

Р. С. Котвицкий², бакалавр, А. В. Збруцкий³, д.т.н., профессор,
А. В. Сарибога⁴, старший преподаватель

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СРЕДСТВАМИ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

En

The development of the inertial navigation system (INS) errors correction method by means and methods of technical vision (MTV) is an actual and effective application problem.

Having the values of the UAV distance and direction to the benchmark, the UAV control algorithm is developed to minimize the difference between the centers of the object and the camera optical axis. After each image processing cycle the MTV gives new values of the UAV distance and direction to the reference point, which corrects the UAV movement to it.

The performed tests of the developed algorithm working capacity on the mobile platform indicate the INS accuracy increase by 1.8 times.

Ua

Розробка методу корекції помилок інерціальної навігаційної системи (ІНС) засобами та методами технічного зору (ЗТЗ) є актуальною та ефективною прикладною задачею.

Якщо маємо значення дистанції та напрямку БПЛА до орієнтиру, то обробляється алгоритм керування БПЛА для мінімізації розбіжностей між центрами об'єкту та оптичною осі камери. ЗТЗ після кожного циклу обробки зображення видає нові значення дистанцій та напрямку БПЛА до орієнтиру, які коригують рух до неї БПЛА.

Проведені тестові випробування працездатності розробленого алгоритму на мобільній платформі показали підвищені точності ІНС у 1,8 рази.

Введение

Анализ существующих инерциальных навигационных систем (ИНС) [1] показывает, что применение подобных систем имеет ряд ограничений для обеспечения требуемой точности определения местоположения при отсутствии сигнала *GPS* [2]. В этом случае актуальным и эффективным может быть применение системы технического зрения (СТЗ) для повышения точности ИНС беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Практическое применение находят четыре основные группы алгоритмов СТЗ для распознавания цели: алгоритмы согласованной фильтрации с про-

² НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», факультет авиационных и космических систем

³ НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», кафедра авиакосмических и роботизированных систем

⁴ НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», кафедра авиакосмических и роботизированных систем

веркой совпадения [3], алгоритмы использующие шаблоны для целей, которые необходимо обнаружить [4]; алгоритмы статистического распознавания образов, предусматривающие выборку изображений целей с учётом их конкретных характерных признаков [5]; алгоритмы технического зрения на основе моделей, с помощью которых сравниваются характерные признаки наблюдаемой цели с хранящимися в памяти эталонными моделями данного изображения [6].

Постановка задачи

Целью статьи является разработка метода коррекции погрешностей инерциальной навигационной системы средствами и методами технического зрения.

Алгоритм коррекции ИНС БПЛА

Спецификации на ИНС дают информацию о максимальной возможной ошибке по координате (dE) ИНС за некоторый промежуток времени (dT). Для минимизации требуемых мощностей бортового микрокомпьютера, а также выполнения других возможных вычислительных задач, выполним коррекцию ИНС средствами СТЗ через каждый интервал времени. Этот интервал зависит от ширины захвата площади обзора камеры оптическим датчиком (L). В момент, когда ошибка по координате dE достигнет значения, равного половине ширины $L/2$ площади обзора камеры оптическим датчиком, запускаются алгоритмы СТЗ для распознавания ориентира в автоматическом режиме (рис. 1).

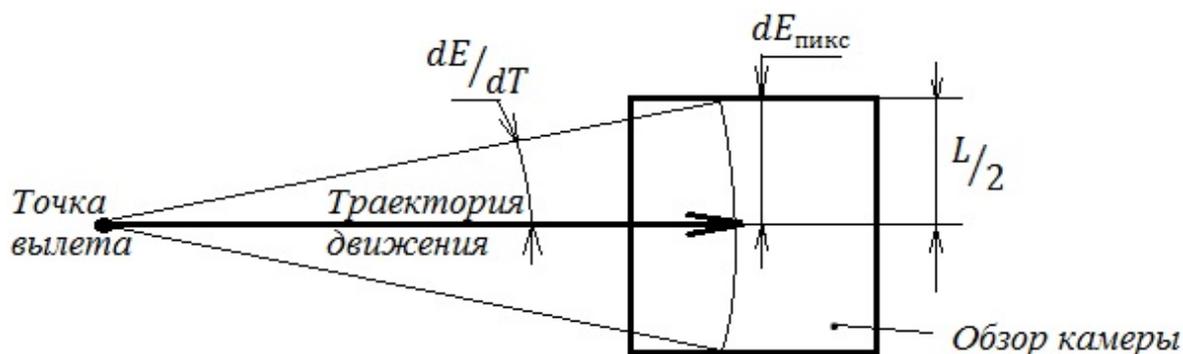


Рис. 1. Момент включения СТЗ для поиска ориентира

Площадь захвата зависит от расширения камеры и высоты полета БПЛА:

$$L = B \cdot GSD = B \cdot \frac{H}{F_{\text{пикс}}} = B \cdot \frac{H}{\frac{b}{R} \cdot K} = \frac{H}{K}, [\text{м}]$$

где GSD – размер пикселя на поверхности земли [м/пиксель],

B – размер ширины изображения [пиксель],

H – высота БПЛА над поверхностью земли [м],

$F_{\text{пикс}}$ – фокусное расстояние [м],

b – размер ширины матрицы оптического датчика [м],

K – оптическое увеличение оптического датчика [1].

Когда ориентир попадает в диапазон просмотра оптического датчика, БПЛА останавливает свое передвижение и стабилизируется.

СТЗ идентифицирует ориентир, находит в базе данных географические координаты ориентира, вычисляет его центр, находит разность между центром ориентира $(x_{\text{Опикс}}, y_{\text{Опикс}})$ и центром изображения сцены $(x_{\text{Спикс}}, y_{\text{Спикс}})$ в пиксельной системе координат относительно главной оптической оси камеры (рис. 2).

$$dx_{\text{пикс}} = x_{\text{Опикс}} - x_{\text{Спикс}}, \text{ [пиксель]}$$

$$dy_{\text{пикс}} = y_{\text{Опикс}} - y_{\text{Спикс}}, \text{ [пиксель]}$$

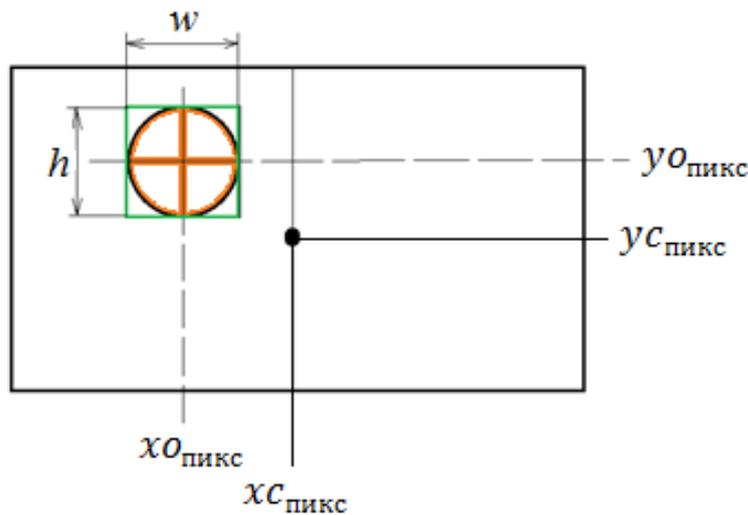


Рис. 2. Алгоритм работы СТЗ

На выходе СТЗ получаем координаты ориентира в пиксельной системе координат, данные о нем, в частности, его географические координаты.

Расстояние оптической оси камеры от центра обнаруженного ориентира $l_{\text{пикс}}$ вычисляются по разности координат центра ориентира и оптической оси $dx_{\text{пикс}}$ и $dy_{\text{пикс}}$:

$$l_{\text{пикс}} = \sqrt{dx_{\text{пикс}}^2 + dy_{\text{пикс}}^2}, \text{ [пиксель]}$$

После этого рассчитывается земное расстояние БПЛА от обнаруженного ориентира в плоскости горизонта l :

$$l = l_{\text{пикс}} \cdot GSD = \sqrt{dx_{\text{пикс}}^2 + dy_{\text{пикс}}^2} \cdot H \cdot \frac{F}{B \cdot b}, \text{ [м]}$$

Имея значения дистанции и направление БПЛА к ориентиру, обрабатывается алгоритм управления БПЛА для минимизации разности между центрами объекта и оптической оси камеры. СТЗ после каждого цикла обработки изображения выдает новые значения дистанции и направление БПЛА к ориентиру, которые корректируют движение к нему БПЛА [7].

