

Классификация и анализ погрешности измерения координат объектов на кадрах звездного неба

М.Л. Беличенко¹, Р.В. Бессонов¹, Д.С. Завгородний², Я.Д. Эльяшев¹,
С.А. Прохорова¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: besson777@gmail.com

²АО «ЛОМО», Санкт-Петербург, 194044, Россия

В данной работе проводится исследование ошибок определения центров изображений звезд на фотоприемной матрице прибора звездной ориентации. В статье приведена терминология ошибок определения центров яркости изображений звезд, так как совокупная ошибка состоит из методической и шумовой составляющих, которые выявляются в процессе исследования. Методическая ошибка возникает независимо от накладываемых на изображение шумов, однако ее вклад можно свести к минимуму при оптимальных параметрах фокусировки. Таким образом, кроме классификации ошибок определения центров изображений звезд, ставится задача выявления оптимальных параметров фокусировки оптического прибора. Для решения этой задачи важным этапом стало моделирование изображений объектов: рассматривался идеализированный случай – нормальное распределение по Гауссу, а также модель с учетом влияния характеристик реального объектива. Для модели реального объектива проводился анализ условий эксплуатации прибора в воздухе и в вакууме. Финальной стадией исследования стало сравнение модели с экспериментальными данными. На имитаторе одной звезды воспроизведен один из моделируемых опытов для такой же оптической системы, что и в модели, благодаря чему удалось сравнить результаты и оценить высокую степень корреляции модели и эксперимента.

Ключевые слова: ориентация, кадры, пиксели, шум, фотоприемная матрица, приборы звездной ориентации, звездные датчики, методическая ошибка, погрешности, субпиксельная точность

Одобрена к печати: 14.03.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-67-77

Введение

По кадрам звездного неба оптические приборы определяют параметры ориентации летательного аппарата в пространстве. В процессе обработки кадра, после выделения изображений звезд на фоне шума определяются их энергетические центры на поверхности фотоприемной матрицы. Точность определения координат объектов зависит от характеристик прибора и условий съемки. В данной работе описана классификация ошибок определения центров изображений звезд с учетом воздействия внешних факторов и шумов различного рода, проявляющихся на кадрах звездного неба.

Определение координат центров яркости изображений звезд происходит с субпиксельной точностью, поэтому распределение ошибок исследуется по полю всего пикселя. Для решения этой задачи использовались различные способы моделирования кадров с изображениями звезд. Кроме того, в статье представлены результаты опытов на смоделированных снимках с учетом влияния характеристик объектива, а также приведены результаты проведенных испытаний на реальном приборе семейства БОКЗ.

Классификация ошибок

Для определения параметров ориентации по кадру звездного неба необходимо считать центры яркости каждой звезды на матрице. Оптическая система формирует

изображение звезды в виде непрерывной функции рассеяния точки. При отображении на пиксели матрицы изображение деформируется: из-за яркостной дискретизации градации АЦП заполняются целыми значениями поступающего сигнала, а в процессе пространственной дискретизации форма изображения звезды дробится на пиксели. Также на изображение звезды накладываются шумы, поэтому рассчитанные координаты центра получаются неточными.

В процессе выполнения штатного алгоритма работы прибора к вышеупомянутым причинам неточного определения центра объекта добавляется вычитание порогового значения сигнала. Поэтому при выделении звезды на фоне шума может усекаться значительная часть пикселей, изменяя при этом форму и яркость уже дискретизированного изображения звезды.

Координаты центра определяются с помощью центроидного метода, описываемого формулами:

$$M_x = \sum_x \frac{\sum_y U_{xy}}{Q} x, \quad (1)$$

$$M_y = \sum_y \frac{\sum_x U_{xy}}{Q} y, \quad (2)$$

где x, y – координаты пикселя, Q – интегральная яркость звезды, U_{xy} – яркость каждого отдельного пикселя.

В качестве составляющих ошибки определения энергетических центров изображений звезд выделяются методическая и шумовая ошибки, которые иллюстрируются на *рис. 1* по результатам моделирования (см. ниже). Стоит отметить, что размер элемента фотоприемной матрицы для данного исследования значения не имеет, т. к. измерения проходят в долях пикселя.

Определение энергетического центра объекта без шумовой составляющей с помощью центроидного метода (1, 2) дает смещенные координаты относительно истинного центра изображения звезды, т. е. проявляется методическая ошибка. Методическая составляющая обусловлена влиянием пространственной и яркостной дискретизации, а также отсечением порогового значения.

В свою очередь, шумовая составляющая вносит случайную ошибку, которая отражена на *рис. 1* разбросом измеренных центров звезд. Среднее значение выборки координат с шумовой составляющей близко к методической ошибке.

