

Исследование основных рабочих параметров гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера

С.И. Харитонов^{а,б}, Ю.С. Стрелков^{а,б}, Н.Л. Казанский^{а,б}

^а Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, ул. Молодогвардейская, 151, Самара, Россия

^б Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

Аннотация

В статье рассмотрено моделирование гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера с дифракционной решёткой, в рамках геометрооптического подхода. Показано, что при параметрах схемы, характерных для аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, функции рассеяния точки для исследуемого спектрального диапазона обладают размерами меньше или сравнимыми с размерами элементов используемых ПЗС-матриц. Получен внешний вид для функций рассеяния и проведено сравнение их параметров с их аналогами, полученными в программе Zemax.

Ключевые слова: гиперспектрометр; схема Оффнера; дифракционная решётка; функция рассеяния точки; трассировка лучей

1. Введение

Работа систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) основана на анализе информации на различных длинах волн [1-2]. Для получения такой информации используются изображающие устройства, называемые гиперспектрометрами. Основными характеристиками этих устройств являются пространственное и спектральное разрешение.

Принцип работы гиперспектрометров основан на описании характеристик земной поверхности, основываясь на спектральном составе её изображения. Хотя спектры поглощения и отражения Земной поверхности были хорошо изучены уже достаточно давно. Их использование в оптических устройствах ДЗЗ, приобрело своё распространение относительно недавно. Причиной низкого распространения использования подобного рода спектральных приборов было низкое геометрическое разрешение авиаспектрометров, которые могли дать информацию о местности только вдоль линии полёта и позволяли судить только о свойствах довольно протяжённых объектов [3-5]. Появление таких устройств, как гиперспектрометры, было следствием ряда технологических прорывов, таких как полихроматоры с высокой спектральной чувствительностью и высокоразрешающих матриц, состоящих из приборов с зарядовой связью (ПЗС-матриц).

Качество изображения, а также число спектральных каналов напрямую зависят от размера функции рассеяния точки (ФРТ) гиперспектрометра. В свою очередь, ФРТ зависит от длины волны, и это является причиной неравномерности распределения спектральных каналов, т.е. с ростом длины волны уменьшается их плотность. Детальное исследование такого поведения оптической системы позволит с большей точностью определять число возможных спектральных каналов, а также позволит улучшить рабочие характеристики устройства.

2. Постановка задачи

Прежде чем изображение, полученное с помощью гиперспектральной аппаратуры, может быть представлено в виде гиперспектрального куба, оно должно пройти несколько стадий обработки. Для того, чтобы иметь возможность провести эти стадии, необходимо знать о таких параметрах системы гиперспектрометра, как спектральное разрешение, размер ФРТ и вид ФРТ. Для гиперспектрометров характерно то, что изображение в виде точки в нём можно получить только от точечного монохроматического источника, для остальных точечных источников изображение будет линией частично или полностью непрерывной (изображение будет спектром, который одновременно является спектральной характеристикой этой точки).

Чтобы иметь возможность оценить качество гиперспектральных изображений, а также параметры ПЗС-матрицы, используемой в этом устройстве, необходимо определить зависимость размера ФРТ от длины волны и угла падения лучей в фокальной плоскости устройства. Далее везде будем считать размером ФРТ средне - квадратичный радиус распределения точек пересечения, трассируемых устройством лучей, с плоскостью детектора.

Устройство рассматриваемого гиперспектрометра, состоит из двух основных частей - изображающей и спектральной. Изображающей частью является катодиоптрический телескоп, методика расчёта которого изложена в статье [6], спектральной частью – зеркальная схема Оффнера, описанная в статьях [7-11].

Зеркальная схема Оффнера в теории представляет собой два соосных сферических зеркала, одно из которых выпуклое, а другое вогнутое, входной щели, определяющей методику сканирования и детектора в плоскости изображения (она же ПЗС-матрица). Радиус выпуклого зеркала, как правило, в два раза меньше радиуса вогнутого,

также на него нанесена дифракционная решётка. Такая система обладает единичным увеличением и практически полностью лишена сферических aberrаций. Перед тем, как попасть в спектральную часть, лучи, прошедшие изображающую систему, падают на входную щель, которая их обрезает, превращая в тонкий пучок. Обрезанный пучок падает на вогнутое зеркало, отражается, и попадает на выпуклое сферическое зеркало с дифракционной решёткой, которое разлагает его в спектр. Полученный спектр, в свою очередь, отражается обратно на вогнутое зеркало, которое перенаправляет его и фокусирует в плоскости детектора. Моделированию системы, состоящей из изображающего и спектрального блоков, и будет посвящена эта работа.

