

Оценка допустимых технологических погрешностей расположения оптических элементов для гиперспектрометра по схеме Оффнера

А.А. Расторгуев¹, С.И. Харитонов^{2,3}, Н.Л. Казанский^{2,3}

¹Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс», ул. Земеца 18, Самара, Россия, 443009

²Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

³Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Рассмотрено математическое моделирование технологических погрешностей расположения оптических элементов для спектрометра по схеме Оффнера. Проведены расчёты условных допусков и анализ их влияния на изображение в плоскости регистратора. С использованием метода статистического моделирования технологической погрешности проведена оценка адекватности выбранных характеристик точности.

1. Введение

На сегодняшний день, гиперспектральное ДЗЗ является перспективным направлением развития рынка информации ДЗЗ. Востребованность данной информации обусловлена высоким пространственным и спектральным разрешением. Гиперспектральная аппаратура позволяет проводить периодическую съёмку земной поверхности [1], эффективно использовать различные длины волн для детального анализа изменений окружающей среды [2], а также решать множество тематических задач [3].

Перспективной является концепция компактного гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера. Результаты испытания макетного образца гиперспектрометра приведены в работе [4]. В работе [5] проведено экспериментальное исследование дифракционной решётки на поверхности выпуклого зеркала. Показано, что распределение энергии по порядкам дифракции согласуется с результатами моделирования. В работах [6-7] рассмотрено моделирование гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в рамках геометрикооптического подхода.

2. Постановка задачи

Конструирование компактного гиперспектрометра по схеме Оффнера должно проводиться в соответствии с требованиями, обеспечивающими создание качественной аппаратуры. Одним из критериев качества конструируемых соединений данной аппаратуры является технологический показатель качества сборки. При конструировании соединений, сборок стараются достичь их точности, характеризуемой погрешностью расположения оптических элементов относительно базовых элементов [8]. Расчёт допустимых погрешностей расположения оптических элементов производят на основе анализа влияния параметров смещения и наклонов оптических элементов на качество изображения [9].

В данном исследовании, для анализа была взята математическая модель гиперспектрометра, состоящего из объектива и спектрометрической части по схеме Оффнера.

Определение технологических допусков проводится для спектрометрической части гиперспектрометра.

Ввиду того, что схема спектрометра по схеме Оффнера дифракционно ограничена [6] и состоит из двух зеркал, предлагается проводить моделирование и оценку допустимой технологической погрешности с использованием автоматизированного способа. Данный способ предполагает трассировку лучей методом элементарных площадок через входной зрачок гиперспектрометра [10] с внесёнными в схему спектрометрической части погрешностями расположения элементов и анализ влияния погрешностей на изображение в плоскости регистратора.

3. Моделирование технологической погрешности

Рассмотрим моделирование технологической погрешности расположения для спектрометрической части прибора. Анализ разновидностей технологических погрешностей показывает, что они приводят к разворотам и поступательным смещениям оптических элементов. Моделирование погрешности удобно проводить с использованием векторного подхода. Для этого пространство спектрометра удобно разбить на пространства зеркал, определив в каждом из них свой локальный базис. Матрица перехода между базисом пространства оптической системы и базисом пространства зеркала определяется моделируемой технологической погрешностью. Приблизённо, развороты зеркал спектрометра могут происходить как вокруг центров кривизны, так и вокруг вершин базовых поверхностей. В общем случае вращение базиса пространства оптического элемента вокруг некой точки пространства оптической системы удобно представить с использованием направляющего вектора и определяющего направление оси OZ оптического элемента. Использование данного подхода обусловлено тем, что развороты оптических элементов могут происходить в произвольных плоскостях.

4. Анализ влияния технологических погрешностей расположения и определение условных допусков

Оценка влияния технологических погрешностей приведена в таблице 1.

Таблица 1. Оценка влияния технологических погрешностей расположения.

Элемент	Смещение / вращение оптического элемента по оси / вокруг оси		Изменения изображения в плоскости регистратора спектрометра
	Тип	Ось	
Большое зеркало	Смещение	OX	смещение спектральной полосы по OX
		OY	смещение спектральной полосы по OY
		OZ	увеличение пятна рассеяния
	Вращение вокруг вершины	OX	смещение спектральной полосы по OY + увеличение пятна рассеяния
		OY	смещение спектральной полосы по OX+ увеличение пятна рассеяния
		OZ	-
Зеркало с дифракционной решёткой	Смещение	OX	смещение спектральной полосы по OX
		OY	смещение спектральной полосы по OY
		OZ	увеличение пятна рассеяния
	Вращение вокруг вершины	OX	смещение по OY+ наклон спектральной полосы + увеличение пятна рассеяния
		OY	смещение по OX+ наклон спектральной полосы + увеличение пятна рассеяния
		OZ	смещение по OY+ наклон спектральной полосы + увеличение пятна рассеяния

Необходимо отметить, что вращение зеркал спектрометра вокруг собственных центров кривизны не дало какого-либо значительного влияния на изображение в плоскости регистратора. Данный результат связан с конструктивной особенностью схемы Оффнера.

