

Моделирование формирования изображения гиперспектральной аппаратурой с учётом параметров движения космического аппарата

А.А. Расторгуев¹, С.И. Харитонов², Н.Л. Казанский², А.В. Бутко¹

¹АО РКЦ «Прогресс», Земеца 18, Самара, Россия, 443009

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Рассмотрено математическое моделирование формирования изображения гиперспектрометром по схеме Оффнера, с расположенным в плоскости регистратора электронным фотоприёмником. Для моделирования бега изображения используется модель углового движения космического аппарата с трёхосным управлением. С использованием разработанного математического аппарата проводится моделирование формирования гиперспектрального изображения для простейших геометрических примитивов.

1. Введение

На сегодняшний день одной из перспективных концепций гиперспектральной аппаратуры является использование компактного гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера. По данной теме проведены обширные теоретические [1-5] и практические работы. В части практических, исследована дифракционная решётка на выпуклой зеркальной поверхности, разработана и изготовлена оптомеханика, проведена юстировка оптической схемы макетного образца [6, 7]. В работе [8] рассмотрена точная калибровка гиперспектрометра, приводятся данные экспериментальных исследований.

На проектной стадии создания данной оптико-электронной аппаратуры, например, такой как, техническое предложение или эскизный проект, зачастую важно не только произвести синтез будущего прибора, предложить варианты компоновок и т.д., но и спрогнозировать в определённом приближении, получаемое изображение на экране монитора конечного пользователя информации. Данное прогнозирование с одной стороны даёт визуальное представление о качестве получаемого изображения, а с другой стороны, возможность наглядного обоснования выбранного варианта компоновки будущего прибора. При этом актуальной является задача получения модели формирования изображения, связывающую оптические, фотоэлектрические характеристики прибора с параметрами движения космического аппарата (КА), на котором предполагается его использование. Данная задача представляется ещё интересной тем, что позволяет связать погрешности параметров движения КА, а также угловые ошибки ориентации оптической оси оптико-электронной аппаратуры относительно системы координат центра масс КА, с получаемым изображением.

2. Допустимые положения при моделировании формирования изображения

Примем следующие допущения:

1. Для простоты будем считать, что в пределах строящегося изображения объекта, наша оптическая система гиперспектрометра локально изопланатична, т.е. функция рассеяния точки (ФРТ), линейный масштаб изображения и т.п. изменяются незначительно, т.о. допустим, что они постоянны в пределах строящегося изображения, для каждого элементарного приращения по длине волны $\Delta\lambda_m$, где m - порядок дифракции.
2. Также будем считать, что дальность D от всех точек объекта до задней главной плоскости объектива гиперспектрометра, за время экспонирования кадра, изменяется на малую величину относительно фокусного расстояния объектива, ввиду того, что мы рассматриваем моделирование построения изображения с высот, характерных полёту КА.
3. Из второго положения следует, что увеличение для каждого узкого интервала длин волн в приближении высоты полёта КА, за время экспонирования кадра, изменяется незначительно и приблизительно постоянно.
4. Пусть все лучи, исходящие из предметной плоскости, падают на входной зрачок оптической системы гиперспектрометра приблизительно под одним углом $\alpha = const$. Т.е. размеры объекта в пределах предметной плоскости таковы, что изменением угла падающих лучей от объекта можно пренебречь.
5. Также, примем, что телесный угол входного значка гиперспектрометра $\Omega_{\Delta\lambda}$ в пределах строящегося изображения объекта изменяется слабо, т.е. постоянен.

3. Моделирование формирования оптического изображения

3.1 Нормированная ФРТ

Рассмотрим излучающую малую элементарную квадратную площадку S с размерами $\Delta x, \Delta y$, расположенную в предметной плоскости $OXYZ$. Будем считать, что площадка S настолько мала, что в её пределах исходящий лучистый поток приблизительно постоянен. Разобьём входной зрачок гиперспектрометра на μ одинаковых площадок с площадью S_μ . Пропустим из центра элементарной площадки через математическую модель гиперспектрометра μ лучей. В плоскость изображения $O'X'Y'Z'$ гиперспектрометра придёт η лучей. При этом лучи распределятся в некой ограниченной области γ . Проведём дискретизацию области γ , разбив плоскость изображения на малые площадки в соответствии с увеличением $\beta_{\Delta\lambda}$, т.е. с размерами $\Delta x' = \beta_{\Delta\lambda} \cdot \Delta x$ и $\Delta y'_{\Delta\lambda} = \beta_{\Delta\lambda} \cdot \Delta y$. Тогда мы получим дискретную функцию зависимости номера площадки от числа пришедших туда лучей. Пронормировав полученную функцию на число лучей η , мы получим дискретную функцию $H_{\Delta\lambda}(x', y')$, которую в данном приближении можно назвать функцией распределения освещённости или дискретной монохроматической ФРТ. При этом будет выполняться соотношение:

$$\sum_{\gamma} H_{\Delta\lambda}(x', y') \Delta x' \Delta y' = 1 \quad (1)$$

Если рассмотреть бесконечно малую элементарную излучающую площадку, то формулу (1), можно переписать в следующем виде:

$$\iint_{\gamma} H_{\Delta\lambda}(x', y') dx' dy' = 1 \quad (2)$$

Таким образом, формула показывает, что в плоскость изображения от площадки приходит суммарный поток равный 1.

