекта (полином 0-го порядка), движущегося равномерно (полином 1-го и модель Сингера 0-го порядка) и равноускоренно (полином 2-го и модель Сингера 1-го порядка).

На основе приведенных в табл. 1 моделей 0-го, 1-го и 2-го порядка с некоррелированными приращениями синтезированы фильтры Калмана 0-го, 1-го и 2-го порядка соответственно. На основе моделей движения по Сингеру 0-го и 1-го порядка синтезированы фильтры Сингера 0-го и 1-го порядка.

Таблица 1

Модели движения, используемые в алгоритмах фильтрации

№	Модель	Уравнение модели	Примечание
1	0-го порядка с некоррелированными приращениями	$\mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{a}_k + K_M \boldsymbol{\mu}_{0k}$	Состав вектора состояния – $\mathbf{a}_{k+1} = \ x_{k+1}\ $ (прямоугольная координата $x$ ), $K_M$ – коэффициент интенсивности маневра, $\boldsymbol{\mu}_{0k}$ – стандартизованная гауссовская случайная величина
2	1-го порядка с некоррелированными приращениями	$\mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{B}\mathbf{a}_k + \boldsymbol{\mu}_{0k},$ $\mathbf{B} = \begin{Bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{Bmatrix}, \mathbf{S} = \begin{Bmatrix} \Delta t^2/2 \\ \Delta t \end{Bmatrix}$	Состав вектора состояния – $\mathbf{a}_{k+1} = \ x_{k+1} \ V_{x(k+1)}\ ^T$ (прямоугольная координата $x$ и скорость ее изменения $V_x$ ), $\boldsymbol{\mu}_{0k}$ – центрированный гауссовский случайный вектор с корреляционной матрицей, равной $\sigma_M^2 \mathbf{S}\mathbf{S}^T$ .
3	2-го порядка с некоррелированными приращениями	$\mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{B}\mathbf{a}_k + \boldsymbol{\mu}_{mk},$ $\mathbf{B} = \begin{Bmatrix} 1 & \Delta t & \Delta t^2/2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix}$	Состав вектора состояния – $\mathbf{a}_{k+1} = \ x_{k+1} \ V_{x(k+1)} \ a_{x(k+1)}\ ^T$ (прямоугольная координата $x$ , скорость ее изменения $V_x$ и ускорение $a_x$ ), $\boldsymbol{\mu}_{mk}$ – центрированный гауссовский случайный вектор с корреляционной матрицей, равной $\mathbf{M} = \sigma_M^2 \mathbf{S}\mathbf{S}^T$ , $\mathbf{S} = \ \Delta t^3/6 \ \Delta t^2/2 \ \Delta t\ ^T$ – матрица пересчета случайных приращений вектора состояния
4	движения по Сингеру 0-го порядка	$\mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{B}\mathbf{a}_k + \boldsymbol{\mu}_{mk},$ $\mathbf{B} = \begin{Bmatrix} 1 & \frac{1 - e^{-k_m \Delta t}}{2k_m} \\ \frac{1 - e^{-k_m \Delta t}}{2k_m} & e^{-k_m \Delta t} \end{Bmatrix}$	Состав вектора состояния – $\mathbf{a}_{k+1} = \ x_{k+1} \ V_{x(k+1)}\ ^T$ (прямоугольная координата $x$ , скорость ее изменения $V_x$ и ее ускорение $a_x$ ), $\boldsymbol{\mu}_{0k}$ – центрированный гауссовский случайный вектор с ковариационной матрицей, равной $\mathbf{M} = (\sigma_M^{(c)})^2 \begin{Bmatrix} M_k^{1,1} & M_k^{1,2} \\ M_k^{1,2} & M_k^{2,2} \end{Bmatrix},$ $M_k^{1,1} = \frac{-3 + 4e^{-k_m \Delta t} - e^{-2k_m \Delta t} + 2k_m \Delta t}{2k_m^3},$ $M_k^{1,2} = \frac{1 + e^{-2k_m \Delta t} - 2e^{-k_m \Delta t}}{2k_m^2}, M_k^{2,2} = \frac{1 - e^{-k_m \Delta t}}{k_m};$ $k_m = 1/\tau_m$ – постоянная маневра, $\tau_m$ – время маневра
5	движения по Сингеру 1-го порядка	$\mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{B}\mathbf{a}_k + \boldsymbol{\mu}_{mk},$ $\mathbf{B} = \begin{Bmatrix} 1 & \Delta t & b_{13} \\ 0 & 1 & \tau_m^2 - \tau_m^2 e^{\frac{-\Delta t}{\tau_m}} \\ 0 & 0 & e^{\frac{-\Delta t}{\tau_m}} \end{Bmatrix},$ $b_{13} = -\tau_m^2 + \tau_m \Delta t + \tau_m^2 e^{\frac{-\Delta t}{\tau_m}}$	Состав вектора состояния – $\mathbf{a}_{k+1} = \ x_{k+1} \ V_{x(k+1)} \ a_{x(k+1)}\ ^T$ (прямоугольная координата $x$ , скорость ее изменения $V_x$ и ускорение $a_x$ ), $\boldsymbol{\mu}_{mk}$ – центрированный гауссовский случайный вектор с ковариационной матрицей, равной $\mathbf{M} = (\sigma_M^{(c)})^2 \begin{Bmatrix} M_k^{1,1} & M_k^{1,2} & M_k^{1,3} \\ M_k^{1,2} & M_k^{2,2} & M_k^{2,3} \\ M_k^{1,3} & M_k^{2,3} & M_k^{3,3} \end{Bmatrix},$ $M_k^{1,1} = \frac{1 - e^{-k_m \Delta t} + 2k_m \Delta t + \frac{2k_m^3 \Delta t^3}{3} - 2k_m^2 \Delta t^2 - 4k_m \Delta t e^{-k_m \Delta t}}{2k_m^5},$ $M_k^{1,2} = \frac{1 + e^{-2k_m T} - 2e^{-k_m \Delta t} + 2k_m T e^{-k_m T} - 2k_m T + k_m^2 T^2}{2k_m^4},$ $M_k^{1,3} = [1 + e^{-2k_m T} - 2k_m T e^{-k_m T}] / 2k_m^3,$ $M_k^{2,2} = [-3 + 4e^{-k_m T} - e^{-2k_m T} + 2k_m T] / 2k_m^3,$ $M_k^{2,3} = [1 + e^{-2k_m T} - 2e^{-k_m T}] / 2k_m^2; M_k^{3,3} = [1 - e^{-2k_m T}] / 2k_m,$ $k_m = 1/\tau_m$ – постоянная маневра, $\tau_m$ – время маневра



