

*А. М. КОВАЛЕНКО, А. А. ШЕЙНИКОВ*

## МОДЕЛЬ ИНЕРЦИАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

*Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»*

*В статье рассматриваются подходы к построению комплексной инерциально-оптической навигационной системы тактического беспилотного летательного аппарата ближнего действия. Предложены алгоритмы постоянной и периодической (в промежуточных пунктах маршрута) коррекции бесплатформенной бортовой инерциальной навигационной системы. При комплексировании информации о параметрах движения беспилотного летательного аппарата (получаемой от рассматриваемых систем) была использована инвариантная слабосвязанная схема обработки данных на основе расширенного фильтра Калмана, что позволило существенно снизить систематическую составляющую погрешности бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Показаны преимущества комплексной инерциально-оптической навигационной системы при обеспечении полета беспилотного летательного аппарата в зоне действия средств радиоэлектронной борьбы противника. Представлены результаты моделирования, подтверждающие возможность обеспечения точностных характеристик инерциально-оптической навигационной системы при отсутствии сигналов спутниковых радионавигационных систем.*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, бесплатформенная инерциальная навигационная система, оптико-электронная система, фильтр Калмана, комплексирование измерений датчиков

### Введение

Одним из основных способов обеспечения точности позиционирования беспилотных летательных аппаратов (БЛА) является комплексирование сигналов спутниковых и инерциальных навигационных систем. Так, например, тактический БЛА ближнего действия [1], стоящие на вооружении ВС РБ, оснащены интегрированными инерциально-спутниковыми навигационными комплексами (ИСНК). Базовым элементом ИСНК является бортовая бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), которая корректируется по сигналам спутниковых радионавигационных систем (СРНС). Особенности ИСНК хорошо изучены. Такие системы обеспечивают точную навигацию БЛА при наличии устойчивого поля сигналов СРНС. Подходы к решению задач комплексной обработки информации в ИСНК достаточно полно описаны в [2].

Современные средства радиоэлектронной борьбы («Гроза-С», «Красуха») позволяют передавать специально сгенерированные сигналы, которые вносят ошибку в показания бортового приемника СРНС (т.н.

«спуффинг атаки» [3]), что приводит к неверной оценке координат носителя. В этих условиях основным источником навигационной информации БЛА остается БИНС, состоящая из МЭМС-датчиков линейных ускорений (ДУС) и датчиков угловой скорости (ДЛУ). Рассматриваемые датчики относятся к измерителям низкого класса точности [4], а их использование в составе БИНС БЛА без коррекции последней приводит к возникновению больших систематических ошибок [5].

В современных условиях развития технологий эффективным решением этой проблемы является коррекция БИНС по сигналам автономного источника пилотажно-навигационной информации бортовой оптико-электронной системы (ОЭС) [6].

### Постановка задачи

Целью работы является оценка возможности комплексирования БИНС и ОЭС, разработка модели соответствующего навигационного комплекса БЛА, оценка точности предлагаемого навигационного комплекса в условиях отсутствия сигналов СРНС.

### Решение задачи

Автономную навигацию предлагается организовать за счет совместной обработки сигналов с бортовой БИНС и ОЭС, соединенных в единую инерциально-оптическую навигационную систему (ИОНС). На рис. 1 показан состав и структура пилотажно-навигационного комплекса (ПНК) на основе БИНС с коррекцией от ОЭС. В качестве примера, для исследования был взят ПНК тактического БЛА ближнего действия (типа «Москит»).

В состав исследуемого ПНК входят: бортовая БИНС; модуль системы воздушных сигналов, включающий барометрический высотомер; ОЭС, состоящая из цифровой камеры и вычислителя, реализующего обработку оптической информации; система автоматического управления (САУ) (четырёхканальная, перекрестная двухконтурная с законами стабилизации и управления углами крена ( $\gamma$ ) и тангажа ( $\vartheta$ ), скорости полета во внутреннем контуре, высоты ( $H$ ), курса ( $\psi$ ) и боковой координаты – во внешнем контуре); модуль СРНС.

### Модель бортовой БИНС

Математическая модель БИНС включает в себя алгоритм угловой ориентации БЛА относительно нормальной подвижной системы координат и навигационный алгоритм определения положения центра масс БЛА в географической системе координат (СК). Ориентация осей связанной с БЛА системы координат определяется в соответствии с ГОСТ 20058–80.

Для описания ориентации БЛА в пространстве использовались углы Эйлера-Крылова [7].

