

УДК 53.087.5

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТ ШУМА ПЗС-ДЕТЕКТОРА
Литвинович Г.С., Бручковский И.И.**

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Использование ПЗС-детекторов нашло широкое распространение в спектральных приборах. Широкий спектральный диапазон, покрывающий область от ультрафиолета до инфракрасного диапазона, позволяет решать широкий круг задач в области дистанционного зондирования земли и мониторинга подстилающих поверхностей. Однако, проводя измерения, например, с авиационной платформы при помощи спектрометра, требуется получить данные с максимальным отношением сигнал/шум за минимальное время экспозиции для уменьшения смаза изображения, что требует информацию о шумовой компоненте, вносящей вклад в результирующий сигнал.

В настоящей работе использована методика [1] и результаты оценки различных компонент шума неохлаждаемой ПЗС-линейки TCD1304DG фирмы Toshiba. Данный датчик популярен среди бюджетных спектрометров на видимую область спектра (350–1 000 нм). Детектор имеет 3 648 рабочих пикселя и 13 конструктивно затемненных пикселей. Сигнал с ПЗС-линейки считывается с частотой 250 кГц и оцифровывается с 12-битным разрешением. Экспозиция изменяется в диапазоне от 15 до 2000 мс. В работе рассматриваются следующие виды шумов: структурный, шум считывания, электронный дробовый шум и фотонный шум, приводятся результаты оценки уровня компонент шума для температуры детектора в 25 °С.

Наличие у детектора конструктивно изолированных от света пикселей позволяет вычитать сигнал, образованный тепловой генерацией электронов.

Сигнал каждого пикселя детектора может быть представлен в следующем виде:

$$N=I \cdot K+Ph(I)+FPN(T,t)+D(T,t)+R(T), \quad (1)$$

где N – сигнал на выходе АЦП электрической схемы детектора; I – освещенность пикселя; K – коэффициент чувствительности пикселя к излучению; Ph – фотонный дробовый шум; FPN – структурный шум; D – электронный дробовый шум; R – шум считывания.

Структурный шум проявляется как шум определенного пространственного рисунка и вызван различиями чувствительности отдельных пикселей детектора. Для определения среднеквадратичного отклонения (СКО) структурного шума проводился следующий эксперимент. Регистровалась серия из $K=100$ изображений при отсутствии света с временами экспозиции от

15 мс до 2 000 мс. Поскольку электронный шум и шум считывания подчиняются нормальному распределению и принимают случайное значение от измерения к измерению, то усреднение выборки изображений на каждой экспозиции позволяет выделить постоянный рисунок на изображении, определяемый структурным шумом. Оценка СКО структурного шума может быть аппроксимирована линейной функцией (рисунок 1) вида $\sigma_{FPN} = 0,00382 \cdot t$, где t – время экспозиции, мс.

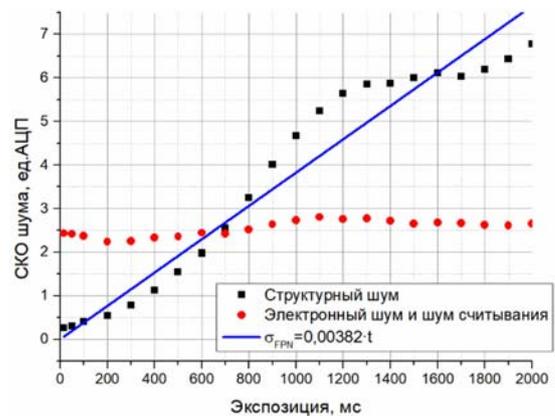


Рисунок 1 – Зависимость компонент шума от времени экспозиции

Электронный дробовый шум и шум считывания определялись из зависимости от времени экспозиции среднего значения всех СКО пикселей по серии из $K=100$ изображений. Так как шум считывания обусловлен особенностями электронной схемы и не зависит от времени экспозиции, то он оценивался как сигнал, полученный с детектора при нулевой экспозиции. Для реального детектора обеспечить нулевое время экспозиции не представляется возможным, поэтому оценка шума считывания получалась при помощи аппроксимации зависимости СКО шума считывания и СКО электронного шума (рисунок 1) до нулевого времени экспозиции. Сумма СКО электронного дробового шума и шума считывания является достаточно пологой. Это означает, что сумма СКО указанных компонент шума ограничена шумом считывания. Для данной температуры СКО шума считывания составляет $\sigma_R = 2,55$ единицы АЦП. Стоит отметить, что при $t > 700$ мс структурный шум начинает преобладать над шумом считывания.

