

Концептуальные вопросы построения оптических систем обеспечения безопасности полётов, контроля параметров движения и ориентации летательных аппаратов в пространстве

В.В.Васильев, А.П.Манин, Д.М.Челахов

Conceptual questions of construction of optical systems of maintenance of safety of flights, the control of parameters of movement and orientation of flying machines in space

V.V.Vasiliev, A.P.Manin, D.M.Chelakhov

Рассматриваются вопросы обеспечения безопасности полётов, контроля движения и ориентации летательных аппаратов с помощью оптических систем. Излагаются принципы построения современных цифровых оптических систем панорамного и следящего типа для решения поставленных задач.

The questions of flights safety maintenance, movement control and flying objects orientation by means of optical systems are considered. Principles of modern digital optical systems construction of panoramic and watching types for the tasks decision in view are stated.

Общее видение проблемы

Обеспечение безопасности полётов летательных аппаратов (ЛА) на аэродромах и в специально выделенных областях пространства, а также контроль их траектории и ориентации является проблемой актуальной. В большей мере эти задачи решаются радиолокационными средствами. Однако есть задачи, которые требуют других подходов к их решению. В частности, идентификация ЛА и птиц, фиксация физических явлений, сопровождающих полет ЛА, точное измерение параметров движения и ориентации ЛА в пространстве. Эти задачи достаточно эффективно решаются оптическими средствами, в частности, кинотеодолитами и фоторегистрирующими средствами.

Традиционное построение прецизионных оптических систем измерения угловых координат основано на соблюдении следующих важных условий.

1. Система координат теодолита должна совпадать с линией отвеса и плоскостью горизонта. Допустимые погрешности отклонения от опорных направлений не должны превышать 2...5 угловых секунд. Это означает, что изготовление теодолита, его установка на местности и дальнейшая эксплуатация должны подчиняться жёстким требованиям отладки и

юстировки. Отсюда массивность теодолитов и постаментов, на которые они устанавливаются, и дороговизна их изготовления.

2. Объективы теодолитов должны иметь минимально допустимую дисторсию, что удорожает их изготовление особенно для панорамных средств наблюдения.

3. ПЗС матрица должна строго располагаться в фокальной плоскости объектива, угол поворота ПЗС матрицы не должен превышать допустимый предел.

4. Фокусное расстояние должно быть строго фиксированным.

Измерение угловых координат является результатом двух типов преобразования изображения цели на общем фоне:

– прямое физическое многократное преобразование в пространстве, оптическом канале и отображение на поверхности ПЗС матрицы;

– обратное математическое преобразование изображения цели на ПЗС матрицы в угловые координаты цели.

При традиционном подходе, когда прямое преобразование изображения цели производится в строго согласованных системах координат, обратное преобразование имеет простое математическое описание с ограниченным числом констант: «нуль» угла места, коллимационная поправка и фокусное расстояние.

Изготовление теодолита, его наладка, калибровка, юстировка и подготовка к работе преследует главную цель – физически согласовать системы координат пространственного преобразования сигнала изображения. Причём это согласование не должно нарушаться во время эксплуатации при воздействии на него различных неблагоприятных факторов. В результате такой теодолит представляет собой громоздкое, тяжеловесное устройство. На практике со временем согласованность систем и параметров нарушается. Поэтому приходится принимать меры по оценке изменения параметров системы с помощью эталонных ориентиров, например с использованием калибровки по звёздам.

Развитие цифровых технологий измерения физических величин позволяет реализовать иной подход к построению оптических прецизионных систем, сущность которого заключается в следующем.

Измеряются все виды рассогласования между собственной системы координат теодолита и действительной системой координат, в которой должны определяться угловые координаты. Измеряются параметры отклонения собственной системы координат теодолита от прямоугольной системы координат, коллимационная погрешность, параметры дисторсии объектива, фокусное расстояние, угол поворота ПЗС матрицы. Измерительная информация используется для решения обратной задачи – вычисления угловых координат. Часть измерений необходимо осуществлять в текущем времени или в конце (начале) сеанса измерений угловых координат. Часть измерений может быть осуществлена на лабораторных стендах при изготовлении теодолита. Часть измерений может быть произведена в полевых условиях с использованием эталонных направлений.

