

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

## АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДАТЧИКА АВИАГОРИЗОНТА НА БАЗЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

УО «Военная академия Республики Беларусь»  
г. Минск, Республика Беларусь

*Рассматривается задача определения особенностей и постановки задачи математического моделирования в статье рассматриваются особенности практической реализации датчика авиагоризонта на базе бортовой системы технического зрения. Предложен, разработанный на базе известных приложений, вариант алгоритма работы видеосистемы ориентации беспилотного летательного аппарата. Показаны проблемы автоматического обнаружения и определения положения линии горизонта на сменяющихся цифровых изображениях, составляющих видеопоток от бортовой цифровой камеры. Проведен анализ факторов, влияющих на точность оценки углов ориентации носителя с использованием предлагаемой системы. Приведены результаты практического исследования, характеризующие степень влияния рассматриваемых факторов на общую погрешность. Разработана дискретная стохастическая математическая модель системы ориентации беспилотного летательного аппарата на базе бортовой системы технического зрения. Показана возможность обеспечения приемлемого уровня точности видеосистемы ориентации за счет определенных технических и алгоритмических решений. Сделан вывод о целесообразности применения этой системы в автономных мультисенсорных навигационных комплексах беспилотных летательных аппаратов.*

**Ключевые слова:** датчик авиагоризонта, система технического зрения, погрешность измерения углов ориентации, дискретная стохастическая математическая модель.

### Введение

В настоящее время бортовая цифровая камера (БЦК) является обязательным элементом оборудования любого, даже самого дешевого, беспилотного летательного аппарата (БЛА). Во многих БЛА более высокого ценового сегмента, в состав бортового оборудования входит не просто БЦК, а система технического зрения (СТЗ), включающая БЦК (в общем случае систему из нескольких БЦК, работающих в одинаковых или различных диапазонах длин волн), вычислитель и программно-алгоритмическое обеспечение обработки видовой информации. По своей сути БЦК является датчиком геофизического поля (оптического или теплового). Соответственно, с учетом современного развития технологий, СТЗ может рассматриваться как перспективная автономная система автоматической навигации по геофизическим полям [1]. Так, при наличии специального алгоритмического обеспечения и достаточных вычислительных ресурсов, СТЗ с БЦК оптического диапазона может реализовывать те же функции, что и бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС) (являющаяся основой большинства современных систем и комплексов воздушной навигации): счисление углов ориентации, скоростных параметров, координат БЛА (с использованием алгоритмов вычисления оптического потока) [2]. Причем, для многих малоразмерных тактических (МТ) БЛА характерно жесткое закрепление БЦК в корпусе носителя, что обуславливает соответствие его динамики и эволюций датчика изображений (светочувствитель-

ной матрицы (СЧМ) БЦК), которые можно описать методами проективной геометрии [3]. Известным недостатком методов счисления пилотажно-навигационных параметров полета (ПНПП) является интегральное накопление ошибок с течением времени, что обусловлено наличием погрешностей у любого датчика, существующих на каждом шаге измерения. Поэтому, разработчики стараются дополнительно применять альтернативные методы оценки ПНПП, опирающиеся на неизменную по времени (медленно меняющуюся по известному закону) внешнюю информацию об окружающем пространстве и его свойствах. В этом случае удается решить проблему с неограниченным ростом ошибок оценивания ПНПП (путем периодической коррекции последних), но встает проблема уменьшения, хоть и стабильных, но существенных, систематических и случайных погрешностей соответствующих датчиков (магнитометрических и пирометрических систем ориентации [4], магнитометрических систем глобального позиционирования [5] и астронавигационных систем [6]). Так, с учетом специфики работы СТЗ, измерение углов ориентации (крена и тангажа) БЛА можно производить опираясь на информацию о положении линии горизонта (ЛГ) [7]. При этом процесс распознавания линии, разделяющей области неба и земной поверхности на цифровом изображении (ЦИ), является ключевым во всей системе [8]. Он сопряжен со многими трудностями, преодолеть которые полностью невозможно. Однако повышение эффективности алгоритмов обработки ЦИ позволяет снизить

