

ШЕЙНИКОВ А.А., МАЛКИН В.А., СМОЛЕНСКИЙ Э.А., ИВАНИЦКИЙ Л.А.

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА МАЛОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»,  
г. Минск, Республика Беларусь

Разработана оптико-электронная корреляционно-экстремальная навигационная система беспилотного летательного аппарата. Предлагаемая навигационная система отличается применением малогабаритных и доступных по цене цифровой камеры и вычислителя, что критично для массово применяемых малых беспилотных летательных аппаратов военного назначения. Разработанное алгоритмическое обеспечение системы отличается применением алгоритмов реконструкции трехмерной цифровой модели местности по оптическим цифровым изображениям от бортовой цифровой камеры беспилотного летательного аппарата, а также применением алгоритмов корреляционной обработки текущих и эталонных цифровых моделей местности, что обеспечивает возможность точной автономной воздушной навигации по видовой информации. Обоснованы требования к параметрам полета малого беспилотного летательного аппарата с оптико-электронной корреляционно-экстремальной навигационной системой. Обосновано значение периода коррекции бортовой бесплатформенной инерциальной навигационной системы по данным предлагаемой оптико-электронной корреляционно-экстремальной навигационной системы. Представлены результаты исследований точности разработанной оптико-электронной корреляционно-экстремальной навигационной системы в зависимости от параметров съемки и качества эталонных моделей.

**Ключевые слова:** система технического зрения, оптико-электронная корреляционно-экстремальная навигационная система, трехмерная модель местности, фотограмметрия

### Введение

Длительное и точное определение навигационных параметров воздушных боевых роботов (ВБР), к которым можно отнести беспилотные летательные аппараты (БЛА) и крылатые ракеты (КР), до недавнего времени было невозможным без использования сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС). Однако в настоящее время, как показывает анализ современных военных конфликтов, средства радиоэлектронной борьбы позволяют подавлять и подменять такие сигналы [1]. Поэтому актуальной становится задача разработки систем автономной воздушной навигации (АВН), не требующих для обеспечения движения по заданному маршруту сигналов СРНС. Что касается штатных автономных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) на микроэлектромеханических модулях (МЭМС) [2] (базовых элементов навигационных комплексов (НК) малых БЛА), то они без периодической коррекции [3] с течением времени достаточно быстро накапливают ошибку счисления координат [4]. В таких условиях альтернативой СРНС могут стать автономные корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС) [5]. Однако, известные образцы КЭНС (TERCOM (Terrain Contour Matching) КР

«Tomahawk», TERPROM (Terrain Profile Matching) КР «Storm Shadow») предполагают наличие на борту носителя дорогих и габаритных систем активной оптической локации (лидар) или радиолокации (бортовая радиолокационная станция) для получения изображений подстилающей местности. Кроме того, бортовые системы активной локации снижают скрытность КР, что увеличивает возможности противника по противодействию. Существуют также КЭНС на основе систем пассивной оптической локации (DSMAC (Digital Scene Matching Area Correlator) КР «Tomahawk»), IBN (Image Based Navigation) КР «Taurus», КЭНС БЛА ZALA 421-16E5G). Однако здесь следует отметить, что обработка цветных плоских цифровых изображений (ЦИ) с использованием технологий машинного зрения и распознавание наземных объектов с использованием технологий искусственного интеллекта требует наличия на борту ВБР достаточно дорогого высокопроизводительного процессора, что не всегда является целесообразным. Так, малые БЛА-камикадзе не могут нести тяжелую боевую часть и не в состоянии уничтожить стратегически важные, дорогие объекты противника, даже действуя в составе группы. Следовательно, встает вопрос о соответствии цены массово применяемых и безвозвратно расходуемых БЛА, стоимости, поражаемой ими, относительно недорогой

тактической цели. Экономическая целесообразность возникает при кратном соотношении значений этих параметров в пользу объекта атаки. Известно, что новые модификации систем DSMAC используют в качестве эталонных не изображения местности, а цифровые модели местности (ЦММ). Дело в том, что в настоящее время идет масштабная оцифровка территорий для целей создания геоинформационных систем (ГИС). Эта детальная информация может быть использована в качестве существенного информационного ресурса для обеспечения АВН. Появляется возможность значительного упрощения НК малых БЛА в связи с тем, что они будут являться всего лишь потребителями заранее подготовленной детальной информации, выработанной гораздо более сложными обеспечивающими техническими системами. В контексте решаемой задачи разработки КЭНС для малых БЛА, предлагается обратить внимание на трехмерные ЦММ. Использование третьего измерения позволит увеличить точность позиционирования за счет увеличения объема обрабатываемых данных, частичного решения проблем теней и случайной динамики диапазона яркостей ЦИ в видеопотоке [6]. Современные технологии позволяют производить трехмерную реконструкцию участков местности по последовательности ее плоских ЦИ фотограмметрическим методом [7]. Причем не обязательно обеспечивать сверхвысокую точность составления трехмерной ЦММ и результатов ее реконструкции. Так, в современных научных публикациях показано, что для этих целей

достаточен второй уровень детализации LoD2 (Level of Detail) [8].

### Постановка задачи

Требуется разработать оптико-электронную (ОЭ) КЭНС малого БЛА военного назначения на основе системы технического зрения (СТЗ), использующую в качестве эталонов трехмерные ЦММ. Для достижения поставленной цели необходимо последовательно решить следующие задачи: определить состав и характеристики элементов НК малого БЛА; разработать математический аппарат и программно-алгоритмическое обеспечение трехмерной реконструкции ЦММ из ЦИ; обосновать требования к параметрам полета малого БЛА с ОЭ КЭНС; обосновать значение периода коррекции бортовой БИНС по данным ОЭ КЭНС БЛА; разработать программно-алгоритмическое обеспечение подготовки и корреляционной обработки эталонных и текущих ЦММ; провести анализ результатов исследования точности разработанной ОЭ КЭНС в зависимости от параметров съемки и качества эталонных моделей.

