

**В. С. Пещеров<sup>1</sup>, С. В. Власов<sup>2</sup>, С. А. Лылов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Институт солнечно-земной физики СО РАН  
ул. Лермонтова, 126а, а/я 291, Иркутск, 664033, Россия*

<sup>2</sup> *Институт автоматики и электрометрии СО РАН  
пр. Академика Коптюга, 1, Новосибирск, 630090, Россия*

*vsp@iszf.irk.ru, sv@iae.nsk.su, lylov@iae.nsk.su*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ЦЕНТРА ИЗОБРАЖЕНИЯ СОЛНЦА В СОЛНЕЧНЫХ ТЕЛЕСКОПАХ ОПЕРАТИВНЫХ ПРОГНОЗОВ**

Рассматривается принцип определения координат центра изображения Солнца для позиционирования магнитографа в солнечных телескопах оперативных прогнозов. Выполнены оценки точности вычисления координат.

*Ключевые слова:* щель, CCD матрица, тестовая окружность, фильтрация изображения, численное моделирование.

### **Введение**

Солнечные телескопы оперативных прогнозов (СТОП) при получении данных для магнитограмм используют позиционирование фрагмента изображения Солнца относительно координат центра его изображения. Для точного определения координат центра, после грубого наведения телескопа на Солнце, используется обработка изображения, полученного от видеокамеры.

Использование видеокамеры позволяет автоматически оценивать качество изображения Солнца в зависимости от метеоусловий. При получении и обработке изображения необходимо учитывать изменение яркости изображения Солнца и флуктуации яркости на границе изображения. В статье описан алгоритм определения координат центра изображения Солнца, и дана оценка погрешности определения этих координат.

### **Постановка задачи**

В телескопах СТОП установлена видеокамера piA1600-35gm/gc, регистрирующая изображение Солнца, спроецированное на щель, со скоростью до 30 кадров в секунду и разрешением 1084\*1928 пикселей. Требуется вычислить координаты центра проекции изображения Солнца на щель.

Алгоритм вычисления должен:

- автоматически определять наличие изображения Солнца в кадре;
- учитывать наличие щели на изображении и свойств неоднородности изображения щели;
- учитывать суточное изменение яркости изображения;

*Пещеров В. С., Власов С. В., Лылов С. А.* Определение координат центра изображения солнца в солнечных телескопах оперативных прогнозов // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии. 2016. Т. 14, № 3. С. 61–68.

- определять наличие искажения формы изображения Солнца, вызванные виньетированием;
- учитывать нестационарность границы изображения Солнца;
- вычислять координаты центра изображения Солнца со скоростью видеосъёмки (30 Гц).

### Оптическая схема телескопа СТОП-1-3

Основной задачей телескопа СТОП-1 является запись данных для построения магнитограмм поверхности Солнца. Для выполнения этой задачи с помощью системы зеркал, изображение полоски диска Солнца проецируется на щель и через неё попадает в спектрограф (рис. 1). Спектрограф последовательно регистрирует спектры полосок, используемые для вычисления магнитограммы поверхности Солнца. Позиционирование полоски изображения Солнца на щели выполняются автоматически, под управлением компьютера, для чего компьютер непрерывно производит вычисление координат центра изображения Солнца, и позицию текущей полоски на поверхности щели.