На *рис. 2* рассмотрено 20 положений изображения звезды в одном пикселе. При каждом положении проведено 50 измерений координат объекта и по ним рассчитано среднеквадратичное отклонение (СКО) центров с шумовой составляющей (*рис. 2a*). При сравнении рассчитанных и истинных центров яркости звезды в разных областях пикселя прослеживается тенденция систематики в распределении ошибок. Распределение методической ошибки по полю пикселя имеет форму, близкую к синусоиде, т. е. в центре и по краям

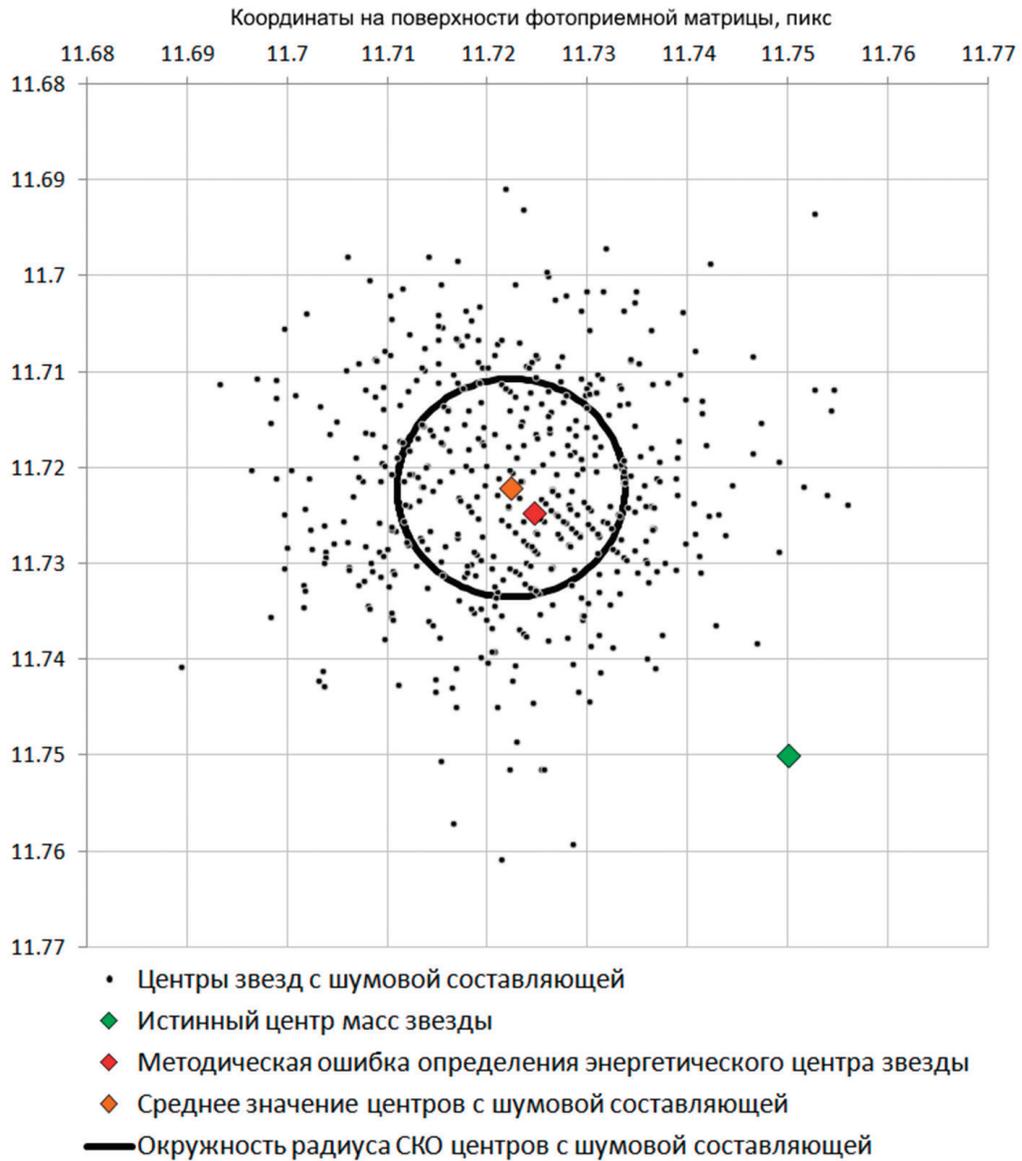
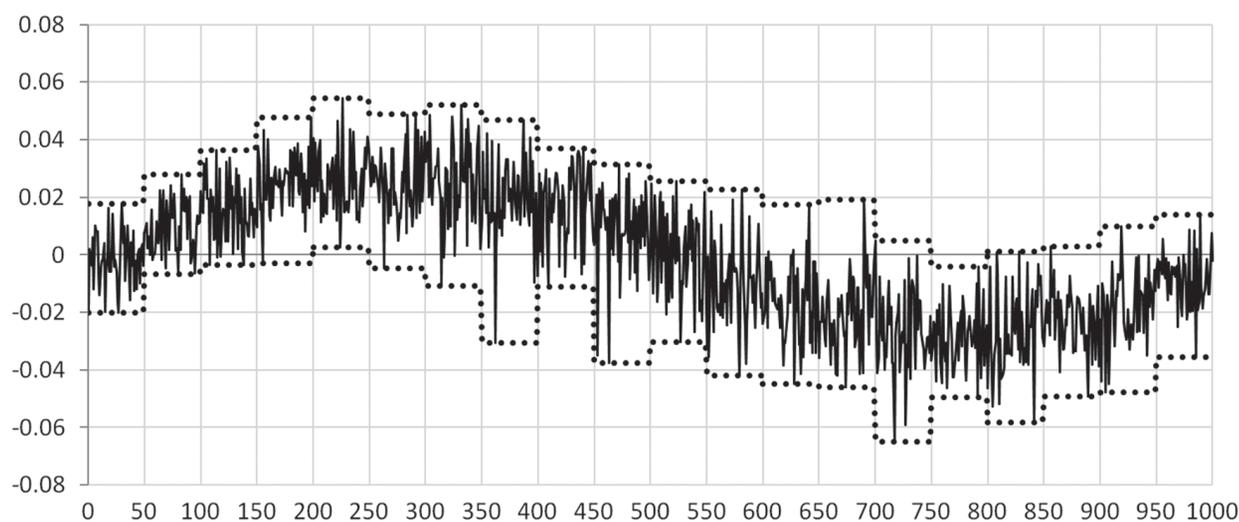