Это позволяет с высокой точностью определить элементы оператора искажения и решать обратную измерительную задачу с учётом этого оператора как математическое преобразование показаний ПЗС матрицы.

Таким образом, центральной идеей такой методологии построения оптических прецизионных систем является перенос важных функций калибровки и юстировки систем в вычислительную среду. Это существенно упрощает физическую часть системы, снимает с неё необходимость поддерживать параметры согласования систем координат. Габариты и вес современной оптической системы существенно уменьшаются. Система может быть изготовлена в носимом (возимом) варианте. Учитывая возможность использования источников автономного энергопитания и аппаратуры автономного геодезического и временного обеспечения, оптическую систему можно устанавливать на необорудованных площадках.

Современные цифровые технологии позволяют решить такую важную задачу – оценивать угловые координаты в реальном темпе времени. Это можно осуществлять не только в следящих оптико-электронных средствах, но и патрульных. Для патрульных систем эту задачу можно решать автоматически без участия оператора. Открывается возможность во время проведения сеансов измерения исключать полностью участие оператора.

В основе цифровых технологий лежат использование в качестве чувствительных элементов прецизионных ПЗС матриц и ввод в реальном темпе времени в вычислительную машину потока цифровых данных видеоизображений для хранения и обработки.

Вместе с тем, возникает ряд проблем на пути реализации и внедрения цифровых оптических систем. К ним относятся:

- малые линейные размеры ПЗС матриц не позволяют обеспечить одновременно и большие углы обзора пространства и высокую точность и разрешающую способность измерений угловых координат объектов наблюдения;

- увеличение линейных размеров ПЗС матриц приводит к уменьшению частоты регистрации кадров видеоизображений, что недопустимо при регистрации быстро протекающих физических явлений.

Современные цифровые технологии позволяют создавать панорамные оптические каналы гибридного типа, устанавливая их на следящую платформу. Особенность панорамных оптических каналов гибридного типа состоит в том, что они обладают высокой точностью измерения угловых параметров и вместе с этим способностью осуществлять наблюдение и измерения в широком поле обзора.

Краткая характеристика комплекса внутрисистемных измерений

Назначение:

- измерение азимута и угла места направления визирной линии теодолита с помощью угломерных датчиков, т.е. определение ориентации системы координат оптического модуля относительно топоцентрической системы координат теодолитного поста;

-измерение отклонений вертикальной оси топоцентрической системы координат теодолитного поста от линии отвеса с помощью прецизионного инклинометра;

-уточнение фокусных расстояний объективов, углов поворота ПЗС матриц и начала координат ПЗС матриц с помощью штатного ориентира, оснащённого аппаратурой потребителя навигационной информации;

Применение комплекса внутрисистемных измерений позволяет строить теодолитный пост с малыми весогабаритными параметрами и использовать его на необорудованных площадках.

Как отмечено выше, одной из центральной особенностью современных цифровых технологий построения прецизионных оптических систем является измерение угловых отклонений реальных систем координат от номинальных. Это в первую очередь касается измерения углов отклонения от вертикального положения линии отвеса.

Система измерения углов отклонения от вертикального положения линии отвеса позволяет определить наклон алидады устройства опорно-поворотного ОПУ теодолита при подготовке изделия по назначению и в процессе выполнения видеорегистрации объектов наблюдения. Центральным элементом системы служит высокоточный измеритель малых угловых отклонений от вертикали.

Существуют различные типы прецизионных измерителей угловых отклонений. Одним из перспективных является устройство, основу которого составляет гироскоп, например, гироскоп с неконтактными подвесами. В настоящее время используются прецизионные инклинометры.

В состав системы, построенной на основе прецизионного инклинометра, входят два измерительных канала:

- канал грубого измерения углов отклонения;
- канал точного измерения углов отклонения.

Канал грубого измерения углов отклонения реализуется жидкостным уровнем. Он используется для первоначального горизонтирования теодолита (выставке вертикальной оси теодолита вручную) при установке изделия на месте эксплуатации.

Канал точного измерения углов отклонения является электронным измерительным каналом, который реализован соответствующими аппаратно-программными средствами в составе изделия. Работа этого канала основана на использовании двухкоординатного инклинометра.

