

УДК 520.353-17:621.382

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ И СТАТИСТИКИ ФОТОНОВ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОПТОВОЛОКОННОМ СПЕКТРОГРАФЕ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ БТА

© 2023 Г. Ш. Митиани<sup>1\*</sup>, Д. Д. Макаров<sup>1</sup>, В. Н. Аитов<sup>1</sup>, Г. Г. Валявин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 25 января 2021 года; после доработки 27 ноября 2022 года; принята к публикации 27 декабря 2022 года

Исследуется нелинейность передаточной функции регистрации фотонов ПЗС-приемником эшелюного оптоволоконного спектрографа высокого спектрального разрешения БТА САО РАН. Осуществляется локальный анализ сигналов в изображении спектра излучения и исправление данных.

Ключевые слова: *приборы: детекторы — приборы: спектрографы — методы: статистические*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Решение современных астрономических вопросов плотно сопряжено с совершенствованием систем регистрации изображений и методов обработки данных. Конечной целью является увеличение точности измерений излучения космических объектов. Приборная точность измерений определена набором фотометрических характеристик и пространственным разрешением, а в целом обусловлена связанными между собой фундаментальными (шум фотонов, белый шум усилителя, частота Найквиста) и аппаратурными ограничениями. В ряде задач в части фотоприемника главным аппаратурным ограничением точности является нелинейность передаточной функции регистрации фотонов.

Передаточная функция регистрации фотонов — один из наиболее ценных инструментов калибровки и оптимизации характеристик ПЗС-матриц. Функция определяет коэффициент преобразования ПЗС-системы, на основании которого рассчитываются такие параметры как шум считывания, темновой ток, квантовая эффективность, глубина потенциальных ям и другие. Однако передаточная функция имеет уникальную форму и нелинейность как для различных типов матриц, так и для конкретных приборов и конкретных отдельных контроллеров. Это обусловлено различными причинами возникновения нелинейности.

Нелинейность выходного усилителя может давать вклад порядка 2–15%, и она связана с электрическими параметрами считывающего узла. Ее значение может быть существенно снижено до

0.01–0.1% правильным смещением считывающего МОП-транзистора, обратной связью по току и напряжению. Важную роль в этом вопросе играет геометрическая форма канала и топология МОП-транзистора. Следствием небольших отличий МОП-структур в разных выходных устройствах является уникальная форма передаточной функции «заряд — напряжение», которая проявляет себя во всем динамическом диапазоне.

Топология ПЗС предполагает вероятность присутствия нежелательных потенциальных ям в фоточувствительной структуре, называемых дефектами экспонирования. Дефекты экспонирования ПЗС обуславливают уникальную форму передаточной характеристики «свет — заряд» отдельных фоточувствительных элементов (пикселей) и влияют на изгиб кривой «свет — цифровые отсчеты» в нижней части динамического диапазона при слабом сигнале.

Наличие схожих дефектов в области канала ПЗС (ловушек, обладающих электрической емкостью) дает вклад в нелинейность через неэффективность переноса заряда от пикселя к пикселю. В современных матрицах этот параметр достаточно хорошо оптимизирован (совершенствованием топологии затворной структуры) и оказываемое влияние весьма незначительно, порядка 0.0001–0.001% нелинейности.

Наблюдательные программы 2010-х годов, в которых стали применяться ПЗС с полным обеднением, эффективные в красном и ближнем инфракрасном диапазонах, выявили нелинейность, связанную с положительной корреляцией сигналов соседних пикселей. Из первых сообщений о