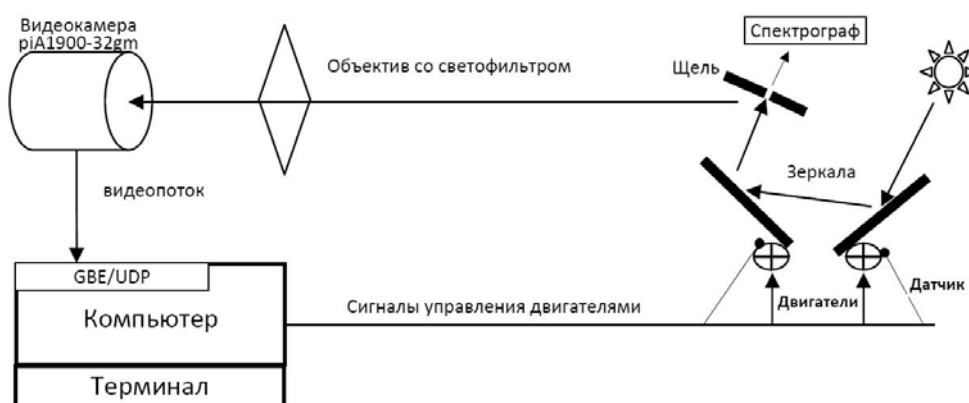


Рис. 1. Оптическая схема телескопа

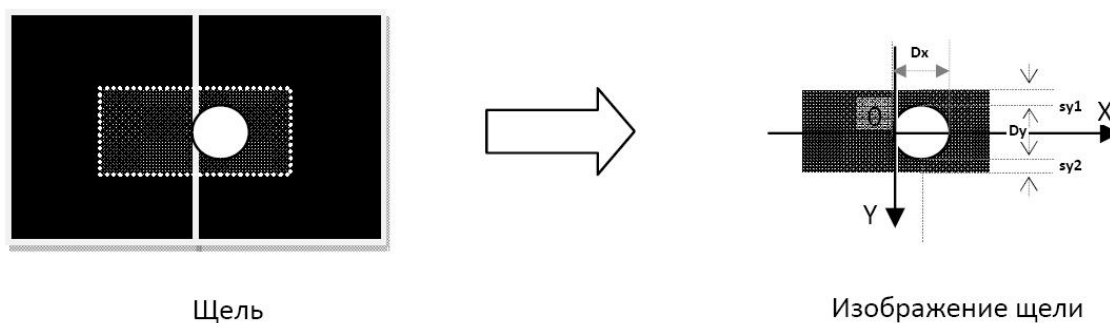


Рис. 2. Изображение щели проецируется на CCD матрицу видеокамеры

Изображение щели направляется на видеокамеру через светофильтр, исключая попадание ультрафиолетового излучения на CCD матрицу (рис. 2).

#### Алгоритм определения координат центра изображения Солнца

Определение координат Солнца включает следующие задачи:

- 1) получение кадра изображения от видеокамеры;
- 2) грубый поиск изображения Солнца (определение наличия изображения);
- 3) фильтрация изображения;

- 4) вычисление центра изображения Солнца;
- 5) автоматическая коррекция чувствительности видеокамеры.

Приём видеопотока от видеокамеры осуществляется асинхронно с использованием двойного видеобуфера: в один буфер принимается следующий кадр, а предыдущий кадр из второго буфера обрабатывается. По окончании обработки кадра буферы переключаются, а обработка следующего кадра начинается по сигналу готовности кадра от видеокамеры.

Вычисления выполняются в системе координат щели, ось ординат ориентирована параллельно щели, начало координат – в центре щели. За единицу масштаба принят размер пиксела видеокамеры (рис. 3).

Обработка кадра начинается с поиска изображения Солнца. Диаметр окружности изображения Солнца приблизительно известен и в нашем случае он изменяется в течение года от 150 до 170 единиц масштаба. Изображение условно разбито на квадраты с размером стороны  $S$  приблизительно равным минимальному радиусу изображения Солнца так, чтобы центры всех квадратов попали в кадр.

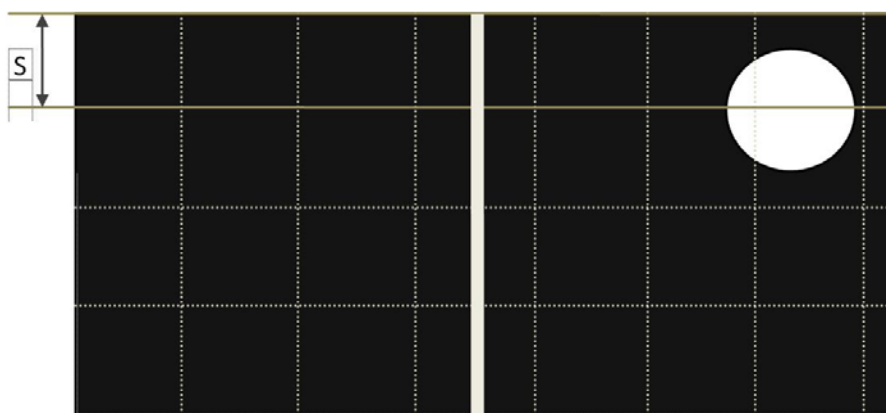


Рис. 3. Изображение щели

Производится анализ яркости изображения в центре всех квадратов. Если высокая яркость обнаружена в одном, либо в двух смежных квадратах, то телескоп наведен на Солнце и возможно вычисление координат центра.

