

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТУПАТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВИДЕОКАМЕРЫ ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКОГО ПОТОКА

Введение

В последние годы растет интерес к мини- и микроБПЛА, связанный с возможностями недорогого наблюдения и для целей дистанционного зондирования земной поверхности [1, 2]. На сегодняшний день большинство БПЛА используют систему спутниковой навигации (GNSS) и инерционную навигационную систему (ИНС). Однако такие навигационные решения не могут работать в средах со слабым или отсутствующим сигналом GNSS и не применяются в таких условиях, как навигация в горах/впадинах, навигация в закрытом пространстве или полет в условиях города. 2D и 3D лазерные сканеры могут обеспечить дополнительную информацию для навигации в такой сложной местности, но недостатком является их высокая стоимость, большой вес и непригодность для установки на мини- или микроБПЛА. Стереоскопические видеосенсоры являются относительно легкими и информационно-ориентированными, связанные алгоритмы обработки видео предъявляют существенные вычислительные требования, что делает их применение в реальном времени проблематичным. Поэтому существует потребность в новых методиках анализа движения для навигации в средах со слабым или отсутствующим сигналом GNSS.

Оптический поток (ОП) камер вызывает особый интерес для исследования из-за простого представления скорости. Было замечено, что медоносные пчелы используют оптический поток для посадки, регулирования скорости полета и избегания препятствий [3]. Заинтересованные схемой полета насекомых, многие разработчики были направлены на использование модифицированных видеосенсоров для измерения оптического потока на основе различных роботизированных платформ [4]. Существуют варианты использования сенсоров оптической мыши, для измерения поля движения, установленные на БПЛА [5], но невысокое разрешение и невозможность установки дополнительной фокусирующей оптики давали неудовлетворительный результат в определении оптического потока [6].

Анализ современной литературы по изучению оптического потока показал, что для измерения оптического потока используются как простые монокулярные камеры, так и специальные сенсоры оптического потока [7]. Оптический поток можно использовать для оценки скорости, ориентации и траектории движения после того как оцененные значения ОП и ИНС прошли через стохастические фильтры. Такие системы ОП/ИНС предоставляют огромные возможности для поддержки малых или микроБПЛА в ближней навигации, не полагаясь на сигнал GNSS, аналогично системе оптической навигации насекомых.

В работе показана возможность применения оптического датчика для оценки параметров движения БПЛА. Предлагается использовать текстурный анализ [8] для оценки оптического потока в сравнении со стандартным блочным методом. Для исследования точности работы всего алгоритма разработана программа в системе MATLAB. На основе полученных данных результатов оценок поступательной скорости проанализирована точность предложенных методов.

Определение параметров движения по данным оптического потока видеокамеры

Различные точки пространства предметов отображаются оптической системой камеры в пространстве изображений на различных расстояниях от фокальной плоскости. Однако, если расстояние между камерой и наблюдаемой сценой значительно превышает фокусное расстояние оптической системы, можно считать, что изображение строится в ее фокальной плоскости. В этом случае можно воспользоваться проективной моделью камеры, в которой изображение трехмерного объекта получается проектированием его в фокальную плоскость (плоскость изображения) через единственную точку, называемую оптическим центром. Прямая

линия, перпендикулярная плоскости изображения и проходящая через эту точку, называется оптической осью камеры, а точка пересечения оптической оси с плоскостью изображения – главной точкой. Движение объектов перед камерой или движение камеры в неподвижной окружающей обстановке приводит к соответствующим изменениям на картинке, и это изменение можно использовать для восстановления соответствующего движения. Камера движется в статической обстановке. Поле движения создается путем проектирования скорости на плоскости изображения.

Точка p соответствует точке P на поверхности Земли (рис. 1). Эти две точки связаны уравнениями проектирования. Важно то, что любой точке изображения можно приписать некоторый вектор. Эти векторы образуют поле движения.