Рис. 1. Ошибки определения координат центров яркости изображений звезды на поверхности матрицы (результаты моделирования, субпиксельный масштаб)

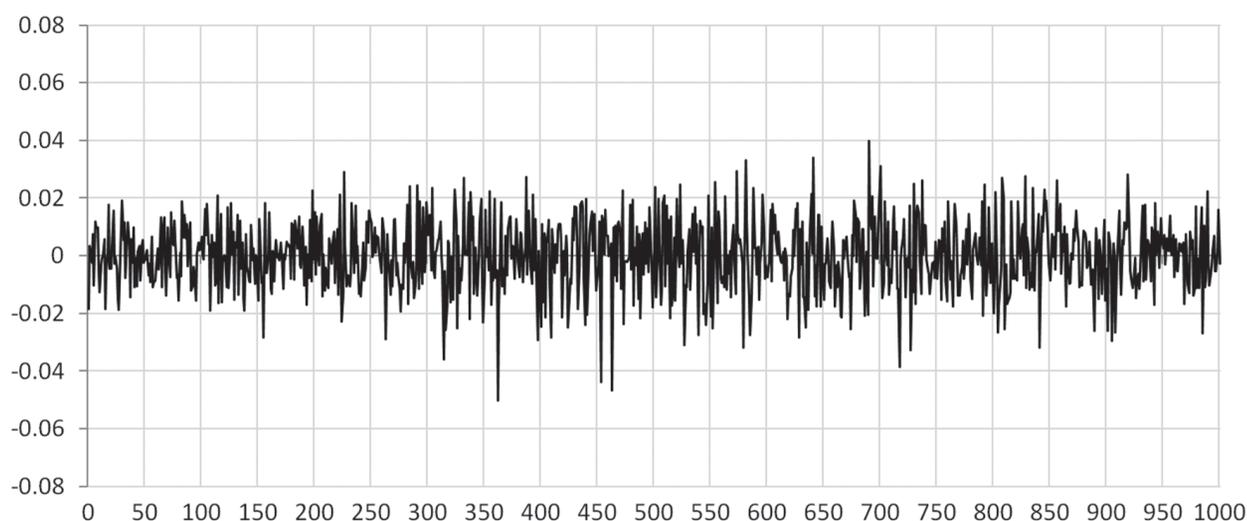
пикселя достигается наименьшая ошибка. Однако яркость объекта вносит свои коррективы: чем меньше интегральная яркость объекта, тем хуже проявляется синусоида, что обусловлено возрастающей ошибкой из-за яркостной дискретизации. Также на форму распределения ошибки существенно влияет отсекаемый порог. После вычитания порогового значения распределение ошибок по пикселю меняется, форма синусоиды искажается.

При учете шумовой составляющей распределение ошибок определения центров представляется в виде случайного шумового сигнала, на который в значительной степени влияет методическая составляющая. При извлечении из суммарной ошибки методической ошибки получается чисто шумовая составляющая (рис. 2б).

Таким образом, выделяются следующие виды ошибок: методическая, шумовая и суммарная. Оценкой ошибок определения координат центров изображений звезд является среднеквадратичное отклонение ряда их измерений от истинных значений центров.



а)



б)

Рис. 2. Ошибка определения координат в 20 областях по полю пикселя (серии по 50 измерений для каждой области): а) – суммарная ошибка; б) – шумовая составляющая без влияния методической ошибки (результаты моделирования)

Параметры моделирования

Определяющими параметрами при моделировании являются: форма оптических изображений звезд на плоскости матрицы, интегральная яркость каждого объекта и шумовая составляющая сигнала пикселя матрицы. В качестве формы изображения звезды на матрице была выбрана модель двумерного нормального распределения по Гауссу. В данном случае гауссова функция отражает идеализированный пример проецирования оптического изображения звезды на матрицу прибора. Следующим этапом стала разработка изображений звезд с учетом модели реальной оптической системы.

Все изображения звезд отличаются интегральной яркостью и количеством пикселей, поэтому возникла необходимость оценки размера звезды на матрице. В данной работе за этот параметр принято стандартное отклонение гауссова распределения σ , измеряемое в долях пикселя. С его помощью можно оценить как нормальное распределение, так и другие формы изображений звезд. На реальном кадре интегральная яркость и количество пикселей в изображениях звезд могут значительно отличаться, однако при этом параметр σ изменяется в относительно малом диапазоне значений. Например, на *рис. 3* показано распределение значений параметра σ по кадру звездного неба, полученному прибором БОКЗ-ВТ.