3. Моделирование работы гиперспектрометра

Гиперспектрометр состоит из спектральной и изображающей частей. В конструкцию спектральной части входят три элемента: сферическое зеркало, сферическая отражающая дифракционная решётка и входная щель. Радиус отражающей выпуклой решётки 80,605 мм, радиус вогнутого зеркала 159,644 мм. Дифракционная решётка расположена не на оси симметрии системы, а с небольшим смещением вниз, равным 0,198 мм и наклоном 0,17 градусов. Плотность штрихов 0,028 штриха на микрометр. Порядок дифракции -1. Изображающая часть является катодиоптрическим телескопом, описанным в статье [6]. Особенности конструкции показаны на рисунке 1.

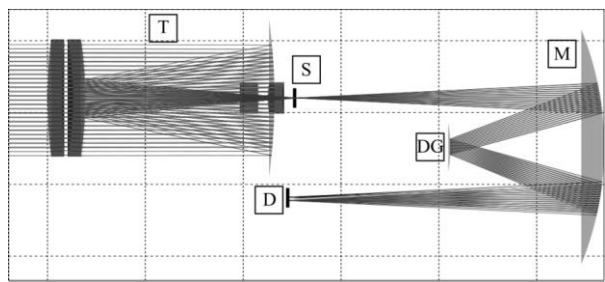


Рис. 1. Конструкция гиперспектрометра: Т – катодиоптрический телескоп; S – щель; М – вогнутое зеркало; DG – дифракционная решётка; D – детектор (ПЗС-матрица). Изображающая часть: М. Спектральная часть: S, M, DG, D.

3.1. Моделирование нулевого порядка дифракции

Сравнение с нулевым порядком дифракции проводилось для того, что определить есть ли различия между результатами моделирования схемы Оффнера, полученными в Zemax и MATLAB.

В таблице 1 представлены изображения, демонстрирующие распределение лучей в плоскости детектора для трёх пучков, падающих на устройство под углами 0° , $0,8^\circ$, $1,227^\circ$. Каждый из пучков имеет три спектральные компоненты, определяемые следующими длинами волн: $\lambda = 450$ нм, $\lambda = 640$ нм, $\lambda = 1050$ нм.

Из таблицы 1 видно, что, несмотря на различия полученных значений, результаты обеих программ находятся в необходимых пределах, установленных конструктивными особенностями современных ПЗС-матриц, а, именно, все размеры не превосходят 12-15 мкм. Несмотря на то, что геометрия пятен отличается, средний квадратичный радиус, рассчитанный и представленный на рисунке 2а и 2б, говорит о близком значении размеров, полученных в Zemax и MATLAB.

Моделирование схемы Оффнера с использованием пучка, состоящего всего из трёх спектральных компонент, достаточно только для приблизительной иллюстрации поведения схемы и визуализации внешнего вида ФРТ. Поэтому было проведено моделирование для всего спектрального диапазона от 450 нм до 1050 нм с шагом в 1 нм. Как и раньше, были рассмотрены три пучка, падающие на устройство под углами 0° , $0,8^\circ$, $1,227^\circ$. Результаты моделирования представлены в виде графиков на рисунках 2а и 2б. Рисунок 2а иллюстрирует полученную в MATLAB зависимость изменения среднего квадратичного радиуса ФРТ от длины волны и угла падения на устройство, рисунок 2б делает аналогичное, но для результатов, полученных в Zemax.