### 3. Устройство межкадровой обработки опτικο-локационной информации и входящий в его состав траекторный измеритель координат и параметров движения наземных объектов

Рассмотрим структуру межкадровой обработки, в рамках которой функционирует траекторный измеритель. При автономном сборе информации по данным БОЛС используется опτικο-локационный координатор системы самонаведения ЛА, с помощью которого осуществляется однократное внутрикадровое обнаружение, распознавание и последовательное межкадровое автоматическое сопровождение неподвижных и движущихся одиночных и групповых наземных объектов на фоне поверхности Земли [4, 6, 7 9]. Координатор позволяет выполнять межкадровую обработку, т.е. объединение во времени отдельных решений о наличии или отсутствии объекта и его классе, а также улучшить характеристики обнаружения (распознавания) и оценки КиПД (снижает СКП). Задача решается методами траекторной обработки, которая реализуется в устройстве межкадровой обработки опτικο-локационной информации. Межкадровая обработка осуществляется последовательно во времени (от кадра к кадру) по мере поступления новых отметок (обнаруженных наземных объектов), формируемых устройством внутрикадровой обработки. Межкадровая обработка опτικο-локационной информации (см. рис. 2) состоит из перечисленных ниже этапов [4, 10, 11, 12]:

- 1) обнаружения новых траекторий;
- 2) отождествления принятых отметок с уже сопровождаемыми траекториями;
- 3) оценки КиПД наблюдаемых наземных объектов;
- 4) удаления (сброс) траекторий из автоматического сопровождения.

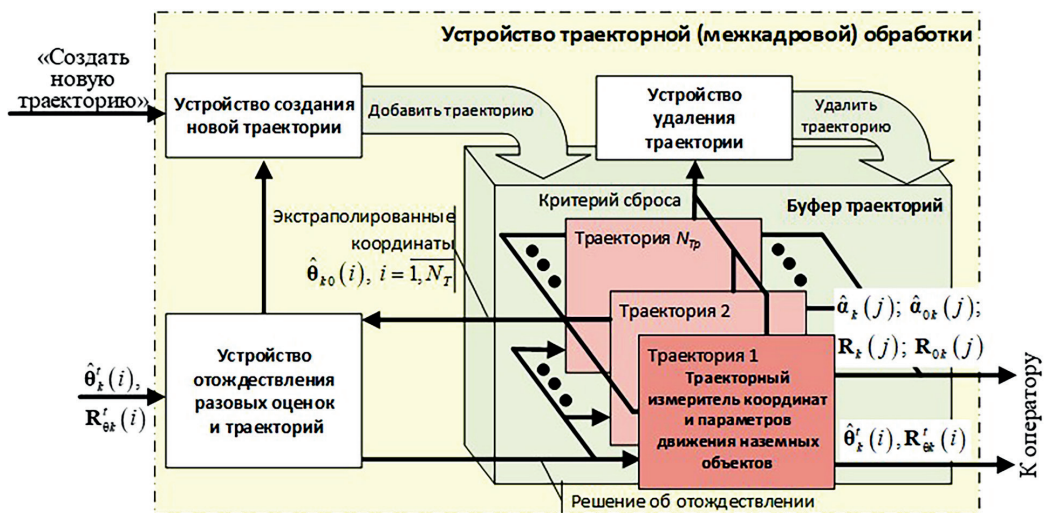


Рис. 2. Упрощенная структурная схема устройства траекторной (межкадровой) обработки опτικο-локационной информации

Как видно из рисунка, принцип работы устройства межкадровой обработки заключается в следующем. Устройство отождествления разовых оценок и траекторий распределяет разовые оценки координат наземных объектов по сопровождаемым траекториям, отбрасывая ложные. Траекторные измерители КиПД наземных объек-

тов (создаются отдельно для каждой траектории) объединяют разовые оценки координат наземных объектов с различных кадров одного объекта, фильтруют значения его вектора состояния и экстраполируют (прогнозируют) их на следующий интервал обновления данных с минимальными СКП. Новая траектория создается по соответствующей команде оператора в реальном времени в случае появления нового, ранее не наблюдавшегося объекта. После выдачи этой команды оператор выбирает оценку координат интересующего его наземного объекта. Инициализация новой траектории происходит в устройстве создания новой траектории на основе данных, выбранных оператором. С выхода устройства межкадровой обработки выдаются оценки фильтрованного и экстраполированного векторов состояния объектов и значения их матриц ковариации погрешностей для всех сопровождаемых траекторий в заданный момент времени в локальной СК.