### Начальные условия

В качестве малого БЛА рассматривается квадрокоптер типа DJI Mavic 3 с гиростабилизированной бортовой цифровой камерой (БЦК) Hasselblad 20 Мп. Характеристики БЦК приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики БЦК

Наименование параметра/характеристики	Обозначение	Значение параметра	Единицы измерения
Сторона матрицы БЦК (параллельная полету)	$x_M$	18	мм
Сторона матрицы БЦК (перпендикулярная полету)	$y_M$	13,5	мм
Площадь матрицы БЦК (стороны 18 мм и 13,5 мм)	$S_M$	243	мм <sup>2</sup>
Размер пикселя матрицы БЦК	$p$	1,5	мкм
Фокусное расстояние БЦК	$f$	14	мм
Период следования кадров	$\tau$	35	мкс

В таблице 2, для сравнения, приведены характеристики известных БИНС, работающих на различных физических принципах.

Анализ таблицы 2 показывает, что для малого БЛА, с учетом цены и массы оборудования,

подходит только БИНС на МЭМС, обладающая низкой точностью.

В таблице 3 для сравнения приведены характеристики известных измерителей высоты полета, работающих на различных физических принципах.

Таблица 2

Характеристики известных разнородных БИНС

БИНС	Принцип работы	Цена, долларов	Масса, кг	Погрешность
ADIS16488	БИНС на МЭМС	Около 1500	0,05	3 % от пройденного пути за 5 мин
БИНС 500НС	БИНС на волоконно-оптических гироскопах	Около 15000	4	1,4 км за час полета
БИНС-21	БИНС на лазерных гироскопах	Около 100000	15	0,9 км за час полета

Таблица 3

Характеристики известных разнородных измерителей высоты полета

Высотомер	Принцип работы	Цена, долларов	Масса, кг	Диапазон измерений, м	Погрешность, м
GY-BMP280	Барометрический МЭМС датчик	4	0,002	0 9000	$\pm 1$
RGK D600	Оптический дальномер	180	0,2	3 600	$\pm 1$
A-065A	Малогабаритный радиовысотомер	Около 2000	0,9	0,5 2000	$\pm 1,5$

Анализ таблицы 3 показывает, что для малогабаритного БЛА, с учетом цены, массы и обеспечиваемой точности, предпочтительным является барометрический МЭМС-датчик.

### Решение задачи

Для осуществления автоматической привязки БЛА к участку местности с известными координатами по видовой информации производится сопоставление обработанных результатов текущей съемки подстилающей земной поверхности с эталонной ЦММ [9]. Трехмерная реконструкция текущей ЦММ выполняется с использованием алгоритмов машинного зрения [10] путем сравнения координат подобных точек на двух смещенных ЦИ (стереопаре), сделанных во время полета с определенной задержкой. Съемка осуществляется гиросtabilизированной бортовой цифровой камерой (БЦК), направленной в надир [11]. В процессе реконструкции трехмерной геометрии сцены по стереопаре, с использованием алгоритмов машинного зрения производится вычисление карты глубины сцены (КГС) – ЦИ, яркость пикселей которого, соответствует расстоянию от поверхностей объектов сцены до точки обзора [10]. Другими словами, на КГС проекции более высоких объектов сцены имеют более низкую яркость. Далее осуществляется преобразование результатов расчета в восстановленную (текущую) ЦММ

с использованием фотограмметрических методов [12]. Так, на рисунке 1 приведена схема измерений высот объектов сцены (ВОС) с помощью БЦК.

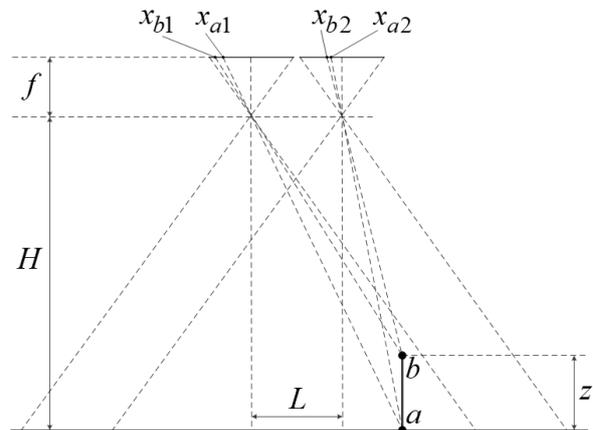


Рисунок 1. Схема измерения ВОС по стереопаре

На рисунке 1:  $a, b$  – нижняя и верхняя точка объекта сцены соответственно;  $x_{a1}, x_{b1}, x_{a2}, x_{b2}$  – координаты проекций точек  $a, b$  (отсчитываемые от левого края ЦИ) на первом и втором кадре соответственно;  $L = V\tau$  – путь, пройденный БЛА за время  $\tau$  между моментами съемки двух ЦИ, составляющих стереопару;  $V$  – истинная скорость БЛА;  $z$  – ВОС. В соответствии со схемой измерений, для расчета ЦММ по стереопаре (преобразования

КГС в ЦММ) получены выражения для прямого и обратного расчета:

$$z = \frac{\xi H^2}{\xi H + V\tau f}; \quad \xi = \frac{zLf}{H(H-z)}, \quad (1)$$

где  $\xi = (x_{a1} - x_{b1}) - (x_{a2} - x_{b2})$  – относительное смещение точек  $a$  и  $b$  в стереопаре.

С учетом того, что измерения проводятся с использованием цифровой матрицы БЦК, следует учитывать дискретность результатов измерений:

$$\Delta \xi = \xi - \text{div}(\xi/p). \quad (2)$$

Тогда погрешность измерения ВОС  $\Delta z$ , обусловленную дискретностью измерителя, можно рассчитать так:

$$\Delta z = \frac{\Delta \xi H^2}{\Delta \xi H + V\tau f}; \quad \Delta z_{\max} = \frac{pH^2}{pH + V\tau f}. \quad (3)$$

На рисунке 2 представлена зависимость погрешности измерения ВОС от  $H$  и  $f$ .

