

Субпиксельное накопление и обнаружение смазанных изображений звёзд, полученных астроинерциальным датчиком ориентации на фоне дневного неба

Н.Н. Василюк¹

¹ ООО «НПК Электрооптика», 107076, г. Москва, ул. Стромынка, д.18, к.1

Аннотация

Для определения ориентации по изображению звёздного поля, полученному цифровой камерой, необходимо обнаружить изображения отдельных звёзд и определить их координаты с субпиксельным разрешением. Эта задача относительно легко решается, если изображение получено неподвижной камерой, наблюдающей ясное ночное небо. Затруднение возникает при наблюдении звёзд поворачивающейся камерой на фоне дневного неба, когда смазанные изображения звёзд практически невозможно обнаружить в фоновом шуме в одном кадре. Из этого затруднения можно выйти за счёт накопления некоторого количества последовательных кадров, в которых предварительно выполнена согласованная фильтрация смаза. В работе рассматривается алгоритм накопления последовательности кадров, реализованный в виде многоканального накопителя, состоящего из нескольких однотипных накопительных каналов, работающих параллельно. Плоскость накопленного изображения в каждом канале совпадает с плоскостью первого кадра накапливаемой последовательности. Субпиксельное разрешение в определении координат обнаруженных изображений звёзд достигается за счёт введения внутривидеопиксельной дискретизации в первом кадре. Ориентация текущего кадра относительно первого кадра вычисляется из измерений гироскопов астроинерциального датчика. При синтезе импульсных реакций фильтров, согласованных со смазом в очередном кадре, учитываются ориентация этого кадра и расположение узлов внутривидеопиксельной дискретизации первого кадра. Приводятся расчётные формулы для определения числа накапливаемых кадров в зависимости от угловой скорости вращения камеры, интенсивности фона и яркости наблюдаемых звёзд. Результаты моделирования показывают возможность обнаружения смазанных изображений относительно тусклых звёзд на фоне дневного неба и определения их координат с субпиксельным разрешением.

Ключевые слова: астродатчик, астрокорректор, астроинерциальная навигационная система, коррекция смаза, накопление изображений.

Цитирование: Василюк, Н.Н. Субпиксельное накопление и обнаружение смазанных изображений звёзд, полученных астроинерциальным датчиком ориентации на фоне дневного неба / Н.Н. Василюк // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 2. – С. 303-311. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1309.

Citation: Vasilyuk NN. Subpixel stacking and detection of blurred star images observed by an astroinertial attitude sensor against the background of the daytime sky. Computer Optics 2024; 48(2): 303-311. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1309.

Введение

Данная работа продолжает работы [1, 2], посвященные алгоритмам обработки изображений звёзд в бесплатформенных астроинерциальных датчиках ориентации (астродатчиках). Рассматриваемый астродатчик представляет собой жёсткую конструкцию, состоящую из цифровой камеры, вычислительного устройства и инерциального измерительного модуля (ИИМ).

Если астродатчик неподвижен относительно звёзд, то объектив цифровой камеры строит изображение звезды на поверхности матричного фотоприёмника (МФП) в виде рассеянного пятна. При вращении астродатчика цифровое изображение звезды смазывается и из пятна превращается в произвольно ориентированную полосу. Форма полосы зависит от угловой

скорости камеры, что вносит непредсказуемую систематическую ошибку в определение координат изображения звезды [3, 4]. Отношение сигнал/шум (С/Ш) в смазанном изображении ухудшается, причём это ухудшение не зависит от оптических условий наблюдения, а определяется исключительно параметрами вращения камеры [5, 6].

В [1, 2] рассмотрен подход к улучшению отношения С/Ш в смазанном изображении, полученному в одном кадре. Улучшение возникает за счёт использования при обработке кадров дополнительной информации, получаемой от ИИМ. Измерения ИИМ позволяют синтезировать цифровой фильтр, согласованный со смазом, непосредственно из параметров движения астродатчика [7]. При таком синтезе фильтра снимается неопределённость в координатах смазанного изображения: максимум профильтрованного

изображения возникает в месте расположения пятна в момент начала экспозиции фильтруемого кадра.

Согласованная фильтрация внутри одного кадра позволяет обнаруживать на фоне дневного неба только яркие звёзды [2]. Таких звёзд очень мало, и они редко используются для определения ориентации астродатчика. Вероятность попадания звезды в поле зрения камеры растёт с увеличением звёздной величины, т.е. с уменьшением яркости звезды. На практике для определения ориентации астродатчика используются звёзды 5-й – 7-й величины, для которых согласованная фильтрация не даёт улучшения С/Ш, достаточного для их обнаружения на фоне дневного неба в одном кадре.

Дальнейшее улучшение С/Ш в изображениях тусклых звёзд возможно за счёт цифрового сложения (накопления) нескольких последовательных кадров. При накоплении кадров уровень полезного сигнала от звёзды растёт пропорционально числу накопленных кадров, а СКО фонового шума и прочих шумов, добавляемых к каждому кадру при его считывании из МФП [8], растёт медленнее, как квадратный корень из числа кадров. Повороты кадров, полученных в различных положениях вращающейся камеры, определяются из измерений гироскопов ИИМ [9,10].

При накоплении смазанных изображений возникает дополнительная проблема. Смазы в изображениях одной и той же звезды в разных кадрах, вообще говоря, ориентированы по-разному. Смазанные изображения, даже после компенсации поворотов кадров, не полностью накладываются друг на друга. То есть вклад отдельных изображений в общую сумму оказывается неполным, а положение максимума этой суммы – неопределённым.

Согласованная фильтрация смазов решает эту проблему – корреляционные максимумы в профильтрованном кадре возникают в тех пикселях, в которых находились изображения звезд в момент начала экспозиции. Если кадры фильтруются независимо, без сквозного учёта траектории движения изображения звезды по всем кадрам накапливаемой последовательности, то положение корреляционного максимума определяется с точностью до пикселя. Максимум возникает в пикселе независимо от того, в каком месте фотоприёмной ячейки находилось изображение звезды в момент начала экспозиции. Поворот независимо профильтрованных кадров ограничивает разрешение в определении координат звезды по накопленному изображению до пиксельного уровня.

В данной работе рассматривается процедура накопления профильтрованных кадров, позволяющая определять координаты накопленного изображения звезды с субпиксельным разрешением. Для этого предлагается организовать накопление кадров в виде многоканального накопителя, состоящего из нескольких однотипных накопительных каналов, работающих параллельно [11, 12]. Каждый накопительный

канал вычисляет своё собственное накопленное изображение, характеризующееся априорным предположением о попадании изображения звезды в начальную точку, одинаково расположенную внутри всех фотоприёмных ячеек в момент начала экспозиции первого кадра накапливаемой последовательности. Для каждого последующего кадра из траектории движения камеры вычисляются новые точки, в которые перешли начальные точки из первого кадра, и для новых точек синтезируется неоднородная импульсная реакция согласованного фильтра. Очередной кадр обрабатывается своим согласованным фильтром и попиксельно складывается с изображением в накопительном канале.

