

УДК 004.932.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ОПТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ

К.А. ВОЛКОВ, Х.М. КАРБАЛАИ САЛЕХ, А.В. ПАРАСОЧКА,  
С.С. ЗАЙЦЕВ, Р.Р. РОМАНОВ, М.Б.М. МАХММУД

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 30 мая 2016*

Произведен анализ параметров движения беспилотного летательного аппарата для моделирования полета с оптической навигационной системой. Рассмотрена задача формирования изображений бортовых камер. Предложена система моделирования движения беспилотного летательного аппарата с оптической навигационной системой. Обозначены возможные направления исследований с использованием предложенной системы моделирования.

*Ключевые слова:* оптическая навигация, моделирование движения, беспилотный летательный аппарат.

### Введение

Разработка систем управления с использованием автономных пассивных оптических навигационных систем является крайне актуальной, поскольку независимость от глобальных систем позиционирования и дистанционного управления оператором в реальном масштабе времени позволяет существенно расширить область применения беспилотного летательного аппарата (БЛА) и круг решаемых задач [1-3]. Основной проблемой при реализации систем оптической навигации является обеспечение надежности их функционирования на различных типах местности, в различных климатических и метеоусловиях, что требует проведения значительного числа экспериментальных исследований. Таким образом, проведение натурных исследований разрабатываемых алгоритмов требует значительных временных и финансовых затрат, а получаемые результаты могут быть непрезентативны из-за невозможности обеспечения всего комплекса экспериментов и проблем организационного, технического и погодного характера. Альтернативой натурным исследованиям на начальных этапах разработки является компьютерное моделирование полета БЛА с использованием имеющихся аэрофотоснимков земной поверхности, сделанных в различных климатических условиях и для различных типов местности [4, 5]. Такой подход позволяет существенно сократить затраты на исследовательскую и экспериментальную работу при создании эффективных алгоритмов оптической навигации БЛА [6, 7].

В работе приводится анализ параметров движения БЛА, рассматривается задача формирования изображения бортовых камер, предлагается система моделирования движения БЛА с оптической навигационной системой.

### Анализ условий моделирования движения БЛА

Рассмотрим движение БЛА по траектории без скольжения при постоянной высоте и в отсутствие ветра. Данный подход не обеспечивает высокоточные оценки координат БЛА в каждой точке траектории ввиду имеющихся допущений, однако позволяет легко получить оценочные значения параметров движения. Такой подход оправдан, поскольку за стабилизацию и кор-

ректировку движения на коротких интервалах пути отвечает автопилот с инерциальной системой навигации [8, 9], алгоритмы функционирования которого хорошо известны и выходят за рамки данной статьи.

Пусть  $v$  – скорость движения БЛА относительно земли (м/с),  $g$  – ускорение свободного падения (м/с<sup>2</sup>),  $\varphi$  – угол крена самолета (°). Тогда радиус разворота, выполняемого с постоянной скоростью может, быть оценен по формуле

$$R = \frac{v^2}{g \tan\left(\varphi \frac{\pi}{180}\right)} \text{ (м)},$$

где  $\tan(\cdot)$  – функция тангенса угла, заданного в радианах.

Тогда центростремительное ускорение может быть определено как

$$a_{ц} = \frac{v^2}{R} = g \tan\left(\varphi \frac{\pi}{180}\right) \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

Время выполнения разворота может быть рассчитано, соответственно, как

$$t = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi v}{g \tan\left(\varphi \frac{\pi}{180}\right)} \text{ (с)}.$$

Таким образом, угол поворота БЛА за некоторое время  $\Delta t$  может быть рассчитан по формуле

$$\alpha = 360^\circ \frac{\Delta t}{t} = 360^\circ \frac{\Delta t \tan\left(\varphi \frac{\pi}{180}\right)}{2\pi v} = 180 \frac{\Delta t \tan\left(\varphi \frac{\pi}{180}\right)}{\pi v} \text{ (}^\circ\text{)}.$$

Для осуществления прикидочного расчета радиусов и времени поворота БЛА используем характерные значения скорости и углов крена легких БЛА малого и среднего радиуса действия. Примем допустимый диапазон скоростей БЛА  $v = [10, 40]$  м/с, а диапазон углов крена –  $\varphi = [10, 30]$  °. Тогда согласно представленным выше формулам, имеем следующие значения, приведенные в таблице:

**Оценочные значения параметров движения БЛА**

$v$ , м/с	$\varphi$ , °	$R$ , м	$a_{ц}$ , м/с <sup>2</sup>	$t$ , с	$\alpha$ для $\Delta t = 1$ с
10	10	58	1,7	36	9,9
20	10	231	1,7	73	5,0
30	10	520	1,7	109	3,3
40	10	925	1,7	145	2,5
10	20	28	3,6	18	20,5
20	20	112	3,6	35	10,2
30	20	252	3,6	52	6,8
40	20	448	3,6	70	5,1
10	30	18	5,7	11	32,5
20	30	71	5,7	22	16,2
30	30	159	5,7	33	10,8
40	30	282	5,7	44	8,1

Полученные значения позволяют определить частоту пересчета траектории движения модели порядка 10-30 Гц, чтобы обеспечить смещение фотоизображения земной поверхности для каждой точки пересчета в пределах 1-10 м по прямой и 0,1-3° по углу.

## Формирование фотоизображения земной поверхности

В настоящее время для моделирования движения БЛА с оптической навигационной системой в открытом доступе присутствуют аэрофото- и космоснимки земной поверхности высокого разрешения трех картографических сервисов: Bing Maps, Google Maps и Yandex Maps [4, 5]. В данных сервисах используется геодезическая система WGS 84, в которой Земля считается эллипсоидом с экваториальным радиусом  $R_A = 6378137$  м и полярным радиусом  $R_B = 6356752$  м. Отображение точек земной поверхности на плоскую карту осуществляется с использованием равноугольной проекции Меркатора, в которой все параллели и меридианы представлены в виде прямых линий, причем линии меридианов являются равноотстоящими (рис. 1). Для проецирования в Bing Maps, Google Maps применяется сферическая проекция Меркатора (земная поверхность аппроксимируется сфероидом и проецируется на цилиндрическую поверхность карты), а для Yandex Maps – эллиптическая (поверхность аппроксимируется эллипсоидом). Важными особенностями проекции Меркатора является сохранение углов и невозможность отображения полюсов.

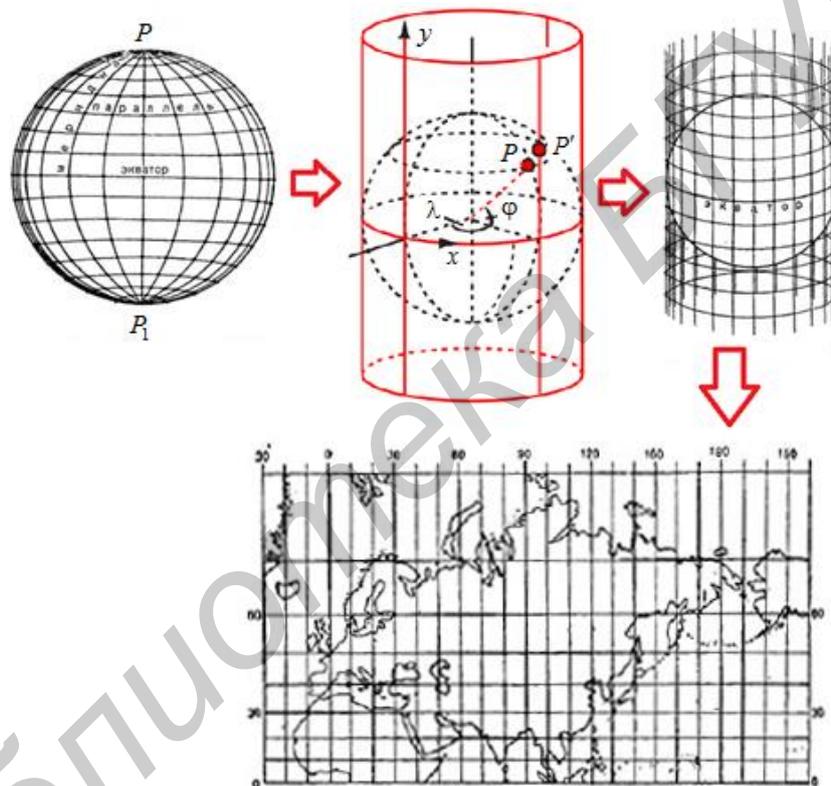


Рис. 1. Преобразование изображения земной поверхности в равноугольной проекции Меркатора

Для быстрого отображения произвольных участков земной поверхности картографические сервисы обеспечивают возможность доступа к ее отдельным квадратным фрагментам (тайлам) с размером  $256 \times 256$  пикселей в проекции Меркатора в требуемом масштабе. При этом уровни масштаба организованы ступенчато, так что на первом уровне присутствует полное изображение Земли на одном тайле, а для каждого следующего уровня масштаб увеличивается в 2 раза.

