

УДК 528.4

## ПРИКЛАДНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕКСАКОПТЕРА AIBOT

**И. Жежера**

Навигационный геодезический центр

**И. Тревого**

Национальный университет «Львовская политехника»

**Ключевые слова:** aibot, мультиспектральная съемка, объемы, БПЛА, гексакоптер.

### Постановка проблемы.

Сегодня использование классических методов ведения измерения объемов земельных работ, а также построение топопланов по геодезическим измерениям требует внедрения современных технологий, способных повысить быстродействие выполнения с должным уровнем точности результата. При этом анализ существующих и перспективных автономных летательных аппаратов демонстрирует, что уже существует тенденция активного применения устройств подобного рода в гражданских и научно-исследовательских целях.

### Вербальная и графическая модели комплекса AiBot x6 v2.

При создании беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) применяют различные способы создания подъемной силы, в зависимости от прямого предназначения аппарата и целей его использования. Существуют такие основные схемы, как самолетная, вертолетная и мультироторная, каждая из которых включает несколько подвидов. Одним из наиболее распространенных типов является мультироторная схема, получившая широкое распространение в таких сферах, как геодезия и картография. Такие летательные аппараты (ЛА) особенно эффективны в задачах, при которых необходима возможность вертикального взлета и посадки, а также способность к зависанию для повышения качества аэрофотоснимка.

Одним из ярких представителей гексакоптеров на мировом рынке является Aibot X6 V2.

Aibot X6 V2 – это новое поколение роботизированных гексакоптеров, специально разработанных для решения сложных задач в сфере геодезии, промышленных инспекций, сельского и лесного хозяйства.

Особенностью этого аппарата является устойчивая схема, состоящая из шести двигателей. Она позволяет обеспечивать функциональную устойчивость аппарата при отказе двух непоследовательных двигателей.

Аппарат имеет навигационную систему, получающую информацию о параметрах окружающей среды по средствам микромеханических измерительных датчиков (акселерометров, датчиков угловых скоростей, барометрическому высотомеру и магни-

тометру) и приемнику чго GPS, позволяет выполнять автоматический траекторный полет [1, 12].

Гексакоптер AiBot x6 v2 снабжен подвесом среднего размера для крепления различного оборудования, такого как мультиспектральные камеры Parrot Sequoia и Marig или RGB камеры, например, sony  $\alpha$  6000.

Внешний вид гексакоптера AiBot X6 V2 представлен на рис. 1, его параметры – в табл. 1.



Рис. 1. Вид гексакоптера AiBot X6 V2

Таблица 1

### Параметры AiBot X6 V2

Параметр	Величина
Высота	0,45 м
Диаметр гексакоптера, м	1,05 м
Масса полезной нагрузки, кг	до 2,0
Взлетный вес, кг	6,5 кг
Максимальная скорость полета, м/с	50 км/ч

При использовании летательного аппарата имеется возможность использования дополнительного оборудования: антенны двухчастотного GPS приемника (рис. 2), способной получать поправки о координате расположения аппарата в текущий момент времени с точностью до 1,5 см.

Для задания полетного маршрута, настройки аппарата, а также постполетного интегрирования логированной полетной информации с фотоатериалом используется программное обеспечение AiProFlight 2.



Рис. 2. Вид антенны двухчастотного GPS приемника

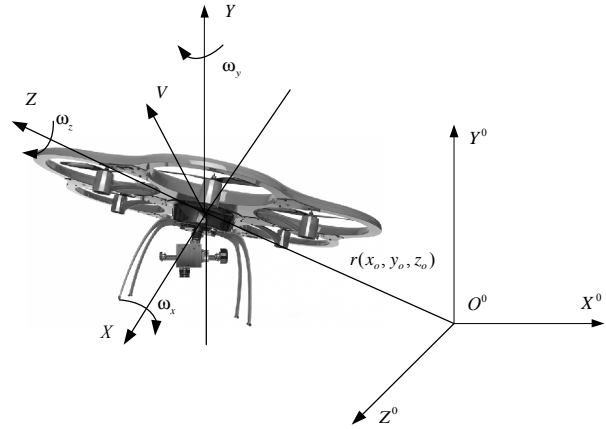


Рис. 3. Используемые в модели системы координат  $K^0$  и  $K$

Математическая модель гексакоптера AiBot х6 v2.

