

УДК 520.16

DOI: 10.62955/0135-3748-2026-429

Orcid 0009-0006-8094-0116

ОБНАРУЖЕНИЕ ГРАНИЦ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ДАТЧИКА ШАКА–ГАРТМАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

М.Б. Дрига

¹Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, driga@iszf.irk.ru

DETECTING SUNSPOT EDGES ON SHACK–HARTMANN SENSOR IMAGES WITH THE COMPUTER VISION METHOD

M.B. Driga

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, driga@iszf.irk.ru

Аннотация. Работа посвящена развитию метода по автоматическому выделению контуров на изображениях солнечных пятен в субапертурах датчика Шака–Гартмана для оценки локальных смещений изображений, вызванных атмосферной турбулентностью. На основе гартманограмм, полученных на Большом солнечном вакуумном телескопе, реализован метод, объединяющий фильтрацию Гаусса, детектор границ Кэнни и моментный анализ бинарных масок пятен. Показано, что оптимальная настройка детектора ($\sigma = 3$, блок сглаживания 3×3) позволяет надежно локализовать все 32 субапертуры и определить координаты центра пятна в каждой из них. По дисперсии дифференциальных смещений вычислен параметр Фрида r_0 , который составил 4.9–5.7 см, что хорошо согласуется с многолетними измерениями оптической нестабильности в месте расположения телескопа.

Ключевые слова: датчик Шака–Гартмана, метод Кэнни, солнечные пятна, оптическая турбулентность, параметр Фрида.

Abstract. The paper addresses automatic detection of sunspot contours within subapertures of a Shack–Hartmann sensor in order to estimate local image displacements caused by atmospheric turbulence. Using Hartmannograms obtained at the Large Solar Vacuum Telescope, we implemented an algorithm combining Gaussian smoothing, the Canny edge detector, and moment analysis of binary spot masks. It is shown that the optimal detector settings ($\sigma = 3$, 3×3 box filter) reliably localize all 32 subapertures and determine the spot centroid in each of them. The Fried parameter r_0 is derived from the variance of differential displacements, yielding values of 4.9–5.7 cm, which is in good agreement with long-term measurements of optical instability at the telescope site.

Keywords: Shack–Hartmann sensor, Canny method, sunspots, optical turbulence, Fried parameter.

ВВЕДЕНИЕ

Турбулентные флуктуации показателя преломления воздуха в земной атмосфере вызывают дрожание и размытие изображений, регистрируемых наземными телескопами. Для компенсации этих искажений широко используются системы адаптивной оптики, характеристики которых определяются вертикальным распределением оптической турбулентности [Rimmele and Marino, 2011; Shikhovtsev et al., 2023]. Одним из ключевых инструментов для измерения локальных наклонов волнового фронта служит датчик Шака–Гартмана, широко применяемый в оптических схемах наземных телескопов [Antoshkin et al., 2017; Schmidt et al., 2021; Шиховцев и др., 2020]. Обработка получаемых с его помощью гартманограмм – изображений в фокальной плоскости микролинз – требует выделения контуров наблюдаемых объектов (например, солнечных пятен) и точного определения их центров. Ручная разметка таких данных чрезвычайно трудоёмка, поэтому актуальна разработка автоматических процедур.

В настоящей работе предлагается методика, основанная на детекторе границ Кэнни [Canny, 1986], адаптированная для анализа гартманограмм солнечных пятен, полученных на Большом

солнечном вакуумном телескопе (БСВТ). Целью является автоматическое выделение субапертур, локализация в них солнечного пятна и расчёт смещений, по которым затем оценивается интегральная характеристика турбулентности – параметр Фрида.

ДАнные И МЕТОды

Экспериментальный материал представлен временными сериями гартманограмм, зарегистрированных макетом адаптивной оптики БСВТ на длине волны 535 нм с частотой 100 Гц [Antoshkin et al., 2017; Shikhovtsev, 2024]. Каждая гартманограмма содержит 32 субапертуры, проекция каждой из которых на светочувствительную матрицу составляет 100×100 пикселей (масштаб 0.3 угл. с/пиксель). В правом верхнем углу субапертур локализовано изображение солнечного пятна.

