

*В.П. ВЛАСЕНКО, В.Е. САВАНЕВИЧ, д-р техн. наук, А.В. ПОГОРЕЛОВ,
А.Б. БРЮХОВЕЦКИЙ, канд. техн. наук*

ЯРКОСТНОЕ ВЫРАВНИВАНИЕ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕДИАННОГО ФИЛЬТРА

Введение

При решении астрометрических задач для звезд и астероидов со слабым видимым блеском на серии ПЗС-кадров выдвигаются жесткие требования к равномерности распределения яркости фоновой составляющей изображения на ПЗС-кадре. Использование служебных кадров «плоского поля» (flat) для калибровки полученных изображений не всегда приводит к желаемому результату, например при наличии паразитных засветок.

Анализ литературы

Традиционно выравнивание фона астрономических кадров производится методом аппаратной калибровки. Калибровка астрономических изображений сводится к попиксельному вычитанию из них Master-dark кадра и их делению на Master-flat кадр [1, 2]. При этом методы формирования данных служебных кадров достаточно полно освещены в литературе [1 – 4]. Самой трудоемкой и неудобной операцией аппаратной калибровки является заблаговременная (вечером перед ночью наблюдений) подготовка flat кадров, от которой мечтают отказаться многие астрономы-наблюдатели и часто отказываются по ряду не зависящих от них причин, снижая качество наблюдательного материала. Аппаратная калибровка астрономических кадров не позволяет ликвидировать фон от временной паразитной засветки.

При исследовании изображений архивных пластинок случаи сохраненных dark и flat кадров также практически отсутствуют.

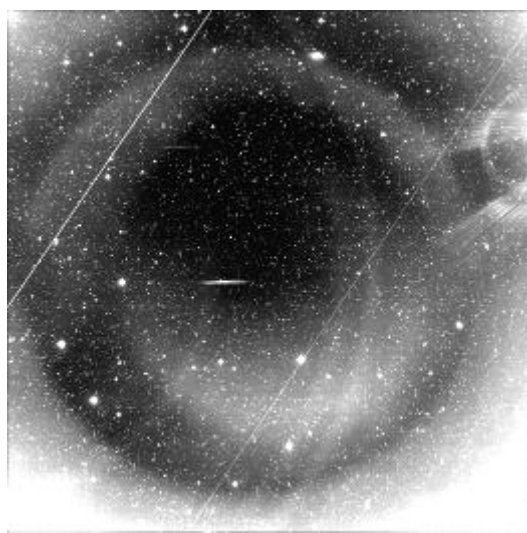
В работе [5] предложен метод обработки астрономических кадров в пакете MIDAS [6] без использования служебных flat кадров. Метод основан на выделении крупноструктурной составляющей плоского поля из кадра с использованием медианного фильтра. Недостатком данного технического решения является использование стороннего ПО. Также в работе [5] отсутствует анализ показателей качества предложенного яркостного выравнивания.

Для яркостного выравнивания фона изображения можно использовать высокочастотную фильтрацию [3, 7 – 10]. Недостаток высокочастотной фильтрации заключается в необходимости представления целочисленных изображений в формате с плавающей точкой для проведения преобразования Фурье [11], что ужесточает требования к размеру оперативной памяти. Наличие артефактов типа «звон» вокруг ярких объектов на выровненных изображениях [12] также ограничивает применение высокочастотной фильтрации для выравнивания изображений.

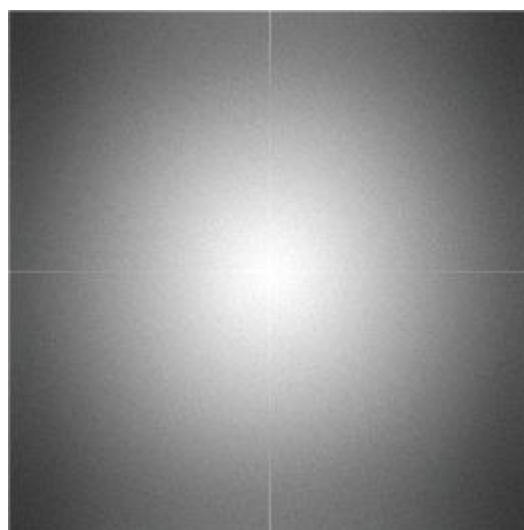
Цель статьи – разработка вычислительного метода яркостного выравнивания фона астрономического изображения и анализ показателей качества выравнивания им фона астрономических изображений.

Обоснование использования метода инверсной медианной фильтрации для яркостного выравнивания астрономических изображений

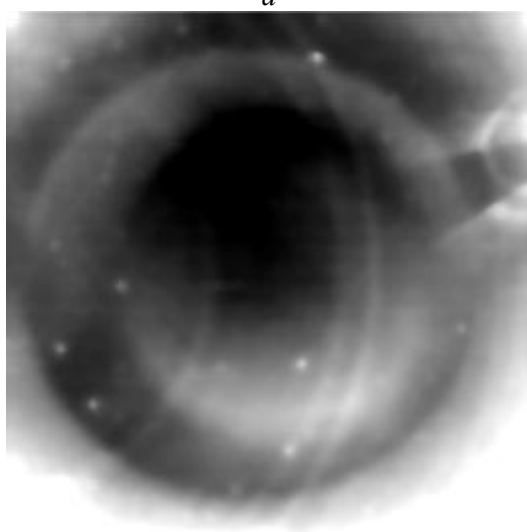
Астрономические цифровые изображения можно разделить на крупноструктурные и мелкоструктурные составляющие. Каждая из составляющих имеет свою физическую природу. Крупноструктурная составляющая изображений соответствует засветке изображения при проведении астрономических наблюдений в полнолуние или на восходе и закате Солнца и занимает значительные части кадров (рис. 1, а, 2, а). Мелкоструктурные составляющие соответствуют изображениям звезд, астероидов и комет. Размер мелкоструктурных составляющих изображений обычно занимает 5–10 пикселей и не превышает 50–60 пикселей.



