

## Калибровка Изображающих Детекторов

Чтобы “превратить” наши изображающие детекторы в высокоточный измерительный прибор, требуется разработка набора специальных контрольных процедур. Целью этих процедур является определение *аппаратной функции* детектора (функции отклика), т.е. фактически – калибровка детектора.

### **Что такое аппаратная функция изображающего детектора?**

Как измерительный прибор детектор распределяет входное излучение по каналам фотоприемника. Стационарный входной поток можно выразить через интенсивность по заданному направлению  $\mathbf{e}$  в заданной спектральной диапозоне  $I_\lambda(\mathbf{e})$  (понимаемую как мощность или количество фотонов данной длины волны  $\lambda$ ). Этот поток распределится по каналам фотоприемника как  $S = \{ S[id] \}$ , где  $id$  — идентификатор канала. Предполагая пропорциональность отклика детектора на интенсивность входного потока (см. однако ниже), приходим к тому, что функцией отклика детектора является зависимость распределения  $S$  от  $\mathbf{e}$  и  $\lambda$  при фиксированной «единичной» интенсивности, т.е.  $s[id](\mathbf{e}, \lambda)$ .

*Примечание 1.* Таковую, наиболее общую постановку целесообразно частично сузить, например определив зависимость от  $\mathbf{e}$  положения центроида изображения  $R_c$  (двумерный вектор на фокальной поверхности, ФП), по которому легко восстанавливается канал, в который попадает этот центроид,  $id_c = id_c(R_c)$ . После этого распределение  $S$  можно сузить до ограниченного носителя, расположенного вблизи канала  $id_c$  (например, можно ограничиться самим каналом  $id_c$  и его ближайшими 8-ю соседями). Однако такая постановка подразумевает отсутствие широкой «подложки» в изображении, что может быть неоправдано в реальном приборе.

*Примечание 2.* Допущение о пропорциональности отклика интенсивности входного потока может оказаться несправедливым, особенно в области сильных сигналов. В частности, могут наблюдаться такие эффекты как pile-up (пропуск фотонов при малом интервале между их временами прихода), эффект нелинейности при засветки большого числа каналов, эффекты after-pulses и «соседи» (в случае SiPM) и др. В каждом из этих случаев требуется дополнительное вычисления, уточняющие отклик прибора.

### **Какие характеристики аппаратной функции требуется определить?**

- 1) Грубое распределение чувствительности фотоприемной поверхности (ФП) детектора, понимаемое как расположение сенсорных зон («пикселей»): положение их центров и углов, их размеры.
- 2) Относительная и абсолютная чувствительность каждого пикселя при его однородной засветке (размер области засветки имеет смысл варьировать от малого до большого для оценки нелинейных эффектов).
- 3) Зависимость положения изображающей точки (центроида?) от направления на точечный источник (ТИ).
- 4) Зависимость размера и формы изображения от направления на ТИ (функции рассеяния точки, ФРТ).
- 5) Зависимость энергии в изображении («боксе пятна») от направления на ТИ.
- 6) Распределение энергии по каналам от направления на ТИ (желательно в нескольких спектральных линиях или полосах).

Каждая из перечисленных выше характеристик может быть выражена в виде набора параметров. Этот набор может меняться в зависимости от выбранной модели отклика. Например, в самом грубом приближении зависимость изображающей точки от направления ТИ может быть представлена как перспективная проекция с фиксированным фокусным расстоянием  $f$ . Однако для широкоугольных оптических систем такой модели явно недостаточно, ввиду заметной дисторсии. В этом случае отклик оптики параметризуется набором из ??? параметров (предполагается также, что ФП может быть смещена...). Аналогично при грубой гауссовой аппроксимации ФРТ достаточно построить зависимость от направления на ТИ лишь одного параметра — ширины  $\sigma$  (или FWHM). Наличие аберраций типа кома приводит к несимметричному (радиально-вытянутому) изображению, что значительно усложняет параметризацию ФРТ (как вариант, ФРТ может быть параметризована нейронной сетью при наличии достаточно точного симулятора-трассировщика оптики).

Для оценки параметров аппаратной функции целесообразно разбить калибровочные процедуры на несколько более-менее независимых блоков:

***А. Лабораторные калибровки отдельных элементов детектора***

***В. Лабораторные калибровки детектора в сборке***

***С. Полевые калибровки детектора***

В блоке А контрольным измерениям подвергаются два основных элемента детектора – фотоприемник и оптическая система. Можно выделить следующие этапы:

А.1. Подбор порогов (общих и индивидуальных).

А.2. Абсолютная и относительная калибровка отдельных каналов.

А.3. Определение осевых и внеосевых ФРТ.

А.4. Определение осевых и внеосевых эффективности оптики.

При этом в А.3, А.4 качестве сенсора желательно использовать CCD- (или CMOS-) матрицы с малым размером пикселя (относительно размера канала). В качестве контроля дополнительно могут быть использованы и каналы фотоприемника.

В блоке В требуется оценить аппаратную функцию детектора с помощью калибровочных источников. Такими источниками могут быть удаленные на большое (по сравнению с фокусным) расстояние малоразмерные источники (например, в коридоре корпуса) или звезды. Для оценки характеристик аппаратной функции методами МО необходимо осуществить взаимное перемещение детектора и источников. Это могут быть контролируемые движения источников (при неподвижном детекторе) – например, смещение источника в коридоре на заданное расстояние, либо вращение набора источников вокруг фиксированной оси (по типу устройства, использованного нами ранее для контроля зеркала ТУС), либо движение звезд по небосводу (при длительной экспозиции). Также можно использовать неконтролируемое перемещение детектора, например его повороты при наблюдении звездного неба.

Блок С предназначен для определения ориентации детектора...