Для определения условных допусков [11] необходимо найти максимальные значения отклонений технологических погрешностей для каждого из зеркал спектрометра, в предположении того, что все остальные параметры соответствуют расчётным.

Определение условных допусков необходимо проводить с использованием ограничивающих критериев:

- по допустимому изменению светового потока в пределах пиксела регистратора,
- по допустимым смещениям и разворотам изображения в плоскости регистратора,
- по сохранению ортоскопии изображения.

Критерий допустимого изменения светового потока в пределах пиксела регистратора связан с возможными аберрациями, не приводящими к ухудшению разрешающей способности гиперспектрометра.

Критерий допустимых смещений и разворотов изображения связан с погрешностями линейного и углового положения фотозон регистратора относительно установочных баз.

Критерий ортоскопии связан с сохранением фотограмметрии изображения в плоскости регистратора.

5. Статистическое моделирование технологической погрешности и оценка адекватности точностных характеристик

Наиболее точный результат для оценки адекватности допусков позволяет дать метод статистического моделирования, где случайным образом выбираются значения технологических погрешностей, распределённых в поле их допуска по заданной функции распределения [8]. Данный метод позволяет получить допуски соответствующие практическому опыту, а также исключить предъявление завышенных допусков к положению зеркал спектрометра.

Зачастую законы технологических погрешностей с хорошим приближением можно считать распределёнными по нормальному закону [8,12], т.е.:

$$f(x) = (\sigma\sqrt{2\pi})^{-1} \exp\left(-\frac{(M(x) - x)^2}{2\sigma^2}\right).$$

Для большинства первичных технологических погрешностей математическое ожидание принимается равным нулю $M(x) = 0$, а допуск на погрешность с вероятностью 0.95 принять равным $\delta x = 2\sigma$ [12].

Таким образом, данный закон распределения может быть принят для моделирования условных допусков технологической погрешности расположения зеркал спектрометрической части гиперспектрометра с большим числом независимых модельных экспериментов методом Монте-Карло. В ходе статистического моделирования определяются максимальные значения изменений светового потока в пределах пиксела регистратора, а также смещений, разворотов изображения спектральной полосы и сохранению ортоскопии изображения.

На основании полученных результатов делаются оценки по технологическим допускам расположения зеркал спектрометрической части гиперспектрометра по схеме Оффнера.

6. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26).

7. Литература

- [1] Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
- [2] Журавель, Ю.Н. Особенности обработки гиперспектральных данных дистанционного зондирования при решении задач мониторинга окружающей среды / Ю.Н. Журавель, А.А. Федосеев // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 4. – С. 471-476.

- [3] Классификатор тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов дистанционного зондирования Земли. – Редакция 7. – Иркутск: ООО «Байкальский центр», 2008. – 80 с.
- [4] Карпеев, С.В. Юстировка и исследование макетного образца гиперспектрометра по схеме Оффнера / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, А.Р. Мурдагулов, М.В. Петров // Вестник СГАУ. – 2016. – Т. 15, № 1. – С. 197-206. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-197-206.
- [5] Карпеев, С.В. Исследование дифракционной решётки на выпуклой поверхности как диспергирующего элемента / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 211-217. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-211-217.
- [6] Казанский, Н.Л. Моделирование работы космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, Л.Л. Досколович, А.В. Павельев // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 1. – С. 70-76. –DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-1-70-76.
- [7] Казанский, Н.Л. Моделирование работы гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в рамках геометрической оптики / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, С.И. Карсаков, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 271-280.
- [8] Латыев, С.М. Конструирование точных (оптических) приборов: Учебное пособие / С.М. Латыев. – СПб.: Политехника, 2007. – 579 с.
- [9] Сокольский, М.Н. Допуски и качество оптического изображения / М.Н. Сокольский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 221с.
- [10] Расторгуев, А.А. Моделирование распределения освещённости в плоскости регистратора космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера / А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 3. – С. 399-405. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-399-405.
- [11] Слюсарев, Г.Г. Методы расчёта оптических систем / Г.Г. Слюсарев. – Л.: Машиностроение, 1969. – 672 с.
- [12] Родионов, С.А. Автоматизация проектирования оптических систем: Учеб. пособие для приборостроительных вузов / С.А. Родионов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1982. – 270 с.

Estimation of permissible technological errors in the arrangement of optical elements for the hyperspectrometer according to the Offner's scheme

A.A. Rastorguev¹, S.I. Kharitinov^{2,3}, N.I. Kazanskiy^{2,3}

¹Joint Stock Company "Rocket and Space Center" Progress", Zemetsa street 18, Samara, Russia, 443009

²Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

³Samara National Research University, Moskovskoe highway 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. We considered Mathematical modeling of technological errors in the arrangement of optical elements for the spectrometer according to the Offner's scheme. Calculations of conditional tolerances and analysis of their effect on the image in the plane of the recorder were carried out. We carried out the adequacy of the selected accuracy characteristics with using the method of statistical modeling of technological error.

Keywords: Offner, scheme, modeling, technological, errors.