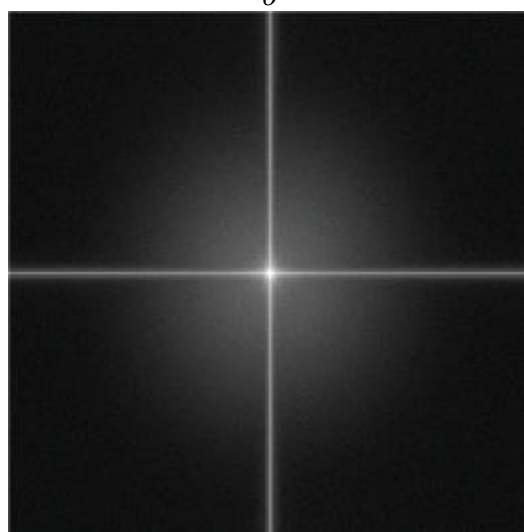
a



б



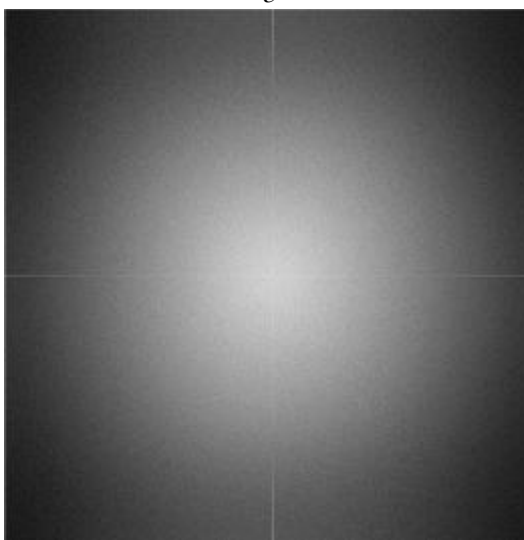
в



г



д



е

Рис. 1. *a* – астрономическое изображение; *б* – модуль спектра астрономического изображения; *в* – крупноструктурная составляющая астрономического изображения; *г* – модуль спектра крупноструктурной составляющей; *д* – мелкоструктурная составляющая астрономического изображения; *е* – модуль спектра мелкоструктурной составляющей