Для построения модели движения гексакоптера применяются две системы координат (рис. 3). Первой, земной системой координат, является неподвижная система отсчета  $K^0$  (с осями  $O^0X^0$ ,  $O^0Y^0$ ,  $O^0Z^0$ ), связанная с некоторой точкой на земной поверхности. Взаимно перпендикулярные оси  $O^0X^0$  и  $O^0Z^0$  располагаются в горизонтальной плоскости, ось  $O^0Y^0$  перпендикулярно к ним и направлена вертикально вверх относительно поверхности земли, как плоскости. Вторая, связанная система координат  $K$  (оси  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ ) жестко привязана к центру масс гексакоптера. Ось  $OX$  направляется вдоль продольной оси симметрии гексакоптера в его нос, а оси  $OY$  и  $OZ$  в перпендикулярных к оси  $OX$  вертикальной и горизонтальной плоскостях симметрии корпуса гексакоптера [2].

Параметры пространственного положения и ориентация гексакоптера в земной системе координат определяются тремя координатами  $x_0, y_0, z_0$  и тремя параметрами углового положения, представленными в кватернионной форме [3].

$$\begin{aligned} q[k] &= \arcsin\left(2\left(q_1^K[k]q_2^K[k] + q_0^K[k]q_3^K[k]\right)\right); \\ y[k] &= \arcsin\left(\frac{2\left(q_1^K[k]q_3^K[k] - q_0^K[k]q_2^K[k]\right)}{\cos(q[k])}\right); \\ g[k] &= \arccos\left(\frac{2q_0^K[k]q_0^K[k] + 2q_2^K[k]q_2^K[k] - 1}{\cos(q[k])}\right). \end{aligned} \quad (1)$$

Положительные направления всех поворотов соответствуют вращению против часовой стрелки, вдоль осей вращения в начало координат.

Уравнения кинематики гексакоптера имеют вид (2):

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{J} \\ \dot{g} \\ \dot{w}_x \\ \dot{w}_y \\ \dot{w}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(y, J, g) & 0 \\ 0 & A_w(y, J, g) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$A(y, J, w) = \begin{bmatrix} \cos y \cos J & \sin y \sin g - \cos y \sin J \cos g & \sin y \cos g + \cos y \sin J \sin g \\ \sin J & \cos J \cos g & -\cos J \sin g \\ -\sin y \cos J & \cos y \sin g + \sin y \sin J \cos g & \cos y \cos g - \sin y \sin J \sin g \end{bmatrix}$$

$$A_w = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\cos g}{\cos q} & -\frac{\sin g}{\cos q} \\ 0 & \sin g & \cos g \\ 1 & -\operatorname{tg} q \cos g & \operatorname{tg} q \sin g \end{bmatrix}$$

Поступательное движение гексакоптера имеет вид (3):

$$\begin{aligned} m(\dot{V}_x + w_y V_z - w_z V_y) &= G_x, \\ m(\dot{V}_y + w_z V_x - w_x V_z) &= G_y + P_y, \\ m(\dot{V}_z + w_x V_y - w_y V_x) &= G_z, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $P_y$  – проекция суммарного вектора тяги, создаваемого всеми двигателями;  $G_x, G_y, G_z$  – проекции силы тяжести на оси связанной системы координат;  $V_x, V_y, V_z$  – проекции на оси связанной системы вектора линейной скорости движения начала координат системы  $K$  относительно земной системы  $K^0$ ;  $w_x, w_y, w_z$  – проекции вектора угловой скорости движения начала координат системы  $K$  относительно земной системы  $K^0$  на оси связанной системы координат.

Уравнения динамики вращательного движения гексакоптера при постоянной массе и моментах инерции в проекциях на оси системы  $K$  имеют такой вид (4):

$$\begin{aligned} J_x \dot{w}_x + (J_z - J_y) w_y w_z &= N_x, \\ J_y \dot{w}_y + (J_x - J_z) w_x w_z &= N_y, \\ J_z \dot{w}_z + (J_y - J_x) w_x w_y &= N_z \end{aligned} \quad (4)$$

$$\bar{N}_P = \begin{bmatrix} kl(w_1^2 + \cos j_k w_2^2 + \cos j_k w_6^2 - w_4^2 - \cos j_k w_3^2 - \cos j_k w_5^2) \\ b(-w_1^2 + w_2^2 - w_3^2 + w_4^2 - w_5^2 + w_6^2) \\ kl \sin j_k (w_2^2 + w_3^2 - w_5^2 - w_6^2) \end{bmatrix},$$

где  $b$  – положительный коэффициент, определяемый экспериментальным или расчетным путем.

#### Среда применения.

Аграрный сектор – одна из наиболее перспективных отраслей использования беспилотных летательных аппаратов. Материалы специализированной цифровой съемки сельскохозяйственных полей с беспилотников могут быть основой для научно-технических оценок состояния и динамики роста посевов, а именно спектр показателей от размера территорий и местоположения поврежденных посевов (насекомыми, болезнями, внешними факторами) до оценки плотности сорняков, заболеваемости и прогнозирования объема урожая [4–6, 11].