При оценке КиПД наблюдаемых наземных объектов для каждой сопровождаемой траектории в траекторном измерителе фильтруются и экстраполируются координаты и параметры межкадровых траекторий объектов.

При практическом применении устройства оценивания КиПД наблюдаемых наземных объектов необходимо учитывать:

- 1) возникновение эффекта «виртуальных ускорений» (нелинейного изменения угловых координат при прямолинейном движении наблюдаемого объекта), для устранения которого алгоритмы фильтрации и экстраполяции необходимо реализовать в прямоугольной СК [13, 14];
- 2) искажения, вносимые нелинейными преобразованиями вектора состояния носителя БОЛС в связанной и локальной СК и погрешностями его оценки [3];
- 3) оценку вектора состояния наблюдаемого объекта с учетом его возможных маневров. При этом в устройстве фильтрации и экстраполяции должны учитываться нелинейные преобразования, описанные выше, а также обеспечиваться возможность расчета в режиме реального времени при темпе обновления информации от 10 и более раз в секунду;
- 4) искажения, вносимые нелинейными преобразованиями вектора состояния угловой ориентации БОЛС и обусловленные погрешностями измерений датчиков [3];
- 5) параметры БОЛС (ширину угла зрения, оптическое разрешение изображения, погрешности разового оценивания, произведенного устройством внутрикадровой обработки);
- 6) факт того, что при наблюдении наземных объектов обычно анализируются модели движения 0-го, 1-го и 2-го порядков (табл. 1), описывающие неподвижные, перемещающиеся с постоянной скоростью или с постоянным ускорением объекты соответственно [15, 16].

Важно подчеркнуть, что использование траекторного измерителя, учитывающего только одну модель движения наземного объекта, неизбежно приведет к появлению переходных процессов в момент смены модели движения и росту суммарной погрешности измерения КиПД наблюдаемых объектов [16, 17]. Для компенсации динамических погрешностей, возникающих в процессе фильтрации КиПД маневрирующих объектов, необходимо использовать эффективные алгоритмы адаптации, например адаптивные ИММ-фильтры. Введение фильтров Калмана с моделями движения по Сингеру (фильтров Сингера 0-го и 1-го порядков) в структуру ИММ обеспечивает минимизацию погрешностей фильтрации на участках переходных процессов и в про-

цессе маневров [15, 18, 24, 25]. От  $(k-1)$ -го шага измерения на  $k$ -й всегда передается  $N$  гипотез о возможных моделях движения с вероятностями их взаимного перехода.

Структурная схема траекторного измерителя координат и параметров движения наземных объектов по данным бортового оптико-локационного координатора, учитывающего перечисленные особенности, приведена на рис. 3. Модели, используемые при фильтрации, представлены в табл. 1 (на примере канала по координате  $x$ , индекс  $j$  (номер сопровождаемой траектории) опущен).