Смазанное изображение звезды считается обнаруженным, если значение пикселя в изображении, накопленном в каком-то из каналов, превысило пороговое значение. Если превышение порога обнаруживается в одном и том же пикселе в нескольких накопленных изображениях, выбирается канал, в котором получено максимальное значение пикселя. За координаты обнаруженного изображения звезды принимаются координаты начальной точки, соответствующей выбранному каналу, а за эпоху наблюдения – момент начала экспозиции первого кадра. Количество накопительных каналов равно количеству дискретных начальных точек внутри фотоприёмных ячеек.

1. Основные понятия, условные обозначения и системы координат

Термины, определения и системы координат, используемые в работе, введены и обоснованы в [1, 2]. Для ясности изложения некоторые определения здесь воспроизводятся, но без подробного объяснения.

МФП цифровой камеры представляет собой прямоугольную матрицу, составленную из фотоприёмных ячеек квадратной формы с длиной стороны a . Размер матрицы $H \times W$, где H , W – число строк и столбцов матрицы соответственно. Положение фотоприёмной ячейки внутри матрицы задаётся парой целочисленных индексов (\hat{h}, \hat{w}) , где $\hat{h} = 0 \dots H-1$ – номер строки и $\hat{w} = 0 \dots W-1$ – номер столбца, в котором расположена ячейка. Значение индексов $(0, 0)$ соответствует левой верхней ячейке матрицы.

В плоскости МФП задана растровая система координат с началом в левом верхнем углу ячейки $(0, 0)$. Положение точки на поверхности МФП задаётся парой действительных чисел $[h \ w]^T$, где $0 \leq h < H$, $0 \leq w < W$. Точка с растровыми координатами $[h \ w]^T$ расположена внутри ячейки с целочисленными индексами

$$\hat{h} = \text{floor}(h), \hat{w} = \text{floor}(w), \quad (1)$$

где $\text{floor}(\dots)$ – функция округления в направлении к $-\infty$.

Положение точек на плоскости МФП относительно главной точки снимка $[h_0 \ w_0]^T$ задаётся векторными координатами $[x \ y]^T$. Растровые $[h \ w]^T$ и векторные $[x \ y]^T$ координаты одной и той же точки связаны:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{a} \begin{bmatrix} h - h_0 \\ w - w_0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} h \\ w \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_0 \\ w_0 \end{bmatrix}.$$

С конструкцией камеры жёстко связана правая ортогональная система координат камеры (СКК). Точке с векторными координатами $[x \ y]^T$ в плоскости МФП соответствует единичный направляющий вектор в пространстве предметов с координатами в СКК

$$\mathbf{s} = \frac{[-x \ -y \ F]^T}{\sqrt{x^2 + y^2 + F^2}}, \quad (2)$$

где F – фокусное расстояние объектива.

2. Многоканальное накопление кадров

2.1. Определение ориентации кадров

В накоплении участвуют K последовательных кадров с порядковыми номерами $k=0..K-1$. Экспозиция очередного кадра с номером k начинается в момент времени $t_{\varepsilon k} = t_{\varepsilon 0} + kT_K$ начала экспозиции и завершается в момент времени $t_{\varepsilon k} + T_{\varepsilon}$ окончания экспозиции, где $t_{\varepsilon 0}$ – момент начала экспозиции кадра с номером $k=0$; T_K – постоянный период получения кадров, T_{ε} – время экспозиции, $T_K > T_{\varepsilon}$. Накопление выполняется в плоскости начального кадра с $k=0$, то есть все последующие кадры перепроектируются на эту плоскость. Координаты звезды определяются на момент времени $t_{\varepsilon 0}$.

Ориентация кадра k задаётся при помощи инерциальной системы координат СКК _{k} , которая в точности совпадает с мгновенным положением СКК поворачивающейся камеры в момент времени $t_{\varepsilon k}$: СКК _{k} = СКК($t_{\varepsilon k}$). Преобразование координат из СКК _{0} в СКК _{k} для кадров с номерами 0 и k задаётся ортогональной матрицей \mathbf{S}_k^0 :

$$\mathbf{S}_k^0 \equiv \mathbf{S}_{\text{СКК}}^{\text{СКК}_0}(t_{\varepsilon k}) = \begin{bmatrix} s_k^{11} & s_k^{12} & s_k^{13} \\ s_k^{21} & s_k^{22} & s_k^{23} \\ s_k^{31} & s_k^{32} & s_k^{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_0^0 = \mathbf{I}_3,$$

где s_k^{ij} , $i, j=1 \dots 3$ – скалярные компоненты матрицы \mathbf{S}_k^0 ; \mathbf{I}_3 – единичная матрица 3×3 . Верхний и нижний индексы в обозначении матрицы \mathbf{S}_k^0 нужно понимать так: если один и тот же вектор \vec{s} задан своими координатами \mathbf{s}_0 в СКК _{0} и \mathbf{s}_k в СКК _{k} , то $\mathbf{s}_k = \mathbf{S}_k^0 \mathbf{s}_0$.

Оси чувствительности трёхосного гироскопа в составе ИИМ сонаправлены с одноимёнными осями СКК. Гироскоп измеряет интегралы

$$\boldsymbol{\theta}_m = [\theta_{xm} \ \theta_{ym} \ \theta_{zm}]^T = \int_{t_{m-1}}^{t_m} \boldsymbol{\omega}(\tau) d\tau$$

от проекций $\boldsymbol{\omega}(t) \equiv \boldsymbol{\omega}_{\text{СКК}}(t)$ вектора $\vec{\omega}(t)$ угловой скорости камеры на СКК между эквидистантными моментами времени $t_{\Gamma m} = t_{\Gamma 0} + T_{\Gamma} m$, где $t_{\Gamma 0}$ – начальный момент времени измерения угловой скорости, T_{Γ} – постоянный период измерения гироскопа, $T_{\Gamma} < T_{\varepsilon} / 2 < T_K$. За $t_{\Gamma 0}$ принимается момент измерения

гироскопа, непосредственно предшествующий моменту $t_{\varepsilon 0}$: $t_{\Gamma 0} \leq t_{\varepsilon 0} < t_{\Gamma 1}$ (рис. 1). Количество M измерений гироскопа, необходимое для интегрирования, определяется по моменту начала экспозиции последнего кадра: $t_{\Gamma M-2} \leq t_{\varepsilon K-1} < t_{\Gamma M-1}$. Каждый момент $t_{\varepsilon k}$ располагается между двумя последовательными измерениями гироскопа с номерами m_{k-1} и m_k : $t_{\Gamma m_{k-2}} \leq t_{\varepsilon k} < t_{\Gamma m_k}$.