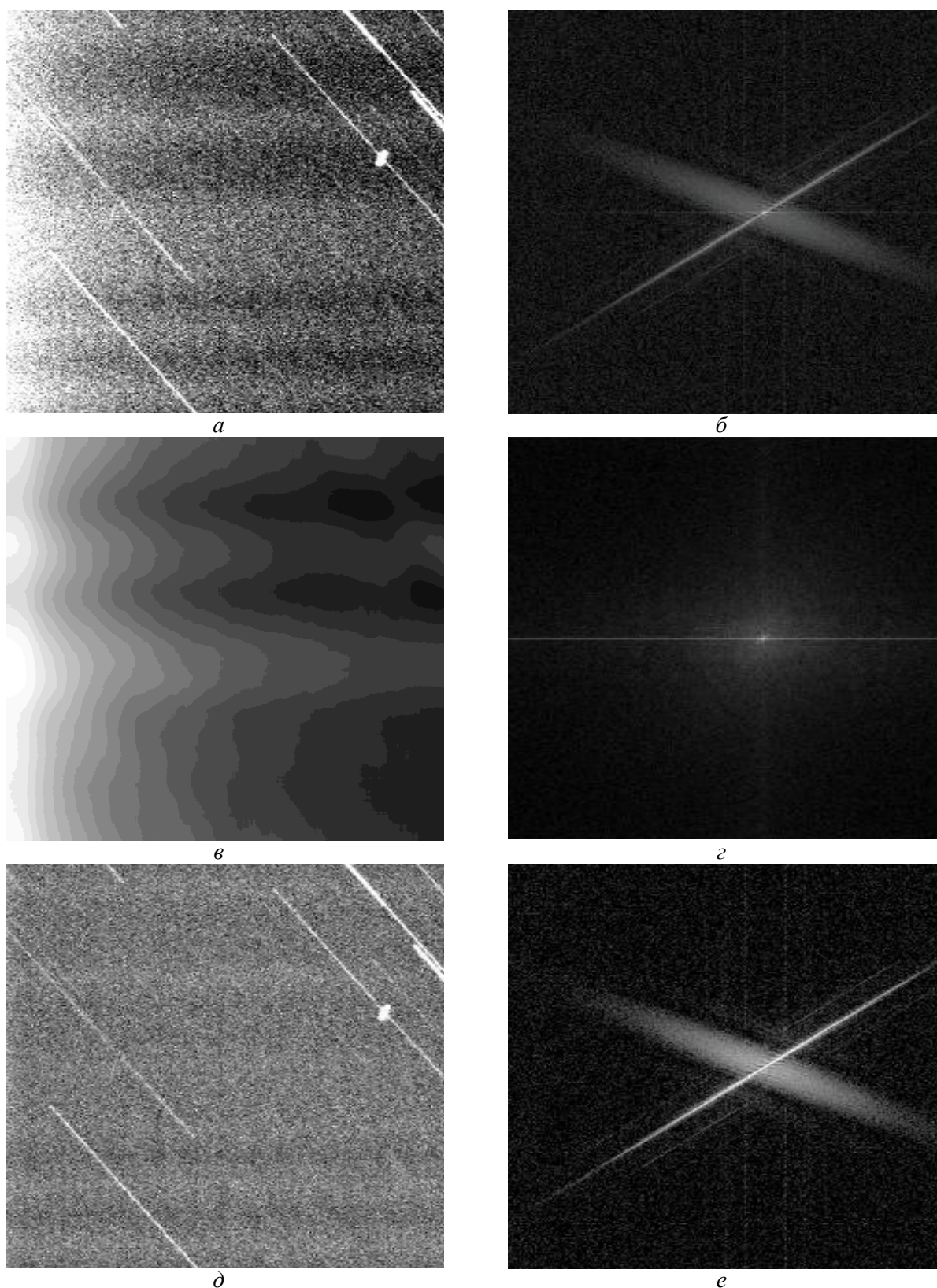


Рис. 2. *a* – астрономическое изображение; *б* – модуль спектра астрономического изображения; *в* – крупноструктурная составляющая астрономического изображения; *г* – модуль спектра крупноструктурной составляющей; *д* – мелкоструктурная составляющая астрономического изображения; *е* – модуль спектра мелкоструктурной составляющей

Использование служебных кадров для калибровки полученных изображений не всегда приводит к желаемому результату, например при наличии паразитных засветок. Поэтому необходимо рассмотреть возможные пути яркостного выравнивания фона изображения.

Крупноструктурной и мелкоструктурной составляющим цифрового изображения соответствуют разные гармоники в его спектре (рис. 1, 2). Крупноструктурной составляющей изображения (рис. 1, в, 2, в) соответствуют низкочастотные гармоники спектра изображения (рис. 1, з, 2, з), а мелкоструктурным составляющим (рис. 1, д, 2, д) – высокочастотные (рис. 1, е, 2, е). Разница в спектре изображений интересных объектов (звезды, астероиды, кометы) и фона (крупноструктурные составляющие астрономических изображений) обеспечивает возможность использования частотной фильтрации изображения для повышения отношения сигнал/шум или уменьшения динамического диапазона фоновой подложки изображения. Для удаления из изображения крупноструктурных составляющих целесообразно использовать высокочастотный фильтр, который ослабляет низкочастотные гармоники спектра изображения, одновременно пропуская высокочастотные гармоники. Известно, что медианный фильтр при определенном подборе размера окна также может выполнять функции низкочастотного фильтра [7, 12]. При этом результаты высокочастотной фильтрации, отбрасывающие крупноструктурные составляющие фона кадра, могут быть получены простым вычитанием результата медианной фильтрации кадра из исходного кадра.

Иными словами, разница в размерах изображений интересных объектов (звезды, астероиды, кометы) и фона (крупноструктурные составляющие астрономических изображений) обеспечивает возможность использования медианной фильтрации изображения для выделения крупноструктурных составляющих. Для выравнивания фона изображения полученная после медианной фильтрации крупноструктурная составляющая вычитается из исходного изображения. Данный метод назван методом инверсной медианной фильтрации.

Медианная фильтрация – метод нелинейной обработки изображений [7, 12 – 16]. Медианный фильтр реализуется как процедура локальной обработки скользящим окном заданных размеров d_x и d_y , которое включает нечетное число пикселей исходного изображения A_{in} [13, 14, 16]. В работе используется медианный фильтр с квадратным окном размером $d \times d$. Для каждого положения окна яркости его пикселей упорядочиваются по возрастанию своих значений [7, 13, 16]. Средний отсчет в этом упорядоченном множестве (медиана) заменяет центральный пиксель в окне для отфильтрованного изображения A_{med} [7, 13, 14, 16] (рис. 3). Для медианы значений яркости рассматриваемой группы из d^2 пикселей существует $(d^2 - 1)/2$ пикселей, меньших или равных ему по величине и столько же больших или равных [7, 13, 14, 16].

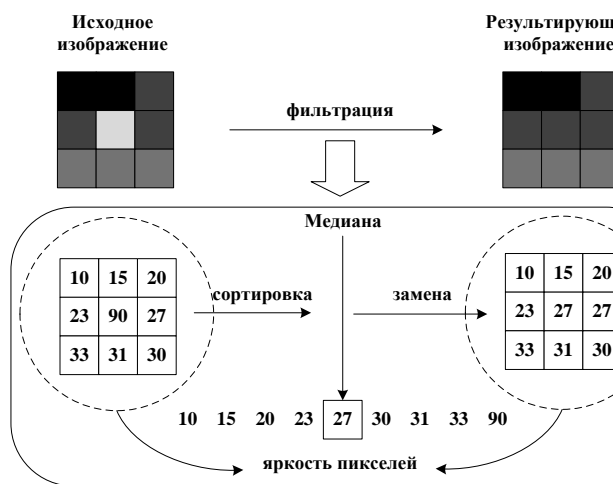


Рис. 3. Медианная фильтрация

На рис. 4, а приведен пример изображения с тремя гауссианами, представляющими значения яркости соответствующих пикселей. Значения гауссиан $G_k(m, n)$ определяется согласно

$$G_k(m, n) = a_k \exp \left\{ -\frac{(m - m_k)^2 + (n - n_k)^2}{2\sigma_k^2} \right\}$$

где k – номер гауссианы; a_k – амплитуда k -й гауссианы; m_k, n_k – координаты центра k -й гауссианы; σ_k – параметры формы гауссианы.

