

Причины метлы и как её минимизировать.

Предисловие

Астрофотограф, знакомый с основами и знающий, что для получения более качественных снимков слабых объектов важно объединять несколько изображений, часто сталкивается с трудностями на своем пути. Одна из них — т.н. метла. Это надоедливая штука, от которой трудно избавиться, и она существенно влияет на итоговое изображение. Вот несколько примеров этой проблемы:



Рисунок 1 Фото моего походного сетапа, сделанное на смартфон Galaxy S8. 12 снимков по 10 секунд.

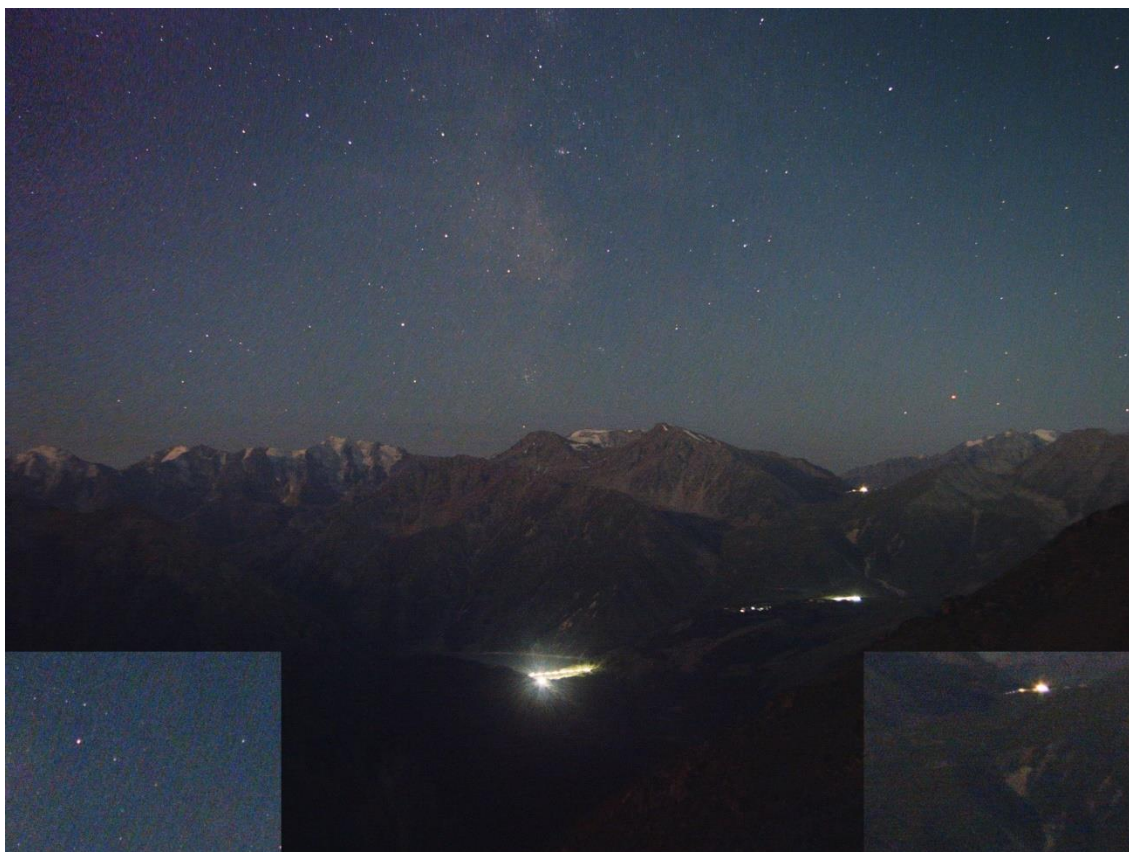


Рисунок 2 Композитное фото, созданное из кадров таймлапса, снятых камерой Canon S5IS. 16 снимков по 15 секунд.

Наглядно видно, что шум образует предсказуемые траектории, когда несколько изображений, полученных с помощью стационарной камеры, выровнены относительно неба. И даже полная калибровка часто не помогает. Здесь мы попытаемся понять причину этого и возможные способы избежать или хотя бы смягчить последствия.

Теория

Есть всем известная формула калибровки астроизображений

$$signal = \frac{light - offset_{master} - dark_{master}}{flat_{master}} \quad 1$$

Где мастер-кадры получают путём усреднения индивидуальных offset, dark и flat снимков, процедуры получения которых, я полагаю всем известны. Число калибровочных кадров желательно иметь чем больше, тем лучше.