погрешности измерения углов ориентации ( $\Delta_{\gamma_0}$ ) и запаздывание навигационных решений (повысить частоту выдачи информации  $n_{\text{БИ}}$ ) до приемлемого уровня ( $\Delta_{\gamma_0} \leq 1,5^\circ$ ,  $n_{\text{БИ}} \geq 60$  Гц) [8]. Учитывая перечисленные особенности функционирования системы ориентации БЛА на базе СОСТЗ (СОСТЗ), в процессе теоретических исследований ее целесообразно представлять в виде дискретной стохастической измерительной системы [9]. Следует также учитывать, что реализация потенциала СОСТЗ по точности возможна в случае комплексирования с другими бортовыми автономными датчиками ПНИ, работающими на других физических принципах и также представляющими собой дискретные стохастические измерительные системы [10]. Соответственно, при анализе рассматриваемого датчика ПНИ для целей последующего синтеза автономного мультисенсорного навигационного комплекса (МСНК) БЛА, целесообразно использовать дискретную стохастическую математическую модель (ДСММ) СОСТЗ. Основными факторами, влияющими на точность СОСТЗ являются: погрешности БЦК как средства измерения (погрешность квантования, зависящая от размера пикселя СЧМ и фокусного расстояния [11]), наличие преград на местности (высотные объекты естественного или искусственного происхождения) и в небе (облака, дым и др.), частично загромождающих ЛГ (что обуславливает погрешность аппроксимации ЛГ), засветка и зашумление ЦИ, обусловленные факторами окружающей среды (солнечная активность, погодные условия). Кроме этого, особенности функционирования СОСТЗ могут обуславливать ограничения на максимальные углы ориентации и высоту полета МТБЛА.

### Постановка задачи

Определить максимальный диапазон измерений углов ориентации БЛА с учетом особенностей функционирования СОСТЗ. Провести анализ влияния основных факторов на точность измерений углов ориентации БЛА с помощью СОСТЗ. Разработать ДСММ СОСТЗ. Оценить возможность применения СОСТЗ в МСНК МТБЛА.

Начальные условия для решения задачи: в качестве носителя выбран МТБЛА типа квадрокоптер; СОСТЗ состоит из вычислителя (с установленным программно-алгоритмическим обеспечением обработки видовой информации) и БЦК оптического диапазона, установленной по курсу и жестко связанной с корпусом БЛА.

### Решение задачи

На ЦИ, полученных с помощью БЦК, область неба является относительно однородной и светлой, а область земли, представляет собой смесь цветов, форм и т.п., в среднем имеющую более темный оттенок. С математической точки зрения, область неба на

ЦИ имеет меньшую дисперсию цвета (меньшую дисперсию оттенков серого полутонового ЦИ) и большее значение средней яркости точек по сравнению с областью земной поверхности. Граница перехода между этими областями и есть искомая ЛГ.

Предлагается следующий алгоритм работы СОСТЗ:

1. Получение ЦИ из видеопотока от БЦК.
2. Перевод ЦИ из цветового пространства *RGB* (трехканальная цветовая модель *red, green, blue* – красный, зеленый, синий) в полутоновое (выполненное в градациях серого цвета) [12]. Этот этап предварительной обработки ЦИ, предназначен для упрощения вычислений за счет исключения из анализа информации о цветовых характеристиках элементов ЦИ (цветовой тон, насыщенность – многопараметрическая система) и перехода к анализу яркостной информации (однопараметрическая система).

3. Последовательное применение централизованной гауссовой функции (размытие по Гауссу) и медианного фильтра [13]. Этот этап предварительной обработки ЦИ предназначен для улучшения структуры ЦИ за счет подавления высокочастотных компонентов при сохранении без искажений резких границ объектов (рисунок 1, а).

4. Применение фильтра Лапласа для выделения границ [14]. В процессе этого этапа обработки ЦИ подчеркиваются разрывы уровней яркости на ЦИ и подавляются области с относительно плавным изменением яркости. После использования фильтра Лапласа на ЦИ остаются две глобальных однородных, но отличающихся по яркости области (область неба и область земли), имеющие общую границу.

5. Вычисление порога по методу Отсу и преобразование полутонового ЦИ в бинарное (черно-белое) (рисунок 1, б) [14].

6. Поиск точек ЦИ, лежащих на переходе между черной и белой областями ЦИ [14]. В процессе этого этапа обработки ЦИ формируется набор точек, составляющих линию перехода (в естественных условиях обычно ломаную как на рисунке 1, б).