Для описания ошибок БИНС была использована модель, предложенная в [8]. Эта модель представляет собой систему неоднородных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами:

$$\Delta\dot{\varphi} = \frac{\Delta V_{Xg}}{R} - \frac{V_{Xg}}{R^2} \Delta R, \quad (1)$$

$$\Delta\dot{\lambda} = \frac{\Delta V_{Zg}}{R \cos \varphi} + \frac{V_{Zg}}{R \cos^2 \varphi} \Delta\varphi - \frac{V_{Zg}}{R^2 \cos \varphi} \Delta R;$$

где  $\Delta\dot{\varphi}$ ,  $\Delta\dot{\lambda}$  – погрешности счисления геоцентрической широты и долготы в скалярной форме;  $V_{Xg}, V_{Zg}$  – проекции путевой скорости БЛА;  $\Delta V_{Xg}, \Delta V_{Zg}$  – погрешности определения составляющих путевой скорости;  $R$  – радиус Земли;

Неоднородность вызвана погрешностями ДУС и ДЛУ, входящих в состав БИНС. Связь между сферическими и прямоугольными координатами находилась в соответствии с выражениями:

$$\begin{cases} X = R \cos \varphi \sin \lambda; \\ Y = R \sin \varphi; \\ Z = R \cos \varphi \cos \lambda; \end{cases} \quad (5)$$

### Модель бортовой ОЭС

В состав ОЭС входит: монокулярная цифровая камера и вычислитель. Камера установлена в надир и жестко закреплена в фюзеляже

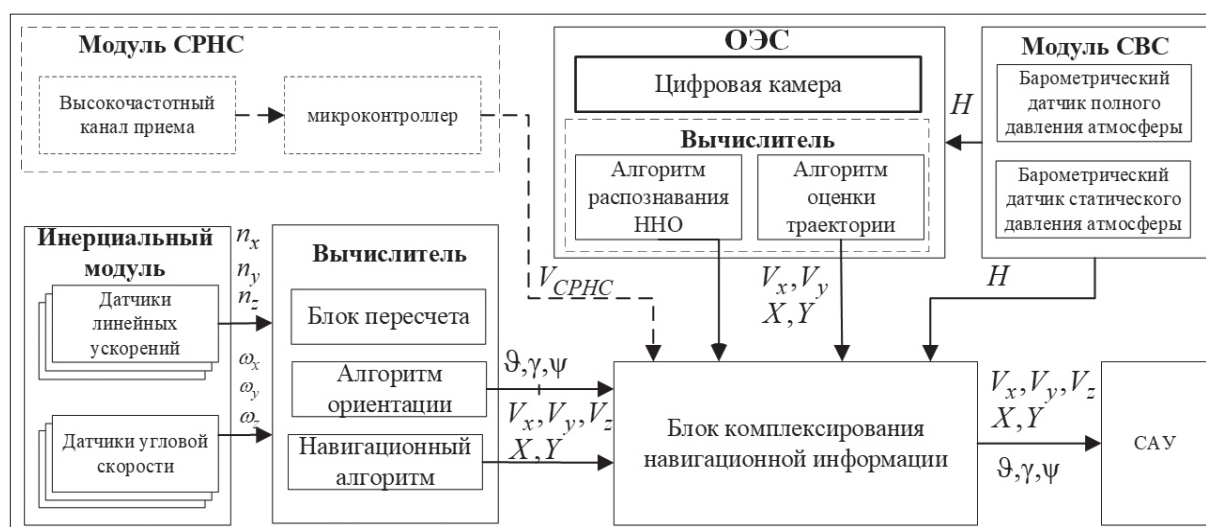


Рис. 1. Структурная схема ПНК с ОЭС

БЛА в центре масс. Она позволяет получать цифровые изображения участков местности и передавать их на бортовой вычислитель. В вычислителе заложены алгоритмы обработки последовательностей цифровых изображений (оптического потока), позволяющие оценивать составляющие координат  $X^{OЭС}, Y^{OЭС}$  БЛА, а также алгоритм распознавания наземных объектов с известными координатами (наземных навигационных ориентиров (ННО)).

В качестве геометрической модели, для определения параметров взаимного расположения объектов с использованием данных ОЭС БЛА была выбрана модель монокулярной камеры с малой диафрагмой [8] (рис. 2). В этой модели участки земной поверхности проецируются на цифровую матрицу ОЭС. В процессе обработки цифрового изображения на нем выделяются контрастные участки, называемые особыми точками [9].

В соответствии со свойствами перспективной проекции в камере с малой диафрагмой координаты особых точек изображения рассчитывались следующим образом [7]:

$$X_i^{OT} = x_i^{OЭС} \frac{H}{f} + c_x, \quad Z_i^{OT} = z_i^{OЭС} \frac{H}{f} + c_z; \quad (3)$$

где  $x_i^{OЭС}, z_i^{OЭС}$  – координаты особых точек на цифровом изображении;  $f$  – фокусное расстояние объектива ОЭС;  $H$  – истинная высота БЛА;  $c_x, c_z$  – координаты «главной» [10] точки изображения.