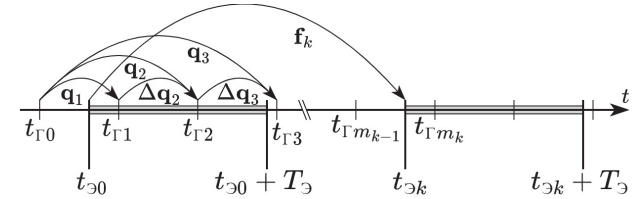


Рис. 1. Взаимное расположение моментов времени измерения гироскопа и начала экспозиции очередного кадра. Стрелки направлены из начальной точки поворота, заданного соответствующим кватернионом, в конечную

Матрица \mathbf{S}_k^0 вычисляется из решения дифференциального уравнения для нормированного кватерниона $\mathbf{q} = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$, $\|\mathbf{q}\| = 1$, задающего поворот камеры от СКК в момент времени $t_{\Gamma 0}$ к СКК в момент t [13, 14]

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2} \mathbf{q} \circ \boldsymbol{\omega}(t), \quad \mathbf{q}(t_{\Gamma 0}) = \mathbf{q}_0,$$

где q_0 – скалярная, q_1, q_2, q_3 – векторные части кватерниона; \mathbf{q}_0 – начальное значение кватерниона в момент $t_{\Gamma 0}$; \circ – символ кватернионного умножения. Распространённым методом численного решения кватернионных уравнений ориентации на коротких промежутках времени является метод последовательных приближений Пикара 3-го порядка [13] с линейной интерполяцией угловой скорости внутри шага интегрирования $[t_{\Gamma m-1}, t_{\Gamma m}]$:

$$\boldsymbol{\omega}(\tau) = \frac{\boldsymbol{\theta}_m}{T_{\Gamma}} + \Delta \boldsymbol{\theta}_m \left(\frac{\tau}{T_{\Gamma}^2} - \frac{1}{2T_{\Gamma}} \right),$$

где $\tau = t - t_{\Gamma m-1}$, $\tau \in [0, T_{\Gamma}]$; $\Delta \boldsymbol{\theta}_m = \boldsymbol{\theta}_m - \boldsymbol{\theta}_{m-1}$. Линейная интерполяция позволяет аналитически проинтегрировать отдельные слагаемые в приближениях Пикара и рассчитать ненормированное приращение

$$\Delta \check{\mathbf{q}}_m(\tau) = [\Delta \check{q}_{0m}(\tau) \ \Delta \check{q}_{1m}(\tau) \ \Delta \check{q}_{2m}(\tau) \ \Delta \check{q}_{3m}(\tau)]^T$$

кватерниона ориентации камеры

$$\begin{bmatrix} \Delta \check{q}_{1m}(\tau) \\ \Delta \check{q}_{2m}(\tau) \\ \Delta \check{q}_{3m}(\tau) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\theta}_m \left(\frac{\tau}{T_{\Gamma}} - \frac{\boldsymbol{\theta}_m^2 \tau^3}{24 T_{\Gamma}^3} \right) + \frac{\boldsymbol{\theta}_m \times \Delta \boldsymbol{\theta}_m}{24} \frac{\tau^3}{T_{\Gamma}^3} + \frac{\Delta \boldsymbol{\theta}_m}{4} \left(\frac{\tau^2}{T_{\Gamma}^2} - \frac{\tau}{T_{\Gamma}} \right),$$

$$\Delta \check{q}_{0m}(\tau) = 1 - \frac{\boldsymbol{\theta}_m^2 \tau^2}{8 T_{\Gamma}^2} - \frac{\boldsymbol{\theta}_m \cdot \Delta \boldsymbol{\theta}_m}{4} \left(\frac{\tau^3}{T_{\Gamma}^3} - \frac{\tau^2}{T_{\Gamma}^2} \right).$$

При $\tau = T_\Gamma$ это приращение соответствует приращению кватерниона

$$\Delta \tilde{\mathbf{q}}_m = [\Delta \tilde{q}_{0m} \quad \Delta \tilde{q}_{1m} \quad \Delta \tilde{q}_{2m} \quad \Delta \tilde{q}_{3m}]^T = \Delta \tilde{\mathbf{q}}_m(T_\Gamma)$$

ориентации камеры за весь промежуток времени $[t_{\Gamma m-1}, t_{\Gamma m}]$ между измерениями ИИМ:

$$\Delta \tilde{q}_{0m} = 1 - \frac{\theta_m^2}{8}, \quad \begin{bmatrix} \Delta \tilde{q}_{1m} \\ \Delta \tilde{q}_{2m} \\ \Delta \tilde{q}_{3m} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \theta_m \left(1 - \frac{\theta_m^2}{24} \right) + \frac{\theta_m \times \Delta \theta_m}{24}.$$

Начальное значение $\mathbf{q}_0 = \mathbf{q}(t_{\Gamma 0})$ кватерниона ориентации камеры выбирается из условия $\mathbf{S}_0^0 = \mathbf{I}_3$, то есть $\mathbf{q}(t_{\Gamma 0}) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$. При таком выборе кватернион $\mathbf{q}_1 \equiv \mathbf{q}(t_{\Gamma 1})$ рассчитывается в виде

$$\tilde{\mathbf{q}}_1 = \Delta \tilde{\mathbf{q}}_1(t_{\Gamma 0} - t_{\Gamma 0}) \circ \tilde{\mathbf{q}}_1, \quad \mathbf{q}_1 = \frac{\tilde{\mathbf{q}}_1}{\|\tilde{\mathbf{q}}_1\|},$$

где знак \sim обозначает комплексное сопряжение кватерниона, $\tilde{\mathbf{q}} = [q_0 \ -q_1 \ -q_2 \ -q_3]^T$. Кватернион ориентации камеры в момент времени $t_{\Gamma m}$, $\mathbf{q}_m = \mathbf{q}(t_{\Gamma m})$, $m \geq 2$, вычисляется после получения очередного измерения от гироскопа:

$$\tilde{\mathbf{q}}_m = \mathbf{q}_{m-1} \circ \Delta \tilde{\mathbf{q}}_m, \quad \mathbf{q}_m = \frac{\tilde{\mathbf{q}}_m}{\|\tilde{\mathbf{q}}_m\|}.$$

