

УДК004.042

МЕТОД ОДНОВРЕМЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ И СКОРОСТИ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО ОПТИЧЕСКОМУ ПОТОКУ

Иванов В. И.

НИИ ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь

Аннотация. Предложен метод одновременного определения высоты и скорости полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА), основанный на анализе временных параметров динамики изменения интенсивности детектируемого оптического потока, обусловленного неоднородной яркостью подстилающей поверхности (ПП). Метод существенно расширяет возможности навигации летательных аппаратов по оптическому потоку, обеспечивает определение высоты и скорости поступательного полета с высоким быстродействием и точностью.

Ключевые слова: автономная навигация БПЛА, навигация по оптическому потоку.

METHOD OF SIMULTANEOUS DETERMINATION OF ALTITUDE AND FLIGHT SPEED OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE BY OPTICAL FLOW

Ivanov V. I.

Institute for nuclear problems of Belarusian state university, Minsk, Belarus

Abstract. A method for simultaneously determining the altitude and speed of an unmanned aerial vehicle (UAV) flight is proposed, based on the analysis of time parameters of the dynamics of changes in the intensity of the detected optical flow, caused by the non-uniform brightness of the underlying surface (OS). The method significantly expands the capabilities of aircraft navigation by optical flow, ensures the determination of the altitude and speed of translational flight with high speed and accuracy.

Keywords: autonomous UAV navigation, optical flow navigation.

Адрес для переписки: Иванов В. И., ул. Голубева, д. 5, кв. 103, г. Минск 220116, Республика Беларусь
e-mail: Ivanov.inp@gmail.com

Метод одновременного определения высоты H и путевой скорости летательного аппарата V_x основан на получении и анализе временных параметров динамики оптического потока, обусловленного изменениями яркости ПП при полете БПЛА над ПП с неоднородной яркостью. Вариации яркости ПП вызваны различной степенью отражения (альбедо) k_0 естественной световой радиации локальными областями ПП [1, 2].

Информация о временных параметрах оптического потока определяется фотодетектированием отраженной световой радиации, получаемой при сканировании ПП по траектории полета БПЛА пространственным «окном» (апертурой) A бортовой оптической системы (ОС).

На борту БПЛА используются две оптические системы ОС1 и ОС2 с разными угловыми полями $\alpha_1 \neq \alpha_2$ и равными углами сканирования (визирования) $\beta_1 = \beta_2$, соответственно. ОС1 и ОС2 установлены вдоль продольной оси ЛА на базовом расстоянии d_0 друг от друга. Каждая из ОС включает объектив и одноэлементный фотодетектор (ФД) – лавинный фотодиод, миниатюрный ФЭУ и т. п.

На рисунке 1 приведена схема метода ($\alpha_1 > \alpha_2$). ПЛА вектора путевой скорости V_x , т. е.

$$B(x') = F \int_{y' - A_x/2}^{y' + A_x/2} \left[\int_{-\infty}^{\infty} L(r) r'(x' - x) dx \right] dy, (1)$$

где $r'(x)$ – весовая функция пространственного «окна».

В данном случае $r'(x) = 1$ при $-A_x/2 \leq x \leq A_x/2$; $r'(x) = 0$ для всех x , непопадающих в интервал $(-A_x/2; A_x/2)$.

В общем случае апертура A определяет площадь S апертуры в предметной плоскости x, y

(на подстилающей поверхности) и является функцией высоты полета БПЛА H , апертурного угла ОС α , и угла сканирования (визирования) β

$$A = f(H, \alpha, \beta). (2)$$

В данном случае угол β отсчитывается от нормали к продольной оси ЛА (горизонтальной строительной плоскости БПЛА) и лежит в плоскости HOX , т. е. $\beta = \beta_x$, рисунок 1. ОС бокового обзора в данном случае не рассматриваем.

