

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОПУСТИМЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА, ПРОЕКТИРУЕМОГО ПО СХЕМЕ ОФФНЕРА

А.А. Расторгуев<sup>1</sup>, С.И. Харитонов<sup>2,3</sup>, Н.Л. Казанский<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс», Самара, Россия,

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника», Самара, Россия,

<sup>3</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

### Аннотация

Предложен математический аппарат, проведены исследования изображения в плоскости регистратора гиперспектрометра по схеме Оффнера, определены условные допуски на положение элементов спектрометра. Результат моделирования совместного действия погрешностей показал, что вероятность удачной сборки гиперспектрометра с соблюдением требований по качеству изображения будет не меньше 0,9.

**Ключевые слова:** гиперспектрометр, погрешность расположения, допуск, схема Оффнера, моделирование.

**Цитирование:** Расторгуев, А.А. Моделирование допустимых погрешностей расположения оптических элементов для космического гиперспектрометра, проектируемого по схеме Оффнера / А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 424-431. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-424-431.

### Введение

На сегодняшний день одной из перспективных концепций гиперспектральной аппаратуры является использование компактного гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера [1–8]. По данной теме проведены обширные теоретические [9, 10] и практические работы. В части практических исследована дифракционная решётка на выпуклой зеркальной поверхности, разработана и изготовлена оптомеханика, проведена юстировка оптической схемы макетного образца [11, 12]. В работе [13] рассмотрена точная калибровка гиперспектрометра, приводятся данные экспериментальных исследований.

Необходимо сказать, что конструирование компактного гиперспектрометра по схеме Оффнера, т.е. разработка конкретного варианта изделия, должна 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 или сборок стараются достичь их точности, характеризуемой погрешностью расположения оптических элементов относительно базовых элементов. Данная погрешность, являясь результатом действия комбинаций инструментальных первичных погрешностей, называется технологической и характерна для конкретного технологического процесса производства оптического прибора.

Разработка конструкции гиперспектрального прибора должна проводиться исходя из расчётов и оценок, сделанных на проектной стадии. В частности, в рамках проектного этапа определяются предварительные требования по допустимым погрешностям расположения оптических элементов. Данные требования связаны в первую очередь с обеспечением заданных целевых характеристик оптической аппаратуры, а также качества получаемой информации с её

помощью. Полученные на проектном этапе точностные оценки предполагают их выполнение на стадиях конструирования и технологического процесса производства гиперспектральной аппаратуры.

В настоящей работе рассматриваются моделирование и оценка допустимых смещений и разворотов (или погрешностей расположения) оптических элементов гиперспектрального блока по схеме Оффнера в рамках геометрической оптики. Для моделирования использовалась математическая модель гиперспектрометра, изображённая на рис. 1, состоящая:

- из катадиоптрического телескопа с диаметром главного зеркала (ГЗ) 60 мм, вторичного зеркала (ВЗ) 30 мм и фокусным расстоянием ~300 мм;
- гиперспектрального блока по схеме Оффнера, включающего большое сферическое зеркало (БЗ) (радиус кривизны – 159,6 мм), зеркало с дифракционной решёткой (ЗсДР) (радиус кривизны – 80,6 мм) с частотой штрихов 30 лин/мм.

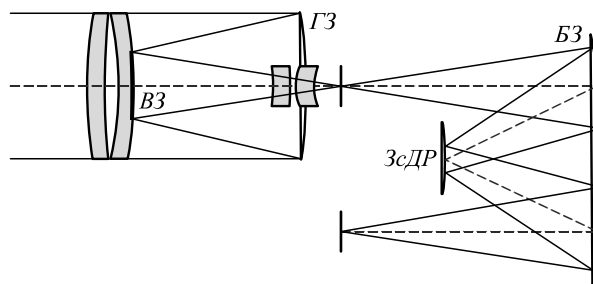


Рис. 1. Оптическая схема гиперспектрометра

Моделирование и оценка допустимых смещений и разворотов, представленные в настоящей статье, носят проектный характер и предваряют первоначальный синтез допусков на первичные погрешности. Полученные результаты призваны ограничить на этапе конструирования допустимые смещения и развороты оптических элементов спектрометра и должны обуславливать заданную точность функционирования

изделия с учётом факторов транспортировки и эксплуатации в условиях космического пространства.

**1. Постановка задачи**

Проектный расчёт допустимых погрешностей расположения оптических элементов производится на основе анализа влияния параметров смещения и наклонов оптических элементов на качество изображения [14].

