

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Рассмотрены особенности строения и функционирования оптических систем ориентации, работающих в видимом и инфракрасном диапазоне длин волн. Рассмотрены также структурные схемы данных систем. Приведен внешний вид оптических систем ориентации, разработанных на кафедре «Приборы управления» Тульского государственного университета. Оценена точность вычисления углов тангажа и крена видеосистемой ориентации. Приведены результаты полетов беспилотного летательного аппарата в полуавтоматическом режиме с пирометрической системой ориентации в контуре обратной связи.

Введение

Оптические системы ориентации не обладают накапливаемой погрешностью, не восприимчивы к вибрациям и линейным перегрузкам, обладают малыми габаритами, массой и себестоимостью.

Видеосистемы (центрально-проективные и катадиоптрические) используют видимый спектр излучения и могут работать в широком диапазоне погодных условий (при условии различимости линии горизонта).

Пирометрическая система ориентации работает в области инфракрасного излучения (диапазон 6-14 мкм). Этот диапазон интересен тем, что фотоны инфракрасного излучения соответствуют температурам от -65 до +100 °С, характерным для Земли. В этом же диапазоне температур находится область чувствительности многих серийно выпускаемых пирометров. Пирометрическая система ориентации может работать даже ночью, и при любых погодных условиях, при которых может быть зафиксирован градиент температуры по отношению к местной вертикали.

Оптические системы ориентации могут использоваться как самостоятельно для определенных режимов полета БПЛА, так и в составе комплексированных систем.

Пирометрическая система ориентации

Вычисление углов тангажа и крена возможно с помощью обработки показаний шести (четырех) пирометров, расположенных попарно ортогонально вдоль строительных осей летательного аппарата (рис. 1), образующих пировертикаль

Распопов Владимир Яковлевич. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет». Действительный член Академии навигации и управления движением.

Ладонкин Александр Валериевич. Аспирант ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет».

Статья по докладу на XIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

(ПВ) [1]. Применение шести пирометров является более предпочтительным, так как обеспечивается дополнительный измерительный канал.

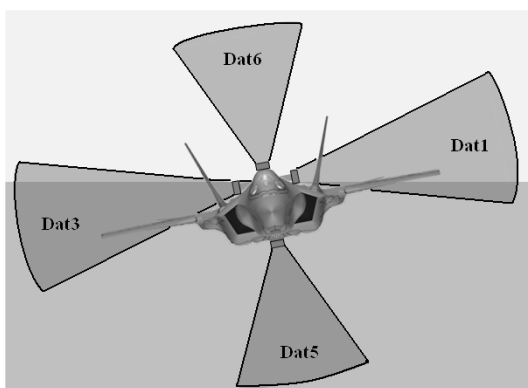


Рис. 1. Расположение пирометров на корпусе БПЛА

Поверхность Земли можно считать матовой; следовательно, сила ее излучения подчиняется закону Ламберта и, принимая пирометром, подчиняется зависимости

$$I_{\alpha} = I \cos(\alpha), \quad (1)$$

где I – сила излучения в направлении перпендикуляра к поверхности Земли; α – угол наклона пирометра.

Нелинейна и реакция ПВ на наклон относительно линии горизонта. Если полный угол обзора пирометров в составе ПВ равен 180 градусам и атмосфера считается прозрачной, согласно (1) имеет место косинусоидальная зависимость значений ΔU_{ϑ} и ΔU_{γ} от угла наклона соответствующей оси ПВ к поверхности Земли.

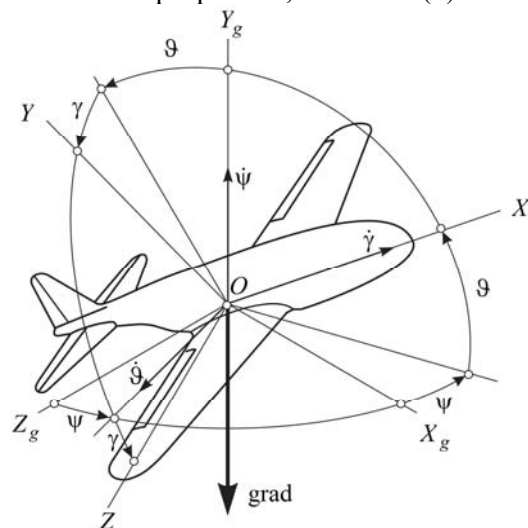


Рис. 2. Положение вектора градиента (grad) относительно связанной и нормальной систем координат

Для вычисления углов крена и тангажа по показаниям шести пирометров введем нормальную систему координат $OX_g Y_g Z_g$ с вершиной, совмещенной с центром масс объекта (рис. 2) и ориентированной географически (ГОСТ 20058-80). Оси связанной системы координат $OXYZ$ относительно нормальной определены углами ψ , ϑ , γ (Эйлера–Крылова).

Рассмотрим ситуацию горизонтального полета (рис. 3, а) для канала крена, когда ось чувствительности датчиков $Dat3$ и $Dat1$ находится в горизонтальной плоскости $OX_g Z_g$

и разность их выходных напряжений ΔU_{γ} равна 0.

