

$\alpha_{\text{П}} = 0,01$ дБ/км), фториде берилля ($\lambda = 2,1$ мкм, $\alpha_{\text{П}} = 0,005$ дБ/км). Применение этих материалов позволит снять ограничения длины РУ, которые обусловлены затуханием.

Литература

1. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей / Н.Н. Слепов – М.: Радио и связь, 2000. – 468 с.: ил.
2. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения / А.Б. Иванов – М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. – 671 с.: ил.
3. Бейли Д. Волоконная оптика: теория и практика / Д. Бейли, Э. Райт / Пер. с англ. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2006. – 320 с.
1. CORNING Optical Fiber [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.corning.com/opticalfiber/> March 2012 1407:02

*Надійшла до редакції
5 березня 2012 року*

©Кучеренко О. К., Свешникова Н. И., 2012

УДК 535.317

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ФУРЬЕ-ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРА

¹⁾Артюхина Н. К., ^{1),2)}Климович Т. В., ^{1),2)}Котов М. Н.

¹⁾Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

²⁾ОАО «Пеленг», г. Минск, Беларусь

Фурье-видеоспектрометр ВС – гиперспектральный оптико-электронный прибор, сочетающий преимущества Фурье-спектрометров и видеоспектральных систем, вследствие чего перспективен для применения в сфере дистанционного зондирования Земли из космоса. Восстановление спектра изучаемого объекта осуществляется путем применения обратного преобразования Фурье к сигналу, представляющему собой зарегистрированную с помощью матричного фотоприемника интерферограмму. На основе принципов формирования и обработки интерференционной картины в Фурье-видеоспектрометре дистанционного зондирования Земли из космоса были составлены математические модели, предназначенные для оптимизации характеристик прибора.

Ключевые слова: *видеоспектрометр, дистанционное зондирование, Фурье-спектрометр.*

Введение

Зарубежными и отечественными учеными накоплен богатый опыт проектирования классических спектрометров для дистанционного зондирования Земли из космоса [1, 2], однако разработка нового типа приборов – Фурье-видеоспектрометров – зачастую вызывает значительные трудности, что связано со спецификой получения и обработки данных об изучаемом объекте. Чрезвычайно большое число факторов, которые должны быть приняты во внимание при проектировании подобных приборов, обуславливают

целесообразность использования специального аппарата для оптимизации параметров прибора. Для решения данной задачи предлагается использовать метод математического моделирования.

При проектировании базовым принципом является обеспечение требуемых тактико-технических характеристик прибора в условиях съемки поверхности Земли с борта космического аппарата. К основным тактико-техническим характеристикам видеоспектрометров дистанционного зондирования относят следующие:

- рабочий спектральный диапазон;
- число спектральных каналов;
- геометрическое разрешение;
- ширина полосы захвата.

На стадии выбора схемного решения прибора были проанализированы существующие оптические схемы интерферометров с точки зрения массо-габаритных параметров, светосилы, точности, удобства юстировки, размерной стабильности в условиях вибраций и перепадов температур. Известные схемы Фурье-видеоспектрометров можно разделить на 2 категории, которые различаются способом изменения разности хода между интерферирующими лучами [3]:

1) динамические – в таких приборах разность хода интерферирующих лучей изменяется механическим способом, например, путем перемещения одного из зеркал интерферометра, а регистрируемая фотоэлектрическим методом интерферограмма выглядит в виде зависящего от времени электрического сигнала;

2) статические – в них интерферограмма образуется и регистрируется в виде неподвижной картины, а формирование полной интерферограммы осуществляется при движении платформы с видеоспектрометром по орбите, т.е. при сканировании поверхности Земли.

Примеры оптических схем динамических видеоспектрометров представлены на рисунке 1, а схемы, показанные на рисунке 2, реализуются в статических приборах.