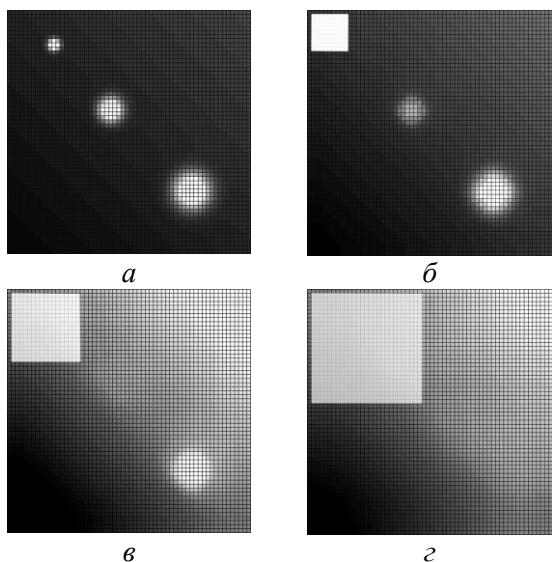


Рис. 4. Фильтрация изображений медианным фильтром: *a* – исходное изображение, содержащее три гауссианы; *б* – результат фильтрации медианным фильтром 7x7 пикселей; *в* – результат фильтрации медианным фильтром 17x17 пикселей; *г* – результат фильтрации медианным фильтром 27x27 пикселей

[18], использующий определение медианы яркости пикселей в окне медианного фильтра при помощи анализа локальной гистограммы. Количество операций, требуемое для вычисления медианы предложенным алгоритмом, пропорционально d [18].

Яркость пикселей изображения, над которым проводится медианная фильтрация, представляется ограниченным количеством известных значений. Для 8-битных изображений количество возможных яркостей пикселей равно 256, для 16-битных – 65536, поэтому для сортировки яркостей используется гистограмма. Можно рассматривать гистограмму яркостей пикселей окна как вариант представления множества целых чисел, в котором номер элемента гистограммы соответствует значению целого числа, а значение этого элемента – количеству элементов данного множества, равных данному числу.

Медианная фильтрация на краях изображения

Для исходного изображения A_{in} размера $N_{CCD_x} \times N_{CCD_y}$ медианный фильтр применим только для пикселей с номерами $m = \overline{(d-1)/2, N_{CCD_x} - (d-1)/2 - 1}$ и $n = \overline{(d-1)/2, N_{CCD_y} - (d-1)/2 - 1}$. Для данных пикселей окно медианного фильтра полностью лежит внутри исходного изображения A_{in} . При расположении центра окна медианного фильтра на расстоянии меньше чем $(d-1)/2$ от краев исходного изображения, пиксели окна медианного фильтра будут определены неполностью (рис. 5). Медианна в этом случае будет вычисляться на количестве пикселей, меньшем, чем количество пикселей окна медианного фильтра. При медианной фильтрации с окном меньшего размера, на краях исходного изображения, не будут отфильтрованы изображения объектов, площадь которых больше половины площади усеченного окна медианного фильтра. Это повлечет за собой искажения на краях выровненного изображения.

Гауссианы с параметром формы $\sigma_1 = 1$, $\sigma_2 = 2$ и $\sigma_3 = 3$ имеют 28, 113 и 254 пикселей, в которых значения яркости больше $0,01a_k$. На рис. 4, *б*, *в*, *г* представлены результаты фильтрации изображения (рис. 4, *а*) медианными фильтрами с размерами окон 9x9, 17x17 и 27x27 пикселей. На отфильтрованных изображениях видно как медианный фильтр подавляет изображения объектов в зависимости от размера окна медианного фильтра и площади занимаемой изображением объектов. В виде белых квадратов в верхних левых углах рис. 4, *б*, *в*, *г* представлены окна медианных фильтров размером 9x9, 17x17 и 27x27 пикселей соответственно.

Быстрая медианная фильтрация

Вычисление медианный путем сортировки значений яркостей пикселей, попавших в окно медианного фильтра, выполняется за d^2 операций. Для уменьшения времени вычисления медианы в работе используется быстрый алгоритм медианной фильтрации, предложенный в

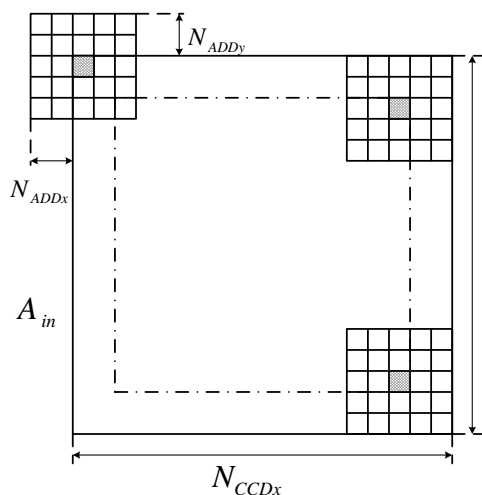


Рис. 5. Медианная фильтрация на краях изображения

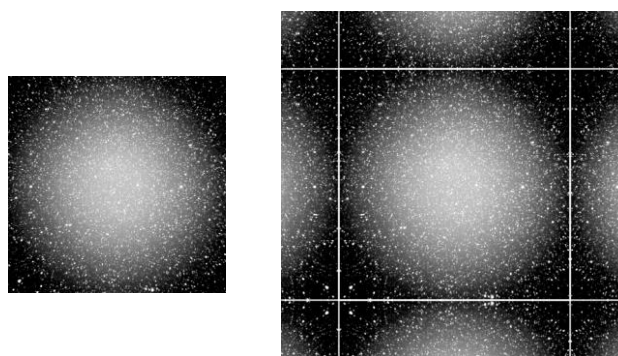


Рис. 6. Иллюстрация симметричного дополнения изображения: *a* – исходное изображение; *б* – исходное изображение, дополненное симметричным продолжением