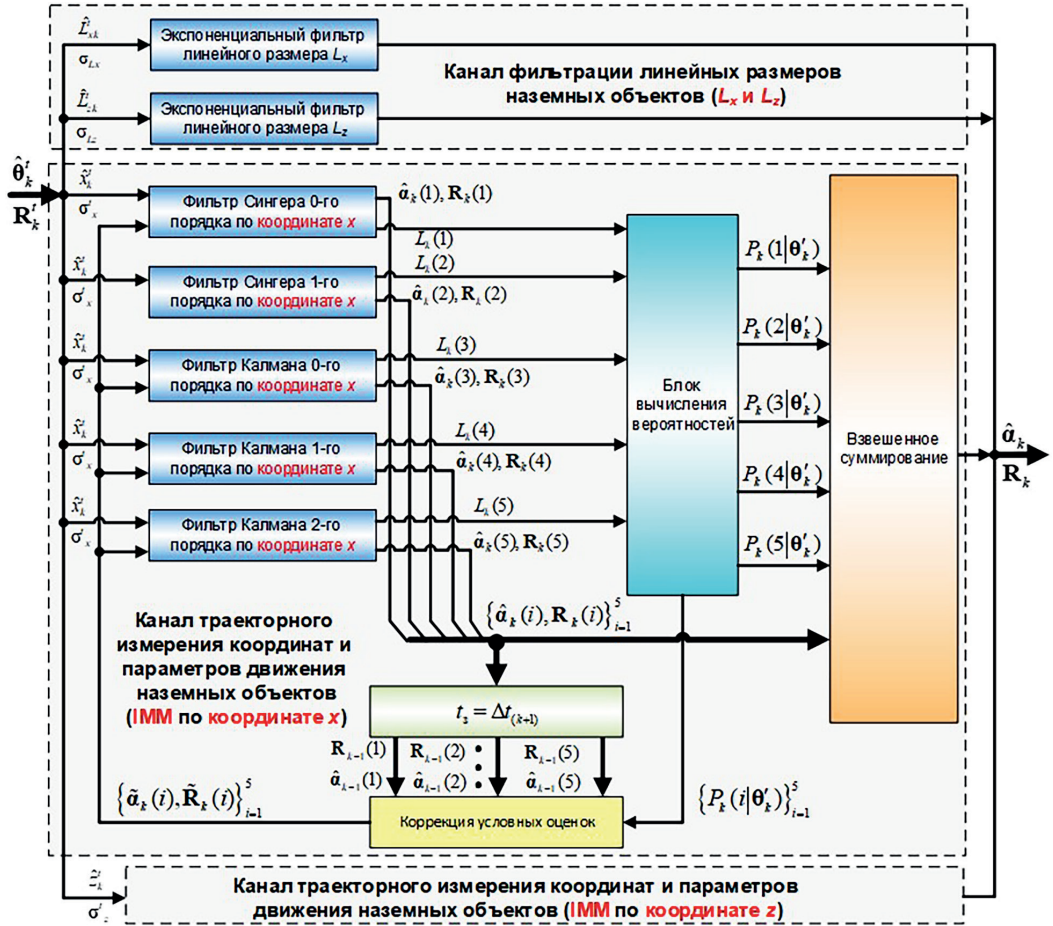


Рис. 3. Структурная схема траекторного измерителя координат и параметров движения наземных объектов

#### 4. Результаты компьютерного моделирования

С целью проверки предложенного устройства было проведено компьютерное моделирование с использованием специального программного комплекса (его структура приведена на рис. 4, а), основанного на межплатформенной визуальной среде разработки Unity [26]. Пример синтезированного видеоизображения наземной обстановки с отмеченными на нем обнаруженными объектами приведен на рис. 4, б. Видно, что в пределах одного кадра наблюдается множество (более 30) наземных объектов, что существенно затрудняет процесс их траекторного сопровождения в реальном времени. Это обосновывает необходимость участия оператора в созда-

нии новых траекторий по предлагаемым оценкам координат наблюдаемых наземных объектов. Перечислим задачи выполненного компьютерного моделирования:

- 1) выявление зависимости показателей качества предлагаемого траекторного измерителя от характера движения наблюдаемого наземного объекта в сравнении с неадаптивными траекторными измерителями;
- 2) обоснование структуры и параметров устройств фильтрации и экстраполяции координат, параметров межкадровых траекторий объектов и их размеров;
- 3) определение граничных условий применения синтезированных устройств фильтрации и экстраполяции координат, параметров межкадровых траекторий объектов и их размеров.

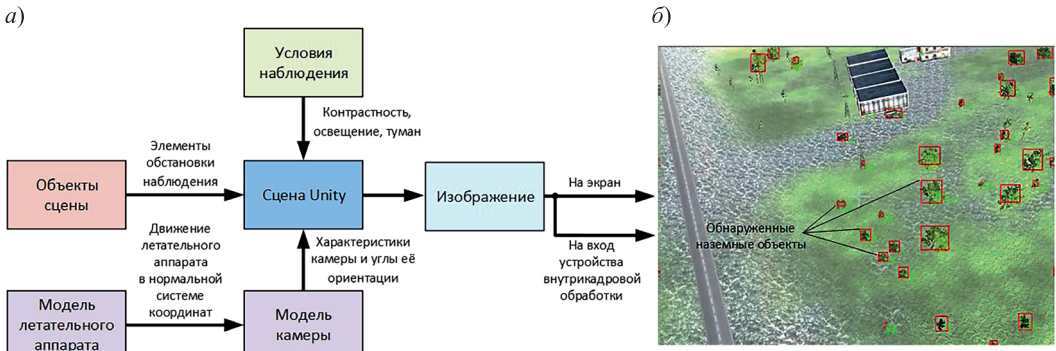


Рис. 4. Структура программного комплекса компьютерного моделирования и экспериментальных исследований (а) и пример смоделированного кадра бортовой оптико-локационной системы (б)

Некоторые результаты компьютерного моделирования (наиболее характерных модельных экспериментов для случаев наблюдения неподвижного, движущегося и маневрирующего наземного объекта) приведены на рис. 5–7.

Как показатель качества рассматриваемых модификаций траекторных измерителей была принята выборочная радиальная СКП оценки местоположения  $\Delta_{\Sigma}(k)$  [13, 22, 27, 28]:

$$\Delta_{\Sigma}(k) = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{exp}} - 1} \sum_{j=1}^{N_{\text{exp}}} \left( [x_{Tj}(k) - x_{\text{fil}j}(k)]^2 + [z_{Tj}(k) - z_{\text{fil}j}(k)]^2 \right)},$$

где  $N_{\text{exp}}$  – количество проведенных опытов (полученных результатов фильтрации траектории в течение всего ее времени наблюдения),  $j$  – номер опыта;  $x_{Tj}(k)$ ,  $z_{Tj}(k)$  – истинные значения координат наблюдаемых наземных объектов,  $k$  – номер шага наблюдения;  $x_{\text{fil}j}(k)$ ,  $z_{\text{fil}j}(k)$  – значения координат наблюдаемых наземных объектов, полученные после фильтрации.

Для сопоставления были синтезированы 4 модификации траекторных измерителей:

- 1) предлагаемый траекторный измеритель (см. рис. 3);
- 2) с использованием фильтра Калмана нулевого порядка при наблюдении прямоугольных координат с независимыми ошибками наблюдения;
- 3) с использованием фильтра Калмана первого порядка при наблюдении прямоугольных координат с независимыми ошибками наблюдения;
- 4) с использованием фильтра Калмана второго порядка при наблюдении прямоугольных координат с независимыми ошибками наблюдения.