Возможность высокоточного автоматического измерения и представления в цифровой форме углов поворота визирной оси теодолита

Система измерения углового положения визирной оси обеспечивает определение азимута α_0 и угла места β_0 визирной оси теодолита, путем считывания показаний датчиков углового положения в моменты времени, соответствующие середине временного интервала экспозиции. Датчики углового положения жестко связаны соответственно с вертикальной и

горизонтальной осями устройства опорно-поворотного ОПУ. Управления датчиками и прием данных от датчиков выполняется аппаратурой временного обеспечения и синхронизации.

Возможность регистрации видеоинформации на ПЭВМ и обработки видеоизображений в реальном времени

Основополагающим элементом современной цифровой системы измерения угловых координат является компьютерная система регистрации потоков информации, поступающих с цифрового оптического модуля цифрового теодолита. Проектно-конструкторская задача заключается в необходимости ввести в ПЭВМ цифровой поток (от 25 до 200 Мбайт/сек) от ПЗС матриц фотоприемного устройства цифрового теодолита, записать его на жесткий диск и обеспечить его математическую обработку в реальном времени программными средствами, совместимыми с используемой операционной системой компьютера.

Следует отметить, что возможности интерфейса серийно выпускаемых ПЭВМ, через который можно ввести указанный цифровой поток информации с требуемой скоростью, весьма ограничены (USB и PCI). Использование шины PCI и PCI express позволяет пропустить поток требуемой скорости, причем «с запасом» на перспективу. Следует отметить, что для решения задач скоростного ввода-вывода через эти шины доступны готовые решения, разработкой и производством которых занимаются специализированные фирмы.

В качестве платы скоростного ввода для цифровой регистрации информации в ЦОС могут использоваться, например, платы NI 6537 или NI 6536 фирмы NI. Следует отметить, что платы указанных типов максимально подходят для решения поставленной задачи как среди номенклатуры продукции NI, так и среди продукции других фирм. Обе платы имеют 32-разрядный цифровой вход с возможностью выбора логических уровней между ТТЛ-стандартами 5в, 3.3в, 2.5в. Входные разъемы одинаковы по типу и по расположению выводов. Главное различие заключается в максимальной частоте ввода и, следовательно, в производительности ЦОС. Плата NI 6537 позволяет вводить информацию с максимальной частотой 50 МГц. При этом потенциальная производительность (пропускная способность) составляет

$$50 \text{ МГц} \times 32 \text{ бита} = 50 \text{ МГц} \times 4 \text{ байта} = 200 \text{ Мбайт/с.}$$

Плата NI 6536 имеет вдвое меньшую производительность, так как позволяет вводить информацию с максимальной частотой 25 МГц. Следовательно, ее потенциальная пропускная способность составляет

$$25 \text{ МГц} \times 32 \text{ бита} = 25 \text{ МГц} \times 4 \text{ байта} = 100 \text{ Мбайт/с.}$$

Ввод видеоинформации в ПК позволяет решать задачи обработки видеоизображений в реальном времени. Для этого в период времени накопления видеоинформации текущего кадра наблюдения производится обработка видеоизображения предыдущего кадра по алгоритмам определения координат энергетического центра контрастного изображения на поле ПЗС матрицы.

Возможность автономной геодезической привязки и привязки к единому времени

Важным элементом современной технологии построения носимых (возимых) ОЭС, устанавливаемых на необорудованных площадках, является автономное геодезическое и временное обеспечение измерений. Такую возможность открывает использование космических навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. При этом необходимо учитывать следующую возможность. Создавая комплекс мобильных ОЭМ, можно с высокой точностью привязать относительно друг друга все средства комплекса, назначив одно средство в качестве ведущего.

Возможность построения цифрового оптического модуля панорамного типа для построения патрульного или патрульно-следающего теодолита

Патрульный теодолит применяется в тех ситуациях, когда априорные сведения об ожидаемом направлении появления объекта наблюдения размыты, его появление возможно в широком диапазоне углов, время наблюдения невелико и не позволяет организовать поиск путём сканирования пространства узкопольным объективом теодолита, который обычно используется для построения следающей системы.

Основные принципы построения теодолита сохраняются, но специфичные требования отражаются на построении оптического модуля (ОМ) теодолита.