7. Сглаживание набора полученных точек (составляющих искомую ЛГ) прямой линией с помощью метода наименьших квадратов (МНК) [15].

8. Определение угла крена  $\gamma$  (в градусах) по формуле [8]:

$$\gamma = \frac{180}{\pi} \arctg\left(\frac{l_1 - l_2}{X}\right), \quad (1)$$

где  $l_1, l_2, X$  – геометрические параметры областей ЦИ в пикселях (рисунок 2).

Шаг 8. Определение угла тангажа  $\vartheta$  (в градусах) с учетом вертикального смещения ЛГ в поле зрения БЦК по формуле [8]:

$$\vartheta = \frac{180}{\pi} \left( 2 \arctg\left(\frac{b}{Y} \operatorname{tg} \omega\right) - \arccos\left(\frac{R}{R+h}\right) \right), \quad (2)$$

где  $b$  – вертикальное смещение ЛГ на ЦИ (рисунок 3),  $\omega$  – поле зрения БЦК, соответствующее стороне  $Y$  (в пикселях) СЧМ БЦК (рисунок 3),  $R$  – радиус поверхности Земли, аппроксимированной сферой;  $h$  – истинная высота полета БЛА.

Разработчики стремятся обеспечить высокое значение максимальной высоты полета БЛА. С другой

стороны, для СОСТЗ критически важным является наличие видимости ЛГ. В качестве основного препятствия при этом выступает облачность. В связи с тем, что нижнее основание облаков обычно не опускается ниже 600 м [16], в качестве «потолка» для БЛА, оснащенного СОСТЗ, целесообразно принять это значение.



a



б

Рисунок 1. Преобразование полутонового ЦИ в бинарное



Рисунок 2. Параметры областей ЦИ, необходимые для определения угла крена

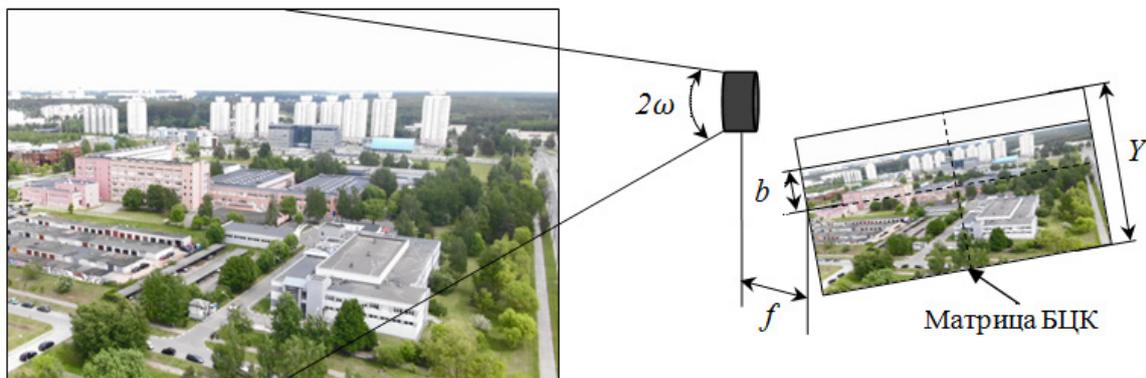


Рисунок 3. Параметры областей ЦИ, необходимые для определения угла тангажа

Ограничения по углу крена (при  $\vartheta = 0^\circ$ ) связаны с выходом аппроксимированной ЛГ за верхнюю (нижнюю) «рамку» ЦИ ( $l_1 = 0, l_2 = Y$  или  $l_1 = Y, l_2 = 0$ ). Тогда, с учетом принятого допуска в 5 % (размера «буферной зоны»), предельное значение измеряемого угла крена для конкретной БЦК можно рассчитать следующим образом:

$$\gamma_{\text{дон}} = \frac{180}{\pi} \arctg\left(\pm \frac{0,9Y}{X}\right). \quad (3)$$

По углу тангажа также имеются ограничения, связанные с невозможностью обеспечения присутствия ЛГ в кадре при малых высотах полета и малом поле зрения БЦК (с учетом «буферной зоны»):

$$\vartheta_{\text{дон}} = \frac{180}{\pi} (2\arctg(0,45\text{tg}\omega) - \arccos(\frac{6371}{6371+h})). \quad (4)$$

При проведении исследований использовалась цифровая камера *Defender C-2525HD* (таблица 1).