Для оценки текущего состояния биомассы посевов используют фотоматериалы, полученные в ближнем инфракрасном диапазоне (NIR), на основании которых вычисляется нормализованный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где  $NIR$  – отражение в ближней инфракрасной области спектра;  $RED$  – отражение в красной области спектра.

где  $J_x, J_z, J_y$  – моменты инерции,  $N_x, N_y, N_z$  – проекции на оси связанной системы координат  $K$  вектора главного момента всех действующих на гексакоптер сил.

Построим модель исполнительных механизмов. К основным характеристикам винта относятся:

– координаты винтов в связанной с гексакоптером системе координат;

– зависимость тяги винта от количества оборотов.

Координаты винтов определяются величиной  $l_k$  и углом  $j_k$ . Пусть зависимость тяги винта от количества оборотов определяется выражением:

$$t_i = k w_i^2, \quad i = \overline{1,6}, \quad (5)$$

где  $t_i$  – момент, развиваемый винтом;  $w_i$  – частота вращения винта;  $k$  – положительный коэффициент, определяемый расчетно или экспериментально.

В этом случае управляющие силы и моменты будут иметь вид (6):

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} 0 \\ k(w_1^2 + w_2^2 + w_3^2 + w_4^2 + w_5^2 + w_6^2) \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

В результате значения NDVI меняются в диапазоне от  $-1$  до  $1$ . Для зеленой растительности отражение в красной области всегда меньше, чем в ближней инфракрасной за счет поглощения света хлорофиллом. Поэтому значения NDVI для растительности не могут быть меньше  $0$ . NDVI характеризует также плотность растительности, позволяет оценить всхожесть и рост растений, продуктивность угодий.

Ниже (рис. 4) изображен пример реализации NDVI карты.

Данные NDVI карт можно использовать при планировании маршрута для дополнительного орошения или удобрения почвы, а также для планирования ожидаемого урожая и объемов закупки удобрений [11].

Еще одним развивающимся и перспективным направлением является измерение объемов земельных работ.

Неоднократно подтвердилась эффективность такого применения ввиду высокого быстродействия, безопасности, точности и мобильности всей системы [7–9].

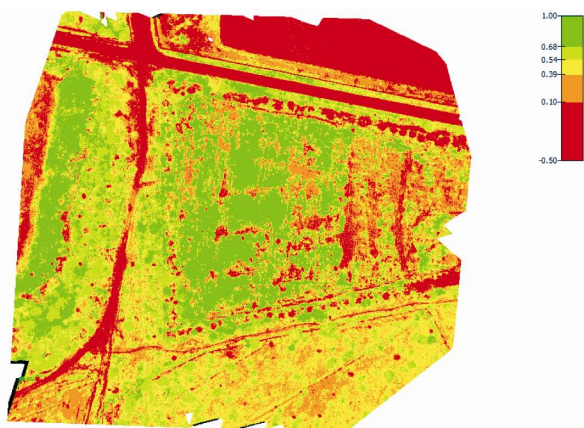


Рис. 4. Изображение индекса NDVI карты

Нижче (рис. 5–8) приведені етапи і результати в вигляді графіків, виконаних при підсчете об'єму окаташшей в ГОКе.



Рис. 5. 3D модель території с насыпними штабелями



Рис. 6. Изображение облака точек штабеля №1

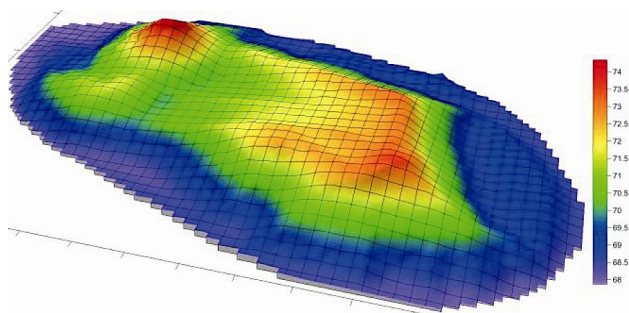


Рис. 7. Изображение поверхности штабеля №1

Объём от плоскости с отметкой 68,5 м: 3199 куб. м. ±0,5 куб. м.  
Площадь штабеля: 1819 кв. м.