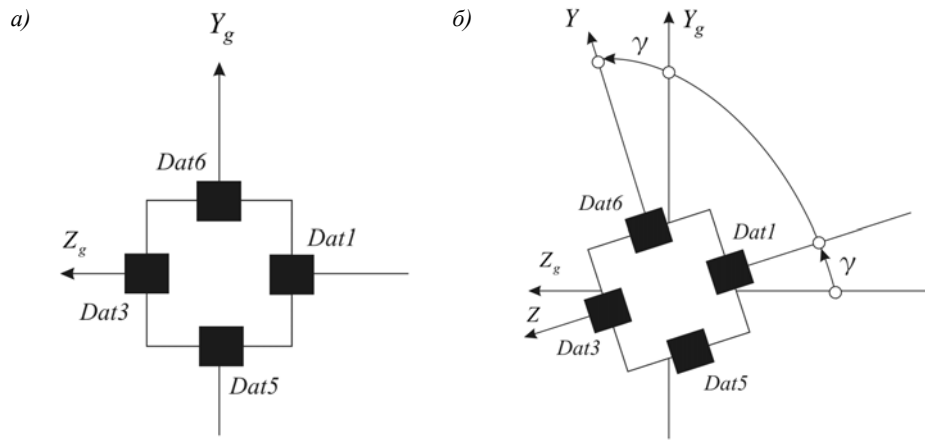


Рис. 3. Положение пирометров: а) горизонтальный полет; б) полет с креном

Направление оси чувствительности датчиков *Dat6* и *Dat5* совпадает с направлением истинной вертикали Y_g , и разность их показаний ΔU_g равна максимальному градиенту, который можно принять равным 1. При вращении ПВ по крену на угол γ (рис. 3, б) сила излучения, воздействующая на пирометры *Dat6* и *Dat5*, уменьшается и ΔU_g изменяется от 1 до 0 по зависимости (1). Одновременно сила излучения, воздействующая на пирометры *Dat3* и *Dat1*, увеличивается и ΔU_γ изменяется от 0 до 1 по синусоидальной зависимости.

Тогда справедливо соотношение

$$\frac{\Delta U_\gamma}{\Delta U_g} = \frac{I_{31}}{I_{65}} = \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma} = \operatorname{tg} \gamma,$$

откуда следуют углы крена и тангажа:

$$\gamma = \arctan \frac{\Delta U_\gamma}{\Delta U_g}, \quad \vartheta = \arctan \frac{\Delta U_\vartheta}{\Delta U_g}. \quad (2)$$

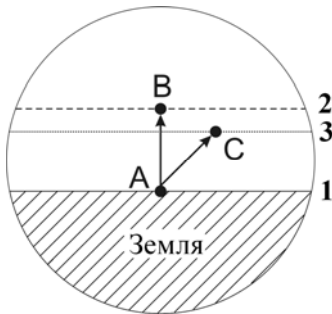


Рис. 4. Область обзора датчика

Недостатком вычислений по формулам (2) является зависимость углов крена и тангажа друг от друга. Пусть БПЛА занимает некоторое положение в пространстве и граница земли и неба (линия горизонта) проходит в поле зрения переднего датчика (*Dat2*) по линии 1 (рис. 4). И пусть на этой линии зафиксирована точка *A*. При наклоне по тангажу при нулевом угле крена точка *A* переместится в точку *B*, а линия горизонта совместится с линией 2. При последовательном наклоне по крену на угол γ и тангажу на угол ϑ точка *A* переместится в точку *C*, а линия 1 совместится с линией 3. Как видно из рисунка, площадь, занимаемая землей и небом, в поле зрения датчика в этих случаях разная, а значит, и показания датчика будут разными. Это приводит к погрешностям вычисления углов крена и тангажа.

Для нейтрализации этого эффекта необходимо применение шести взаимно перпендикулярных пирометров с пересекающимися областями обзора размахом

180°, где четыре датчика расположены в горизонтальной плоскости, а два – в вертикальной, и одновременный учет показаний всех шести датчиков при вычислении углов крена и тангажа. Причем шесть пирометров необходимо рассматривать как три перпендикулярные оси чувствительности ΔU_ϑ , ΔU_γ , ΔU_g , на которые проецируется вертикаль, как вектор «зенит/надир» с максимальным градиентом (grad) (см. (1) и рис. 2).

Расчет углов крена и тангажа при такой организации ПВ может быть произведен следующим образом. Векторы ΔU_ϑ , ΔU_γ , ΔU_g совмещаются с осями связанного трехгранника $OXYZ$ (рис. 2). Тогда модуль вектора градиента при любом положении БПЛА равен

$$grad = \sqrt{\Delta U_\gamma^2 + \Delta U_\vartheta^2 + \Delta U_g^2}.$$

При расположении оси OX вдоль направления движения БПЛА углы крена и тангажа вычисляются по формулам:

$$\gamma = \arctan \frac{\Delta U_\gamma}{\Delta U_g}, \vartheta = \arcsin \frac{\Delta U_\vartheta}{grad}. \quad (3)$$

В случае разворота горизонтальных датчиков ПВ на 45 градусов величины ΔU_ϑ и ΔU_γ в (3) заменяются выражениями:

$$\Delta U_\vartheta' = \frac{\Delta U_\vartheta + \Delta U_\gamma}{\sqrt{2}}, \Delta U_\gamma' = \frac{-\Delta U_\vartheta + \Delta U_\gamma}{\sqrt{2}}. \quad (4)$$

Рабочая характеристика реального пирометра в составе ПВ не является строго косинусоидальной, что обусловлено конструктивными особенностями пирометров, а также ограничениями на применимость закона Ламберта в реальных условиях. Данное расхождение приводит к ошибкам вычисления углов ориентации по формулам (2) и (3).

