

коэффициент для каждой полосы, представленной в метаданных, C_{band} – масштабный коэффициент для каждой полосы, представленной в метаданных.

Литература

1. Harris Geospatial Solutions, Inc. <https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI>.
2. Harris Geospatial Solutions, Inc. <https://www.harrisgeospatial.com/Support/Self-Help-Tools/Help-Articles/Help-Articles->

Detail/ArtMID/10220/ArticleID/16162/Vegetation-Analysis-Using-Vegetation-Indices-in-ENVI.

3. NDVI – теория и практика, Максим Дубинин <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>.

4. J. PEÑUELAS, F. BARET, I. FILELLA, Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica* 31(2): 221-230, 1995.

5. Harris Geospatial Solutions, Inc. <https://www.harrisgeospatial.com/docs/LeafPigments.html>.

УДК 681.77, 681.2.083, 681.2.088, 681.2.089

ОСОБЕННОСТИ СХЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВНУТРЕННЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ АППАРАТОВ

Старосотников Н.О., Фёдорцев Р.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Введение. В связи с совершенствованием технологии создания фотоприёмников, в схемах работы оптико-электронных аппаратов (ОЭА), таких как цифровые автоколлиматоры, системы астроориентации, пеленгаторы, датчики Шака-Гартмана, проекционные измерительные системы, схемы геометрической калибровки ОЭА [1-2], фотоприёмник выступает не только в качестве приёмного устройства, но и отсчётного, поскольку элементы фотоприёмника – пиксели – имеют высокую точность пространственной периодичности. Задачи, стоящие перед ОЭА, становятся более сложными, требуется большие поля зрения, которые обеспечиваются в том числе за счёт размера фотоприёмников с минимальным размером пикселя. Однако существуют технологические ограничения создания таких фотоприёмников. Решением проблемы становится использование нескольких фотоприёмников, установленных на одной электронной плате.

Поскольку фотоприёмники ОЭА выступают, в том числе, в качестве измерительных устройств, то необходимо производить геометрическую калибровку ОЭА. Геометрическая калибровка подразумевает измерение элементов внутреннего ориентирования (ЭВО) ОЭА, используемых при обработке изображений ОЭА. Геометрическая калибровка позволяет исключить погрешности взаимной выставки фотоприёмников на одной электронной плате, установленной в фокальной плоскости ОЭА, а также искажения, вносимые объективом ОЭА, в первую очередь дисторсией [3]. Под ЭВО ОЭА понимаются следующие параметры:

- фотограмметрическое (эфффективное) фокусное расстояние ЭФР f_e ;
- положение главных точек Sfx', Sfy' ;
- расположение фотоприёмников в фокальной плоскости ОЭА:
- линейное – координаты нулевого пикселя

фотоприёмника $x0, y0$;

– угловое – угол поворота фотоприёмника κ .

Общее описание геометрической калибровки ОЭА. Общей схемой для геометрической калибровки ОЭА является проецирование на фотоприёмник ОЭА эталонной связки векторов с предварительно известной пространственной ориентацией. По энергетическим центрам тяжести, определяемых периодической топологией элементов фотоприёмника, спроецированной эталонной связки векторов, фотоприёмник регистрирует их пространственное положение в системе координат ОЭА. Таким образом, в данной схеме периодическая топология элементов фотоприёмника ОЭА будет являться измерительной шкалой. Определяются невязки эталонной связки векторов и их проекций в системе координат ОЭА. Невязки входят в систему линейных алгебраических уравнений, решение которых методом наименьших квадратов будет определить ЭВО ОЭА.

Главным различием методов геометрической калибровки можно назвать способ формирования связки векторов. В зависимости от того, какой в ОЭА фотоприёмник: линейный или матричный определяется то, как должны быть разнесены вектора связки векторов: по двум или по одной координатам. Величина поля зрения ОЭА влияет на то, какой диапазон должна охватывать связка векторов. Требования к точности геометрической калибровки определяют требования к определению пространственной ориентации связки векторов.

Для геометрической калибровки чаще всего используются коллимационные схемы [4]. В данном случае в качестве тест-объекта может выступать либо матрица тест-объектов, либо единственный тест-объект.

Коллиматор с матрицей тест-объектов подходит для геометрической калибровки ОЭА с небольшим полем зрения, ограниченным технологическими возможностями производства матрицы

тест-объектов. Предварительно такой коллиматор также калибруется, например, теодолитом.