Вычисление координат центра выполняется методом вспучивания окружности (рис. 4). Вначале в качестве центра окружности выбирается средняя точка между центрами квадратов, где обнаружена высокая яркость. Диаметр окружности  $D$  равен половине размера стороны квадрата  $S/2$ , что гарантирует полноту попадания окружности в изображение Солнца. Также устанавливается величина начального смещения  $dD = D/2$ .

Алгоритм поиска состоит в итерационном сравнении яркости текущей окружности  $V$  с яркостью  $V_s$  смещённых окружностей увеличенного диаметра. Яркость  $V_s$  вычисляется для окружности с центром, смещённым на величину сдвига  $dD$  и имеющей диаметр равный  $D+dD$ . Смещение центра производится по одному из восьми направлений системы координат, через  $45^\circ$ , начиная от направления вдоль оси  $X$ .

Если  $V_s \geq V$ , то окружность увеличенного диаметра становится текущей и выполняется следующий шаг итерации, иначе смещение выполняется по следующему направлению.

Если условие  $V_s \geq V$  не выполнено ни для одного из восьми направлений смещения то величина сдвига  $dD$  уменьшается вдвое:  $dD = dD/2$ , и выполняется новый цикл итерационного поиска со сдвигом по восьми направлениям.

Поиск завершается если  $dD$  становится меньше половины единицы масштаба (половины размера пиксела). Координаты центра последней текущей окружности являются искомыми.

Яркость окружности вычисляется суммированием значений яркости пикселей вдоль границы окружности. Количество пикселей суммирования фиксировано для всех окружностей и выбирается из соображения компромисса между скоростью обработки и точностью.

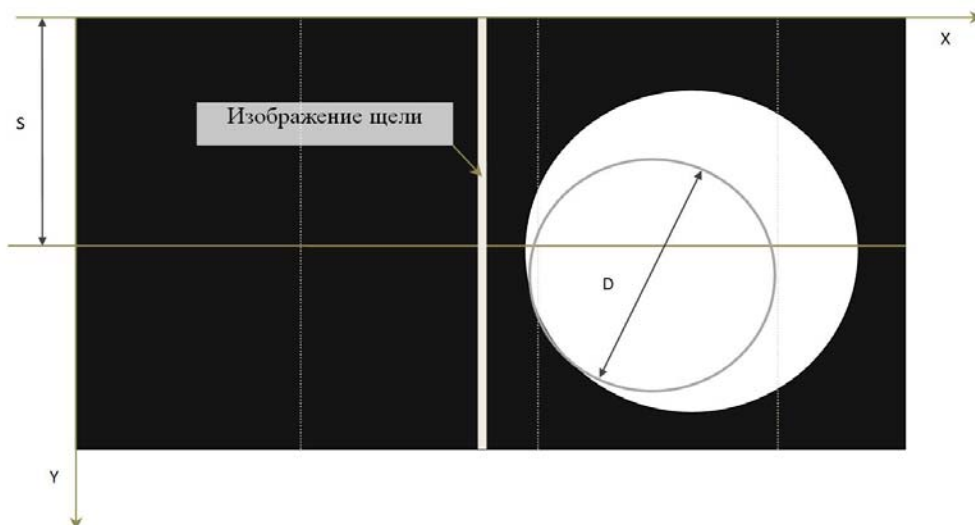


Рис. 4. Вычисление координат центра методом вписывания окружности

Для уменьшения влияния изображения щели и краевых флуктуаций поверхности Солнца при обработке контура окружности выполняется фильтрация изображения с использованием фильтра Гаусса, фильтра Собеля и точечных фильтров первого, третьего и пятого порядка.

Полученный в результате поиска координат центра окружности её диаметр  $D$  используется для автоматической коррекции чувствительности видеокамеры. Изображение Солнца с точностью до “кипения” поверхности Солнца является окружностью, диаметр изображения изменяется в течение года и точно известен в каждый момент времени. Если разница между диаметром окружности и табличным значением диаметра изображения Солнца положительна, то чувствительность видеокамеры нужно уменьшить, иначе – увеличить.

### Фильтрация изображения

Повышению точности определения координат центра способствует использование фильтров Гаусса [1] и Собеля [2], применяемых к окрестности контура окружности.

Ослабить влияние неравномерности чувствительности матрицы и свойств оптического канала на точность определения координат центра позволяет использование spot-фильтров первого и второго порядка: яркость рассматриваемого пиксела сравнивается со значением яркости пикселей окружения и, если она меньше яркости окружения, её значение увеличивается до минимальной яркости окружения, а если больше – уменьшается до значения максимальной яркости из массива пикселей окружения (рис. 5).