\*E-mail: gsmitian@gmail.com

наблюдаемой нелинейности в толстых матрицах стало известно, что при засветке плоским полем с увеличением сигнала ковариация между соседними пикселями растет быстрее, чем их среднее значение. В структурированных изображениях отмечена тенденция к расползанию сигнала звезд при увеличении яркости (эффект «ярче – шире», англ. «brighter – fatter»). Наиболее значительная нелинейность такого рода, связанная с коррелированным откликом дискретной структуры ПЗС, обусловлена динамическим потенциалом интегрального фототока, который изменяет форму силовых линий поля, что приводит к перераспределению заряда. Коррелированный отклик также может быть связан с эффектами поперечной диффузии зарядов и латеральным искажением поля в области пространственного заряда ПЗС стоповым напряжением. Оба эффекта обладают хроматизмом. Поперечная диффузия более выражена в коротковолновой области спектра, где имеет большую ширину полумаксима гауссового распределения. Однако проведенное другими авторами исследование на основе метода автокорреляции сигналов плоского поля, не выявило значительного вклада поперечной диффузии в нелинейность (Downing et al. 2006). Исследование латеральных искажений в работе Doherty et al. (2014) показало значительную корреляцию сигнала между пикселями, приводящую к провалу сигнала ниже 80% от среднего по полю, но только в области не далее 10 пикселей от края матрицы. В остальной части изображения латеральные искажения существенной роли не играют.

В следующих Разделах представлены результаты тестов нелинейности ПЗС-системы оптоволоконного спектрографа БТА САО РАН, оборудованного чипом с глубоким обеднением. Регистрируемые спектры представляют собой структурированные изображения. Наблюдаемая в них нелинейность ожидаемо превосходит паспортные значения ПЗС-камеры, полученные с помощью классической методики с засветкой плоским полем. Измерение и исправление нелинейности производятся по отдельным пикселям, путем набора достаточной статистики для подавления шума Пуассона и применения степенного полинома. Такой подход интересен тем, что каждый пиксель спектральных порядков засвечен монохроматическими квантами. Это дает возможность не только осуществлять исправление нелинейности с учетом указанных выше эффектов корреляции, но и исследовать особенности распределения нелинейности по полю изображения для разных длин волн.

## 2. ТЕСТИРУЕМАЯ АППАРАТУРА

Эшельный оптоволоконный спектрограф БТА (рис. 1) детально описан в работах Valyavin et al.

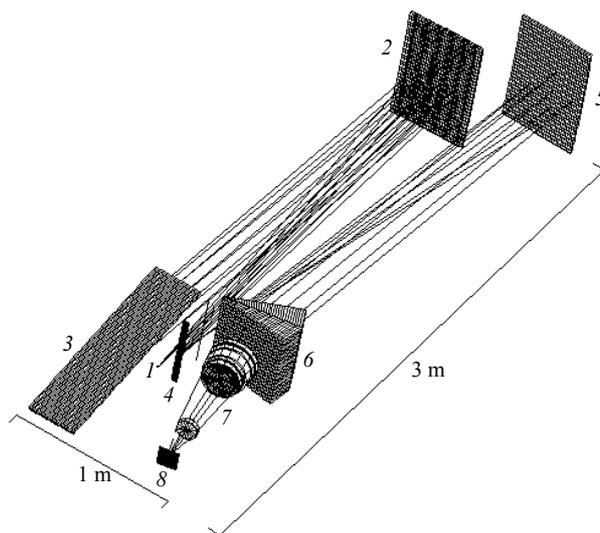


Рис. 1. Оптическая схема спектрографа. 1 — щель, 2 и 5 — внеосевые коллиматоры, 3 — эшелле-решетка, 4 — ломающее зеркало, 6 — кроссдисперсионная призма, 7 — восьмилинзовый объектив камеры, 8 — приемник.

(2014; 2020) и представляет собой классическую сборку «белый зрачок» (Dekker et al. 2000). Сборка использует два внеосевых коллиматора. Один из них работает в режиме автоколлимации с эшелле-решеткой, другой формирует плоскость зрачка в своем фокусе, где строится недиспергированное изображение эшелле-решетки, за которым происходит вторичное формирование спектра исследуемого объекта. В этом месте затем размещается узел кросс-дисперсии и фокусирующая оптика с ПЗС-приемником. В качестве ПЗС-приемника используется охлаждаемая азотом камера с матрицей e2v CCD231-84. Для калибровки спектра применяются торий-аргоновая лампа и стабилизированный светодиод, который использован нами для определения функции нелинейности. Затвор расположен перед щелью спектрографа в области схождения лучей и имеет диаметр два сантиметра, что обеспечивает моментальное перекрытие всего пучка света.