При использовании коллиматора с единичным тест-объектом, его проецируют под разными углами в ОЭА. Могут быть три варианта:

– коллиматор неподвижен, поворачивается калибруемый ОЭА;

– коллиматор поворачивается, калибруемый ОЭА неподвижен;

– калибруемый ОЭА поворачивается по одной оси, а коллиматор по другой, для упрощения конструктивной реализации геометрической калибровки, когда необходимо калибровать ОЭА с большими полями зрения по двум осям. Во всех случаях необходимо измерять величину поворота либо ОЭА, либо коллиматора, например, при помощи углового датчика или теодолита.

Для геометрической калибровки ОЭА с сильно вынесенным входным зрачком, необходимо не только осуществлять поворот, но и линейное перемещение. Это обеспечивает расположение коллиматора и калибруемого ОЭА как можно ближе друг к другу для уменьшения области с возможным движением воздушных масс, либо градиентом температуры, влияющих на точность геометрической калибровки.

Таким образом, возникает необходимость в практической реализации вышеописанных способов, то есть проектировании схем и устройств для геометрической калибровки ОЭА. А также оценки точности проведения их геометрической калибровки ОЭА.

Описание схемы геометрической калибровки ОЭА. В качестве примера рассмотрим простую схему геометрической калибровки, показанную на рисунке 1, включает коллиматор и ОЭА. Коллиматор включает объектив, тест-объект, осве-

титель и обеспечивает проецирование тест-объекта, расположенного в фокальной плоскости объектива тест-объекта. Рисунком тест-объекта является массив прозрачных точек на непрозрачном фоне. Массив точек подобран таким образом, чтобы равномерно спроецировать их изображения в центре и по краям фотоприёмника ОЭА. Осветитель включает массив светодиодов и матовое стекло для обеспечения равномерной подсветки рисунка тест-объекта. Плата, на которой установлены светодиоды, с тыльной стороны охлаждается вентилятором. Объектив ОЭА, в фокальной плоскости которого установлены один или несколько фотоприёмников, формирует изображение тест-объекта, спроецированного коллиматором, на фотоприёмнике. Объектив коллиматора рассчитан на минимум дисторсии, астигматизма, комы и хроматических aberrаций. Размер рисунка тест-объекта, функции рассеяния точки объективов и размера фоточувствительного элемента ОЭА должны быть согласованы друг с другом [5].

Для устранения искажений в оптическом тракте схемы геометрической калибровки из-за рефракции воздуха, оптический тракт закрывается кожухом. Использование кожуха устраняет влияние перемещения воздушных масс в помещении на процесс геометрической калибровки. Кожух устанавливается таким образом, чтобы оставались открытыми не входящие в оптический тракт схемы геометрической калибровки части осветителя и ОЭА. Это необходимо для свободного отвода выделяемого ими тепла во время геометрической калибровки. Помимо этого, кожух должен быть пористым, чтобы обеспечить отвод тепла из оптического тракта, а также устранить застаивания воздушных масс. Для снижения влияния вибраций схемы геометрической калибровки устанавливается на виброизолирующий стол.

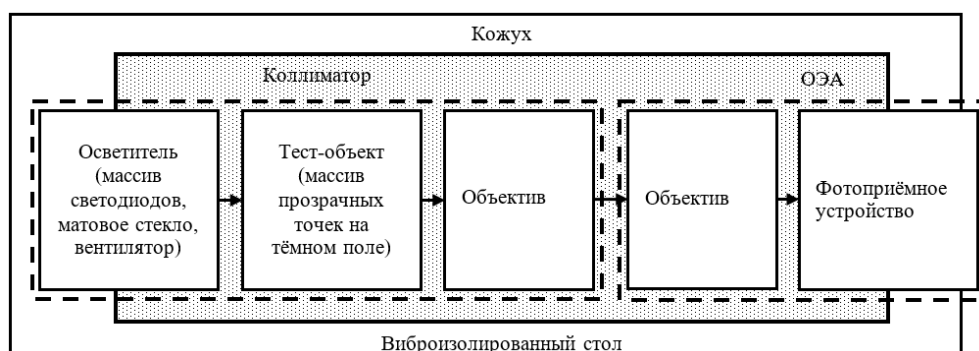


Рисунок 1 – Пример структурной схемы геометрической калибровки

Литература

1. Старосотников, Н.О. Высокоточный цифровой автоколлиматор для измерения малых углов / Н.О. Старосотников // Новые направления развития приборостроения: материалы 7-й Междунар. студ. науч.-техн. конф., 23–25 апр. 2014 г. Минск: БНТУ, 2014. – С. 244.