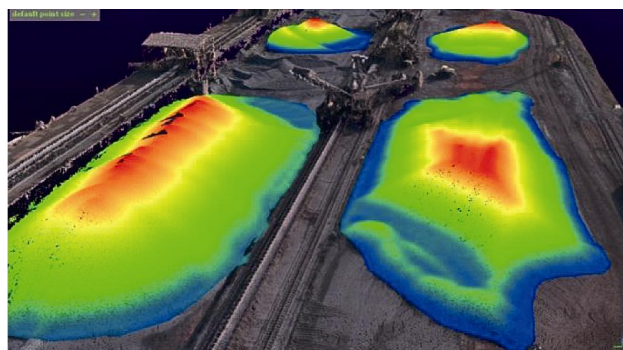


Рис. 8. Визуализация изменения объемов

**Выводи**

- Беспилотная авиация, в частности мульти-роторные системы, такие как AiBot х6 v2, зарекомендовала себя как высокоэффективная система, способная собирать информацию об объекте с геодезической точностью (для карт пятисотого масштаба), с возможностью последующего построения из нее облака точек. Это позволяет бригадам геодезистов выполнять работу за короткие, меньшие сроки с минимальными рисками.

- Для аграрного сектора, динамика роста экономического эффекта применения подобного аппарата обуславливается направлением его использования и состоит из прибыли, полученной в результате роста урожаев и снижения расходов за счет экономии топлива, семенного материала, удобрений, агрохимикатов и оросительных вод, а также предупреждения потерь от краж урожая [10].

- Следует отметить, что при выполнении съемочных работ необходимы нормальные погодные условия, хорошая видимость, отсутствие высотных объектов вблизи линии маршрута, а также объектов с мощным магнитным (электромагнитным) полем, способных влиять на измерительные приборы летательного аппарата.

**Литература**

1. Распопов В. Я. Микросистемная авионика: учеб. пособ. / В. Я. Распопов. – Гриф и К, 2010. – 249 с.
2. Кульченко А. Е. Метод управления движением гексакоптера в трехмерной среде с препятствиями на базе динамических отталкивающих сил / А. Е. Кульченко, В. С. Лазарев, М. Ю. Медведев // Инженерный вестник Дона, 2016. – С. 45–49.
3. Кулік А. С. Дослідження системи управління малогабаритного літального апарату вертикального зльоту і посадки / А. С. Кулік, С. Н. Фірсов, Ван Тхьин Нгуєн // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2012. – № 2 (89). – С. 66–70.
4. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / за ред. В. І. Лялько та М. О. Попова. – К. : Наукова думка, 2006. – 360 с.
5. Назаров А. С. Фотограмметрия: учеб. пособ. – Мн.: ТетраСистемс, 2006. – 368 с.

6. Бурштинська Х. В. Аерокосмічні знімальні системи: підручник / Х. В. Бурштинська, С. А. Станкевич. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2013. – 408 с.
7. Кохан С. С. Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи: підручник. – К. : Вища шк., 2009. – 511 с.
8. Atzberger C., Schierf M. Object-based system density estimates in a Mid-European forest district based on artificial neural nets – Comparison of Landsat-TM and NuMAP performances // Geoinformation for European-wide Integration: Proceed. of the 22-nd Symp. of the EARSeL, Prague, 4–6 June 2002. – Rotterdam: Millpress, 2003. – P. 413–418.
9. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.50northspatial.org/ua/otsinka-stanuposiviv/>
10. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://maintenance.leica-geosystems.com/lgs/index.htm>

#### Прикладне використання гексакоптера aibot

І. Жежера, І. Тревого

Запропоновано комплексне рішення для проведення геоінформаційних робіт з використанням автономного літального апарата AiBot x6 v2 схеми гексакоптер. Наведено короткий опис математичної моделі гексакоптера та показано спектр можливостей

з прикладами виконаних проектів. У висновку вказано виявлені особливості використання безпілотного літального апарата для проведення геоінформаційних робіт.

#### Прикладное использование гексакоптера aibot

И. Жежера, И. Тревого

Предлагается комплексное решение для проведения геоинформационных работ с использованием автономного летательного аппарата AiBot x6 v2 схемы гексакоптер. Приведено краткое описание математической модели гексакоптера и показан спектр возможностей с примерами выполненных проектов. Выявлены и сформулированы в заключении особенности использования беспилотного летательного аппарата для проведения геоинформационных работ.

#### Applied use of hesakoptera aibot

I. Zhezhera, I. Trevocho

The article proposes a complex solution for geoinformation works using the autonomous aircraft AiBot x6 v2 with hexacopter scheme. Brief description of the hexacopter mathematical model was considered and a spectrum of possibilities with examples of completed projects is shown. The identified features of the use of an unmanned aerial vehicle for conducting geoinformation works are formulated.

BERLIN

2017

INTERGEO®

26.–28. SEPTEMBER

WISSEN UND HANDELN  
FÜR DIE ERDE

CiTyference  
Kyiv & Dnipro 2017

THE 7th INTERNATIONAL URBAN GEOGRAPHIES  
OF POST-COMMUNIST STATES CONFERENCE:

A view on cities from elsewhere

Kyiv & Dnipro with Kryvyi Rih

26-29 September 2017