Для этого в предметной плоскости необходимо сформировать набор точек, перекрывающих полосу захвата прибора, и провести от них трассировку монохроматических лучей в плоскость регистратора. После этого необходимо провести несколько этапов для определения допустимых погрешностей. На первом этапе необходимо оценить влияние на изображение предварительно внесённых в схему спектрометра погрешностей расположения элементов. На втором этапе – разработать ограничивающие критерии на смещения/развороты элементов. А на третьем – определить условные погрешности и дать оценку адекватности полученных результатов.

Ввиду поставленной задачи возникла необходимость дополнить представленный в работах [9, 10, 15] математический аппарат моделируемыми погрешностями расположения элементов спектрометра.

**2. Математический аппарат, используемый при моделировании смещений и разворотов оптических элементов спектрометра по схеме Оффнера в рамках геометрической оптики**

Рассмотрим моделирование погрешности расположения для спектрометрической части прибора. Анализ разновидностей технологических погрешностей показывает, что они приводят к разворотам и поступательным смещениям оптических элементов. Моделирование смещений и разворотов удобно проводить с использованием векторного подхода. Для этого глобальное 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 оптического элемента определяется моделируемой погрешностью.

Случай поступательного смещения

Для случая простого поступательного смещения оптического элемента (погрешности расположения), определяемого вектором  $\mathbf{r}_\Delta = \mathbf{r}_\Delta(x_\Delta, y_\Delta, z_\Delta)$ , компоненты направляющего вектора  $\mathbf{v}$  светового луча в локальном базисе остаются теми же. Если положение точки начала направляющего вектора  $\mathbf{v}$  в глобальном базисе  $(x_0, y_0, z_0)$  определяется вектором  $\mathbf{R}_0$ , то в локальном базисе  $(x', y', z')$  его положение определяется из соотношения:

$$\mathbf{R}'_0 = \mathbf{R}_0 - \mathbf{r}_\Delta. \tag{1}$$

Справедливо и обратное соотношение в случае перехода в базис оптической системы:

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{R}'_0 + \mathbf{r}_\Delta. \tag{2}$$

Случай разворота оптического элемента

В общем случае вращение базиса пространства оптического элемента вокруг некой точки пространства оптической системы удобно представить с использованием направляющего вектора, имеющего компоненты  $\mathbf{e} = \mathbf{e}(e_x(\theta, \phi), e_y(\theta, \phi), e_z(\theta))$ , где  $(\theta, \phi)$  – углы в сферической системе координат, и определяющего направление оси  $OZ$  оптического элемента. Использование данного подхода обусловлено тем, что вращение оптического элемента может происходить в произвольных плоскостях.

Выбор точки вращения оптического элемента определяется моделируемой погрешностью. Для моделирования децентрировки точка вращения может располагаться как в центре кривизны, так и в вершине сферической поверхности оптического элемента.

Легко заметить, что углы  $\phi = \pi/2, 3\pi/2$  соответствуют поворотам в плоскости  $YZ$ , а углы  $\phi = 0, \pi$  – в плоскости  $XZ$ .

Для случая погрешности разворота оптического элемента вектора локального базиса, ориентированного по направляющему вектору  $\mathbf{e}$ , несложно построить в виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}' &= (e_x, e_y, e_z)^T, \\ \mathbf{x}' &= [\mathbf{y} \times \mathbf{z}'] = (e_z, 0, -e_x)^T, \\ \mathbf{y}' &= [\mathbf{z}' \times [\mathbf{y} \times \mathbf{z}']] = (-e_x e_y, e_x^2 + e_z^2, -e_y e_z)^T, \end{aligned} \tag{3}$$

где  $\mathbf{y} = \mathbf{y}(0, 1, 0)^T$ .

Полученные вектора нормируются:

$$\mathbf{x}' = \frac{\mathbf{x}'}{|\mathbf{x}'|}, \quad \mathbf{y}' = \frac{\mathbf{y}'}{|\mathbf{y}'|}, \quad \mathbf{z}' = \frac{\mathbf{z}'}{|\mathbf{z}'|}. \tag{4}$$

Матрица преобразования координат имеет вид:

$$\mathbf{M} = [\mathbf{x}', \mathbf{y}', \mathbf{z}'] = \begin{bmatrix} e_z & -e_x e_y & e_x \\ 0 & e_x^2 + e_z^2 & e_y \\ -e_x & -e_y e_z & e_z \end{bmatrix}. \tag{5}$$