На рис. 5 приведена нормированная до 100% рабочая характеристика – выходной сигнал $U(\alpha)$ пирометра MLX90614, – снятая экспериментально.

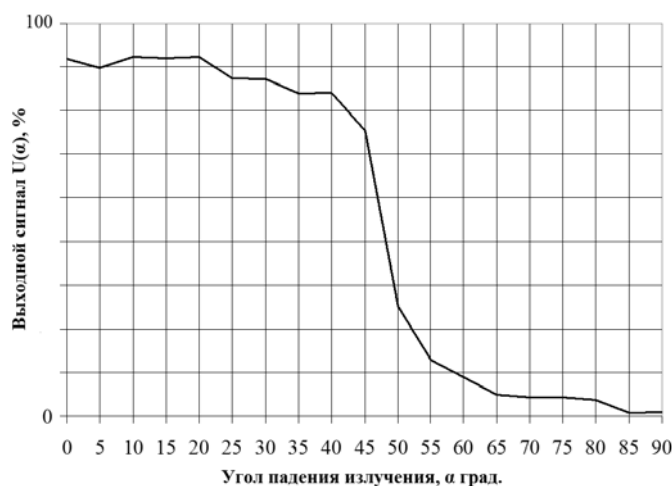


Рис. 5. Рабочая характеристика $U(\alpha)$ пирометра MLX90247

Натурные испытания ПВ показали аналогичную характеристику изменения ΔU_θ , ΔU_γ и ΔU_g при наклоне ПВ по крену и тангажу. На рис. 6 показано изменение ΔU_g при наклоне по крену на угол $-80 \dots 0 \dots +80^\circ$.

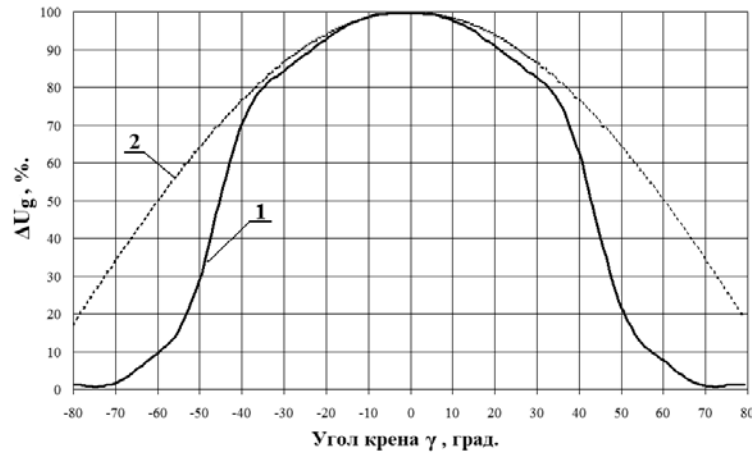


Рис. 6. Рабочая характеристика ПВ по каналу ΔU_g (1), совмещенная с графиком $\cos \gamma$ (2)

На основании экспериментов установлено, что до 40 градусов рабочую характеристику ПВ справедливо считать косинусоидальной по каналу ΔU_g и синусоидальной по каналам ΔU_θ и ΔU_γ .

Модель ПВ (по каналу ΔU_g) может быть записана

$$U(\alpha) = K(\cos \alpha - F(\alpha)) + \delta_u + \Delta\theta + \Delta n, \quad (5)$$

где K – масштабный коэффициент, зависящий от градиента; $F(\alpha)$ – функция, определяющая расхождение $U(\alpha)$ и $K \cos \alpha$; δ_u – инструментальная погрешность; $\Delta\theta$ – погрешность от засветки; Δn – шумовая погрешность; α – угол наклона.

По остальным каналам модель аналогична при условии замены $\cos \alpha$ на $\sin \alpha$.

Инструментальная погрешность (δ_u) пирометра мала (указана в документации производителя и составляет обычно менее 1%) и может не учитываться. Кроме того, так как в вычислении углов ориентации участвуют не сами сигналы пирометров, а разности сигналов противоположных датчиков, δ_u в значительной мере взаимоуничтожаются. Погрешность $\Delta\theta$ обусловлена засветкой от конструктивных элементов БПЛА и при правильном размещении ПВ на БПЛА (с симметричными областями обзора противоположных датчиков) разности показаний датчиков также взаимоуничтожаются. Шумовая погрешность Δn зависит от погодных условий (градиента) и может быть подавлена одним из известных способов фильтрации.

Таким образом, погрешность определения углов ориентации в большей мере зависит от величины расхождения $(\cos \alpha - F(\alpha))$. Отступление от косинусоидальной формы рабочей характеристики ПВ может быть устранено путем составления таблицы поправок для $U(\alpha)$ с определенным шагом и интерполяцией между соседними узлами или аппроксимацией $F(\alpha)$ до подобной функции $F(\alpha)_{аннр}$ и введению ее в модель как противовеса $F(\alpha)$. Выбор решения зависит

от ресурсов вычислителя ПВ в каждом конкретном случае реализации ПВ. В случае избытка ПЗУ предпочтительна таблица поправок, тогда как при избытке вычислительного времени предпочтительно введение противовесной функции $F(\alpha)_{анпр}$. Разработанные ПВ имеют избыток вычислительного времени.