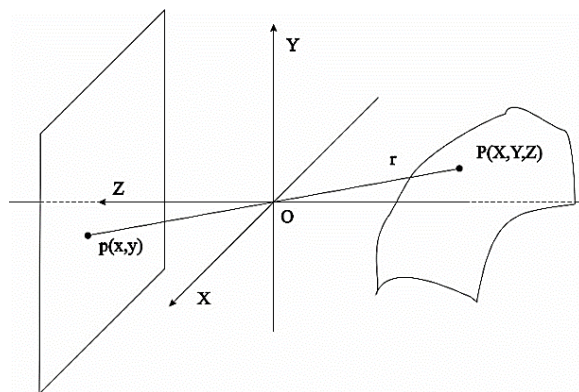


Рис. 1. Система координат проективной камеры

Систему координат свяжем с камерой так, чтобы ось Z совпала с оптической осью камеры. Обозначим r – вектор, соединяющий точку O с точкой $P=[X,Y,Z]^T$, f – фокусное расстояние. Проектируемые пиксельные координаты P на плоскости изображения определяются так [9]:

$$p = f \frac{P}{Z}. \quad (1)$$

В общем случае измерение координат в фотоприемнике осуществляется в единицах, отличных от единиц, задающих координаты в стандартной системе. Для полного описания камеры необходимо выразить координаты точки p в естественных единицах фотоприемника. В новой системе координаты проекции точки p примут вид

$$u = \frac{fX}{wZ} + u_0, \quad v = \frac{fY}{hZ} + v_0. \quad (2)$$

где (u_0, v_0) – координаты главной точки относительно начала координат фотоприемника (в естественных координатах фотоприемника); w и h – масштабы вдоль осей ox и oy (например, расстояния между ячейками матричного фотоприемника вдоль строк и столбцов).

Для последующего изложения введем трехмерный вектор, соответствующий точке $P=(X,Y,Z)$, и двумерный вектор $p=(x,y)^T$, соответствующий точке p . Определим также вектор однородных внутренних координат камеры $W=(u,v,1)^T$. Используя эти обозначения, соотношения можно представить в компактной векторно-матричной записи [10]:

$$ZW = AP, \quad (4)$$

где $A = \begin{bmatrix} f/w & \mu & u_0 \\ 0 & f/h & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ – матрица внутренних параметров камеры, содержит только па-

раметры оптической системы и фотоприемника камеры.

Пусть $OXYZ$ – глобальная система координат, $O'X'Y'Z'$ – стандартная система координат камеры. Переход от системы $OXYZ$ к системе $O'X'Y'Z'$ можно осуществить поворотом координатных осей к системе $OX''Y''Z''$ и последующим смещением начала координат. Тогда связь между координатами точки P в глобальной и стандартной системе может быть представлена как

$$P' = RP + t, \quad (5)$$

где P и P' – векторы пространственных координат точки P в глобальной и стандартной системах соответственно; R – матрица размерности 3×3 , описывающая поворот стандартной системы координат относительно глобальной; t – трехмерный вектор смещения начала координат глобальной системы относительно начала координат стандартной.

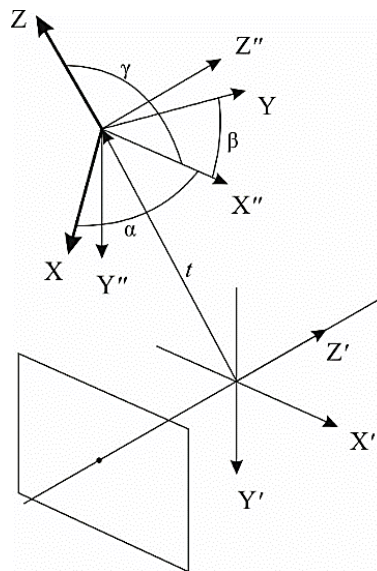


Рис. 2. Переход от глобальной системы координат к стандартной системе координат камеры

На рис. 2 схематически показано преобразование координат. Здесь α, β, γ – углы, образованные осью OX'' с осями OX, OY и OZ соответственно. Вектор $t = (t_x, t_y, t_z)^T$ – смещение начала координат глобальной системы относительно начала координат стандартной. Для получения внутренних параметров камеры, а также компенсации радиальных и тангенциальных искажений выполняется процедура калибровки видео камеры [11].