Направляющий вектор  $\mathbf{v}$  светового луча в новом базисе определяется как:

$$\mathbf{v}' = \mathbf{M}^T \times \mathbf{v}. \tag{6}$$

Для положения точки начала направляющего вектора луча  $\mathbf{R}_0$  в локальном базисе имеем:

$$\mathbf{R}'_0 = \mathbf{M}^{-1} \times \mathbf{R}_0. \tag{7}$$

Соответственно, справедливы обратные соотношения:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_0 &= \mathbf{M} \times \mathbf{R}'_0, \\ \mathbf{v} &= \mathbf{M} \times \mathbf{v}'. \end{aligned} \tag{8}$$

Случай разворота дифракционного зеркала

Для описания поворота дифракционного сферического зеркала дополнительно введём погрешность на отклонение направления штрихов дифракционной решётки от оси  $OY$  глобального базиса спектрометра. Допустим данная погрешность в плоскости  $XU$  задаётся

углом  $\alpha$  или вектором  $\mathbf{s} = \mathbf{s}(\sin(\alpha), 0, 0)$ . Тогда вектор, определяющий направление штрихов решётки:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{y} + \mathbf{s}, \quad \tilde{\mathbf{y}} = \tilde{\mathbf{y}}(\sin(\alpha), 1, 0). \tag{9}$$

Вектора базиса, ориентированного по вектору  $\mathbf{e}$ , с учётом погрешности на отклонение направления штрихов решётки от оси  $OY$  строятся так же, как в формулах (3), и с учётом нормировки аналогично (4) матрица перехода будет иметь вид:

$$\tilde{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} e_z & (e_y^2 + e_z^2)\sin(\alpha) - e_x e_y & e_x \\ -e_z \sin(\alpha) & e_x^2 + e_z^2 - e_x e_y \sin(\alpha) & e_y \\ e_y \sin(\alpha) - e_x & -e_z (e_x \sin(\alpha) + e_y) & e_z \end{bmatrix}. \tag{10}$$

Легко заметить, что при  $\alpha = 0$  матрица перехода  $\tilde{\mathbf{M}}$  для дифракционного зеркала преобразуется в матрицу  $\mathbf{M}$  для поверхности обычного оптического элемента.

**3. Анализ исходных параметров и результатов влияния погрешностей расположения на геометрию изображения в плоскости регистратора**

Исходные параметры моделирования

Для получения точечной диаграммы, характеризующей геометрические параметры изображения, в предметной плоскости (на расстоянии 500 км) был сформирован набор точечных источников. Для того чтобы перекрыть полосу захвата гиперспектрометра, источники были расположены равномерно по оси  $Y$  направления щели спектрометра (с координатой по оси  $X=0$ ). В данном исследовании полоса захвата 24 км была равномерно перекрыта 9 точечными источниками с шагом в 3 км. Рассматриваемый спектральный диапазон от 400 до 900 нм был равномерно разбит с шагом в 50 нм. В плоскости регистратора гиперспектрометра для первого порядка дифракции формировалась точечная диаграмма средних значений координат по каждому из точечных источников.

Характеристика изображения в плоскости регистратора

Анализ результата моделирования показал, что спектрометрам данного типа свойственна дисторсия. Данная aberrация приводит к нарушению подобия монохроматических линий спектра и описывается как:

- изменение координаты  $X$  спектральной линии вдоль  $Y$  направления щели, выражающееся как кривизна спектральной линии (рис. 2);
- изменение координаты  $Y$  спектра вдоль направления спектральной координаты  $X$ , выражающееся как кривизна спектральной полосы (рис. 3);
- трапецидальность спектральных полос, выражающаяся как разнонаправленный наклон спектральных полос в зависимости от координаты щели (рис. 3).

В табл. 1 приведены параметры изображения, дающие полное представление о геометрических искажениях спектра изображения.

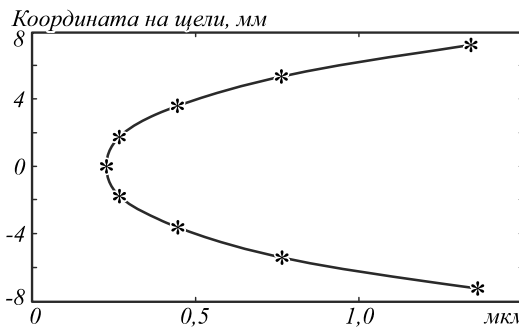


Рис. 2. Кривизна монохроматических линий спектра вдоль направления щели (рис. 1)

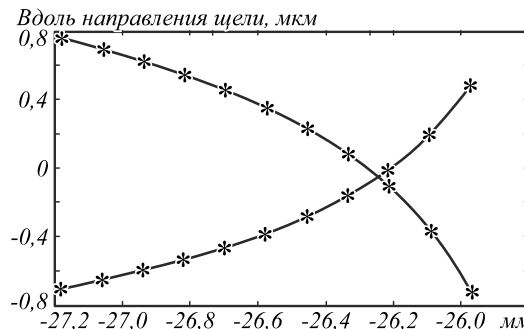


Рис. 3. Относительная кривизна и трапецидальность спектральных полос на противоположных краях щели (рис. 1)