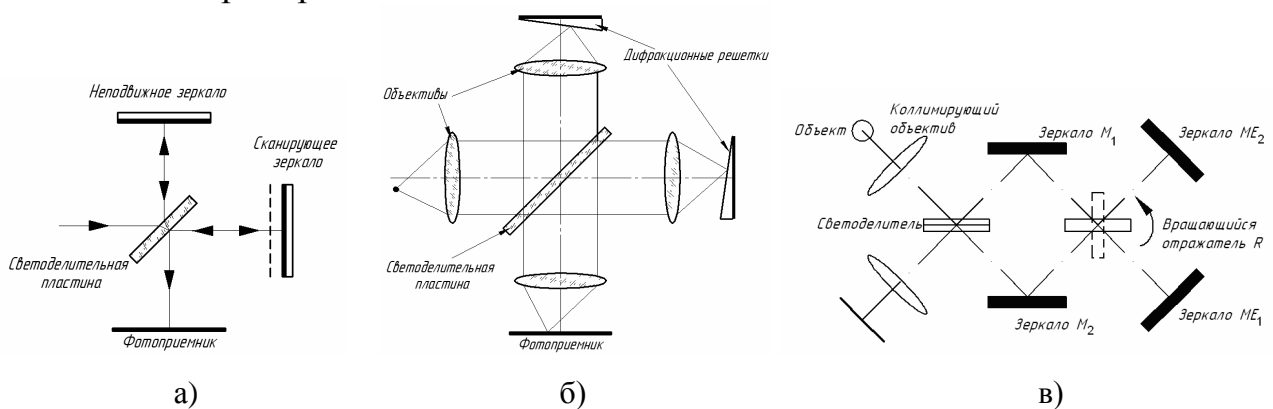


Рис. 1. Схемы динамических Фурье-видеоспектрометров: а) схема на основе интерферометра Майкельсона; б) схема с дифракционными решетками; в) схема с вращающимися элементами

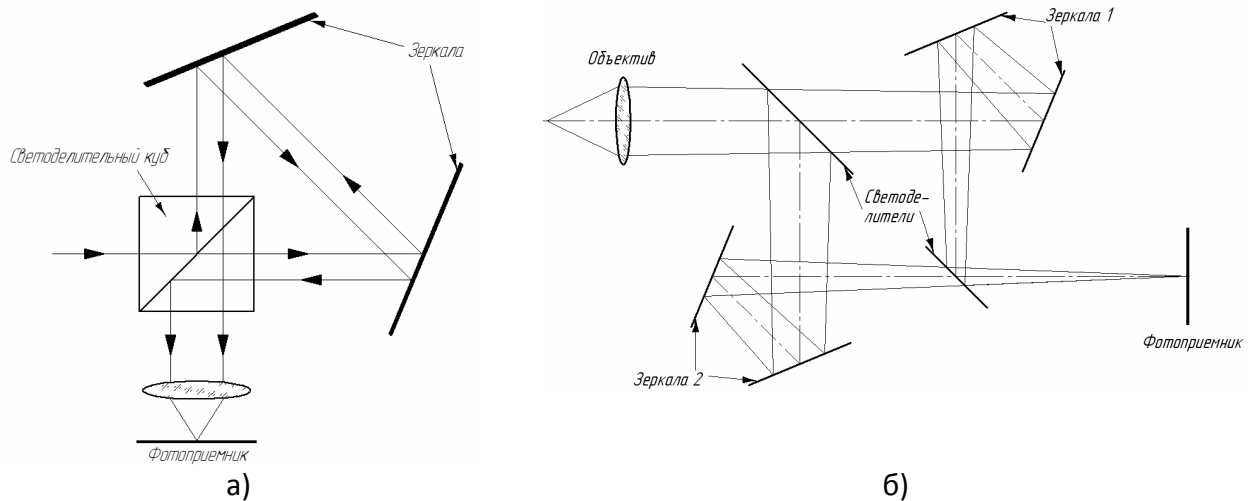


Рис. 2. Схемы статических Фурье-видеоспектрометров: а) схема на основе треугольного интерферометра Саньяка; б) схема с угловыми отражателями

Для проведения исследований в качестве исходной была выбрана схема статического Фурье-видеоспектрометра на базе треугольного интерферометра Саньяка, которая была модернизирована с целью адаптации конфигурации прибора к условиям работы на борту космического аппарата (рис. 3).