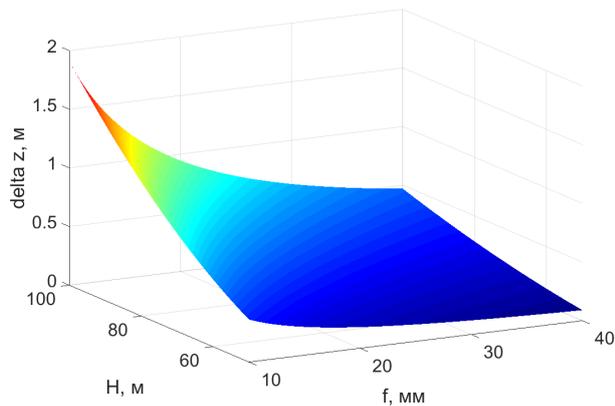


Рисунок 2. Зависимость погрешности измерения ВОС от  $H$  и  $f$

Из рисунка 2 видно, что главным фактором, влияющим на точность фотограмметрических

измерений, является  $H$ . Быстрый рост погрешности при увеличении  $H$  выше 100 м еще раз подтверждает выводы, сделанные авторами ранее в [13]. Таким образом, можно с уверенностью констатировать, что в качестве рабочей высоты полета БЛА следует выбирать  $H = 100$  м. При большей  $H$  необходимо увеличение  $f$ , что потребует обеспечения более жестких требований к стабилизации БЦК.

Из таблицы 3 видно, что современный технологический уровень обеспечивает измерение  $H$  в рассматриваемом диапазоне (0–100 м) с погрешностью не более  $\pm 1$  м. Соответственно, в качестве критерия по точности измерения ВОС с использованием предлагаемой системы целесообразно выбрать:  $\Delta z_{\max} = 1$  м. Для обеспечения такой точности, с учетом (3), а также с учетом известных характеристик БЦК (таблица 1) и установленного значения  $H$  (100 м), целесообразно выбрать  $V = 109$  км/ч.

Для обеспечения точности совмещения текущей ЦММ (ТМ) и эталонной ЦММ (ЭМ) с одной стороны желательно увеличивать площадь ЭМ для обеспечения попадания в кадр максимального числа контрастных уникальных участков сцены. С другой стороны, известно [14], что для минимизации вычислительных ресурсов при поиске глобального экстремума (ГЭ) корреляционной функции (КФ), желательно обеспечить  $S_{ЭМ}/S_M = 1/10$ , где  $S_{ЭМ} = x_{ЭМ} \times y_{ЭМ}$  – площадь квадратного участка цифровой матрицы камеры (ЦМ), в который полностью укладывается проекция круглого наземного навигационного ориентира (ННО) радиусом  $R$  [15],  $x_{ЭМ}, y_{ЭМ}$  – геометрические размеры этого участка,  $S_M = x_M \times y_M$  – площадь ЦМ. Таким образом, зная  $x_M, y_M$  легко определить  $x_{ЭМ}, y_{ЭМ}$ . Зная  $H$  и  $f$  можно вычислить размеры участка земли с ННО  $x_{ЭЗ}, y_{ЭЗ}$ , а также размеры прямоугольного участка земли, захватываемого камерой  $x_3, y_3$  (рисунок 3).

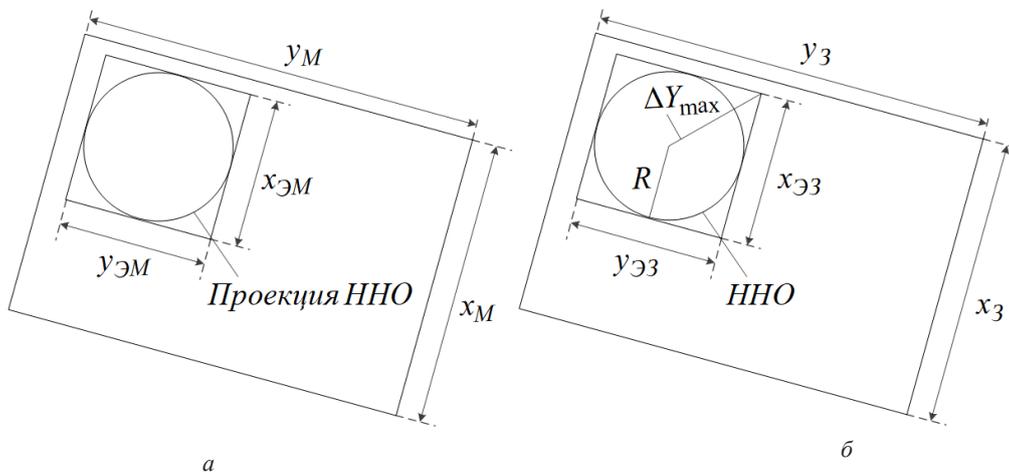


Рисунок 3. Участок земли, захватываемый бортовой камерой БЛА:  $a$  – цифровая матрица бортовой камеры;  $b$  – участок земли, захваченный камерой

Одной из задач при реализации КЭНС, является оценка бокового отклонения [16] БЛА ( $\Delta Y$ ) от линии заданного пути (ЛЗП) за время  $t$  для прогнозирования координат проекции очередного ННО на очередном снимке. Такая оценка позволяет снизить вычислительные ресурсы, требуемые для

поиска ГЭ КФ, а также определить максимальное значение периода съемки местности ( $T_{\max}$ ). Для определения характера зависимости  $\Delta Y(t)$ , обусловленной погрешностями БИНС, была использована методика, предложенная в [17]. В таблице 4 представлены начальные условия для расчетов.