В [12, 17] для устранения данного эффекта предложено дополнять исходное изображение A_{in} бордюром со стороны каждой из границ исходного изображения A_{in} . Значения пикселя бордюра изображения и пикселя изображения равны между собой при их симметричном размещении относительно ближайшей границы рассматриваемого изображения (рис. 6). Исходное изображение A_{in} , дополненное бордюром, можно обозначить как расширенное исходное изображение $A_{in\ add}$ с размерами $(N_{CCDx} + 2N_{ADDx}) \times (N_{CCDy} + 2N_{ADDy})$. Ширина бордюра N_{ADDx} и N_{ADDy} , которым дополняется исходное изображение слева – справа и сверху – снизу определяются выражениями:

$$N_{ADDx} = \frac{d-1}{2}, \quad (1)$$

$$N_{ADDy} = \frac{d-1}{2}. \quad (2)$$

Расширенное исходное изображение $A_{in\ add}$ после медианной фильтрации даст отфильтрованное изображение A_{med} с размерами $N_{CCDx} \times N_{CCDy}$ равными размеру исходного изображения A_{in} .

Яркостное выравнивание фона изображения

Значения яркостей пикселей изображения с выровненным по яркости фоном $A_{out}(m, n)$ без крупноструктурной составляющей будут найдены как разность значений яркостей пикселей исходного изображения $A_{in}(m, n)$ и значений яркостей пикселей отфильтрованного изображения $A_{med}(m, n)$:

$$A_{out}(m, n) = A_{in}(m, n) - A_{med}(m, n), \quad (3)$$

где $m = \overline{0, N_{CCDx} - 1}$ и $n = \overline{0, N_{CCDy} - 1}$.

Полученное, согласно (3), изображение с выровненным по яркости фоном A_{out} может иметь пиксели с отрицательными значениями яркости. Для устранения данного эффекта от значений яркости всех пикселей выровненного изображения $A_{out}(m,n)$ отнимается значение пикселя с минимальной яркостью A_{min} :

$$A_{out}(m,n) = A_{out}(m,n) - A_{min}, \quad (4)$$

Деление исходного изображения на фрагменты

Факторами, влияющими на необходимость деления исходного изображения на фрагменты, являются размер обрабатываемых изображений, требуемое количество параллельно обрабатываемых изображений, доступный объем оперативной памяти. Так, для проведения медианной фильтрации одного 16-битного изображения размером 10000×10000 пикселей требуется 860 Мб оперативной памяти. При наличии 4 Гб свободной оперативной памяти возможно проведение медианной фильтрации четырех таких изображений одновременно. Для одного 16-битного изображения размером 14000×14000 необходимо уже 1,5 Гб свободной оперативной памяти.

Для сокращения памяти при медианной фильтрации больших изображений предлагается делить исходное изображение A_{in} на фрагменты, а медианную фильтрацию проводить над фрагментами изображений. Исходное изображение A_{in} размера $N_{CCDx} \times N_{CCDy}$ делится на $1 \times M_y$ фрагментов $A_{cr l}$ размером $N_{CCDx} \times N_{cry}$, который зависит от допустимого объема памяти, используемой при медианной фильтрации.

При этом деление исходного изображения A_{in} на фрагменты проводится только вдоль одной координатной оси. В работе исходные изображения A_{in} делятся вдоль оси ординат

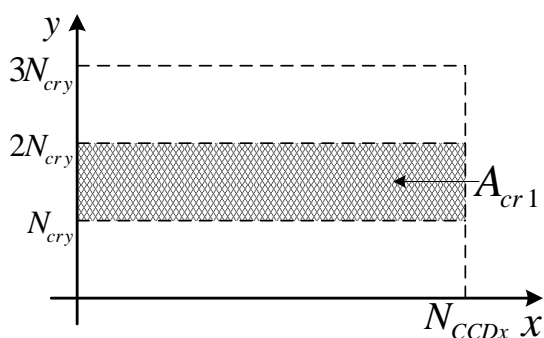


Рис. 7. Покрытие исходного изображения фрагментами

(рис. 7). Такое разбиение исходного изображения A_{in} на фрагменты позволяет исключить необходимость повторного вычисления гистограммы при переходе от одного фрагмента исходного изображения к следующему фрагменту, при реализации вычислительного метода быстрой медианной фильтрации [18].

При медианной фильтрации l -го фрагмента изображения $A_{cr l}$, так же как и при медианной фильтрации изображения, необходимо дополнять фрагменты изображения бордюром.

Можно ввести формальную связь между значениями пикселей расширенного исходного изображения $A_{in add}(m,n)$ и l -го расширенного фрагмента изображения $A_{cr add l}(m,n)$:

$$A_{cr add l}(m,n) = A_{in add}(m, n + N_{cry}l), \quad (5)$$

где $m = \overline{0, N_{CCDx} + 2N_{ADDx} - 1}$, $n = \overline{0, N_{cry} + 2N_{ADDy} - 1}$, $l = \overline{0, M_y - 1}$.

В результате медианной фильтрации l -х расширенных фрагментов изображения $A_{cr add l}$ получаются l -е отфильтрованные фрагменты изображения $A_{med l}$. Из полученных фрагментов формируется отфильтрованное изображение A_{med} . Значения пикселей

отфильтрованного изображения $A_{med}(m, n)$ связаны со значениями пикселей l -х отфильтрованных фрагментов изображения $A_{medl}(m, n)$ согласно выражению

$$A_{med}(m, n) = A_{medl}(m, n - lN_{cr y}), \quad (6)$$

где $m = \overline{0, N_{CDDx} - 1}$, $n = \overline{0, N_{CDDy} - 1}$ и $l = E\left[\frac{n}{N_{cr y}}\right]$.

