

# МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОШИБОК РАЗОВОГО ОЦЕНИВАНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ В БОРТОВЫХ ОПТИКО-ЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

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

*Военная академия Республики Беларусь, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 4 декабря 2017*

**Аннотация.** Основываясь на методе линеаризации представлена методика расчета ошибок разового оценивания местоположения наблюдаемых наземных объектов по данным бортовой оптико-локационной системы. Определены допущения и ограничения, при которых допустимо применение предлагаемой методики в режиме реального времени.

**Ключевые слова:** оптико-локационная система, разовые ошибки, метод линеаризации, корреляционная матрица ошибок.

**Abstract.** Based on the method of linearization, a technique for calculating of a single estimation errors of the observable terrestrial objects location from the data of the onboard optical-location system is presented. The assumptions and limitations under which the proposed technique acceptable in real time operation are defined.

**Keywords:** optical-location system, single errors, linearization method, correlation error matrix.

**Doklady BGUIR. 2018, Vol. 112, No. 2, pp. 26-32**

**Methodology for calculating of the different estimation errors of observed objects location in the airborne optical-location systems**

**A.S. Solonar, P.A. Khmarski, A.A. Mihalkovki, S.V. Tsuprik**

## Введение

Многочисленные публикации, посвященные оптико-локационным системам (ОЛС), свидетельствуют о все более расширяющихся научных, учебных и практических сферах их применения [1, 2]. Одной из разновидностей ОЛС является бортовая ОЛС, важнейшей задачей которой является сопровождение – оценивание координат и траекторных параметров наземных движущихся объектов. Вследствие возникновения эффекта «кажущихся ускорений» сопровождение наземных объектов по данным бортовой ОЛС целесообразно осуществлять в прямоугольной системе координат (СК) [3–6]. При этом с выхода устройства внутрикадровой обработки ОЛС формируются оценки координат наблюдаемых объектов в СК дискретизированного изображения. В известной литературе приведены выражения для пересчета координат различных СК бортовой ОЛС [1]. Однако пересчет ошибок измерений из СК дискретизированного изображения в прямоугольную СК не представлен, что ограничивает возможности анализа результатов наблюдений и их адекватной фильтрации. Целью настоящей статьи является разработка методики расчета ошибок разового оценивания местоположения наблюдаемых объектов в прямоугольной СК по данным бортовой ОЛС в режиме реального времени.

## Постановка задачи

**Начальные условия.** Будем считать, что имеется бортовая ОЛС, наблюдающая за наземными объектами. Началом отсчета координат является точка старта носителя ОЛС с поверхности Земли с прямоугольными координатами  $O(x_{st}, y_{st}, z_{st})$  (рис. 1, а). Пилотажно-навигационный комплекс носителя ОЛС в дискретные моменты времени  $t_k$  формирует оценки векторов состояния носителя  $\hat{\mathbf{a}}_{ei nk}$  (в связанной СК, рис. 1, б),  $\hat{\mathbf{a}}_{GPSk}$  (в нормальной СК, рис. 1, а) и значений их корреляционных матриц (КМ) ошибок оценивания  $\mathbf{R}_{инск}$ ,  $\mathbf{R}_{GPSk}$ :

$$\hat{\mathbf{a}}_{\text{эфнк}} = \left\| \hat{\alpha}_k \quad \hat{\beta}_k \quad \hat{\gamma}_k \right\|^T, \quad \hat{\mathbf{a}}_{\text{GPSk}} = \left\| \hat{x}_k \quad \hat{y}_k \quad \hat{z}_k \right\|^T, \quad \mathbf{R}_{\text{эфнк}} = \begin{bmatrix} \sigma_{\alpha}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\gamma}^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_{\text{GPSk}} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z^2 \end{bmatrix},$$

где  $\hat{x}_k, \hat{y}_k, \hat{z}_k$  – оценки прямоугольных координат носителя в нормальной земной СК со среднеквадратическим отклонением (СКО) ошибок оценивания  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ;  $\hat{\beta}_k, \hat{\epsilon}_k, \hat{\gamma}_k$  – оценки значений углов рысканья, тангажа и крена с СКО ошибок оценивания  $\sigma_{\beta}^2, \sigma_{\epsilon}^2, \sigma_{\gamma}^2$  в связанной СК.