Для получения $F(\alpha)_{анпр}$ по известной $F(\alpha)$ применяется один из математических методов, например метод генетического программирования (ГП). На рис. 7 представлены результаты аппроксимации в графическом виде.

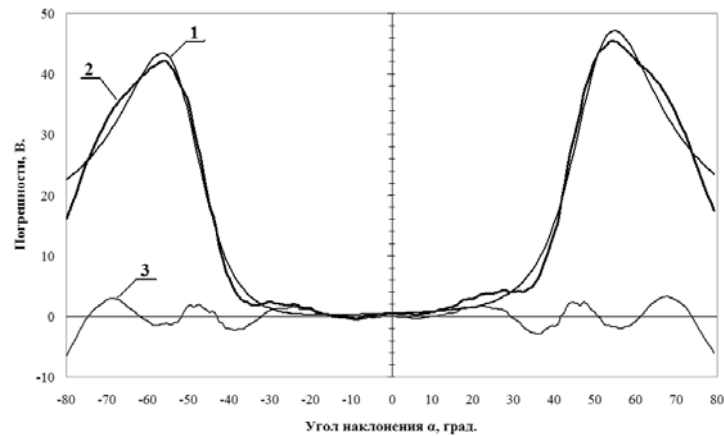


Рис. 7. Функции погрешностей:

$$1) F(\alpha)_{анпр} = F(\alpha) \pm \Delta; 2) F(\alpha)_{анпр} = K(\cos \alpha - U(\alpha)); 3) \Delta = F(\alpha) - F(\alpha)_{анпр}$$

Как видно из графика 3 (рис. 7), расхождение исходного $F(\alpha)$ и аппроксимированного $F(\alpha)_{анпр}$ графиков не превышает 4В, что составляет 4% от полного 100% размаха сигнала и укладывается в заданное отклонение в 5%. Рабочая характеристика 1 (см. рис. 6) теперь может быть приведена к форме косинуса следующим образом:

$$K \cdot U(\alpha)_{анпр} = K(U(\alpha) + F(\alpha)_{анпр}).$$

На рис. 8 показан результат наложения вычислений по данному выражению на график идеального косинуса. Таким образом, очевидна эффективность применения противовесной функции $F(\alpha)_{анпр}$ для устранения погрешностей ПВ.

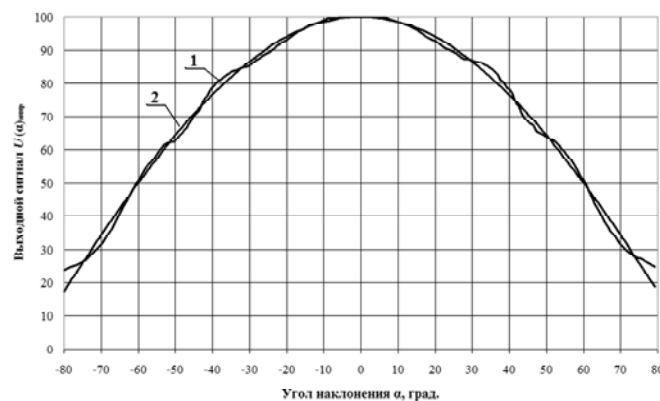


Рис. 8. Рабочая характеристика ПВ $U(\alpha)_{анпр}$ (1), совмещенная с графиком $\cos \alpha$ (2)

Структурная схема статического автопилота (АП) с гировертикалью в цепи обратной связи представлена на рис. 9 [2].

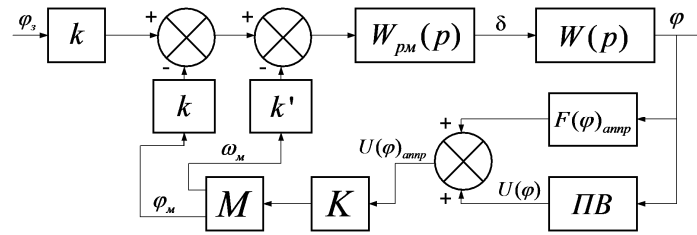


Рис. 9. Структурная схема статического АП с ПВ в цепи обратной связи: $W(p)$ – передаточная функция БПЛА по каналу управления; $W_{рм}(p)$ – передаточная функция привода; δ – отклонение управляющего органа канала управления; φ_z , φ , φ_m – заданный, действующий и вычисленный по ПВ угол ориентации БПЛА по каналу управления; ω_m – вычисленная по ПВ угловая скорость БПЛА по каналу управления; k и k' – коэффициенты АП; M – математический модуль вычисления угла и угловой скорости по показаниям ПВ; K – масштабный коэффициент ПВ; ПВ – математическая модель вида $U(\varphi) = \cos \varphi - F(\varphi)$; $F(\alpha)_{ангр}$ – противовесная функция

На рис. 10 приведен внешний вид ПВ, разработанной на кафедре «Приборы управления» Тульского государственного университета (ТулГУ).