Кватернионы $\{\mathbf{q}_m\}_{m=0}^{M-1}$ вычисляются независимо от состояния экспозиции камеры. Кватернион \mathbf{f}_k ориентации камеры в момент $t_{\Sigma k}$, $\mathbf{f}_k = \mathbf{q}(t_{\Sigma k})$, вычисляется из кватерниона ориентации камеры $\mathbf{q}_{m_k-1} = \mathbf{q}(t_{\Gamma m_k-1})$ и приращение кватерниона за промежуток времени $[t_{\Gamma m_k-1}, t_{\Sigma k}]$:

$$\tilde{\mathbf{f}}_k = \mathbf{q}_{m_k-1} \circ \Delta \tilde{\mathbf{q}}_{m_k}(t_{\Sigma k} - t_{\Gamma m_k-1}),$$

$$\mathbf{f}_k = [f_{0k} \quad f_{1k} \quad f_{2k} \quad f_{3k}]^T = \frac{\tilde{\mathbf{f}}_k}{\|\tilde{\mathbf{f}}_k\|}.$$

Из компонентов кватерниона \mathbf{f}_k рассчитываются элементы искомой матрицы \mathbf{S}_k^0 ориентации кадра:

$$\begin{aligned} s_k^{11} &= 1 - 2(f_{2k}^2 + f_{3k}^2), & s_k^{12} &= 2(f_{0k}f_{3k} + f_{1k}^0f_{2k}), \\ s_k^{13} &= 2(f_{1k}f_{3k} - f_{0k}f_{2k}), & s_k^{21} &= 2(f_{1k}f_{2k} - f_{0k}f_{3k}), \\ s_k^{22} &= 1 - 2(f_{1k}^2 + f_{3k}^2), & s_k^{23} &= 2(f_{0k}f_{1k} + f_{2k}^0f_{3k}), \\ s_k^{31} &= 2(f_{0k}f_{2k} + f_{1k}^0f_{3k}), & s_k^{32} &= 2(f_{3k}f_{2k} - f_{0k}f_{1k}), \\ s_k^{33} &= 1 - 2(f_{1k}^2 + f_{2k}^2). \end{aligned}$$

2.2. Внутрипиксельная дискретизация кадров

Для определения координат изображения звезды с субпиксельным разрешением внутри чувствительной области каждой фотоприёмной ячейки МФП выделяются $N_D \geq 1$ несовпадающих точек – узлов внутрипиксельной дискретизации. Положение узла с порядковым номером $n = 0 \dots N_D - 1$ внутри ячейки задаётся вектором смещений $[\Delta x(n) \ \Delta y(n)]^T$ относительно её левого верхнего угла. Расположение узлов минимизирует математическое

ожидание $\langle d(\hat{h}, \hat{w}) \rangle$ расстояния между истинным положением звезды и узлом внутри ячейки (\hat{h}, \hat{w}) :

$$\langle d(\hat{h}, \hat{w}) \rangle = \int_0^a dx \int_0^a dy d(x, y) p(x, y | \hat{h}, \hat{w}),$$

$$d(x, y) = \min_{n=0 \dots N_D-1} \{((x - \Delta x(n))^2 + (y - \Delta y(n))^2)^{1/2}\},$$

где $d(x, y)$, $0 \leq x, y < a$ – расстояние между геометрическим изображением звезды и узлом с номером n ; $p(x, y | \hat{h}, \hat{w})$ – плотность распределения изображений звезды внутри ячейки (\hat{h}, \hat{w}) . Координаты узлов внутрипиксельной дискретизации для равномерной плотности $p(x, y | \hat{h}, \hat{w}) = a^{-2}$ и $N_D = 3$ перечислены в табл. 1. Для дальнейших расчётов будет использоваться именно эта конфигурация узлов.

Табл. 1. Координаты узлов внутрипиксельной дискретизации в единицах длины стороны пикселя a

Номер	$\Delta x(n)$	$\Delta y(n)$
1	0,21	0,50
2	0,69	0,76
3	0,69	0,23

Каждый кадр в накапливаемой последовательности подвергается внутрипиксельной дискретизации по отдельности. Узел с номером $n_k = 0 \dots N_D - 1$ внутри пикселя (\hat{h}_k, \hat{w}_k) , $\hat{h}_k = 0 \dots H - 1$, $\hat{w}_k = 0 \dots W - 1$, расположенный в кадре $k = 0 \dots K - 1$, далее будет обозначаться $(n_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k)$. Векторные координаты

$$\boldsymbol{\eta}(n_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k) = [\eta_x(n_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k) \quad \eta_y(n_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k)]^T$$

этого узла на полноразмерной матрице:

$$\boldsymbol{\eta}(n_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k) = \frac{1}{a} \begin{bmatrix} \hat{h}_k - h_O \\ \hat{w}_k - w_O \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x(n_k) \\ \Delta y(n_k) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

В момент времени $t_{\Sigma 0}$ узлу n_0 кадра 0 соответствует некоторое постоянное направление в пространстве предметов. Координаты

$$\mathbf{s}_0(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) = \begin{bmatrix} s_{x0}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) \\ s_{y0}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) \\ s_{z0}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) \end{bmatrix}$$

единичного направляющего вектора $\vec{s}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0)$ этого направления в СКК₀ получаются из (2):

$$\mathbf{s}_0(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) = \frac{1}{\eta_F(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0)} \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\eta}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) \\ F \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $\eta_F(n_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k) = (|\boldsymbol{\eta}(n_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k)|^2 + F^2)^{1/2}$. В СКК_k у этого вектора получается новый столбец координат

$$\mathbf{s}_k(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) = \begin{bmatrix} s_{xk}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) \\ s_{yk}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) \\ s_{zk}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) \end{bmatrix} = \mathbf{S}_k^0 \mathbf{s}_0(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0). \quad (5)$$

Из компонент $\mathbf{s}_k(n_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k)$ находятся векторные координаты

$$\xi_k(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) = [\xi_{xk}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) \quad \xi_{yk}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0)]^T$$

точки в плоскости кадра k , в которую проецируется направление $\vec{s}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0)$ в момент времени $t_{\varepsilon k}$

$$\xi_k(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) = -\frac{F}{s_{zk}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0)} \begin{bmatrix} s_{xk}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) \\ s_{yk}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

У вектора $\xi_k(n_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k)$, в отличие от (3), появился подстрочный индекс k номера кадра. Выражение (3) даёт векторные координаты дискретного узла $(n_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k)$ в плоскости «своего» кадра k , т.е. множество значений вектора $\boldsymbol{\eta}(n_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k)$ действительно, но дискретно. Выражение (6) позволяет найти векторные координаты точки в плоскости кадра k , в которую перешёл дискретный узел $(n_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k)$ из кадра 0. Множество значений вектора $\xi_k(n_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k)$ действительно и непрерывно. После подстановки (4–5) в (6) эти координаты записываются в форме известных проективных преобразований одной плоскости в другую

$$\xi_k(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) = -F \frac{\begin{bmatrix} s_k^{11} & s_k^{12} & s_k^{13} \\ s_k^{21} & s_k^{22} & s_k^{23} \\ s_k^{31} & s_k^{32} & s_k^{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) \\ -F \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} s_k^{31} & s_k^{32} & s_k^{33} \\ \boldsymbol{\eta}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) \\ -F \end{bmatrix}}.$$

Векторные координаты $\boldsymbol{\eta}(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0)$ узла $(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0)$ в плоскости «своего» кадра 0, в правой части этого преобразования, рассчитанные согласно (3).