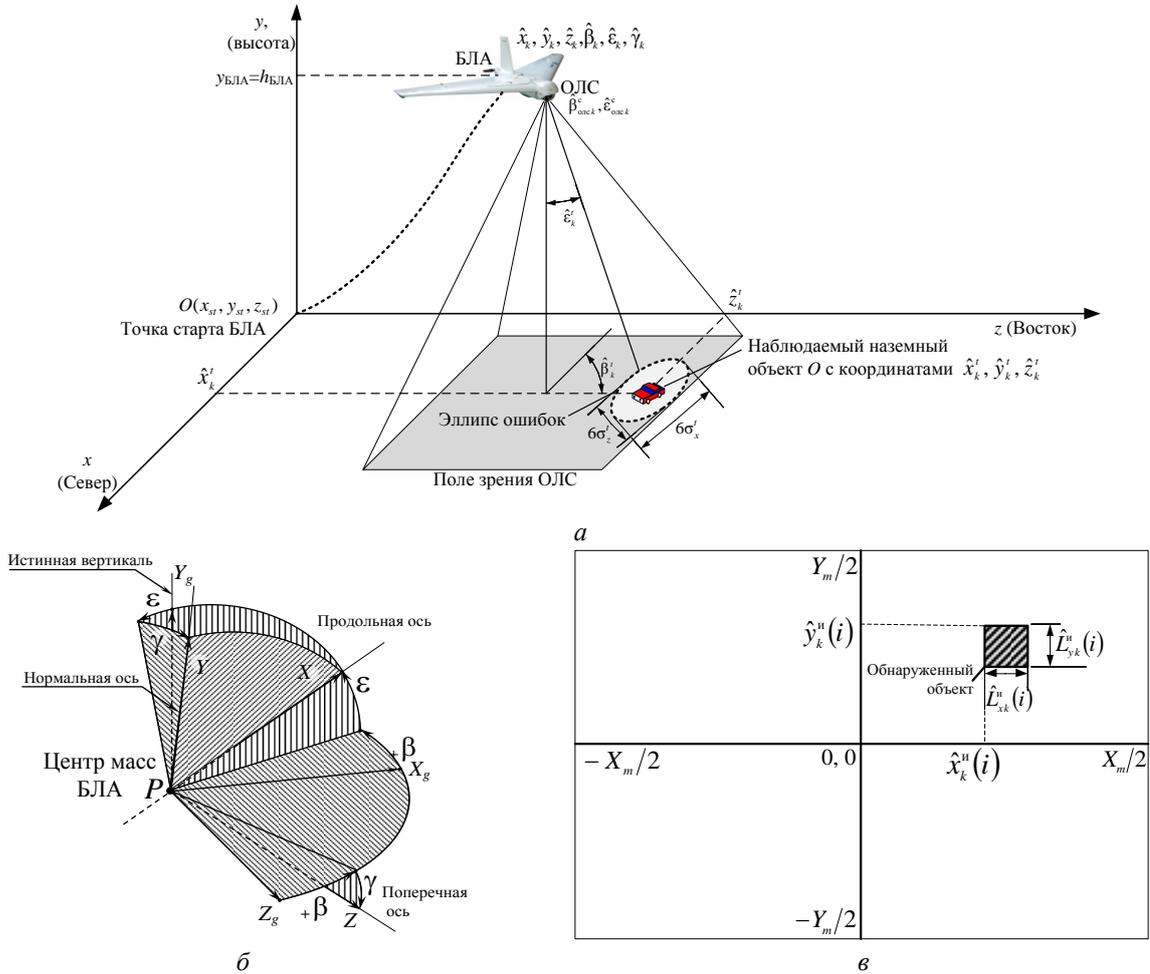


Рис. 1. Система координат: местная с центром в точке старта (а); связанная с центром масс  $P$  носителя оптико-локационной системы (б); дискретизированного изображения (в)

В момент времени  $t_k$  ОЛС выдает значения:  $\epsilon_d$  – ширина угла зрения в вертикальной плоскости;  $X_m, Y_m$  – разрешение цифрового оптического изображения.