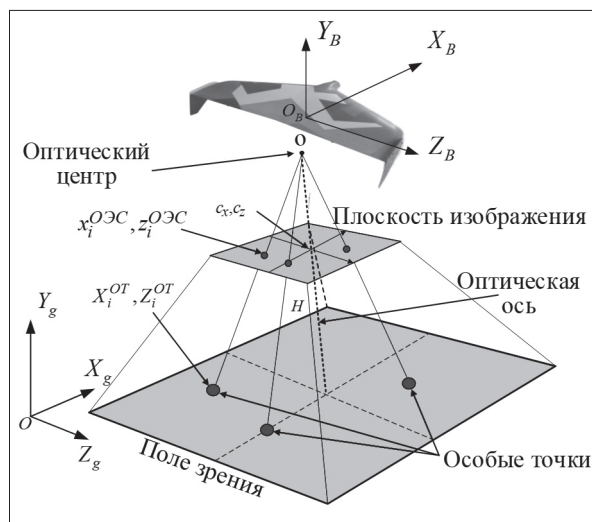


Рис. 2. Перспективная проекция в камере с малой диафрагмой

### Алгоритм комплексирования информации БИНС и ОЭС

Привлечение дополнительной навигационной информации, получаемой с помощью ОЭС, реализует принцип избыточности, который обеспечивает возможность повышения точности позиционирования.

Для решения задачи комплексирования БИНС и ОЭС была использована инвариантная слабосвязанная схема обработки данных на основе расширенного фильтра Калмана (ФК) [2]. Достоинством схемы является ее сравнительная простота и независимость от характера движения носителя. При построении таких алгоритмов не требуется использование дополнительной информации об особенностях движения БЛА и его динамических свойствах, что позволяет снизить вычислительные затраты и влияние динамических ошибок [2].

В слабосвязанной схеме БИНС и ОЭС формируют оценки вектора состояния  $\hat{x}_i = [\hat{x}_i^{БИНС}, \hat{x}_i^{OЭС}]^T$ . Связующий блок, включающий ФК, на основании разности показаний БИНС и ОЭС формирует оценку вектора состояния в одной системе координат и одной размерности. Оценка вектора состояния используется для коррекции БИНС и компенсации ее инструментальных погрешностей. Структура инвариантной слабосвязанной схемы обработки данных БИНС и ОЭС показана на рис. 3.

Алгоритм оценивания составляющих вектора ошибок построен на базе дискретного ФК [2,4]. При этом математическая модель ИОНС в дискретном виде описывается уравнениями состояния и измерения:

$$\begin{aligned} x(i+1) &= \Phi(i+1, i)x(i) + \Gamma(i+1, i)w(i), \\ z(i+1) &= H(i+1)x(i+1) + v(i+1); \end{aligned} \quad (4)$$

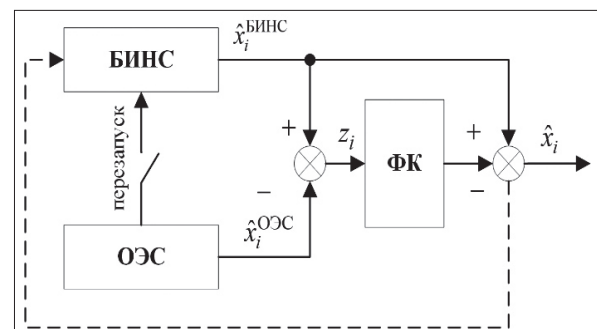


Рис. 3. Структура инвариантной слабосвязанной схемы обработки навигационной информации.

где  $x(i)$  - вектор состояния системы;  $z(i+1)$  вектор измерения;  $v(i+1)$  вектор ошибки измерения;  $w(i)$  вектор возмущения;  $\Phi(i+1, i)$  блочно-диагональная переходная матрица состояния;  $\Gamma(i+1, i)$  переходная матрица возмущающих воздействий;  $H(i+1)$  матрица измерения.

Оценка вектора состояния системы производится на основе анализа оценок:

$$\hat{x}_i = [\hat{x}_i^{\text{БИНС}}, \hat{x}_i^{\text{ОЭС}}]^T, \quad (5)$$

$$\text{где } \hat{x}_i^{\text{БИНС}} = [X_i^{\text{БИНС}}, Z_i^{\text{БИНС}}]^T,$$

$$\hat{x}_i^{\text{ОЭС}} = [X_i^{\text{ОЭС}}, Z_i^{\text{ОЭС}}]^T;$$

где  $X_i^{\text{БИНС}}, Z_i^{\text{БИНС}}$  - оценки координат БЛА по данным БИНС;  $X_i^{\text{ОЭС}}, Z_i^{\text{ОЭС}}$  - оценки координат БЛА по данным ОЭС.

Вектор измерений  $z(i+1)$  формируется с учетом разности данных об ошибках измерения координат БЛА, полученных от БИНС и ОЭС:

$$\begin{aligned} z_1(i+1) &= \Delta X^{\text{БИНС}}(i+1) - \Delta X^{\text{ОЭС}}(i+1), \\ z_2(i+1) &= \Delta Z^{\text{БИНС}}(i+1) - \Delta Z^{\text{ОЭС}}(i+1); \end{aligned} \quad (6)$$

Алгоритм оценивания координат БЛА, включает: выражения для вектора состояния, матрицу коэффициентов усиления, матрицу состояния, матрицу измерения, переходную матрицу, матрицу интенсивности, корреляционную матрицу.