Табл. 1. Геометрические параметры изображения

Параметр	Мин., мкм	Макс., мкм
Кривизна спектральной линии	1,116	1,259
Кривизна спектральной полосы	0,006	0,371
Трапецидальность спектральной полосы	0,001	1,483

Анализ влияния погрешностей расположения на параметры изображения

Следующим этапом исследования стала оценка влияния предварительно внесённых в оптическую схему спектрометра условных погрешностей на качество изображения в плоскости регистратора. Действие условных погрешностей описывается как смещение/разворот отдельного оптического элемента при условии того, что положение остальных элементов соответствует расчётным.

Оценка влияния относительно малых смещений и разворотов элементов спектрометра представлена в табл. 2. Необходимо отметить, что ввиду конструктивной особенности схемы спектрометра вращение зеркал вокруг собственных центров кривизны не оказало какого-либо влияния на качество изображения в плоскости регистратора и может рассматриваться исходя из задач расчёта габаритов и исключения виньетирования световых пучков.

**4. Определение условных допусков и оценка адекватности полученных результатов**

Исходные параметры и результаты моделирования

Для определения условных допусков [16] необходимо найти максимальные значения отклонений погрешностей расположения для каждого из зеркал спектрометра в предположении того, что все осталь-

ные параметры соответствуют расчётным. Определение условных допусков необходимо проводить с использованием ограничивающих критериев. Исходя из оценок влияния условных погрешностей расположения на параметры изображения, были выделены следующие критерии:

- по допустимому изменению размера пятна рассеяния в пределах пиксела регистратора;
- смещению изображения в плоскости регистратора;
- ортоскопии изображения.

Табл. 2. Оценка влияния условных погрешностей расположения большого зеркала (БЗ) и зеркала с дифракционной решёткой (ЗсДР) спектрометра (изменения изображения расположены по убыванию относительной величины проявления)

Смещение/вращение оптического элемента по оси / вокруг оси		Изменения изображения в плоскости регистратора спектрометра
Тип	Ось	
Смещение	OX	Смещение изображения по OX
	OY	Смещение изображения по OY
	OZ	Увеличение пятна рассеяния
Вращение вокруг вершины	OX	Увеличение пятна рассеяния, смещение изображения по OY, увеличение трапецеидальности спектральной полосы
	OY	Увеличение пятна рассеяния, смещение изображения по OX, увеличение кривизны спектральной линии
	OZ	<u>Только для ЗсДР</u> Увеличение трапецеидальности спектральной полосы, кривизны спектральной линии, пятна рассеяния

Критерий допустимого изменения пятна рассеяния в пределах пиксела регистратора связан с возможными aberrациями, не приводящими к ухудшению пространственной разрешающей способности гиперспектрометра. Разрешающая способность определялась по критерию анализа распределения световой энергии в плоскости регистратора от двух светящихся точек, расположенных в плоскости изображения гиперспектрометра. Критерий считался выполненным, если по всем точкам изображения величина интенсивности центрального минимума суммарного распределения не превышала 75% от меньшего из соседних максимумов. С этой целью в исходных параметрах моделирования, представленных в параграфе 3 настоящей статьи, точечные источники были дополнены соответствующими парами на необходимом расстоянии, определяющем разрешающую способность оптической системы. В данной работе были выполнены расчёты с учётом сохранения разрешающей способности гиперспектрометра – 20 м и 30 м с расстояния 500 км. В случае 20 м в плоскости изображения расстояния между максимумами ФРТ составило 12 мкм, для 30 м – 18 мкм.

Критерий допустимого смещения изображения в плоскости регистратора связан с погрешностями линейного и углового положения фотозон регистратора относительно установочных баз. Здесь в качестве

критерия выбрана типовая погрешность линейного расположения фотоприёмного устройства 100 мкм.

Критерий сохранения ортоскопии связан с допустимой дисторсией изображения в плоскости регистратора. Для случая сохранения разрешения 20 м и из расчёта шестой части расстояния между ФРТ было принято, что максимальное действие дисторсии по абсолютному значению в плоскости XY не должно превышать 2 мкм. Для разрешения 30 м – абсолютное действие дисторсии не более 3 мкм. Полученные результаты представлены в табл. 3, 4.