Начало координат в плоскости изображения камеры совпадает с главной точкой $u_0 = v_0 = 0$, а единицы измерения координат в глобальной системе и в плоскости изображения камеры одинаковы ($w = h = 1$). Движение твердого тела можно разложить на две составляющие: (V) поступательное движение и вращательное движение ($\vec{\omega}$) вокруг оси, проходящей через начало координат. Скорость точки будет иметь вид [12]:

$$V_{total} = -V - \vec{\omega} \times r, \quad (6)$$

где $V = (V_x, V_y, V_z)^T$ – поступательное движение; $\vec{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ – параметры вращения.

Взяв производную по времени, получим соотношение между скоростью P в опорном кадре камеры и скорости p в плоскости изображения с функцией ошибки ρ_0 .

$$\frac{flow}{\Delta t} \equiv V_{cam} = \rho_0 \cdot f \frac{ZV_{total} - V_z P}{Z^2}. \quad (7)$$

Для x и y компонентов поле движения можно записать в виде

$$\dot{x} = -\frac{V_x}{Z} + x \left(\frac{V_z}{Z} + \omega_x y - \omega_y x \right) - \omega_y + \omega_z y, \quad \dot{y} = -\frac{V_y}{Z} + y \left(\frac{V_z}{Z} + \omega_x y - \omega_y x \right) - \omega_z x + \omega_x. \quad (8)$$

Можно записать эти уравнения в виде $\dot{x} = u_t + u_r$ и $\dot{y} = v_t + v_r$. Оптический поток разобьем на поступательную составляющую (u_t, v_t) и вращательную составляющую (u_r, v_r) :

$$u_t = (-V_x + xV_z)/Z, \quad u_r = \omega_x xy - \omega_y(x^2 + 1) + \omega_z y, \quad (9)$$

$$v_t = (-V_y + yV_z)/Z, \quad v_r = \omega_x(y^2 + 1) - \omega_y xy - \omega_z x. \quad (10)$$

Для определения оптического потока в статье [8] применяется метод сопоставления блоков, который использует адаптивно изменяемый размер и адаптивную стратегию поиска вектора движения с взвешиванием измерений блоков изображения, где каждому блоку соответствует показатель текстуры.

Оценка скорости поступательного движения

Рассмотрим три возможные варианта начальных условий движения видеокamеры или платформы. Воспользуемся методом наименьших квадратов для определения параметров движения.

1. Расстояние от камеры до поверхности в каждой точке изображения известно. Зададимся целью определить параметры поступательного движения V_x, V_y .

Определим наименьшее отклонение:

$$\min_{V_x, V_y} \iint \left[\left(u - \frac{\alpha}{Z} \right)^2 + \left(v - \frac{\beta}{Z} \right)^2 \right] dx dy, \quad (11)$$

где $\alpha = -V_x + xV_z$; $\beta = -V_y + yV_z$.

Дифференцируя интегралы по V_x, V_y и приравнявая результирующие уравнения к нулю, получим:

$$V_x = \frac{V_z \iint x dx dy - Z \iint u dx dy}{(n \cdot m)}, \quad V_y = \frac{V_z \iint y dx dy + Z \iint v dx dy}{(n \cdot m)}. \quad (12)$$

2. Рассмотрим условие, при котором поступательное движение по оси Z отсутствует, $V_z = 0$. В этом случае выражение (12) упрощается, получим параметры поступательного движения:

$$V_x = \frac{-Z \iint u dx dy}{(n \cdot m)}, \quad V_y = \frac{-Z \iint v dx dy}{(n \cdot m)}. \quad (13)$$

3. Далее рассмотрим условие, при котором необходимо определить параметры движения V_x, V_y, V_z с неизвестной величиной Z . Применение метода наименьших квадратов к выражению (12) не дает единственного решения, так как результирующие уравнения нелинейны относительно V_x, V_y, V_z . Для рассмотрения явного решения воспользуемся выражением, предложенным в [9]. Метод наименьших квадратов состоит из следующих шагов: вначале мы определяем величину Z , которая минимизирует подынтегральное выражение в каждой точке (x, y) , а затем определяем величину V_x, V_y и V_z , которая минимизирует интеграл.