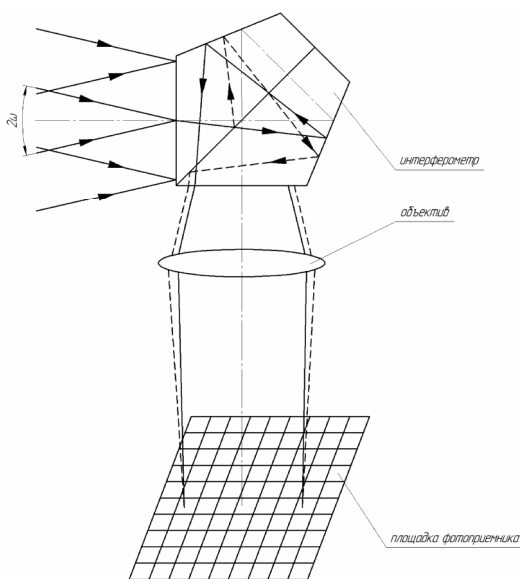


Рис. 3. Схема исследуемого статического Фурье-видеоспектрометра

Для проведения исследований в качестве исходной была выбрана схема статического Фурье-видеоспектрометра на базе треугольного интерферометра Саньяка, которая была модернизирована с целью адаптации конфигурации прибора к условиям работы на борту космического аппарата (рис. 3). В данной схеме отсутствуют подвижные элементы, что исключает ошибки, связанные с их неточным движением, а также позволяет снизить массу и габариты прибора по сравнению с динамическими Фурье-видеоспектрометрами.

Для регистрации интерферограммы в Фурье-видеоспектрометре используется позиционно чувствительный фотоприемник. Его выбор осуществляется с учетом следующих характеристик: рабочий спектральный

Конструктивно интерферометр проектируемого прибора представляет собой склейку двух полупентапризм, при этом на гипотенузную грань нанесено светоделительное покрытие.

Одна из отражающих граней сдвинута от симметричного положения относительно светоделителя для создания разности хода между двумя интерферирующими лучами. Такое исполнение позволяет достичь жесткости конструкции и стабильности величины угла между зеркалами интерферометра, роль которых выполняют отражающие грани призм, а также упрощает юстировку прибора и делает его менее чувствительным к вибрациям и колебаниям температуры.

диапазон, глубина потенциальной ямы, формат, размер пикселя, величины собственных шумов, разрядность оцифровки, квантовая эффективность, удобство интеграции в электронную схему, однородность характеристик пикселей по площадке ФП, габаритные размеры, частота считывания кадров, рабочий температурный диапазон.

Параметры интерферометра, объектива и фотоприемного устройства видеоспектрометра, а также ряд внешних факторов оказывают существенное влияние на свойства Фурье-видеоспектрометра. Определение параметров и характеристик оптико-электронного прибора, в наибольшей степени влияющих на показатели его качества, наряду с оптимизацией, т.е. постепенным изменением параметров с целью достижения оптимальных характеристик, являются одними из важнейших задач проектирования Фурье-видеоспектрометра. Для решения данных задач предлагается использовать ряд математических моделей. Ниже приведем краткое описание составленных моделей.

Математическое моделирование процесса формирования изображения при полете Фурье-видеоспектрометра на борту КА

Для учета особенностей проведения съемки поверхности Земли с высоты полета искусственного спутника Земли была разработана соответствующая математическая модель, предназначенная для решения следующих основных задач:

1. Моделирование полета Фурье-видеоспектрометра на борту КА;
2. Выявление взаимосвязей (соотношений) между значениями основных параметров прибора и их математическое описание;
3. Расчет следующих параметров прибора:
 - фокусное расстояние объектива. Оптимальное значение фокусного расстояния объектива f_o было определено из условия синхронизации работы фотоприемного устройства и режима полета КА, т.е. за время считывания одного кадра изображение сцены должно переместиться в плоскости фотоприемника на расстояние, равное размеру пикселя;
 - поле зрения – исходя из формата приемника и фокусного расстояния объектива;
 - размер проекции пикселя на поверхность Земли, исходя из высоты орбиты космического аппарата, параметров и режима работы фотоприемника;
 - ширина полосы захвата – определяется полем зрения прибора и высотой орбиты;
 - число спектральных каналов;
 - объем информационных данных, передаваемых на наземную приемную станцию.

Кроме того данная математическая модель позволяет определить периодичность съемки сцены в зависимости от высоты полета КА и скорость перемещения формируемого изображения в плоскости фотоприемника, что

необходимо при проведенні дальніших досліджень для конструювання обладнання, імітуючого бег супутникової точки і призначеного для експериментальної перевірки параметрів космічних оптично-електронних приладів.

В якості входних даних в даній моделі використовуються наступні змінні: висота орбіти, робочий спектральний діапазон, параметри і режим роботи фотоприймача, розрядність оцифровки.

Приклади графіків залежностей основних параметрів зйомки від фокусної відстані об'єктива наведені на рис. 4.

Отримані з допомогою даної моделі чисельні значення використовуються в якості входних даних наступних моделей для проведення дальніших досліджень Фур'є-відеоспектрометра.