Формулы для прямого и обратного пересчета из геодезических координат в координаты тайлов имеют следующий вид. Преобразование широты  $\varphi$  и долготы  $\lambda$  в координаты  $X_C$  и  $Y_C$  сетки тайлов для сферической проекции производится по формулам

$$X_C = \frac{\lambda + 180}{360} 2^s,$$

$$Y_C = 0,5 \left[ 1 - \frac{\ln \left( \tan \left( \varphi \frac{\pi}{180} \right) + \frac{1}{\cos \left( \varphi \frac{\pi}{180} \right)} \right)}{\pi} \right] 2^S.$$

Преобразование широты  $\varphi$  и долготы  $\lambda$  в координаты  $X_{\vartheta}$  и  $Y_{\vartheta}$  сетки тайлов для эллиптической проекции производится по формулам

$$J = \frac{\sqrt{R_A^2 - R_B^2}}{R_A},$$

$$X_{\vartheta} = \frac{\lambda + 180}{360} 2^S,$$

$$Y_{\vartheta} = 2^{S-1} - \frac{2^{S-2}}{\pi} \left( \ln \frac{1 + \sin \left( \varphi \frac{\pi}{180} \right)}{1 - \sin \left( \varphi \frac{\pi}{180} \right)} - J \ln \frac{1 + J \sin \left( \varphi \frac{\pi}{180} \right)}{1 - J \sin \left( \varphi \frac{\pi}{180} \right)} \right).$$

Обратное преобразование из координат сетки тайлов для сферической проекции в геодезические координаты производится по формулам

$$\varphi = \arctan \left( \sin h \left( \pi - 2\pi \frac{Y_C}{2^S} \right) \right) \frac{180}{\pi},$$

$$\lambda = 360 \frac{X_C}{2^S} - 180$$

где  $S$  – уровень масштаба ( $S \geq 1$ ),  $\sin(\cdot)$  и  $\cos(\cdot)$  – функции синуса и косинуса угла, заданного в радианах,  $\arctan(\cdot)$  – функция арктангенса,  $\sin h(\cdot)$  – функция гиперболического синуса,  $\ln(\cdot)$  – функция натурального логарифма.

С учетом приведенных выше формул, линейный размер пикселя на фотоизображении может быть определен как

$$d = \frac{4\pi R_A \cos \left( \varphi \frac{\pi}{180} \right)}{2^S 256} = 2^{-6-S} \pi R_A \cos \left( \varphi \frac{\pi}{180} \right) \text{ (м/пиксель)}.$$

### Система моделирования движения БЛА

Для моделирования движения БЛА была спроектирована и реализована программная система (рис. 2), состоящая из двух подсистем: А – моделирования движения и Б – навигации и управления. За синхронизацию работы подсистем отвечает Блок 1, формирующий команды для выполнения потактового расчета. По сигналам Блока 1 производится расчет положения БЛА в пространстве Блоком 2, расчет координат целей Блоком 7 и формирование команд на органы управления Блоком 8.