Обработка выполнялась в несколько этапов. Сначала для подавления высокочастотного шума применялся гауссов фильтр с размером ядра 3×3 и $\sigma = 3$. Затем к сглаженному изображению применялся алгоритм Кэнни [Canny, 1986]: вычисление градиента (оператор Собеля), немаксимальное подавление и двойная пороговая фильтрация. При $\sigma = 3$ детектор выделял 64 контура (внутренние и внешние границы 32 субапертур) без

появления артефактов. Координаты субапертур автоматически находились по положению крайнего левого верхнего пикселя каждого контура.

После выделения субапертур для уменьшения остаточного шума внутри них применялся нормализованный блочный фильтр 3×3 . Количественный анализ показал, что среднеквадратичное отклонение интенсивности снижается с 46.9 (без фильтрации) до 34.6, тогда как более крупные ядра (5×5 , 7×7) дают близкие значения (~ 29), но излишне сглаживают края пятен. Поэтому в качестве компромисса выбран размер 3×3 .

Для отделения пятна от фона производилась линейная нормализация интенсивности в диапазон $[0; 4]$ с последующей бинаризацией: пиксели, соответствующие пятну, получали значение 1, остальные – 0. Координаты центра тяжести бинарного изображения (центра пятна) вычислялись через статистические моменты. Нулевой момент даёт площадь пятна S , а координаты центра определяются отношениями первых моментов к нулевому:

$$\underline{x} = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \underline{y} = \frac{M_{01}}{M_{00}},$$

где

$$M_{ij} = \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{y=1}^{N_y} x^i y^j I_{xy},$$

I_{xy} — интенсивность пикселя на бинарном изображении. Реализация алгоритма опиралась на библиотеки OpenCV и scikit-image.

Последовательное применение описанной процедуры ко всем гартманограммам серии даёт временные ряды смещений центра пятна в каждой субапертуре. По двум центральным субапертурам вычислялась дисперсия дифференциального смещения $\sigma_{\Delta\alpha}^2$, которая затем использовалась для оценки параметра Фрида r_0 [Ботыгина и др., 2013]:

$$r_0 = \left[0.528 \lambda^5 D^{-\frac{1}{5}} (\sigma_{\Delta\alpha}^2) \right]^{-\frac{3}{5}} \left(1 - 0.562 \left(\frac{d}{D} \right)^{-1/3} \right)^{3/5}$$

где $\lambda = 0.535$ мкм, $D = 10$ см – эквивалентный диаметр субапертуры, $d/D = 1.1$. Дисперсия оценивалась по 30-секундным интервалам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Применение разработанного алгоритма к тестовым сериям гартманограмм показало его устойчивую работу: на всех кадрах корректно выделялись 32 субапертуры и определялось положение центра пятна (за исключением редких кадров, где пятно было слишком слабо контрастировано – менее 0.5 % случаев). Вычисленные по дифференциальным смещениям значения r_0 составили 4.9 см (х-компонента) и 5.7 см (у-компонента). Эти величины попадают в интервал 3–8 см, характерный для дневных условий на БСВТ и хорошо согласуются с ранее опубликованными многолетними оценками, полученными как прямыми оптическими измерениями, так и методами нейросетевого

прогноза [Shikhovtsev, 2024; Шиховцев, 2022; Potanin et al., 2022].

Полученные результаты подтверждают, что метод Кэнни в сочетании с моментным анализом бинарных масок обеспечивает необходимую точность выделения границ пятен в условиях реального шума гартманограмм. Дополнительное преимущество подхода – его низкая вычислительная сложность, допускающая обработку в режиме, близком к реальному времени, что важно для оперативной подстройки адаптивной оптики.