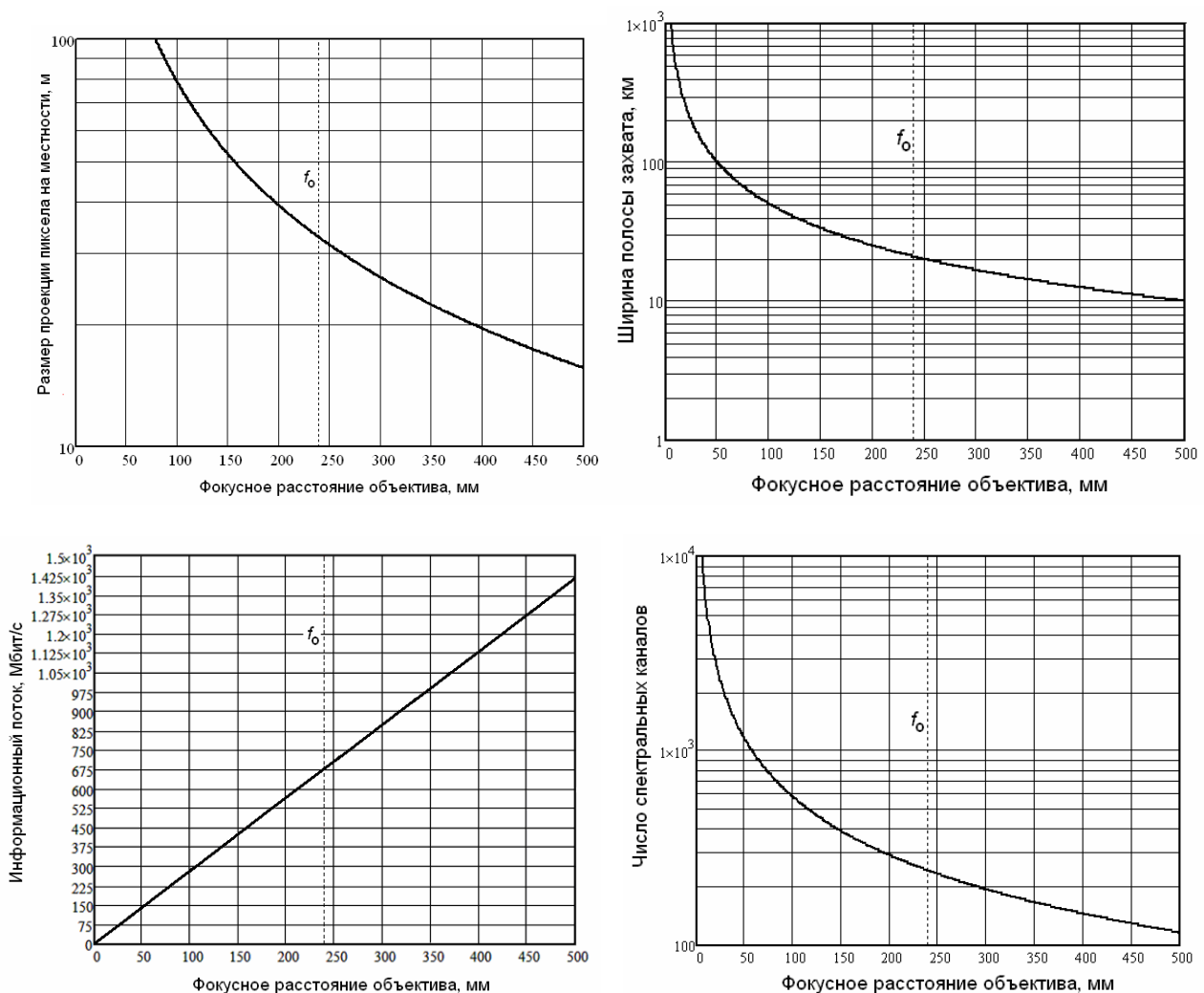


Рис. 4. Графики залежностей основних параметрів зйомки від фокусної відстані об'єктива (f_o – оптимальне значення фокусної відстані об'єктива): а) розміра проекції пікселя на місцевості; б) ширини полоси захвата; в) інформаційного потоку; г) числа спектральних каналів

Моделирование энергетических характеристик Фурье-видеоспектрометра

Следующая математическая модель была разработана для изучения энергетических характеристик статического Фурье-видеоспектрометра. При этом основной целью проведения исследований является проверка выполнения энергетического условия функционирования оптико-электронного прибора, которое заключается в определенном превышении полезного сигнала над шумовыми составляющими.