Точка $\xi_k(n_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k)$ попадает в кадре k в пиксель с растровыми индексами (1):

$$\begin{bmatrix} \hat{h}_k(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) \\ \hat{w}_k(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) \end{bmatrix} = \text{floor} \left(\frac{\xi_k(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0)}{a} + \begin{bmatrix} h_0 \\ w_0 \end{bmatrix} \right),$$

и заменяется ближайшим узлом внутрипиксельной дискретизации с номером

$$m_k = \arg \min_{m=0 \dots N_{\text{д}}-1} \{ | \mathbf{d}_k(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0 | m) | \},$$

где $\mathbf{d}_k(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0 | m)$ – вектор, отложенный из точки $\xi_k(n_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k)$ в узел $m=0 \dots N_{\text{д}}-1$ внутри пикселя $(\hat{h}_k(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0), \hat{w}_k(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0))$,

$$\mathbf{d}_k(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0 | m) = \frac{\xi_k(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0)}{a} + \begin{bmatrix} h_0 \\ w_0 \end{bmatrix} - \left(\begin{bmatrix} \hat{h}_k(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) \\ \hat{w}_k(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x(m) \\ \Delta y(m) \end{bmatrix} \right).$$

Таким образом, узел $(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0)$ из кадра 0 переходит в узел $(m_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k | n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0)$ в кадре k . Далее для сокращения обозначений растровые индексы начального пикселя (\hat{h}_0, \hat{w}_0) и текущего пикселя

(\hat{h}_k, \hat{w}_k) будут обозначаться одинаковыми строчными буквами. То есть запись $(m_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k | n_0)$ следует читать как $(m_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k | n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0)$.

2.3. Обработка последовательных кадров в многоканальном накопителе

Каждый канал многоканального накопителя настраивается на определённый номер $n_0=0 \dots N_{\text{д}}-1$ узла внутри всех пикселей кадра с номером 0. Таким образом, в накопителе содержится $N_{\text{д}}$ независимых, параллельно работающих накопительных каналов.

Новый узел $(m_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k | n_0)$ рассматривается в накопительном канале n_0 как начальная точка траектории смаза для возможного изображения звезды в кадре k . Вдоль этой траектории в канале n_0 синтезируется ядро смаза $H_{m_k}(\hat{p}, \hat{q}; \hat{h}_k, \hat{w}_k | n_0)$ [1] с использованием измерений ИИМ, накопленных за промежуток времени $[t_{\varepsilon k}, t_{\varepsilon k} + T_{\varepsilon}]$. Здесь индексы (\hat{h}_k, \hat{w}_k) и номер m_k являются параметрами ядра смаза, задающими пиксель и узел внутри этого пикселя, в котором начинается траектория смаза. Индексы (\hat{p}, \hat{q}) являются аргументами дискретной параметрической функции $H_{m_k}(\hat{p}, \hat{q}; \hat{h}_k, \hat{w}_k | n_0)$. Ядро смаза неоднородно в плоскости изображения (при переходе от одного пикселя (\hat{h}_k, \hat{w}_k) к другому структура ядра изменяется), поэтому с ядром $H_{m_k}(\hat{p}, \hat{q}; \hat{h}_k, \hat{w}_k | n_0)$ рассчитывается единственное значение корреляции, определённое только в том пикселе (\hat{h}_k, \hat{w}_k) , для которого синтезировано ядро:

$$\hat{I}_k(\hat{h}_k, \hat{w}_k | n_0) = \sum_{\hat{p}=0}^{H-1} \sum_{\hat{q}=0}^{W-1} H_{m_k}(\hat{p}, \hat{q}; \hat{h}_k, \hat{w}_k | n_0) I_k(\hat{p}, \hat{q}), \quad (7)$$

где $\{I_k(\hat{p}, \hat{q})\}_{\hat{p}, \hat{q}=0}^{H-1, W-1}$ – матрица цифрового изображения, полученная в кадре k . Если возможное изображение звезды реализуется в рассматриваемом узле, то значение $\hat{I}_k(\hat{h}_k, \hat{w}_k | n_0)$ содержит корреляционный максимум с наилучшим отношением сигнал/шум. В противном случае в этом пикселе реализуется смесь ослабленного сигнала со сглаженным фоновым шумом, или просто сглаженное значение фонового шума.

Очевидно, что для каждого узла $(n_0, \hat{h}_0, \hat{w}_0)$ существует единственный узел $(m_k, \hat{h}_k, \hat{w}_k | n_0)$ (обратное неверно). Отсюда, при вычислении корреляции (7) в накопительном канале n можно сразу учесть поворот этого кадра относительно кадра 0. Для этого результат вычисления $\hat{I}_k(\hat{h}_k, \hat{w}_k | n_0)$ нужно присвоить не элементу (\hat{h}_k, \hat{w}_k) , как это следует из определения корреляции, а элементу (\hat{h}_0, \hat{w}_0) в канале n_0

$$J_k(\hat{h}_0, \hat{w}_0 | n_0) = \hat{I}_k(\hat{h}_k, \hat{w}_k | n_0), \quad (8)$$

где $J_k(\hat{h}_0, \hat{w}_0 | n_0)$ – значение пикселя промежуточного изображения $\{J_k(\hat{h}_0, \hat{w}_0 | n_0)\}_{\hat{h}_0, \hat{w}_0=0}^{H-1, W-1}$.