Таблица 1

Характеристики цифровой камеры *Defender C-2525HD* в режиме видео

Цена, USD	Эффективное фокусное расстояние объектива, мм	Разрешение видео, пикселей	Поле зрения, град.
20	4,8-8,0	640x480	57,8-36,7

Для выбранной БЦК были рассчитаны предельные значения измеряемых параметров:  $\gamma_{\text{дон}} \approx \pm 35^\circ$  (при  $\vartheta = 0^\circ$ ) (рисунок 4, а),  $\vartheta_{\text{дон}} \approx \pm 50^\circ$  (при  $\gamma = 0^\circ, h = 40$  м) (рисунок 4, б). Расширение диапазона измеряемых углов ориентации носителя СОСТЗ возможно за счет обеспечения  $Y = \max$ . С другой стороны, для увеличения скорости

обработки ЦИ (с целью обеспечения работы СОСТЗ в режиме реального времени) целесообразно обеспечить  $XU = \min$  при условии сохранения приемлемого уровня точности измерений ( $\Delta\gamma_{\text{max}} = \Delta\vartheta_{\text{max}} = 1,5^\circ$  [8]).

Алгоритм СОСТЗ предполагает автоматическое сглаживание ЛГ по МНК:

$$\begin{cases} y = \frac{K_{xy}^*}{D_x^*} x + m_y^* - \frac{K_{xy}^*}{D_x^*} m_x^* \\ m_x^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; m_y^* = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}; K_{xy}^* = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)(y_i - m_y^*)}{n}; D_x^* = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)^2}{n} \end{cases} \quad (5)$$

где  $x, y$  – координаты точки ЦИ, лежащей на линии перехода между белой и черной областями;  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  – количество анализируемых точек ЦИ;  $K_{xy}^*$  – корреляционный момент;  $m_x^*, m_y^*$  – математические ожидания координат анализируемых точек;  $D_x^*$  – дисперсия значений координат анализируемых точек по оси  $X$  ЦИ.

ляционный момент;  $m_x^*, m_y^*$  – математические ожидания координат анализируемых точек;  $D_x^*$  – дисперсия значений координат анализируемых точек по оси  $X$  ЦИ.

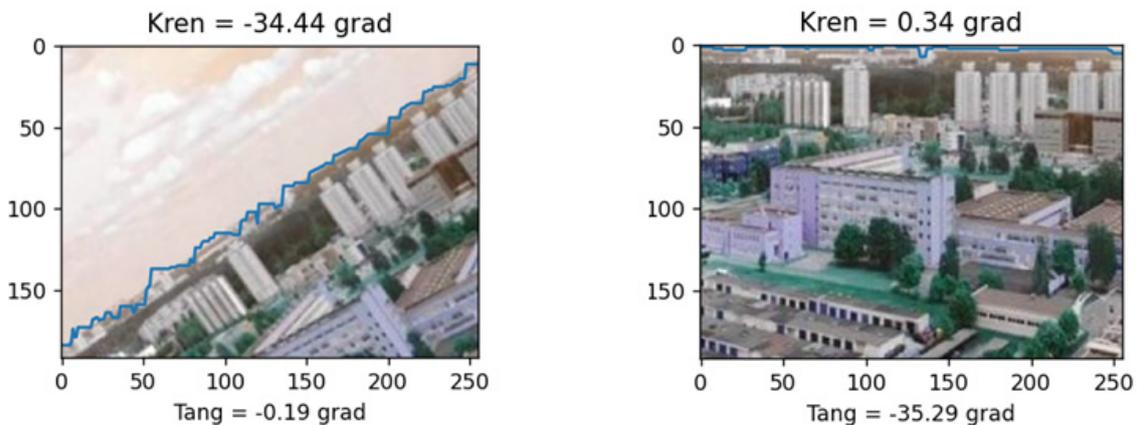


Рисунок 4. Результат работы СОСТЗ при предельных значениях углов ориентации

Для оценки влияния погрешности алгоритмической аппроксимации ЛГ на точность определения вертикали ( $\Delta g_{xy}$ ) были выбраны следующие начальные условия:  $\gamma = 0^\circ$ ,  $X = [600...2880]nkc$ ,  $\Delta Y_{ЛГ} = [2...10]nkc$  ( $\Delta Y_{ЛГ}$  – заданное значение СКО вертикального случайного разброса точек, составляющих ЛГ на ЦИ). Результаты моделирования (рисунок 5) показывают, что