Использование астрономических служебных кадров в программе FrameSmooth

Описанный метод яркостного выравнивания кадров был реализован в ПО FrameSmooth [19]. Данное ПО может использовать служебные кадры. Особенно важно использовать master-dark кадр. Все мастер-кадры формируются попиксельно. Предварительно 10 % самых больших и 10 % самых малых значений яркости каждого пикселя отбрасывается. Для K_1 оставшихся значений яркости $A_k(m, n)$ пикселя с номерами m , n используемых калибровочных кадров находится среднее:

$$\Delta_{K_1}(m, n) = \frac{1}{K_1} \sum_{k=1}^{K_1} A_k(m, n) \quad (7)$$

и СКО:

$$\sigma_{K_1}(m, n) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{K_1} (A_k(m, n) - \Delta_{K_1}(m, n))^2}{(K_1 - 1)}}. \quad (8)$$

Яркость пикселя мастер-кадра считается равной среднему значению яркости только тех K_2 ($K_2 \leq K_1$) пикселей, которые не отличаются от среднего $\Delta_{K_1}(m, n)$ (7) более, чем на три сигмы $\sigma_{K_1}(m, n)$ (8):

$$\sqrt{(A_k(m, n) - \Delta_{K_1}(m, n))^2} \leq 3 \cdot \sigma_{K_1}(m, n). \quad (9)$$

1. Подготовка служебных кадров.

1.1. Master-bias кадр формируется согласно выражениям (7) – (8) на основе bias кадров.

1.2. Master-dark кадр формируется согласно выражениям (7) – (8) на основе dark кадров.

Если существует master-bias кадр, то перед формированием master-dark кадра из каждого исходного dark кадра будет вычтен master-bias кадр.

1.3. Для формирования master-flat кадра исходные flat кадры обрабатываются инверсным медианным фильтром. Предварительно, при наличии dark flat кадров и/или master-bias кадра, по аналогии с п.1.2, формируется master-darkflat кадр. Далее из flat кадров вычитаются master-bias и master-darkflat кадр. После проведенных операций flat кадры приводятся к одному уровню средней яркости пикселей на кадре – к уровню яркости первого кадра путем попиксельного умножения каждого flat кадра (кроме первого) на нормировочный коэффициент, равный отношению суммы яркости всех пикселей на первом кадре к сумме яркости всех пикселей анализируемого кадра. Затем из полученных трансформированных flat кадров формируется master-flat кадр с использованием операций, аналогичных п.1.1.

2. Яркостное выравнивание ПЗС-кадров. Яркостное выравнивание изображений сводится к попиксельному вычитанию из них master-dark кадра и их делению на master-flat кадр с последующей инверсной медианной фильтрацией полученного результата. При этом использование master-flat кадра при проведении инверсной медианной фильтрации не является обязательным и незначительно влияет на получаемый результат.

Показатели качества выравнивания фона и их краткий анализ

Использование выровненных изображений приводит к повышению показателей точности астрометрии и фотометрии звезд, показателей качества обнаружения астероидов и комет и так далее. Однако эти показатели связаны с целями надсистем. Они связаны с самими надсистемами и при изменении последних также могут измениться. Тем самым показатели качества выравнивания из указанных групп не являются объективными.

В работе в качестве показателей качества яркостного выравнивания используется среднее значение $\hat{\Delta}_{\Theta}$ и СКО $\hat{\sigma}_{\Theta}$ яркости фона на множестве Θ пикселей фона исследуемого локального сегмента до $\hat{\Delta}_{\Theta in}, \hat{\sigma}_{\Theta in}$ и после $\hat{\Delta}_{\Theta out}, \hat{\sigma}_{\Theta out}$ выравнивания:

$$\hat{\Delta}_{\Theta in} = \sum_{m,n \in \Theta} A_{in}(m,n) / N_{\Theta}, \quad (10)$$

$$\hat{\Delta}_{\Theta out} = \sum_{m,n \in \Theta} A_{out}(m,n) / N_{\Theta}, \quad (11)$$

$$\hat{\sigma}_{\Theta in} = \sqrt{\sum_{m,n \in \Theta} (A_{in}(m,n) - \hat{\Delta}_{\Theta in})^2 / (N_{\Theta} - 1)}, \quad (12)$$

$$\hat{\sigma}_{\Theta out} = \sqrt{\sum_{m,n \in \Theta} (A_{out}(m,n) - \hat{\Delta}_{\Theta out})^2 / (N_{\Theta} - 1)}, \quad (13)$$

где N_{Θ} – количество пикселей фона исследуемого локального сегмента.

Анализ введенных показателей качества выравнивания астрономических цифровых кадров свидетельствует, что в результате инверсной медианной фильтрации диапазон средних значений фона в сегменте кадра снижается в десятки раз. Диапазон средних значений яркости пикселей фона уменьшается в 131 раз по уровню 5 % от максимального значения гистограммы для сегментов 30x30 пикселей и в 145 раз для сегментов 50x50 пикселей (рис. 8 – 9, 12 – 13). При этом СКО яркости пикселей фона в исследуемых сегментах меняется незначительно. В 1,2 раза по уровню 5 % от максимального значения гистограммы для значений яркости рассчитанных в сегментах 30x30 пикселей и 1,3 раза для сегментов 50x50 пикселей (рис. 10 – 11, 14 – 15).

