

В.И. Заварзин, А.В. Ли

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА АППАРАТНОЙ ФУНКЦИИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМОЧНОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

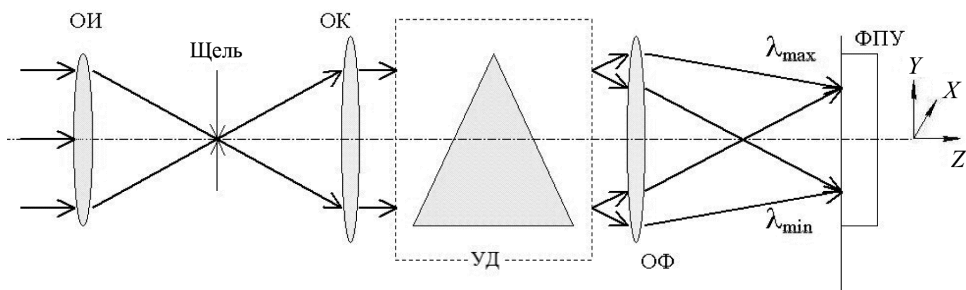
*Предложена модель аппаратной функции гиперспектральной съёмочной аппаратуры, на основе которой разработаны методика и программа для расчета аппаратной функции, модуляционной передаточной функции, функции спектрального разрешения.*

**E-mail: dekan.oep@gmail.com**

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, аппаратная функция, гиперспектральная аппаратура, спектральное разрешение, преобразование Фурье.

В настоящее время интенсивно развивается производство приборов для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Особое место занимает гиперспектральная съёмочная аппаратура (СА), позволяющая получать одновременно изображение объекта и его спектральную характеристику. За последнее десятилетие создан целый ряд подобных авиационных и космических приборов.

Как правило, гиперспектральная СА строится на основе схемы классического спектрометра, входная щель которого — экспонирующая щель изображающего объектива (рис. 1). Сканирование происходит поперек направления щели [1].



**Рис. 1. Схема прибора**

Объектив изображающий (ОИ) формирует движущееся (по направлению оси  $OY$ ) изображение подстилающей поверхности на входную щель, установленную в фокальной плоскости ОИ. Объектив коллимирующий (ОК) образует параллельный пучок лучей от изображения на щели, который раскладывается в спектр с помощью

устройства дисперсионного (УД) и проецируется объективом фокусирующим на фотоприемном устройстве (ФПУ).

Размер щели по оси  $OY$  равен размеру элемента приемника изображения, а по оси  $OX$  — размеру строки матрицы и определяет полосу захвата прибора. При этом в направлении строки приемника изображается пространство, а в направлении столбца — движущийся спектр ограниченного щелью изображения местности.

Процесс проектирования аппаратуры предполагает оптимизацию основных схмотехнических и конструктивных решений по критерию их влияния на качество формируемого изображения (его опто-технические параметры).

Формируемое СА ДЗЗ изображение сцены съемки — не ее абсолютная точная копия. Одной из причин этого является размытие мелких деталей, величина которого определяется общей (полной) функцией рассеяния точки (ФРТ) СА, которая также называется аппаратной функцией аппаратуры  $A(x, y)$ . На основе аппаратной функции может быть получено большинство возможных способов оценки качества оптического изображения: модуляционная передаточная функция, пространственное разрешение, а для гиперспектральных аппаратов — спектральное разрешение [2].

Если на вход аппаратуры поступает излучение  $I_0(x, y)$ , сигнал на выходе в общем случае можно представить [3]

$$I(w, r) = \iint_W I_0(x, y) A(w - x, r - y) dx dy,$$

где  $A(w - x, r - y)$  — смещенный на величины  $w$  и  $r$  отклик прибора;  $W$  — диапазон координат, в котором отклик прибора является существенным. Смысл приведенного выражения состоит в том, что выходной сигнал равен свертке входного сигнала и аппаратной функции.