Датчики ОЛС формируют оценки вектора состояния угловых ориентаций ОЛС и его корреляционную матрицу ошибок  $\hat{\mathbf{a}}_{\text{иэфнк}}^{\text{н}}, \mathbf{R}_{\text{иэфнк}}$ :

$$\hat{\mathbf{a}}_{\text{иэфнк}}^{\text{н}} = \left\| \hat{\beta}_{\text{иэфнк}}^{\text{н}} \quad \hat{\epsilon}_{\text{иэфнк}}^{\text{н}} \right\|^T, \quad \mathbf{R}_{\text{иэфнк}} = \begin{bmatrix} \sigma_{\beta_{\text{иэфнк}}^{\text{н}}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\epsilon_{\text{иэфнк}}^{\text{н}}}^2 \end{bmatrix},$$

где  $\hat{\beta}_{\text{иэфнк}}^{\text{н}}, \hat{\epsilon}_{\text{иэфнк}}^{\text{н}}$  – оценки углов ориентации ОЛС (в вертикальной и горизонтальной плоскости) и в связанной СК с СКО ошибок оценивания  $\sigma_{\beta_{\text{олск}}^{\text{с}}}, \sigma_{\epsilon_{\text{олск}}^{\text{с}}}$ .

С выхода его блока внутрикадровой обработки формируются  $N$  разовых оценок векторов наблюдения обнаруженных целей  $\hat{\boldsymbol{\theta}}_k^e(i)$ ,  $i=1, N$  и значения их КМ ошибок разового оценивания  $\mathbf{R}_{\theta k}^u(i)$  в СК дискретизированного изображения (рис. 1, в) в момент времени  $t_k$ :

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_k^e(i) = \left\| \hat{x}_k^e(i) \quad \hat{y}_k^e(i) \quad \hat{L}_{xk}^e(i) \quad \hat{L}_{yk}^e(i) \right\|^T, \quad \mathbf{R}_{\theta k}^u(i) = \left\| \begin{array}{cccc} \sigma_x^{u2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^{u2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Lx}^{u2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{Ly}^{u2} \end{array} \right\|,$$

где  $\hat{x}_k^e(i)$ ,  $\hat{y}_k^e(i)$  – оценки координат обнаруженного  $i$ -го объекта в СК дискретизированного изображения;  $\hat{L}_{xk}^e(i)$ ,  $\hat{L}_{yk}^e(i)$  – оценки линейных размеров обнаруженного  $i$ -го объекта в СК дискретизированного изображения;  $\sigma_x^u$ ,  $\sigma_y^u$ ,  $\sigma_{Lx}^u$ ,  $\sigma_{Ly}^u$  – СКО разовых ошибок оценивания координат обнаруженного объекта и их линейных размеров объекта в СК дискретизированного изображения.

*Задача:* по полученным исходным данным ( $O(x_{st}, y_{st}, z_{st})$ ,  $\hat{\mathbf{a}}_{e\bar{i}\bar{n}k}$ ,  $\mathbf{R}_{инск}$ ,  $\hat{\mathbf{a}}_{GPSk}$ ,  $\mathbf{R}_{GPSk}$ ,  $\hat{\boldsymbol{\theta}}_k^e(i)$ ,  $\mathbf{R}_{\theta k}^u$ ,  $\hat{\mathbf{a}}_{i\bar{e}\bar{n}k}^n$ ,  $\mathbf{R}_{i\bar{e}\bar{n}k}^n$ ,  $\varepsilon_d$ ,  $X_m$ ,  $Y_m$ ) для момента времени  $t_k$  разработать методику оценки в режиме реального времени совокупности  $N$  разовых оценок векторов наблюдения обнаруженных целей  $\hat{\boldsymbol{\theta}}_k(i)$  и значений их КМ ошибок разового оценивания  $\mathbf{R}_{\theta k}(i)$  в местной прямоугольной СК:

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

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

### Основная часть

Для обеспечения решения поставленной задачи в режиме реального времени введем ряд упрощающих вычисления допущений и ограничений.

1. Высота всех наблюдаемых объектов  $h_{об}(i)$  считается равной высоте точки старта  $y_{st}$ , скорость изменения высоты наблюдаемого объекта равна нулю.

2. Высота любого  $i$ -го наблюдаемого объекта  $h_{об}(i)$  в поле зрения ОЛС много меньше высоты полета носителя ОЛС  $y_k$ :  $y_k \gg h_{об}(i)$ .

3. Средняя высота рельефа  $h_{ср.рельеф.}$  равна высоте точки старта:  $h_{ср.рельеф.} = y_{st}$ .

4. Перепады рельефа  $\Delta h_{об\bar{e}\bar{i}\bar{n}k}$  пренебрежимо малы в сравнении со значением высоты полета:  $\Delta h_{об\bar{e}\bar{i}\bar{n}k} \ll y_k$ .