Ограничением метода является чувствительность к выбору порогов бинаризации и σ гауссова ядра. Однако проведённый перебор показал, что для используемой аппаратной конфигурации оптимальные значения стабильны, и их однократная настройка достаточна для всего набора данных. Расширение методики на другие типы структур (поры, грануляцию) потребует адаптации этапа бинаризации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена и апробирована методика автоматического выделения субапертур и центров солнечных пятен на гартманограммах датчика Шака–Гартмана. Ключевые элементы – оптимизированный детектор границ Кэнни ($\sigma = 3$) и моментный анализ бинарных изображений. На основе вычисленных дифференциальных смещений получены оценки параметра Фрида (4.9–5.7 см), соответствующие независимым данным о состоянии атмосферы над БСВТ. Разработанный инструмент может быть интегрирован в контур управления адаптивной оптикой и использован для накопления статистики оптической турбулентности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-72-10043). Измерения проведены с использованием Уникальной научной установки «Большой солнечный вакуумный телескоп» (<http://ckp-rf.ru/usu/200615/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Rimmele Th.R., Marino J. Solar adaptive optics // Living Rev. Sol. Phys. 2011. V. 8, No. 2. P. 1–92. DOI: 10.12942/lrsp-2011-2.
- Shikhovtsev A.Y., Kovadlo P.G., Lezhenin A.A., Gradov V.S., Zaiko P.O., Khitrykau M.A., Kirichenko K.E., Driga M.B., Kiselev A.V., Russkikh I.V. et al. Simulating Atmospheric Characteristics and Daytime Astronomical Seeing Using Weather Research and Forecasting Model // Appl. Sci. 2023, V.13. 6354. DOI: 10.3390/app13106354.
- Antoshkin L.V., Botygina N.N., Bolbasova L.A., Emaleev O.N., Konyaev P.A., Kopylov E.A., Kovadlo P.G., Kolobov D.Yu., Kudryashov A.V., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N., Lukin V.P., Chuprakov S.A., Selin A.A., Shikhovtsev A.Yu. Adaptive Optics System for Solar Telescope Operating under Strong Atmospheric Turbulence // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, No. 3. P. 291–299. DOI: 10.1134/S1024856017030034.

Schmidt D., Beard A., Ferayorni A. et al. Adding multi-conjugate adaptive optics to the Daniel K. Inouye Solar Telescope // *Proceedings of SPIE*. 2021. V. 11448: Adaptive Optics Systems VII. 114480F. DOI: 10.1117/12.2559606.

Шиховцев А.Ю., Ковадло П.Г., Киселев А.В. О статистике астроклиматических характеристик в Саянской солнечной обсерватории // *Солнечно-земная физика*. 2020. Т.6. №1. С.126 – 133. DOI:10.12737/szf-61202012.

Canny J. A Computational Approach to Edge Detection // *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 1986. V. PAMI-8, No. 6. P. 679–698. DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.

Shikhovtsev A.Yu. Reference optical turbulence characteristics at the Large Solar Vacuum Telescope site // *Publ. Astron. Soc. Japan*. 2024. V. 76, No. 3. P. 538–549. DOI: 10.1093/pasj/psae031.

Шиховцев А.Ю. Метод определения характеристик оптической турбулентности по лучу зрения астрономического телескопа // *Оптика атмосферы и океана*. 2022. Т.35. № 1. С. 74 – 80. DOI: 10.15372/AOO20220111.

Ботыгина Н.Н., Ковадло П.Г., Копылов Е.А., Лукин В.П., Туев М.В., Шиховцев А.Ю. Оценка качества астрономического видения в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа // *Оптика атмосферы и океана*. 2013. Т. 26, № 11. С. 942–947.

Potarin S.A., Kornilov M.V., Savvin A.D., Safonov B.S., Ibragimov M.A., Kopylov E.A., Nalivkin M.A., Shmagin V.E., Huy L.X., Thao N.T. A Facility for the Study of Atmospheric Parameters Based on the Shack–Hartmann Sensor // *Astrophys. Bull.* 2022. V. 77, No. 2. P. 214–221. DOI: 10.1134/S1990341322020067.