На правах рукописи

Ладонкин Александр Валериевич

КАТАДИОПТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Специальность 05.11.03 – «Приборы навигации»

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Тула – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор Распопов Владимир Яковлевич				
Официальные оппоненты:	Солдаткин Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Казанский национали технический исследовательский универс им. А.Н. Туполева», заведующий кафе, «Приборы и информационно-измерители системы»				
	Черноморский Александр Исаевич,				
	кандидат техниче	андидат технических наук, доцент,			
	ФГБОУ	ВПО	«Московский		
	авиационный	институт	(национальный		
	исследовательский университет)» (МАИ),				
	профессор кафедры «Автоматизированные				

Ведущая организация:	ФГУП «Санкт-Петербургское ОКБ
	«Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова»,
	г. Санкт-Петербург

комплексы систем ориентации и навигации»

Защита диссертации состоится «____» ____ 2013 года, в _____часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.11 в ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ по адресу: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, дом 4.

Автореферат разослан «____» ____ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.11, кандидат технических наук, доцент

Горбачев Ю.В.

Актуальность работы. В настоящее время малоразмерные беспилотные летательные аппараты (МБПЛА) приобретают все более широкое применение в военных и гражданских целях. При этом наиболее востребованной функцией является аэфрофото- и аэровидеосъемка.

Традиционно на МБПЛА в качестве источника информации о параметрах полета (угловых и линейных координатах) используются системы ориентации и навигации на основе микромеханических датчиков (акселерометров и датчиков угловой скорости), что обусловлено массогабаритными требованиями к бортовой аппаратуре. Из-за невысоких (на сегодняшний день) точностных характеристик разработка таких систем сопряжена с определенными проблемами: латчиков. присутствие накапливаемой во времени ошибки, влияние линейных перегрузок на точность Данные проблемы пытаются устранить помошью И Т.Д. с комплексирования систем с дополнительными источниками информации.

Для решения задачи ориентации применяются и другие методы. Примерами могут служить системы на базе магнитометров, пирометров и других источников первичной информации.

Разработкой подобных систем активно занимаются фирмы такие И организации как «Philips Semiconductors» (Голландия), «Honeywell», *«Space* Electronic», «Crossbow Technology Inc.», «Precision Navigation Inc.», «Advanced Orientation Systems Inc. (AOSI)» (США), УП «Минский НИИ радиоматериалов» (Беларусь), НТЦ «Рисса», ООО «ТеКнол», ФГУП ГНПП «Электроприбор», ФГУП ГНПП «СПЛАВ», ФГУП НКТБ «Феррит», ОАО «Научно-производственный комплекс «ЭЛАРА» имени Г.А.Ильенко», ГОУ ВПО «Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (Россия) и др.

Среди всех систем ориентации выделяются оптические (OCO), которые используют оптическую информацию об окружающем пространстве. Такие системы можно разделить на две группы: функционирующие в инфракрасном и видимом диапазонах длин волн.

К первой группе относятся пирометрические системы, использующие в своем составе бесконтактные измерители температуры (пирометры).

Системы второго типа используют, как правило, обычные матричные приемники оптического излучения - видеокамеры. Принцип работы таких систем основан на вычислении углов тангажа и крена по положению линии горизонта в кадре изображения, или по расположению в кадре нескольких опорных точек с известными координатами.

Оптические системы имеют, как правило, простую конструкцию (видеокамера и цифровой вычислитель) и обеспечивают дополнительный функционал в виде аэровидеосъемки. К недостаткам таких систем относятся ограниченный диапазон рабочих углов тангажа и крена (из-за ограниченного угла обзора видеокамер), зависимость ошибки измерения от освещенности, погодных условий, рельефа и т.д.

В связи с этим актуальной является разработка ОСО, обладающей повышенными точностными характеристиками и способной функционировать в более широком диапазоне различных эксплуатационных условий. Существенными являются задачи расширения диапазона рабочих углов тангажа и крена, а также снижения влияния на точность измерения освещенности, погодных условий и рельефа.

Цели и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является повышение точности и диапазона эксплуатационных условий ОСО.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка способа увеличения угла обзора видеокамеры до значений, превышающих 180°;
- разработка алгоритма вычисления углов тангажа и крена повышенной точности;
- разработка алгоритма быстрой кластеризации неба и земли на изображениях;
- оценка и учет влияния различных факторов на точность оптических систем ориентации;

Объектом исследования является ОСО, состоящая из видеокамеры и цифрового вычислителя. Вычисление углов тангажа и крена происходит на основе анализа взаиморасположения земли и неба в кадре изображения. Угол курса вычисляется на основе показаний магнитометрических датчиков.

Предметом исследования являются математические модели, алгоритмы работы и структуры, а также новые способы построения ОСО на базе видеокамеры, позволяющие повысить её точность, расширить углы обзора и улучшить эксплуатационные характеристики.

Методы исследований: в работе использовался комплексный метод исследования, который характеризуется применением теории случайных процессов, теории геометрической оптики, теории цифровой обработки сигналов, математического моделирования с применением ЭВМ, физического моделирования в лабораторных и полевых условиях.