при увеличении  $\Delta Y$  растет погрешность оценки крена  $\Delta\gamma$ . Так, при  $\Delta Y = 2nkc - \Delta\gamma = 0,6^\circ$  (линия 3), при  $\Delta Y = 5nkc - \Delta\gamma = 2^\circ$  (линия 2),  $\Delta Y = 10nkc - \Delta\gamma = 7^\circ$  (линия 1). Увеличение  $X$  (при  $\Delta Y = \text{const}$ ) положительно влияет на точность определения вертикали. Так, при  $X = 600nkc - \Delta\gamma = 2^\circ$  (линия 5), при  $X = 2880nkc - \Delta\gamma = 0,5^\circ$  (линия 4).

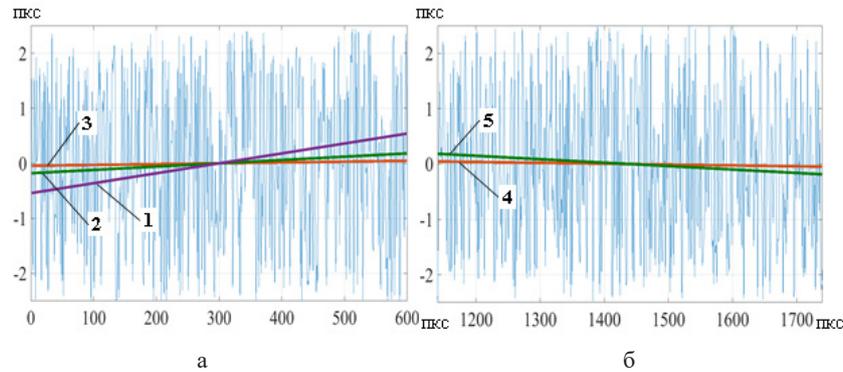


Рисунок 5. Результаты алгоритмического сглаживания ЛГ на ЦИ

Результаты анализа показывают принципиальную возможность стабилизации  $\Delta g_{xy}$  в пределах  $\pm 4^\circ$  за счет обеспечения  $X = \max$ . С учетом предыдущих выводов ( $Y = \max$ ,  $XU = \min$ ), очевидной становится необходимость поиска вариантов, обеспечивающих оптимальное соотношение  $X$  и  $Y$ .

Для оценки влияния факторов окружающей среды на точность автоматического определения линии горизонта ( $\Delta g_{noise}$ ) были выбраны следующие начальные условия:  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\vartheta = 0^\circ$ ,  $h = 40$  м,  $X = 640nkc$ ,  $Y = 480nkc$ . В процессе исследований производились преобразования ЦИ: яркость исходного ЦИ принималась равной 50 % и изменялась с шагом 10 % в диапазоне [10 %...90 %]; изменялась степень зашумления ЦИ путем автоматического увеличения локальной дисперсии шума для каждого пикселя на 20 единиц (процесс добавления импульсного шума к ЦИ состоит в замене исходных значений яркости пикселей на новые случайные значения (в пределах заданного СКО) [14]; значение заданного угла крена  $\gamma_{зад}$  изменялось в диапазоне  $[-35^\circ...35^\circ]$  с шагом  $5^\circ$ ; значение заданного угла тангажа  $\vartheta_{зад}$  изменялось в диапазоне  $[-35^\circ...35^\circ]$  с шагом  $3^\circ$ . Разность между заданными и расчетными (вычисленными СОСТЗ) значениями углов ориентации ( $\Delta\gamma = \gamma_{зад} - \gamma_{расч}$ ,  $\Delta\vartheta = \vartheta_{зад} - \vartheta_{расч}$ ) рассматривалась как погрешность,

возникающая из-за ошибок автоматического определения ЛГ на ЦИ (таблица 2). Анализ таблицы 2 показывает, что: изменение яркости ЦИ в заданных пределах не вызывает существенного изменения погрешности определения углов ориентации БЛА; заданное увеличение степени зашумления ЦИ приводит к существенному росту погрешности определения углов ориентации (в 1,5 раза). Результаты анализа показывают принципиальную возможность стабилизации  $\Delta g_{noise}$  в пределах  $\pm 0,3^\circ$  за счет применения эффективных алгоритмов предварительной обработки ЦИ (например, совместное применение медианного фильтра и размытия по Гауссу).