Для накопления изображений в каждом накопительном канале выделен отдельный аккумулятор

$\{A(\hat{h}_0, \hat{w}_0 | n_0)\}_{\hat{h}_0, \hat{w}_0=0}^{H-1, W-1}$. Все аккумуляторы инициализируются результатами фильтрации (8) начального кадра 0

$$A_0(\hat{h}_0, \hat{w}_0 | n_0) = J_0(\hat{h}_0, \hat{w}_0 | n_0),$$

где $A_0(\hat{h}_0, \hat{w}_0 | n_0)$ – содержимое аккумулятора $A(\hat{h}_0, \hat{w}_0 | n_0)$ после обработки кадра 0. После обработки очередного кадра $k > 0$ к аккумуляторам прибавляются значения из промежуточных буферов:

$$A_k(\hat{h}_0, \hat{w}_0 | n_0) = A_{k-1}(\hat{h}_0, \hat{w}_0 | n_0) + J_k(\hat{h}_0, \hat{w}_0 | n_0),$$

где $A_k(\hat{h}_0, \hat{w}_0 | n_0)$ – содержимое аккумулятора $A(\hat{h}_0, \hat{w}_0 | n_0)$ после обработки кадра k . После получения последнего кадра с номером $K-1$ в накапливаемой последовательности все аккумуляторы нормируются для получения N_D накопленных изображений:

$$U(\hat{h}_0, \hat{w}_0 | n_0) = \frac{1}{K} A_{K-1}(\hat{h}_0, \hat{w}_0 | n_0).$$

3. Моделирование многоканального накопления

Моделирование многоканального накопления обобщает моделирование однокадровой согласованной фильтрации в [2] на случай, когда яркости звезды недостаточно для её обнаружения в одном кадре. Модельные звёзды наблюдаются камерой, параметры которой перечислены в [2, табл. 1].

Модельное накопление выполняется многоканальным накопителем с координатами узлов, перечисленными в табл.1. В момент $t_{Э0}$ начала экспозиции кадра $k=0$ геометрическое изображение модельной звезды находится в узле №1 внутри фотоприёмной ячейки с растровыми индексами $(\hat{h}_{Ц}, \hat{w}_{Ц}) = (3240, 2430)$, в которой расположена главная точка изображения. В этом описываемая модель многокадрового накопления отличается от модели [2] однокадровой фильтрации, в которой модельная звезда располагалась точно в центре ячейки $(\hat{h}_{Ц}, \hat{w}_{Ц})$ в момент начала экспозиции. Моделирование проводится для угловой скорости $\omega = [0,63 \ 1,90 \ 0]^T$ °/с, $|\omega| = 2$ °/с при частоте кадров $1/T_K = 20$ Гц (межкадровый период $T_K = 50$ мс).

В качестве опорной звезды для моделирования выбрана Вега со звёздной величиной $m = 0,03$. Спектр излучения Веги был линейно отмасштабирован для получения модельной звёзды со звёздной величиной $m = 3,39$. Моделирование излучения фона выполняется для зенитного угла оптической оси цифровой камеры в 0° (камера смотрит в зенит) и зенитного угла Солнца в 40° [15]. Начальной высотой наблюдения выбирается $h_{НБЛ} = 8$ км, т.к. на этой высоте спектральные плотности освещённости от фона и от Веги в полосе пропускания объектива очень близки (рис.2). Время экспозиции для этого случая, рассчитанное согласно методике [2] и использованное для моделирования однокадровой фильтрации, $T_Э = 5$ мс.

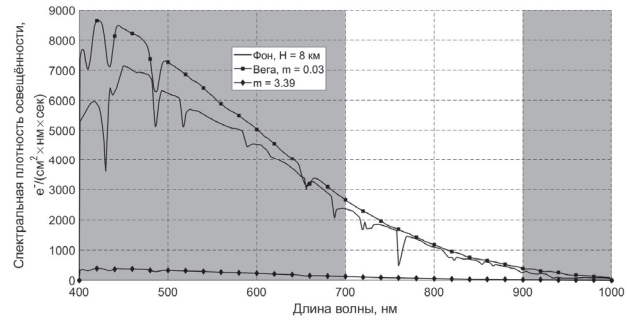


Рис. 2. Графики спектральной плотности освещённости входного зрачка объектива, создаваемые атмосферным фоном и модельными звёздами. Полоса пропускания объектива выделена светлым прямоугольником

Эффект от накопления последовательности кадров демонстрируется для $K = 30$, что эквивалентно времени измерения одного значения ориентации $(K-1)T_K = 1,45$ с. Численные значения энергетических параметров наблюдаемой сцены приведены в табл. 2 с использованием обозначений [2]. Максимальное число электронов в одном пикселе кадра со смазанным изображением звезды обозначено $\langle I_{\text{спикс}}^{\text{max}} \rangle$.

Табл. 2. Энергетические параметры сигналов от модельных звёзд. Параметры фона приведены для $h_{НБЛ} = 8$ км

m	0,03 (Вега)	3,39
$E_{\text{зв}}, [e^- / (\text{см}^2 \times \text{с})]$	232489	10529
$\langle I_{\text{зв}} \rangle, [e^-]$	10144	459
$\langle I_{\text{спикс}}^{\text{max}} \rangle, [e^-]$	647	29
$E_{\text{сфон}}, [e^- / (\text{см}^2 \times \text{с})]$	202126	202126
$\langle I_{\text{сфон}} \rangle, [e^-]$	8819	8819
$\sigma_{\text{сфон}}, [e^-]$	94	94

Смазанные изображения звезды, полученные в одном кадре в различных условиях наблюдения, показаны в [2, рис. 3, 4]. На рис. 3 показаны результаты накопления изображения одной и той же звезды, полученной при $|\omega| = 2$ /с, в трёх накопительных каналах при различных фоновых шумах. Черным прямоугольником выделен ярчайший пиксель изображения, линия – траектория смаза, жирная точка – начало траектории. Истинное положение изображения звезды в момент времени $t_{Э0}$ – узел 0 в центральном пикселе, т.е. звезда должна быть обнаружена в центральном пикселе изображения, накопленного в канале 0.

На рис. 3а–в показаны результаты накопления кадров без фонового шума для звезды с $m = 3,39$ в трёх накопительных каналах. Фон в этих кадрах присутствует только в качестве постоянной «фоновой подставки», равной математическому ожиданию фона на высоте $h_{НБЛ} = 8$ км. Уровни сигналов в ярчайших пикселях изображений, накопленных в отдельных каналах, перечислены в табл. 3. Из этой таблицы видно, что в идеальных условиях, вследствие плохих корре-

ляционных свойств ядра смаза, абсолютный корреляционный максимум, соответствующий истинному положению звезды в канале 0, мало отличается от максимумов в других накопительных каналах.

На рис. 3г–е показаны те же самые кадры, накопленные с фоновым шумом на высоте $h_{\text{НБЛ}} = 8$ км. Здесь звезда обнаруживается во всех трёх каналах, абсолютный максимум проявляется в канале 1 (табл. 3). При этом ни один максимум в каналах обнаружения не проявляется в пикселе с истинным положением звезды. Т.е. при $K = 30$ в таких условиях наблюдения координаты изображения звезды будут определены с погрешностью порядка размера пикселя.

На рис. 3ж–и показаны накопленные изображения той же самой звезды, но наблюдаемой на высоте $h_{\text{НБЛ}} = 25$ км. Здесь абсолютный максимум проявляется в канале 0, что соответствует истинному положению звезды (табл. 3).