Программная реализация сервиса поиска центра изображения Солнца содержит возможность селективного подключения перечисленных фильтров, что позволяет оператору телескопа выбрать компромисс между точностью вычислений и свободным ресурсом производительности компьютера.

|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

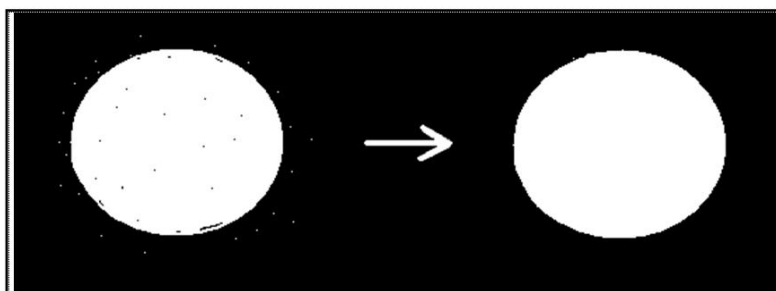


Рис. 5. Spot-фильтр первого и второго порядка

### Программный сервис определения координат изображения Солнца

Обработка изображения выполняется программным модулем, работающим в среде Windows NT; полученные значения доступны приложениям, подключившимся к этому модулю, через СОМ интерфейс.

Через СОМ-интерфейс выполняется установка режимов работы сервиса: задаётся количество пикселов суммирования яркости окружности, включаются фильтры, включается автоподстройка чувствительности видеокамеры и производятся другие настройки. Клиентская программа также имеет доступ к видеобуферу для визуального контроля обработанного изображения. Установленные режимы автоматически запоминаются в реестре. Модуль имеет встроенное клиентское окно, позволяющее выполнять необходимые настройки сервиса или просматривать изображение (рис. 6).

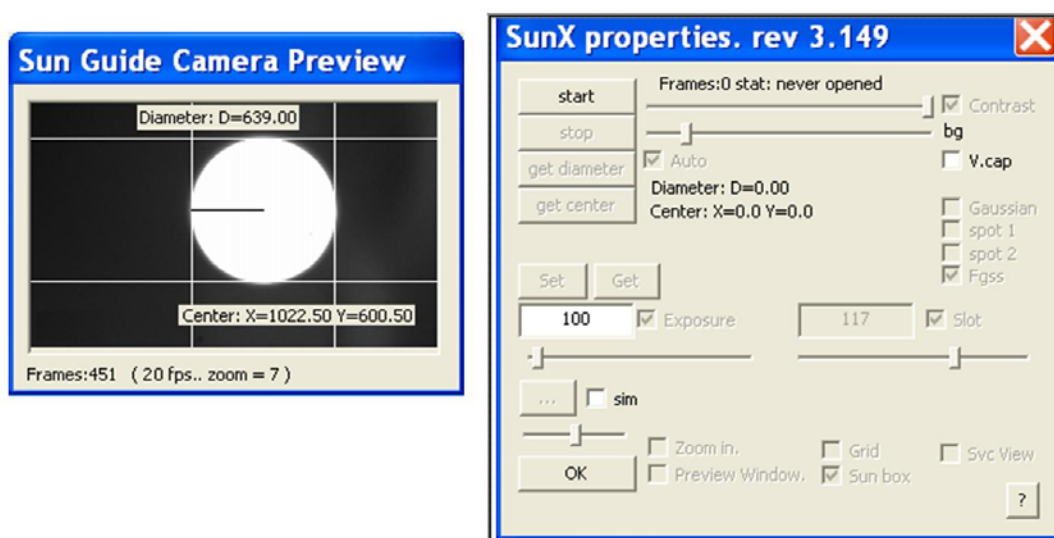


Рис. 6. Клиентское окно сервиса определения координат

К модулю через СОМ-интерфейс может подключаться произвольное число клиентов, если при этом производительность процессора остаётся достаточной для синхронной обработки кадров видеопотока.

Сервис изменяет чувствительность видеокамеры в момент окончания передачи очередного кадра если вычисленный диаметр окружности отличается от табличного значения больше чем на величину  $dS$ , которая устанавливается равной нескольким единицам масштаба (от 2 до 7). Здесь принимается во внимание факт, что “кипение” поверхности Солнца вызывает флуктуации границы изображения в пределах нескольких пикселов.