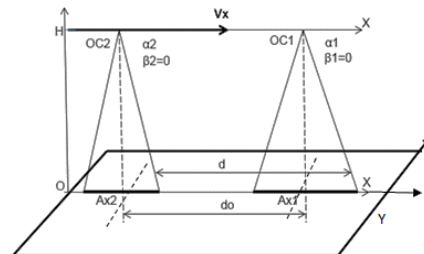


Рисунок 1 – Схема реализации метода на Б

Не нарушая общности обоснования данной методологии дальнейшее рассмотрение проводим для апертуры с использованием прямоугольной вырезающей диафрагмы с размерами $l_x \times l_y$ мм. В этом случае апертура ОС в плоскости ПП также имеет прямоугольную конфигурацию с длиной сторон по координатам x, y A_x и A_y соответственно, которые определяются уравнениями:

$$A_x = H[tg(\beta + \alpha_x/2) - tg(\beta - \alpha_x/2)]; (3)$$

$$A_y = 2H tg \alpha_y/2; (4)$$

$$\alpha_x = 2arctg l_x/2F; (5)$$

$$\alpha_y = 2arctg l_y/2F, (6)$$

где α_x и α_y – апертурные углы по координатам x и y соответственно, определяющие поле зрения ОС; F – фокусное расстояние объектива ОС, мм.

Площадь аперттуры прямоугольной конфигурации

$$A = A_x A_y = H^2 \{ [tg(\beta + \alpha_x/2) - tg(\beta - \alpha_x/2)] 2tg\alpha_y/2 \} \quad (7)$$

определяет площадь сканирующего окна (аперттуры ОС) в плоскости ПП на высоте полета H .

При $l_x = l_y$ ($\alpha_x = \alpha_y = \alpha$) и угле визирования $\beta = 0^\circ$ (вертикальное сканирование) аперттура ОС имеет форму квадрата с размерами сторон

$$A_x = A_y = 2Htg\alpha/2. \quad (8)$$

При сканировании альbedo ПП может изменяться в широких пределах, например, в видимом диапазоне от $k_0 = 8\%$ (сухая темная почва) до $k_0 = 64\%$ (снег чистый, сухой) [1, 2]. Это определяет динамику изменения сигнала (1), а именно амплитуду и скорость $1/\tau_i$ амплитудной модуляции сигнала, а соответственно и требуемую полосу частот Δf детектируемых сигналов в зависимости от степени неоднородности альbedo ПП, протяженности локальных яркостных полей ПП D_{xi} , аперттуры A и скорости полета V_x .

Параметр τ_i определяет длительность сигнала импульса

$$\tau_i = (D_{xi} + A_x)/V_x = (D_{xi} + 2Htg\alpha/2)/V_x. \quad (9)$$

Глубина амплитудной модуляции сигнала $B(r, t)$ определяется уравнением

$$|m_i| = \frac{|B_{Di} - B_{Di+1}|}{B_{Di} + B_{Di+1}} = \frac{|Ek_{0,Di} - Ek_{0,Di+1}|}{Ek_{0,Di} + Ek_{0,Di+1}} = \frac{|k_{0,Di} - k_{0,Di+1}|}{k_{0,Di} + k_{0,Di+1}}, \quad (10)$$

где $\Delta B_{Di,Di+1} = |B_{Di} - B_{Di+1}|$ – дифференциальная разность сигналов B_{Di} и B_{Di+1} от двух смежных областей ПП D_i и D_{i+1} с разными альbedo $k_{0,Di}$, $k_{0,Di+1}$ соответственно; E – освещенность ПП.

Увеличение дифференциальной разности сигналов $\Delta B_{Di,Di+1}$, а соответственно и глубины модуляции (10), увеличивают соотношение «сигнал/шум», что в данном случае углы визирования ОС1 и ОС2 равны, а их оптические оси совпадают с нормалью к горизонтальной плоскости ЛА, т.е. $\beta_1 = \beta_2 = 0^\circ$. Соответственно при горизонтальном полете БПЛА относительно ПП сканирование осуществляется перпендикулярно ПП (в надиr). Выходной сигнал ОС пропорционален энергетической яркости ПП

$$B(r) = F \iint_A L(r) dr, \quad (11)$$

где F – оператор приема и фотодетектирования; $L(r)$ – функция распределения яркости подстилающей поверхности (яркостная сигнатура ПП); $r = x, y$ – вектор пространственных координат на плоскости x, y ПП.