Алгоритм коррекции ИНС показан на блок-схеме 3.

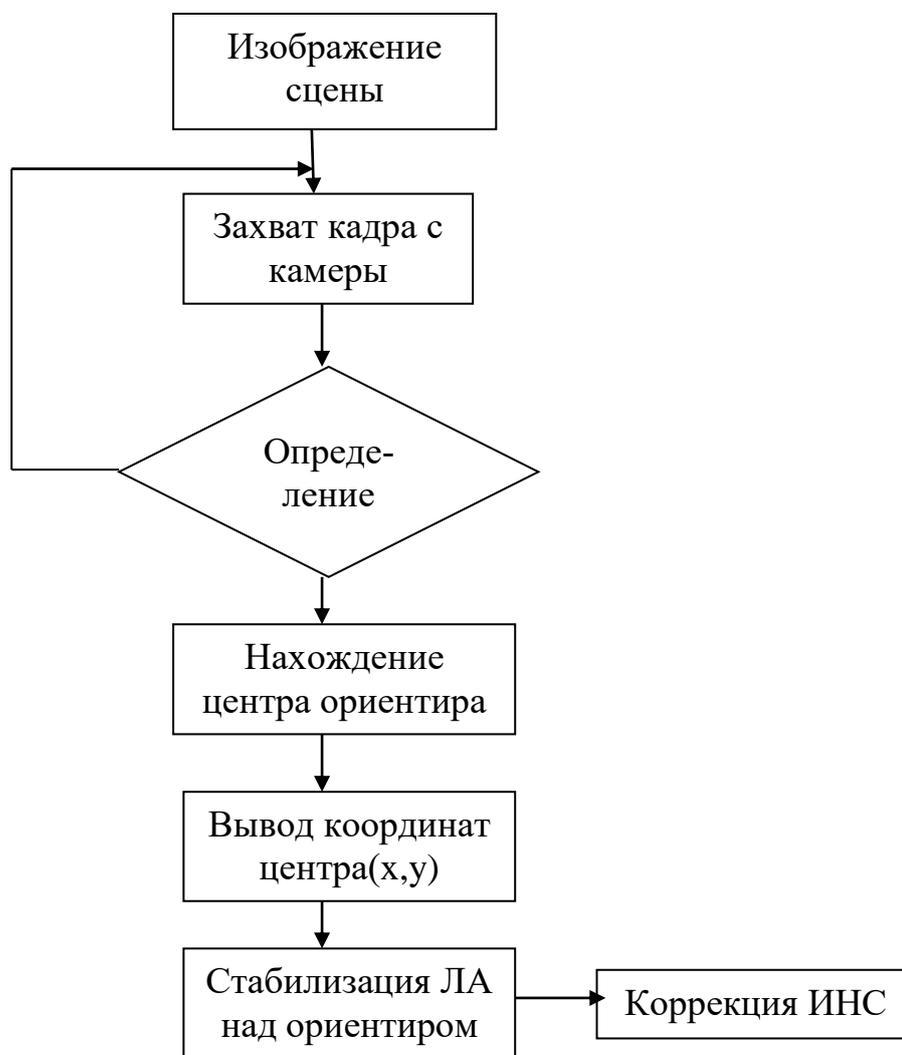


Рис. 3. Блок-схема алгоритма коррекции ИНС

Когда БПЛА зависает над ориентиром, географические координаты обнаруженного ориентира передаются в систему управления для коррекции ИНС.

ИНС сбрасывает все свои начальные значения и получает новые (новая начальная выставка), которые базируются на новой информации о координатах местоположения ориентира.

После коррекции ИНС БПЛА продолжает свою первичную задачу.

Тестовые испытания работоспособности алгоритма коррекции ИНС

Для проведения тестовых испытаний работоспособности алгоритма коррекции ИНС на специальную передвижную платформу устанавливался акселерометр MPU6050, оптический датчик Logitech c350 и микрокомпьютер Raspberry Pi 3. На платформе закреплялась камера таким образом, чтобы главная оптическая ось камеры была направлена вертикально вниз.