3.2 Учёт влияния атмосферы на размытие изображения

Для учёта влияния турбулентности атмосферы на размытие изображения, воспользуемся известной формулой Фризера, описывающей функцию передачи модуляции турбулентности атмосферы, при временах экспозиции, характерных для съёмки из космоса:

$$A(v_{x'}, v_{y'}) = \exp(-2\pi^2 Q^2 f^2 (v_{x'}^2 + v_{y'}^2) / D^2), \quad (3)$$

где Q – параметр турбулентности атмосферы, значение которого изменяется от 0,017 при хороших и до 0,1 при плохих условиях наблюдения.

Тогда распределение освещённости в плоскости регистратора от бесконечно малой площадки с учётом влияния турбулентности атмосферы определяется как:

$$G_{\Delta\lambda}(x', y') = F^{-1} [F[H_{\Delta\lambda}(x', y')] \cdot A(v_{x'}, v_{y'})] \quad (4)$$

3.3 Моделирование распределения освещённости

Теперь, допустим, что указанная малая площадка имеет в своих пределах постоянную яркость L_s для малого приращения $\Delta\lambda$. Тогда с учётом спектральных коэффициента пропускания оптики объектива $\tau_{об}(\Delta\lambda)$ и интенсивности порядка дифракции $C_m(\Delta\lambda)$, элементарная площадка для заданного порядка дифракции и малого $\Delta\lambda$ в плоскости изображения создаёт распределение освещённости, описываемое функцией:

$$E(x', y') = \frac{\eta_{\Delta\lambda}}{\mu_{\Delta\lambda}} \Omega_{\Delta\lambda} C_m(\Delta\lambda) \tau_{об}(\Delta\lambda) L_s(\Delta\lambda) G_{\Delta\lambda}(x', y') \Delta x \Delta y \Delta\lambda \quad (5)$$

Перейдя к интегрированию, и на основании [2] напишем формулу для освещённости, создаваемой совместно несколькими прямоугольными малыми площадками для заданного порядка дифракции и малого приращения $\Delta\lambda$:

$$E(x', y') = \frac{\eta_{\Delta\lambda}}{\mu_{\Delta\lambda}} \Omega_{\Delta\lambda} C_m(\Delta\lambda) \tau_{об}(\Delta\lambda) \Delta\lambda \iint_{\Gamma(x,y)} L_s(x, y, \Delta\lambda) G_{\Delta\lambda}(x' - \beta x - \alpha\lambda m, y' - \beta y) dx dy \quad (6)$$

С учётом диапазона длин волн и всех порядков дифракции формула для освещённости преобразуется:

$$E(x', y', \lambda) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \iint_{\Gamma(x,y,\lambda)} \Omega_{\lambda} \frac{\eta_{\lambda}}{\mu_{\lambda}} C_m(\lambda) \tau_{об}(\lambda) L_s(x, y, \lambda) G_{\lambda}(x' - \beta x - \alpha\lambda m, y' - \beta y) dx dy d\lambda \quad (7)$$

До сих пор мы не учитывали щель гиперспектрометра. Спроецировав в фокальную плоскость изображение предмета, вырежем часть строящегося изображения (яркостного поля) объекта, причём диапазон значений поля яркости $x = x_1 \dots x_k$, $y = y_1 \dots y_k$. Тогда формула для освещённости преобразуется к виду:

$$E(x', y', \lambda) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{x_1}^{x_k} \int_{y_1}^{y_k} \Omega_{\lambda} \frac{\eta_{\lambda}}{\mu_{\lambda}} C_m(\lambda) \tau_{об}(\lambda) L_s(x, y, \lambda) G_{\lambda}(x' - \beta x - \alpha\lambda m, y' - \beta y) dx dy d\lambda \quad (8)$$

Допустим, что гиперспектрометр находится на КА, который за время съёмки обрабатывает определённую программу углового движения. Тогда с приращением времени dt щель гиперспектрометра будет вырезать разное яркостное поле объекта, т.е. диапазон значений поля будет функцией времени $x = x(t)$, $y = y(t)$. Формула для изменения освещённости в плоскости регистратора за время t будет иметь вид:

$$E(x', y', \lambda, t) = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{x_1}^{x_k} \int_{y_1}^{y_k} \Omega_{\lambda} \frac{\eta_{\lambda}}{\mu_{\lambda}} C_m(\lambda) \tau_{об}(\lambda) L_s(x(t), y(t), \lambda) G_{\lambda}(x' - \beta x - \alpha\lambda m, y' - \beta y) dx dy d\lambda dt$$