Разработанная математическая модель работает следующим образом:

1. Задается спектральное распределение яркости в плоскости объекта $B(\lambda, x, y)$, где λ – длина волны излучения; x, y – координаты объекта в выбранной системе координат (за начало координат принята точка пересечения оптической оси видеоспектрометра с плоскостью объекта, направление координатных осей соответствуют строке и столбцу матричного фотоприемника).

2. Моделируется формирование интерференционной картины, соответствующей заданной яркости на входе прибора, в плоскости ФП на основе следующего выражения:

$$I(x_p, y_p) = K \int_0^{\infty} 2B(\sigma, x, y) k(\sigma) \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi dx_p}{f'} \right) \right) d\sigma,$$

где $I(x_p, y_p)$ – интенсивность излучения в точке (x_p, y_p) на фотоприемнике;

d – расстояние между мнимыми когерентными источниками; формируемыми при прохождении излучения через интерферометр;

$\sigma = 1/\lambda$ – волновое число, см^{-1} ;

f' – фокусное расстояние объектива Фурье-видеоспектрометра;

K – коэффициент пропорциональности, учитывающий геометрию распространения пучка лучей;

$k(\sigma)$ – спектральный коэффициент ослабления излучения в атмосфере.

3. На ее основе формируется выходной сигнал S_{jk} с учетом спектральных и пространственных фильтрующих свойств ФП, который можно описать следующим образом:

$$S_{jk} = \iint I_f(x_p, y_p) \text{rect} \left(\frac{x_p}{d_p} - j, \frac{y_p}{d_p} - k \right) dx_p dy_p,$$

где j, k – номер строки и столбца пикселя соответственно; I_f – интенсивность интерференционной картины, определенная с учетом спектральных фильтрующих свойств фотоприемника.

4. Осуществляется расчет отношения «сигнал-шум» по спектральным каналам, а также в широком спектральном диапазоне. В ходе проектных исследований учитываются фотонный шум и темновой ток, которые являются преобладающими.

Входными параметрами в данной математической модели являются: спектральная яркость снимаемой сцены, рабочий спектральный диапазон, характеристики выбранного ФП, фокусное расстояние объектива, определенное на *предыдущей стадии моделирования*, относительное отверстие объектива, число спектральных каналов.

В качестве приближения в модели принято, что объектом съемки является равномерно излучающая площадка, спектральная яркость которой одинакова во всем рабочем спектральном диапазоне Фурье-видеоспектрометра. Принимаем, что во входное поле зрения прибора попадает одна светящаяся точка, характеризующая соответствующим спектральным распределением яркости. Изображение этой точки последовательно перемещается в плоскости ФП по строке из одного крайнего пикселя к другому. Поскольку каждому пикселю соответствует определенная разность хода между интерферирующими лучами, таким образом формируется зависимость величин выходного полезного сигнала, шумовой составляющей и их отношения от номера пикселя в строке (табл. 1).

Таблица 1. Отношение «сигнал-шум» в различных зонах интерферограммы для входного сигнала с широким равномерным спектром и в спектральных каналах

Спектральные каналы	Отношение «сигнал-шум» в различных зонах интерферограммы			
	Номер пикселя в строке			
	1	80	160	240
Все спектральные каналы ($\lambda = 400..1000$ нм)	300	208	198	200
Спектральный канал с $\lambda = 400$ нм	29	28	27	25
Спектральный канал с $\lambda = 600$ нм	62	62	60	57
Спектральный канал с $\lambda = 800$ нм	51	50	48	45
Спектральный канал с $\lambda = 1000$ нм	19	18	17	16

Математическое моделирование процесса восстановления спектра изучаемого объекта Фурье-видеоспектрометром

Одним из важнейших аспектов исследований функционирования Фурье-видеоспектрометра методом математического моделирования является оценка качества восстанавливаемого спектра и поиск способов его улучшения.

Составленная модель позволяет имитировать восстановление спектра наблюдаемого объекта посредством преобразования Фурье над соответствующим сигналом с различными спектральными яркостями с учетом функции апподизации и применения фильтров. Алгоритм основан на использовании основного уравнения Фурье - спектроскопии, которое можно

записать следующим образом:

$$I(\sigma) = \int_0^{\infty} \left[I_{\text{инт}}(\Delta_{\text{max}}) - \frac{1}{2} I_{\text{инт}}(0) \right] \cos(2\pi\sigma\Delta) d\Delta,$$

где $I_{\text{инт}}(\Delta_{\text{max}})$, $I_{\text{инт}}(0)$ - интенсивности излучения в интерферограмме при максимальном (Δ_{max}) и минимальном (0) значении разности хода интерферирующих лучей.