Выражения, реализующие алгоритм дискретного оценивания вектора состояния системы, имеют вид:

$$\begin{aligned} \hat{x}(i+1, i) &= \Phi(i+1, i)\hat{x}(i, i), \\ \hat{x}(i+1, i+1) &= \hat{x}(i+1, i) + \\ &+ K(i+1)(z(i+1, i) - H(i+1)\Phi(i+1, i)\hat{x}(i, i)); \end{aligned} \quad (7)$$

Матрица коэффициентов усиления  $K(i+1)$  определяется с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} K(i+1) &= \hat{P}(i+1, i)H^T(i+1)(H(i+1) \\ &\hat{P}(i+1, i)H^T(i+1) + R(i+1))^{-1}, \\ \hat{P}(i+1, i) &= \Phi(i+1, i)P(i, i)\Phi^T(i+1, i) + \\ &+ \Gamma(i+1, i)Q(i)\Gamma^T(i+1, i), \\ P(i+1, i) &= \hat{P}(i+1, i) - K(i+1)H(i+1)\hat{P}(i+1, i); \end{aligned} \quad (8)$$

где  $P(i, i)$  - корреляционная матрица;  $\hat{P}(i+1, i)$  - корреляционная матрица ошибки прогнозирования.

В процессе исследований использовалась модель задающего воздействия первого порядка. Т.к. систематические составляющие погрешностей оцениваются в соответствии с разностной схемой фильтрации, то для аппроксимации постоянной составляющей задающего воздействия применялись полиномы первой степени:

$$x_i = \begin{bmatrix} x_{i-1} + V_{xi}\Delta t \\ V_{xi} \end{bmatrix}; \quad (9)$$

При этом, переходная матрица состояния  $\Phi(i+1, i)$  и матрица измерения  $H(i+1)$ , имеют вид:

$$\Phi(i+1, i) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$H(i+1, i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Переходная матрица возмущающих воздействий  $\Gamma(i+1, i)$  и матрица интенсивности  $Q(i)$  имеют вид:

$$\begin{aligned} \Gamma(i+1, i) &= \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} & 0 & 0 & 0 \\ \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta t^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t & 0 \end{bmatrix}; \\ Q(i) &= \begin{bmatrix} \sigma_{\text{ДУС}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\text{ДЛУ}}^2 \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\sigma_{\text{ДУС}}, \sigma_{\text{ДЛУ}}$  - среднеквадратические ошибки измерения ДУС и ДЛУ.

Корреляционная матрица ошибок  $R_i$  была получена по данным модели ошибок ИОНС, рассмотренной в [6,11]:

$$\begin{aligned} R_i &= R_i^{\text{БИНС}} + R_i^{\text{ОЭС}} = \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_{X^{\text{БИНС}}}^2 + \sigma_{X^{\text{ОЭС}}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{Y^{\text{БИНС}}}^2 + \sigma_{Y^{\text{ОЭС}}}^2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (12)$$

Исследования характеристик комплексной инерциально-оптической навигационной системы

В среде виртуального моделирования MATLAB была реализована функциональная модель разработанной ИОНС на базе дискретного ФК (рис. 4).

На рис. 4  $n_x, n_y, n_z$  – проекции линейного ускорения на оси связанной СК, вырабатываемые ДЛЮ;  $\omega_{xg}, \omega_{yg}, \omega_{zg}$  – проекции вектора абсолютной угловой скорости на оси географической СК, вырабатываемые ДУС;  $C$  – матрица перехода от связанной к географической СК;  $V_{xg}^{OЭС}, V_{zg}^{OЭС}$  – северная и восточная составляющие линейной скорости, определяемые по данным ОЭС;  $\lambda^{OЭС}, \varphi^{OЭС}$  – координаты распознанного ННО для периодической коррекции БИНС («перезапуска» БИНС с начальными значениями координат  $\lambda(t_i), \varphi(t_i)$ ) в промежуточных пунктах маршрута.

Для упрощения модели были приняты следующие допущения:

1. Автоматическое управление полетом БЛА в горизонтальной плоскости и его стабилизация на линии заданного пути (ЛЗП) осуществляется по маршрутному методу управления;

2. Задача синхронизации данных с выхода БИНС и ОЭС решена;

3. На протяжении всего маршрута заранее выбраны ННО, данные о координатах которых используются для «перезапуска» БИНС;

4. Шаг дискретизации считается одинаковым и равным  $\Delta t$ ;

5. Распознавание очередного ННО происходит мгновенно с вероятностью равной 1.