### Оценка погрешности определения координат центра изображения Солнца

Значения координат центра изображения Солнца используются для наведения телескопа и сканирования изображения Солнца с целью получения магнитограмм. На точность определения координат центра влияют: атмосферные помехи, свойства оптического канала телескопа и свойства видеокамеры. Рассмотрение влияния атмосферных помех и влияния оптического канала телескопа в данной статье не проводится. Вместе с тем, описанный здесь алгоритм позволяет определить наличие искажений изображения, вызванных этими двумя источниками и сформировать сигнал ошибки.

Погрешность определения координат центра изображения Солнца, связанная со свойствами видеокамеры, возможна из-за некорректной настройки чувствительности видеокамеры, из-за неравномерности чувствительности CCD матрицы и из-за дискретности CCD матрицы. Ниже приведена оценка погрешности, вызванная дискретностью CCD матрицы. Подстройка чувствительности видеокамеры выполняется в процессе работы автоматически, а неравномерность чувствительности матрицы можно оценить при выполнении профилактики телескопа и пренебречь, если она не искажает старшие четыре разряда значения яркости.

Для оценки погрешности, вызванной дискретностью CCD матрицы видеокамеры, использован следующий подход. Предположим, что одинаковые значения координат центра порождаются несколькими изображениями Солнца, смещёнными друг относительно друга и относительно сетки CCD матрицы. Максимальное расстояние между центрами этих изображений даёт искомую погрешность.

Для реализации описанного подхода к оценке погрешности использовался следующий алгоритм (рис. 7):

- для заданных значений координат центра и диаметра изображения Солнца следует отыскать все окружности, смещённые относительно заданной и порождающие засветку CCD матрицы видеокамеры такую, что алгоритм определения координат центра получает значения этих координат, совпадающие с заданными;
- смещение центра производится на расстояние до одного пиксела в плоскости XY матрицы видеокамеры. Искомая погрешность равна максимальному расстоянию между центрами найденных тестовых окружностей.

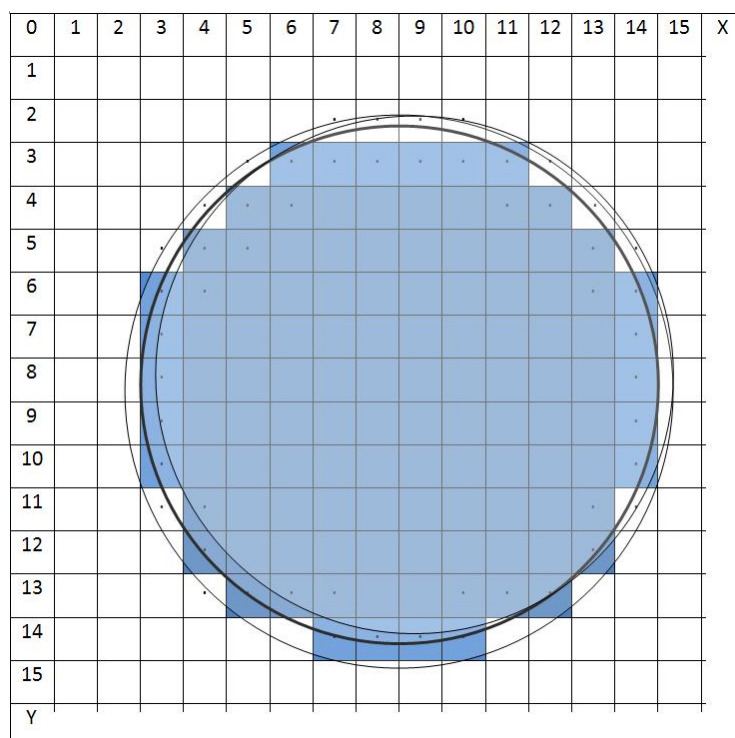


Рис. 7. Заданная окружность и смещённые окружности

Поиск следует повторить для значений диаметра тестовых окружностей, отличающихся от образцовой на величину до одного пиксела, а также для значений центра образцовой окружности, смещённых относительно координатной сетки.

Для оценки погрешности использовалось численное моделирование. Шаг смещения и шаг изменения диаметра окружности выбраны равными 0,1 от размера пиксела: при меньших значениях шага значение погрешности изменяется незначительно.