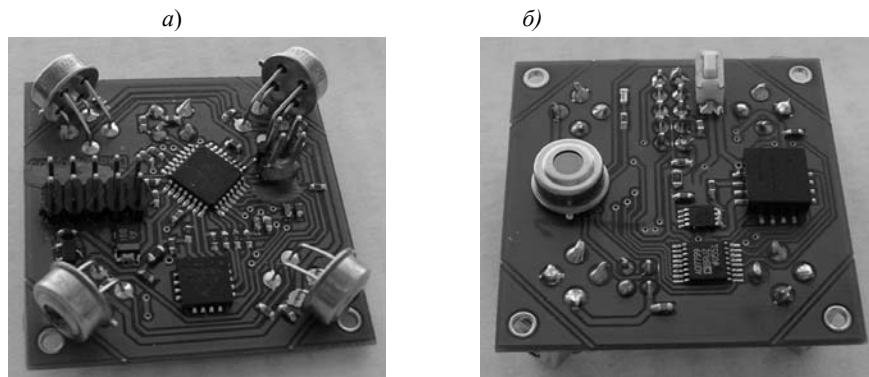


Рис. 10. Внешний вид ПВ: а) вид снизу; б) вид сверху

Катадиоптрическая система ориентации

Способ измерения углов тангажа и крена в видеосистемах ориентации основан на анализе взаиморасположения земли и неба (линии горизонта) в кадре изображения. Для измерения полного диапазона углов такая система должна иметь угол обзора, превышающий 180° , чтобы линия горизонта все время находилась в поле зрения.

Увеличить угол обзора видеокамеры можно с помощью зеркальной оптической системы, получив, таким образом, катадиоптрическую систему. Одна из таких конструкций [3] базируется на применении сферического зеркала (рис. 11).

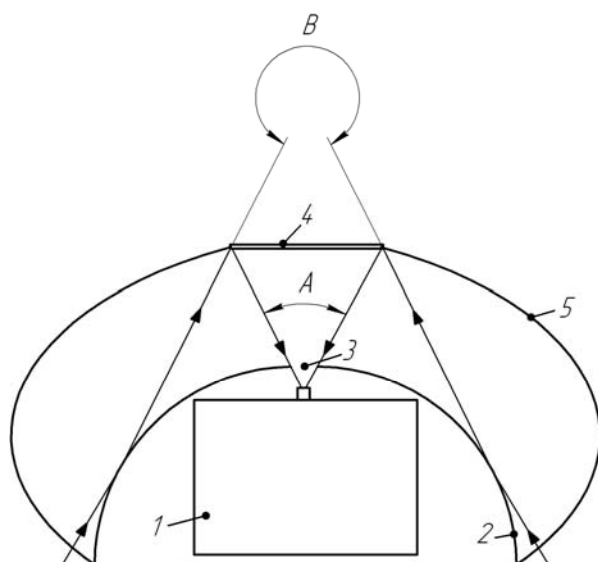


Рис. 11. Схематический вид конструкции катадиоптрической системы (оптическая головка):

1 – видеокамера; 2 – сферическое зеркало; 3 – отверстие; 4 – плоское зеркало; 5 – светопрозрачный корпус

крепиться на корпус БПЛА несколькими способами: в верхней, нижней и носовой частях. Основным требованием, налагаемым при выборе способа крепления оптической головки, является отсутствие различных частей корпуса ЛА в пределах ее угла обзора B .

Примеры получаемых изображений с оптической головки в зависимости от ее установки представлены на рис. 12.

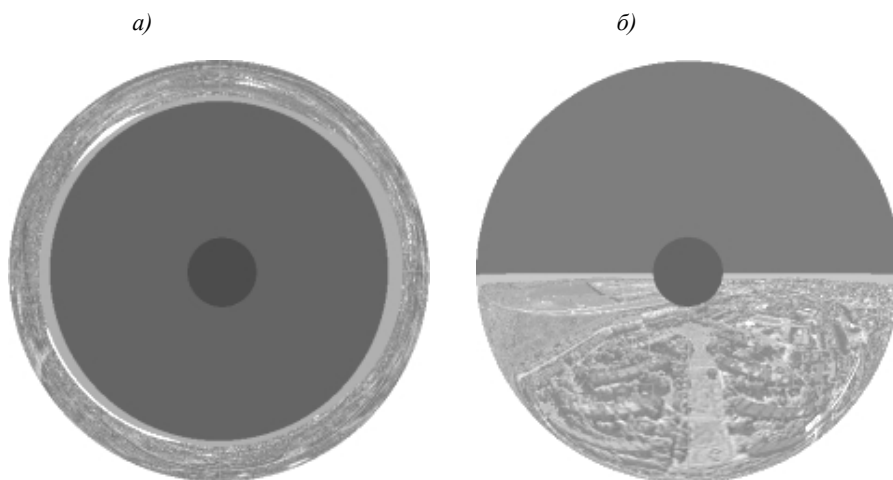


Рис. 12. Примеры изображений, получаемых с оптической головки:

а) ось видеокамеры направлена вертикально вверх; б) ось видеокамеры направлена на горизонт

Использование дополнительной зеркальной оптической системы является причиной больших искажений на изображении. Линия горизонта практически всегда проецируется на матрицу в виде некой эллиптической кривой. Это вы-

нуждает использовать вычислительные алгоритмы отличные от применяемых в центрально-проективных системах.