Научная новизна:

1) Разработан способ увеличения угла обзора видеокамеры до значений, превышающих 180°, отличающийся от известных применением дополнительной зеркальной оптической системы, состоящей из плоского и сферического зеркал. При этом обеспечиваются повышение качества изображения, увеличение диапазона рабочих углов тангажа и крена до значений [-90°...+90°] и [-180°...+180°] соответственно, возможность простой регулировки результирующего угла обзора.

2) Разработан алгоритм вычисления углов тангажа и крена, оценивающий взаимное расположение неба и земли в кадре изображения, а не только линии горизонта, что позволяет уменьшить погрешность ОСО.

3) Предложен алгоритм кластеризации неба и земли на изображении, основанный на применении пороговой фильтрации с динамически изменяющимся

пороговым значением. Алгоритм не требует больших вычислительных затрат, что снижает результирующую задержку ОСО.

4) Разработана математическая модель ОСО на базе видеокамеры с увеличенным углом обзора, отличающаяся от существующих систем более точным определением параметров ориентации летательного аппарата, а также возможностью функционирования в более широком диапазоне эксплуатационных условий.

Практическая ценность работы:

1) Построена математическая модель ОСО на базе видеокамеры с дополнительной зеркальной оптической системой.

2) Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее проводить имитационное моделирование ОСО.

3) Исследовано влияние различных факторов (высота полета, рельеф, наличие высотных объектов, освещенность, погодные условия, шум приемника оптического излучения) на погрешность ОСО. Приведены методы для устранения влияния высоты полета.

4) Проведены лабораторные и полевые испытания разработанных опытных образцов катадиоптрической системы ориентации.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Тульский университет» качестве лабораторных работ государственный В по курсу «Микросистемная авионика», что отражено в акте внедрения результатов диссертационной работы. Результаты исследования реализованы в программных продуктах «Катадиоптрическая система ориентации (КСО)» и «Программный комплекс автоматического сопровождения цели (ПК-АСЦ)» на которые получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Результаты исследования использованы при выполнении гранта РФФИ № 09-08-00891 «Концепция построения и проектирования авионики малоразмерных беспилотных летательных аппаратов».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы, докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях: XI Конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», март 2009 г., С.–Петербург; Международной научно-практической Г. конференции Ι «Интеллектуальные машины», апрель 2009 г., г. Москва, МГТУ «МАМИ»; XVIII Международном научно-техническом семинаре «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации», сентябрь 2009 г. Крым, г. Алушта (доклад отмечен дипломом I степени), I Тульском инновационном конвенте, октябрь 2009 (работе присуждено второе место), VI молодежной научнопрактической конференции Тульского государственного университета «Молодежные инновации», 2012. По результатам XI Конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» (март 2009 г., г. С.-Петербург) автор стал победителем конкурса «УМНИК-2009», что позволило выполнять в период с 2009

по 2011 гг. работы по договору №У-2009-2/2 на тему «Разработка панорамной видеосистемы для определения углов тангажа и крена беспилотного летательного аппарата». В период с 2010 и по настоящее время основные результаты диссертационной работы демонстрировались в международных форумах-выставках «Беспилотные многоцелевые комплексы»-«UVS-TECH».

Содержание диссертационной работы отражено в 10 печатных работах, в том числе в 7 периодических изданиях, рекомендованных ВАК.

Достоверность теоретических положений подтверждена математическим моделированием и экспериментальными исследованиями в лабораторных и полевых условиях на опытных образцах катадиоптрической системы ориентации.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и трех приложений. Основная часть изложена на 136 страницах машинописного текста, содержит 71 рисунок, 6 таблиц. Список используемой литературы содержит 102 наименования.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

повышения угла обзора видеокамеры, 1) Способ основанный на применении дополнительной зеркальной системы с возможностью регулирования обеспечивает результирующего угла обзора, что расширение диапазона эксплуатационных условий.

2) Алгоритм вычисления параметров ориентации БПЛА с помощью ОСО на базе видеокамеры, отличающийся от известных оценкой взаимного расположения неба и земли в кадре изображения, а не только линии горизонта, что приводит к снижению погрешности ОСО, особенно при больших углах тангажа и крена. Отличием данного алгоритма также является универсальность – способность применения к любым типам оптических систем, обладающих круговой симметрией.

3) Алгоритм кластеризации земли и неба на изображении использующий пороговую фильтрацию с динамически изменяющимся пороговым значением.

4) Математическая модель ОСО, позволяющая проводить имитационное моделирование катадиоптрической системы ориентации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении рассмотрены актуальность и практическая ценность работы, сформулированы цель работы, задачи и методы исследований, научная новизна, результаты апробации и внедрения данной работы, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор малоразмерных беспилотных летательных аппаратов, обобщены и систематизированы основные сведения о применяемых на них отечественных и зарубежных системах ориентации различных типов.