Для исследования характеристик комплексной ИОНС проводилось моделирование в соответствии со следующими сценариями:

1. БЛА осуществляет полет по заданному маршруту в зоне действия средств РЭБ. Спутниковая коррекция отсутствует. Прямолинейное движение БЛА происходит с постоянной скоростью и высотой полета.

2. Движение БЛА осуществляется по квадратной траектории (барражирование «по корбочке») в зоне действия средств РЭБ (спутниковая коррекция отсутствует).

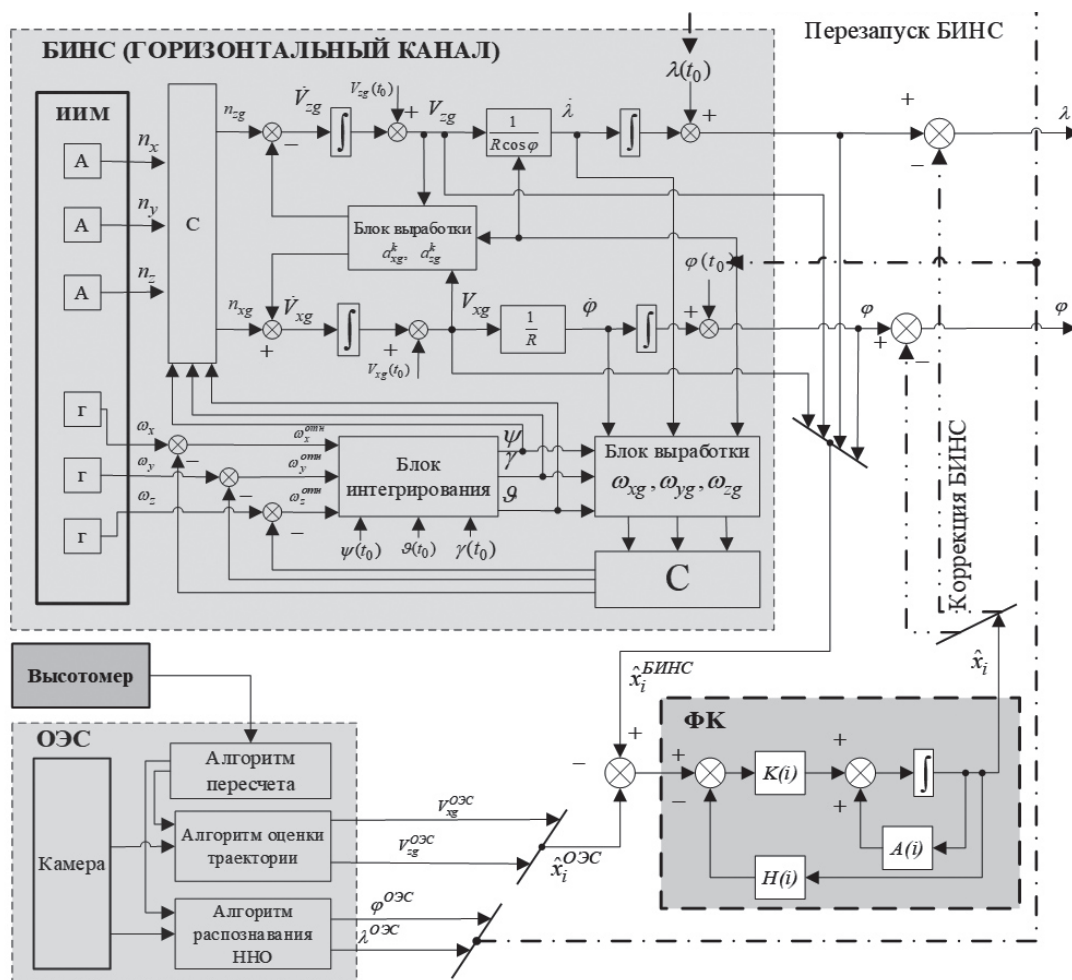


Рис. 4. Модель комплексной инерциально-оптической навигационной системы БЛА

Таблица 1. Параметры для моделирования движения БЛА

Параметры для моделирования	Значение
Систематические погрешности гироскопа, %/ч	5
Систематические погрешности акселерометра, м/с <sup>2</sup>	10–3
Характеристики шума гироскопа, рад/с	0,3
Характеристики шума акселерометра, м/с <sup>2</sup>	0,029
Высота полета, м	500
Погрешность высотомера (СКО), м	20
Размер матрицы ОЭС, мм	15,6×23,5
Разрешение снимка, пикселей	6000×4000
Фокусное расстояние, мм	20

Параметры для моделирования движения БЛА представлены в таблице 1.

На рис. 5, а представлены результаты моделирования траектории БЛА по данным БИНС и по данным ОЭС ( $V_x = 0$  м/с,  $V_z = 15$  м/с,  $H = 500$  м). Систематические составляющие погрешности МЭМС-датчиков БИНС оказывают значительное влияние на точность оценки координат БЛА. Так, например, для рассматриваемых начальных условий по истечении 100 с полета погрешность оценки координат с использованием БИНС составляет 80 м, а через 600 с – 3570 м.