Выражение, которое мы хотим минимизировать, примет вид

$$\min_{V_x, V_y, V_z} \iint \left[\left(u - \frac{\alpha}{Z} \right)^2 + \left(v - \frac{\beta}{Z} \right)^2 \right] (\alpha^2 + \beta^2) dx dy, \quad (14)$$

где $\alpha = -V_x + xV_z$; $\beta = -V_y + yV_z$.

Обозначим интеграл для минимизации через

$$g(V_x, V_y, V_z) = aV_x^2 + bV_y^2 + cV_z^2 + 2dV_xV_y + 2eV_yV_z + 2fV_zV_x, \quad (15)$$

где $a = \iint v^2 dx dy$, $b = \iint u^2 dx dy$, $c = \iint (xv - yu)^2 dx dy$, $e = \iint u(xv - yu) dx dy$, $f = -\iint v(xv - yu) dx dy$.

Для определения скорости поступательного движения методом наименьших квадратов необходимо решить следующую однородную систему относительно w : $Gw = 0$, где

$$G = \begin{pmatrix} a & d & f \\ d & b & e \\ f & e & c \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Поскольку данные содержат шум, функцию $g(V_x, V_y, V_z)$ нельзя сделать равной нулю для ненулевой поступательной скорости и, таким образом, $w = (0, 0, 0)^T$ будет единственно правильным решением. Определив собственный вектор, соответствующий собственному значению λ_1 , получим:

$$\begin{aligned} V_x &= (b - \lambda_1)(c - \lambda_1) - f(b - \lambda_1) - d(c - \lambda_1) + e(f + d - e), \\ V_y &= (c - \lambda_1)(a - \lambda_1) - d(c - \lambda_1) - e(a - \lambda_1) + f(d + e - f), \\ V_z &= (a - \lambda_1)(b - \lambda_1) - e(a - \lambda_1) - f(b - \lambda_1) + d(e + f - d). \end{aligned}$$

Необходимо заметить, что значение λ_1 должно быть небольшим при хороших данных, и можно просто аппроксимировать точное решение, используя эти уравнения при $\lambda_1 = 0$.

Результаты моделирования и оценки параметров движения видеокамеры

Для исследования точности работы алгоритмов была разработана программа в системе MATLAB. Для создания эффекта полета БПЛА координаты подстилающей поверхности будут неизменными, менять будем координаты и ориентацию камеры. Изменение положения и ориентации камеры задается аналитическими уравнениями. При запуске моделирования полета на экране будет отображаться подстилающая поверхность с определенной точки про-

странства и под определенными углами, значение которых зависит от текущего положения и ориентации камеры.

В процессе полета происходит изменение яркостной картинки изображения. Полученное текущее изображение разбивается на блоки размером 8×8 и выполняется процедура оценки оптического потока. Параметры векторов движения (величина и направление) записываются в соответствующие матрицы. В зависимости от решаемой задачи выбирается алгоритм анализа векторов движения (поля движения). Моделирование движения производилось на восьми изображениях подстилающей поверхности высокого разрешения (4412×4779 пикселей) с различной текстурой. Для сравнения поступательная скорость движения рассчитывается с применением текстурного анализа и стандартным методом, основанным на равноточных измерениях.

Внешний вид системы координат, моделируемой для системы наблюдения, представлен на рис. 4. Начало координат находится на поверхности подстилающей поверхности в выбранной точке. Начальное положение камеры характеризуется координатами (X, Y, Z) и углами ориентации (α, β, γ) .