Сложность алгоритма  $\Sigma$  зависит от диаметра круга  $D$  и шага изменения диаметра  $\varepsilon$ :

$$\Sigma \approx D^2 \cdot \varepsilon^{-5}.$$

Время выполнения одной оценки составило около 10 секунд. Полученное значение оценки погрешности – 1.9 пиксела.

При использовании фильтрации изображения значения погрешности уменьшались. Полученные оценки для различных комбинаций фильтров приведены в таблице:

| Фильтр      | Полученные значения погрешности при включенных фильтрах |     |     |     |     |      |             |      |      |      |
|-------------|---|-----|-----|-----|-----|------|-------------|------|------|------|
| Sobel       | –   | ✓   | –   | –   | –   | ✓    | ✓           | –    | –    | ✓    |
| Gaussian    | –   | –   | ✓   | –   | –   | –    | –           | ✓    | ✓    | ✓    |
| spot1       | –   | –   | –   | ✓   | –   | ✓    | –           | ✓    | –    | ✓    |
| spot2       | –   | –   | –   | –   | ✓   | –    | ✓           | –    | ✓    | ✓    |
| погрешность | <b>1,9</b>  | 0,8 | 1,2 | 1,7 | 1,5 | 0,57 | <b>0,55</b> | 0,64 | 0,62 | 0,51 |

### Заключение

Результат численного моделирования алгоритма поиска центра изображения Солнца, используемого в солнечных телескопах оперативных прогнозов подтверждает правильность выбранного метода. Экспериментально подтверждено предположение об улучшении точности при применении фильтрации изображения.

### Список литературы

1. *Lindeberg T.* Edge detection and ridge detection with automatic scale selection // International journal of computer vision. 1998. Vol. 30. № 2. P. 117–154.
2. Sobel edge detector [Electronic resource] / Fisher R., Perkins R., Walker A., Wolfart E. Electronic date. HIRP, 2003. Access free: <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/sobel.htm>.
3. *Пещеров В. С., Григорьев В. М., Свидский П. М., Бевзов А. Н., Будников К. И., Власов С. В., Зотов А. А., Котов В. Н., Китов А. К., Лубков А. А., Лылов С. А., Перебейнос В. А.* Солнечный телескоп оперативных прогнозов нового поколения // Автометрия. 2013. № 6. С. 62–69.
4. *Пещеров В. С., Власов С. В., Григорьев В. М., Лылов С. А., Савченко Т. Н.* Солнечный телескоп оперативных прогнозов нового поколения: система для координатных измерений на Солнце // Всерос. конф. по солнечно-земной физике. 16–21 сентября 2013 г., Иркутск: Тез. докл. Иркутск, 2013. С. 50.

Материал поступил в редколлегию 23.05.2016

**V. S. Peschero<sup>1</sup>, S. V. Vlasov<sup>2</sup>, S. A. Lylov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS  
126a Lermontov Str., p/o box 291, Irkutsk, 664033, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Institute of Automation and Electrometry SB RAS  
1 Academician Koptug Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*vsp@iszf.irk.ru, sv@iae.nsk.su, lylov@iae.nsk.su*

### SUN IMAGE CENTER COORDINATES COMPUTATION FOR STOP SERIES SOLAR TELESCOPES

A sun image center coordinates computation subsystem for magnetograph positioning in STOP series solar telescopes is described. Proved that coordinates computation error is less than one pixel.

*Keywords:* optical slit, CCD matrix, sample circle, image filtering, numerical simulation.

### References

1. Lindeberg, Tony (2001), "Edge detection", Encyclopedia of Mathematics, Springer, ISBN 978-1-55608-010-4
2. Feature Detectors - Sobel Edge Detector
3. PeshcheroV, V.S.; Grigor'ev, V.M.; Svidskii, P.M.; Bezvov, A.N.; Budnikov, K.I.; Vlasov, S.V.; Zotov, A.A.; Kotov, V.N., Kitov, A.K., Lubkov, A.A.; Lylov, S.A.; Perebeynos, S.V. New Generation Solar Telescope of Operative Predictions // *Avtometriya*. 2013. #6. pp. 62-69.
4. PeshcheroV, V. S.; Vlasov, S.V.; Grigor'ev, V.M.; Lylov, S.A.; Savtchenko, T.N. New Generation Solar Telescope of Operative Predictions: solar coordinates measurements system // *Stepanov Conference on Solar-Earth Physics, Irkutsk, September 16-21 2013*, theses p50.