При моделировании процесса восстановления спектра учитывается также вид аподизирующей функции (предусмотрена возможность выбора треугольной, трапецеидальной, гармонических функций апподизации), на которую умножается интерферограмма, а также искажения, вызванные характеристиками фотоприемника.

Получаемая графическая информация позволяет судить о степени соответствия истинного и восстановленного спектров, а также проводить поиск путей ее повышения. Пример спектра отражения объекта и полученного на его основе с помощью математической модели восстановленного спектра представлены на рис. 5.

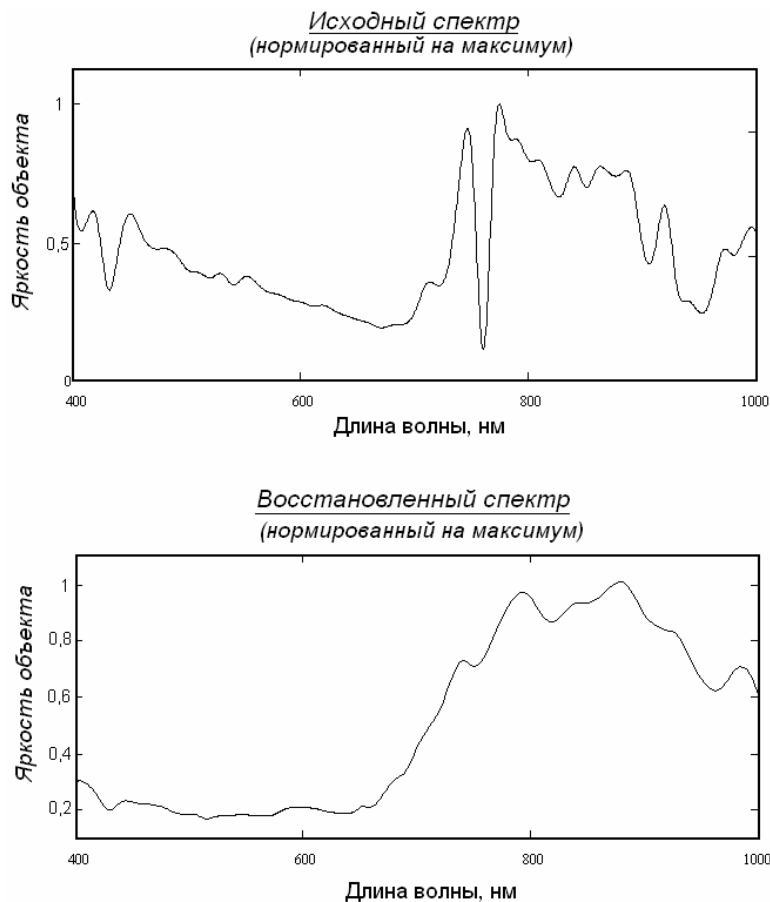


Рис. 5. Пример исходного (истинного) спектра отражения объекта и полученного на его основе с помощью математической модели восстановленного спектра

Математическое моделирование изображающих свойств Фурье-видеоспектрометра

Поскольку прибор относится к классу видеоспектральной аппаратуры, то кроме анализа его спектральных характеристик, определяющих качество восстановленных спектров, необходимо оценить изображающие свойства, для чего была составлена соответствующая математическая модель. В качестве оценки изображающих свойств Фурье-видеоспектрометра выбрана зависимость контраста интерференционной картины при наблюдении штрихового объекта в различных областях интерферограммы от пространственной частоты этого штрихового объекта.

Модель работает следующим образом. Принимаем, что пространственное распределение яркости объекта съемки имеет П-образный профиль. В качестве входных данных в данной модели задаются пространственная частота штрихов объекта, перпендикулярных строкам ФП, и его спектральное распределение яркости. Затем происходит формирование соответствующего заданной «сцене» распределения освещенности в плоскости фотоприемного устройства. Для того чтобы рассчитать контраст в различных областях интерферограммы, он формируется в виде функции от номера пикселя в строке. После определения полезных и шумовых составляющих сигналов двух соседних пикселей вычисляется контраст.

Выходными данными математической модели являются значения зависимостей контраста от номера пикселя в строке фотоприемника для трех значений пространственной частоты штрихового объекта, контраст которого также можно задавать: частота Найквиста, а также вдвое и втрое меньшие частоты (табл. 2). Частота Найквиста определяет, в соответствии с теоремой Котельникова, предельную частоту штрихов наблюдаемого объекта, при которой он изображается без нелинейных искажений. Две другие пространственные частоты штриховых объектов позволяют оценить увеличение контраста интерференционной картины при уменьшении частоты.