Оптический модуль – устройство, содержащее один или несколько оптических цифровых каналов наблюдения, обеспечивающих заданный угол обзора пространства, точность измерения угловых координат, разрешающую способность и частоту считывания цифровой информации.

Оптический модуль цифрового патрульного теодолита обладает своей спецификой, так как он должен отвечать противоречивым требованиям: обеспечить большой угол наблюдения и при этом высокую точность измерения угловых координат и достаточно высокую частоту считывания цифровой информации.

Фотоплёночные патрульные теодолиты разрешали это противоречие путём применения фотоплёнки широкого формата, использования обтюраторного режима съёмки. Но проявление и дешифрация фотоплёнки требует недопустимо большого по нынешним меркам времени и тем более не позволяет решать задачу измерения в реальном времени.

Указанные выше основные технические характеристики оптической системы зависят от параметров цифровой матрицы, определяющих преобразование аналогового сигнала изображения в дискретный пространственный сигнал, а за тем в цифровой код, свойств объектива и конфигурации оптического модуля. Уровень состояния развития цифровых матриц на текущий момент таков, что обеспечить и большой угол обзора, и приемлемые значения показателей точности и частоты считывания в рамках ОМ с одним каналом наблюдения не удаётся.

Возникает проблема создания панорамных оптических модулей.

При относительно малых значениях угла обзора не существуют особых трудностей в построении оптического модуля, так как канал наблюдения один и есть возможность совмещать две системы отсчёта: прибора в целом и объектива. Это обеспечивает упрощение расчёта угловых координат и их последующую обработку.

Для того, что бы обеспечить большие углы обзора, высокую точность измерения и приемлемую кадровую частоту считывания информации возникает проблема построения ОМ. Основное препятствие – малые геометрические размеры цифровых матриц и их дискретных элементов - и пикселей и резкое падение кадровой частоты при увеличении размеров матриц. Редкие пока примеры большемерных матриц отличаются неприемлемо низкой кадровой частотой. Для разрешения этих противоречий строятся сложные оптические модули, содержащие более одного оптического канала. Имеются различные направления построения таких оптических модулей.

1. ОМ с несколькими объективами, оптические оси которых сдвинуты относительно друг друга на угол, обеспечивающий формирование заданного угла обзора. Цифровые матрицы устанавливаются стандартным способом.

2. ОМ с несколькими объективами, визирные вектора которых коллинеарны. Каждый объектив имеет одинаковый заданный широкий угол обзора. Цифровые матрицы устанавливаются в фокальные плоскости по определённой структуре.

3. ОМ с одним объективом и разложением светового потока на несколько каналов:

– путём расщепления единого светового потока на несколько с помощью призмы;

– путём раздвоения светового потока полупрозрачными зеркалами;

4. Оптический модуль с использованием анаморфотной насадки на объектив или анаморфотных объективов.

Особенность анаморфотного объектива состоит в том, что такой объектив практически линейно «сжимает» наблюдаемое пространство и «укладывает» его в пределы ПЗС матрицы. Если коэффициент сжатия точно известен и используется эталонная сетка для учёта геометрического преобразования пространства наблюдения, то можно таким образом разрешить противоречие в требованиях по обеспечению широкого поля наблюдения и большого фокусного расстояния. Однако при решении обратной задачи – определении угловых координат объекта наблюдения – существенно уменьшается разрешающая способность системы из-за эквивалентного увеличения геометрических размеров светочувствительного пикселя ПЗС матрицы.

Применение дифференциального метода обработки видеоизображений для селекции подвижных слабоконтрастных целей

Обнаружение и идентификация слабоконтрастных объектов наблюдения оптическими средствами является вопросом проблемным и часто является ограничивающим условием применения оптических средств. Современные цифровые технологии позволяют реализовать в реальном темпе времени или при послесекансной обработке видеоинформации дифференциальный метод селекции высоко динамичных мало контрастных целей.

Наиболее просто этот метод реализуется в патрульных оптических системах, в которых общий наблюдаемый фон неподвижен или мало подвижен.

Сущность его заключается в следующем.