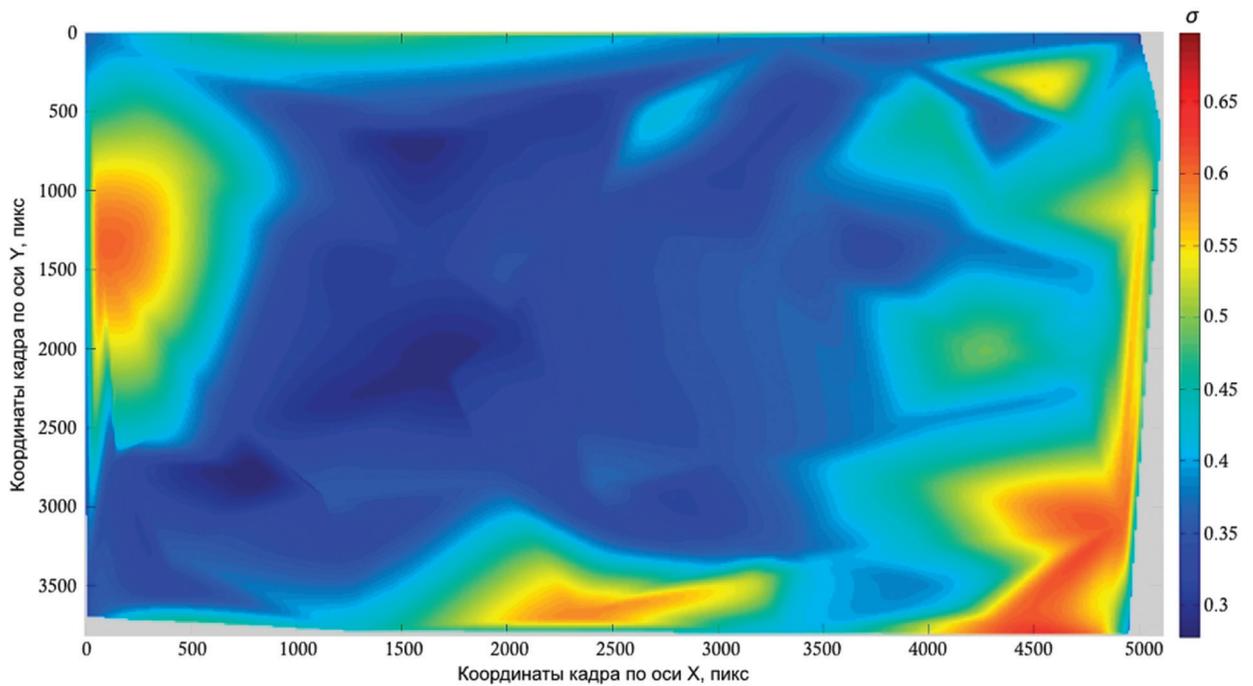


Рис. 3. Распределение значений σ по кадру звездного неба, полученному БОКЗ-ВТ

Из рисунка видно, что в центральной области кадра располагаются объекты со значением параметра $\sigma \approx 0,35$, в то время как самые большие отклонения параметра σ достигают 0,6 и находятся на краях, что объясняется влиянием аберраций.

Как сказано ранее, одним из исследуемых параметров является интегральная яркость. В качестве исследуемого диапазона яркостей изображений звезд выбран интервал, включающий в себя основные значения, полученные в результате сканирования бортового каталога прибора БОКЗ-ВТ. Зависимость количества звезд каталога от интегральной яркости при штатной работе прибора показала, что основная доля звезд приходится на 200–10000 градаций АЦП, что и взято за основу расчета (*рис. 4*). Для отдельных расчетов в качестве типичной выбирается интегральная яркость в 1000 градаций АЦП.

При моделировании также учитывается накладываемая шумовая составляющая. Шум в пикселях матрицы имеет различную природу: структурный шум возникает из-за неравномерности чувствительности матрицы прибора, фотонный шум зависит от принимаемого

сигнала. Проведенные исследования шумовых характеристик фотоприемной матрицы прибора БОКЗ-ВТ (КМОП-матрица CMV20000) показали, что матрица имеет случайный шум, близкий к фотонному, и постоянный структурный шум, растущий в зависимости от яркости в пикселе (рис. 5). Сумму фотонного и структурного шума в исследовании назовем «приборным шумом».

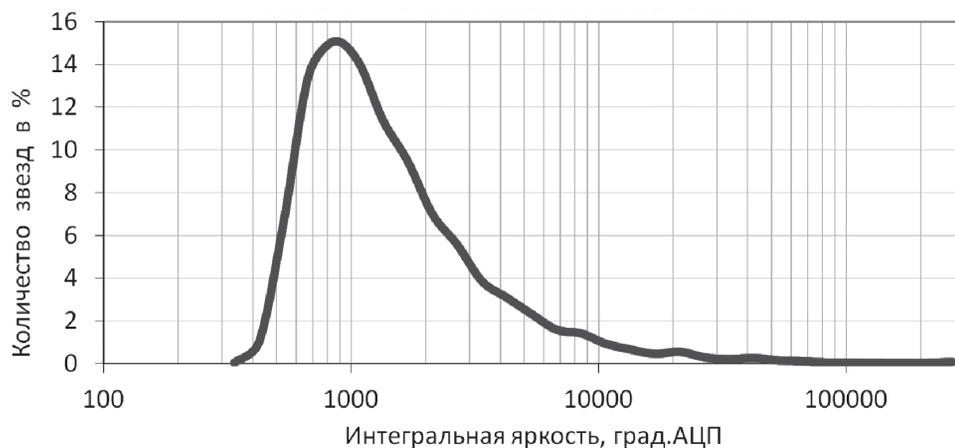


Рис. 4. Распределение звезд бортового каталога прибора БОКЗ-ВТ по интегральной яркости