Моделирование геометрических параметров интерферометра

Для определения конкретных геометрических параметров призмы, необходимых для ее изготовления, осуществлено математическое моделирование интерферометра на основании данных, полученных при проведении численных исследований с использованием описанных выше моделей.

Модель предназначена для решения следующих основных задач:

1. Моделируется ход лучей через интерферометр.
2. Осуществляется расчет геометрических параметров интерферометра (рис. 6):
 - расчет размеров входной и выходной граней интерферометра;
 - определение разноплечности исходя из требуемой разности хода интерферирующих лучей;

- определение зоны нанесения светоделительного покрытия.

Таблица 2. Значения контраста интерференционной картины в нескольких областях интерферограммы при различных пространственных частотах объектов на входе

Контраст интерференционной картины				
Пространственная частота, м ⁻¹	Номер пикселя в строке			
	1	80	160	240
$\lambda = 400$ нм				
$\nu_{\text{Найквиста}}$	0,26	0,22	0,19	0,14
$\nu_{\text{Найквиста}}/2$	0,34	0,29	0,26	0,19
$\nu_{\text{Найквиста}}/3$	0,47	0,41	0,35	0,31
$\lambda = 700$ нм				
$\nu_{\text{Найквиста}}$	0,39	0,36	0,29	0,19
$\nu_{\text{Найквиста}}/2$	0,53	0,48	0,41	0,27
$\nu_{\text{Найквиста}}/3$	0,6	0,56	0,49	0,4
$\lambda = 1000$ нм				
$\nu_{\text{Найквиста}}$	0,28	0,13	0,06	0,04
$\nu_{\text{Найквиста}}/2$	0,42	0,14	0,07	0,06
$\nu_{\text{Найквиста}}/3$	0,5	0,26	0,23	0,15
Широкий спектральный диапазон 400 – 1000 нм				
$\nu_{\text{Найквиста}}$	0,25	0,07	0,06	0,05
$\nu_{\text{Найквиста}}/2$	0,34	0,11	0,09	0,08
$\nu_{\text{Найквиста}}/3$	0,44	0,22	0,18	0,13

$\nu_{\text{Найквиста}}$ /обозначение

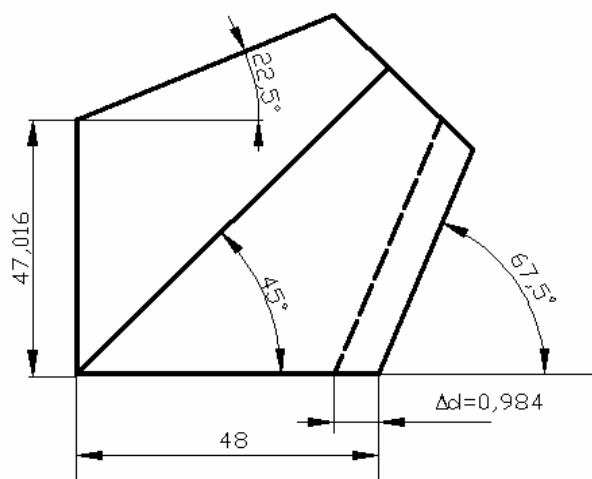


Рис. 6. Основные геометрические параметры интерферометра, построенного по треугольной схеме Саньяка

3. Устанавливается вид зависимости между разностью хода интерферирующих лучей и углом наблюдения (рис. 7).

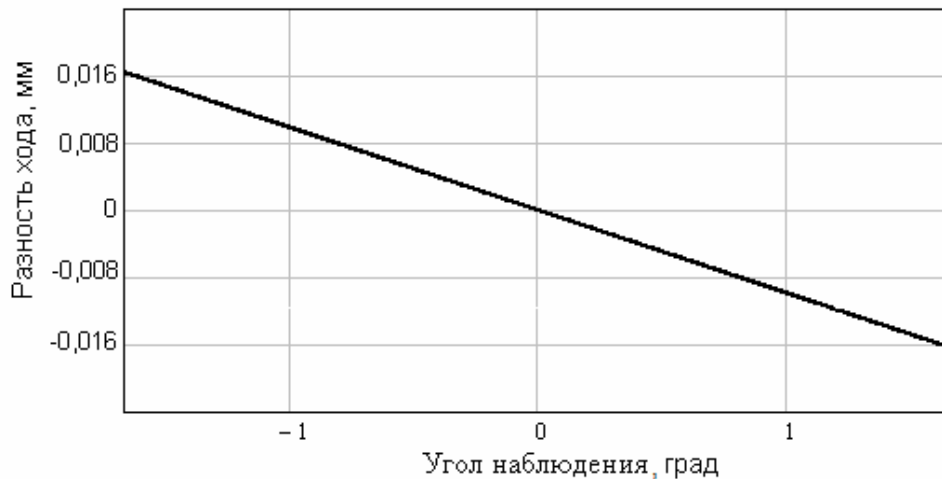


Рис. 7. Зависимость приобретаемой в интерферометре разности фаз от угла наблюдения