Таблица 4. Начальные условия для расчета зависимости

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Общие параметры			
Ускорение свободного падения	$g$	9,8	м/с <sup>2</sup>
Параметры полета БЛА			
Высота	$H$	100	м
Истинная скорость	$V$	109	км/ч
Параметры бортовой цифровой камеры БЛА			
Геометрические размеры ЦМ	$x_M$	18	мм
	$y_M$	13,5	мм
Вклад погрешностей гироскопов в ошибку БИНС			
Систематическая составляющая	$\sigma_{syst}^{gyro}$	4	град/ч
Шум (случайное блуждание угла)	$ARW$	0,2	град/√ч
Нестабильность нуля (фликер-шум)	$\sigma_{BI}^{\Delta\omega}$	10	град/ч
Время корреляции	$T_c^{\Delta\omega}$	1000	с
Вклад погрешностей акселерометров в ошибку БИНС			
Шум (случайное блуждание угла)	$VRW$	0,0011	м/(с <sup>2</sup> √Гц)
Нестабильность нуля (фликер-шум)	$\sigma_{BI}^{\Delta a}$	0,0001	м/с <sup>2</sup>
Время корреляции	$T_c^{\Delta a}$	1000	с

Расчет  $\Delta Y(t)$  производился согласно выражения [17] (рисунок 4):

$$\Delta Y(t) = \frac{g\sigma_{syst}^{gyro}}{6} t^3 + \left( \frac{ARW}{2\sqrt{5}} + \frac{3g\sigma_{BI}^{\Delta\omega}}{\sqrt{126T_c^{\Delta\omega}}} + \frac{\sigma_{BI}^{\Delta a}}{\sqrt{10T_c^{\Delta a}}} \right) t^{5/2} + \frac{\sigma_{syst}^{acc}}{2} t^2 + \frac{VRW}{\sqrt{3}} t^{3/2}. \quad (4)$$

С учетом [15], в качестве условия для коррекции БИНС по данным КЭНС было выбрано:

$$\Delta Y(T_{\max}) \geq \frac{H}{10f} \sqrt{x_m^2 + y_m^2}. \quad (5)$$

Для принятых значений параметров получены следующие результаты расчетов:  $T_{\max} = 22$  с;  $\Delta Y(T_{\max}) = 20,45$  м (рисунок 4). Полученные результаты расчетов согласуются с выводами, сделанными в [18].

Для нахождения максимума КФ  $R_{\max}$  использовался классический алгоритм [18]:

$$R(x, y) = \frac{1}{x_{ЭМ} y_{ЭМ}} \sum_{i=0}^{x_{ЭМ}-1} \sum_{j=0}^{y_{ЭМ}-1} f_{ЭМ}(i, j) f_{ТИ}(i+x, j+y), \quad (6)$$

где  $x, y$  – смещение фрагмента  $f_{ЭМ}$  относительно  $f_{ТИ}$ ,  $0 \leq x \leq (x_M - x_{ЭМ})$ ,  $0 \leq y \leq (y_M - y_{ЭМ})$ .

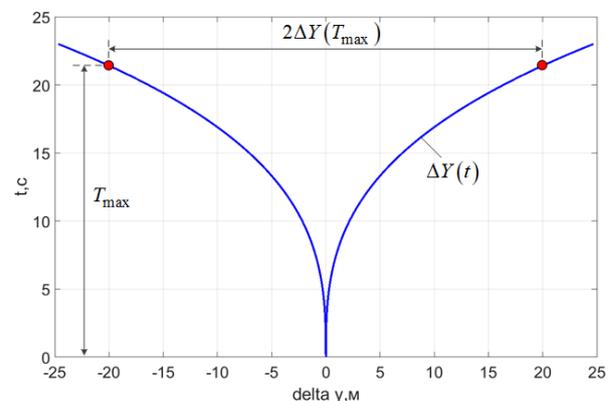


Рисунок 4. Оценка значения  $T_{\max}$  по известному значению  $\Delta Y_{\max}$

В [14] показано, что устойчивость алгоритмов поиска ГЭ КФ во многом зависит от степени геометрических искажений текущего изображения (ТМ). Для снижения этих искажений, перед сопоставлением с ЭМ, целесообразно осуществлять ее дополнительную обработку, включающую аффинные (сдвиг, поворот, изменение масштаба) преобразования с учетом результатов оценки пилотажно-навигационных параметров полета в НК БЛА [19]. Так, например, поворот ЭМ вокруг центра с координатами  $(x_r, y_r)$  на угол  $\theta$  можно осуществить с использованием выражений [14]:

$$m' = x_r + (m - x_r) \cos \theta - (n - y_r) \sin \theta; \tag{7}$$

$$n' = y_r + (m - x_r) \sin \theta - (n - y_r) \cos \theta.$$

где  $m, n$  – координаты отдельной точки исходной ЭМ в системе координат, связанной с ТМ;  $m', n'$  – координаты отдельной точки повернутой ЭМ в системе координат, связанной с ТМ.

На рисунке 5 приведен график зависимости значения максимума КФ  $R_{\max}$  от угла поворота ЭМ  $\theta$ , полученный в результате исследований с использованием видеозаписей реальных полетов БЛА. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с данными, приведенными в [14].

На рисунке 6 приведена исправленная ЭМ (повернутая на угол  $\theta$ ), и ТМ (с выделением совпадающего участка и оценкой значения  $R_{\max}$ ).

В процессе исследований для построения ЭМ использовались стереопары, снятые ранее с этого же БЛА. Причем рассматривались следующие случаи: та же траектория полета БЛА (те же направление и высота полета) (рисунок 7, а) и измененная траектория полета (измененные направление и высота полета) (рисунок 7, б). Кроме этого для построения ЭМ использовались стереопары, снятые ранее со спутника (рисунок 7, в).