Фотонный шум вызван неравномерным попаданием фотонов на пиксель детектора, соответствующая вероятность описывается распределе-

нием Пуассона [2], согласно которому СКО фотонного шума равно квадратному корню из числа сигнальных электронов N . Для оценки величины фотонного шума регистрировался сигнал различной интенсивности в пределах динамического диапазона детектора для времени экспозиции 200 мс, которая была выбрана из соображений небольшого вклада уже определенных компонент шума и уровня сигнала, занимающего весь динамический диапазон детектора. С использованием экспериментальных данных, представленных на рисунке 2, зависимость величины СКО фотонного шума от уровня сигнала определялась по формуле: $\sigma_{ph}(N) = 0.07 \cdot \sqrt{N}$. При линейном увеличении уровня сигнала уровень фотонного шума возрастает пропорционально \sqrt{N} , следовательно, отношение сигнал/шум возрастает пропорционально \sqrt{N} . То есть при проведении измерений с целью минимизации вклада фотонного шума, имеет смысл регистрировать максимальные уровни сигнала в пределах области линейности детектора.

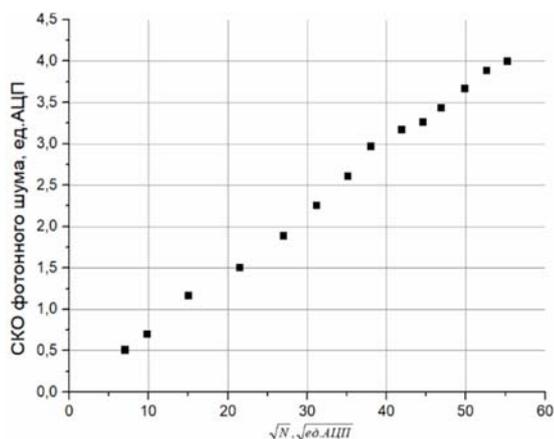


Рисунок 2 – Зависимость СКО фотонного шума от уровня сигнала

Схожие исследования были проведены для температуры детектора 35 °С, что примерно соответствует температуре детектора спектрометра, находящимся под прямыми солнечными лучами на широтах Беларуси в летнее время: при повышении температуры наблюдается рост всех видов шумов. Однако именно структурный шум требует особого внимания, поскольку не может быть устранен усреднением спектров. Для такой температуры на временах экспозиции более 100 мс структурный шум преобладает над остальными видами шума.

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для уменьшения влияния фотонного шума, требуется выбирать максимально возможный уровень сигнала в пределах области линейности детектора.
2. Для уменьшения вклада структурного шума в сигнал стоит использовать небольшие времена экспозиции (менее 260 мс при температуре детектора 25 °С).
3. Для устранения влияния структурного шума производить вычитание темнового сигнала, зарегистрированного при отсутствии излучения на той же экспозиции, что и полезный сигнал.
4. Для возможной коррекции температурных эффектов применять датчик температуры.
5. При необходимости регистрации слабых сигналов на длительных временах экспозиции имеет смысл проводить регистрацию сигнала следующим образом: суммировать несколько изображений на временах экспозиции менее 100 мс. Такой подход позволяет уменьшить компоненту структурного шума до величины меньшей, чем шаг оцифровки сигнала.

Существуют методы цифровой фильтрации сигнала от шума на основе, например, Фурье-фильтров низких частот. Однако учитывая зависимость амплитуды шума от внешних факторов (температуры, время экспозиции), для каждого режима измерений приходится подбирать параметры соответствующего фильтра нижних частот, что представляется достаточно трудоемкой задачей. Априорные знания о величине каждой компоненты шума для заданных условий регистрации позволяет разработать оптимальный фильтр конкретно для данных условий и решаемой задачи.

Компоненты шума, которые были определены экспериментально, позволяют устанавливать оптимальные параметры съемки для различных условий измерений и уже на этапе планирования эксперимента установить желаемые параметры измерения, позволяющие получить максимальное отношение сигнал/шум.

Литература

1. Irie K. A Technique for Evaluation of CCD Video-Camera Noise / K. Irie, A.E. McKinnon, K. Unsworth, I.M. Woodhead // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2008. – Vol. 18, iss. 2. – P. 280–284.
2. Irie K. A model for measurement of noise in CCD digital-video cameras / K. Irie, A.E. McKinnon, K. Unsworth, I.M. Woodhead // Measurement Science and Technology. – 2008. – Vol. 19. – № 4. – P. 1–5.
3. A. Ferrero. Low-uncertainty absolute radiometric calibration of a CCD / Ferrero A., Campos J., Pons A. – Metrologia. – 2006. – Vol. 43. – № 2. – P. 17–21.