5. Углы скольжения наблюдаемых объектов в пределах кадра более  $40^\circ$ .

6. От кадра к кадру размеры объекта изменяются незначительно (в течение 6–10 кадров можно считать, что размеры объекта не меняются).

7. Линейные размеры наблюдаемых объектов не превышают 5–6 % от минимальной стороны размера матрицы цифрового изображения.

Пересчет совокупности  $N$  оценок значений векторов наблюдения  $\hat{\boldsymbol{\theta}}_k^e(i)$  из СК дискретизированного изображения в нормальную СК производится в 4 этапа.

На первом этапе производится пересчет из СК дискретизированного изображения (в пикселях) в СК визирования (в угловых координатах относительно центра ориентации оптической камеры) с учетом значений при помощи функционального преобразования [1]:

$$\begin{aligned} \hat{\varepsilon}_{pk}(i) &= \arctg\left(\frac{-\hat{x}_k^{\hat{\varepsilon}}(i)}{\left(R_{opt} \cos(\hat{\varepsilon}_{i\hat{\varepsilon}nk}^{\hat{\varepsilon}}) - \hat{y}_k^{\hat{\varepsilon}}(i) \sin(\hat{\varepsilon}_{i\hat{\varepsilon}nk}^{\hat{\varepsilon}})\right)} + \hat{\varepsilon}_{i\hat{\varepsilon}nk}^{\hat{\varepsilon}} X_m / Y_m\right), \\ \hat{\beta}_{pk}(i) &= \arcsin\left(\frac{\left(R_{opt} \sin(\hat{\varepsilon}_{i\hat{\varepsilon}nk}^{\hat{\varepsilon}}) + \hat{y}_k^{\hat{\varepsilon}}(i) \cos(\hat{\varepsilon}_{i\hat{\varepsilon}nk}^{\hat{\varepsilon}})\right)}{\sqrt{R_{opt}^2 + (\hat{x}_k^{\hat{\varepsilon}}(i))^2 + (\hat{y}_k^{\hat{\varepsilon}}(i))^2}}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

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

Так как преобразования (1) детерминированные, то в таком случае справедлив линейный пересчет ошибок измерения при переходе из СК дискретизированного изображения в СК визирования. При этом допустим аддитивный учет влияния ошибок позиционирования оптической оси ОЛС:

$$\mathbf{R}_{\theta k}^B(i) = \mathbf{H}^i \mathbf{R}_{\theta k}^i(i) (\mathbf{H}^i)^T + \begin{bmatrix} m_{\Gamma} & 0 \\ 0 & m_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{\beta_{олск}}^c & 0 \\ 0 & \sigma_{\varepsilon_{олск}}^c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где  $m_{\Gamma} = \varepsilon_d / X_m$ ,  $m_B = m_{\Gamma} Y_m / X_m$  – линейные коэффициенты преобразования ошибок измерения;  $\mathbf{H}^i$  – матрица статического пересчета.

На втором этапе определяются прямоугольные координаты наблюдаемых объектов в СК визирования  $WUV$  (рис. 2).