3.4 Моделирование регистрации освещённости фотоэлектрическим преобразователем

Пусть каждый элемент фотоэлектрического преобразователя вырезает из оптического изображения и интегрирует освещённость. Тогда для сигнала с k – го элемента фотоприёмника в электронах за время накопления $t_n = t_2 - t_1$ будет иметь место следующее соотношение

$$Ne_k = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{P_{x_1}}^{P_{x_2}} \int_{P_{y_1}}^{P_{y_2}} \int_{t_1}^{t_2} \frac{E(x', y', \lambda, t)}{h \cdot c} \lambda \cdot S(\lambda) dx' dy' dt d\lambda \quad (9)$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света в вакууме, $S(\lambda)$ – спектральная квантовая эффективность фотоприёмника.

Для простоты учтём в данной модели фотонный и темновой шум для каждого элемента фотоприёмника, которые описываются законом Пуассона с математическим ожиданием равным для первого $\sqrt{Ne_k}$, а для второго $\sqrt{Ne_d}$. Также для простоты примем, что:

– прочие шумы электронного тракта описываются законом Гаусса с нулевым математическим ожиданием с СКО $50\bar{e}$;

– динамический диапазон АЦП согласован с динамическим диапазоном фотоприёмника.

Тогда проквантовав полученный сигнал в соответствии с динамическим диапазоном фотоприёмника, можно преобразовать его в пиксел изображения.

4. Соотношения для имитации движения изображения в процессе съёмки

Для имитации движения оптического изображения в плоскости регистратора гиперспектрометра воспользуемся известным соотношением [9]:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{A_2 \cdot \vec{r}}{\bar{R}_p - \bar{R}_{ka}} \left(\left(A \cdot \vec{V}_{ka} \right) - \frac{1}{f_{\Delta\lambda}} \left(\vec{r} \cdot A_2 \cdot \vec{V}_{KA} \right) \right) - W \cdot \vec{r} + \frac{1}{f_{\Delta\lambda}} \vec{r} \cdot W_2 \cdot \vec{r} \quad (10)$$

где

$$A = A_\psi A_\beta A_\alpha = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix}$$

матрица поворота КА (с последовательностью поворота - тангаж, крен, рыскание) от орбитальной системы координат (ОСК) к программной системе координат (ПСК), \bar{R}_{KA} – радиус вектор центра масс КА в ОСК, \bar{R}_p – радиус вектор точки визирования в ОСК, \vec{V}_{ka} – вектор скорости КА в ОСК относительно поверхности Земли в точке визирования, \vec{r} – вектор пространства изображений в плоскости регистратора.

Моделирование движения изображения с учётом ошибок ориентации оптической оси объектива гиперспектрометра относительно системы координат центра масс КА проводится путём интегрирования дифференциального уравнения (10) с учётом ошибок по каналам тангажа, крена и рыскания.

5. Апробация полученных соотношений

При исследовании формирования изображения, обычно используют геометрические примитивы. Также представляется интересным оценить качество полученного изображения с учётом параметров движения КА при использовании гармонического тест-объекта. Данным тест-объектом обычно служит мира выполненная из материала с известным спектральным коэффициентом диффузного отражения (спектральным альбедо), расположенная на Земле с известными параметрами освещённости сцены.

Для исследования формирования изображения гармонического тест объекта, имеющего заданный контраст, можно воспользоваться известной формулой

$$\rho_{ш} = \frac{1+K}{1-K} \rho_\phi$$

где $\rho_{ш}, \rho_\phi$ – спектральные альбедо соответственно шпалы миры и фона, K – коэффициент контраста миры.

6. Литература

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Досколович, Л.Л. О коррекции эффекта перекрытия дифракционных порядков в спектрометре на основе схемы Оффнера / Л.Л. Досколович, Е.А. Безус, Д.А. Быков // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 777-781.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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 университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2016. - Т. 15, №1. – С. 197-206.
- [8] Подлипнов, В.В. Калибровка изображающего гиперспектрометра / В.В. Подлипнов, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 869-874. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-869-874.
- [9] Оптимальное сканирование космическим аппаратом поверхности земли: учеб. пособие / В.Ф. Петрищев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. у-та, 2007. – 96 с.

Simulation of image formation by hyperspectral equipment taking into account the parameters of the spacecraft

A.A. Rastorguev¹, S.I. Kharitinov², N.I. Kazanskiy², A.V. Butko¹

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

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The mathematical modeling of image formation by the hyperspectrometer according to the Offner scheme with an electronic photoreceiver located in the recorder plane is considered. To simulate an image run, a model of the angular motion of a spacecraft with a three-axis control is used. Using the developed mathematical apparatus, modeling of the formation of a hyperspectral image is carried out for the simplest geometric primitives.