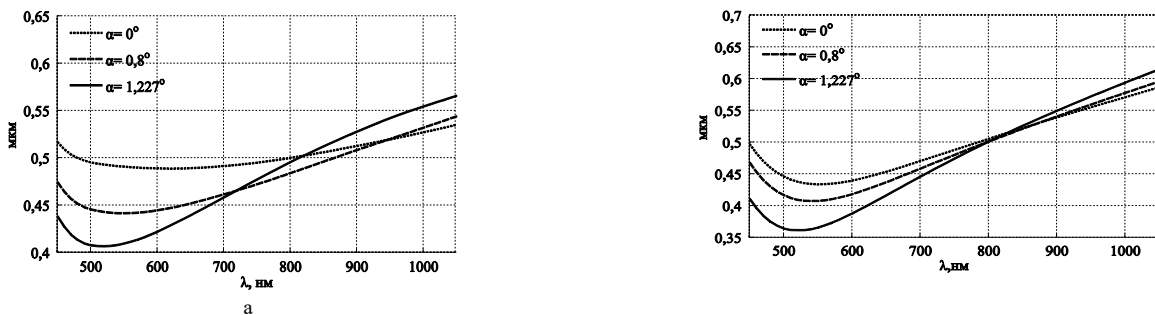
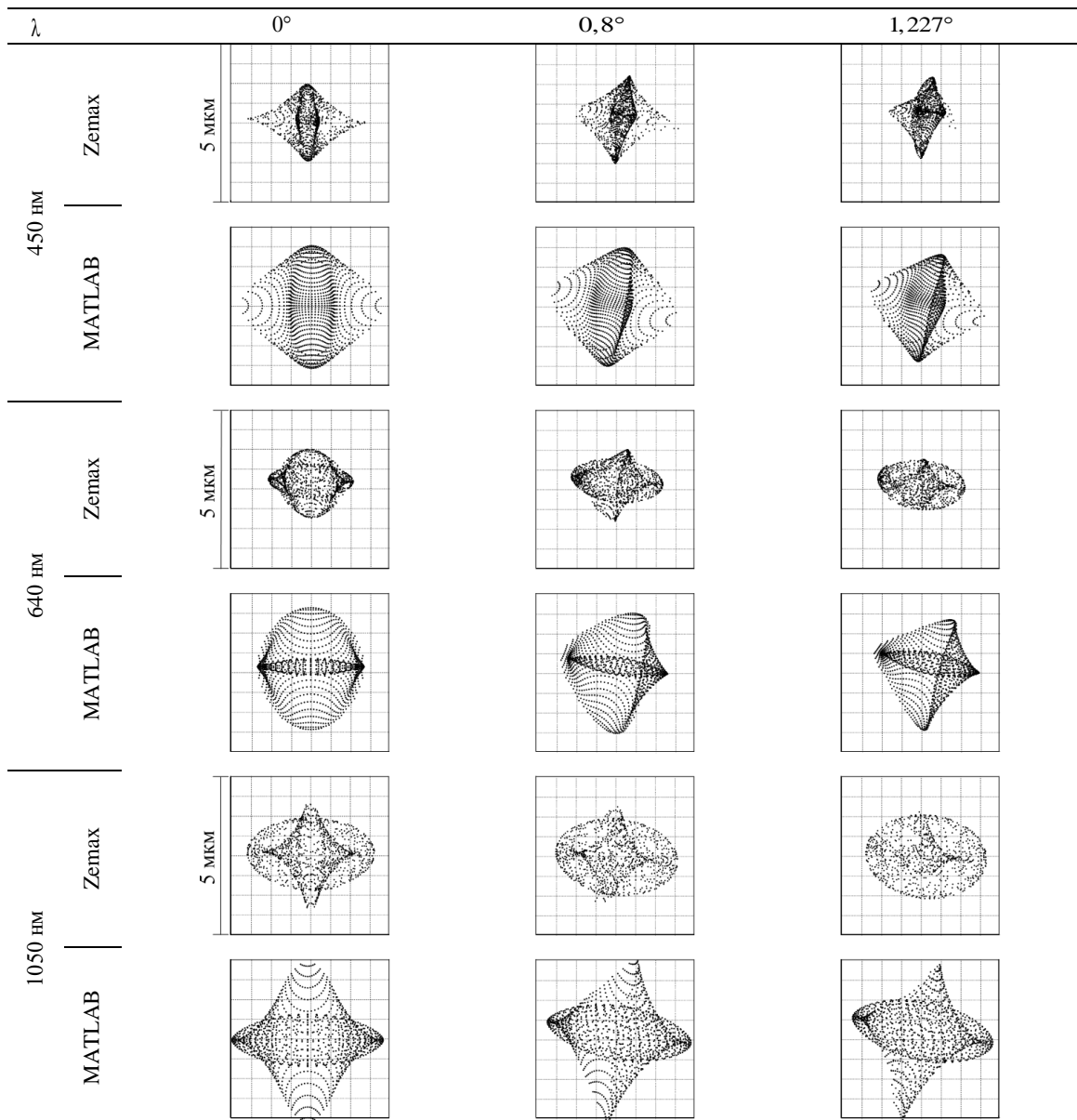