Так, например, при прямоугольной приемной апертуре ОС площадью A , в дальнейшем просто

апертурой A , в виде прямоугольника со сторонами A_x и A_y можно записать

$$B(r) = F \int_{x'-A_x/2}^{x'+A_x/2} \int_{y'-A_y/2}^{y'+A_y/2} L(r) dx dy. \quad (12)$$

При полете БПЛА скорость сканирования определяется путевой (земной) скоростью ЛА, а направление сканирования ПП совпадает с направлением вектора путевой скорости V_x (ось X). В общем виде путевая скорость V_x рассматривается как проекция вектора воздушной скорости БПЛА в пространстве V_θ на ПП и определяется уравнением

$$V_x = V_\theta \cos\theta, \quad (13)$$

где θ – угол вектора воздушной скорости полета ЛА по отношению к горизонтальной плоскости ПП; при горизонтальном полете $\theta = 0$; $V_x = V_\theta$.

При этом координата X принимает непрерывный ряд значений x' , а координата Y остается неизменной. Соответственно выходной сигнал фотодетектора ОС определяется сверткой пространственного «окна» (аперттуры A) и функции распределения яркости $L(r)$ ПП в направлении конечного итога определяется яркостным контрастом смежных областей ПП. При малом контрасте (малой глубине модуляции) сигнала определяющим является мощность принимаемого сигнала [3, 4].

Согласно (9) разность длительностей сигнальных импульсов $\Delta\tau$ определяется уравнением

$$\Delta\tau = |\tau_{i1} - \tau_{i2}| = \frac{[(D_i + A_{x1}) - (D_i + A_{x2})]}{V_x} = \frac{|A_{x2} - A_{x1}|}{V_x} = |\Delta A_x|/V_x, \quad (14)$$

где A_{x1} и A_{x2} – протяженность апертур ОС1 и ОС2 по оси x (по направлению вектора скорости V_x). При вертикальном сканировании ПП $\beta_1 = \beta_2 = 0^\circ$. Соответственно

$$k_1 = tg\alpha_1/2; \quad (15)$$

$$k_2 = tg\alpha_2/2; \quad (16)$$

$$A_{x1} = 2Htg\alpha_1/2 = 2Hk_1; \quad (17)$$

$$A_{x2} = 2Htg\alpha_2/2 = 2Hk_2. \quad (18)$$

Полагаем, что $\alpha_1 > \alpha_2$, при этом

$$\Delta A_x = A_{x1} - A_{x2} = 2H(k_1 - k_2). \quad (19)$$

В этой связи уравнение (14) примет вид

$$\Delta\tau = 2H(k_1 - k_2)/V_x. \quad (20)$$

Из (20) получаем

$$V_x = 2H(k_1 - k_2)/\Delta\tau. \quad (21)$$

Время задержки (запаздывания) τ_d импульса τ_{i1} относительно импульса τ_{i2} определяется уравнением:

$$\tau_d = d/V_x = (d_0 + \Delta d)/V_x, \quad (22)$$

где d – расстояние между передними «фронтами» апертур ОС1 и ОС2; d_0 – базовое расстояние установки ОС1 и ОС2 на ЛА (рисунок 1).

$$\Delta d = H(k_1 - k_2) = 0,5\Delta A_x. \quad (23)$$

Соответственно (22) примет вид

$$\tau_d = [d_0 + H(k_1 - k_2)]/V_x. \quad (24)$$

Из (21) имеем:

$$V_x = [d_0 + H(k_1 - k_2)]/\tau_d. \quad (25)$$

Уравнения (21) и (25) инвариантны друг к другу, т. е.

