

УДК 004.056.32

**ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ
ОТ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВЛЕННЫХ ДАТЧИКОВ**

*А.В. КАРЛА, д-р техн. наук, проф. В.К. ЖЕЛЕЗНЯК
(Полоцкий государственный университет)*

Бурное развитие и масштабное внедрение в современном мире беспилотных летательных аппаратов (БЛА) обуславливает необходимость решения новых задач при полетах.

В статье рассматриваются вопросы оценки точности параметров наблюдения, определяющих стабильность БЛА при различных влияющих факторах, которые зависят не от летательного аппарата, а от внешних воздействий. Анализируются литературные издания, статьи и другие источники информации. Предложены альтернативные способы использования ресурсов и их реализация, которые направлены на определение стабильности и точности. Результатом статьи является оценка стабильности параметров наблюдения для определения точности и повышения достоверности информации.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, стабильность, достоверность информации, влияющие факторы.

Введение. Беспилотным летательным аппаратом является аппарат без экипажа на борту, способный самостоятельно целенаправленно перемещаться в воздушном пространстве для выполнения различных функций в автономном режиме с помощью собственной управляющей программы или посредством дистанционного управления, осуществляемого человеком-оператором со стационарного или мобильного пульта управления [1]. Такие аппараты имеют различную степень автономности: от управляемых дистанционно до полностью автоматических, а также различаются по конструкции, назначению и множеству других параметров.

Основные преимущества БЛА перед летательным аппаратом (ЛА):

- габаритные характеристики БЛА меньше, чем ЛА;
- масса БЛА для выполнения определенных действий меньше, чем ЛА, что подразумевает экономию ресурсов на питание;
- сложность обнаружения БЛА в связи с малыми габаритами и неотражающими материалами, используемыми при изготовлении.

БЛА по габаритам и массе подразделяются:

- на микро- и мини-БЛА ближнего радиуса действия (взлетная масса до 5 кг, дальность действия до 25–40 км);
- на легкие БЛА малого радиуса действия (взлетная масса 5–50 кг, дальность действия 10–70 км);
- на легкие БЛА среднего радиуса действия (взлетная масса 50–100 кг, дальность действия 70–150 м, некоторые виды – до 250 км);
- на средние БЛА (взлетная масса 100–300 кг, дальность действия 150–1000 км);
- на среднетяжелые БЛА (взлетная масса 300–500 кг, дальность действия 70–300 км);
- на тяжелые БЛА среднего радиуса действия (взлетная масса более 500 кг, дальность действия 70 км и более);
- на тяжелые БЛА большой продолжительности полета (взлетная масса более 1500 кг, дальность действия около 1500 км) и др.

По назначению делятся:

- на применяемые в научных целях (испытания новой техники, в т.ч. новых принципов полета; наблюдения за природными явлениями и др.);

- на применяемые в прикладных целях.

По функциональному назначению БЛА классифицируют на используемые в военной сфере и в гражданской сфере.

Гражданские БЛА применяются:

- для мониторинга различных объектов (видеонаблюдение с целью их охраны);
- для мониторинга лесных массивов службой лесоохраны;
- для наблюдения за движением на железных и шоссейных дорогах, контроля судоходства;
- для наблюдения за посевами предприятий сельского хозяйства;
- для картографирования земной поверхности;
- для разведки и составления планов помещений с помощью малых БЛА внутри разрушенных или опасных зданий;
- для мониторинга нефтегазовых объектов, особенно трубопроводов;

- для радиационной и химической разведки на опасных территориях;
- для видеофотосъемки труднодоступных промышленных объектов (линий электропередач, опор мостов, дымовых труб, ветрогенераторов, антенн и т.д.);
- для мониторинга опасных природных явлений (паводков, извержений вулканов, лавиноопасных горных районов и др.);
- для поиска полезных ископаемых с помощью специальных средств зондирования;
- для познавательных акций (видео- и фотосъемка объектов архитектуры, природы, бизнеса, а также массовых мероприятий с целью презентации или рекламы);
- для авиамоделизма и авиаконструирования;
- для использования малых БЛА в качестве арт-объекта или объекта развлечения;
- для наблюдения за прокладкой кабелей в опасных зонах;
- для ретрансляции сигналов (ретрансляция радиосигналов с целью увеличения дальности действия каналов связи) .

Для полетного режима БЛА существует классификация по принципу полета, в соответствии с которой выделяют:

- БЛА с жестким крылом (самолетного типа);
- БЛА с гибким крылом;
- БЛА с вращающимся крылом (вертолетного типа);
- БЛА с машущим крылом;
- БЛА аэростатического типа;
- различные гибридные подклассы аппаратов, которые трудно однозначно отнести к какой-либо группе.