Оценку погрешностей определения вертикали, обусловленных инструментальными погрешностями (погрешность квантования) бортовой оптико-электронной измерительной системы ( $\Delta g_q$ ) можно провести, основываясь на результатах, полученных в предыдущей работе авторов [17]. Результаты анализа показывают принципиальную возможность стабилизации  $\Delta g_q$  в пределах  $\pm 0,05^\circ$  за счет применения СЧМ БЦК с меньшим размером пикселей.

Таким образом, ДСММ СОСТЗ в общем случае может быть описана следующим образом:

$$z_k = j \cdot \left( g_k + \Delta g_k^{xy} \xi_k^{xy} + \Delta g_k^{noise} \xi_k^{noise} + \Delta g_k^q \xi_k^q \right), \quad j = \begin{cases} 1, & \text{при } \gamma \leq \gamma_{дон} (\vartheta \leq \vartheta_{дон}) \\ \text{error}, & \text{при } \gamma > \gamma_{дон} (\vartheta > \vartheta_{дон}) \end{cases} \quad (6)$$

где  $j$  – параметр, учитывающий ограничения по углам ориентации БЛА,  $z_k$  – результат измерения ориентации БЛА с помощью СОСТЗ на  $k$ -м шаге;  $g_k$  – истинное угловое положение БЛА;  $\xi_k^{xy}$ ,  $\xi_k^{noise}$ ,  $\xi_k^q$  – шумы измерений, обусловленные погрешностью

алгоритмической аппроксимации ЛГ, негативным влиянием факторов окружающей среды и инструментальными погрешностями СОСТЗ. Все перечисленные шумы являются независимыми дискретными гауссовскими белыми шумами с нулевым средним и единичной дисперсией.

Таблица 2

Влияние яркости и степени зашумления ЦИ на точность СОСТЗ

Амплитуда шума 0 ед.									
Яркость, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\gamma_{зад}$ , град	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
$\gamma_{расч}$ , град	-19,61	-14,70	-9,75	-4,63	0,23	5,27	10,22	15,14	20,09
$\Delta\gamma$ , град	0,39	0,3	0,25	0,37	0,23	0,27	0,22	0,14	0,09
$\vartheta_{зад}$ , град	-15	-12	-9	-3	0	3	9	12	15
$\vartheta_{расч}$ , град	-15,34	-11,75	-8,57	-2,32	-0,83	3,50	9,85	12,78	15,83
$\Delta\vartheta$ , град	-0,34	0,25	0,43	0,68	-0,83	0,5	0,85	0,78	0,13
Амплитуда шума 20 ед.									
Яркость, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\gamma_{зад}$ , град	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
$\gamma_{расч}$ , град	-19,54	-14,62	-9,68	-4,57	0,59	5,19	10,29	15,37	20,12
$\Delta\gamma$ , град	0,46	0,38	0,32	0,43	0,59	0,19	0,29	0,37	0,12
$\vartheta_{зад}$ , град	-15	-12	-9	-3	0	3	9	12	15
$\vartheta_{расч}$ , град	-15,83	-11,54	-9,51	-2,18	-1,05	3,86	8,31	12,78	16,25
$\Delta\vartheta$ , град	-0,83	0,46	-0,51	0,82	-1,05	0,86	-0,69	0,78	1,25

Результаты моделирования с использованием разработанной ДСММ показывают возможность обеспечения стабилизации общей погрешности СОСТЗ в пределах  $\pm 0,75^\circ$  (что удовлетворяет приемлемому уровню точности измерений углов ориентации БЛА). Наибольший вклад в общую погрешность СОСТЗ вносят погрешности алгоритмической аппроксимации ЛГ (53 % от общей погрешности).