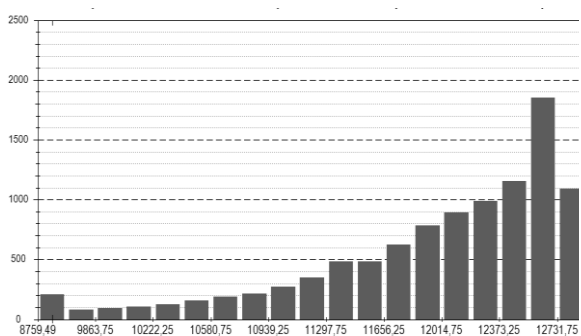


Рис. 8. Гистограмма среднего яркости пикселей фона в сегментах 30x30 исходного изображения

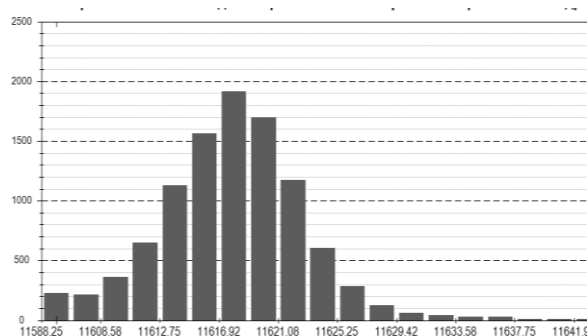


Рис. 9. Гистограмма среднего яркости пикселей фона в сегментах 30x30 выровненного изображения

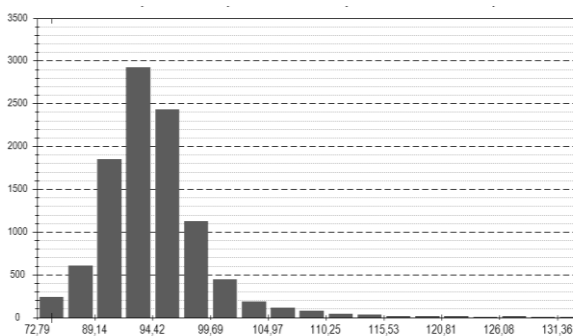


Рис. 10. Гистограмма СКО яркости пикселей фона в сегментах 30x30 исходного изображения

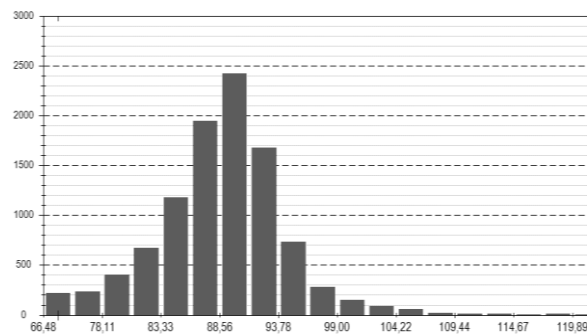


Рис. 11. Гистограмма СКО яркости пикселей фона в сегментах 30x30 выровненного изображения

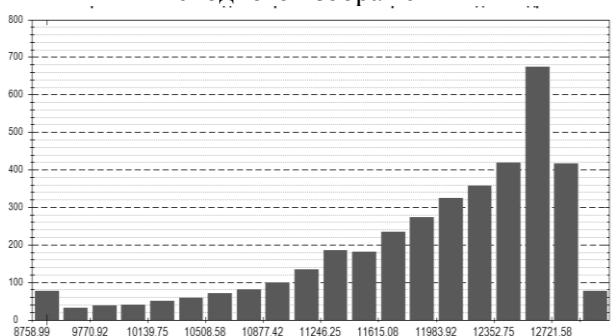


Рис. 12. Гистограмма среднего яркости пикселей фона в сегментах 50x50 исходного изображения

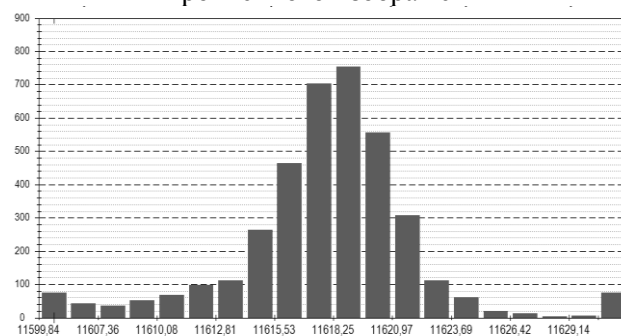


Рис. 13. Гистограмма среднего яркости пикселей фона в сегментах 50x50 выровненного изображения

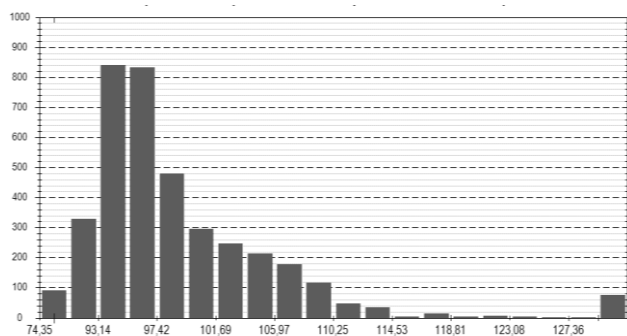


Рис. 14. Гистограмма СКО яркости пикселей фона в сегментах 50x50 исходного изображения

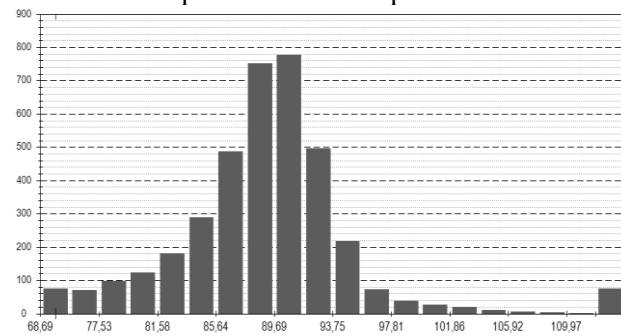


Рис. 15. Гистограмма СКО яркости пикселей фона в сегментах 50x50 выровненного изображения

В отличие от flat-калибровки кадров инверсный медианный фильтр удаляет крупноструктурные составляющие не только «внутренние» по отношению к оптической системе, но и «внешние». Последние связаны с засветками от Луны, Солнца, а также засветками техногенного происхождения.