Табл. 3. Значения ярчайших пикселей (в единицах младшего разряда) накопленных изображений для $t = 3,39$

Условие	Без шума	$h_{\text{НБЛ}} = 8$ км	$h_{\text{НБЛ}} = 25$ км
Канал 0	3512,49	3513,15	76,72
Канал 1	3512,36	3513,22	76,53
Канал 2	3512,35	3513,20	76,64

Заключение

Многоканальное накопление последовательных кадров, рассмотренное в работе, позволяет обнаруживать смазанные изображения тусклых звёзд в сильных фоновых шумах и измерять координаты этих изображений с субпиксельным разрешением. Обязательным этапом обработки каждого кадра, предшествующим накоплению, является цифровая фильтрация, согласованная со смазом. Предлагаемый алгоритм обобщает известные корреляционные алгоритмы многоканального обнаружения точечной цели на случай, когда нельзя пренебречь движением изображения цели на интервале экспозиции, а направление этого движения на межкадровом интервале может произвольно изменяться.

Движение изображения учитывается за счёт измерения вектора угловой скорости камеры при помощи гироскопов. Из этих измерений рассчитывается ориентация плоскости очередного кадра относительно плоскости накапливаемого изображения. Ориентация позволяет связать каждый пиксель накапливаемого изображения с пикселем в очередном кадре и указать на узел внутривидеопиксельной дискретизации, в котором нужно синтезировать ядро смаза и выполнить согласованную фильтрацию.

Если в каком-либо пикселе очередного кадра начинается смазанное изображение звезды, то после согласованной фильтрации в этом пикселе проявляется корреляционный максимум. Если сигнал от звезды в пикселе отсутствует, то его профильтрованное значение представляет собой корреляцию между ядром смаза и реализацией изображения фона.

Ядро смаза обладает плохими корреляционными свойствами: значения пикселя, содержащего максимум автокорреляционной функции ядра, мало отличается от значений других пикселей из ближайшей окрестности этого максимума. Поэтому число накапливаемых кадров, требуемое для измерения координат смазанного изображения звезды с субпиксельным разрешением, заметно превышает число накапливаемых кадров, достаточное для простого обнаружения этого изображения.

Плохие корреляционные свойства ядра смаза не позволяют разделить смазанные изображения двух близких звёзд. Если расстояние между начальными пикселями смазанных изображений меньше половины длины смаза, то два накопленных изображения сольются в одно общее пятно. Максимум в этом пятне, скорее всего, удастся обнаружить. Но невозможно указать, к какому из двух слившихся изображений он относится.

Максимальное количество накапливаемых кадров ограничено временем нахождения звезды в поворачиваемом поле зрения цифровой камеры. Кроме указанного геометрического ограничения, максимальное время накопления может ограничиваться нарастающими погрешностями определения ориентации очередного кадра относительно начального. Эти погрешности обусловлены как погрешностями измерения компонент вектора угловой скорости, так и методическими погрешностями алгоритма численного интегрирования этих измерений. Поэтому параметры алгоритма накопления и условия эксплуатации астроинерциального датчика нужно выбирать так, чтобы минимизировать количество накапливаемых кадров.

References

- [1] Vasilyuk NN. Synthesis of the rotational blur kernel in a digital image using measurements of a triaxial gyroscope. *Computer Optics* 2022; 46(5): 763-773. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1081.
- [2] Vasilyuk NN. Correction of rotational blur in images of stars observed by an astroinertial attitude sensor against the background of the daytime sky. *Computer Optics* 2023; 47(1): 79-91. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1141.
- [3] Liebe CC, Gromov K, Meller DM. Toward a stellar gyroscope for spacecraft attitude determination. *J Guid Control Dyn* 2004; 26(1): 91-99. DOI: 10.2514/1.9289.
- [4] Samaan MA, Mortari D, Pollock TC, Junkins JL Predictive centroiding for single and multiple FOVs star trackers. *J Astronaut Sci* 2002; 50(1): 113-123. DOI: 10.1007/BF03546333.
- [5] Aretskin-Hariton E, Swank AJ. Star tracker performance estimate with IMU. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conf* 2015: AIAA2015-0334. DOI: 10.2514/6.2016-0334.
- [6] Wang Z, Jiang J, Zhang G. Global field of view imaging model and parameter optimization for high dynamic star tracker. *Opt Express* 2018; 26(25): 33314-33332. DOI: 10.1364/OE.26.033314.
- [7] Wang S, Zhang S, Ning M, Zhou B. Motion blurred star image restoration based on MEMS gyroscope aid and blur

kernel correction. Sensors 2018; 18(8): 2662. DOI: 10.3390/s18082662.

[8] Loke SC. Astronomical image acquisition using an improved track and accumulate method. IEEE Access 2017; 5: 9691-9698. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2700162.

[9] Ni Y, Dai D, Tan W, Wang X, Qin S. Attitude-correlated frames adding approach to improve signal-to-noise ratio of star image for star tracker. Opt Express 2019; 27(11): 15548-15564. DOI: 10.1364/OE.27.015548.

[10] Ma L, Bernelli-Zazzera F, Qin S, Wang X, Ma L. Performance analysis of the attitude-correlated frames approach for star sensors. IEEE Metrology for Aerospace 2016: 81-86. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2016.7573190.

[11] Kirichuk VS, Kosykh VP, Kurmanbek UT. Algorithm of detection of moving small-scale objects in a sequence of images. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing 2009; 45(1): 8-13. DOI 10.1134/S8756699009010026.

[12] Kirichuk VS, Kosykh VP. Construction of a multichannel filter for detecting point targets in the image formed by a matrix photodetector. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing 2012; 48(5): 497-505. DOI 10.3103/S875669901205010X.

[13] Branets VN, Shmyglevski IP, Applications of quaternions in problems on the motion of rigid bodies [In Russian], Moscow: "Nauka" Publisher; 1973.

[14] Molodenkov AV, Sapunkov YG, Perelyaev SE, Molodenkova TV, Analytical solutions in the Darboux problem, the Bortz equation and the approach to orientation algorithm of sins based on them [In Russian]. Applied Mathematics and Mechanics 2019, 83(4): 586-596. DOI 10.1134/S003282351904009X.

[15] Bessonov RV, Zhukov BS, Karavaeva ES, et al. The basic principles of design of astrocorrector for endoatmospheric vehicles [In Russian]. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space 2018; 15(6): 21-30. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-21-30.