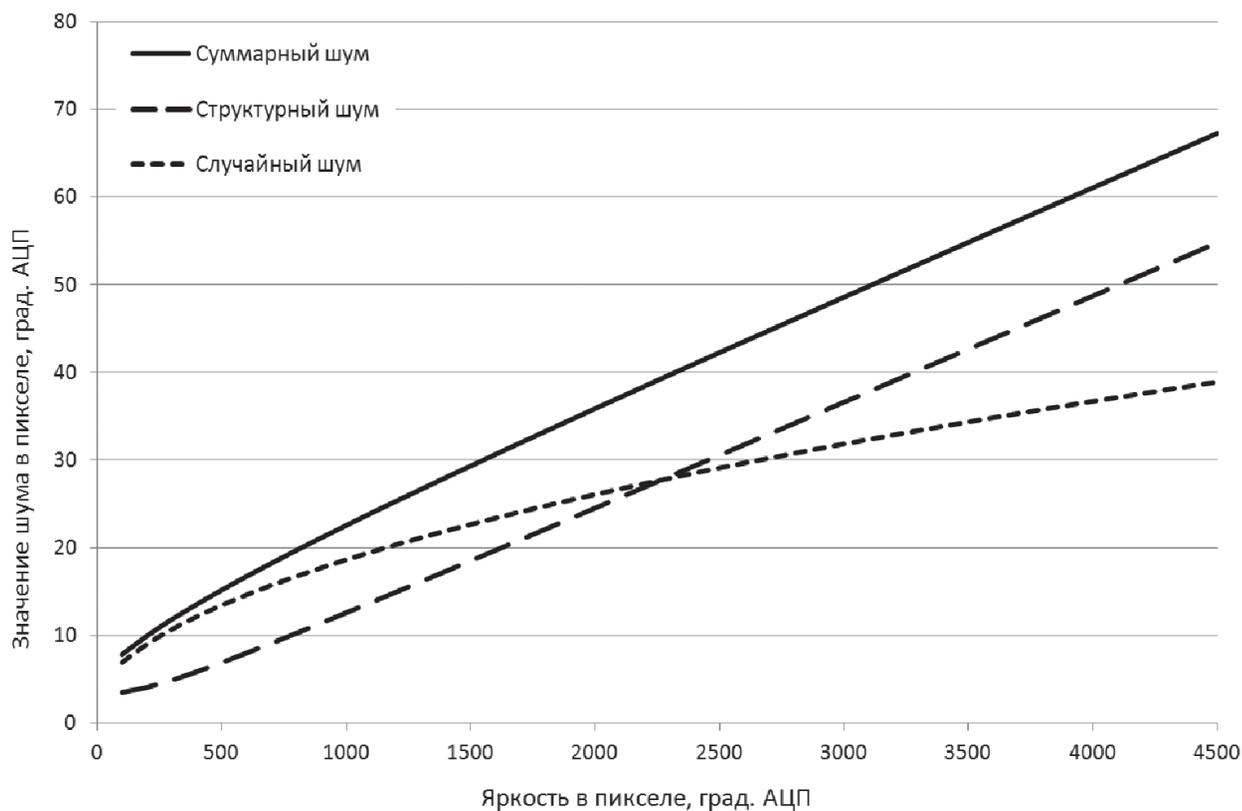


Рис. 5. Шум в пикселях КМОП-матрицы CMV20000 в зависимости от яркости

Результаты исследования

В процессе исследования ставится задача выявления погрешности определения центров изображений звезд. Моделирование изображений в этом случае дает ряд преимуществ, т. к. заранее известны определяемые параметры: интегральная яркость объектов, координаты и параметр размера (σ) изображения звезды. При определении этих значений рассчитывается погрешность их оценки, однако наиболее важным параметром остаются координаты объектов, поэтому для них рассчитывается среднеквадратическое отклонение от истинных значений. Таким образом, проводится анализ влияния различных характеристик изображения на результат определения ориентации. Также в процессе исследования на изображения накладываются шумы различного рода, описанные ранее (рис. 5), что дает наиболее полное представление о результатах определения центров изображений звезд.

Идеализированная модель

В идеализированном случае изображения звезд моделировались на основе нормального распределения по Гауссу. График, отражающий зависимость СКО ошибок определения координат центров изображений звезд от параметра σ при единой интегральной яркости – 1000 градаций АЦП, представлен на рис. 6.