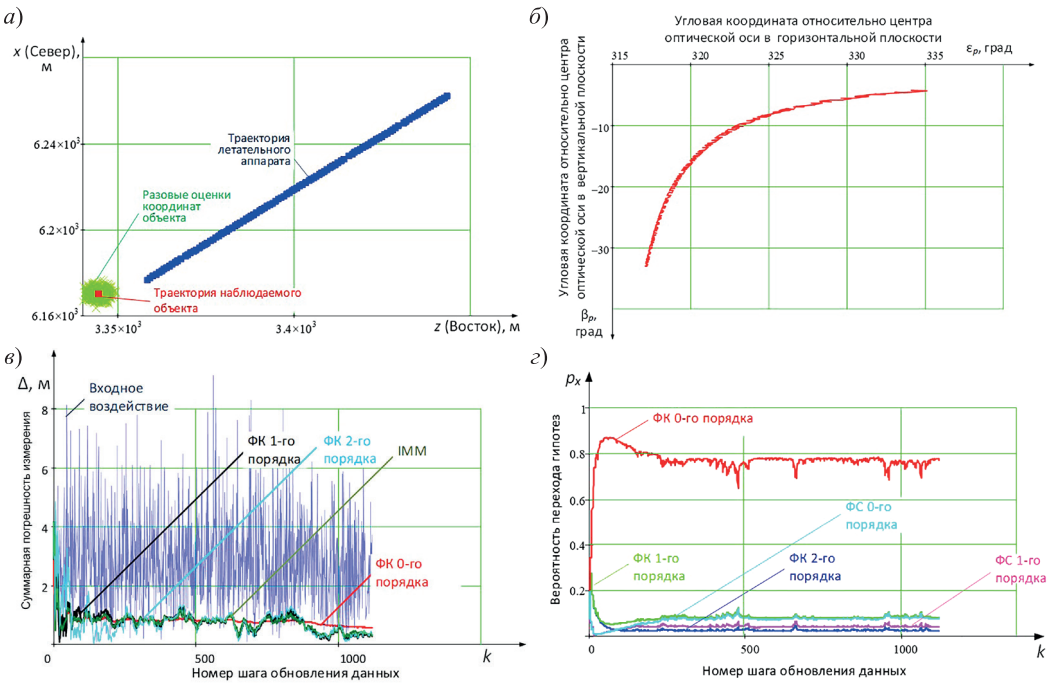


Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования при наблюдении неподвижного наземного объекта (модельный эксперимент №1): а) тактическая ситуация; б) изменение угловых координат объекта; в) суммарные погрешности траекторных измерителей; г) вероятности перехода гипотез ИММ-фильтра (по координате  $x$ )

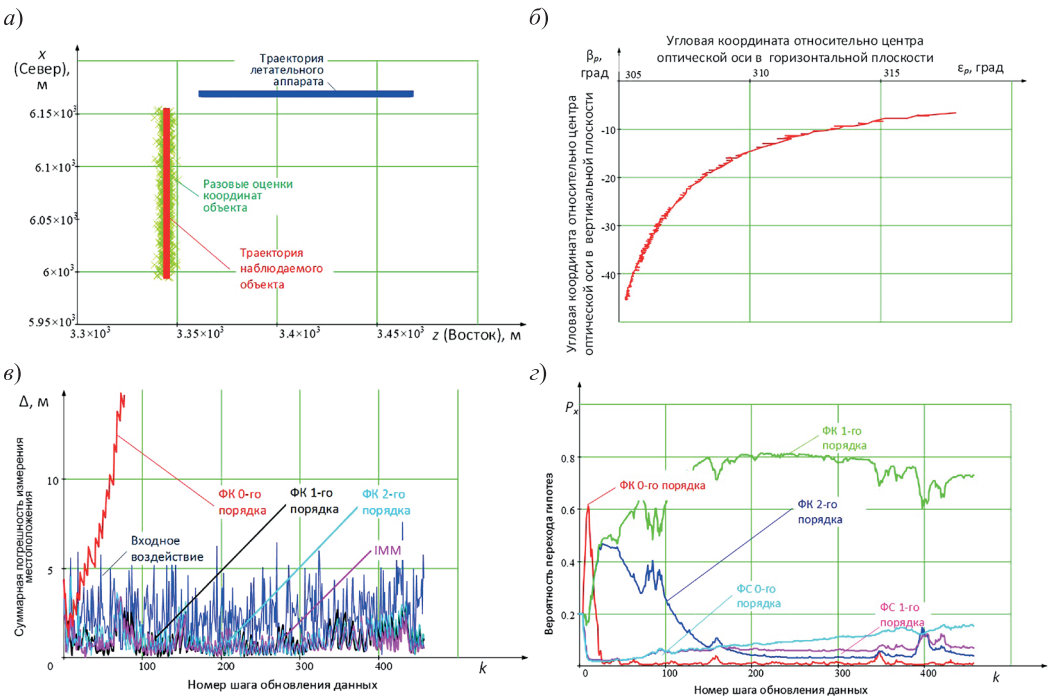


Рис. 6. Результаты компьютерного моделирования при наблюдении наземного объекта, движущегося с постоянной скоростью (модельный эксперимент №2): а) тактическая ситуация; б) изменение угловых координат объекта; в) суммарные погрешности траекторных измерителей; г) вероятности перехода гипотез ИММ-фильтра (по координате  $x$ )