Каждой длине волны  $\lambda$  соответствует определенная точка фокальной поверхности с координатой  $y$ , в направлении которой получается информация о спектральном составе излучения, поэтому аппаратная функция по оси  $OY$  может быть записана в виде  $A(x, \lambda)$  при фиксированной  $\lambda$  и называется спектральной аппаратной функцией.

Для гиперспектральной СА общую функцию рассеяния точки определяют следующие основные компоненты:

- оптическая ( $PSF_{\text{опт}}$ );
- входной щели ( $PSF_{\text{щел}}$ );
- связанная с движением изображения (смещение изображения за время экспонирования  $PSF_{\text{смещ}}$ );

– связанная с конечным размером элемента приемника изображения ( $PSF_{\text{ПИ}}$ );

– электроники ( $PSF_{\text{эл}}$ ).

Результирующая функция рассеяния точки аппаратуры является сверткой всех компонент ФРТ:

$$A_{\text{общ}}(x, y) = PSF_{\text{опт}} PSF_{\text{щел}} PSF_{\text{дет}} PSF_{\text{смещ}} PSF_{\text{эл}}.$$

Для описания отклика системы кроме общей ФРТ системы используется передаточная функция ( $TF_{\text{общ}}$ ), которая описывается с помощью преобразований Фурье. Преобразование Фурье от функции рассеяния точки является передаточной функцией в области пространственных частот [3].

**Оптическая ФРТ.** Данная функция определяется как пространственное энергетическое распределение освещенности в изображении точечного источника. Оптическая система никогда не бывает «идеальной», поэтому энергия от такого источника рассеивается и распределяется в фокальной плоскости в пределах некоторой небольшой области. Степень рассеяния зависит от многих факторов, в том числе от дифракции, аберраций и качества сборки оптической системы.

Общей базовой моделью оптической функции рассеяния точки  $PSF_{\text{опт}}$  с хорошей точностью служит двумерная функция Гаусса [4]:

$$PSF_{\text{опт}}(x, y) = \exp(-x^2 / a^2) \exp(-y^2 / b^2).$$

Здесь коэффициенты  $a$  и  $b$  вычисляются исходя из требований к полуширине ФРТ по следующим формулам:

$$a = \sqrt{-\frac{\delta_x^2}{4 \ln 0,5}}; \quad b = \sqrt{-\frac{\delta_y^2}{4 \ln 0,5}},$$

где  $\delta_x, \delta_y$  — полуширина оптической ФРТ, определяется как ширина функции на уровне половины от ее максимального значения [5] соответственно по осям  $x$  и  $y$ .

Применяя преобразование Фурье к функции рассеяния, получаем оптическую передаточную функцию:

$$TF_{\text{опт}}(v_x, v_y) = \exp(-\pi^2 a^2 v_x^2) \exp(-\pi^2 a^2 v_y^2), \quad (1)$$

где  $v_x, v_y$  — пространственные частоты.

Если известны конструктивные параметры оптической схемы, ожидаемое (расчетное) значение оптической ФРТ с большой точно-

стью может быть получено путем моделирования в программах автоматизированного расчета оптических систем.

**ФРТ входной щели.** Описывает пространственное размытие, связанное с конечным размером входной щели гиперспектральной СА. ФРТ входной щели имеет следующий вид:

$$PSF_{щел}(y) = \text{rect}(y/h),$$

где  $h$  — ширина щели.

Фурье-образ от ФРТ входной щели будет иметь вид

$$TF_{щел}(v_y) = \text{sinc}(\pi h v_y). \quad (2)$$

**ФРТ приемника изображения.** Описывает пространственное размытие, связанное с ненулевыми размерами чувствительных элементов приемника. ФРТ приемника изображения имеет следующий вид:

$$PSF_{ПИ}(x, y) = \text{rect}(x/d_x) \text{rect}(y/d_y),$$

где  $d_x, d_y$  — размеры элемента приемника изображения поперек маршрута (вдоль строки ФПУ) и вдоль маршрута (вдоль столбца ФПУ) соответственно.