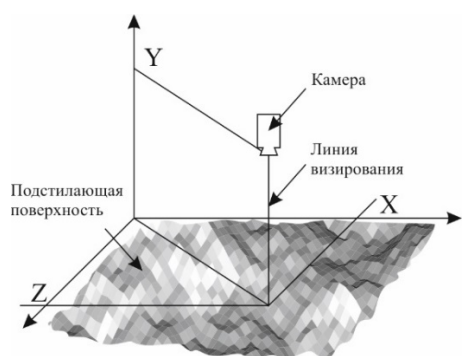


Рис. 4. Моделирование движения видеокамеры



Рис. 5. Траектория движения видеокамеры

Начальные данные моделирования: средняя скорость движения 16 м/с , высота движения камеры 100 м , угол обзора камеры 90 градусов, фокусное расстояние 1 мм , размер ПЗС матрицы 256×256 пикселей, частота обработки кадров 30 кадров/с. Оценка поступательной скорости движения с компенсацией вращательного движения, изменение угловых скоростей $Y, X, Z = [-10; 10]$.

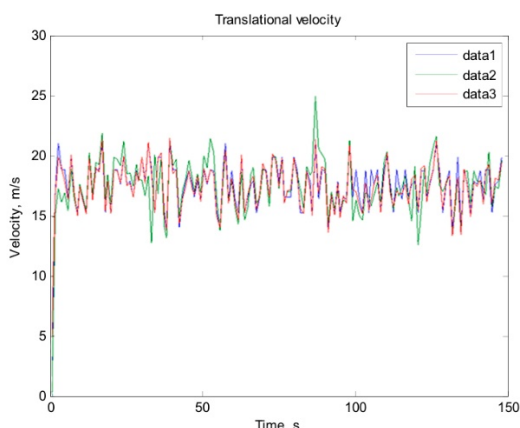


Рис. 6. Поступательная скорость движения камеры

data1 – истинная поступательная скорость;
 data2 – рассчитанная поступательная скорость стандартным методом;
 data3 – рассчитанная поступательная скорость разработанным методом ОП

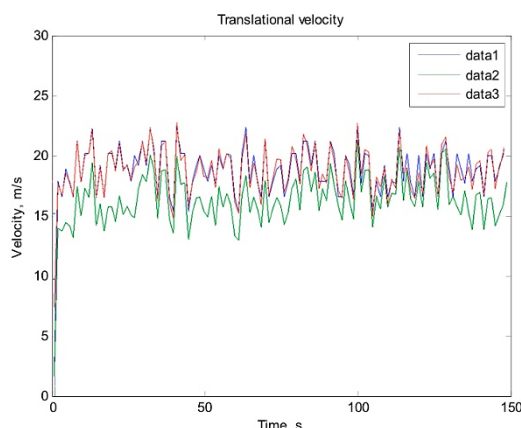


Рис. 7. Поступательная скорость движения

data1 – истинная поступательная скорость;
 data2 – рассчитанная поступательная скорость стандартным методом;
 data3 – рассчитанная поступательная скорость разработанным методом ОП

На основе полученных результатов оценки поступательной скорости можно проанализировать точность предложенного метода.

Для текстурного анализа в работе [8] был предложен параметр, характеризующий степень текстурованности изображения по оценке ковариационной матрицы. Анализ изображения подстилающей поверхности относительно оценки числа обусловленности равнялся 9.6348, что является признаком высокой текстурованности всего изображения.