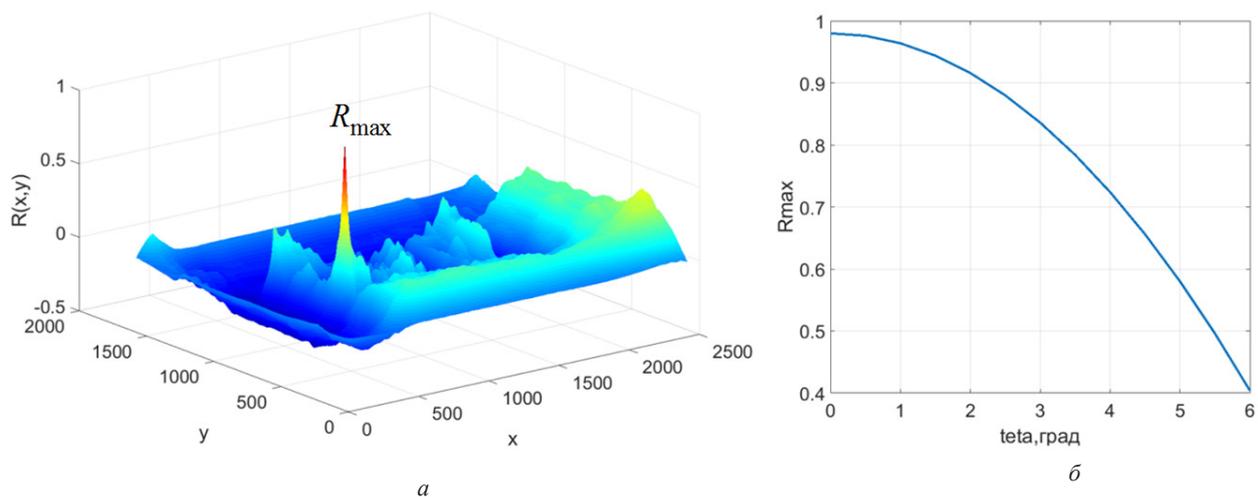


Рисунок 5. Зависимость значения максимума КФ от угла поворота ЭМ: а – вид КФ; б – зависимость  $R_{\max}$  от  $\theta$

В таблице 5 представлены результаты корреляционной обработки ТМ при рассмотренных вариантах ЭМ.

Невысокое значение  $R_{\max}$  для случая реконструкции ЭМ из материалов спутниковой съемки, обусловлено низким разрешением спутниковых снимков (СС), взятых из общедоступного ресурса [20]. В случае применения снимков с большим разрешением можно увеличить  $R_{\max}$  до приемлемых для инженерных задач значений. Из рисунков 7,

а и б видно, что в случае использования КГС частично решается проблема теней на ЦИ – контуры теней присутствуют на КГС, но имеют меньшие значения яркости точек по сравнению с точками, принадлежащими проекциям высотных объектов сцены. Здесь также следует отметить, что СС для «Яндекс.Карт» делаются с интервалом в доли секунды, поэтому у быстро движущихся объектов даже не совпадают контуры (рисунок 8) [21]. За этот интервал времени спутник значительно смещается.

Таблица 5. Результаты корреляционной обработки ТМ при различных вариантах ЭМ

Вариант ЭМ	Предварительная обработка ЭМ	Значение $R_{\max}$ , %
ЭМ (та же траектория БЛА)	–	98
ЭМ (измененная траектория)	Аффинные преобразования	95
ЭМ (из спутниковых снимков)	Аффинные преобразования	67

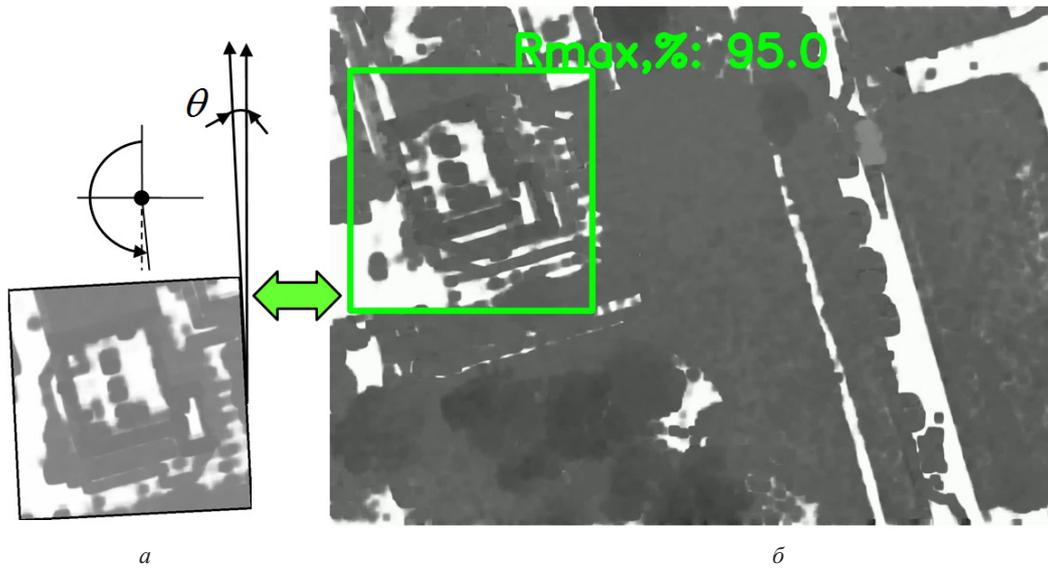


Рисунок 6. Результаты корреляционной обработки ЭМ и ТМ: *a* – исправленная ЭМ; *б* – обработанный кадр ТМ