Проведен анализ характеристик существующих типов ОСО, показаны их достоинства и недостатки. Показана актуальность разработки ОСО повышенной точности и с расширенным диапазоном эксплуатационных условий.

Во второй главе рассмотрены три направления повышении точности ОСО: за счет способов увеличения угла обзора видеокамеры, за счет применения вычислительных алгоритмов на основе оценки взаимного расположения неба и земли, а также за счет применения алгоритмов кластеризации неба и земли повышенной точности.

Для увеличения угла обзора предложено дополнить видеокамеру зеркальной оптической системой (рис. 1), получив, таким образом, оптическую головку. Оптическая головка состоит из видеокамеры 1, расположенной внутри зеркальной полусферы 2, имеющей небольшое отверстие 3. Над этим отверстием расположено круглое плоское зеркало 4, закрепленное на светопрозрачном корпусе 5.

Лучи света сначала проходят через последовательно корпус 5, затем отражаются от зеркал 2 и 4, и через отверстие 3 попадают объектив в видеокамеры Таким образом, 1. начальный угол А расширяется до угла В.

Особенностью данной конструкции является присутствие в кадре изображения так называемых «мертвых» зон: участков матрицы, на которые свет попал в результате многократного отражения от плоского и сферического зеркал (возникает в центре изображения) или минуя плоское зеркало (возникают в углах изображения).



Рис. 1. Схематический вид конструкции оптической головки: 1 – видеокамера;

2 – полусферическое зеркало;

3 – отверстие;

4 – плоское зеркало;

5 – светопрозрачный корпус

Из-за наличия в оптической головке зеркальных и преломляющих (объектив видеокамеры) элементов, такая система называется зеркально-линзовой, или катадиоптрической.

Входными данными для алгоритма вычисления углов тангажа и крена является матрица, элементы которой представляют собой пиксели изображения, на котором земля и небо уже распознаны. На рис. 2 приведены примеры таких изображений, полученных при различных углах крена и тангажа, при условии, что оптическая головка установлена в верхней части БПЛА и ось видеокамеры направлена вдоль оси *Y* БПЛА. Черным цветом обозначены области, не несущие полезной информации («мертвые зоны»).



Рис. 2. Примеры изображений, получаемых с оптической головки при различных значениях углов тангажа θ и крена γ: a) θ=45°, γ=0°; б) θ=31°, γ=35°; в) θ=0°, γ=45°

Как видно, все три изображения практически одинаковы, и отличаются только углом поворота a. Отрезком P обозначено расстояние от центра изображения до центра яркости неба. Во всех трех случаях угол между осью Y БПЛА и местной вертикалью (обозначим его как угол p) составлял 45°.

Углы крена и тангажа могут быть определены на основе углов p и a. Угол a может быть легко вычислен на основании координат центра яркости неба и центра изображения. Угол p может быть вычислен на основании длины отрезка P. Данная зависимость p=f(P) определяется параметрами оптической головки и высотой полета, и может быть получена методом последовательного увеличения угла тангажа оптической головки при нулевом угле крена с одновременным расчетом координат центра яркости неба и, соответственно, длины отрезка P. При этом расчет ведется для какой-либо конкретной высоты полета. Пример графика данной зависимости приведен на рис. 3.



Рис. 3. Графическая зависимость угла *р* от расстояния *Р* (пример)

Для реализации зависимости p=f(P) в цифровом вычислителе, могут использоваться различные методы: табличный, табличный с экстраполяцией (линейной, билинейной, квадратичной и т.д.), полиномиальная аппроксимация и т.д. С целью экономии оперативной памяти вычислителя, целесообразно использовать полиномиальную аппроксимацию. При этом для уменьшения степени аппроксимирующих полиномов, можно разбить зависимость p=f(P) на два участка. Первый участок аппроксимируется полиномом 3-го порядка, второй участок – полиномом 4-го порядка. При этом ошибка вычисления углов тангажа и крена не превосходит 0,2°.

Для описания алгоритма вычисления углов тангажа и крена введем некоторые обозначения: *CImageX*, *CImageY* – координаты центра изображения;

Cx, Cy -координаты центра яркости неба; gCx, gCy -координаты центра яркости земли; Pixel -текущий исследуемый пиксель; x, y -координаты текущего пикселя;

PixelsSky – множество всех пикселей изображения, распознанных как небо;

PixelsGnd – множество всех пикселей изображения, распознанных как земля;

NPixelsSky – количество пикселей, распознанных как небо; *NPixelsGnd* – количество пикселей, распознанных как земля.

1) Определение центра яркости неба на изображении.

Координаты центра яркости неба определяются по следующим формулам:

$$Cx = \frac{\sum x}{NPixelsSky}, Pixel \in PixelSky; Cy = \frac{\sum y}{NPixelsSky}, Pixel \in PixelSky;$$
$$gCx = \frac{\sum x}{NPixelsGnd}, Pixel \in PixelGnd; gCy = \frac{\sum y}{NPixelsGnd}, Pixel \in PixelGnd.$$

2) Вычисление угла а и расстояния Р.