Рис. 2. График зависимости среднего квадратичного радиуса ФРТ от длины волны, полученный в MATLAB для трёх углов: 0° ; $0,8^\circ$; $1,227^\circ$ (а); график зависимости среднего квадратичного радиуса ФРТ от длины волны, полученный в Zemax для трёх углов: 0° ; $0,8^\circ$; $1,227^\circ$ (б).

Таблица 1. Внешний вид распределение лучей в плоскости детектора, полученный в MATLAB и Zemax



Из рисунка 2а видно, что размеры ФРТ для трёх разных пучков сильно зависит от угла падения. Однако, после 700 нм разность между значениями радиусов начинает уменьшаться. Схожее поведение можно заметить и на рисунке 2б, где после 700нм разность между значениями радиусов уменьшается сильнее, чем на рисунке 2а.

Для оценки различия между результатами моделирования, из значений радиусов, полученных в Zemax, были вычтены аналогичные значения, полученные в MATLAB. По полученным данным был построен график разности радиусов ФРТ, который представлен на рисунке 3.

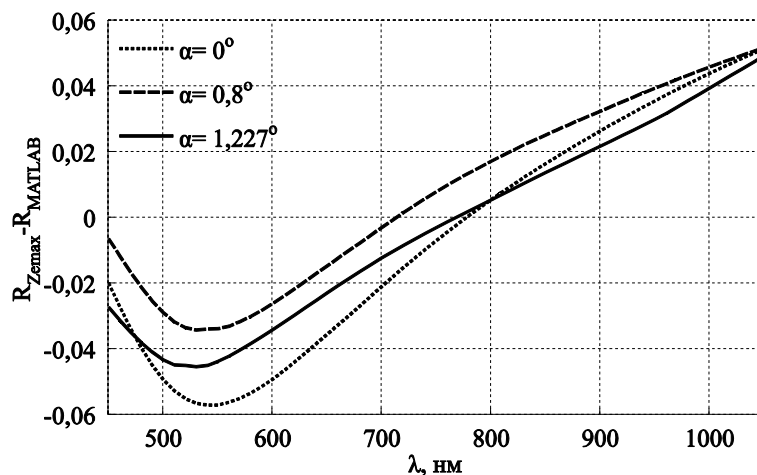


Рис. 3. График зависимости разницы между радиусами ФРТ, полученными в Zemax и Matlab.

Из рисунка 3 видно, что сильнее всего значения среднего квадратичного радиуса различаются на промежутках от 500 нм до 600 нм и от 900 нм до 1050 нм. Так же видно, что для всех пучков радиусы ФРТ, полученные в MATLAB, для первой половины исследуемого спектрального диапазона больше аналогичного размера, полученного в Zemax.

Усреднённые по длинам волн значения радиусов ФРТ представлены в таблице 3

Таблица 3. Усреднённые по длинам волн радиусы ФРТ, полученные в Matlab и Zemax (значения представлены в микрометрах)

$\gamma_{гол}$	0°	$0,8^\circ$	$1,227^\circ$
R_{Zemax}	0,4975	0,4879	0,4760
R_{MATLAB}	0,4975	0,4807	0,4791