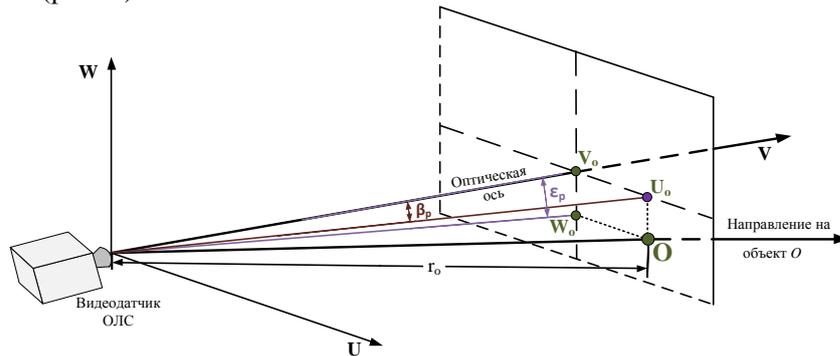


Рис. 2. Система координат визирования  $WUV$

На рис. 3 приведены полученные методом математического моделирования зависимости изменения суммарной ошибки измерения местоположения  $\Delta_{\Sigma, H} / \Delta_{\Sigma}$  от перепадов рельефа  $\Delta h_{\text{рельеф}}$  в процентном отношении относительно высоты носителя  $y_k$ . Как видно из рис. 3, увеличение составляющих КМ  $\mathbf{R}_{\text{GPS}k}$  приводит к снижению влияния перепадов рельефа  $\Delta h_{\text{рельеф}}$ . Наибольший вклад в суммарную ошибку измерения вносят перепады рельефа при минимальной ошибке  $\sigma_{\text{GPS}}$  (на рис. 3 – 1 м), в таком случае требования к допущениям снижаются. Выработанные допущения выполняются при  $\Delta h_{\text{рельеф}} / h_{\text{АЭА}} < 10\%$ , когда суммарный вклад в ошибку измерения местоположения не превышает 10% при минимальных значениях  $\sigma_{\text{GPS}}$ .

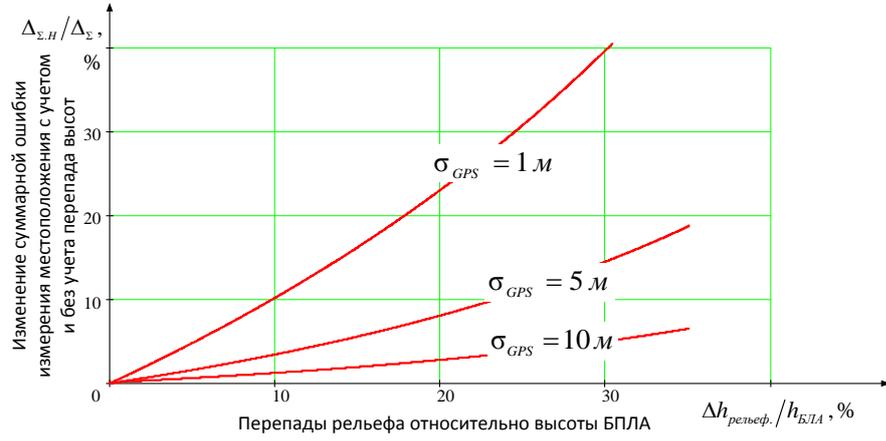


Рис. 3. Влияние перепадов рельефа на суммарную ошибку измерения местоположения

С учетом принятых ограничений дальность до  $i$ -го наблюдаемого объекта равняется  $\hat{r}_{ok}(i) = \hat{y}_k / \cos(\hat{\varepsilon}_{pk}(i))$ . Тогда прямоугольные координаты в СК визирования будут равны:

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

С целью обеспечения работоспособности методики в режиме реального времени оценка КМ в СК визирования производится при помощи метода линеаризации, при использовании которого [3, 4]: для аппроксимации математического ожидания предполагается, что влиянием второго и более высоких порядков можно пренебречь; для аппроксимации КМ предполагается, что все нечетные члены ряда Тейлора будут равны нулю, а влиянием четвертого и более высоких порядков можно пренебречь. В СК визирования КМ ошибок разового оценивания координат  $i$ -го наблюдаемого объекта методом линеаризации определяется как

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

$$\mathbf{H}_A^{WUV}(i) = \begin{vmatrix} \cos(\hat{\theta}_{pk}(i)) \sin(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) & -\hat{r}_{ok}(i) \sin(\hat{\theta}_{pk}(i)) \cos(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) & \hat{r}_{ok}(i) \cos(\hat{\theta}_{pk}(i)) \cos(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) \\ \sin(\hat{\theta}_{pk}(i)) \sin(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) & \hat{r}_{ok}(i) \cos(\hat{\theta}_{pk}(i)) \sin(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) & \hat{r}_{ok}(i) \sin(\hat{\theta}_{pk}(i)) \cos(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) \\ \cos(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) & 0 & -\hat{r}_{ok}(i) \sin(\hat{\varepsilon}_{pk}(i)) \end{vmatrix}, \quad (2)$$

На третьем этапе производится пересчет через оценки  $\hat{\mathbf{a}}_{i\hat{e}\hat{n}k} = \left\| \hat{\alpha}_k \quad \hat{\beta}_k \quad \hat{\gamma}_k \right\|^T$  и  $\hat{\mathbf{a}}_{i\hat{e}\hat{n}k}^{\hat{n}} = \left\| \hat{\beta}_{i\hat{e}\hat{n}k}^{\hat{n}} \quad \hat{\varepsilon}_{i\hat{e}\hat{n}k}^{\hat{n}} \right\|^T$  в нормальную прямоугольную СК согласно функциональным преобразованиям [1]:

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

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

$$\hat{\gamma} = \hat{\gamma}_k, \quad \hat{\beta} = \hat{\beta}_k, \quad \hat{\alpha} = \hat{\alpha}_k, \quad \mathbf{D}(\varepsilon_{i\hat{e}\hat{n}}, \beta_{i\hat{e}\hat{n}}) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\hat{\varepsilon}_{i\hat{e}\hat{n}k}) & \sin(\hat{\varepsilon}_{i\hat{e}\hat{n}k}) \\ 0 & -\sin(\hat{\varepsilon}_{i\hat{e}\hat{n}k}) & \cos(\hat{\varepsilon}_{i\hat{e}\hat{n}k}) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos(\hat{\beta}_{i\hat{e}\hat{n}k}) & \sin(\hat{\beta}_{i\hat{e}\hat{n}k}) & 0 \\ -\sin(\hat{\beta}_{i\hat{e}\hat{n}k}) & \cos(\hat{\beta}_{i\hat{e}\hat{n}k}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Оценка КМ в нормальной СК также производится при помощи метода линеаризации с учетом значений ошибок измерения  $\mathbf{R}_{инск}$  согласно выражениям:

$$\mathbf{R}_k^c(i) = \mathbf{H}_k^c(i) \mathbf{R}_{\hat{\mathbf{A}}}^{WUV}(i) (\mathbf{H}_k^c(i))^T + \left\| \begin{array}{ccc} \sigma_{\beta}^2 \hat{r}_{ок}^2(i) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\alpha}^2 \hat{r}_{ок}^2(i) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\gamma}^2 \hat{r}_{ок}^2(i) \end{array} \right\|,$$

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

На четвертом этапе производится пересчет в нормальную неподвижную прямоугольную СК путем переноса:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_k(i) = \left\| \hat{x}_k^n(i) \quad \hat{y}_k^n(i) \quad \hat{z}_k^n(i) \right\|^T + \left\| \hat{x}_k \quad \hat{y}_k \quad \hat{z}_k \right\|^T - \left\| x_{st} \quad y_{st} \quad z_{st} \right\|^T.$$

В значения КМ ошибок измерения  $\hat{\boldsymbol{\theta}}_k(i)$  аддитивно добавляются ошибки измерения  $\mathbf{R}_{GPSk}$ :  $\mathbf{R}_{\theta k}(i) = \mathbf{R}_k^c(i) + \mathbf{R}_{GPSk}$ .

Для учета искажений, вносимых в оценку линейных размеров наблюдаемых объектов, вычисления проводятся для четырех точек  $((\hat{x}_k^e(i), \hat{y}_k^e(i)), (\hat{x}_k^e(i) + \hat{L}_{xk}^e(i), \hat{y}_k^e(i)), (\hat{x}_k^e(i) + \hat{L}_{xk}^e(i), \hat{y}_k^e(i) - \hat{L}_{yk}^e(i))$  и  $(\hat{x}_k^e(i), \hat{y}_k^e(i) - \hat{L}_{yk}^e(i))$ , после чего определяются значения ширины и высоты в требуемой нормальной СК.

Достоверность результатов пересчетов с помощью предложенной методики проверялась при помощи лабораторно-моделирующего комплекса [2], доработанного под задачи бортовой ОЛС.

### Заключение

В настоящей статье представлена разработанная методика расчета разовых ошибок оценивания местоположения наблюдаемых объектов в прямоугольной СК по данным бортовой ОЛС. Представленная методика основывается на методе линеаризации, позволяющем заменить нелинейные преобразования на линейные в окрестности разовой оценки. Предлагаемая методика реализуется в четыре этапа и позволяет учесть: значения векторов состояния носителя ОЛС в связанной и нормальной СК и ошибки их измерений; вектора состояния угловых ориентаций ОЛС и ошибки их измерений; параметры ОЛС (ширина угла зрения, разрешение оптического изображения). Предлагаемая методика характеризуется низкой вычислительной сложностью, реализуема в режиме реального времени, характерного для бортовых систем, и применима при выполнении принятых допущений и ограничений. Полученные разовые ошибки измерения местоположения наблюдаемых объектов могут использоваться: при оценке влияния условий наблюдения на показатели качества внутрикадровой обработки; на этапе сопровождения траекторий в устройстве межкадровой обработки.