Точность оценок текущих координат БЛА по оптическому потоку зависит от характеристик бортовой камеры, точности определения высоты полета, количества и расположения особых точек.

На рис. 5, б представлен вектор измерений  $z(i+1)$ , формируемый с учетом разности данных об ошибках измерения координат БЛА,

полученных от БИНС и ОЭС. Кроме этого, представлены результаты работы фильтра.

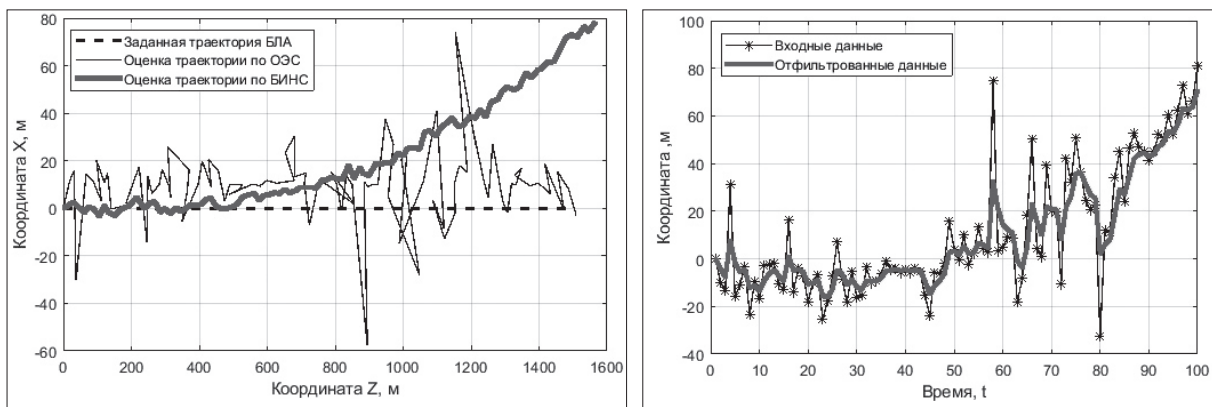
Для оценки погрешности определения координат БЛА с помощью ОЭС использовалась модель ошибок, представленная в [11].

Моделирование показало, что при прямолинейном полете БЛА с ИОНС по истечении 600 сек. (рис 6.) отклонение от заданной траектории составит не более 50 м. Такое отклонение для выбранных параметров оптической системы соответствует половине ширины цифрового кадра. При увеличении длительности полета ошибка оценки координат превышает зону, охватываемую полем зрения камеры.

Для дальнейшего удержания БЛА на ЛЗП необходимо производить «перезапуск» БИНС в зонах с ННО (путем автоматической идентификации конкретных ННО с помощью бортовой ОЭС). Результаты работы ИОНС при полете по маршруту с «перезапуском» БИНС в зонах с ННО показаны на рис. 6, б.

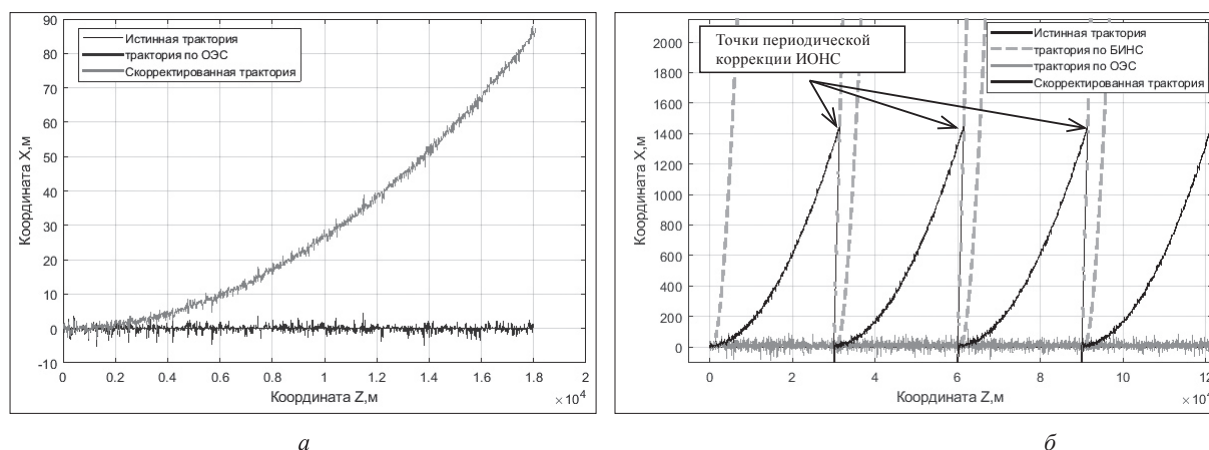
На рис. 7 показаны результаты моделирования работы ИОНС в режиме барражирования БЛА по квадрату. Точка старта (рис. 7, А) расположена в начале системы координат. Точки разворотов (рис. 7, В, С, D, E) отстоят друг от друга на 1500 м. Точка приземления (рис. 8, F) характеризует накопившуюся ошибку за время полета ИОНС по координате.