Платформа начинала перемещаться от начальной точки с координатами (x_0, y_0) к пункту с координатами (x_1, y_1) (рис. 4). Оси акселерометра при этом совпадали с осями связанной системы координат платформы, где продольная ось OX направлена вдоль линии перемещения, поперечная ось OY перпендикулярна линии перемещения. При этом камера производила поиск ориентиров.

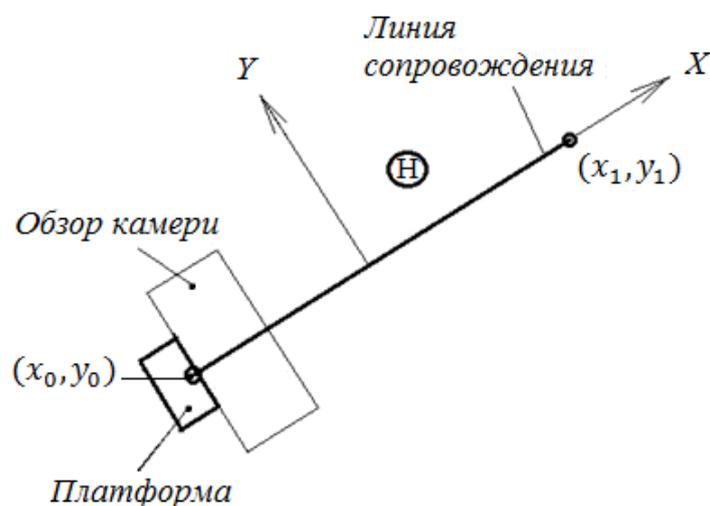


Рис. 4. Схема перемещения платформы; вид сверху

При попадании ориентира в обзор камеры (рис. 5) происходило распознавание ориентира СТЗ, считывание его координат $(x_{0\text{пикс}}, y_{0\text{пикс}})$ и определение расстояния от оптической оси камеры к центру ориентира $(dx_{\text{пикс}}, dy_{\text{пикс}})$. После этого выполнялась коррекция показаний акселерометра.

На рис. 6:

- 1 – данные акселерометра по оси Y без коррекции;
- 2 – данные акселерометра по оси Y с коррекцией;
- 3 – истинное значение акселерометра по оси Y .

На 43 секунде (рис. 6) перемещения платформы распознавался ориентир. С 43-й по 47-ю секунды, когда ориентир еще находится в диапазоне обзора камеры, система сопровождала его, выдавая новые координаты платформы. После 47 секунды, когда ориентир вышел из зоны видимости, координаты платформы рассчитывались по показаниям акселерометра.