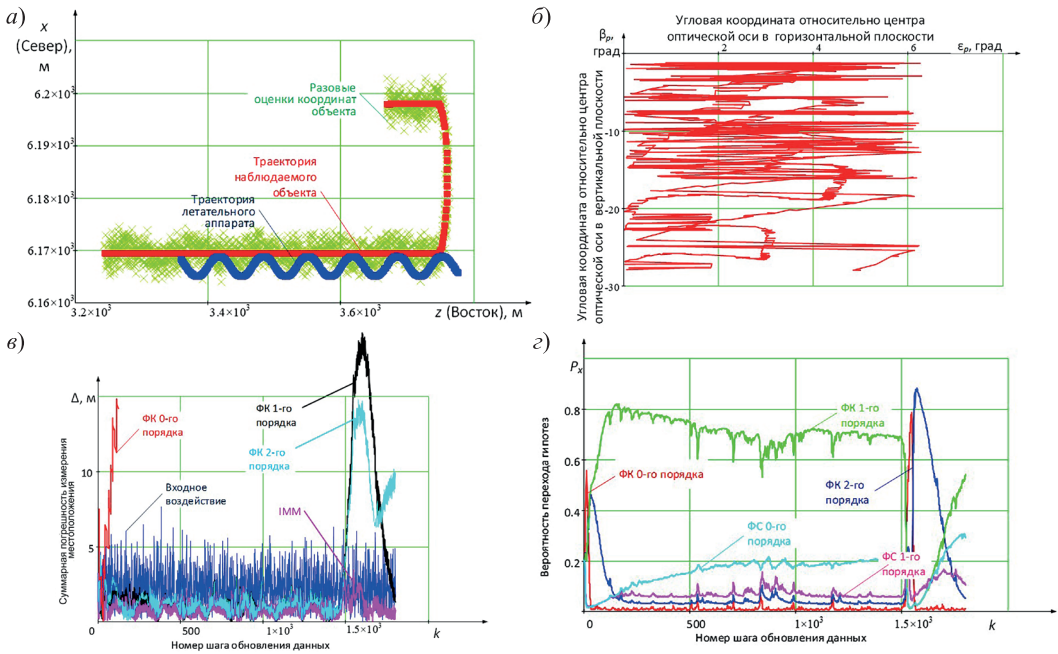


Рис. 7. Результаты компьютерного моделирования при наблюдении маневрирующего наземного объекта (модельный эксперимент №3): а) тактическая ситуация; б) изменение угловых координат объекта; в) суммарные погрешности траекторных измерителей; г) вероятности перехода гипотез IMM-фильтра (по координате  $x$ )

Выбор сопоставляемых траекторных измерителей обусловлен наиболее распространенными моделями движения наземных объектов: неподвижные объекты (фильтр Калмана с моделью движения нулевого порядка), движение с постоянной скоростью (фильтр Калмана с моделью движения первого порядка) и движение с постоянным ускорением (фильтр Калмана с моделью движения второго порядка). Использование модификации фильтра Калмана при наблюдении прямоугольных координат с независимыми погрешностями наблюдения позволяет устранить проблему так называемых «виртуальных ускорений» (за счет предварительного пересчета в локальную СК) и снизить на порядок вычислительные затраты по сравнению с фильтром при наблюдении прямоугольных координат с коррелированными погрешностями наблюдения [13, 27].

В ходе моделирования рассматривались ситуации, когда положение оптической камеры направлено строго вниз. При этом сопровождаемый наземный объект находился всегда в пределах поля зрения камеры.

**Модельный эксперимент №1** (рис. 5). Наблюдаемый наземный объект неподвижен, летательный аппарат движется прямолинейно с постоянной скоростью (рис. 5, а). Несмотря на то что наблюдаемый объект неподвижен, его угловые координаты изменяются по нелинейному закону (рис. 5, б), поэтому возникает эффект виртуальных ускорений [29]. Рассматриваемые модификации траекторных измерителей в таких условиях наблюдения имеют практически равные показатели качества и позволяют снизить суммарную СКП оценки КиПД объекта в 3-5 раз (рис. 5, в) в сравнении с ее разовым значением. Динамика изменения вероятности переходов гипотез в предлагаемой модификации траекторного измерителя (рис. 5, г) показывает, что для него характерно преобладание модели с полиномом нулевого порядка.



Модельный эксперимент №2 (рис. 6). Наблюдаемый наземный объект и летательный аппарат движутся прямолинейно с постоянной скоростью (рис. 6, а). Эффект виртуальных ускорений сохраняется (рис. 6, б). Рассматриваемые модификации траекторных измерителей в таких условиях наблюдения имеют практически равные показатели качества (за исключением фильтра с моделью полинома нулевого порядка, для которого наблюдается срыв сопровождения) и позволяют снизить суммарную СКП оценки КиПД объекта в 3-5 раз (рис. 6, в) в сравнении с ее разовым значением. Динамика изменения вероятности переходов гипотез в предлагаемой модификации траекторного измерителя (рис. 6, г) показывает, что для него характерно преобладание модели с полиномом первого порядка.

Модельный эксперимент №3 (рис. 7). Летательный аппарат движется по «змейке», наземный объект маневрирует – на конечном участке делает разворот на 180° (рис. 7, а). Ввиду сложности движения график на рис. 7, б в этом случае имеет лишь информационный характер. Для всех рассматриваемых модификаций траекторных измерителей (за исключением предлагаемой) происходит срыв сопровождения на этапе маневра наблюдаемого объекта (рис. 7, в). Динамика изменения вероятности переходов гипотез в предлагаемой модификации траекторного измерителя (рис. 7, г) показывает, что для него характерно преобладание модели с полиномом первого порядка на всем участке траектории за исключением этапа маневра, когда преобладает фильтр Калмана с моделью движения по Сингеру первого порядка.