Табл. 3. Условные допуски с обеспечением разрешающей способности 20 м (вариант 1)

Элемент	Ось	Погрешность положения		Погрешность децентрировки, вокруг осей, град (с.)
		Верх. предел, мкм	Ниж. предел, мкм	
БЗ	OX	25	-25	0,0094 (34)
	OY	25	-25	0,0094 (34)
	OZ	14	-12	–
ЗсДР	OX	52	-52	0,0375 (135)
	OY	52	-52	0,0375 (135)
	OZ	25	-30	0,0247 (89)

Табл. 4. Условные допуски с обеспечением разрешающей способности 30 м (вариант 2)

Элемент	Ось	Погрешность положения		Погрешность децентрировки, вокруг осей, град (с.)
		Верх. предел, мкм	Ниж. предел, мкм	
БЗ	OX	25	-25	0,0094 (34)
	OY	25	-25	0,0094 (34)
	OZ	22	-19	–
ЗсДР	OX	52	-52	0,0375 (135)
	OY	52	-52	0,0375 (135)
	OZ	40	-46	0,0717 (258)

Из представленных результатов видно, что наиболее жёсткие требования по точности предъявляются к угловому и линейному положению большого зеркала спектрометра по оси Z (табл. 4). Высокие требования к точности углового положения дифракционного зеркала относительно оси спектрометра обусловлены сохранением надлежащего уровня ортоскопии изображения в плоскости регистратора.

Оценка адекватности полученных результатов

Наиболее точный результат оценки адекватности допусков позволяет дать метод статистического моделирования, где случайным образом выбираются значения погрешностей, распределённых в поле их допуска по заданной функции распределения. Данный метод позволяет получить допуски, соответствующие практическому опыту, а также исключить предъявление завышенных допусков к положению зеркал спектрометра. При этом наиболее разумным представляется использование здесь функции распределения Гаусса, которая, как известно, с хорошим приближением описывает законы распределения технологических погрешностей.

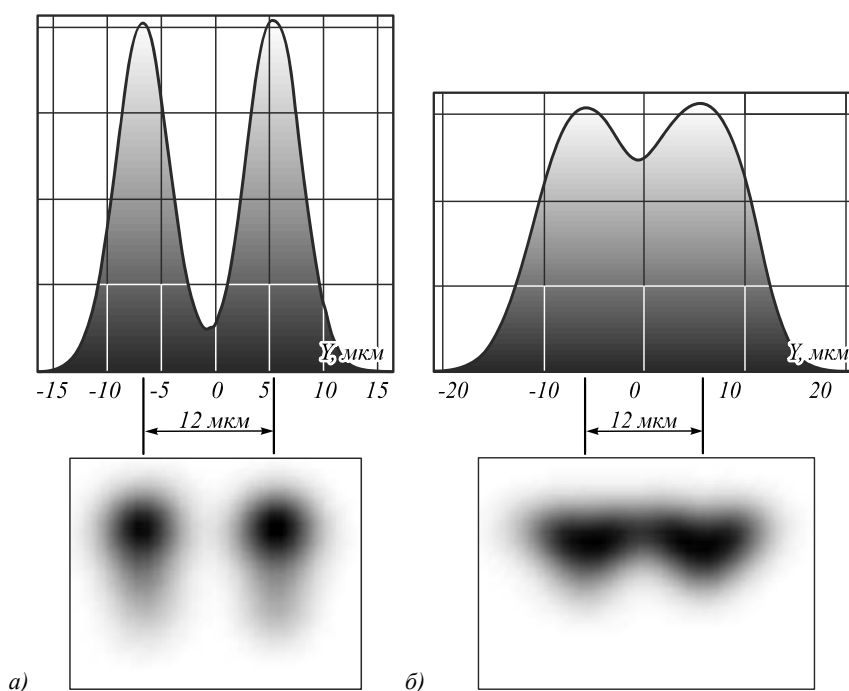


Рис. 4. Профиль (вдоль направления щели) и изображение монохроматических ФРТ (вариант 1):

без погрешности расположения (а); с погрешностью расположения БЗ (14 мкм) (б)

В данном исследовании математическое ожидание погрешностей было принято равным нулю. Предельное рассеяние (с доверительной вероятностью равной 0,997) погрешностей было принято совпадающим с границами поля допуска ( $\delta = 3\sigma$ ). Для допусков с одинаковыми пределами использовался закон Гаусса с симметричным полем, для допусков с разными пределами – закон Гаусса с несимметричными полями. Генерация нормально распределённых независимых выборок проводилась с использованием центральной предельной теоремы. Вектор направления для случая разворотов находился в поле от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  и имел равномерное распределение.

Результаты моделирования совместного действия погрешностей представлены в табл. 5.