### Заключение

Таким образом, в процессе исследований

разработана ДСММ СОСТЗ, отличающаяся учетом ограничений на максимальные углы ориентации носителя и учетом влияния основных факторов на точность измерения углов ориентации БЛА, что позволяет выявить эффективные направления совершенствования СОСТЗ.

Общая погрешность СОСТЗ сравнима с погрешностью БИНС, что делает целесообразным совместное использование рассматриваемых систем (работающих на различных физических принципах) в автономных МСНК БЛА.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Белоглазов, И.Н. Основы навигации по геофизическим полям / И.Н. Белоглазов. – М.: Наука, 1985. – 328 с.
2. Шейников, А.А. Оценка пилотажно-навигационных параметров полета БЛА с учетом результатов обработки последовательности изображений / А.А. Шейников, А.М. Коваленко // ГУ НИИ ВС РБ «Наука и военная безопасность». – 2021. – № 2(68). – С. 98-107.
3. Клетте, Р. Компьютерное зрение. Теория и алгоритмы / Р. Клетте. пер. с англ. А.А. Слинкин. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 506 с.
4. Распопов, В.Я. Микросистемная авионика. – Тула: Гриф и К, 2010. – 248 с.
5. Canciani, A.J. Absolute positioning using the Earth's magnetic anomaly field: diss. ... PhD: AFIT-ENG-DS-16-S-074 / Aaron J. Canciani. – Ohio, 2016. – 264 p.
6. Воробьев, Л.М. Астрономическая навигация летательных аппаратов / Л.М. Воробьев. – М.: Машиностроение, 1968. – 281 с.
7. Костяшкин, Л.Н. Обработка изображений в авиационных системах технического зрения / Л.Н. Костяшкин, М.Б. Никифоров. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. – 240 с.
8. Распопов, В.Я. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2011. – 184 с.
9. Красильщиков, М.Н. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / М.Н. Красильщиков, Г.Г. Серебряков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 556 с.

10. **Матвеев, В.В.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.
11. **Удалов, Н.В.** Методы и алгоритмы обработки цифровых изображений в комплексных системах наблюдения летательных аппаратов / Н.В. Удалов. – М.: Изд-во МАИ, 2014. – 144 с.
12. **Гонсалес, Р.С.** Цифровая обработка изображений / Р.С. Гонсалес, Вудс Р.Е. пер. с англ. П.А. Чочиа. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
13. **Фисенко, В.Т.** Компьютерная обработка и распознавание изображений / В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.
14. **Старовойтов, В.В.** Цифровые изображения: от получения до обработки / В.В. Старовойтов, Ю.И. Голуб. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2014. – 202 с.
15. **Вентцель, Е.С.** Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Высшая школа, 2006. – 575 с.
16. **Богаткин, О.Г.** Авиационная метеорология / О.Г. Богаткин. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2005. – 328 с.
17. **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. 69-75.