### Список литературы

1. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б.А. Алпатов [и др.]. М: Радиотехника, 2008. 176 с.
2. Гуцев Р.А. СолонАР А.С., Цуприк С.В. Лабораторно-моделирующий комплекс для исследования показателей качества работы оптико-локационной системы телевизионного типа // Докл. БГУИР. 2016. № 6 (100). С. 55–61.
3. Blackman, S., Popoli R. Design and analysis of modern tracking systems. Boston, London: Artech House, 1999. 1230 p.
4. Хмарский П.А., СолонАР А.С. Влияние выбора моделей входного воздействия на точность измерений вектора состояния для фильтров Калмана // Докл. БГУИР. 2012. № 7 (69). С. 47–53.

5. Хмарский П.А., Солонар А.С. Влияние условий наблюдения на показатели качества дискретных фильтров Калмана при наблюдении прямоугольных координат // Приложение к журналу «Известия Национальной академии наук Беларуси», физико-технические науки. 2014. № 2. С. 102–109.
6. Хмарский П.А., Солонар А.С. Оценка влияния условий наблюдения на точность измерения дискретных фильтров Калмана при наблюдении объектов в полярных координатах методом Монте-Карло // Докл. БГУИР. 2014. № 7 (85). С. 71–77.

### References

1. Metody avtomaticheskogo obnaruzhenija i soprovozhdenija ob'ektov. Obrabotka izobrazhenij i upravlenie / B.A. Alpatov [i dr.]. M: Radiotekhnika, 2008. 176 s. (in Russ.)
2. Gucev R.A. Solonar A.S., Cuprik S.V. Laboratorno-modelirujushhij kompleks dlja issledovanija pokazatelej kachestva raboty optiko-lokacionnoj sistemy televizionnogo tipa // Dokl. BGUIR. 2016. № 6 (100). S. 55–61. (in Russ.)
3. Blackman, S., Popoli R. Design and analysis of modern tracking systems. Boston, London: Artech House, 1999. 1230 p.
4. Hmarskij P.A., Solonar A.S. Vlijanie vybora modelej vhodnogo vozdejstvija na tochnost' izmerenij vektora sostojanija dlja fil'trov Kalmana // Dokl. BGUIR. 2012. № 7 (69). S. 47–53. (in Russ.)
5. Hmarskij P.A., Solonar A.S. Vlijanie uslovij nabljudenija na pokazateli kachestva diskretnyh fil'trov Kalmana pri nabljudenii prjamougol'nyh koordinat // Prilozhenie k zhurnalu «Izvestija Nacional'noj akademii nauk Belarusi», fiziko-tehnicheskie nauki. 2014. № 2. S. 102–109. (in Russ.)
6. Hmarskij P.A., Solonar A.S. Ocenka vlijanija uslovij nabljudenija na tochnost' izmerenija diskretnyh fil'trov Kalmana pri nabljudenii ob'ektov v poljarnyh koordinatah metodom Monte-Karlo // Dokl. BGUIR. 2014. № 7 (85). S. 71–77. (in Russ.)

### Сведения об авторах

Солонар А.С., к.т.н., доцент, докторант Военной академии Республики Беларусь.

Хмарский П.А., к.т.н., доцент кафедры авиационных радиоэлектронных систем Военной академии Республики Беларусь.

Михалковский А.А., старший инженер кафедры радиолокации и приемо-передающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Цуприк С.В., адъюнкт кафедры радиолокации и приемо-передающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

### Information about the authors

Solonar A.S., PhD, assistant professor, postdoctoral student of Military academy of the Republic of Belarus.

Khmarski P.A., PhD, associate professor of the department aviation radio-electronic systems of Military Academy of Republic of Belarus.

Mihalkovski A.A., senior engineer of the department of radar-location and send-recv devices of Military academy of the Republic of Belarus.

Tsuprik S.V., PG student of the department of radar-location and send-recv devices of Military academy of the Republic of Belarus.

### Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,  
г. Минск, пр-т Независимости, 220,  
Военная академия Республики Беларусь  
тел. +375-29-219-56-49;  
e-mail: pierre2009@mail.ru  
Хмарский Петр Александрович

### Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosti ave., 220,  
Military academy of the Republic of Belarus  
tel. +375-29-219-56-49;  
e-mail: pierre2009@mail.ru  
Khmarski Petr Aleksandrovich