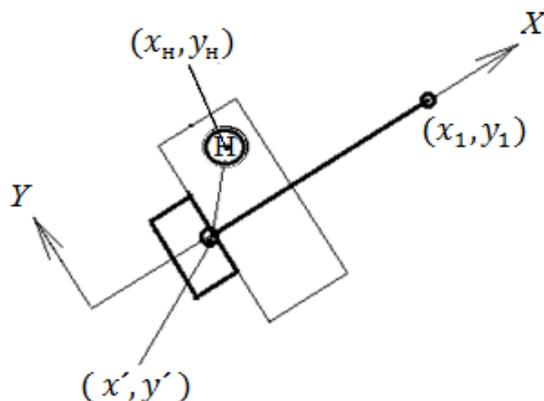


Рис. 5. Распознавание ориентира

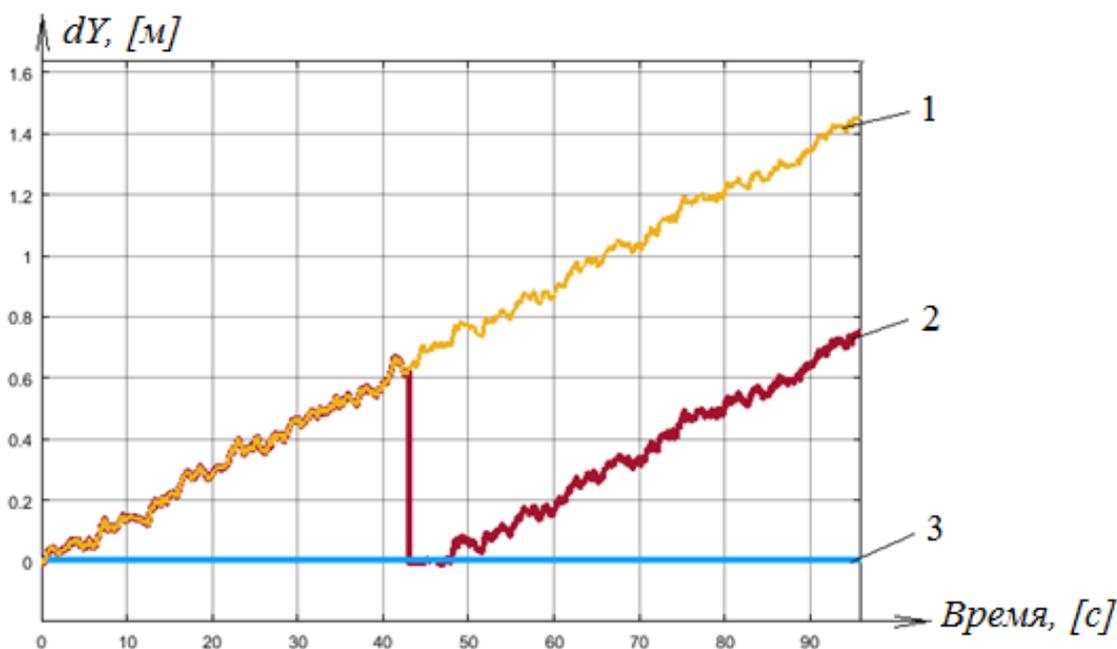


Рис. 6. Ошибка акселерометра по оси OY

Точность определения координат местоположения платформы средствами СТЗ зависит от характеристик камеры [8].

Общая погрешность за время перемещения платформы по оси Y без коррекции составляет 1,41 м, с коррекцией она не превышала 0,78 м.

Выводы

Разработан метод коррекции погрешностей инерциальной навигационной системы средствами и методами технического зрения, принцип работы которого заключается в обнулении погрешностей и показаний ИНС до первоначальных при точном определении координат местоположения БПЛА.

Проведенные тестовые испытания работоспособности разработанного алгоритма на передвижной платформе показали повышение точности ИНС в 1,8 раза.

Список использованной литературы

1. *Андреев В. Д.* Теория инерциальной навигации. Корректируемые системы. / В. Д. Андреев // М.: Наука, 1967. – 647 с.
2. *Збруцький О. В.* Метод визначення координат рухомого об'єкту з використанням системи технічного зору. / О. В. Збруцький, Г. В. Сарибога, Р. С. Котвицький // Інформаційні системи, механіка та керування. – К. : НТУУ «КПІ», 2010. – № 16 (2017), с. 71–78.
3. *Колобородов В. Г.* Застосування методів і алгоритмів цифрової обробки зображень в оптико–електронних приладах / В. Г. Колобородов, К. В. Харитоненко // Вісник НТУУ “КПІ”. – К. : НТУУ «КПІ», 2010. – № 40. – С. 23–31.
4. *Блохинов Ю. Б.* Алгоритм анализа и принятия решения в задаче селекции объектов на изображениях наземных сцен / Ю. Б. Блохинов, В. В. Гнилицкий, В. В. Инсаров, А. С. Чернявский // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами 2010: Труды научно-технической конференции-семинара. Вып. 4 / Под ред. Р. Р. Назирова.— М. : КДУ, 2011.— 328 с.
5. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
6. *John Hershberger & Jack Snoeyink*, “Speeding Up the Douglas–Peucker Line-Simplification Algorithm”, Proc 5th Symp on Data Handling, 134–143 (1992). UBC Tech Report TR-92-07.
7. *Marynoshenko O., Głębocki R.* Algorithm for formation flight of unmanned aerial vehicles / Polskie Towarzystwo Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, Mechanika Wlotnictwie, Tom 1, ML-XVII 2016. pp. 103–111. ISBN 978-83-932107-8-7.
8. *Цепляева Т. П.* Метод выбора характеристик фотооборудования для БПЛА в зависимости от высоты полета / Т.П. Цепляева, А.Н. Лохов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии – Харьков, 2011. – № 49. – С. 48–52.

