Исследование и компенсация методической погрешности измерения координат звёзд датчиков ориентации при лётной эксплуатации

Г. А. Аванесов, Р. В. Бессонов, Е. В. Белинская, Н. Н. Брысин,
С. В. Воронков, А. Н. Куркина, П. С. Сметанин

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: kurkinaan@mail.ru*

В статье представлены результаты исследования одной из составляющих погрешности измерения координат энергетических центров звёзд, зарегистрированных на ПЗС-матрицах датчиков ориентации. Основной материал для исследований накоплен в процессе функционирования звёздных датчиков семейства БОКЗ (блок определения координат звёзд) на космических аппаратах, находящихся на околоземной орбите. Получена систематическая зависимость ошибки определения местоположения звезды от дробной части координат звезды на изображении, которая подчиняется гармоническому закону и носит название методической погрешности. Этот вид погрешности обусловлен вычислением энергетического центра объекта по методу среднего взвешенного, а также неоднородностью структуры элементов ПЗС-матрицы. Предложены два способа её определения: один из них основан на длительном наблюдении ошибки измерения местоположения одиночной звезды, другой — на оценке распределения координат звёзд по полю пикселя. Продемонстрирована возможность эффективной компенсации методической погрешности на примере нескольких звёздных датчиков семейства БОКЗ. Подробно рассмотрена одна из причин возникновения методической ошибки, связанная с неоднородностью ячеек ПЗС-матриц, которые используются в приборах семейства БОКЗ. Оценка неравномерности чувствительности элемента ПЗС-матрицы, основанная на наблюдениях за изменением интегральной яркости звёзд при их перемещении по изображению, подтверждает неоднородность структуры ячеек по одной из осей.

Ключевые слова: приборы звёздной ориентации, погрешности ориентации, методическая погрешность, ПЗС-матрица, неравномерная чувствительность пикселя

Одобрена к печати: 24.01.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-68-79

Введение

В последние годы существенно возросли объёмы информации, передаваемой на землю с борта космических аппаратов (КА). Эта тенденция затронула и датчики звёздной ориентации разработки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), установленные на различных спутниках дистанционного зондирования Земли из космоса. В 2016 г. был поставлен эксперимент по сбору промежуточных результатов работы звёздных датчиков в процессе их штатной работы в составе системы управления движением КА «Ресурс-П» № 3. В рамках этого эксперимента в течение нескольких месяцев были получены многочисленные измерения координат звёзд, зафиксированных на ПЗС-матрицах (прибор с зарядовой связью) четырёх приборов серии БОКЗ-М60 (блок определения координат звёзд). Полученные данные позволили уточнить параметры оптической системы звёздных датчиков и в 1,5–2 раза снизить случайную составляющую погрешности определения ориентации на этапе наземной обработки информации при проведении геопривязки изображений, полученных целевой аппаратурой. Технология лётной калибровки показала высокую эффективность и впоследствии стала применяться на большинстве космических аппаратов, на которых используется информация с приборов серии БОКЗ (Аванесов и др., 2018).

Поступающая с борта КА телеметрия значительно расширяет и дополняет возможности традиционных методов исследований, основанных на стендовых испытаниях и натурной съёмке звёзд небесной сферы с земли. Получаемые при этом результаты используются в даль-

нейшем для уточнения математических моделей приборов и совершенствования бортовых алгоритмов обработки данных.

В рамках данной работы на основе телеметрической информации с приборов серии БОКЗ было проведено детальное исследование методической погрешности измерения координат звёзд на изображении, возникающей вследствие пространственной и амплитудной дискретизации изображения, а также неоднородности элементов ПЗС-матрицы, и показана возможность её компенсации.

Наблюдение методической погрешности

Термин «методическая погрешность» используется для обозначения одной из составляющих ошибки измерения координат звёзд, которая вызвана особенностями способа вычисления их энергетических центров. В звёздных датчиках ориентации серии БОКЗ для определения координат центра объекта (X_C , Y_C) используется центроидный метод, или метод «среднего взвешенного»:

$$X_C = \frac{\sum_{i=1}^N V_i X_i}{\sum_{i=1}^N V_i}, \quad (1)$$

$$Y_C = \frac{\sum_{i=1}^N V_i Y_i}{\sum_{i=1}^N V_i}, \quad (2)$$

где N — число пикселей в объекте; V_i — яркость i -го пикселя в объекте; X_i — координата пикселя по оси OX (по столбцам ПЗС-матрицы); Y_i — координата пикселя по оси OY (по строкам ПЗС-матрицы).

Поскольку звёзды представляют собой бесконечно удалённые источники светового излучения, то форма их изображения на фотоприёмном устройстве определяется функцией рассеяния точки, являющейся характеристикой объектива, а также параметрами фотоприёмного устройства. Таким образом, источниками возникновения методической погрешности являются дискретизация функции рассеяния точки при проектировании светового сигнала от звезды на пиксельную структуру фотоприёмной матрицы и аналого-цифровом преобразовании яркости каждого пикселя в сочетании с математическим алгоритмом определения энергетического центра яркости объекта.

Наблюдения методической ошибки неоднократно проводились разработчиками звёздных датчиков в лабораторных условиях, а также при помощи компьютерного моделирования (Аванесов и др., 2009; Беличенко и др., 2017; Бессонов и др., 2018; Немальцына, Шекин, 2019). Исследования показывают, что величина методической погрешности зависит от многих факторов, в том числе от качества фокусировки оптической системы, интегральной яркости объекта, выбранного порога отсечки шумового сигнала, и довольно трудно поддаётся компенсации. Её амплитуда, как правило, составляет несколько сотых долей пикселя, а при острой фокусировке может достигать и десятых долей. С учётом того, что угловой размер пикселя ПЗС-матрицы в приборах серии БОКЗ составляет 55 угл.с, методическая погрешность определения направления на отдельно взятую звезду измеряется в угловых секундах. Таким образом, компенсация методической погрешности приборов звёздной ориентации по-прежнему остаётся актуальной задачей.