При *NPixelsSky* >= *NPixelsGnd*:

$$a = \arctan\left(\frac{Cx - CImageX}{Cy - CImageY}\right),$$
$$P = \sqrt{(Cx - CImageX)^2 + (Cy - CImageY)^2}.$$

При *NPixelsSky < NPixelsGnd*:

$$a = \arctan\left(\frac{gCx - CImageX}{gCy - CImageY}\right),$$
$$P = \sqrt{\left(gCx - CImageX\right)^2 + \left(gCy - CImageY\right)^2}.$$

3) Вычисление угла р.

$$p = f(P).$$

9

4) Вычисление углов крена и тангажа.

Для случая, когда ось видеокамеры направлена вдоль оси *Y* летательного аппарата, зависимости имеют вид:

при *NPixelsSky* >= *NPixelsGnd*

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

при *NPixelsSky < NPixelsGnd*

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

Если ось видеокамеры направлена параллельно оси *X* летательного аппарата, зависимости имеют другой вид:

при NPixelsSky >= NPixelsGnd:

$$\vartheta = \frac{\pi}{2} - p,$$

 $\gamma = -a;$
при NPixelsSky < NPixelsGnd:
 $\vartheta = p - \frac{\pi}{2},$
 $\gamma = -a - \pi.$

Алгоритм кластеризации неба и земли основан на пороговой фильтрации с динамически изменяющимся пороговым значением *Bp*. Причем вычисление данного значения происходит на основании гистограммы синей компоненты *B* пикселей изображения (рис. 4). Если значение компоненты *B* пикселя превышает значение *Bp* то его воспринимают как «небо», иначе – как «землю».

Алгоритм поиска порогового значения Вр заключается в следующем:

- 1. Усреднить график гистограммы (рис. 5), приняв допущение, что компонента яркости *В* пикселей принимает значения с некоторым шагом *Bstep*, большим 1 (например, *Bstep* = 5). Это необходимо для снижения степени зашумленности гистограммы.
- 2. При движении по графику от точки В=0 вправо находим первую точку, для

которой выполняется условие Y[B+1] < Y[B], где Y[B] – количество пикселей с яркостью *B*. Обозначим эту точку как *B1*.

- 3. При движении по графику от точки *B*=255 влево находим первую точку, для которой выполняется условие *Y*[*B*-1]<*Y*[*B*]. Обозначим эту точку как *B*2.
- 4. Выполняем поиск абсолютного минимума графика в диапазоне яркостей [*B1*, *B2*]. Данный минимум и будет искомым пороговым значением *Bp*.



Приведенный алгоритм кластеризации на основе пороговой фильтрации с динамически определяемым пороговым значением является простым и не требует больших вычислительных затрат.

Для вычисления угла курса в ОСО вводятся датчики магнитного поля земли (магнитометры, рис. 6) и информация о параметрах магнитного поля в текущей точке полета (углы магнитного склонения *D* и наклонения *I*). Магнитометры располагаются вдоль осей связанной системы координата БПЛА. Углы *D* и *I* могут быть получены с помощью модуля спутниковой навигационной системы и карты магнитных склонений и наклонений. Также данные углы могут быть известны заранее для предполагаемой местности полета и не изменяться сколь-нибудь значительно.



Рис. 6. Структурная схема системы для вычисления угла курса

Выражения для расчета угла курса имеют вид:

$$\Psi_{M} = \begin{cases} \arctan\left(\frac{\overline{Z} \cdot \cos \gamma + \overline{Y} \cdot \sin \gamma}{X \cdot \cos \vartheta + Z \cdot \sin \gamma \cdot \sin \vartheta - Y \cdot \cos \gamma \cdot \sin \vartheta}\right), \\ npu \quad \Psi_{M} \in (0;45^{\circ}) \cup (135^{\circ};225^{\circ}) \cup (315;360^{\circ}), \\ \arccos\left(\frac{X \cdot \cos \vartheta + Z \cdot \sin \gamma \cdot \sin \vartheta - Y \cdot \cos \gamma \cdot \sin \vartheta}{\cos I}\right), \\ npu \quad \Psi_{M} \in (45^{\circ};135^{\circ}) \cup (225^{\circ};315^{\circ}). \end{cases}$$

Оценка погрешности вычисления угла курса при погрешностях углов тангажа и крена $\approx (1^{\circ} \dots 2^{\circ})$ составляет 1°-3°.

Третья глава посвящена исследованию предложенных методов повышения точности ОСО и диапазона ее эксплуатационных условий.

Для создания математической модели оптической головки необходимо составить модель формирования изображения видеокамерой, и затем последовательно рассмотреть влияние всех компонентов зеркальной оптической системы.