Задача данной статьи заключается в том, чтобы обосновать и определить стабильность летательных аппаратов, в основе которых лежит поддержание нужной высоты, стабильность равномерного поддержания летательного аппарата по координатным осям. Сформулировать и конкретизировать оценку параметров точности, которые влияют как на стабильность, так и на действия БЛА. Основные параметры, на которые будет сделан упор, – это влияние погодных условий, ландшафт местности, высота и режим полета.

Актуальность статьи: анализ факторов стабильного полета как для точного и полного выполнения поставленных задач, так и для безопасности получения достоверной информации.

Анализ метода. Важнейшими вопросами являются определение координат в пространстве и повышение стабилизации БЛА. Повышенная стабилизация необходима для наблюдения и устойчивости полета. Указанные параметры определяются приведенными ниже факторами.

Дистанционный контроль при помощи устанавливаемых на БЛА фото- и видеокамер, применяется во многих сферах деятельности. Востребованной является стабилизация изображения и самого летательного аппарата.

В первую очередь, требуется рассмотреть фактор, который возникает при сложении радиолокационных (РЛ) сигналов в момент дистанционного наблюдения с высокой точностью.

При принятии РЛ сигнала вследствие отражения от элементарных площадок поверхности происходит сложение фаз сигналов, которое называется блужданием центра отражения или же угловым мерцанием цели. Такое явление приводит к угловым ошибкам определения мгновенного центра отражения. Блуждание центра отражения происходит в пределах ограниченной области, связанной с отражающей поверхностью. Вследствие этого угловые колебания отраженного сигнала существенно зависят от дальности. Зачастую блуждание центра отражения выражают в виде стационарной случайной функции, поделенной

на дальность $D(t)$ до отражающей поверхности $X(t) = \frac{X_6(t)}{D(t)}$ [2]. Случайная функция X_6 имеет спектральную плотность, которая хорошо аппроксимируется формулой

$$S_6(\omega) = \frac{a\sigma_6^2}{\alpha + \beta\omega^2 + \gamma\omega^4}, \tag{1}$$

где σ_6^2 – дисперсия блуждания центра отражения.

Экспериментально формула (1) более детально и подробно рассмотрена Р. Делано [2] и Дж. Данном, Д. Ховардом, А. Кингом [3].

Часть параметров, которые используются в последней формуле, являются постоянными значениями: $a = 9,67$; $\alpha = 483,1 \text{ с}^{-1}$; $\beta = 0,456$; $\gamma = 0,001 \text{ с}^3$. В свою очередь, среднее квадратическое отклонение зависит от наибольшего размера L облучаемой РЛ цели и вычисляется по формуле $\sigma_6 = 0,21L$ (L измеряется в метрах).

При рассмотрении расстояния при принятии сигнала, следует отметить такой фактор, как влияние атмосферы на точность координат БЛА.

В связи с тем, что атмосфера всегда находится в непрерывном случайном движении относительно Земли, что выражается в появлении ветра, скорость ветра W является случайной функцией времени и координат точки пространства R : $W = W(R, t)$. Скорость ветра можно представить в виде суммы двух составляющих: постоянной и переменной. Составляющую скорости ветра считают постоянной, если за время движения летательного аппарата она мало изменяется по направлению и по величине. Модуль постоянной составляющей скорости ветра обычно рассматривают как случайную величину. Экспериментальные данные Ю.П. Доброленского [4] показывают, что данная величина имеет закон распределения вероятности Рэлея. Плотность вероятности постоянной составляющей скорости ветра [4]

$$f(W) = \frac{W}{\sigma^2} e^{-\frac{W^2}{2\sigma^2}}.$$

В представленной формуле среднее квадратическое отклонение постоянной составляющей скорости ветра зависит от высоты над земной поверхностью. В приземном слое атмосферы среднее отклонение выражается следующей зависимостью от высоты [5]:

$$\sigma = \frac{2}{\pi} m_{w_0} \left(\frac{H}{H_0} \right)^n,$$

где m_{w_0} – математическое ожидание скорости ветра на некоторой опорной высоте H_0 ;

H – текущая высота;

n – показатель степени, величину которого рекомендуется выбирать в пределах 0,15–0,20.