На видеокадре имеется изображение объекта и некоторый фон. Размеры кадра, например, – 1024 X 1024 пикселя. Частота смены кадра – 25 Гц. Информация о кадре имеет следующую форму: напряжение сигнала на каждом пикселе, эквивалентное интенсивности светового потока, представлено одним байтом (восьмиразрядным числом). Объект подвижен, фон – нет. Если рассмотреть два соседних кадра и сравнить информацию, то окажется, что данные, характеризующие фон, совпадают как положению в пространстве кадра, так и по уровню сигнала. Данные, характеризующие объект, отличаются по местоположению на матрице. Если из последующего кадра попиксельно вычесть данные предыдущего кадра, то в идеальном случае данные о фоне обнуляются (появляется уровень «черного»), разность данных изображения объекта формирует различные структуры в зависимости от угловой скорости движения объекта и его угловых размеров (размеров на поверхности матрицы). К таким структурам относятся:

- двойное полное изображение объекта, позитивное и негативное, если скорость объекта настолько велика, что за время смены кадра (1/25 сек) объект полностью меняет своё положение без какого-либо «перекрытия» позитивного и негативного изображений;

- изображения контуров объекта, позитивного и негативного, расположенных ортогонально направлению движения и противоположно друг другу, если скорость движения низка, но достаточная чтобы сместиться изображению объекта за 1/25 сек хотя бы на один пиксель, и если интенсивность сигнала изображения равна на всей площади изображения объекта;

- разного рода промежуточные варианты между двумя указанными выше.

Более тонкий анализ разностного сигнала показывает, что при движении практически с любой скоростью, есть, хоть небольшие, различия в прямом и инверсном сигнале. Постановкой фильтров можно исключить мешающие эффекты или, наоборот, использовать селекции целей по скорости.

В общем случае при сложном сигнале изображения объекта разностный сигнал, как пространственная производная, имеет место и несёт в себе

информацию, как о движении объекта, так и о других идентификационных его признаках.

Заметим, что в случае, когда объект не различим на фоне из-за потери идентификационных признаков, дифференциальный принцип позволяет его обнаружить как движущийся объект и даже классифицировать его.

Применение интегрального метода обработки измерений для селекции слабоконтрастных целей по траектории движения

Для случаев, когда объект трудно обнаружить на видеокадре даже после применения дифференциального метода, возможно применение интегрального метода.

Сущность его состоит в том, что кадры цифровых данных видеоизображений на определённом отрезке времени складываются. Вся совокупность малоконтрастных изображений выстраивается на суммарном кадре как проекция траектории движения на фокальную плоскость объектива. Структурно упорядоченную совокупность точек (фигур) оператору обнаружить существенно проще, чем одинокий слабоконтрастный объект.

При этом методе от каждого предыдущего кадра в цифровом виде вычитается последующий кадр, затем все кадры выделенной части кадров суммируются и для удобства анализа изображение может, инвертироваться. В результате получается изображение траектории снаряда, убирается неподвижный фон, разность фонов суммируется.

Применение принципов семантического сжатия информации видеоизображения

Применение дифференциального метода позволяет селектировать цели по скорости, отделяя их объектов с общей групповой скоростью. Выделенные объекты обладают устойчивой координатной привязкой в поле ПЗС матрицы. Это позволяет передавать в ПЭВМ только информацию о яркости цели и её линейных координатах, что существенно сокращает объём передаваемых данных.

Формирование комплекса возимых (носимых) высокоточных оптических систем

Из совокупности носимых (возимых) пассивных оптико-электронных средств можно формировать мобильный комплекс ОЭС. Его задача - обрабатывать с помощью локального вычислительного комплекса измерения угловых координат объектов наблюдения для получения экспресс информации об их параметрах движения, об обеспечении требований безопасности полётов.

Для решения этой задачи необходимо комплекс оснащать средствами передачи информации, малоинформативными средствами сбора измерительной информации и портативными вычислительными средствами.

Обычно упорядоченную совокупность измерений угловых координат, формируемую по результатам измерений измерительных средств обрабатывают методом наименьших квадратов (МНК). Такая методика даёт наилучшую точность, но она не обладает гибкостью, способной быстро перестроить алгоритм под конкретную измерительную ситуацию. Автономность измерительного средства на этапе обработки исчезает. Наряду с этим при традиционной обработке решается система нелинейных уравнений, что усложняет саму процедуру обработки.