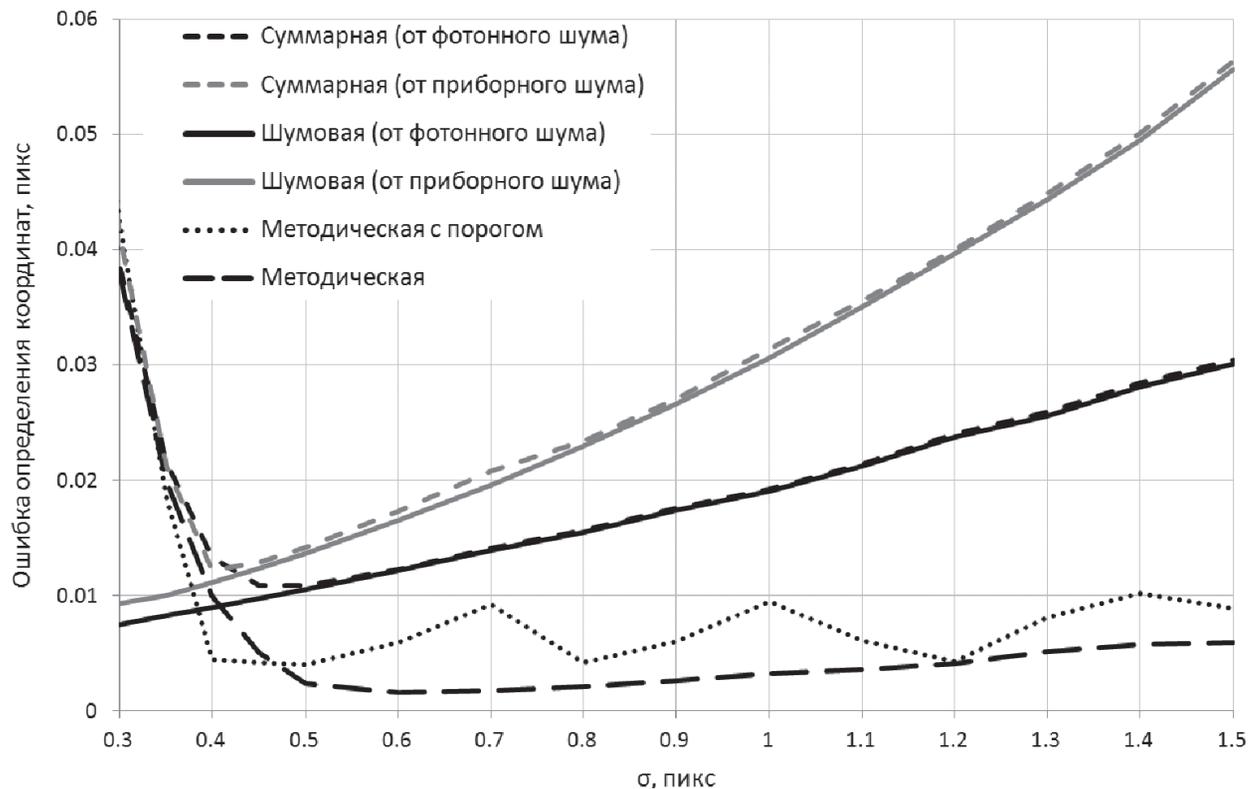


Рис. 6. Ошибка определения координат, интегральная яркость – 1000 град. АЦП, режим эксплуатации – воздух

Методическая ошибка на данном графике составляет меньше 0,01 пикселя при $\sigma > 0,4$ и при учете отсекаемого порога проявляется неравномерно в зависимости от параметра σ . При меньших значениях σ методическая ошибка резко возрастает, что объясняется тем, что изображение звезды в этом случае представляет собой остросфокусированный объект. При $\sigma > 0,5$ влияние методической ошибки становится несущественным. Графики для фотонного и приборного шумов показывают, что оптимальное значение параметра σ находится в интервале 0,4–0,5.

Анализ зависимости от интегральной яркости показал, что суммарная ошибка, начиная с 1000 градаций АЦП, меняется слабо, т. к. яркие объекты несут в себе достаточное количество информации для определения их центров. Например, при $\sigma = 0,5$ ошибка определения координат центров не превышает 0,01 пикселя, начиная с 2000 градаций АЦП.

Модель реального объектива

Формы изображений звезд на реальных кадрах отличаются от нормального распределения по Гауссу, т. к. на них влияет функция рассеяния точки оптической системы и воздействие различных факторов, из которых в данном исследовании отметим режимы эксплуатации прибора (в воздухе, в вакууме). Данные особенности возможно учесть благодаря модели реальной оптической системы, поэтому следующий расчет проведен для смоделированных объектов с учетом характеристик реального объектива.

Точная модель реального объектива прибора БОКЗ-ВТ разрабатывалась в среде проектирования оптических систем Zemax. Благодаря заполнению межлинзового пространства воздухом или вакуумом учтено два режима эксплуатации прибора. На формы изображений звезд влияет положение чувствительной матрицы относительно фокальной плоскости, поэтому модель по реальному объективу создавалась условным перемещением плоскости матрицы относительно фокальной от -200 до $+100$ мкм.

График, отражающий зависимость СКО ошибок локализации звезд от фокусировки, представлен на *рис. 7* при интегральной яркости 1000 градаций АЦП.

Рядом с фокальной плоскостью (расфокусировка – 0 мкм) шумовая составляющая ошибки координат доходит до 0,01 пикселя, а преобладающее влияние на суммарную ошибку 0,1 пикселя оказывает методическая ошибка. При этом максимальная ошибка достигается при смещении от фокальной плоскости на $+10$ мкм, а минимальная при смещении на -50 мкм (*рис. 7*).

В результате моделирования показано, что воздействия температуры и спектрального класса на результат не являются критичными, а наиболее существенные изменения вносит режим эксплуатации в воздухе и в вакууме: переход из воздуха в вакуум эквивалентен перемещению плоскости матрицы на 100 мкм (*рис. 8*).