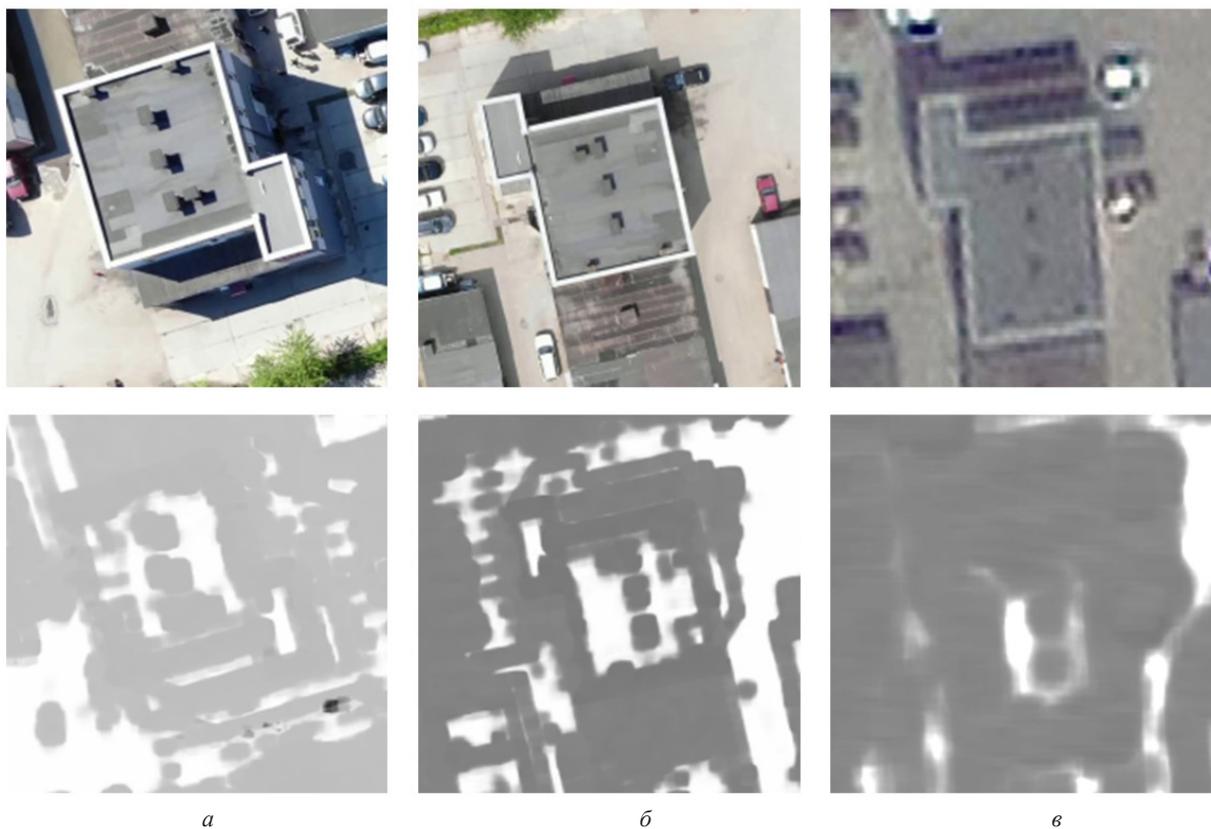


Рисунок 7. Изображения ННО и соответствующие им ЭМ: *a* – та же траектория полета; *б* – обработанный кадр ТМ; *в* – спутниковый снимок

Данное явление как раз и обеспечивает возможность восстановления КГ из двух смещенных участков «Яндекс.Карты» (СС), сделанных спутником под разным углом.

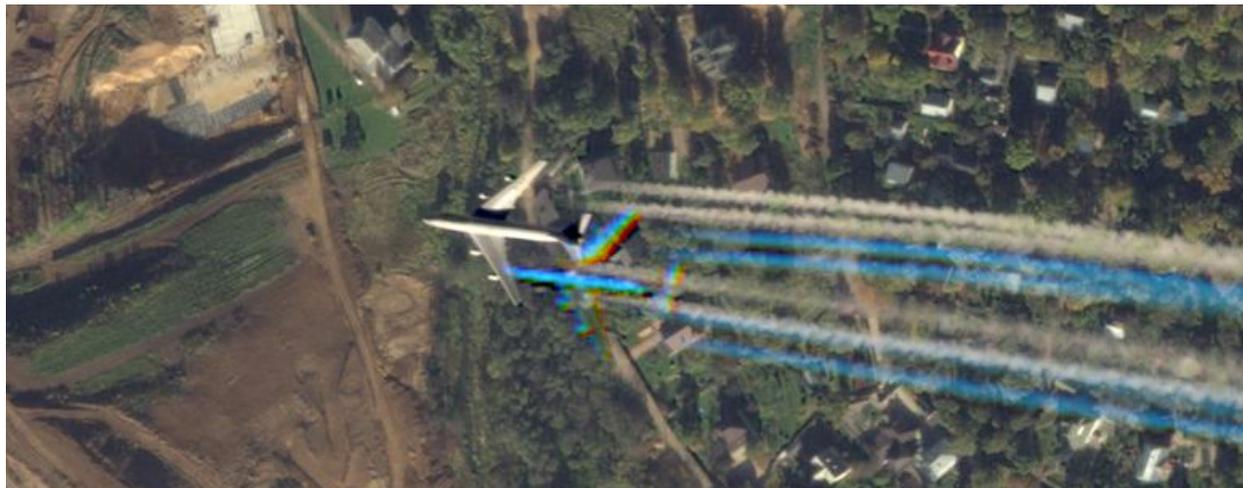


Рисунок 8. СС самолета, сделанный в окрестностях аэропорта

Сравнительный анализ результатов корреляционной обработки видеопотока, в случае применения в качестве эталона СС и трехмерных ЦММ, восстановленных из СС, показал, что применение последних обеспечивает существенно большие значения  $R_{\max}$  (таблица 6).

Для обработки видеопотока от БЦК БЛА на основе алгоритмов машинного зрения и рассмотренных математических соотношений было разработано программное обеспечение,

адаптированное под одноплатный компьютер Raspberry Pi 4. Последний широко применяется в качестве бортового вычислителя, в том числе для решения задач навигации и наведения БЛА по видовой информации. Практические исследования показали, что время обработки очередного кадра видеопотока (построение КГС, аффинные преобразования, реконструкция трехмерной ЦММ, корреляционная обработка ЭМ и ТМ) составляет не более 0,9 с.

Таблица 6. Результаты корреляционной обработки при разнородных эталонах

Вариант эталона	Обработка эталона	Значение $R_{\max}$ , %
ЦИ (из спутниковых снимков)	Аффинные преобразования	29
ЭМ (из спутниковых снимков)	Аффинные преобразования	67

### Заключение

Таким образом, в процессе исследований разработана оптико-электронная КЭНС малого БЛА, отличающаяся применением алгоритмов реконструкции трехмерных ЦММ по воздушным снимкам, а также алгоритмов корреляционной обработки ТМ и ЭМ, что обеспечивает возможность точной АВН малых БЛА по видовой информации. Обоснованы требования к характеристикам

бортовой оптико-электронной системы, к качеству ЭМ и параметрам полета носителя, обеспечивающие максимальную точность предлагаемой КЭНС. Применение разработанной КЭНС обеспечит возможность реализации режима АВН малых БЛА по данным ГИС в условиях плохого приема или подавления сигналов СРНС. Следует также отметить бюджетность предлагаемого технического решения, что актуально для, массово используемых, малых БЛА военного назначения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Теодорович, Н.Н.** Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами / Н.Н.Теодорович, С.М. Строганова, П.С. Абрамов // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Том 9, № 1.
2. **Распопов, В.Я.** Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 2011. – 184 с.
3. **Пролетарский, А.В.** Способы коррекции навигационных систем и комплексов летательных аппаратов / А.В. Пролетарский, К.А. Неусыпин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2012. – С. 223–216.
4. **Матвеев, В.В.** Инерциальные навигационные системы / В.В. Матвеев. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – 199 с.