Передаточная функция элемента приемника в частотной области

$$TF_{ПИ}(v_x, v_y) = \text{sinc}(\pi d_x v_x) \text{sinc}(\pi d_y v_y). \quad (3)$$

**ФРТ, связанная с движением изображения.** Пространственное размытие изображения происходит и в том случае, когда в течение времени, пока идет интегрирование сигнала для данного пиксела, изображение смещается от одного детекторного элемента к другому. Такое смещение моделируется с помощью одномерной функции рассеяния точки, имеющей вид прямоугольного импульса:

$$PSF_{смещ}(y) = \text{rect}(y/s),$$

где  $s$  — пространственное размытие изображения в фокальной плоскости, определяемое как сдвиг изображения, выраженный в долях пиксела за время интегрирования.

Выполнив преобразование Фурье от ФРТ смещения изображения, получим

$$TF_{смещ}(v_y) = \text{sinc}(\pi s v_y). \quad (4)$$

**ФРТ электроники.** Электронный тракт аппаратуры во время накопления и переноса зарядов, оцифровки сигнала, усиления и т. д.

вносит искажения, влияющие на аппаратную функцию. ФРТ электроники рассчитывается либо измеряется в каждом конкретном случае специально.

По теореме о свертке получим передаточную функцию системы как произведение фурье-образов ФРТ всех составляющих в частотной области:

$$TF_{\text{общ}}(v_x, v_y) = TF_{\text{опт}} TF_{\text{щел}} TF_{\text{дет}} TF_{\text{смещ}} TF_{\text{эл}}. \quad (5)$$

Особенностью работы спектрометра является разделение ФРТ на поперечное  $A_{\perp}(x)$  и продольное  $A_{\parallel}(y)$  направления. В продольном направлении измеряются пространственные характеристики сцены съемки, а в поперечном получается информация о спектральном составе изображения местности, ограниченного входной щелью спектрометра.

Подставив формулы (1)—(4) в выражение (5), получим в поперечном и продольном направлениях следующие формулы:

$$TF_{\text{общ}}(v_x) = \exp(-\pi^2 a^2 v_x^2) \text{sinc}(\pi d_x v_x);$$

$$TF_{\text{общ}}(v_y) = \exp(-\pi^2 b^2 v_y^2) \text{sinc}(\pi h v_y) \text{sinc}(\pi d_y v_y) \text{sinc}(\pi s v_y).$$

Наибольший интерес представляет амплитудная составляющая передаточной функции — модуляционная передаточная функция (МПФ). Вводя обозначение  $MTF$ , получаем аналогично следующее выражение:

$$MTF_{\text{общ}} = |TF_{\text{общ}}| = MTF_{\text{опт}} MTF_{\text{щел}} MTF_{\text{ПИ}} MTF_{\text{смещ}} MTF_{\text{эл}}.$$

Используя обратное преобразование Фурье к общей передаточной функции, получаем формулу для вычисления аппаратной функции:

$$A_{\text{общ}}(x) = \tilde{F}^{-1} [TF_{\text{общ}}(v_x)];$$

$$A_{\text{общ}}(y) = \tilde{F}^{-1} [TF_{\text{общ}}(v_y)],$$

где  $\tilde{F}^{-1}$  — оператор обратного преобразования Фурье.

Спектральное разрешение  $\delta\lambda$  гиперспектральной СА можно определить как произведение полуширины  $\Delta y(\lambda)$  спектральной аппаратной функции для каждой длины волны и обратной линейной дисперсии аппаратуры  $D_i(\lambda)$  [5]:

$$\delta\lambda = \Delta y(\lambda) \frac{1}{D_i(\lambda)}. \quad (6)$$

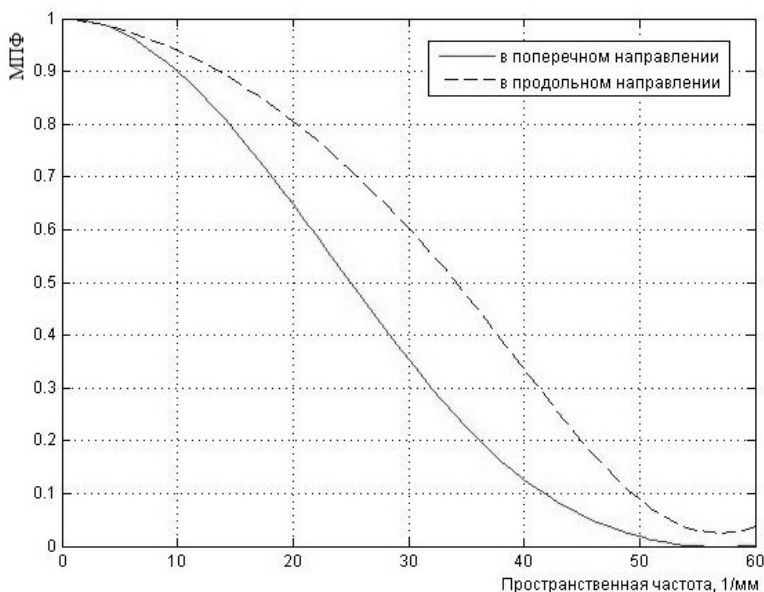
Определим характеристики гиперспектральной аппаратуры, разработанной на Красногорском заводе им. С.А. Зверева.

Аппаратура работает в диапазоне длин волн 0,4...0,95 мкм. Рабочий спектральный диапазон разбит на два поддиапазона с границами: 0,40...0,65 мкм (канал ВД 1); 0,63...0,95 мкм (канал ВД 2).

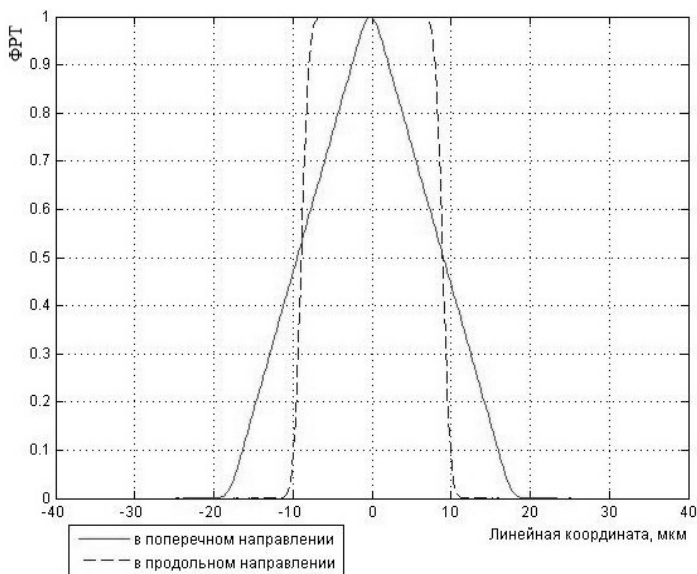
Расчет проводим для канала ВД 1. Параметры для расчета представлены в таблице.

Параметр	Описание
Приемник изображения	Кадровая матрица с размером элемента 18×18 мкм
Входная щель спектрометра	Ширина 18 мкм
Оптика	Заданное значение полуширины оптической ФРТ $\delta_x = \delta_y = 1,8$ мкм
Линейная дисперсия	Рассчитанное по параметрам УД значение $D_l(\lambda) = 3,942 \cdot 10^{-12} \lambda^4 - 9,456 \cdot 10^{-9} \lambda^3 + 8,612 \cdot 10^{-6} \lambda^2 - 3,552 \cdot 10^{-3} \lambda + 0,566$

Полученные графики МПФ в продольном и поперечном направлениях представлены на рис. 2. Влияние ФРТ электроники и движения изображения на общую функцию не учитывалось.