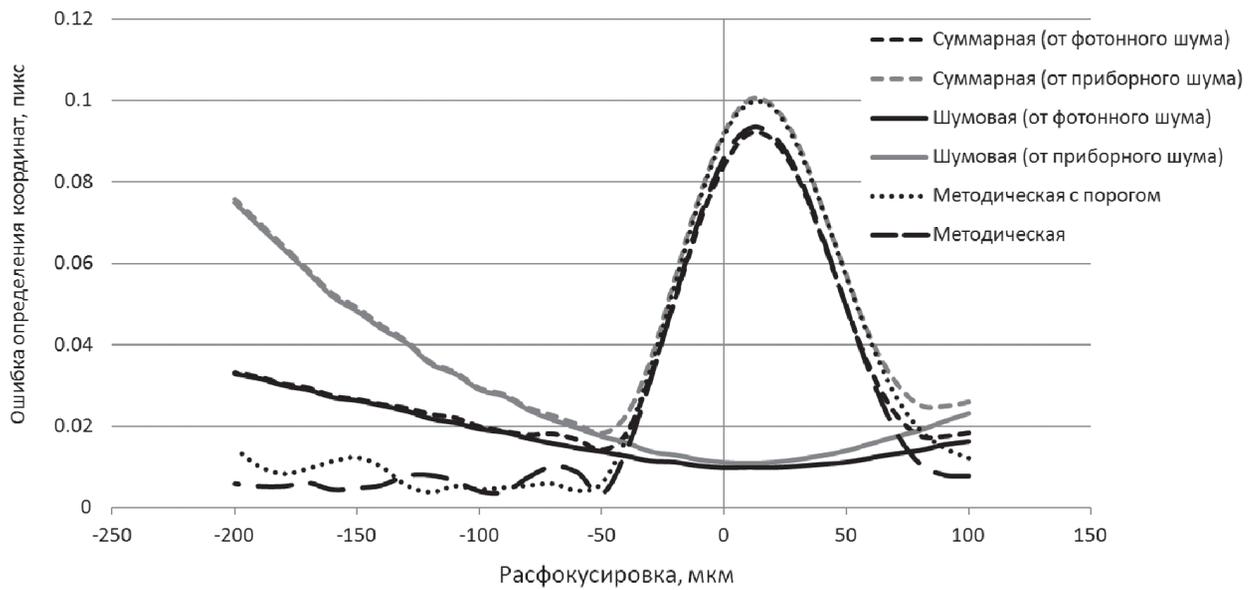


Рис. 7. Ошибка определения координат для модели с учетом влияния характеристик объектива

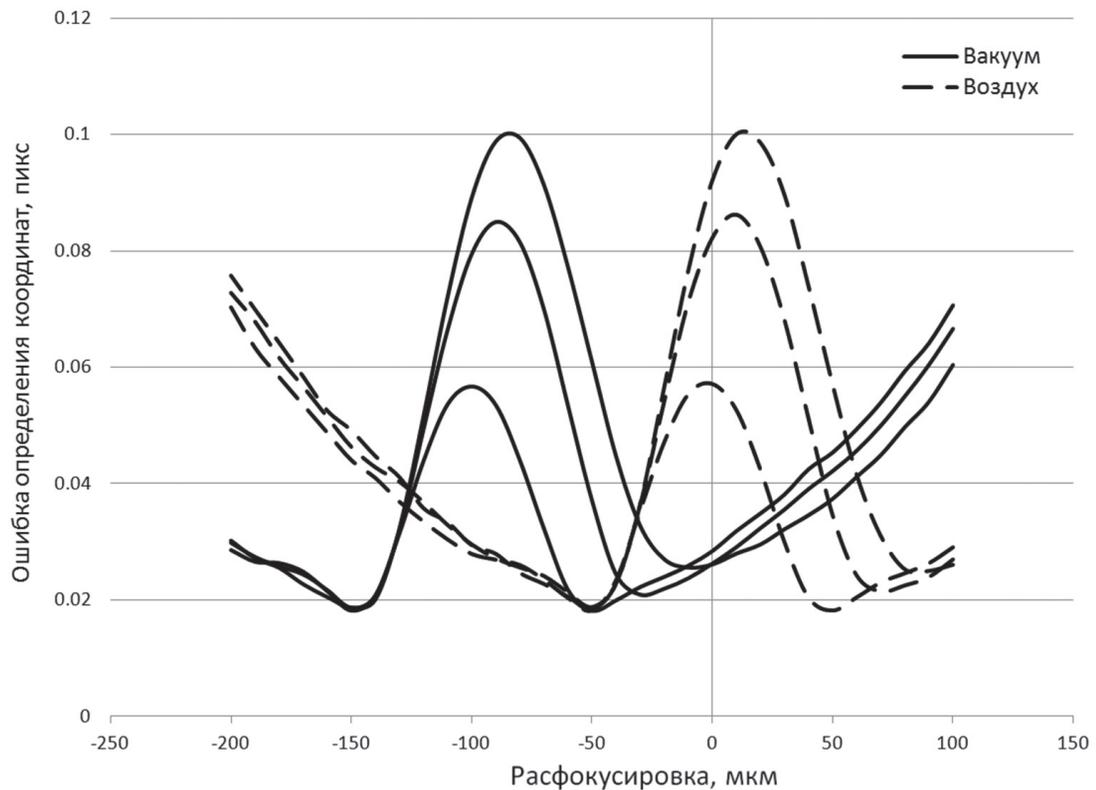


Рис. 8. Ошибка определения координат для модели с учетом влияния характеристик реального объектива при двух режимах эксплуатации: воздух, вакуум. В каждом режиме представлено 3 положения на матрице, сверху вниз: центр, край, угол

Сравнение с экспериментом

Эксперимент проводился на стенде имитации одной звезды, представляющем собой место для установки прибора, коллиматор и источник света – лампу или лазер, имитирующие

свечение одной звезды. В процессе испытания прибор совершал съемку такого объекта при различных экспозициях и при варьируемой фокусировке коллиматора.