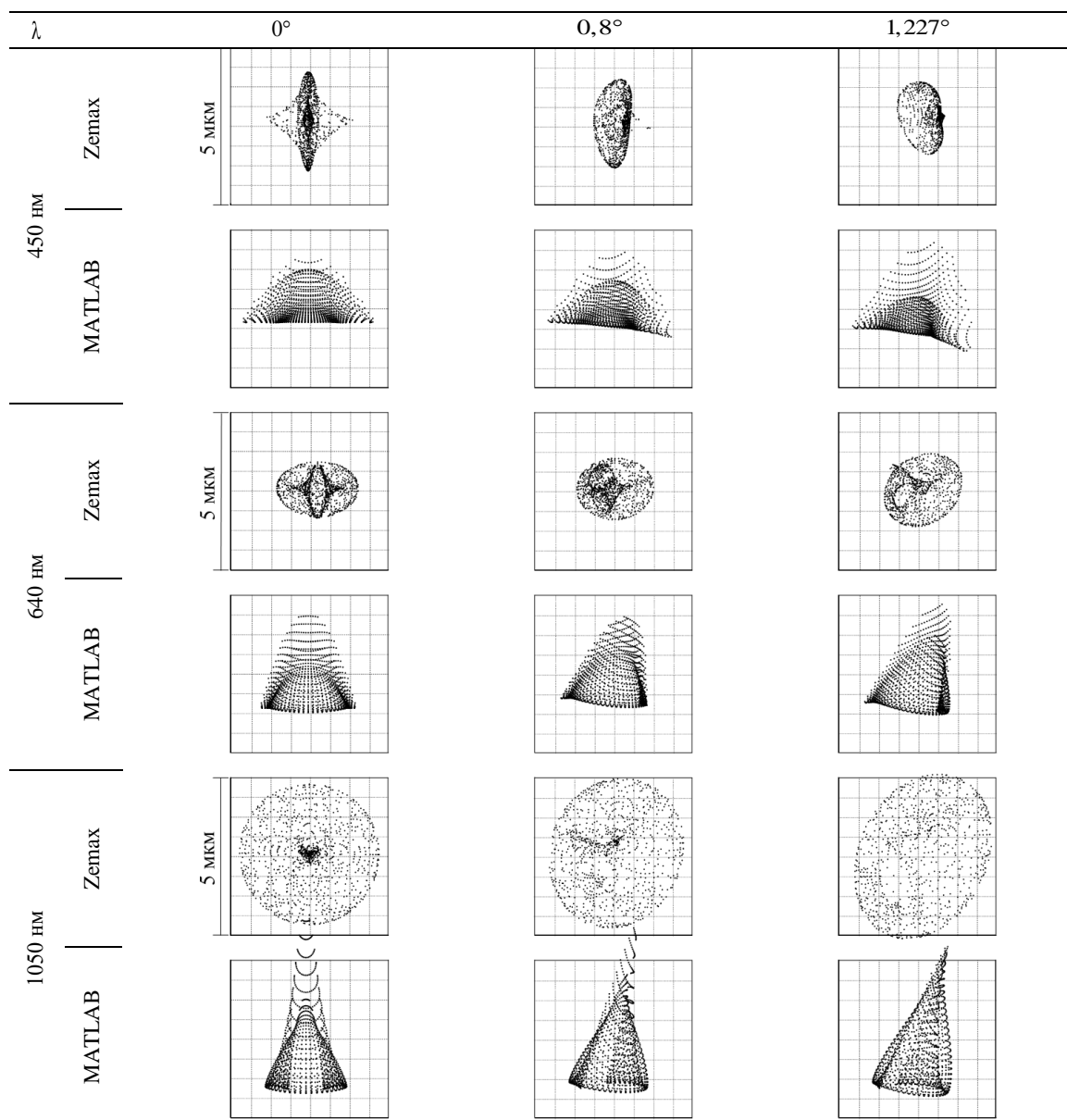
Несмотря на очевидные различия формы ФРТ, представленных в таблице 1, из таблицы 3 видно, что средние значения радиусов для трёх исследуемых углов практически не отличаются. Больше всего различаются размеры ФРТ для пучков, падающих под углом в $1,227^\circ$ и меньше всего для падающих под углом 0° .

3.2. Моделирование минус первого порядка дифракции

Исследуя только лишь нулевой дифракционный порядок, невозможно получить гиперспектральное изображение, так как спектр сольётся в одну линию. Рабочим порядком для схемы Оффена данной конфигурации является минус первый дифракционный порядок.