При определении способа вычисления углов ориентации используются тот факт, что предлагаемая оптическая система является центрально-симметричной, т.е. изображения, получаемые при различных углах крена и тангажа, но при одинаковых углах между нормальной осью БПЛА и местной вертикалью, будут отличаться лишь углом поворота относительно центра кадра. Это обстоятельство поясняется на рис. 13, на котором показаны изображения, получаемые при различных углах крена γ и тангажа ϑ .

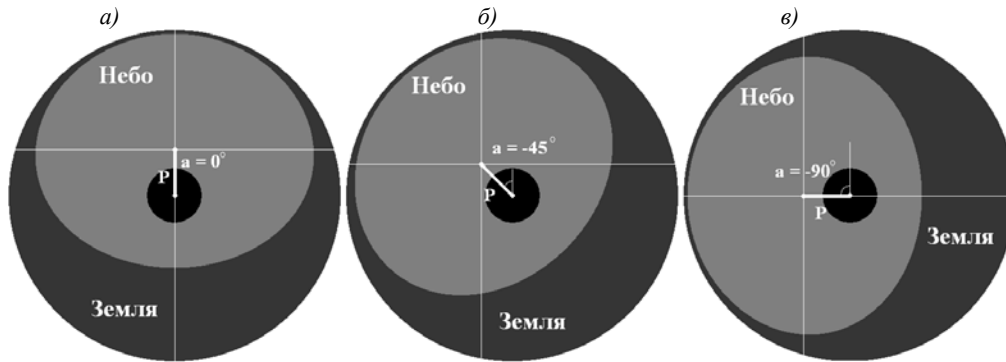


Рис. 13. Примеры изображений:

а) $\vartheta = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$; б) $\vartheta = 31^\circ$, $\gamma = 35^\circ$; в) $\vartheta = 0^\circ$, $\gamma = 45^\circ$

(отрезок P – расстояние от центра изображения до центра яркости неба)

Как видно, все три изображения практически одинаковы и отличаются только углом поворота a . Во всех трех случаях угол между нормальной осью Y БПЛА и местной вертикалью Y_g (угол p) составляет 45° . Длина отрезка P также одинакова во всех трех случаях. Из этого следует, что угол p и длина отрезка P связаны некоторой зависимостью.

Таким образом, углы крена и тангажа могут быть определены на основе углов p и a . Угол a вычисляется как угол наклона отрезка P относительно вертикали кадра. Угол p зависит только от длины отрезка P и может быть вычислен при помощи аппроксимирующих полиномов.

Для случая, когда оптическая ось катадиоптрической системы параллельна нормальной оси Y БПЛА, формулы для вычисления углов тангажа и крена имеют вид:

$$\vartheta = \frac{\cos a}{|\cos a|} \arctan \left(\frac{\sin p}{\sqrt{\cos^2 p + \tan^2 a}} \right),$$

$$\gamma = \frac{\sin a}{|\sin a|} \arccos \left(\frac{\cos p}{\sqrt{\sin^2 p + \cos^2 a \cdot \cos^2 p}} \right).$$

Если оптическая ось видеокамеры параллельна оси X БПЛА, формулы упрощаются:

$$\vartheta = 90 - p, \gamma = -a. \quad (6)$$

Особенностью данного алгоритма является то, что он применим для любой центрально-симметричной системы, включая и обычные центрально-проективные. Небольшие объекты, расположенные на горизонте, практически не влияют на точность вычисления углов ориентации, поскольку принимается во внимание положение всего неба, а не только линии горизонта. Информацию об угловых скоростях можно получить при помощи дифференцирования угловых показаний, либо с помощью дополнительно установленных датчиков угловой скорости.

Катадиоптрическая система ориентации включает в себя оптическую головку и вычислительный блок. Вычислительный блок (ВБ) состоит из оцифровщика видеопотока и нескольких цифровых вычислителей, предназначенных для разделения неба и земли на изображении, поиска центра яркости неба, вычисления и фильтрации углов ориентации (рис. 14).



Рис. 14. Функциональная схема вычислительного блока

Структурная схема катадиоптрической системы ориентации, которая может использоваться для целей моделирования, представлена на рис. 15.

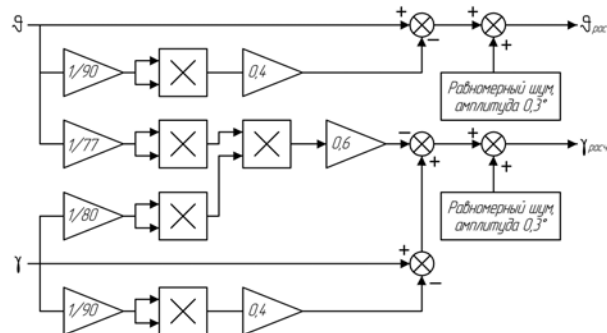


Рис. 15. Эквивалентная структурная схема катадиоптрической системы ориентации

Для составления данной структурной схемы использовались графики ошибок вычисления углов тангажа и крена катадиоптрической системой для диапазона углов $[-90^\circ \dots +90^\circ]$. Графики были получены при помощи программного

№ 3 (78), 2012 73

обеспечения, моделирующего работу данной системы ориентации [4]. Коэффициенты структурной схемы, приведенной на рис. 15, подбирались из условия максимального совпадения ошибок вычисления углов тангажа и крена с ошибками моделирующего программного обеспечения.