При опорной высоте $H_0 = 10$ м рекомендуется принимать $m_{w_0} = 3 \div 4$ м · с⁻¹. Переменная составляющая скорости ветра $W^0(R, t)$ характеризует турбулентность движения атмосферы, выражающуюся в хаотическом случайном перемещении частиц воздуха. По масштабу различают три интервала турбулентного движения: крупномасштабный, инерционный, вязкий. Крупномасштабная турбулентность обусловлена нарушением равновесного состояния атмосферы за счет неравномерного нагревания Солнцем. Данное движение носит асимметричный характер вследствие влияния поверхности земли и ее вращения. В инерционном диапазоне масштабов турбулентного движения происходит передача энергии от крупномасштабного движения сравнительно небольшим массам воздуха. При этом турбулентность носит изотропный характер. Предельные величины вихрей в этом диапазоне имеют порядок нескольких сотен метров. В вязком диапазоне турбулентность также носит изотропный характер и охватывает наиболее высокие частоты движения воздуха. Размеры вихрей в этом диапазоне составляют несколько сантиметров.

При статическом описании турбулентности обычно принимаются гипотезы о неизменности поля скоростей по отношению к летательному аппарату (гипотеза «замороженности» Тейлора) и об однородности и изотропности в вероятностном смысле поля скоростей. На основании первой гипотезы вероятностные характеристики турбулентности, полученные как функции координат для одного момента времени, можно использовать для любого момента времени. Вторая гипотеза позволяет ограничиться при статическом описании лишь одной корреляционной функцией проекции вектора скорости ветра на направление, соединяющие две точки пространства: $k_r(r)$, где r – расстояние между двумя точками пространства. Вследствие условия изотропности и однородности эта функция проекций вектора скорости ветра на нормаль к направлению между двумя точками $k_n(r)$ связана с корреляционной функцией $k_r(r)$ соотношением, полученным в общей теории турбулентности [4]:

$$k_n(r) = k_r(r) + \frac{1}{2} r \frac{dk_r(r)}{dr}.$$

Аналитические выражения для корреляционных функций, полученных аппроксимацией экспериментальных кривых, имеют следующий вид:

$$k_r(r) = \sigma_w^2 e^{-\frac{|r|}{L_r}};$$

$$k_n(r) = \sigma_w^2 \left(1 - \frac{|r|}{2L_n} e^{-\frac{r}{L_n}} \right),$$

где σ_w^2 – дисперсия переменной составляющей скорости ветра;

L_n и L_r – поперечный и продольный масштабы турбулентности соответственно.

График корреляционной функции турбулентности представлен на рисунке 1.

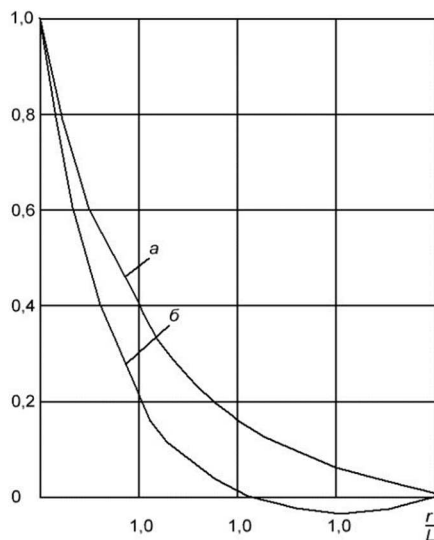


Рисунок 1. – Корреляционная функция турбулентности

Масштабы турбулентности характеризуют длины интервалов, на которых сохраняются корреляционные связи случайного процесса. Эти масштабы определяются как интегралы от нормированных корреляционных функций:

$$L_r = \frac{1}{\sigma_w^2} \int_0^\infty k_r(r) dr; \quad L_n = \frac{1}{\sigma_w^2} \int_0^\infty k_n(r) dr.$$

Между масштабами турбулентности имеется соотношение $L_r = 2L_n$. Для перехода от корреляционных функций, зависящих от координат, к корреляционным функциям, зависящим от времени, следует воспользоваться соотношением, вытекающим из гипотезы замороженности поля скоростей:

$$-r = v\tau,$$

где v – скорость полета БЛА.

Тогда

$$k_r(\tau) = \sigma_w^2 e^{-\alpha|\tau|}; \quad k_n(\tau) = \sigma_w^2 (1 - \alpha|\tau|) e^{-\frac{\alpha|\tau|}{2}},$$

где $\alpha = \frac{v}{L_r} = \frac{v}{2L_n}$.