Табл. 5. Результаты моделирования совместного действия погрешностей

Параметр	Вариант 1	Вариант 2
Всего итераций, шт.	1000	1000
Число удачныхборок, шт.	927	918
Число неудачныхборок, шт.	73	82
Процент удач, %	<b>92,7</b>	<b>91,8</b>
Процент неудач, %	<b>7,3</b>	<b>8,2</b>
Распределение процента неудач по критериям		
Разрешающая способность, % (шт.)	26 (19)	35 (29)
Смещение, % (шт.)	74 (54)	65 (53)
Ортоскопия, % (шт.)	0 (0)	0 (0)

**Заключение**

В ходе работы был предложен математический аппарат, проведены исследования изображения в

плоскости регистратора гиперспектрометра, определены условные допуски на положение элементов спектрометра. Результат моделирования совместного действия погрешностей показал, что вероятность удачной сборки гиперспектрометра с соблюдением требований по качеству изображения будет не меньше 0,9. Полученные допуски могут быть использованы как ограничения при разработке конструкции гиперспектрального блока с учётом факторов транспортировки и эксплуатации прибора в условиях космического пространства. Разработанный математический аппарат может быть использован для имитации законов распределения технологических первичных погрешностей и получения результата их влияния для конкретной конструкции гиперспектрального блока.

**Благодарности**

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 16-29-11744, № 16-29-09528 и государственного задания ИСОИ РАН (соглашение № 007-ГЗ/43363/26).

**Литература**

1. **Mouroulis, P.** Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy / P. Mouroulis, R.G. Sel-lar, D.W. Wilson // Optical Engineering. – 2007. – Vol. 46, Issue 6. – 063001. – DOI: 10.1117/1.2749499.
2. **Mouroulis, P.** Convex grating types for concentric imaging spectrometers / P. Mouroulis, D.W. Wilson, P.D. Maker, R.E. Muller // Applied Optics. – 1998. – Vol. 37, Issue 31. – P. 7200-7208. – DOI: 10.1364/AO.37.007200.
3. **Prieto-Blanco, X.** The Offner imaging spectrometer in quadrature / X. Prieto-Blanco, C. Montero-Orille, H. Gon-zález-Nuñez, M.D. Mouriz, E.L. Lago, R. de la Fuente //

- Optics Express. – 2010. – Vol. 18, Issue 12. – P. 12756-12769. – DOI: 10.1364/OE.18.012756.
4. **Prieto-Blanco, X.** Analytical design of an Offner imaging spectrometer / X. Prieto-Blanco, C. Montero-Orille, B. Couce, R. de la Fuente // Optics Express. – 2006. – Vol. 14, Issue 20. – P. 9156-9168. – DOI: 10.1364/OE.14.009156.
  5. **Lee, J.H.** Optical design of a compact imaging spectrometer for STSAT3 / J.H. Lee, T.S. Jang, H.-S. Yang, S.-W. Rhee // Journal of the Optical Society of Korea. – 2008. – Vol. 12, Issue 4. – P. 262-268. – DOI: 10.3807/JOSK.2008.12.4.262.
  6. **Lee, J.H.** Optomechanical design of a compact imaging spectrometer for a microsatellite STSAT3 / J.H. Lee, Ch.W. Lee, Y.M. Kim, J.W. Kim // Journal of the Optical Society of Korea. – 2009. – Vol. 13, Issue 2. – P. 193-200. – DOI: 10.3807/JOSK.2009.13.2.193.
  7. **Lee, J.H.** A very compact imaging spectrometer for the microsatellite STSAT3 / J.H. Lee, K.I. Kang, J.H. Park // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – Vol. 32, Issue 14. – P. 3935-3946. – DOI: 10.1080/01431161003801328.
  8. **Lee, J.H.** Flight model development of a compact imaging spectrometer for a microsatellite STSAT3 / J.H. Lee, T.S. Jang, K.I. Kang, S.-W. Rhee // Proceedings of the Optical Remote Sensing of the Environment. – 2010. – OMB3. – DOI: 10.1364/ORSE.2010.OMB3.
  9. **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.
  10. **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.
  11. **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.
  12. **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 Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2016. – Т. 15, № 1. – С. 197-206. – DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-197-206.
  13. **Подлипов, В.В.** Калибровка изображающего гиперспектрометра / В.В. Подлипов, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 869-874. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-869-874.
  14. Допуски и качество оптического изображения / М.Н. Сокольский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1989. – 221 с. – ISBN: 5-217-00547-5.
  15. **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.
  16. Методы расчёта оптических систем / Г.Г. Слюсарев. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, 1969. – 672 с.