2. Jinyun, Yan. Dynamic Imaging Model and Parameter Optimization for a Star Tracker / Y. Jinyun, J. Jie, Z. Guangjun // Optics Express. 2016. V. 24, Iss. 6. P. 5961–5983.

3. Лобанов А.Н., Буров М.И., Краснопецев Б.В. Фотограмметрия: Учеб. – М.: Недра, 1987. – 308 с.

4. Фотограмметрические параметры оптико-электронной аппаратуры / С.А. Архипов [и др.] // Вестник

МГТУ имени Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2008. № 4. – С. 105–115.

5. Старосотников, Н.О. Оценка точности определения координат энергетического центра тяжести тест-

объекта коллиматора в схемах контроля оптико-электронных приборов с матричными фотоприемниками / Н.О. Старосотников, Р.В. Фёдорцев // Наука и техника. 2015. № 5. – С. 71–76.

УДК 621.375

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОПРИЕМНИКОВ В СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТИ ФАЗ МЕЖДУ ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМИ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

Шейников А.А.¹, Суходолов Ю.В.²

¹Военная академия Республики Беларусь
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Основной функцией любого фотоприемника является преобразование оптического излучения (оптического сигнала) в какую-то другую форму, более удобную для последующей регистрации. Чаще всего фотоприемники преобразуют оптическое излучение в форму электрических сигналов, методы регистрации которых на сегодняшний день наиболее хорошо отработаны. Полезной информацией об оптическом сигнале при его регистрации обычно являются какие-то его энергетические характеристики, т. е. полная энергия либо средняя по определенному интервалу времени мощность попадающего в апертуру фотоприемника и поглощаемого последним потоком фотонов. Практически ни один фотоприемник не способен без применения каких-либо дополнительных оптических элементов (устройств) осуществлять регистрацию каких-то других характеристик светового излучения (его несущей частоты или длины волны, поляризации, локальной интенсивности и т. д.). Для этого в измерительную схему обычно включаются оптические фильтры, призмы, дифракционные решетки, пространственные диафрагмы, что усложняет и удорожает конструкцию.

При разработке оптоэлектронных систем часто встает вопрос о выборе фотоприемника, обеспечивающего соответствие параметров электрических сигналов на его выходе характеру модуляции входного оптического излучения. Успешное решение этой задачи зависит от соотношения быстродействия фотоприемника и длительности входного светового импульса. Принцип действия многих оптоэлектронных измерительных систем и систем связи основан на использовании световых импульсов малой длительности (в том числе периодических). Так, в конструкции импульсного оптического рефлектометра применяются полупроводниковые лазеры, генерирующие импульсы длительностью от 1 нс до 10 мкс [1]. Длительность импульсов излучения задающего лазера твердотельного лазерного гироскопа составляет 0,5 мкс [2]. В волоконно-оптических интерферометрических датчиках поверхностно-излучающий лазер генерирует импульсы длительностью 1 нс и периодом следования 1 мкс [3].

Инерционность фотоприемников характеризуется постоянными фронта нарастания и спада фототовета при импульсной засветке. Так, промежуток времени от начала облучения до момента, когда выходная величина достигает 63% от установившегося значения при длительном облучении, называется постоянной фронта нарастания. Постоянная времени спада определяется как интервал времени после прекращения воздействия излучения, по истечении которого спадающий по экспоненте фотосигнал уменьшается до 37%. К примеру, длительность фронта нарастания оптического излучения комплекта аппаратуры для информационного обмена ОМТД-01m составляет 10 нс [4], такое же значение имеет постоянная времени кремниевого фотодиода ФД-256 [5].

Таким образом, современный технологический уровень обеспечивает возможность преобразования фотоприемником модулированного оптического излучения в соответствующую этому световому сигналу периодическую последовательность электрических трапециевидных импульсов длительностью не менее 30 нс (3·10 нс) с фронтом не менее 10 нс и периодом следования не менее 1 мкс.

В [6] представлен подход к измерению разности фаз между двумя периодическими последовательностями трапециевидных электрических импульсов, позволяющий оценивать рассматриваемый параметр используя значения характерных гармонических составляющих спектра суммы этих сигналов. Суть разработанного метода заключается в замене непосредственной регистрации разности фаз между периодическими последовательностями импульсов, регистрацией параметров характерных гармонических составляющих спектра результирующей суммы рассматриваемых сигналов. При этом в рассмотрение принимаются только те гармонические составляющие, которые обладают максимальной чувствительностью к отклонениям фазы и минимальной чувствительностью к некоррелированным изменениям параметров сигналов, обусловленным нестабильностью работы отдельных элементов измерительной аппаратуры. Последнее способствует повышению точности