Корреляционным функциям соответствуют спектральные плотности, аргументом которых является пространственная частота Ω :

$$\left. \begin{aligned} S_r(\Omega) &= \frac{2L_r \sigma_w^2}{\pi} \cdot \frac{1}{1 + (\Omega L_r)^2} \\ S_n(\Omega) &= \frac{L_n \sigma_w^2}{\pi} \cdot \frac{1 + 3(\Omega L_n)^2}{[1 + (\Omega L_n)^2]^2} \end{aligned} \right\}.$$

Корреляционным функциям соответствуют спектральные плотности временной угловой частоты $w = v\Omega$:

$$S_r(w) = \frac{2 \sigma_w^2 \alpha}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha^2 + w^2}; \quad S_n(w) = \frac{2 \sigma_w^2}{\pi} \cdot \frac{\alpha^2 + 3w^2}{(\alpha^2 + w^2)^2}.$$

Рассмотренные экспериментальные корреляционные функции и спектральные плотности достаточно хорошо описывают характеристики турбулентности в инерциальном интервале и значительно хуже в крупномасштабном и вязком интервалах. Вопреки этому, простота аналитических выражений данных функций служит веским основанием для широкого использования их в практических расчетах. Чаще всего

значения параметров в формулах для корреляционных функций и спектральных плотностей соответственно равны $L_r = 200 \div 300$ м; $\sigma_w = 2 \div 3$ м · с⁻¹ – для ясной погоды; $\sigma_w = 8 \div 3$ м · с⁻¹ – для кучевых облаков и $\sigma_w = 18 \div 25$ м · с⁻¹ – для грозных условий (рисунки 2, 3).

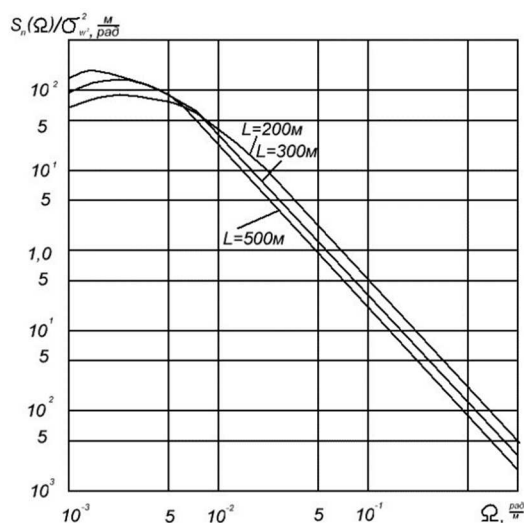


Рисунок 2. – Спектральная плотность тангенциальной составляющей скорости ветра [4]

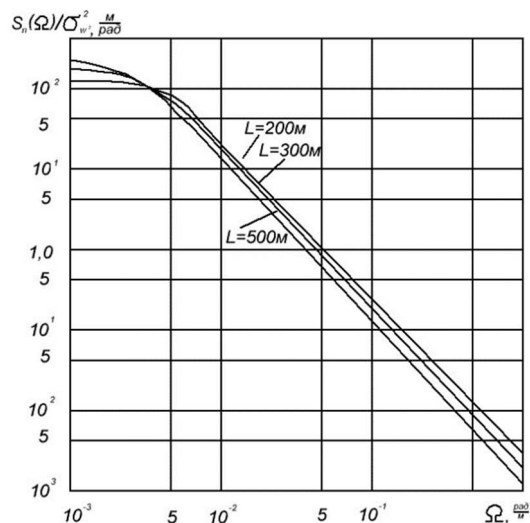


Рисунок 3. – Спектральная плотность нормальной составляющей скорости ветра [4]

Для примера рассмотрим датчик ADIS16495 компании Analog Devices как один из наиболее подходящих для стабилизации.

Нелинейную характеристику электролитического датчика можно приближенно представить в виде кусочно-линейной характеристики типа чистого ограничения. Также в электролитическом датчике имеется существенная нелинейность, обусловленная взаимным влиянием каналов. При наличии угла наклона датчика в другой плоскости β изменяется крутизна характеристики, определяющей зависимость амплитуды выходного напряжения от угла α . Параметры идеализированной кусочно-линейной характеристики датчика, соответствующей наклону оси датчика в плоскости угла β , зависят от угла α . Данные зависимости необходимо учитывать при вычислении гармонических и статических коэффициентов передачи электролитического датчика. В таком случае электролитический датчик можно полагать безынерционным нелинейным звеном типа ограничителя с двумя взаимно связанными каналами.

Электролитические датчики имеют широкое распространение в гироскопических приборах как первичные датчики вертикали места. Простота устройства, малые габариты и высокая чувствительность (менее 1'–2') являются положительными качествами.