5. **Сырямкин, В.И.** Корреляционно-экстремальные радионавигационные системы. Монография / В.И. Сырямкин, В.С. Шидловский. – Томск: Изд-во Том. ун-та. – 2010. – 315 с.
6. **Костяшкин, Л.Н.** Обработка изображений в авиационных системах технического зрения / Л.Н. Костяшкин, М.Б. Никифоров. – М.: Физматлит, 2016. – 240.
7. **Латкин, В.А.** Трехмерное картографирование местности / В.А. Латкин // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26. – № 2. – С. 133-146.
8. **Тужилкин, А.Ю.** Распознавание и реконструкция 3D-объектов по спутниковым изображениям на основе сравнения спектров графов / А.Ю. Тужилкин // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2. – С. 3727–3732.
9. **Красильщиков, М.Н.** Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / М.Н. Красильщиков [и др.]. – М.: Физматлит, 2009. – 556 с.
10. **Клетте, Р.** Компьютерное зрение. Теория и алгоритмы / пер. с англ. А.А. Сликин. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 506 с.
11. **Козин, Е.В.** Фотограмметрия / Е.В. Козин, А.Г. Карманов, Н.А. Карманова. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 142 с.
12. **Ардентов, А.А.** Алгоритмы вычисления положения и ориентации БПЛА / А.А. Ардентов [и др.] // Программные системы: теория и приложения. – 2012. – Т. 3 – № 3. – С. 23-39.
13. **Шейников, А.А.** Математическая модель ошибок высотомера беспилотного летательного аппарата на базе стереосистемы технического зрения / А.А. Шейников, В.А. Малкин, А.А. Санько, Л.А. Иваницкий // Авиационный вестник. – 2022. – № 7. – С. 68-75.
14. **Елесина, С.И.** Совмещение изображений в корреляционно-экстремальных навигационных системах. Монография / С.И. Елесина, Л.Н. Костяшкин, А.А. Логинов, М.Б. Никифоров. – М.: Радиотехника, 2015. – 204 с.
15. **Коваленко, А.М.** Коррекция ошибок бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата с использованием наземных навигационных ориентиров / А.М. Коваленко, А.А. Шейников // ГУ НИИ ВС РБ «Наука и военная безопасность». – 2020. – № 2(64). – С. 16-22.
16. **Биард, Р.** Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Р. Биард, Т. Маклэйн. – М.: Техносфера, 2015. – 312 с.
17. **Матвеев, В.В.** Инженерный анализ погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы / В.В. Матвеев // Известия ТулГУ. – 2014. – № 9. – С. 251-267.
18. **Костяшкин, Л.Н.** Совмещение изображений в корреляционно-экстремальных навигационных системах / Л.Н. Костяшкин, М.Б. Никифоров. – М.: Радиотехника, 2015. – 208 с.
19. **Коваленко, А.М.** Модель инерциально-оптической навигационной системы беспилотного летательного аппарата / А.М. Коваленко, А.А. Шейников // Системный анализ и прикладная информатика. – 2020. – № 2. – С. 17-25.
20. **Яндекс Карты:** [Электронный ресурс] // Яндекс. URL: <https://yandex.ru/maps/>. (Дата обращения 02.04.2024).
21. **Технологии. Спутниковые снимки на Яндекс.Картах:** [Электронный ресурс] // Компания Яндекс. URL: <https://yandex.ru/company/technologies/satellite/>. (Дата обращения 02.04.2024).

## REFERENCES

1. **Teodorovich, N.N.** Methods of detecting and combating small-sized unmanned aerial vehicles / N.N. Teodorovich, S.M. Stroganova, P.S. Abramov // Internet journal “Science Studies”. 2017. Vol. 9, No. 1.
2. **Raspopov, V.Ya.** Microsystems of orientation of unmanned aerial vehicles. – М.: Mashinostroenie, 2011. 184 p.
3. **Proletarsky, A.V.** Methods for correcting navigation systems and aircraft complexes / A.V. Proletarsky, K.A. Neusypin // Bulletin of MSTU named after. N.E. Bauman. Ser. “Instrument Engineering”. – 2012. – Pp. 223-216.
4. **Matveev, V.V.** Inertial navigation systems / V.V. Matveev. – Tula: Tula State University Publishing House, 2012. 199 p.
5. **Syryamkin, V.I.** Correlation-extreme radio navigation systems. Monograph / V.I. Syryamkin, V.S. Shidlovsky. – Tomsk: Publishing house Tom. Univ., 2010. – 315 p.
6. **Kostyashkin, L.N.** Image processing in aviation vision systems / L.N. Kostyashkin, M.B. Nikiforov. – М.: Физматлит, 2016. – 240 p.
7. **Latkin, V.A.** Three-dimensional mapping of terrain / V.A. Latkin // Bulletin of SGUGiT. – 2021. – Vol. 26. – No. 2. – Pp. 133-146.
8. **Tuzhilkin, A.Yu.** Recognition and reconstruction of 3D objects from satellite images based on comparison of graph spectra / A.Yu. Tuzhilkin // Fundamental research. – 2015. – No. 2. – Pp. 3727-3732.
9. **Krasilshchikov, M.N.** Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aerial vehicles / M.N. Krasilshchikov [and others]. – М.: Физматлит, 2009. – 556 p.
10. **Klette, R.** Computer vision. Theory and algorithms / trans. from English A.A. Slickin. – М.: ДМК Press, 2019. 506 p.
11. **Kozin, E.V.** Photogrammetry / E.V. Kozin, A.G. Karmanov, N.A. Karmanova. – St. Petersburg: ITMO University, 2019. 142 p.