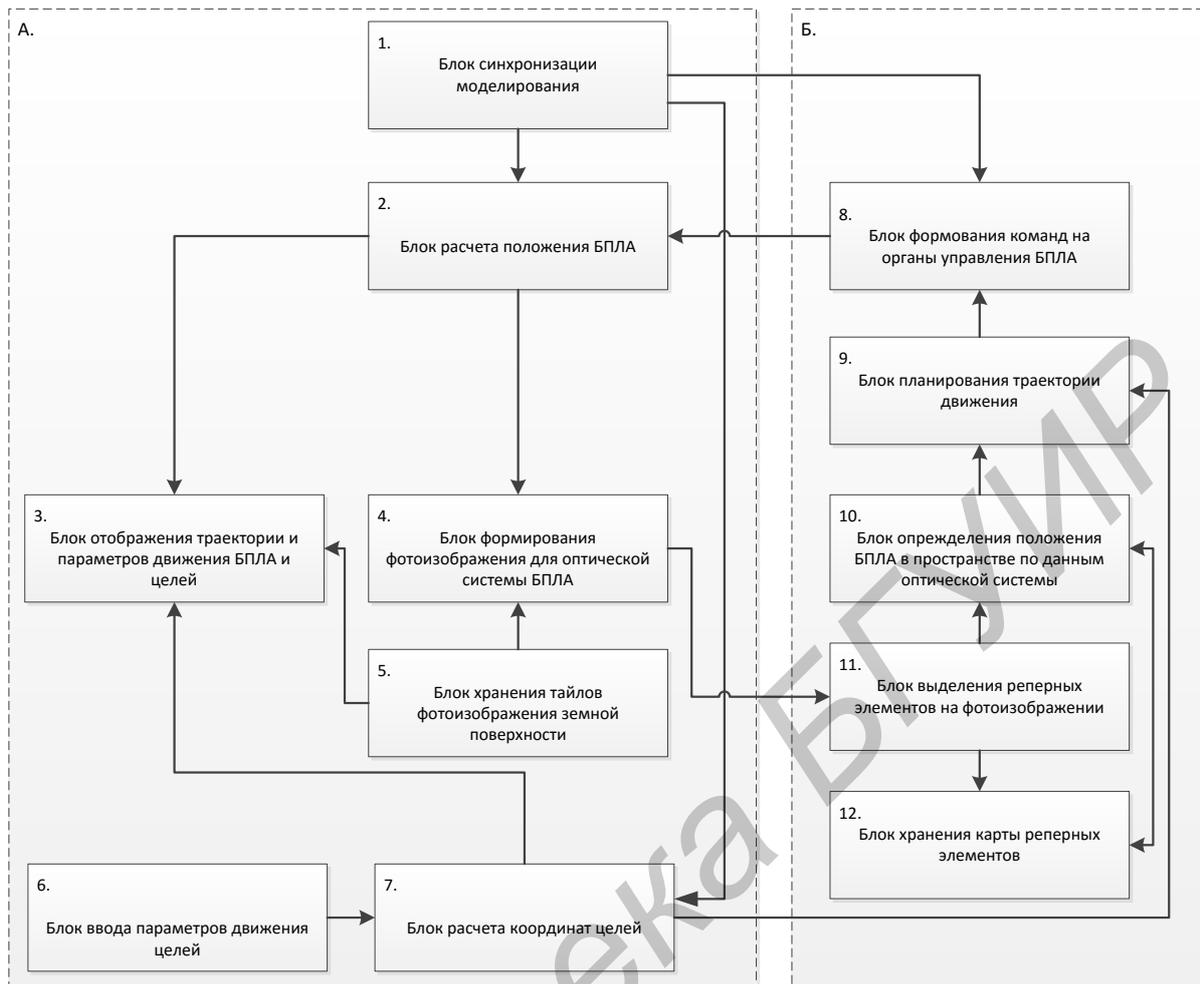


Рис. 2. Система моделирования движения БЛА с оптической навигацией

Подсистема А моделирования движения функционирует следующим образом.

На каждом такте моделирования информация о текущем положении БЛА в пространстве из Блока 2 поступает в Блок 3 для визуализации пользователю на карте, и в Блок 4 для формирования актуального фотоизображения от оптической системы БЛА (рис. 3). Тайлы цифровой карты земной поверхности в Блоки 3 и 4 поступают из Блока 5, ответственного за их хранение.

Ввод параметров движения целей оператором осуществляется посредством Блока 6, а дальнейший расчет их координат осуществляется Блоком 7. Информация об актуальном положении целей выводится оператору на карте посредством Блока 3 (совместно с информацией о положении и траектории БЛА).

Подсистема Б навигации и управления включает в себя Блоки 8-12, которые соответствуют блокам системы управления реального БЛА, но поддерживают работу в режиме потактового моделирования.