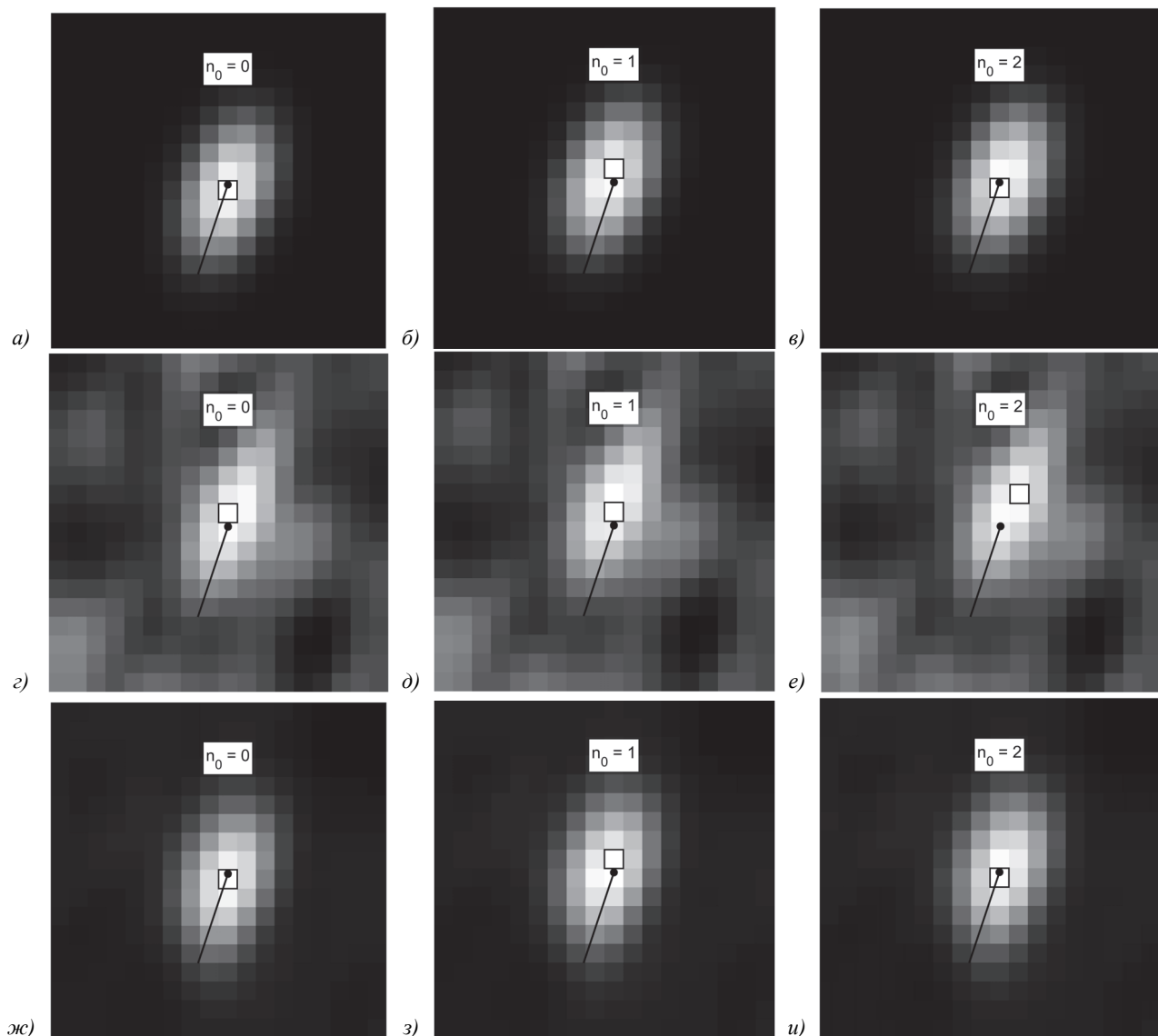


Рис.3. Результаты накопления изображений одной звезды с $t = 3,39$ в трёх накопительных каналах $n_0 = 0, 1, 2$ при $|\omega| = 2^\circ/\text{с}$. (а-в) – накопление без фонового шума при $h_{\text{нбл}} = 8$ км; (г-е) – накопление с фоновым шумом при $h_{\text{нбл}} = 8$ км; (ж-и) – накопление с фоновым шумом при $h_{\text{нбл}} = 25$ км

Сведения об авторе

Василюк Николай Николаевич, 1976 года рождения, кандидат физико-математических наук, заместитель главного конструктора ООО «НПК Электрооптика». Область научных интересов: оптико-электронные следящие системы, системы навигации и ориентации, методы комплексирования в навигационных системах.
E-mail: nik-vasilyuk@yandex.ru ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2317-8066>.

ГРНТИ: 28.23.15

Поступила в редакцию 28 марта 2023 г. Окончательный вариант – 15 августа 2023 г.

Subpixel stacking and detection of blurred star images observed by an astroinertial attitude sensor against the background of the daytime sky

N.N. Vasilyuk¹

¹Electrooptika, LLC,

107076, Moscow, Russia, Stromynka, d.18, k.1

Abstract

To determine the attitude from the image of a star field obtained by a digital camera, it is necessary to detect images of individual stars and determine their coordinates with subpixel resolution. This problem is relatively easy to solve if the image of the star field is obtained by a stationary camera observing a clear night sky. The difficulty arises when the stars are observed by the rotating camera against the background of the daytime sky. The blurred images of stars are almost impossible to detect in the background noise in one frame. This difficulty can be overcome by accumulating a certain number of consecutive frames after the matched blur filtering has been performed. This paper considers an algorithm for accumulating the sequence of frames, implemented as a multichannel accumulator, consisting of several accumulative channels of the same type, and operating in parallel. The plane of the accumulated image in each channel coincides with the plane of the first frame of the accumulated sequence. Subpixel resolution in determining the coordinates of detected star images is achieved by introducing intrapixel discretization in the first frame. The orientation of the current frame relative to the first one is calculated from the measurements of the gyroscopes of the astroinertial sensor. When synthesizing the impulse responses of the blur-matched filters for the current frame, the attitude of this frame and the location of the intrapixel discretization nodes of the first frame are taken into account. Calculation formulas are given for determining the number of accumulated frames depending on the angular velocity of the camera rotation, the background intensity and the brightness of the observed stars. The simulation results show the possibility of detecting blurred images of fairly dim stars against the background of the daytime sky and determining their coordinates with subpixel resolution.

Keywords: star tracker, astrocorrector, astro inertial navigation system, blur correction, images stacking.

Citation: Vasilyuk NN. Subpixel stacking and detection of blurred star images observed by an astroinertial attitude sensor against the background of the daytime sky. *Computer Optics* 2024; 48(2): 303-311. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1309.

Author's information

Nikolay Nikolaevich Vasilyuk (b. 1976), PhD in Physics, deputy chief design officer at Electrooptika LLC. Research interests: optoelectronic tracking and detection systems, navigation and orientation systems, navigation sensors fusion. E-mail: nik-vasilyuk@yandex.ru ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2317-8066>

Received 28 March, 2023. The final version – 15 August, 2023.