Стартовая формула берётся из-за того факта, что свет, попадающий на камеру, проходит через оптический тракт и первым делом некоторая его доля поглощается объективом/светофильтрами, затем заряд, накопленный в ячейках, умножается на некий коэффициент, задаваемый пользователем aka ISO/gain. И в конце происходит оцифровка. А мы, дабы получить исходный сигнал, разворачиваем цепочку обратно:

$$ADU_{light} = photoelectrons_{light} \cdot transmission \cdot gain + offset \quad 2$$

Темновой ток я исключил из рассмотрения, т.к. принципиально нового он нам ничего не добавит, а выкладки увеличит.

Для анализа нам реально доступны только значения *ADU* (Analog-Digital Units) значения, выдаваемые нам аналогово-цифровым преобразователем (АЦП). Какому числу фотоэлектронов (далее я буду обозначать их как e^-) они соответствуют нам необходимо определять самостоятельно. Например, чтобы получить число зарегистрированных

электронов e_{light}^- нам нужно снять кадр без засветки матрицы, иначе величину ADU_{offset} мы определить не можем. А значит, не можем и значение $offset$ вычислить.

В формуле 2 коэффициент $transmission$ представляет собой коэффициент пропускания оптической системы (включая чувствительность индивидуальных пикселей и общее виньетирование системы). Разделять эти два параметра тут я не буду, т.к. на принципиальные выводы это не влияет.

Для начала рассмотрим мастер-оффсет.

Даже при полном отсутствии света матрица генерирует некоторое количество отсчётов, просто из-за тепловых флуктуаций (плюс сам АЦП шумит). Причём все эти флуктуации добавляются к нашему регистрируемому сигналу. Чтобы определить, во-первых, величину этого "паразитного сигнала", а во-вторых, чтобы не вносить излишний шум при вычитании мастер-оффсета из одиночных лайтов, таких кадров делают много. Тогда случайные шумы имеют возможность усредняться, а систематические, повторяющиеся от кадра к кадру, остаются на итоговой сумме. В теории, если все пиксели одинаковы, то структура шума в них будет абсолютно идентичной, однако в реальности помимо фотонного и шумов считывания, существуют и пространственные неоднородности.

Пример 1 — fixed pattern noise. Когда значение $offset$ несколько разный для разных пикселей.

Пример 2 — PRNU (pixel response non-uniformity), по-простому, чуть разные коэффициенты усиления по разным пикселям.

Для КМОС иметь такие пространственные шумы сам бог велел — там ведь свои усилители в каждом пикселе.

Как определить силу первого шума своей матрицы? Надо делать мастер БИАС, устремив n к бесконечности. Если с ростом n (число отснятых $offset$ кадров) $offset_{master}$ будет стремиться к ровному полю, значит паттерн-noise маленький. Если очень скоро с ростом n картинка мастербиаса примет явный устойчивый рисунок — неоднородность тока смещения.

Второй шум — то же самое, но смотреть надо будет по кадрам плоского поля.

При этом если мы будем считать статистику по всему кадру, то в случае идеальных пикселей дисперсия их сигналов будет стремиться к нулю при усреднении всё большего и большего числа кадров, а если оффсеты для каждого свои — то мы упруемся в некоторый предел, определяемый матрицей, и ниже продвинуться уже не сможем. Хотя ничего страшного в этом нет, при грамотной калибровке все эти неоднородности убираются вполне неплохо.

Предположим, мы сняли 25 кадров для мастер-оффсета, тогда его итоговый шум для идеальной матрицы будет в ~ 5 раз меньше, чем на одиночном оффсете. Или чуть больше, если разброс по пьедесталу для индивидуальных пикселей существует. Так или иначе, характерные величины оффсетов на современных зеркалках лежат в районе $ADU_{offset} \sim 1000 \div 2000$, а после усреднения 20-40 кадров дисперсия оффсета обычно не превышает нескольких единиц $\Delta ADU_{moffset} \sim 1 \div 5$. Например для Canon 450D на ISO 400 (Gain ~ 2) само значение $ADU_{moffset} = 1024$, а $\Delta ADU_{offset} \sim 12$ на одиночном кадре и для 25 кадров $\Delta ADU_{moffset} = 3.3 \div 3.5$, в зависимости от того, складываем ли мы медианой или средним арифметическим. В любом случае, значение получается чуть больше теоретического ($\frac{12}{\sqrt{25}} = 2.4$), что свидетельствует об упомянутых выше эффектах. В дальнейшем, при вычитании мастер-оффсета именно это значение шума мы привнесём в каждый одиночный кадр при калибровке.

Если выбросить из рассмотрения темновой ток, как я уже сказал, предположив, что мы снимаем относительно небольшими выдержками, то формулу 1 с учётом 2 можно переписать как:

$$e_{light}^- = \frac{ADU_{light} - offset_{master}}{transmission \cdot gain}$$

Отсюда и далее индексы *light*, *flat*, *master* переобозначены соответственно, как *l*, *f*, *m*.