Сформированные данные от оптической системы из Блока 4 поступают в Блок 11, который осуществляет выделение реперных элементов на изображении [6, 7]. Дескрипторы реперных элементов из Блока 11 поступают в Блок 10, куда также поступает информация из Блока 12, где содержится карта реперных элементов с геодезической привязкой координат. Блок 10 рассчитывает текущее положение БЛА, сравнивая найденные реперные элементы с имеющейся цифровой картой, и передает координаты в Блок 9. Также вычисляются координаты реперов, которые отсутствуют на имеющейся карте, и передаются в Блок 12 для ее пополнения. Блок 9 производит расчет требуемого вектора движения с учетом текущих координат БЛА и полученных из Блока 7 координат целей. Найденный вектор передается в Блок 8, который формирует команды на органы управления, которые далее передаются в Блок 2.

После выполнения всех расчетов в подсистемах А и Б Блок 1 генерирует сигнал на проведение очередного такта моделирования, в котором в качестве начальных значений используются результаты предыдущего такта.



Рис. 3. Интерфейс системы моделирования движения БЛА с оптической навигационной системой

### Применение системы моделирования движения БЛА

Описанная программная система используется для анализа эффективности различных алгоритмов и форматов хранения данных для системы оптической навигации БЛА. В частности, проводятся исследования в следующих областях:

- оценка эффективности алгоритмов коррекции яркости/контраста/цветовой гаммы изображения;
- оценка надежности и быстродействия алгоритмов выделения реперных элементов на изображении;
- оценка эффективности способов хранения и алгоритмов поиска дескрипторов реперных элементов в базе данных;
- оценка надежности и быстродействия алгоритмов определения положения БЛА в пространстве с использованием цифровой карты реперных элементов;
- оценка надежности и быстродействия алгоритмов определения положения объектов в пространстве относительно БЛА;
- оценка оптимальности и быстродействия алгоритмов планирования траектории движения БЛА при сопровождении подвижных целей;
- оценка оптимальности и быстродействия алгоритмов планирования траектории движения БЛА при движении по заданному маршруту;
- оценка эффективности алгоритмов планирования траектории движения БЛА в пространстве с запретными зонами;
- оценка применимости различных стратегий управления для БЛА самолетного и вертолетного типов.

На рис. 3 приводится пользовательский интерфейс системы моделирования движения БЛА, позволяющий отображать траекторию и параметры полета, а также видео с оптической системы. Отображение всей информации производится в реальном масштабе времени, также существует возможность ретроспективного просмотра.

## Заключение

В работе произведен анализ параметров движения БЛА для моделирования полета с оптической навигационной системой. Рассмотрена задача формирования изображений бортовых камер для исследования алгоритмов оптической навигации и планирования траектории движения. Предложена система моделирования движения БЛА с оптической навигационной системой и выполнена ее программная реализация. Обозначены возможные направления исследований с использованием предложенной системы моделирования.

## MODELING OF THE MOVEMENT OF UAV WITH THE OPTICAL NAVIGATION SYSTEM

K.A. VOLKOV, H.M. KARBALAEI SALEH, A.V. PARASOCHKA,  
S.S. ZAITSEV, R.R. ROMANOV, M.B.M MAHMOOD

### Abstract

The analysis of the movement of unmanned aerial vehicle (UAV) parameters for modeling of flight with the optical navigation system is made. The problem of image formation of dash cameras is considered. Modeling of the movement of UAV with the optical navigation system is offered. The possible directions of researches with use of the offered system of modeling are designated.

*Keywords:* optical navigation, motion simulation, unmanned aerial vehicle.

### Список литературы

1. *Arkin R.C.* Behavior-based Robotics. Cambridge, 1998.
2. *Beard R.W.* // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2002. Vol. 18. P. 911-922.
3. *Pachter M., Ceccarelli N., Chandler P.R.* // Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, 2007.
4. *Якубайлик О.Э., Попов В.Г.* // Вычислительные технологии, 2009. Т. 14. №6. С. 116-126.
5. *Жилнев М.Ю.* // Геоматика. 2009. №3. С. 56-64.
6. *Szeliski R.* Computer Vision: Algorithms and Applications Springer. New York, 2010.
7. *Форсайт Д., Понс Ж.* Компьютерное зрение. Современный подход. М., 2004.
8. *Андреевский Б.Р., Фрадков А.Л.* Современные направления синтеза систем автоматического управления летательными аппаратами. СПб, 2004.
9. *Богословский С.В., Дорофеев А.Д.* Динамика полетов летательных аппаратов. СПб, 2002.