Моделирование показало, что при коррекции БИНС по данным ОЭС по истечении 1200 с полета БЛА отклонится от заданной траектории не более чем на 70 м, что является приемлемым с точки зрения обеспечения точности навигации в условиях РЭБ.



а – оценки траектории БЛА по данным БИНС и по данным ОЭС; б – выходной сигнал фильтра

Рис. 5. Результаты моделирования траектории полета БЛА



*a* – полет между двумя ННО; *б* – полет по маршруту с периодической коррекцией в зонах с ННО.  
Рис. 6. Результаты моделирования процесса периодической коррекции БИНС с помощью ОЗС

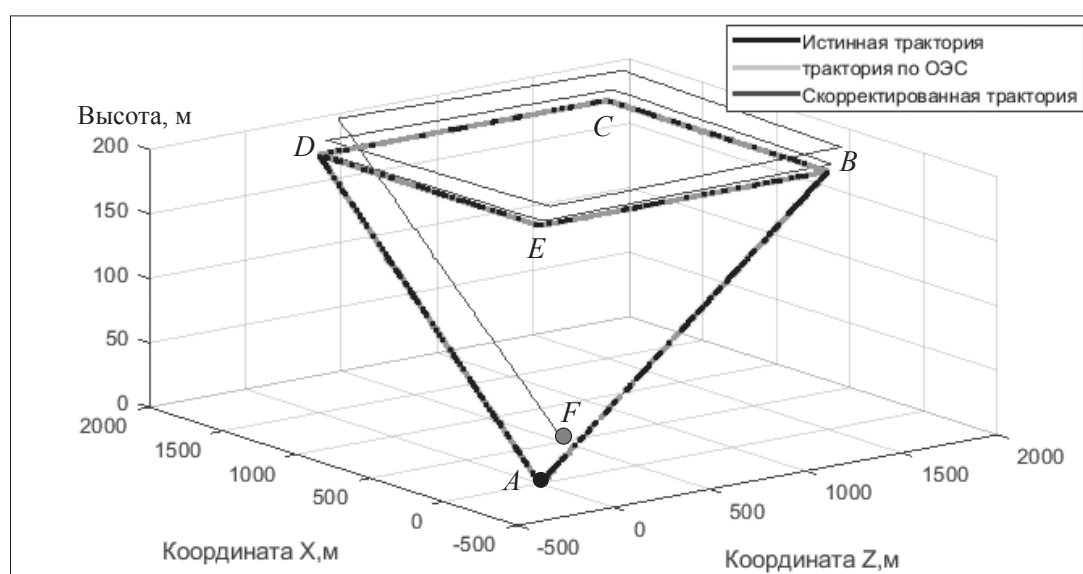


Рис. 7. Моделирование траектории барражирования БЛА по квадрату

### Выводы

Таким образом, представленный алгоритм постоянной коррекции погрешностей БИНС БЛА, отличается учетом данных с бортовой ОЗС и применением методов фильтрации систематических погрешностей датчиков навигационной информации, что позволяет повысить точность оценки текущих навигационных параметров полета БЛА.

Представленный алгоритм периодической коррекции БИНС БЛА, отличается учетом пилотажных параметров носителя и применением фотограмметрических методов

оценки относительных координат, что позволяет повысить точность позиционирования БЛА в промежуточных пунктах маршрута.

Результаты моделирования показали, что точность определения координат с помощью предложенной комплексной инерциально-оптической навигационной системы существенно превышает точность определения координат штатным ПНК БЛА, что доказывает эффективность предлагаемого подхода к коррекции БИНС при полете тактического БЛА в условиях действия средств радиоэлектронной борьбы противника.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Азаренок, И. П.** Справочник офицера Военно-воздушных сил и войск противовоздушной обороны / под ред. И. П. Азаренка (отв. Ред.) [и др.] // – Мн.: командование ВВС и войск ПВО, 2009. – с. 511