В наиболее простом случае видеокамера состоит из двух компонентов: объектива и фотоприёмной матрицы. Матрица характеризуется горизонтальным и вертикальным разрешением (количеством пикселей) width и height cootветственно. Диагональный размер матрицы в пикселях Length вычисляется как *Length* = $\sqrt{Height^2 + Width^2}$. Объектив характеризуется углом обзора и фокусным расстоянием. Для всей видеокамеры также указывается угол обзора ω . Как правило, указывается наибольший угол обзора (диагональный или горизонтальный, которые рассчитываются исходя из физических размеров матрицы и параметров объектива). Нас интересует минимальный угол обзора (вертикальный), так как расчет математической модели с учетом именно этого угла обеспечит полное попадание оптического потока в кадр изображения. Таким образом, под углом обзора видеокамеры обудем подразумевать вертикальный угол.

При прохождении света через объектив, лучи фокусируются на фотоприемной матрице. Согласно приближениям геометрической оптики, каждый пиксель изображения соответствует одному лучу, который можно описать двумя углами: углом α между прямой, соединяющей пиксель с центром изображения, и вертикальной осью изображения, и углом β между лучом и оптической осью видеокамеры (рис. 7).



Рис. 7. К вопросу описания пикселей изображения

Угол а измеряется по направлению часовой стрелки и его значения лежат в диапазоне [0° ... 360°). Угол β может принимать значения [0 ... $\omega/2$]. Ниже приведены формулы вычисления данных углов для пикселя с координатами (x, y). Координаты пикселя отсчитываются относительно левого верхнего угла кадра.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x - Cx}{Cy - y}\right),\tag{1}$$

$$\beta = \arctan\left(\tan(\omega)\frac{2\sqrt{(x-Cx)^2 + (Cy-y)^2}}{Length}\right)$$
(2)

Для создания математической модели оптической головки использовалась эквивалентная конструкция (рис. 8).



Как видно из рис. 8б

$$\beta 2 = n1 + n3. \tag{3}$$

Угол *п1* может быть вычислен исходя из теоремы о сумме углов треугольника:

$$nl = \pi - n2 - \beta l. \tag{4}$$

Угол *n*2 вычисляется исходя из теоремы косинусов и того факта, что он не может быть острым:

$$\frac{R}{\sin\beta 1} = \frac{h12 + R}{\sin n2},$$

$$n2 = \pi - \arcsin\left(\frac{(h12 + R)\sin\beta 1}{R}\right).$$
(5)

Подставляя выражение (5) в формулу (4) получим

$$n1 = \arcsin\left(\frac{(h12 + R)\sin\beta 1}{R}\right) - \beta 1.$$
(6)

Угол *и*3 вычисляется по формуле

$$n3 = \pi - n2 = \arcsin\left(\frac{(h12 + R)\sin\beta 1}{R}\right).$$
(7)

Таким образом, подставляя выражения (6, 7) в формулу (3) получим зависимость

$$\beta 2 = 2 \arcsin\left(\frac{(h12 + R)\sin\beta 1}{R}\right) - \beta 1.$$
(8)

Зависимости (1, 2, 8) позволяют полностью моделировать изображения, получаемые с оптической головки. Так как рассматриваемая оптическая система обладает осевой симметрией, то изменению подвергается только угол β, значение угла α остается неизменным и вычисляется по формуле (1).

Результирующий угол обзора оптической головки может быть вычислен по формуле

$$\omega = 4 \arcsin\left(\frac{(h12 + R)\sin\frac{\omega l}{2}}{R}\right) - \omega l,$$

где $\omega 1$ – угол обзора видеокамеры.

Теоретический максимальный угол ωmax для оптической головки наблюдается, когда угол $n2 = 90^{\circ}$ (рис. 8б). При этом

$$\omega max = 2\pi - \omega 1.$$

14

Угловой размер центральной мертвой зоны вычисляется с помощью подстановки выражений (6, 8) в формулу

$$\frac{\frac{b}{2} - R\sin n1}{h2 + R(1 - \cos n1)} = \tan \beta 2,$$

где b – диаметр плоского зеркала. При этом в качестве угла β 1 в (8) выступает угловой размер центральной мертвой зоны.

Полученные значения можно использовать для трассировки лучей с целью визуализации получаемых с помощью оптической головки кадров изображения. Для этого надо сопоставить каждому лучу с координатами (α , β) единичный вектор, найти его проекции *x*, *y*, *z* на оси нормальной системы координат и «повернуть» его на текущие углы тангажа и крена БПЛА. После данного преобразования надо лишь узнать, куда «указывает» этот луч: на землю, или на небо. Для этого можно воспользоваться следующим условием:

$$\arctan\left(\frac{y}{\sqrt{x^2+z^2}}\right) \ge -\xi,$$
 (9)

где ξ - граничный угол, под которым видна линия горизонта. Угол ξ зависит от высоты полета *H* и вычисляется по следующей формуле:

$$\xi = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{r}{r+H}\right)$$
, где r – радиус Земли.

Если условие (9) выполняется, то данный луч указывает на небо. Иначе – на землю.

На базе данных математических зависимостей было разработано специализированное программное обеспечение (рис. 9).