В таблице 4 представлены изображения, аналогичные тем, что были получены в пункте 3.1 в таблице 1, но полученные при условии -1 порядка дифракции.

Таблица 4. Внешний вид распределение лучей в плоскости детектора, полученный в MATLAB и Zemax



Из таблицы 4 видно, что внешний вид и форма пятен рассеяния приобрели существенные различия в сравнении с нулевым порядком дифракции. Тем не менее результаты обеих программ так же находятся в необходимых пределах, установленных конструктивными особенностями современных ПЗС-матриц. Для описания параметров пятен были построены графики среднего квадратичного радиуса $4a$ и $4b$, аналогичные тем что были получены в пункте 3.1. Различие во внешнего вида ФРТ может быть обусловлено тем, что при их получении были применены различные алгоритмы, реализующие работу дифракционной решётки на сферической поверхности.

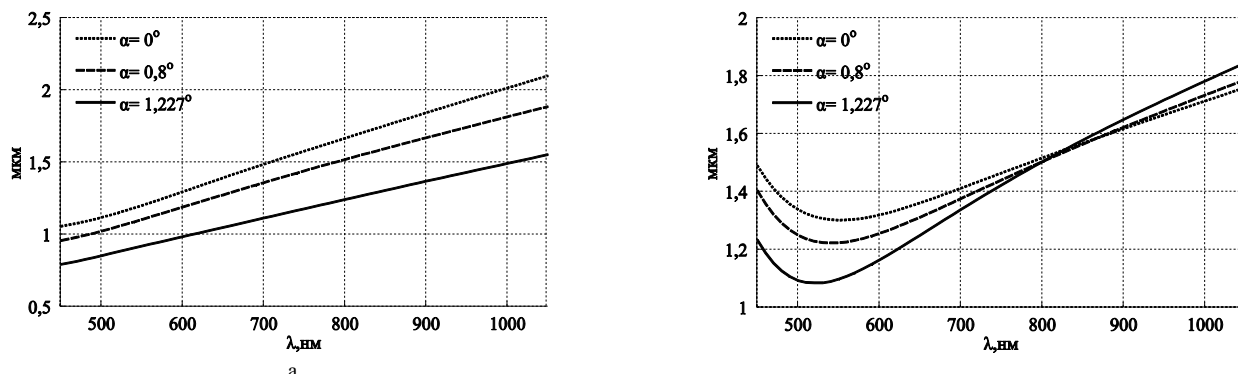


Рис. 4. График зависимости среднего квадратичного радиуса ФРТ от длины волны, полученный в MATLAB для трёх углов: 0° ; $0,8^\circ$; $1,227^\circ$ (а); график зависимости среднего квадратичного радиуса ФРТ от длины волны, полученный в Zemax для трёх углов: 0° ; $0,8^\circ$; $1,227^\circ$ (б).

Из рисунка 4а видно, что размеры ФРТ для трёх разных пучков возрастают практически линейно. Рисунок 4б демонстрирует сильное различие тенденции возрастания размера ФРТ на промежутке от 450 нм до 600нм в сравнении с рисунком 4а. Для определения различия полученных результатов был построен график разности, представленный на рисунке 5.

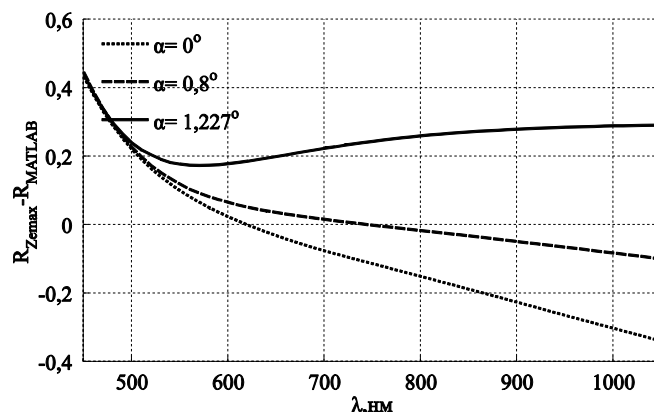


Рис. 5. График зависимости разницы между радиусами ФРТ, полученными в Zemax и Matlab.