Результаты компьютерного моделирования позволили выявить следующее:

- 1) при сопровождении наземных объектов по угловым координатам возникают аномалии, вызванные принятием неверных решений на этапе отождествления;
- 2) недостатки алгоритмов фильтрации по угловым координатам в связанной СК – эффект виртуальных ускорений и, как следствие, необходимость компенсации собственного движения носителя, низкое качество фильтрации;
- 3) переход к фильтрации в нормальной, неподвижной относительно Земли локальной СК позволяет устранить указанные недостатки;
- 4) суммарная погрешность разового оценивания местоположения составляет 3-8 м (для принятых условий моделирования);
- 5) использование ИММ-фильтра позволило снизить суммарную погрешность измерения в 3-5 раз по сравнению с разовой для всех условий моделирования и скомпенсировать возникающие динамические погрешности.

По результатам работы можно предложить следующие основные рекомендации для практической реализации алгоритмов траекторного измерения:

- 1) фильтрацию координат и параметров движения наземных объектов по данным бортовой оптико-локационной системы необходимо проводить в неподвижной относительно Земли локальной СК;
- 2) в качестве траекторного измерителя координат и параметров движения наземных объектов по данным бортовой оптико-локационной системы должен применяться ИММ-измеритель;
- 3) ИММ должен содержать фильтры Калмана с моделями движения по Сингеру для снижения переходных процессов в момент начала маневра (смены модели движения) наземного объекта.

В дальнейшем предполагается продолжить исследование эффективных адаптивных алгоритмов обработки изображений наблюдаемых объектов [6, 30–33], методов не-

линейной фильтрации при определении физической реализуемости сопровождаемых траекторий [34]. Кроме того, необходимо развивать методы сопровождения маневрирующих объектов, в том числе с использованием угломерной информации [24, 35].

### Заключение

В работе проанализированы особенности построения траекторных измерителей координат и параметров движения (составляющих скорости и ускорения) наземных объектов в БОЛС в рамках межкадровой (траекторной) обработки данных. Описана структура построения траекторного измерителя в виде ИММ-фильтра, приведены типовые модели, включаемые в банк фильтров. Описан адаптивный подход к траекторному измерению, когда модель движения наблюдаемого наземного объекта неизвестна. Представленные результаты компьютерного моделирования наглядно демонстрируют преимущество предлагаемого траекторного измерителя координат и параметров движения маневрирующих и неманеврирующих наземных объектов по сравнению с неадаптивными измерителями, настроенными на одну конкретную модель движения. Полученные в ходе моделирования результаты позволяют определить область применения рассмотренных фильтров и дать общие рекомендации по их использованию.

*Работа выполнена при поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф23М-103).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Алпатов Б.А. и др. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. М: Радиотехника, 2008. 176 с.
2. Бьард Р.У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. М.: Техносфера, 2015. 312 с.
3. Солонар А.С., Хмарский П.А., Михалковский А.А., Цуприк С.В. Методика расчета ошибок разового оценивания местоположения наблюдаемых объектов в бортовых оптико-локационных системах // Доклады БГУИР. 2018. №2 (112). С. 26 – 32.
4. Солонар А.С., Хмарский П.А., Михалковский А.А., Цуприк С.В., Иванюк В.С. Оптико-локационный координатор системы самонаведения беспилотного летательного аппарата // Доклады БГУИР. 2018. №3(113). С.19 – 25.
5. **Современные информационные технологии** в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Себрякова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 556 с.
6. Али Б., Садеков Р.Н., Цодокова В.В. Алгоритмы навигации БПЛА с использованием систем технического зрения // Гироскопия и навигация. Том 30. №4 (119). 2022. С. 87–105. DOI 10.17285/0869-7035.00105.
7. Mueller, K., Atman, J. & Trommer, G.F., Combination of Wide Baseline Image Matching and Tracking for Autonomous UAV Approaches to a Window, *Gyroscopy Navig.*, 2019, 10, 206–215, <https://doi.org/10.1134/S2075108719040138>.
8. Hecker, P., Angermann, M., Bestmann, U. et al., Optical Aircraft Positioning for Monitoring of the Integrated Navigation System during Landing Approach, *Gyroscopy Navig.*, 2019, 10, 216–230, <https://doi.org/10.1134/S2075108719040084>.
9. **Высокоточные системы самонаведения:** расчет и проектирование. Вычислительный эксперимент / под ред. Пупкова К.А. и Егупова Н.Д. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 512 с.
10. Solonar, A.S., Khmarski, P.A., Main problems of trajectory processing and approaches to their solution within the framework of multitarget tracking, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1864, Art. ID 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012004>.