Рис. 9. Внешний вид окна приложения «Катадиоптрическая система ориентации»

Окно приложения можно разделить на три части:

- 1. Область отображения кадров, формируемых оптической головкой. Данная область имеет размеры 640х480 пикселей. Черным цветом отображаются «мертвые» зоны, коричневым земля, синим небо. Белым перекрестьем отображается центр яркости неба.
- 2. Область управляющих элементов и параметров оптической головки. Данная область содержит элементы для настройки параметров оптической головки, высоты полета, текущих углов тангажа и крена, а также два управляющих элемента. При нажатии на кнопку «Смоделировать изображение» происходит расчет изображения и отображается результат. Кнопка «Получить данные для графика» предназначена для получения таблицы значений зависимости p=f(P).
- 3. Область тестирования алгоритма вычисления углов тангажа и крена. В данной области содержатся элементы для настройки коэффициентов аппроксимирующих полиномов и граничного значения, разбивающего зависимость p=f(P) на две части. Так же в данной области находятся элементы отображения рассчитанных углов тангажа и крена.

С помощью данного программного обеспечения проводилась оценка погрешности вычисления углов тангажа и крена.

Так же проводилась оценка влияния различных факторов (высота полета, рельеф, освещенность, шумы видеокамеры, погодные условия) на погрешность вычисления углов тангажа и крена.

Оценка влияния высоты полета H на точность вычисления углов тангажа и крена производилась вследствие того, что угловые размеры земли и неба отличаются на разных высотах (см. (9)), и зависимость p=f(P) (рис. 3) рассчитывается для какой-либо конкретной высоты. В таблице 1 приведены погрешности вычисления углов тангажа и крена для высот 10 м и 1000 м при расчете зависимости p=f(P) для высоты 250 м.

Таблица 1

		5	1 / 1		
	θ=0°	ુ=20°	Գ=40°	θ=60°	θ=80°
	γ=0°	γ=20°	γ=40°	γ=60°	γ=80°
<i>H</i> =10 м	$\Delta \vartheta = 0^{\circ}$	Δθ=0,15°	∆9=0,3°	$\Delta \vartheta = 0,4^{\circ}$	$\Delta \vartheta = 0,15^{\circ}$
	$\Delta \gamma = 0^{\circ}$	Δγ=0,15°	Δγ=0,4°	Δγ=0,9°	Δγ=5,15°
<i>H</i> =1000 м	$\Delta \vartheta = 0^{\circ}$	$\Delta \vartheta = -0,15^{\circ}$	$\Delta \vartheta = -0,2^{\circ}$	$\Delta \vartheta = -0,5^{\circ}$	$\Delta \vartheta = -0,5^{\circ}$
	$\Delta \gamma = 0^{\circ}$	Δγ=-0,15°	Δγ = -0,4°	Δγ=-1°	$\Delta \gamma = -5^{\circ}$

Как видно, ошибка возрастает с ростом значений углов тангажа и крена и начинает значительно проявляется для углов больших 60°. Снизить данную ошибку можно несколькими способами:

1. Без привлечения информации о текущей высоте полета. Если задаться минимальной *Hmin* и максимальной *Hmax* высотами полета БПЛА, то существует такое оптимальное значение высоты *Honm* для расчета

зависимости p=f(P), для которого ошибка вычисления углов тангажа и крена во всем диапазоне высот [*Hmin*, *Hmax*] будет минимальна. В результате исследований получена следующая зависимость:

Honm \approx *Hmin* + (*Hmax-Hmin*)/4.

2. С привлечением информации о текущей высоте полета. Если заранее рассчитать зависимость p=f(P) для набора высот от *Hmin* до *Hmax* с какимлибо шагом, то в процессе полета можно выбирать наиболее подходящее решение, основываясь на информация о текущей высоте *H*. Точность данного метода зависит от выбранного шага изменения высоты. Например, если шаг составит 100 м, то ошибка вычисления углов крена и тангажа при $9 = \gamma = 80^{\circ}$ не превысит 1,5°. Можно также отказаться от расчета множества зависимостей и рассчитать лишь одну, для высоты H = 0 м. Но для этого случая потребуется корректировать значение угла *p* по формуле $p_{\rm H} = p(1+H/K_{\rm H})$, где $p_{\rm H}$ – новое значение угла р, К_н – коэффициент, зависящий от параметров оптической Для параметров, представленных на рис. 9. коэффициент головки. К_н≈25000 м. Использование такого подхода снижает ошибку вычисления углов тангажа и крена до 1° при $9 = \gamma = 80^\circ$ и H = 2500 м.

Возвышающиеся над БПЛА объекты увеличивают погрешность вычисления углов тангажа и крена. Ошибка тем больше, чем больше угловые размеры объекта в кадре изображения. Единичные объекты с небольшими горизонтальными угловыми размерами влияют незначительно. Степень их влияния зависит от вертикального углового размера. Наибольшую ошибку оказывают протяженные объекты – объекты, с большим горизонтальным угловым размером. Худшим случаем является объект с горизонтальным угловым размером $\alpha_{\rm H}=180^{\circ}$. Ошибка вычисления углов тангажа и крена составит в этом случае $\Delta = \alpha_{\rm V}/2$, где $\alpha_{\rm V}$ – вертикальный угловой размер объекта.