#### Сведения об авторах

**Расторгуев Андрей Алексеевич**, 1984 года рождения, в 2006 году окончил физический факультет Самарского государственного университета по специальности «Оптика», работает ведущим инженером-конструктором в отделе целевой эффективности и подтверждения ТТХ КК и КС, гиперспектральных комплексов, обработки и взаимодействия с потребителями информации ДЗЗ. С 2016 года обучается в аспирантуре Самарского университета. Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, моделирование работы гиперспектральной аппаратуры. E-mail: [goto.anras@gmail.com](mailto:goto.anras@gmail.com).

**Харитонов Сергей Иванович**, 1961 года рождения. Доктор физико-математических наук, доцент кафедры наноинженерии, ведущий научный сотрудник лаборатории дифракционной оптики ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. 1984 г. – окончил физический факультет Самарского государственного университета. 1993 г. – защитил кандидатскую диссертацию на тему «Асимптотические методы дифракционного расчёта фокусаторов лазерного излучения». 2010 г. – защитил докторскую диссертацию на тему «Асимптотические методы расчёта дифракции когерентного электромагнитного излучения на дифракционных оптических элементах». Область научных интересов: дифракционная, квантовая оптика, физика плазмы. В списке научных работ С.И. Харитонova 87 статей, 5 авторских свидетельств и патентов. E-mail: [prognoz2007@gmail.com](mailto:prognoz2007@gmail.com).

**Казанский Николай Львович**, 1958 года рождения. В 1981 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (1996 год), профессор, работает руководителем Института систем обработки изображений РАН – филиала Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики Самарского университета. Заведующий базовой (Самарского университета в ИСОИ РАН) кафедрой высокопроизводительных вычислений. Является членом международных научных обществ OSA, SPIE и IAPR. Н.Л. Казанский – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Н.Л. Казанского 290 статей, 12 монографий, 53 авторских свидетельства и патента.

Страница в интернете: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazanskiy.htm>. E-mail: [kazanskiy@ssau.ru](mailto:kazanskiy@ssau.ru).

ГРПТИ: 29.31.29.

Поступила в редакцию 11 апреля 2018 г. Окончательный вариант – 26 мая 2018 г.

**MODELING OF ARRANGEMENT TOLERANCES FOR THE OPTICAL ELEMENTS IN A SPACEBORNE OFFNER IMAGING HYPERSPECTROMETER**

A.A. Rastorguev<sup>1</sup>, S.I. Kharitonov<sup>2,3</sup>, N.L. Kazanskiy<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Joint Stock Company "Rocket and Space Center" Progress", Samara, Russia,

<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Samara, Russia,

<sup>3</sup>Samara National Research University, Samara, Russia

**Abstract**

We propose mathematical tools and analyze the quality of an image in the detection plane of an Offner imaging hyperspectrometer, evaluating conditional tolerances for the position of the spectrometer elements. The results of modeling of a combined effect of the arrangement errors show that the probability for the hyperspectrometer to be successfully assembled in compliance with the requirements for image quality is not lower than 0.9.

**Keywords:** hyperspectrometer, arrangement error, tolerances, Offner scheme, modeling.

**Citation:** Rastorguev AA, Kharitonov SI, Kazanskiy NL. Modeling of arrangement tolerances for the optical elements in a spaceborne Offner imaging hyperspectrometer. *Computer Optics* 2018; 42(3): 424-431. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-424-431.

**Acknowledgements:** The work was partly funded by the Russian Foundation for Basic Research under RFBR grants ## 16-29-11744, 16-29-09528 and under an IPSI RAS state contract (Agreement 007-Г3/43363/26).

**References**

[1] Mouroulis P, Sellar RG, Wilson DW. Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy. *Opt Eng* 2007; 46(6): 063001. DOI: 10.1117/1.2749499.

[2] Mouroulis P, Wilson DW, Maker PD, Muller RE. Convex grating types for concentric imaging spectrometers. *Appl Opt* 1998; 37(31): 7200-7208. DOI: 10.1364/AO.37.007200.

[3] Prieto-Blanco X, Montero-Orille C, González-Nuñez H, Mouriz MD, Lago EL, de la Fuente R. The Offner imaging spectrometer in quadrature. *Opt Express* 2010; 18(12): 12756-12769. DOI: 10.1364/OE.18.012756.

[4] Prieto-Blanco X, Montero-Orille C, Couce B, R. de la Fuente. Analytical design of an Offner imaging spectrometer. *Opt Express* 2006; 14(20): 9156-9168. DOI: 10.1364/OE.14.009156.