Анализ измерительной задачи, решаемой цифровым угломерным прибором, показывает, что существуют инвариантные условия ортогональности вектора наблюдения к фокальной плоскости оптического измерителя, которые позволяют автономно сформировать для каждого прибора систему линейных уравнений, связывающих искомые координаты ЛА с тригонометрическими функциями от измеренных значений угловых параметров. Прямое объединение этих систем уравнений образует обобщённую систему уравнений, которую можно решать с учётом принципов метода наименьших квадратов.

Отличительная особенность алгоритмов обработки состоит в том, что они решают линейную систему уравнений, дополняемую в зависимости от числа привлекаемых измерительных средств. Это исключает итерационные циклы решения и в целом упрощает реализацию программного обеспечения.

Практика построения современных оптических комплексов

Одним из примеров практической реализации оптической системы современного типа является мобильный комплекс «Конгломерат» для контроля результатов стрельб подразделений противовоздушной обороны и обеспечения безопасности их проведения на полигонах (разработчик ОАО НПИЦ «Арминт»). Комплекс задуман и реализован как взаимосвязанная совокупность автономных измерительных следящих и патрульных модулей (постов). Модули могут работать не только в составе комплекса «Конгломерат», но и автономно, например, на необорудованных трассах. Количество модулей определяется размерами контролируемого пространства и требованиями, предъявляемыми к качеству измерений. Базовый вариант комплекса состоит из двух следящих, двух патрульных модулей и пункта сбора и обработки информации. Основные технические характеристики:

- среднеквадратическая погрешность измерения координат воздушных объектов, м - 1,5 – 10,0 в зависимости от расстояния объекта наблюдения;
- среднеквадратическая погрешность оценки взаимного относительного положения объектов наблюдения, м - 0,5 – 3,0;
- время на развертывание (свертывание) системы, мин. – не более 60;
- время непрерывной работы системы, час – не менее 8;
- время непрерывной регистрации, мин. – не менее 120;
- время выдачи результатов экспресс – обработки результатов измерений, мин – не более 15.

Анализ результатов и выводы

Обеспечение безопасности полётов летательных аппаратов (ЛА) на аэродромах и в специально выделенных областях пространства, а также контроль их траектории и ориентации требует привлечения наряду с другими техническими средствами современных цифровых оптических средств. В основе перспективной методологии построения оптических прецизионных систем лежит перенос важных функций калибровки и юстировки систем в вычислительную среду. Это существенно упрощает физическую часть системы, снимает с неё необходимость поддерживать параметры согласования систем координат. Применение комплекса внутрисистемных измерений позволяет строить теодолитный пост с малыми весогабаритными параметрами и использовать его на необорудованных площадках.

Применение цифровых технологий позволяет реализовать следующие возможности:

- высокоточное автоматическое измерение и представление в цифровой форме углов поворота визирной оси теодолита;
- регистрация видеоинформации на ПЭВМ и обработка видеоизображений в реальном времени;
- построение цифрового оптического модуля панорамного типа для построения патрульного или патрульно-следающего теодолита;
- применение дифференциального и интегрального методов обработки видеоизображений для селекции подвижных слабоконтрастных целей и идентификации ЛА и птиц, фиксации физических явлений, сопровождающих полет ЛА.

Список литературы:

1. Манин А.П., Васильев В.В. Применение инвариантных условий ортогональности при оценивании движения летательных аппаратов. М., «Машиностроение», ОНТЖ «Полёт», 2007 г., №2.
2. Манин А.П. Контроль и коррекция нелинейного оценивания состояния стохастических объектов. «Машиностроение» ОРНТЖ «Полёт» №3. 2006-08-16.
3. Васильев В.В., Манин А.П., Белоус Р.А. Принципы построения цифровых оптических локаторов патрульного типа. XV Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», г Воронеж, 2009 г.
4. Манин А.П., Васильев В.В., Мацыкин С.В., Семёнов И.Г. Анализ задач пассивной цифровой оптической локации. «Вопросы оборонной техники». №2, 2010 г.
5. Васильев В.В., Манин А.П., Мацыкин С.В. Решение задач пассивной цифровой оптической локации в интеллектуальной среде. Десятая международная научно-практическая конференция «Инженерные, научные и образовательные приложения на базе технологий National Instruments», 2011, Москва, Россия 8 – 9 декабря, 2011 г.