График разности демонстрирует наибольшее различие значений в начале и конце исследуемого спектрального диапазона. Значения усреднённых радиусов ФРТ для результатов, полученных в результате моделирования -1 первого порядка имеют очень слабые отличаются между собой. Усреднённые по длинам волн радиусы ФРТ представлены таблице 5.

Таблица 5. Усреднённые по длинам волн радиусы ФРТ, полученные в Matlab и Zemax (значения представлены в микрометрах)

$\gamma_{\text{гол}}$	0°	$0,8^\circ$	$1,227^\circ$
R_{ZEMAX}	1,4926	1,4639	1,4281
R_{MATLAB}	1,4926	1,4302	1,1765

Не смотря на то, что различие геометрии ФРТ для минус первого порядка стало более существенным в сравнении с нулевым порядком, из таблицы 5 видно, что средние значения радиусов для трёх исследуемых углов практически не отличаются. Больше всего различаются размеры ФРТ для пучков, падающих под углом в $1,227^\circ$ и меньше всего для падающих под углом 0° , что аналогично результатам полученным для нулевого порядка.

4. Заключение

В процессе выполнения работы был написан программный комплекс в MATLAB, позволяющий моделировать оптические устройства такие, как, например, гиперспектрометр Оффнера, который является объектом исследования статьи. С помощью этого комплекса было проведено моделирование работы гиперспектрометра для нулевого и минус первого порядков дифракции. Моделирование проводилось для пучков, падающих под углами 0° , $0,8^\circ$, $1,227^\circ$, длины волн которых брались из диапазона от 450 нм до 1050 нм с шагом в 1нм. Проведённое сравнение с результатами

моделирования аналогичной модели в Zemax показало, что, несмотря на заметное различие геометрии ФРТ для минус первого порядка, средние значения размеров ФРТ не отличаются очень слабо, а для нулевого порядка практически не отличаются. Наибольшие различия наблюдались в областях более длинных волн. Так же результаты моделирования в Zemax и MATLAB показали, что как для нулевого, так и для минус первого порядка, ФРТ имеет размеры, позволяющие ей уместиться в ячейку ПЗС-матрицы со стороной 12-15мкм.

Литература

- [1] 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.
- [2] Mouroulis, P. Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy / P. Mouroulis, R.G. Sellar, D.W. Wilson // Optical Engineering. – 2007. – Vol. 46, Issue 6 – P. 063001-1-9.
- [3] Rickard, L.J. HYDICE: An airborne system for hyperspectral imaging / L.J. Rickard [et al.] // Optical Engineering and Photonics in Aerospace Sensing. – 1993. – P. 173-179.
- [4] Oskotsky, M. Airborne hyperspectral imaging system / M. Oskotsky, M.J. Russo, Jr. // Patent No. US 7944559 B2. Date of Publication 17.05.2011.
- [5] Prieto-Blanco, X. Off-plane anastigmatic imaging in Offner spectrometers / X. Prieto-Blanco, H. González-Nuñez, R. de la Fuente // Journal of the Optical Society of America A. – 2011. – Vol. 28, Issue 11. – P. 2332-2339.
- [6] Казанский, Н.Л. Математическое моделирование оптических систем / Н.Л. Казанский. – Самара: СГАУ, 2005. – 240 с.
- [7] Mouroulis, P. Convex grating types for concentric imaging spectrometers [Text] / P. Mouroulis, D.W. Wilson, P.D. Maker, R.E. Muller // Applied Optics. – 1998. – V. 37, N. 31. – P. 7200-7208.
- [8] Lobb, D.R. Imaging spectrometer. Patent No. EP 0 961 920 B1 // Pub. Date: 12.05.2004.
- [9] Chrisp, M.P. Convex diffraction grating imaging spectrometer. Patent No. US 5880834 // Pub. Date: 9.03.1999.
- [10] Reiningger, Francis M. Imaging spectrometer/camera having convex grating. Patent No. US 6100974 // Pub. Date: 8.08.2000.
- [11] Nelson, N.R. Hyperspectral scene generator and method of use. Patent No. US 7106435 B2 // Pub. Date: 12.09.2006.