Характеристики ПЗС-приемника в тестах:

- тип ПЗС —  $n$ -канальный, полнокадровый, с глубоким обеднением;
- формат —  $4128 \times 4128$  пикселей;
- фоточувствительная область —  $61.4 \times 61.7$  мм<sup>2</sup>;
- размер пикселя —  $15 \times 15$  мкм;
- время считывания полного кадра — 126 с;
- нелинейность усиления  $\pm 0.05$ ;
- температурный режим — 153 К.

### 3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Для измерения и исправления нелинейности функции регистрации фотонов существуют различные методики. Наиболее точной из них является анализ пространственной автокорреляционной дисперсии (Downing et al. 2006), направленный на вычисление коэффициента преобразования считывающего узла по данным о нелинейных девиациях заряда относительно отдельно засвеченного пикселя. Другие классические «техники», применяемые непосредственно на телескопах, предполагают использование «flat fields» (кадров плоского поля). Методы измерений для определения нелинейности отклика приемника изображения делятся на два типа: измерения с фиксированной экспозицией и измерения с фиксированной интенсивностью (Doherty et al. 2014). Не останавливаясь на деталях, отметим, что сложность в реализации измерений с фиксированной экспозицией состоит в необходимости применения калибровочной системы для устранения вклада термически наведенной нелинейности, возникающей в источнике света. А сложность измерений с фиксированной интенсивностью заключается в необходимости дополнительной корректировки результатов ввиду конечного времени срабатывания шторок затвора, что ведет к появлению эффектов виньетирования и нелинейности по полю, значительной при коротких экспозициях. В обоих случаях имеется неоднородность засветки плоским полем порядка 1%. В проводимых нами тестах матрица засвечивается излучением фотодиода с фиксированной интенсивностью. Нелинейностью, связанной с затвором, в таком случае мы пренебрегаем, так как пучок света перекрывается моментально в наиболее узкой его части. Это также снимает вопрос термически наведенной нелинейности в эксперименте.

Оптическая часть спектрографа (рис. 1) вынесена от телескопа в специальное светозащищенное помещение, что позволяет производить большое число измерений в светлое время суток. Стабильность излучения светодиода и электрического режима камеры оценивалась нами из среднеинтегрального сигнала с фотоприемника для большого числа заданных экспозиций, аperiodически снимаемых в ходе недельных измерений. Выявленная долговременная нестабильность составляет  $\pm 1.5e^{-}$ .

Для определения нелинейности с учетом коррелированных составляющих необходим отказ от классического подхода с освещением плоским полем и набором достаточной статистики усреднением по полю изображения. В данной работе нами

использован сигнал в отдельных пикселях, снятый при различных экспозициях  $t$ . Число выборок  $n$  (то есть кадров в отдельном цикле экспозиций), по которым ведется усреднение, определяет точность восстановления кривой передаточной функции, ограниченную шумом Пуассона. Соответствующая ошибка уменьшается пропорционально квадратному корню от числа выборок. Полиномиальная аппроксимация нелинейности позволяет снизить количество выборок, необходимое для подавления шума Пуассона. Пример восстановленных таким образом функций нелинейности показан на рис. 2.

Для построения кривых были получены изображения спектра излучения светодиода, по 11 кадров для 26 экспозиций ( $n = 11$  и  $t = 26$ ), и кадры темнового тока. После попиксельного усреднения изображений спектра вычитался темновой фон. Для каждого пикселя осуществлялось построение зависимости уровня сигнала от экспозиции  $S(\tau)$ :

$$S(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i(\tau), \quad (1)$$

где  $n$  — количество кадров в экспозиции. Методом наименьших квадратов была выполнена линейная аппроксимация зависимости уровня сигнала от экспозиции  $L(\tau)$ ; вычислены девиации среднего сигнала относительно соответствующего значения линейной функции