Формула для ошибки на Δe_l^- по расчётам для косвенных измерений запишется как:

$$\Delta e_l^- = \frac{ADU_l - offset_m}{transmission \cdot gain} \sqrt{\left(\frac{\Delta transmission}{transmission}\right)^2 + \left(\frac{\Delta ADU_l}{ADU_l - offset_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta offset_m}{ADU_l - offset_m}\right)^2} \quad 4$$

При выводе предполагается, что ошибка *gain* отсутствует полностью.

Теперь хотелось бы понимать, а каковы величины каждого из слагаемых в формуле. Начнём с первого из них. Определим погрешность определения пропускания $\Delta transmission$.

Из формулы:

$$ADU_f = e_f^- \cdot transmission \cdot gain + offset \quad 5$$

$$transmission = \frac{ADU_f - offset}{e_f^- \cdot gain} \quad 6$$

Аналогично формуле 4: **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

$$\Delta transmission = \frac{ADU_f - offset_m}{e_f^- \cdot gain} \sqrt{\left(\frac{\Delta e_f^-}{e_f^-}\right)^2 + \left(\frac{\Delta ADU_f}{ADU_f - offset_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta offset_m}{ADU_f - offset_m}\right)^2} \quad 7$$

Типичная зеркалка имеет АЦП 14 бит. Что означает, что в нашем распоряжении ~16000 отсчётов. Даже если мы экспонировали наш кадр плоского поля достаточно слабо, не в 2/3 от доступного диапазона, а так, что после вычитания мастер-оффсета у нас остался сигнал всего в $ADU_f - offset_m = 1000$, то, в предположении, например единичного гейна, погрешность измерения $\Delta transmission$ будет равна:

$$\Delta transmission = transmission \sqrt{\left(\frac{\sqrt{1000}}{1000}\right)^2 + \left(\frac{\sim\sqrt{1000}}{1000}\right)^2 + \left(\frac{\sim 2 \div 3}{1000}\right)^2} \sim \sqrt{\frac{2}{ADU_f - offset_m}} \quad 8$$

Где величина Δe_f^- была оценена согласно распределению пуассона, как $\sqrt{e_f^-}$, а т.к. *gain* мы приняли близким к единице, то $e_f^- \sim ADU_f - offset_m$.

Подставив 8 в 4 получим:

$$\Delta e_l^- = e^- \sqrt{\left(\frac{\Delta e_f^-}{e_f^-}\right)^2 + \left(\frac{\Delta ADU_f}{ADU_f - offset_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta offset_m}{ADU_f - offset_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta ADU_l}{ADU_f - offset_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta offset_m}{ADU_l - offset_m}\right)^2} \quad 9$$

Отсюда видно, что если мы экспонируем флэты так же, как у нас заполнены лайты — то мы фактически увеличиваем итоговую относительную ошибку в корень из двух раз. Ухудшая во столько же раз *snr* итоговой суммы. Естественно, при условии, что флэтов у было отснято ровно столько же, сколько и лайтов. Если мы снимем их в 8 раз больше (или заполняем гистограмму на три стопа больше), то итоговое ухудшение *snr* будет уже не в корень из двух раз больше, а всего в $\frac{\sqrt{8+1}}{\sqrt{8}} = 1.06$ раз. Или на 6%.

Проверка практикой

Теперь, когда теоретической воды налили — дело за проверкой на практике. Что было сделано:

Сняты кадры плоского поля, имитирующие как полезный сигнал, так, собственно использующиеся и для калибровки этого сигнала.

Было снято 2 последовательности:

1) 8 Флэтов по 1/6 секунды на ISO 400 и диафрагме f/11 (чтоб и выдержка была побольше и пыль проявилась получше). Эти кадры были проинспектированы в ирисе на предмет пересвета и было получено среднее значение пикселей в зелёном канале ~7935 с дисперсией 130. В итоге было взято только 4 из них, далее будет объяснено почему, но итоговое "время накопления" ~ 2/3 секунды.

2) 64 флэта на три ступени тусклее первых, т.е. света на них упало в 8 раз меньше, что соответствовало выдержке в 1/50 секунды. Среднее значение пикселей в зелёном же канале было уже 976 с дисперсией 44.4.