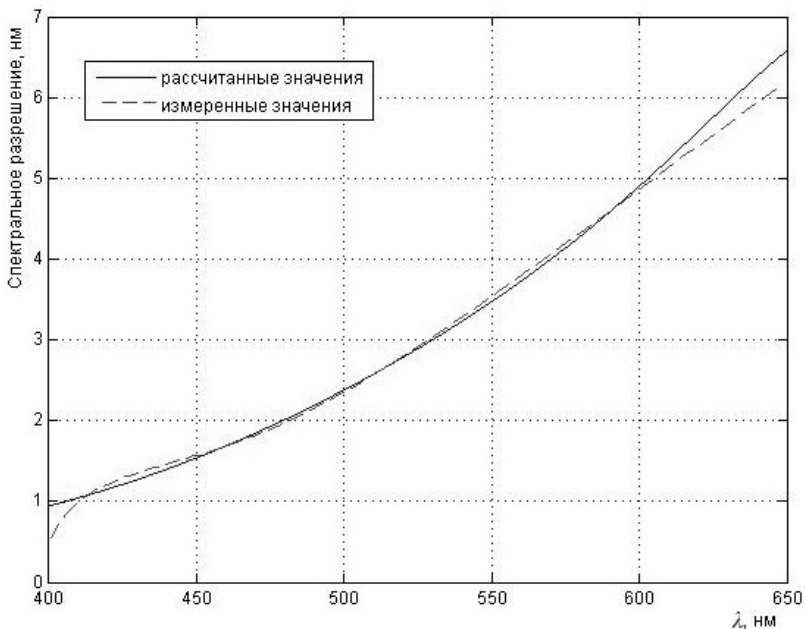


**Рис. 2. Графики модуляционной передаточной функции в продольном и поперечном направлениях**



**Рис. 3. Графики рассчитанной аппаратной функции в продольном и поперечном направлениях**

Графики аппаратной функции в продольном и поперечном направлениях приведены на рис. 3. Полуширина спектральной аппаратной функции  $\Delta y(\lambda) = 18,12$  мкм. По значению линейной дисперсии из таблицы можно найти спектральное разрешение прибора по формуле (6).



**Рис. 4. Спектральное разрешение в диапазоне длин волн 400...650 нм**

На рис. 4 представлен график спектрального разрешения для диапазона длин волн 400...650 нм (пунктирная линия — измеренные значения интервала спектральной выборки прибора).

Видно, что результаты расчета по предложенной методике имеют хорошее совпадение с реальными измеренными значениями и могут использоваться на этапе проектирования аппаратуры в качестве критерия для оптимизации схемотехнических и конструктивных параметров гиперспектральной СА. Расхождения на длинах волн свыше 600 нм возможны вследствие того, что в расчете было принято фиксированное значение полуширины оптической ФРТ  $\delta_x = \delta_y = 1,8$  мкм. Однако в реальном приборе это значение зависит от длины волны и точки поля и аппаратную функцию в таком случае необходимо рассчитывать для каждого параметра отдельно.

**Заключение.** Разработанная модель аппаратной функции гиперспектральной СА позволяет определить основные спектральные характеристики аппаратуры, на ее основе разработаны методика и программа в среде MATLAB для расчета аппаратной функции, МПФ и спектрального разрешения. Проверочный расчет аппаратной функции, МПФ и спектрального разрешения для гиперспектральной аппаратуры, разработанной на Красногорском заводе им. С.А. Зверева, показал хорошее соответствие расчетных и реальных измеренных данных, что позволяет использовать предлагаемую методику при проектировании новой гиперспектральной съемочной аппаратуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптические системы современных космических видеоспектрометров: варианты и особенности схемных решений / С.А. Архипов, А.В. Ли, В.М. Линько, С.А. Морозов // Сб. материалов восьмой научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». – М., 2011. – С. 146–152.
2. Заказов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И. Теория оптических систем. – М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.
3. Мосягин Г. М. Теория оптико-электронных систем. – М.: Машиностроение, 1990. – 432 с.
4. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
5. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. – Л.: Машиностроение, 1975. – 312 с.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012