Датчик ADIS16495 имеет следующие характеристики [5]:

- 1) трехосевой цифровой гироскоп:
 - варианты диапазонов измерения $\pm 125^\circ/\text{с}$, $\pm 450^\circ/\text{с}$, $\pm 2000^\circ/\text{с}$;
 - погрешность взаимной ориентации осей $\pm 0,05^\circ$;
 - рассогласование ориентации осей относительно корпуса $\pm 0,25^\circ$ (макс.);
 - стабильность смещения в установившемся состоянии $0,8^\circ/\text{час}$;
 - случайный уход по углу $0,09^\circ/\sqrt{\text{час}}$;
- 2) трехосевой цифровой акселерометр:
 - диапазон измерений ± 8 g;
 - стабильность смещения в установившемся состоянии $3,2 \times 10^{-6}$ g;
- 3) выходы показаний по трем осям, приращения угла и приращения скорости;
- 4) заводская калибровка чувствительности, смещения и взаимной ориентации осей:
 - температурный диапазон калибровки от -40°C до $+85^\circ\text{C}$;
- 5) цифровой ввод/вывод: индикатор готовности данных, внешняя тактовая синхронизация;
- 6) варианты синхронизации выборки: внутренняя, внешняя или масштабированная;
- 7) самотестирование внутренних датчиков по запросу;

- 8) однополярное питание от 3,0 В до 3,6 В;
- 9) выдерживает механические ударные нагрузки до 1500 g;
- 10) рабочий температурный диапазон от -40°C до $+105^{\circ}\text{C}$.

Заключение. Таким образом, выполнен анализ углового мерцания или же блуждания центра отражения, который описывается стационарной случайной функцией и дальностью до отражающей поверхности. Рассмотрена величина закона распределения вероятности Рэлея при помощи изученных экспериментальных данных. Исходя из последнего следует, что среднее квадратическое отклонение постоянной составляющей скорости ветра зависит от высоты над земной поверхностью.

Совокупность воздействующих на БЛА процессов, представленных в виде математических моделей, обеспечивает стабилизацию движения БЛА, а также точность координат, фиксируемых устройством съема информации.

Показано три интервала турбулентного движения, выражающегося в хаотическом случайном перемещении частиц воздуха. Крупномасштабная турбулентность имеет асимметричный характер, а инерционная и вязкая турбулентность – изотропный.

Описан переход от одной корреляционной функции к другой корреляционной функции, зависящий от определенных параметров, при помощи соотношения, вытекающего из гипотезы заморозенности поля скоростей. Обоснованы аналитические выражения, служащие основанием для широкого использования в практических расчетах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авиация : энциклопедия / Центр. аэрогидродинам. ин-т им. Н.Е. Жуковского ; редкол.: Г.П. Свищев (гл. ред.) [и др.]. – М. : Науч. изд-во «Большая рос. энцикл.», 1994. – 736 с.
2. Делано, Р. Теория мерцания цели и угловые ошибки при радиолокационном сопровождении / Р. Делано // Вопросы радиолокационной техники. – 1954. – № 1. – С. 108–119.
3. Данн, Дж. Влияние флуктуации эхо-сигнала на работу радиолокационных станций сопровождения / Дж. Данн, Д. Ховард, А. Кинг // Радиотехника и электроника за рубежом. – 1959. – № 6. – С. 97–113.
4. Доброленский, Ю.П. Динамика полета в неспокойной атмосфере / Ю.П. Доброленский. – М. : Машиностроение, 1969. – 260 с.
5. ADIS16495. Инерциальный датчик тактического класса с шестью степенями свободы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.analog.com/ru/products/adis16495.html. – Дата доступа: 21.08.2020.

Поступила 08.10.2020

METHOD FOR EVALUATING THE STABILITY OF OBTAINING INFORMATION FROM THE PARAMETERS OF INSTALLED SENSORS

A. KARLA, V. ZHELEZNYAK

The rapid development and large-scale introduction of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the modern world makes it necessary to solve new problems during flights.

The article discusses the issues of assessing the accuracy of observation parameters that determine the stability of the UAV under various influencing factors that depend not on the aircraft, but on external influences. Literary publications, articles and other sources of information are analyzed. Alternative ways of using resources and their implementation are proposed, which are aimed at determining stability and accuracy. The result of the article is to assess the stability of observation parameters to determine the accuracy and increase the reliability of information.

Keywords: *unmanned aerial vehicles, stability, reliability of information, influencing factors.*