Выводы

Рассмотрены вычислительный метод яркостного выравнивания астрономических изображений, основанный на инверсной медианной фильтрации, и реализация данного метода для больших изображений. В качестве показателей качества выравнивания фона в работе введены оценки средних значений и СКО яркостей пикселей фона в сегментах на исходных и выровненных кадрах. Проведен анализ показателей качества выравнивания фона астрономических изображений рассмотренным методом. Показано, что диапазон средних значений яркости пикселей фона уменьшается на два порядка по уровню 5 % от максимального значения гистограммы. Данное уменьшение тем больше, чем больше размер используемого окна.

Кроме того, использование выровненных изображений приводит к повышению показателей точности астрометрии и фотометрии звезд, показателей качества обнаружения астероидов и комет.

Рассмотренный вычислительный метод позволяет повысить отношение сигнал/шум и уменьшить динамический диапазон фоновой подложки астрономических изображений. Метод внедрен и успешно используется в ПО автоматического поиска астероидов и комет на серии цифровых кадров CoLiTec [20], а также реализован в свободно распространяемом ПО FrameSmooth [19].

Список литературы: 1. *Ian S. McLean*. Imaging in Astronomy. Detectors and Instrumentation (Second Edition). Springer, 2008. – P.552. 2. *Steve B. Howell*. Handbook of CCD Astronomy – 2nd ed., Cambridge University Press, 2006. – P.208. 3. *The Handbook of Astronomical Image Processing*; by Richard Berry and James Burnell. – 2nd ed., Berlin: Willmann-Bell, 2005. – P.684. 4. *Brian D. Warner*. A Practical Guide to Lightcurve Photometry and Analysis. New York: Springer, 2006. – P.298. 5. *Андрук В.Н., Иващенко Ю.Н., Бутенко Г.З.* Обработка ПЗС-изображений звездных полей в пакете MIDAS/ROMAFOT. Abstr. Int. Conf. ASTROECO-2002 "Current status and prospects of international research in observational astronomy, ecology and extreme physiology in the Elbrus region", Terskol, Russia, Aug. 12-16, 2002. – Kyiv. – P. 71–74. 6. *R. Bucchieri, P. Crane, Vito di Gesù, M.C. Maccarone, L. Scarsi, H.U. Zimmermann*. Data Analysis in Astronomy IV. Ettore Majorana International Science Series. – V. 59. New York: Springer Science & Business Media, 1992. – P.364. 7. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – Москва : Техносфера, 2005. – 1072 с. 8. *Chris Solomon, Toby Breckon*. Fundamentals of Digital Image Processing. A Practical Approach with Examples in Matlab. John Wiley & Sons, 2011. – P.344. 9. *Michael Seul, Lawrence O’Gorman, Michael J. Sammon*. Practical algorithms for image analysis: description, examples and code. – Cambridge University Press, 2000. – P.295. 10. *Patrick Martinez, Alain Klotz*. A practical guide to CCD astronomy. Cambridge University Press, 1997. – P.264. 11. *FFTW User Manual* // [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.fftw.org/fftw3_doc/. 12. *Гонсалес Р., Вудс Р., Эддингс С.* Цифровая обработка изображений в Matlab. – Москва : Техносфера, 2006. – 616 с. 13. Методы компьютерной обработки изображений ; под ред. В.А. Сойфера. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с. 14. *Яншин В.В.* Анализ и обработка изображений: принципы и алгоритмы. – Москва : Машиностроение, 1994. – 112 с. 15. *Яне Б.* Цифровая обработка изображений. – Москва : Техносфера, 2007. – 584 с. 16. *Теоретические основы цифровой обработки изображений : учеб. пособие ; под ред. В.А. Сойфер.* – Самара : СГАУ им. Королева, 2000. – 256 с. 17. *Wilhelm Burger, Mark J. Burge*. Principles of Digital Image Processing. Fundamental Techniques. London : Springer-Verlag, 2009. – P.261. 18. *Thomas S. Huang, George J. Yang, Gregory Y. Tang*. A Fast Two-Dimensional Median Filtering Algorithm // IEEE Transactions On Acoustics, Speech, And Signal Processing. – 1979. – Vol. 27, № 1. – P.609–616. 19. *FrameSmooth* – кроссплатформенная программа, предназначенная для выравнивания остаточной фоновой составляющей изображений на астрономических кадрах // [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.neoastrosoft.com/filter_en/. 20. *Саваневич В.Е.* Сравнительный анализ показателей точности позиционных ПЗС-измерений малых тел солнечной системы программными обеспечениями CoLiTec и Astrometrica / В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, Ю.Н. Иващенко, И.Б. Вавилова, М.М. Безкровный, Е.Н. Диков, В.П. Власенко, Н. С. Соковицова, Я.С. Мовсесян, Н.Ю. Дихтяр, Л.В. Еленин, А.В. Погорелов, С.В. Хламов // Кинематика и физика небесных тел. – 2015. – Т. 31, № 6. – С. 55–69.

Харьковский национальный
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 17.03.2016