$$\delta(S) = S(\tau) - L(\tau); \quad (2)$$

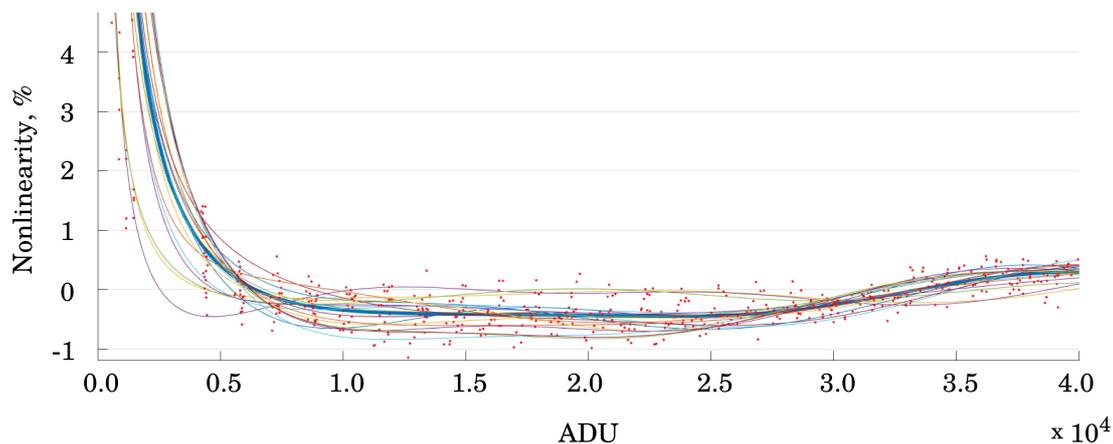
определена нелинейность  $NL(S)$  как отношение

$$NL(S) = \frac{\delta(S)}{L(\tau)}; \quad (3)$$

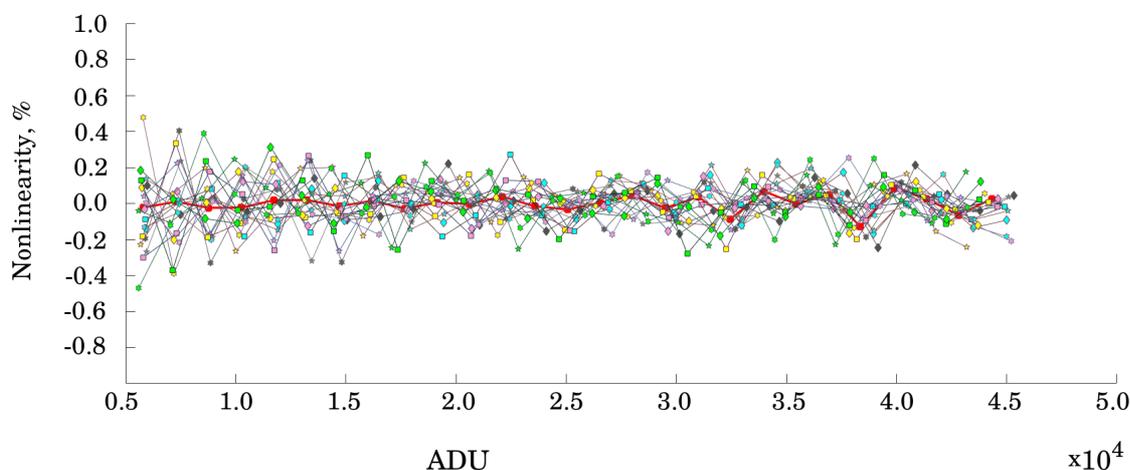
выполнена Фурье-аппроксимация полиномом третьей степени

$$\begin{aligned} f(x) = & a_0 + a_1 \cos xw + b_1 \sin xw \\ & + a_2 \cos 2xw + b_2 \sin 2xw \\ & + a_3 \cos 3xw + b_3 \sin 3xw. \end{aligned} \quad (4)$$

Порядок полинома для наилучшей аппроксимации выбирается из предполагаемого числа изгибов функции. Первый изгиб графика (рис. 2) до 7000 ADU ассоциирован с нелинейностью усилителя, дефектами экспонирования и переноса. В этой части, в области слабого сигнала, дополнительную ошибку в определение функции вносит точность двойной коррелированной выборки при преобразовании «заряд — напряжение». Поэтому целесообразно ограничить число выборок в этой области, чтобы не увеличивать ошибку в функции аппроксимации в области с большим сигналом.



**Рис. 2.** Функции нелинейности, восстановленные с помощью полиномов, и точки средних значений сигналов, измеренных при различных экспозициях в разных частях поля изображения.