2. Степанов, О. А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания / О. А. Степанов // СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. 509 с.
3. Ян, Л. Обнаружение спуфинг-атак на ГНСС с использованием ИНС/ Ян Лю, С. Ли, С. Сяо, Ц. Фу // Статья по докладу на XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2015. Том 24№ 1 (92), 2016.
4. Матвеев, В. В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем: учеб. пособие / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов. // СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2009.–280 с.
5. Коваленко, А. М. Сравнительный анализ точности инерциальной и оптической навигационных систем беспилотного летательного аппарата / А. М. Коваленко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь.– 2019.– № 4(65).– с. 110–118.
6. Солонар, А. С. Методика расчета ошибок разового оценивания местоположения наблюдаемых объектов в бортовых оптико-локационных объектах / А. С. Солонар и другие // доклады БГУИР.– 2018. № 2 (112). с. 26–32.
7. Красильщиков, М. Н. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / М. Н. Красильщиков, Г. Г. Серебряков // М.: ФИЗМАТЛИТ. 2009.– 272 с.
8. Hartley, R. and Zisserman, A., Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2003.
9. H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, «Speeded-up robust features (SURF)», International Journal on Computer Vision and Image Understanding, vol. 110–346–359 pp.– 2008.
10. Назаров, А. С. Фотограмметрия: учеб. пособие для студентов вузов / А. С. Назаров. Мн.: ТетраСистемс, 2006.– 368 с.
11. Коваленко, А. М. Математическая модель ошибок инерциально-оптической навигационной системы малоразмерного БЛА / А. М. Коваленко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь.– 2020.– № 1(66).– с. 110–118.

## REFERENCES

1. Azarenok I.P. The reference book by the officer of the Air Force and troops of air defense / under the editorship of I. P. Azarenk // [and etc.]– Minsk: command of the Air Force and troops of air defense, 2009.– page 511
2. Stepanov, O.A. Bases of the theory of estimation with annexes to problems of processing of navigation information. Ch.1. Introduction to the theory of estimation / O.A. Stepanov // SPb.: GNTs Russian Federation JSC «Concern Central Research Institute Elektropribor», 2010. 509 p.
3. Yang, L. Detection spoofing attacks on GNSS with use INS / Jan Liu, S. Li, C. Xiao, Ts. Fu // Article according to the report at the XXII St. Petersburg international conference on the integrated navigation systems, 2015. Volume 24№ 1 (92), 2016.
4. Matveev, V.V. Bases of creation of platformless inertial navigation systems: studies. grant / V.V. Matveev, V. Ya. Raspopov. // SPb: GNTs Russian Federation JSC Concern CSRI Elektropribor, 2009.–280 p.
5. Kovalenko, A.M. Comparative analysis of accuracy of inertial and optical navigation systems of the unmanned aerial vehicle / A.M. Kovalenko // Vestn. Soldier. academician of Republic Belarus.– 2019.– No. 4(65).– P. 110–118.
6. Solonar, A.S. Methodology for calculating of the different estimation errors of of observed objects location in the airborne optical-localational systems / Solonar and others//reports of BGUIR.– 2018. No. 2 (112). page 26–32.
7. Krasilschikov, M.N. Modern information technologies in problems of navigation and targeting of pilotless maneuverable aircraft / M.N. Krasilshchikov //M.: FIZMATLIT. 2009.– 272 p.
8. Hartley, R. and Zisserman, A., Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2003.
9. H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, “Speeded-up robust features (SURF)”, In-ternational Journal on Computer Vision and Image Understanding, vol. 110–346–359 pp.– 2008.
10. Nazarov, A.S. Fotogrammetriya: studies. a grant for students of higher education institutions/Ampere-second. Nazarov. Мн.: ТетраСистемс, 2006.– 368 p.
11. Kovalenko, A.M. Mathematical model of errors of the inertial and optical navigation system of the small-sized UAV / A.M. Kovalenko//Vestn. Soldier. academician of Republic Belarus.– 2020.– No. 1(66).– p. 110–118.

Поступила  
01.04.2020

После доработки  
07.04.2020

Принята к печати  
01.06.2020

## MODEL OF THE INERTIAL AND OPTICAL NAVIGATION SYSTEM OF THE UNMANNED AERIAL VEHICLE

*In article approaches to creation of the complex inertial and optical navigation system of the short-range tactical unmanned aerial vehicle are considered. Algorithms constant and periodic (in intermediate points of a route) are offered correction of the platformless onboard inertial navigation system. At integration of information on parameters of the movement of the unmanned aerial vehicle (received from the considered systems) the invariant loosely coupled scheme of data processing on the basis of the expanded filter of Kallman was used that allowed to lower significantly a systematic component of an error of the platformless inertial navigation system. Advantages of the complex inertial and optical navigation system when ensuring flight of the unmanned aerial vehicle in an area of coverage of means of radio-electronic fight of the opponent are shown. The results of modeling confirming a possibility of ensuring precision characteristics of the inertial and optical navigation system in the absence of signals of satellite radio navigational systems are presented.*

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle, platformless inertial navigation system, optical-electronic system, Kallman's filter, integration of measurements of sensors.*





**Шейников Алексей Александрович** – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры авиационной техники и вооружения учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Мобильный телефон для связи (персональный): +375295850027.



**Коваленко Александр Михайлович** – магистр технических наук, адъюнкт кафедры авиационной техники и вооружения учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

E-mail: AMKovalenko@outlook.com

Мобильный телефон для связи (персональный): +375298579793