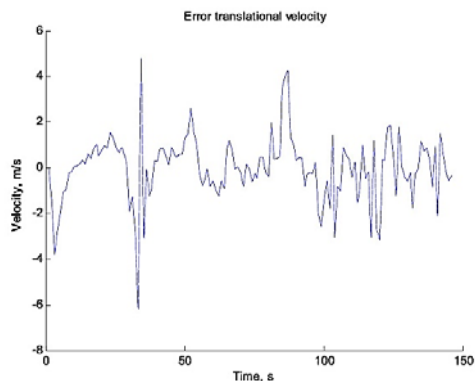


Рис. 8. Ошибки оценок поступательной скорости стандартным методом ОП

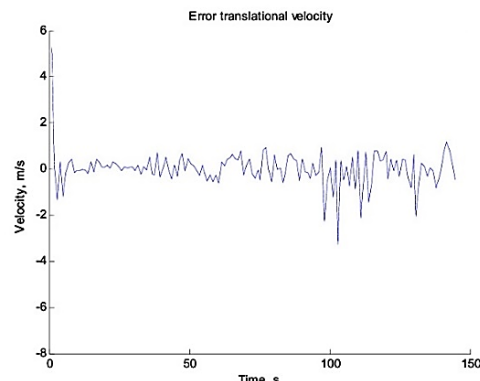


Рис. 9. Ошибки оценок поступательной скорости разработанным методом ОП

Для оценок, выполненных на основе стандартного блочного метода, среднее оцененное значение ошибки поступательной скорости составило 0.154 m/s, СКО ошибки определения поступательной скорости 1.4389 m/s.

Расчет поступательной скорости с применением оценки блоков изображений дал следующий результат: среднее оцененное значение ошибки поступательной скорости составило 0.0880 m/s, СКО ошибки определения поступательной скорости 0.6392 m/s.

На рис. 7 представлены результаты оценок скорости для изображения подстилающей поверхности со слабым показателем текстурованности. Моделирование движения видеокамеры производилось на однородной текстуре водной поверхности. Исходя из полученных данных результатов оценок поступательной скорости можно оценить точность предложенного метода. Текстуальный анализ всего изображения подстилающей поверхности относительно оценки числа обусловленности равнялся 6.6203, что указывает на слабую текстурованность изображения.

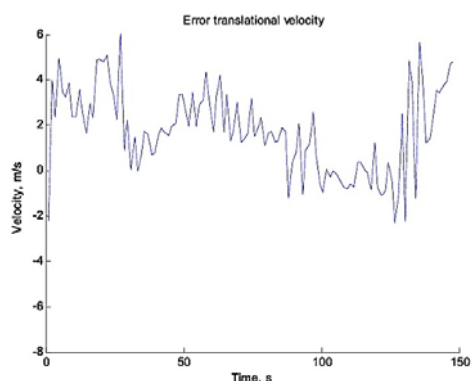


Рис. 10. Ошибки оценок поступательной скорости стандартным методом ОП

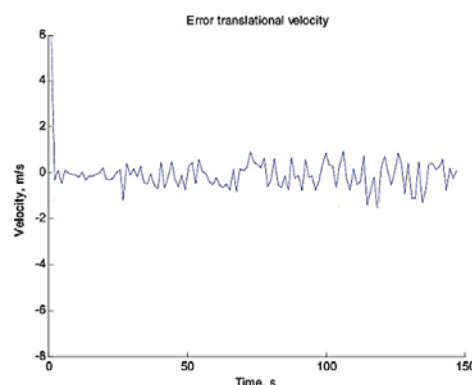


Рис. 11. Ошибки оценок поступательной скорости разработанным методом О

Для оценок на основе стандартного метода среднее оцененное значение ошибки измерений поступательной скорости составило 2.5128 m/s, СКО ошибки определения поступательной скорости 1.1727 m/s.

Расчет поступательной скорости с применением текстурного анализа дал следующий результат: среднее оцененное значение ошибки измерений поступательной скорости 0.0221 m/s, а СКО ошибки определения поступательной скорости 0.7223 m/s.

В табл. 1 приведены результаты оценок поступательным параметрам движения для различных изображений подстилающей поверхности:

Таблица 1

Результаты оценок поступательным параметрам движения

Параметры оценок	Текстура подстилающей поверхности							
	Топографическая карта	Аэрофото-съемка	Аэрофото-съемка2	Поле	Текстура асфальт	Текстура бетон	Текстура трава	Текстура вода
Текстурный анализ	2.7736	4.7706	9.6348	3.3554	2.5556	2.1907	3	6.6203
Мат. ожидание ошибки определения поступательной скорости	0.33 m/s	1.1 m/s	1.38 m/s	0.29 m/s	0.18 m/s	0.2 m/s	0.32 m/s	2.51 m/s
СКО ошибки определения поступательной скорости	0.6m/s	1.57 m/s	1.44 m/s	0.57 m/s	0.62 m/s	0.7 m/s	0.76 m/s	1.17 m/s
Мат. ожидание ошибки определения поступательной скорости с использованием текстурного метода	0.27 m/s	0.03 m/s	0.09 m/s	0.29 m/s	0.16 m/s	0.2 m/s	0.26 m/s	0.02 m/s
СКО ошибки определения поступательной скорости с использованием текстурного метода	0.47 m/s	0.41 m/s	0.64 m/s	0.5 m/s	0.61 m/s	0.7 m/s	0.39 m/s	0.72 m/s

Выводы

Проанализированы методы определения параметров движения по данным оптического потока видеокамеры. Использовались два метода определения оптического потока: стандартный блочный метод и метод с взвешиванием измерений блоков изображений.

На основе данных моделирования для тестовых изображений и проверки на наборе реальных изображений показана эффективность метода, использующего текстурный анализ. Использование метода оценки движения с взвешиванием измерений блоков изображений дает более точный результат в сравнении с стандартными блочными методами определения оптического потока. Исследования проводились для различных видов подстилающей поверхности. В условиях применения метода с взвешиванием блоков изображений для оценки оптического потока слабая текстурированность не вносит ошибку в определение поступательной скорости движения.

Таким образом, результаты подтверждают работоспособность методов и возможность использования предлагаемых подходов для оценки поступательной скорости БПЛА в условиях отсутствия сигналов GNSS.

Список литературы: 1. *D. W. Casbeer, S. M. Li, R. W. Beard, T. W. McLain, and R. K. Mehra.* Forest fire monitoring with multiple small UAVs // Proceedings of the American Control Conference, June 2005, pp. 3530–3535. 2. *H. Chao and Y. Q. Chen,* Remote Sensing and Actuation Using Unmanned Vehicles. Hoboken, New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2012. 3. *M. Srinivasan, S. Thurrowgood, and D. Soccol,* Competent vision and navigation systems // IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 16, no. 3, pp. 59–71, 2009. 4. *J. Chahl, M. V. Srinivasan, and S. W. Zhang.* Landing strategies in honeybees and applications to uninhabited airborne vehicles // Journal of Robotics Research, vol. 23, no. 2, pp. 101–110, 2004. 5. *Griffiths, J. Saunders, A. Curtis, B. Barber, T. McLain, and R. Beard.* Maximizing miniature aerial vehicles: Obstacle and terrain avoidance for mavs // IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 13, no. 3, pp. 34–43, 2006. 6. *J. C. Zufferey and D. Floreano.* Toward 30-gram autonomous indoor aircraft: Vision-based obstacle avoidance and altitude control // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, April 2005, pp. 2594–2599. 7. *G. Barrows, C. Neely, and K. Miller,* Fixed and Flapping wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Application. AIAA, 2001, vol. 23, ch. Optic Flow Sensors for MAV Navigation, pp. 557–573. 8. *Молчанов, А. А., Кортунюв, В. И.* Метод оценки движения оптического потока с взвешиванием измерений блоков изображения // Системы обработки информации, ХУПС. – 2015. – № 3 (128). – С. 26-31. 9. *R. Hartley and A. Zisserman,* Multiple View Geometry in Computer Vision, 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004, ISBN 0521540518. 10. *Zhang, Z.* A Flexible New Technique for Camera Calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 22, No. 11, 2000, pp. 1330–1334. 11. *Heikkila, J., and O. Silven.* A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction // IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 1997. 12. *Richard Von Mises* Theory of Flight. Courier Corporation, 1959. – 629 p. 13. *B. K. P. Horn and B. G. Schunck.* Determining optical flow: a retrospective // Artificial Intelligence, vol. 59, no. 1–2, pp. 81–87, 1993.

*Национальный аэрокосмический университет
имени Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Поступила в редколлегию 01.03.2017