[5] Lee JH, Jang TS, Yang H-S, Rhee S-W. Optical Design of A Compact Imaging Spectrometer for STSAT3. *Journal of the Optical Society of Korea* 2008; 12(4): 262-268. DOI: 10.3807/JOSK.2008.12.4.262.

[6] Lee JH, Lee CW, Kim YM, Kim JW. Optomechanical design of a compact imaging spectrometer for a microsatellite STSAT3. *Journal of the Optical Society of Korea* 2009; 13(2): 193-200. DOI: 10.3807/JOSK.2009.13.2.193.

[7] Lee JH, Kang KI, Park JH. A very compact imaging spectrometer for the micro-satellite STSAT3. *International Journal of Remote Sensing* 2011; V. 32, Issue 14: 3935-3946. DOI: 10.1080/01431161003801328.

[8] Lee JH, Jang TS, Kang KI, Rhee SW. Flight model development of a compact imaging spectrometer for a microsatellite STSAT3. *Proc Optical Remote Sensing of the Environment* 2010: OMB3. DOI: 10.1364/ORSE.2010.OMB3.

[9] Kazanskiy NL, Kharitonov SI, Karsakov SI, Khonina SN. Modeling action of a hyperspectrometer based on the Offner scheme within geometric optics. *Computer Optics* 2014; 38(2): 271-280.

[10] Kazanskiy NL, Kharitonov SI, Doskolovich LL, Pavelyev AV. Modeling the performance of a spaceborne hyperspectrometer based on the Offner scheme. *Computer Optics* 2015; 39(1): 70-76. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-1-70-76.

[11] Karpeev SV, Khonina SN, Kharitonov SI. Study of the diffraction grating on a convex surface as a dispersive element. *Computer Optics* 2015; 39(2): 211-217. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-211-217.

[12] Karpeev SV, Khonina SN, Murdagulov AR, Petrov MV. Alignment and study of prototypes of the Offner hyperspectrometer. *Vestnik of the Samara State Aerospace University* 2016; 15(1): 197-206. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-197-206.

[13] Podlipnov VV, Skidanov RV. Calibration of an imaging hyperspectrometer. *Computer Optics* 2017; 41(6): 869-874. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-869-874.

[14] Sokolsky MN. Tolerances and the quality of the optical image [In Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publisher; 1989. ISBN: 5-217-00547-5.

[15] Rastorguev AA, Kharitonov SI, Kazanskiy NL. Modeling the illuminance distribution in the detection plane of a spaceborne Offner hyperspectrometer. *Computer Optics* 2017; 41(3): 399-405. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-399-405.

[16] Slyusarev GG. Methods of calculating optical systems [In Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publisher; 1969.

**Author's information**

**Andrey Alekseevich Rastorguev** (b. 1984), in 2006 graduated from Physics department of Samara State University, specializing in Optics. He has been working as a leading design engineer with the Progress Center at the department of Target Efficiency and Performance Verification of Space Vehicles, Hyperspectral Complexes, and ERS Data.

Since 2016 he has been studying at a post-graduate course of Samara University. Areas of scientific interests: earth remote sensing, modeling of hyperspectral equipment. E-mail: [goto.anras@gmail.com](mailto:goto.anras@gmail.com).

**Sergey Ivanovich Kharitonov**, leading researcher of Diffractive Optics laboratory in the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Doctor of Physical and Mathematical Sciences. 1984 – graduated from Physics department of Samara State University. 1993 – defended his dissertation “Asymptotic methods of calculation of the diffraction of laser radiation focuser”. 2010 – defended his doctoral thesis on “Asymptotic methods for calculating the diffraction of coherent electromagnetic radiation in diffractive optical elements”. Research interests: diffraction, quantum optics, plasma physics. His list of publications contains 87 research articles and 5 patents. E-mail: [prognoz2007@gmail.com](mailto:prognoz2007@gmail.com).

**Nikolay Lvovich Kazanskiy** (b. 1958), graduated with honors (1981) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, Samara National Research University), majoring in Applied Mathematics. He received his Candidate in Physics & Maths (1988) and Doctor in Physics & Maths (1996) degrees from Samara University. He is the director of Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), also holding a part-time position of a professor at Technical Cybernetics sub-department of Samara University, holding the chair at the sub-department of High-Performance Computing at IPSI RAS. He is an OSA-, SPIE- and IAPR-member. He is co-author of 290 scientific papers, 12 monographs, 53 inventions and patents. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics.

Website: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazanskiy.htm>. E-mail: [kazanskiy@ssau.ru](mailto:kazanskiy@ssau.ru).

---

*Received April 11, 2018. The final version – May 26, 2018.*

---