**Рис. 3.** Нелинейность исправленного сигнала в различных пикселях.

Участки 7000–30 000 и 30 000–40 000 ADU ассоциированы с нелинейностью усилителя и эффектами корреляции сигналов между пикселями.

#### 4. ПРИМЕНЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Нелинейность, рассчитанная аппроксимацией значений, позволяет определить ошибку сигнала в линейной системе и играет главным образом информативную роль. Для компенсации вносимых нелинейностью искажений удобнее пользоваться вычитанием из измеренного сигнала соответствующих значений аппроксимированной функции девиаций. На рис. 3 показаны значения нелинейности  $NL(S)$  в отдельных пикселях, рассчитанные после такого исправления.

Стандартное отклонение девиаций  $\delta(S)$  исправленных данных соответствует распределению Пуассона. В диапазоне сигнала 5000–30 000 ADU

наблюдается стационарность, нелинейность составляет 0.01–0.02% (см. красную линию на рис. 3), а эффективность коррекции составляет 1–2 порядка. Сигнал более 30 000 ADU заметно коррелирован, нелинейность достигает 0.15%, что тем не менее в 5–10 раз ниже, чем в данных без исправления.

#### 5. ВЫВОДЫ

Представленная методика измерений нелинейности камеры на эшелном оптоволоконном спектрографе БТА проста в реализации. Она не требует учета нестабильности излучения светодиода, вызываемой его нагревом. Вполне достаточно контроля стабильности электрических характеристик питания. Исключена нелинейность отклика приемника из-за конечного времени срабатывания затвора ввиду его компактных размеров и размещения в

месте схождения оптического пучка. Применение полинома Фурье для аппроксимации функций (3) и (4) позволяет повысить качество спектрального материала в наблюдениях астрофизических объектов с высоким спектральным разрешением. Точность измерений детерминирована набором экспозиций  $t$  и числом кадров  $n$  в каждом цикле. В общем случае подавление шума фотонов для выявления субпуассоновых эффектов требует достаточного для статистического анализа набора из нескольких сотен кадров ( $n \gg 200$ ) для каждого  $t$ . Благодаря стационарности Пуассона принцип наименьших сумм в подборе коэффициентов полинома в случае достаточно большого числа  $t$  позволяет снизить необходимое число кадров отдельных экспозиций в  $1/t$  раз. Такой подход при  $t = 26$  и  $n = 11$  обеспечил точность исправления нелинейности в диапазоне 5000–30 000 ADU на 1–2 порядка, а в диапазоне от 30 000 ADU в 5–10 раз. Дальнейшее изучение субпуассоновских эффектов представляет интерес для перспективных исследований атмосфер экзопланет в момент транзита с помощью телескопа БТА САО РАН.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты».

### Study of Nonlinearity and Statistics of Photons in BTA High-Resolution Fiber-Optic Spectrograph Images

G. S. Mitiani<sup>1</sup>, D. D. Makarov<sup>1</sup>, V. N. Aitov<sup>1</sup>, and G. G. Valyavin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

The nonlinearity of the transfer function of photon detection by a CCD receiver of an echelle fiber-optic spectrograph of high spectral resolution at the BTA SAO RAS is studied. Local analysis of signals in the image of the emission spectrum and correction of data are carried out.

Keywords: *instrumentation: detectors—instrumentation: spectrographs—methods: statistical*

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы признательны правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту № 075-15-2020-780.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Dekker, S. D’Odorico, A. Kaufer, et al., SPIE Conf. Proc. **4008**, p. 534 (2000).
2. P. E. Doherty, P. Antilogus, P. Astier, et al., SPIE Conf. Proc. **9154**, id. 915418 (2014).
3. M. Downing, D. Baade, P. Sinclair, et al., SPIE Conf. Proc. **6276**, id. 627609 (2006).
4. G. G. Valyavin, V. D. Bychkov, M. V. Yushkin, et al., *Astrophysical Bulletin* **69** (2), 224 (2014).
5. G. G. Valyavin, F. A. Musaev, A. V. Perkov, et al., *Astrophysical Bulletin* **75** (2), 191 (2020).