Для начала сделаем sanity check (проверку на вшивость). ISO 400 в моих более ранних экспериментах давал для Canon 450D переводной коэффициент $0.52 \frac{e^-}{ADU}$. Что соответствует примерно двойному гейну (1.91). Значит для длинного флэта на 7935 приходится вдвое меньше фотоэлектронов ~ 3966 . дисперсия, согласно распределению пуассона — корень из этого: 63. Ну а т.к. мы каждый отсчёт растянули вдвое — дисперсия для $\Delta ADU = 2 \cdot 63 = 126$. Т.е. цифры бьются. Для короткого флэта петрушка аналогичная — можете проверить. При этом, что для длинного, что для короткого флэта фотонный шум во много раз превышает шум считывания в 12 ADU (в 10.5 и 3.7 раз соответственно), поэтому и наблюдается почти полное совпадение расчётного и экспериментального шумов: оффсет тут практически ничего не вносит.

Дальше начинаем создавать из первой половины коротких флэтов — мастер-флэт. Чтобы всё-таки убедиться, берётся ли метла на снимках из-за недостаточной линейности отклика каждого пикселя, или же из-за чего-то ещё. Для этого нам естественно из каждого кадра нужно вычистить мастер-оффсет. Это немного ухудшит нам ситуацию с шумом, но давайте проверим на бумаге и сравним. Для этого я загрузил первый файл в серии и измерил дисперсию. Она оказалась равной 43.9. Дисперсия на мастер-оффсете равна, как я уже сказал, 3.5:

$$\sqrt{43.9^2 + 3.5^2} = 44.04$$

После проведения операции — получаю результат 44.0. Пока всё по учебникам. Так что оффсетов больше 25-30 снимать особого смысла нет. По крайней мере, если вы снимаете в зоне с засветкой, или можете выставить такую выдержку, чтобы фон у вас был в ~ 1000 отсчётов от 16к.

Смело калибруем наши исходники и теперь складываем их в мастер-флэт. Для первой половины после усреднения получаем 975.2 ± 10.1 . Для второй половины — 972.6 ± 10.2 . Что как бы уже не очень стыкуется с полной независимостью отсчётов по пикселям, потому что если бы это было так — величина дисперсии должна была бы быть в районе $\frac{44}{\sqrt{32}} = 7.78$

Вот мы и пришли к тому, что мы подозревали:

*Второй шум — то же самое, но смотреть надо будет по кадрам
плоского поля.*

Вот и посмотрели. Есть эти шумы там, родимые. Так что — да подвижки наше всё. Какие же флэты лучше уберут имеющиеся у нас неоднородности усиления, на которые мы напоролись: длинные или же те, что сняты с тем же заполнением гистограммы, что и наши лайты? Для этого возьмём вторую половину наших коротких кадров (33-64) и сделаем из них короткий мастер-флэт, который хотя будет и более шумным, чем длинный — возможно окажется лучшим в борьбе с метлой, чем длинный (ведь пиксели экспонированы одинаково).

Поэтому дальше — берём первую половину изображений и калибруем её флэтом, получившимся из второй половины. Переводим в цвет и складываем тремя разными способами:

1) Сложение без смещений вообще, как будто у нас было идеальное ведение монтажки.

2) Сложение со стабильным смещением на 2 пикселя по горизонтали и по вертикали, имитируя дрейф.

3) Сложение со стабильным смещением на 2 пикселя по горизонтали и по вертикали, плюс случайные подвижки, разыгранные согласно равномерному распределению в диапазоне [-8, +8].

Потом повторяем все те же манипуляции, используя уже длинный флэт. Т.к. для первой части в итоговую сумму пошла только половина кадров, поэтому и для длинного мастер-флэта я использовал только 4 кадра, а не 8.

Результаты даны на картинке ниже. Выводы можно сделать такие, что экспонирование флэта слабо влияет на его способность устранять метлу. Равно как и то, что недоэкспонированные флэты якобы не работают. Максимум что они могут — внести лишний шум в исходники.



Рисунок 3 Результаты проверки алгоритмов, какой из них лучше всего борется с метлой.

Видно, что рандомизация положений кадра на ± 8 пикселей полностью убила метлу. Значит, чтобы не терять рабочую площадь кадра большие подвижки не требуются. Плюс, чтобы не перегружать и так уже довольно объёмистый текст, скажу без доказательств, что можно снимать сериями без подвижек, а потом выровнять все кадры по опорному и шум тоже довольно эффективно устранился. В среднем получается, что если взять всю сессию разбить её на 10-15 равных интервалов и делать единственную подвижку по окончании каждого интервала – метла уходит практически так же эффективно, как и при подвижках через каждый кадр. Но время на «устаканивание» сетапа требуется намного меньше. Вот такой вот вывод.

Anton Chechkin. (4D on astronomy.ru)

<https://www.excentrisitet.space>

2026.03.23

Translated in English 2026.03.23