Была выбрана оптическая система, аналогичная использованной в модели реального объектива. На имитаторе одной звезды перефокусировка коллиматора эквивалентна перемещению матрицы в приборе относительно фокальной плоскости. Таким образом, при нескольких фокусировках и различных экспозициях на стенде отсняты серии кадров.

На рис. 9 представлен график СКО ошибок определения координат центров для 10 различных значений расфокусировки в зависимости от интегральной яркости. При определенных значениях расфокусировки в эксперименте удалось достичь значения ошибки до 0,01 пикселя для шумовой составляющей, начиная с 1000 градаций АЦП, что является положительным результатом. Если представить на том же графике результаты по модели из предыдущего опыта при смещении от фокальной плоскости на -50 и $+10$ мкм, когда достигаются наименьшие и наибольшие значения ошибки, то результаты опыта будут находиться внутри теоретически определенных границ, что подтверждает хорошую корреляцию модели с экспериментом.

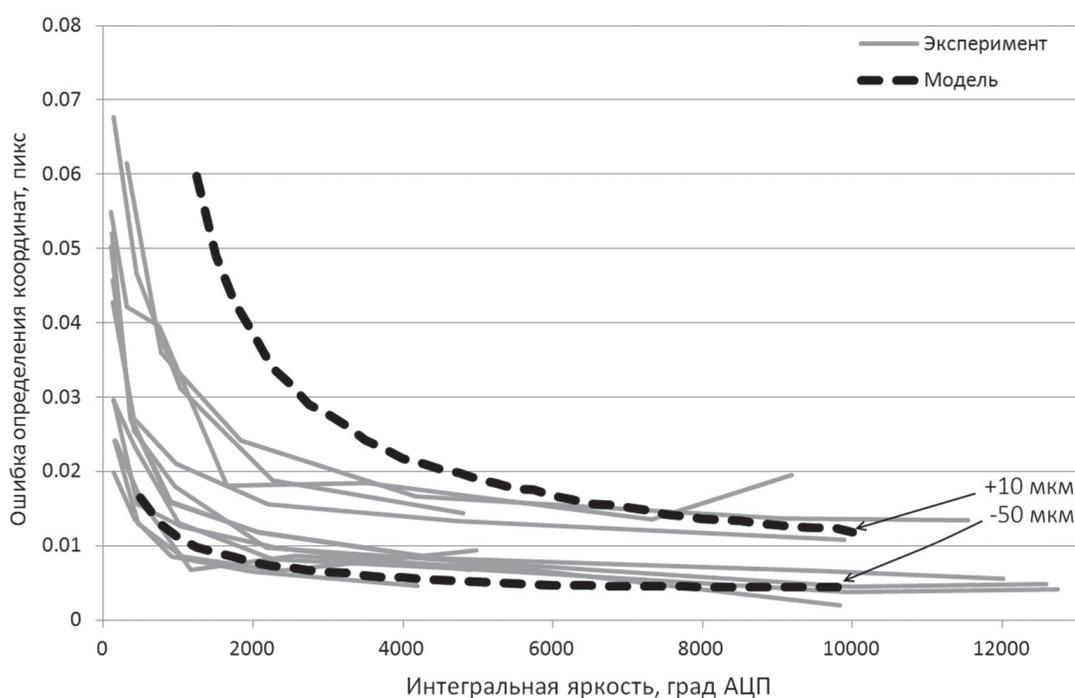


Рис. 9. Ошибка определения координат для разных расфокусировок в зависимости от интегральной яркости (шумовая составляющая). Результаты эксперимента и модели с учетом влияния характеристик объектива

Заключение

Ошибка определения координат центров звезд сводится к минимуму при оптимальных значениях параметра σ и интегральной яркости. Значение интегральной яркости изо-

бражения звезды должно начинаться от 1000 градаций АЦП. В свою очередь, оптимальные значения параметра σ находятся в пределах 0,4–0,5. В этом случае показано, что шумовая составляющая ошибки может достигать порядка 0,01 пикселя (при интегральной яркости не менее 1000 градаций АЦП), что является положительным результатом для минимизации погрешности определения координат. Кроме того, разработанная модель реальной оптической системы и проведенный эксперимент обладают высокой степенью корреляции, что дает возможность исследовать и другие приборы подобным методом.

Classification and analysis of errors in estimating coordinates of objects in images of starry sky

M.L. Belichenko¹, R.V. Bessonov¹, D.S. Zavgorodniy², I.D. Elyashev¹, S.A. Prokhorova¹

¹Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: besson777@gmail.com

²LOMO JSC, St. Petersburg 194044, Russia

The study of errors in determining coordinates of energy centers of star image on the star tracker's photoreceiver is presented. The total error consists of methodical and noise components, which are identified within the research process. Methodological error appears regardless of the noise superimposed on the image, but its contribution can be minimized if there are optimal focusing parameters. Thus, in addition to classifying this determination errors, it is necessary to determine the optimal parameters of the star tracker focusing. An important step in solving this task was the simulation of objects images. An ideal case was considered - Gaussian distribution and a model taking into account the impact of the lens real characteristics. A number of factors affecting the image, such as stars' spectral class, the temperature or tracker operation conditions were also analyzed. The final stage of the study was the comparison of the model with experimental data. One of the simulated experiments for the same optical system as in the model was reproduced at one star imitator. This made it possible to compare the results and to assess the high degree of model and experiment correlation.

Keywords: orientation, frames, pixels, noise, photoreceiver, star trackers, star sensors, methodical error, errors, subpixel accuracy

Accepted: 14.03.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-67-77