12. **Ardentov, A.A.** Algorithms for calculating the position and orientation of UAVs / A.A. Ardentov [et al.] // Software systems: theory and applications. – 2012. – Vol. 3 – No. 3. – Pp. 23-39.
13. **Sheynikov, A.A.** Mathematical model of errors in the altimeter of an unmanned aerial vehicle based on a stereo vision system / A.A. Sheynikov, V.A. Malkin, A.A. Sanko, L.A. Ivanitsky // Aviation Bulletin. – 2022. – No. 7. – Pp. 68-75.
14. **Elesina, S.I.** Combination of images in correlation-extremal navigation systems. Monograph / S.I. Elesina, L.N. Kostyashkin, A.A. Loginov, M.B. Nikiforov. – M.: Radio engineering, 2015. – 204 p.
15. **Kovalenko, A.M.** Error correction of a strapdown inertial navigation system of an unmanned aerial vehicle using ground-based navigation landmarks / A.M. Kovalenko, A.A. Sheynikov // State Research Institute of the Armed Forces of the Republic of Belarus “Science and Military Security”. – 2020. – No. 2(64). – Pp. 16-22.
16. **Biard, R.** Small unmanned aerial vehicles: theory and practice / R. Biard, T. McLane. – M.: Tekhnosphere, 2015. 312 p.
17. **Matveev, V.V.** Engineering analysis of errors in a strapdown inertial navigation system / V.V. Matveev // News of Tula State University. – 2014. – No. 9. – Pp. 251-267.
18. **Kostyashkin, L.N.** Combination of images in correlation-extremal navigation systems / L.N. Kostyashkin, M.B. Nikiforov. – M.: Radio engineering, 2015. – 208 p.
19. **Kovalenko, A.M.** Model of an inertial-optical navigation system for an unmanned aerial vehicle / A.M. Kovalenko, A.A. Sheynikov // System analysis and applied informatics. – 2020. – No. 2. – Pp. 17-25.
20. **Yandex Maps:** [Electronic resource] // Yandex. URL: <https://yandex.ru/maps/>. (Date of access: 04/02/2024).
21. **Technologies. Satellite images on Yandex.Maps:** [Electronic resource] // Yandex Company. URL: <https://yandex.ru/company/technologies/satellite/>. (Date of access: 04/02/2024).

*SHEINIKOV A.A., MALKIN V.A., SMOLENSKY E.A., IVANITSKY L.A.*

## OPTICAL-ELECTRONIC CORRELATION-EXTREME NAVIGATION SYSTEM OF SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLE

*Educational institution "Military Academy of the Republic of Belarus"  
Minsk, Republic of Belarus*

*An optical-electronic correlation-extreme navigation system for an unmanned aerial vehicle has been developed. The proposed navigation system is characterized by the use of a small-sized and affordable digital camera and computer, which is critical for small military unmanned aerial vehicles. The developed algorithmic support for the system is distinguished by the use of algorithms for reconstructing a three-dimensional digital terrain model using optical digital images from an on-board digital camera, as well as algorithms for correlation processing of current and reference models, which ensures the possibility of accurate autonomous air navigation using view information. The requirements for the flight parameters of a small unmanned aerial vehicle with an optical-electronic correlation-extreme navigation system are substantiated. The values of the true speed of an unmanned aerial vehicle and the correction period of the on-board strapdown inertial navigation system are substantiated according to the data of the proposed optical-electronic correlation-extreme navigation system. The results of the developed optical-electronic correlation-extremal navigation system accuracy studies depending on the shooting parameters and the quality of the reference models are presented.*

**Keywords:** *technical vision system, optical-electronic correlation-extreme navigation system, three-dimensional terrain model, photogrammetry*



**Шейников Алексей Александрович**, кандидат технических наук, доцент, докторант учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Почтовый адрес: 220057 г. Минск, пр-т Независимости, 220.

**Sheinikau Aliaksei**, candidate of technical sciences, associate professor, doctoral student of the educational institution "Military academy of the Republic of Belarus". Postal address: 220057 Minsk, Independence Ave., 220. Area of scientific interests – methods of analysis and synthesis of unmanned aerial vehicles navigation systems

**E-mail:** [af.varb.ao@gmail.com](mailto:af.varb.ao@gmail.com)



**Малкин Виталий Александрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры авиационных радиоэлектронных систем авиационного факультета учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Область научных интересов – методы анализа и синтеза систем автоматического управления летательных аппаратов.

**Malkin Vitaliy**, doctor of technical sciences, professor, professor of the aviation radio-electronic systems department of the aviation faculty of the educational institution "Military academy of the Republic of Belarus". Area of scientific interests – methods of analysis and synthesis of aircraft automatic control systems.



**Смоленский Эдуард Анатольевич**, начальник цикла кафедры авиационных радиоэлектронных систем авиационного факультета учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Почтовый адрес: 220057 г. Минск, пр-т Независимости, 220. Область научных интересов — методы анализа и синтеза навигационных комплексов беспилотных летательных аппаратов.

**Smolensky Eduard**, cycle head of the aviation radio-electronic systems department of the aviation faculty of the educational institution "Military academy of the Republic of Belarus". Postal address: 220057 Minsk, Independence Ave., 220. Area of scientific interests – methods of analysis and synthesis of unmanned aerial vehicles navigation systems.

**E-mail:** Smolenskiy1989@bk.ru



**Иваницкий Леонид Александрович**, адъюнкт учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Почтовый адрес: 220057 г. Минск, пр-т Независимости, 220. Область научных интересов — методы анализа и синтеза навигационных комплексов беспилотных летательных аппаратов.

**Ivanitsky Leonid**, graduate student of the educational institution "Military academy of the Republic of Belarus". Postal address: 220057 Minsk, Independence Ave., 220. Area of scientific interests – methods of analysis and synthesis of unmanned aerial vehicles navigation systems.

**E-mail:** leonid210785@mail.ru