Оценка влияния различных факторов окружающей среды (шум видеокамеры, освещенность, погодные условия) проводилась с помощью разработанного специализированного программного обеспечения. Процедура оценки заключалась в следующем. Из входного видеопотока выбиралось несколько кадров изображения, на которых присутствовала линия горизонта. При этом яркость (освещенность), контраст (погодные условия: туман, смог) и шум видеокамеры имели значения по умолчанию (100%, 100%, 0 ед.) соответственно. Вычисленные значения углов тангажа и крена, принимались как опорные. Затем изображение изменялось путем настройки яркости, контраста и шума видеокамеры. Разница между вновь вычисленными углами тангажа и крена и опорными принималась как ошибка, возникающая из-за ошибок кластеризации неба и земли.

В результате исследований выявлено, что по отдельности снижение яркости изображения до 20% от исходного, контраста до 30%, и увеличение шумов видеокамеры до 15 ед. не вызывают сколь-нибудь значительного увеличения погрешности вычисления углов тангажа и крена.

Наибольшая погрешность возникает при одновременном увеличении амплитуды шумов видеокамеры и снижении яркости и контраста изображения. На рис. 10 приведены изображения, соответствующие полету в вечернее время суток при наличии небольшого смога. Амплитуда шумов видеокамеры при этом составляет 15 ед. На рис. 11 приведен график вычисленного значения угла крена.



Рис. 10. Изображение с амплитудой шума 15 ед., яркостью 45%, контрастом 45%



Как видно, средняя ошибка ОСО в этом случае составила 1° (опорное значение $\gamma = -24,8^{\circ}$).

Моделирование полета БПЛА в режиме терминальной навигации (полет МБПЛА из точки с координатами (x_0 , y_0) к цели, имеющей координаты (x_{11} , y_{11}), с заданной средней путевой скоростью за определенное время при действии (в общем случае) крупномасштабных ветровых возмущений) с ОСО в контуре обратной связи каналов управления угловым положением показало, что траектория БПЛА более точно совпадает с заданной, чем в случае применения бесплатформенной системы ориентации (БСО). Это вызвано отсутствием влияния на ОСО перегрузок, возникающих в процессе маневрирования БПЛА, и систематических дрейфов инерциальных чувствительных элементов.

В четвертой главе приведены результаты лабораторных испытаний алгоритма вычисления углов тангажа и крена и алгоритма кластеризации, а также полевых испытаний разработанного вычислительного блока КСО.

Лабораторные испытания проходили в два этапа. Первый этап заключался в установке минивидеокамеры на поворотном стенде, и сравнении вычисленных с помощью алгоритмов КСО углов тангажа и крена с показаниями поворотного стенда. Роль цифрового вычислителя в этом случае выполнял персональный компьютер. Второй этап заключался в применении алгоритмов КСО к видеофайлу, полученному в результате полетов БПЛА на базе авиамодели *TwinStarII* (рис. 12), и сравнении результатов с телеметрическими показаниями установленной на борту БСО.

На первом этапе испытаний средняя ошибка углов тангажа и крена (по сравнению с показаниями поворотного стенда) составила 1°. На втором этапе средняя ошибка составила: по крену - 1°, по тангажу – 1,5°. Увеличение ошибки при проведении второго этапа можно объяснить взаимной неточностью установки КСО и БСО, а также погрешностью самой БСО.

a)



Рис. 12. Взлет авиамодели *TwinStarII* (а) и полет (б). Запуск производит Алалуев Р.В., пилот – Ладонкин А.В.

Полевые испытания проводились для разработанного вычислительного блока КСО. Вычислительный блок (рис. 13) состоит из аппаратного видеодекодера ADV7180BSTZ, преобразующего аналоговый видеосигнал в цифровую форму, двух цифровых вычислителей (программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) EP2C5T144C8N и микроконтроллера ATMEGA128L) и системы преобразователей напряжения (обеспечивают питание вычислительного блока). Цифровые вычислители способны осуществлять коммуникацию с другими бортовыми системами (автопилотом, модулем CHC, магнитометрами и т.д.).

Испытания заключались в полете авиамодели *TwinStarII* в ручном режиме с одновременной регистрацией углов тангажа и крена, вычисленных с помощью КСО и БСО. В качестве оптической головки КСО использовалась видеокамера, установленная в носовой части авиамодели. При наложении полученных графиков (рис. 14) вычислялась разница в показаниях этих двух систем.

По результатам испытаний, средняя погрешность КСО по углам тангажа и крена не превысила 1°.