Выводы

Для изучения работы статического Фурье-видеоспектрометра дистанционного зондирования Земли из космоса и оптимизации параметров прибора авторами был предложен ряд взаимосвязанных математических моделей.

Модели предназначены для решения следующих задач на стадии проектирования Фурье-видесопектрометра:

1. Моделирование полета Фурье-видеоспектрометра на борту КА;
2. Выявление взаимосвязей (соотношений) между значениями основных параметров прибора и их математическое описание;
3. Проверка выполнения энергетического условия функционирования оптико-электронного прибора;
4. Моделирование хода лучей через интерферометр;
5. Моделирование процесса восстановления спектра по сформированной интерферограмме;
6. Оценка изображающих характеристик видеоспектрометра;
7. Расчет следующих параметров прибора: фокусное расстояние объектива, поле зрения, размер проекции пикселя на поверхность Земли, ширина полосы захвата, число спектральных каналов, объем информационных данных, передаваемых на наземную приемную станцию, отношение «сигнал-шум» по спектральным каналам, а также в широком спектральном диапазоне, геометрические параметры призмы-интерферометра, контраст интерференционной картины в различных ее зонах.

Предложенные модели могут представлять интерес для специалистов в области проектирования оптико-электронных приборов дистанционного зондирования, поскольку позволяют ускорить и упростить процесс определения и оптимизации параметров Фурье-видеоспектрометра, а также оценить степень влияния характеристик различных его узлов на показатели качества конечного продукта.

Литература

1. Еремеев В.А. Современные гиперспектральные сенсоры и методы обработки гиперспектральных данных / В.А. Еремеев, И.Н. Мордвинцев, Н.Г. Платонов // Исследование Земли из космоса. – 2003. – № 6. – С. 80 – 90.
2. Мальцев Г.Н. Космические системы и технологии многоспектрального дистанционного зондирования Земли / Г.Н. Мальцев, И.А. Козинков, А.П. Данилкин // Информация и космос. – 2010. – № 1. – С. 148 – 158.
3. Морозов А.Н. Основы фурье-спектрометрии / А.Н. Морозов, С.И. Светличный – М.: Наука, 2006. – 275 с.

*Надійшла до редакції
24 листопада 2011 року*

© Артюхина Н. К., Климович Т. В., Котов М. Н., 2012

УДК 535.21

**МЕТОДЫ ПАССИВНОЙ АТЕРМАЛИЗАЦИИ И АХРОМАТИЗАЦИИ
ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Кучеренко О. К., Муравьев А. В.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
г. Киев, Украина*

Цель настоящей статьи – проанализировать температурные влияния на параметры предложенных композиций дублетов и дать рекомендации по оптимизации их температурных характеристик при минимизации хроматических аберраций. С помощью программ оптического моделирования существует возможность оценивать температурное влияние на оптические характеристики изображающих систем, работающих в нестабильных температурных условиях. Статья содержит методики и аналитические соотношения для создания атермализованных и ахроматических дублетов с помощью пассивной атермализации для случая однородного распределения температуры в системе. Предлагаются рекомендуемые материалы для двухкомпонентных оптических систем, синтезированных на основе данных методик.

***Ключевые слова:** терморасфокусировка, ахроматические и атермальные дублеты, пассивная атермализация.*

Вступление

Оптические приборы часто работают в широком диапазоне температур окружающей среды. Этот диапазон может достигать $\pm 60^{\circ}\text{C}$ и более. В первую очередь это касается приборов специального назначения, приборов работающих в космосе, а также в сложных цеховых условиях. В работах [1,2] рассматриваются условия сохранения работоспособности и различные методы атермализации оптических систем, созданных на основе каталога оптических материалов Schotta. Терморасфокусировка систем проанализирована в работе [3]. Автор приводит примеры конструкций термокомпенсаторов для различных методов атермализации и методики их расчета. В [4] рассмотрен анализ термоаббераций различных оптических систем и температурных характеристик оптических материалов.