На рис. 16 приведен внешний вид вычислительного блока катадиоптрической системы ориентации, разработанного на кафедре «Приборы управления» ТулГУ.

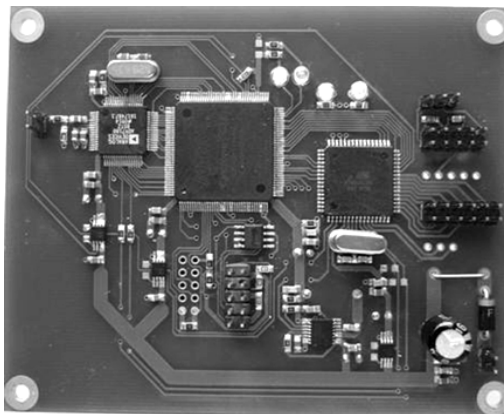


Рис. 16. Вычислительный блок катадиоптрической системы ориентации

Результаты испытаний оптических систем ориентации в контуре автопилота

Испытания ПВ выполнялись на авиамодели EasyCub (рис. 17) в ручном и полуавтоматическом режимах полета (использовался статический пропорционально-дифференциальный автопилот). Оператор с помощью наземной аппаратуры управления задавал необходимые углы тангажа и крена БПЛА (в полуавтоматическом режиме). Автопилот с ПВ в контуре обратной связи производил стабилизацию БПЛА и одновременно записывал показания углов тангажа и крена во флеш-накопитель.



Рис. 17. Авиамодель EasyCub, оборудованная ПВ:
а) внешний вид; б) размещение ПВ на крыле

Результаты испытаний ПВ представлены на рис. 18 [2].

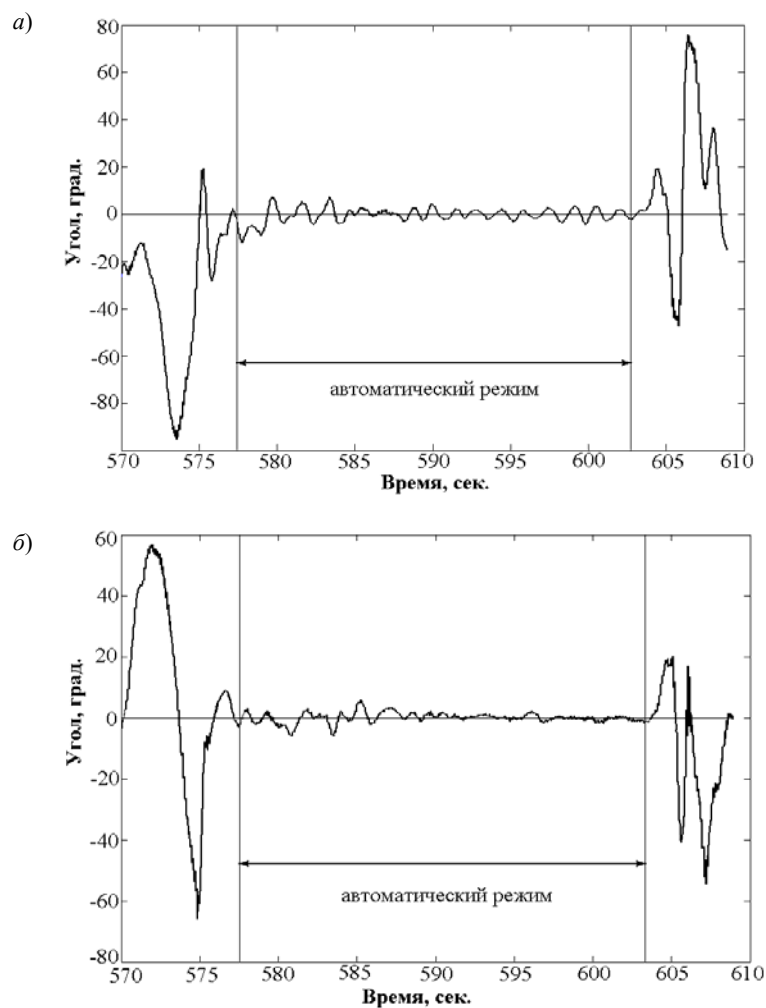


Рис. 18. Результаты стабилизации нулевых углов тангажа (а) и крена (б) с помощью ПВ



Рис. 19. Испытание алгоритмов катадиоптрической системы ориентации:

- а) авиамодель TwinStar II с установленной видеокамерой;
- б) исходное и обработанное изображения с видеокамеры

Оценка эффективности и корректности вычислительных алгоритмов катадиоптрической системы ориентации осуществлялась с помощью бесплатформенной системы ориентации (БСО) и видеокамеры, установленных на авиамодели TwinStar II (рис. 19, а). С помощью БСО происходил полуавтоматический полет и передача углов ориентации БПЛА по радиоканалу на наземную аппаратуру управления. Одновременно с этим на флеш-накопитель записывался видеопоток, к которому применялись алгоритм распознавания неба и формулы (6) (рис. 19, б). Графики углов тангажа и крена, полученные с помощью БСО и алгоритмов катадиоптрической системы, накладывались, и оценивалась их разность.