Рис. 13. Опытный образец вычислительного блока КСО: 1 – аппаратный видеодекодер и разъем для подключения аналогового видеосигнала; 2 – ПЛИС Altera EP2C5T144C8N; 3 – разъемы для программирования и подключения цифрового видеосигнала; 4 – разъемы для программирования и коммуникации с другими бортовыми системами; 5 – микроконтроллер ATMGEA128L; 6 – разъем питания



Рис. 14. Графики углов тангажа (а) и крена (б), полученных с помощью КСО и БСО

Полученные результаты экспериментальных исследований разработанного опытного образца вычислительного блока КСО, реализующего весь набор необходимых вычислительных алгоритмов, показали возможность построения ОСО с погрешностью по углам тангажа и крена не более 1°.

Получено подтверждение универсальности разработанных алгоритмов вычисления углов тангажа и крена, то есть возможность их применения с любыми оптическими головками, обладающими осевой симметрией, в том числе и с обычными видеокамерами.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты, полученные в диссертационной работе.

В приложении приведены акты регистрации программных продуктов и акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

- 1) Разработан способ увеличения угла обзора видеокамеры до значений, превышающих 180°, за счет применения дополнительной зеркальной оптической системы, что позволяет вычислять углы ориентации при любых значениях углов тангажа и крена.
- 2) Разработан алгоритм кластеризации неба и земли на изображениях, основанный на применении пороговой фильтрации с динамически изменяющимся пороговым значением. Данный алгоритм не требует больших вычислительных затрат и обладает малым временем исполнения, что позволяет снизить общую задержку КСО.
- Разработан универсальный алгоритм вычисления углов тангажа и крена, основанный на анализе взаиморасположения неба и земли на изображении, что позволяет использовать его с оптическими головками любых типов, обладающими осевой симметрией.
- 4) Получена математическая модель оптической головки, позволяющая проводить имитационное моделирование работы КСО и оценить точность системы на этапе проектирования.
- 5) Создано программное обеспечение, предназначенное для моделирования катадиоптрической системы ориентации, анализа работы алгоритма кластеризации, оценки влияния различных факторов на погрешность вычисления углов тангажа и крена.
- 6) Произведена оценка влияния различных факторов на точность вычисления углов тангажа и крена: высоты полета, ландшафта (высотных объектов), освещенности (времени суток), погодных условий (туман, смог), шумовых характеристик приемника оптического излучения. Предложены методы для компенсации влияния высоты полета на погрешность системы. Выяснено, что наибольшую погрешность вызывают протяженные объекты с большим вертикальным угловым размером, и шумы приемника оптического излучения в условиях низкой освещенности и низкого контраста.
- 7) Полученные результаты лабораторных и экспериментальных исследований подтверждают достоверность теоретических выводов. Погрешность вычисления углов тангажа и крена не превышает 1°, что является удовлетворительным для выполнения задачи автоматического полета БПЛА.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1) Ладонкин А.В. Катадиоптрическая видеосистема для определения углов крена и тангажа беспилотного летательного аппарата // Датчики и системы. №8 2011. С. 15-18.
- Ладонкин А.В., Машнин М.Н. Система автоматизированного определения и коррекции коэффициентов автопилота беспилотного летательного аппарата. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 6, Ч.2. Тула: Изд-во Тулгу, 2011. С. 66-71.
- 3) 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. С.151-161.
- 4) Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / Под ред. В.Я. Распопова. М.: Машиностроение, 2011. С.126-144.
- 5) Ладонкин А.В., Машнин М.Н., Шведов А.П.. Математическая модель погрешностей информационно-измерительной системы МБПЛА. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 12, Ч.1. Тула: Изд-во Тулгу, 2012. С. 197-204.
- 6) Ладонкин А.В., Распопов В.Я. Оптические системы ориентации в контуре управления беспилотного летательного аппарата // Гироскопия и навигация. №3 (78) 2012. С. 64-78.
- 7) Ладонкин А.В. Терминальная навигация беспилотного летательного аппарата с компенсацией влияния на систему ориентации линейных ускорений / А.В. Ладонкин, В.Я. Распопов, А.П. Шведов, М.Н. Машнин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 7. Тула: Изд-во Тулгу, 2012. С. 140-155.
- 8) Ладонкин А.В., М.Н. Машнин, В.Я. Распопов. Управление малоразмерными беспилотными летательными аппаратами в режиме терминальной навигации // Мехатроника, автоматизация, управления. №9. Изд-во «Новые технологии», 2012. С. 15-23
- 9) Ладонкин А.В. Метод коррекции бесплатформенной системы ориентации малоразмерного беспилотного летательного аппарата / А.В. Ладонкин, А.П. Шведов, В.Я. Распопов, М.Н. Машнин // Мехатроника, автоматизация, управления. №9. Изд-во «Новые технологии», 2012. С. 10-14
- 10) Ладонкин А.В., Машнин М.Н. Моделирование оптических систем ориентации в контуре автоматического управления малоразмерного беспилотного летательного аппарата // VI молодежная научно-практическая конференция Тульского государственного университета «Молодежные инновации»: сборник докладов / под. общ. ред. д-ра. Техн. наук, проф. Ядыкина Е.А.: в 2.ч. – Тула, изд-во ТулГУ, 2012, Ч.1 – С. 183 – 185.