11. Solonar A.S., Khmarski P.A. General construction principles and performance features of trajectory processing by data from one radar data source, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1864, Art. ID 012138. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012138>.
12. Solonar A.S., Khmarskiy P.A., Mihalkovskiy A.A., Tsuprik S.V. Features of trajectory measurement coordinates and parameters of movement of ground objects in on-board optical-location systems, *25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, St. Petersburg, Russia, 2018, pp. 1–5, doi: 10.23919/ICINS.2018.8405853.
13. СолонАР А.С., Хмарский П.А. Влияние условий наблюдения на показатели качества дискретных фильтров Калмана при наблюдении прямоугольных координат // Приложение к известиям НАН РБ. Физико-технические науки. 2014. №2. С. 102–109.
14. СолонАР А.С., Горшков С.А., Хмарский П.А. Особенности применения методов нелинейной фильтрации в радиолокаторах управления воздушным движением для сопровождения траекторий // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. 2014. С. 3706–3717.
15. Li, X.R., Jilkov, V.P., Survey of maneuvering target tracing. Part I: Dynamic models, *IEEE Trans. Aerospace Electronic Syst.*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 1333–1364, doi: 10.1109/TAES.2003.1261132.
16. Хмарский П.А., СолонАР А.С. Особенности реализации адаптивных дискретных квазилинейных фильтров параметров траекторий // Доклады БГУИР. 2012. №8 (70). С. 57–64.
17. Горшков С.А., СолонАР А.С. Сопоставление методов адаптивной дискретной фильтрации координат маневрирующих целей // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2006. Т.4. №6. С. 14–30.
18. СолонАР А.С., Хмарский П.А., Михалковский А.А. Особенности фильтрации координат и параметров движения объекта на этапе совершения установившегося разворота // Доклады БГУИР. 2013. №4 (74). С. 67–73.
19. Blom, H.A.P., Bar-Shalom, Y., The Interacting Multiple Model Algorithm for Systems with Markovian Switching Coefficients, *IEEE Trans. Automatic Control.*, 1988, vol. 33, no. 8, pp. 780–783, doi: 10.1109/9.1299.
20. Fisher K.A., Maybeck P.S. Multiple Model Adaptive Estimation with Filter Spawning, *IEEE Trans. Aerospace Electronic Syst.*, 2002, vol. 38, no. 3, pp. 755–768, doi: 10.1109/TAES.2002.1039397.
21. Дмитриев С.П., Степанов О.А. Многоальтернативная фильтрация в задачах обработки навигационной информации // Радиотехника. 2004. № 7. С. 11–17.
22. Бар-Шалом Я., Ли Х.Р. Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы. Часть 1. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 272 с.
23. Бар-Шалом Я., Ли Х.Р. Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы. Часть 2. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 239 с.
24. Blackman, S., Popoli, R., *Design and analysis of modern tracking systems*, Boston, MA: Artech House, 1999. 1230 p.
25. Bar-Shalom, Y., Li, X. R., Kirubarajan, T., *Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms, and Software*, New York: Wiley, 2001, 558 p., <https://doi.org/10.1002/0471221279>.
26. Хокинг Дж. Unity в действии. Мультиплатформенная разработка на C#. СПб.: Питер, 2018. 336 с.
27. Хмарский П.А., СолонАР А.С. Влияние выбора моделей входного воздействия на точность изменений вектора состояния для фильтров Калмана // Доклады БГУИР. 2012. №7. С.47–53.
28. Khmarski, P.A., Solonar, A.S., Quality indicators of devices for trajectory processing of radar information and methods of their testing, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1864, Art. ID 012004, doi: 10.1088/1742-6596/1864/1/012138.
29. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993. 319 с.
30. Артемьев В.М., Наумов А.О., Кохан Л.Л. Обработка изображений в пассивных обзорно-поисковых оптико-электронных системах. Минск: Беларуская навука, 2014. 116 с.
31. Артемьев В. М., Наумов А.О., Кохан Л.Л. Обнаружение точечных объектов на изображениях в условиях неопределенности // Информатика. 2010. №2. С. 15–24.
32. Артемьев В. М., Наумов А.О., Кохан Л.Л. Обнаружение объектов конечных размеров на изображениях в условиях неопределенности // Информатика. 2010. №4. С. 5–15.
33. Артемьев В. М., Наумов А.О., Кохан Л.Л. Нелинейная фильтрация случайных последовательностей расширенным методом наименьших квадратов // Информатика. 2018. Т. 15, №1. С. 60–69.
34. Solonar, A.S., Khmarski, P.A., Naumov, A.O., Juraev, D.A., Muhammedov, V.M., The use of numerical Monte Carlo integration to verify the physical feasibility of a trajectory based on surveillance radar data, *Stochastic Modelling and Computational Sciences*, 2023, 3(1), pp. 59–73.

- 35. Voronina, N.G., Shafranyuk, A.V.**, Algorithm for constructing trajectories of maneuvering object based on bearing-only information using the Basis Pursuit method, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1864, Art. ID 012004, doi: 10.1088/1742-6596/1864/1/012139.
- 36. Воронина Н.Г., Шафранюк А.В.** Кусочно-стационарная фильтрация в задачах траекторного анализа // Материалы конференции «Управление в морских системах (УМС 2020)». 2020. С. 30–33.
- 

**Solonar, A.S., Khmarski, P.A., and Tsuprik, S.V.** (Military Academy of Republic of Belarus, Minsk, Belarus; Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus)  
Tracking Estimator of the Ground Target Coordinates and Motion Parameters Using Onboard Optical Positioning System Data, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2023, vol. 31, no. 3 (122), pp. 91–108.

**Abstract.** The features of estimators of coordinates and motion parameters of ground targets in onboard optical positioning systems are considered. The structure of the developed estimator using onboard optical positioning system data is described. Some simulation results are provided.

**Key words:** optical positioning system, autonomous navigation system, unmanned aerial vehicle, estimator.

Материал поступил 19.07.2018