На рис. 20 представлены графики углов тангажа и крена, полученные с помощью алгоритмов катадиоптрической системы ориентации, в режиме снижения высоты и стабилизации нулевого угла крена. Колебания графиков на первых секундах вызваны порывом встречного ветра. Рассчитанный угол тангажа меньше действительного на величину угла установки видеокамеры (около 10°).

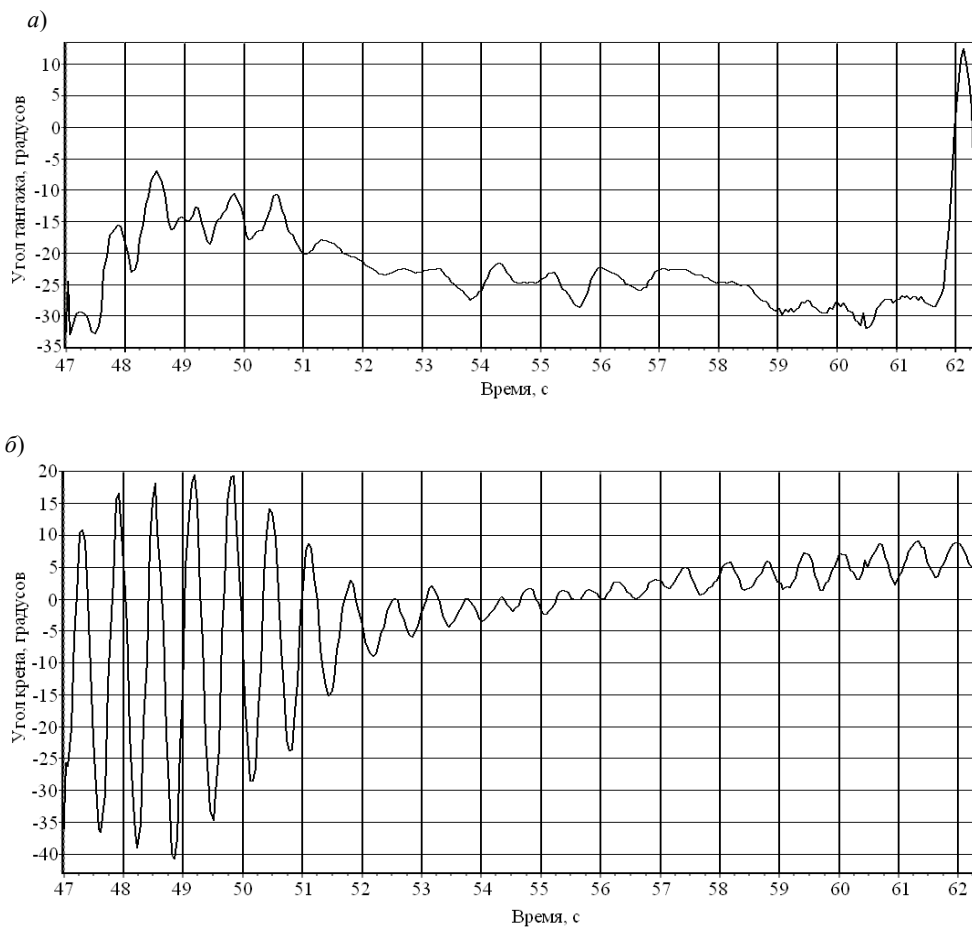


Рис. 20. Результаты вычисления углов тангажа и крена с помощью алгоритмов катадиоптрической системы ориентации в режиме снижения высоты и стабилизации нулевого угла крена:

а) тангаж; б) крен

Анализ полученных телеметрических данных показал, что средняя ошибка стабилизации БПЛА при использовании ПВ составила $2,5^\circ$.

Разница показаний видеосистемы и БСО практически на протяжении всего полета не превышала $1,5^\circ$.

Заключение

На сегодняшний день оптические системы ориентации обладают достаточной точностью для применения в качестве основных и в составе комплексированных систем ориентации БПЛА. Они способны функционировать практически во всех погодных условиях, в которых возможна основная функция БПЛА гражданского назначения – аэрофото- и аэровидеосъемка.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Товкач С.Е.** Автопилот пирометрического типа для БПЛА / С.Е. Товкач, А.В. Ладонкин, В.Я. Распопов // Мир авионики. – 2009. – №5. – С. 29-34.
2. **Товкач С.Е.** Информационно-измерительная система пирометрического типа для малоразмерного беспилотного летательного аппарата (БПЛА): Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.11.16 / ГОУ ВПО «Тульский государственный университет» - Тула: Изд. ТулГУ, 2010. – 191 с.
3. **Ладонкин А.В.** Панорамная видеосистема для определения углов крена и тангажа летательного аппарата // Материалы XI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009 – С.190-195.
4. **Расчетный** и лабораторный практикум по микросистемной авионике: учебное пособие для вузов / Под ред. проф., д-ра техн. наук В.Я. Распопова. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – 211 с.

Abstract. The paper considers the design and performance of optical orientation systems operating in visible and IR ranges. The first group includes vision-based attitude determination systems, the second one, pyrometric systems. The systems' flow diagrams are presented. Overview of optical orientation systems developed by the Control devices department of Tula State University is presented. Roll and pitch errors of vision-based system are estimated. Given are the results of semi-automatic flights of an UAV equipped with pyrometric systems operating in closed-loop mode.

Key words: optical orientation systems, pyrometric vertical, catadioptric systems, flight tests