## REFERENCES

1. **Beloglazov, I.N.** Fundamentals of navigation in geophysical fields / I.N. Beloglazov. – M.: Nauka, 1985. – 328 p.
2. **Sheinikov, A.A.** Evaluation of flight and navigation parameters of the UAV flight, taking into account the results of image sequence processing / A.A. Sheinikov, A.M. Kovalenko // State Research Institute of the Armed Forces of the Republic of Belarus «Science and military security». – 2021. – No. 2 (68). – P. 98-107.
3. **Klette, R.** Computer vision. Theory and algorithms / R. Klette. per. from English. A.A. Slinkin. – M.: DMK Press, 2019. – 506 p.
4. **Raspopov, V.Ya.** Microsystem avionics. – Tula: Grif and K, 2010. – 248 p.
5. **Canciani, A.J.** Absolute positioning using the Earth's magnetic anomaly field: diss. ... PhD: AFIT-ENG-DS-16-S-074 / Aaron J. Canciani. – Ohio, 2016. – 264 p.
6. **Vorobyov, L.M.** Astronomical navigation of aircraft / L.M. Vorobyov. – M.: Mashinostroenie, 1968. – 281 p.
7. **Kostyashkin, L.N.** Image processing in aircraft vision systems / L.N. Kostyashkin, M.B. Nikiforov. – M.: FIZMATLIT, 2016. – 240 p.
8. **Raspopov, V.Ya.** Microsystems for orientation of unmanned aerial vehicles / V.Ya. Raspopov. – M.: Mashinostroenie, 2011. – 184 p.
9. **Krasilshchikov, M.N.** Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aircraft / M.N. Krasilshchikov, G.G. Serebryakov. – M.: FIZMATLIT, 2009. – 556 p.
10. **Matveev, V.V.** Fundamentals of construction of strapdown inertial navigation systems / V.V. Matveev, V.Ya. Raspopov. – St. Petersburg: State Scientific Center of the Russian Federation OJSC «Concern» Central Research Institute «Elektropribor», 2009. – 280 p.
11. **Udalov, N.V.** Methods and algorithms for processing digital images in complex systems for observing aircraft / N.V. Udalov. – M.: Publishing House of MAI, 2014. – 144 p.
12. **Gonzalez, R.S.** Digital image processing / R.S. Gonzalez, Woods R.E. per. from English. P.A. Chochia. – M.: Technosfera, 2012. – 1104 p.
13. **Fisenko, V.T.** Computer processing and image recognition / V.T. Fisenko, T.Yu. Fisenko. – St. Petersburg: St. Petersburg State University ITMO, 2008. – 192 p.
14. **Starovoitov, V.V.** Digital images: from acquisition to processing / V.V. Starovoitov, Yu.I. Golub. – Minsk: OIPI NAS of Belarus, 2014. – 202 p.
15. **Wentzel, E.S.** Probability theory / E.S. Wentzel. – M.: Higher school, 2006. – 575 p.
16. **Bogatkin, O.G.** Aviation meteorology / O.G. Bogatkin. – St. Petersburg: Publishing House of the Russian State Humanitarian University, 2005. – 328 p.
17. **Sheinikov, A.A.** Mathematical model of errors in the altimeter of an unmanned aerial vehicle based on a stereo vision system / A.A. Sheinikov, V.A. Malkin, A.A. Sanko, L.A. Ivanitsky // Aviation Bulletin. – 2022. – No. 7. – Pp. 69-75.

SHEINIKOV A.A., IVANITSKI L.A., MALKIN V.A.

## ANALYSIS OF ERRORS OF THE ARTIFICIAL HORIZON SENSOR BASED ON VISION SYSTEM

*Military academy of the Republic of Belarus  
Minsk, Republic of Belarus*

*The article discusses the features of the practical implementation of the artificial horizon sensor based on the onboard vision system. Proposed, developed on the basis of well-known applications, a variant of the algorithm for the operation of an unmanned aerial vehicle orientation video system. The problems of automatic detection and determination of the position of the horizon line on changing digital images that make up the video stream from the onboard digital camera are shown. The analysis of the factors influencing the accuracy of estimation of carrier orientation angles using the proposed system is carried out. The results of a practical study are presented, characterizing the degree of influence of the considered factors on the total error. A discrete stochastic mathematical model of an unmanned aerial vehicle orientation system based on an onboard vision system has been developed. The possibility of providing an acceptable level of accuracy of the orientation video system due to certain technical and algorithmic solutions is shown. The conclusion is made about the expediency of using this system in autonomous multisensor navigation systems for unmanned aerial vehicles.*

**Keywords:** artificial horizon sensor; vision system; orientation angle measurement error; discrete stochastic mathematical model.



**Шейников Алексей Александрович**, кандидат технических наук, доцент, докторант учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Область научных интересов – методы анализа и синтеза навигационных комплексов беспилотных летательных аппаратов

**Sheinikau Aliaksei**, candidate of technical sciences, associate professor, doctoral student of the educational institution “Military academy of the Republic of Belarus”. Area of scientific interests methods of analysis and synthesis of unmanned aerial vehicles navigation systems.

**E-mail:** af.varb.ao@gmail.com



**Иваницкий Леонид Александрович**, адъюнкт учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Область научных интересов – методы анализа и синтеза навигационных комплексов беспилотных летательных аппаратов.

**Ivanitski Leonid**, graduate student of the educational institution “Military academy of the Republic of Belarus”. Area of scientific interests methods of analysis and synthesis of unmanned aerial vehicles navigation systems.

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



**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 department of aviation radio-electronic systems 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