$$2H(k_1 - k_2)/\Delta\tau = [d_0 + H(k_1 - k_2)]/\tau_d \quad (26)$$

Из (26) получаем уравнение для определения высоты полета H виде

$$H = d_0\Delta\tau / [(2\tau_d - \Delta\tau)(k_1 - k_2)]. \quad (27)$$

Уравнение для определения скорости полета V_x получено из (25) с учетом (27)

$$V_x = 2d_0 / (2\tau_d - \Delta\tau). \quad (28)$$

Как следует из уравнений (27, 28) метод обеспечивает одновременное определение высоты H и путевой скорости V_x БПЛА при полете над ПП с неоднородной яркостной сигнатурой. Особые преимущества метода проявляются в условиях квазигоризонтальных маловысотных полетов

со скоростью до 300 км/ч в диапазоне высот до 250–300 м, что актуально для контроля сближения БПЛА с заданными объектами на ПП, автоматизированной посадки, осуществления полетов с огибанием рельефаместности на предельно малых высотах до $0,2 \div 0,5$ м [4].

Литература

1. Гурлев, Д. С. Справочник по фотографии (фото-съемка) / Д. С. Гурлев. – Киев: Техника, 1989. – 305 с.
2. Тимофеев, Ю. М. Основы теоретической атмосферной оптики / Ю. М. Тимофеев, А. В. Васильев. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2007. – 338 с.
3. Иванов, В. И. Методология и алгоритмы получения 3D-портретов объектов по 2D-распределениям интенсивности усеченных реализаций отраженного лазерного излучения / В. И. Иванов // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 3. – С. 386–396.
4. Иванов, В. И. Метод определения высоты и скорости полета беспилотного летательного аппарата по яркостной сигнатуре подстилающей поверхности / В. И. Иванов // Журнал прикладной спектроскопии. – 2025. – Т. 92, № 5. – С. 607–617.

УДК 621.313

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОКА ХОЛОСТОГО ХОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН Исаев А. В., Суходолов Ю. В., Лычковский В. А., Кротова А. С., Леонович П. Д.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Проблема оценки работоспособности электромеханических приводов является актуальной с самого зарождения станко- и приборостроения. Целью данной работы было разработка метода, построение алгоритма и изготовление на их основе прибора, который сможет на основе спектральных составляющих тока, протекающего в обмотках электрической машины, работающей в режиме «холостого хода» контролировать его состояние с возможностью своевременного выявления дефектообразования.

Ключевые слова: диагностика электрических машин, методы оценки состояния электрических машин, спектральный состав тока холостого хода, сопротивление межвитковой изоляции обмоток.

USING NO-LOAD CURRENT TO ASSESS THE CONDITION OF ELECTRIC MACHINE WINDINGS Isaev A. V., Sukhodolov Yu. V., Lychkovsky V. A., Krotova A. S., Leonovich P. D.

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Abstract. The problem of assessing the performance of electromechanical drives has been relevant since the very inception of machine-tool and instrument-making. The purpose of this work was to develop a method, build an algorithm and manufacture a device based on them that will be able to monitor the state of an electric machine with the ability to promptly detect defects based on the spectral components of the current flowing in the windings of an electric machine operating in the "idle" mode.

Keywords: diagnostics of electrical machines, methods for assessing the condition of electrical machines, spectral composition of no-load current, resistance of interturn insulation of windings.

*Адрес для переписки: Исаев А. В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: isaevav@bntu.by*

Проблема оценки работоспособности электромеханических приводов была актуальна с самого зарождения станко- и приборостроения. При этом данная проблема до конца не решена и в настоящее время. А с учетом увеличения требований к такому оборудованию, существенному повышению эксплуатационных характеристик, эта проблема стала еще более критичной. В настоящее время разработано большое количество методов, в той или иной

мере позволяющие оценить состояние электрических цепей электроприводов, но все они мало пригодны для использования в реальных условиях [1, 2]. Да и фиксируют они проблему уже на конечных стадиях дефектообразования, когда говорить о работоспособности, а тем более об исправности такого диагностируемого оборудования не приходится. Поэтому работы по разработкам методов и алгоритмов контроля состояния электрических машин,