Наглядное проявление методической погрешности продемонстрировано по данным с одного из приборов серии БОКЗ, который установлен на космическом аппарате таким образом, что изображение звезды на ПЗС-матрице при орбитальном движении перемещается практически строго вдоль столбцов.

Рис. 1. Координаты энергетического центра звезды 4,4 G5, зарегистрированной на ПЗС-матрице прибора БОКЗ при орбитальном движении (линией показана расчётная траектория)

На рис. 1 приведён график перемещения звезды 4,4 G5, полученный по ~800 последовательным измерениям её координат. При угловой скорости движения аппарата 4 угл. мин/с за один измерительный такт (250 мс) центр изображения звезды смещается в среднем на 1,02 пикселя по вертикали и на 0,007 пикселя по горизонтали. Синусоидальный характер изменения координат, который при подобной траектории звезды виден невооружённым глазом, как будет показано дальше, вызван методической погрешностью.

Поскольку движение космического аппарата в данном примере является плавным на достаточно длительном интервале времени, то аппроксимацией изменений координат одной звезды от времени можно оценить траекторию её перемещения (показана линией на рис. 1) и выделить составляющую ошибки определения координат, обусловленную методической погрешностью. На рис. 2 приведена разность между измеренным местоположением изображения звезды на ПЗС-матрице по осям OX и OY и её расчётной траекторией в зависимости от координат по одноимённым осям.

Рис. 2. Зависимость ошибки местоположения изображения звезды 4,4 G5 на ПЗС-матрице от координат её энергетического центра

Периоду ошибки измерения координаты по оси OX соответствует смещение центра звезды на 1 пиксель, а периоду ошибки координаты по оси OY — смещение центра звезды на 45 пикселей, при котором происходит последовательное изменение дробной части координаты на 1 пиксель. По данным *рис. 2* можно сделать вывод, что существует периодическая зависимость ошибки измерения местоположения объекта от дробной части координат его энергетического центра. Разность между измеренными координатами изображения звезды и расчетной траекторией в зависимости от дробной части координат её энергетического центра приведена на *рис. 3*.

Рис. 3. Зависимость ошибки местоположения изображения звезды 4,4 G5 на ПЗС-матрице от дробной части координат её энергетического центра

На графиках явно видна гармоническая зависимость ошибки измерения местоположения центра звезды от дробной части координат в пикселях, что хорошо согласуется с результатами предыдущих исследований (Аванесов и др., 2009; Беличенко и др., 2017; Бессонов и др., 2018; Немальцына, Щекин, 2019) и позволяет говорить о возможности качественного наблюдения и компенсации методической погрешности в процессе лётной эксплуатации звёздных датчиков серии БОКЗ.

Компенсация методической погрешности

Один из возможных способов компенсации методической ошибки основан на наблюдениях траектории перемещения изображения отдельно взятой звезды по плоскости ПЗС-матрицы. Аппроксимируя полученные выше оценки ошибок измерения положения звезды гармоническими функциями, можно построить зависимость методической погрешности от дробной части координат их энергетического центра (показана линией на *рис. 3*). Данный способ оценки методической погрешности является довольно наглядным, для его применения достаточно от 500 до 1000 измерений координат одной звезды. Однако серьёзный недостаток этого метода заключается в необходимости выбора длительных участков равномерного углового движения аппарата, позволяющих проанализировать постепенное изменение координат изображения звезды. Некоторые приборы серии БОКЗ установлены на космических аппаратах, которые основное время функционируют в режиме поддержания заданной ориентации относительно Солнца, периодически совершая кратковременные вращения. В этом случае при наблюдении изображения отдельно взятой звезды координаты её энергетического центра на одних участках изменяются незначительно, а на других — слишком быстро и непродолжительно, поэтому не набирается необходимый для оценки объём информации и применение данного метода компенсации методической погрешности становится невозможным.

В процессе штатной работы звёздного датчика в составе бортовой системы управления ориентацией за сутки накапливается до $\sim 3,5$ млн измерений координат звёзд. На основании анализа обширной выборки, полученной в процессе лётной эксплуатации приборов серии БОКЗ, был предложен более эффективный способ определения методической ошибки, основанный на оценке равномерности распределения координат объектов по площади пикселя. На *рис. 4а* нанесены значения дробной части координат энергетических центров 150 тыс. звёзд, на *рис. 4б, в* — гистограммы распределения дробной части их координат по осям OX и OY соответственно, построенные с шагом 0,01 пикселя.

Рис. 4. Распределение исходных измерений координат звёзд: *а* — распределение координат по полю пикселя; *б, в* — гистограммы распределения координат по осям OX и OY соответственно

В идеальном случае при наличии достаточно большой статистики распределение координат по пикселю должно быть равномерным. Однако данные, представленные на *рис. 4*, свидетельствуют об обратном: в центре пикселя наблюдается более плотное скопление измерений, а ближе к краям — более разреженное. Полученная картина свидетельствует о наличии систематического смещения координат объектов в зависимости от местоположения энергетического центра объекта относительно элемента изображения, т.е. является ещё одной иллюстрацией проявления методической погрешности.

То, что функции методической погрешности элемента изображения однозначно связаны с гистограммами распределения координат объектов, можно показать следующими соотношениями:

$$E_X(\Delta X) = \int S_X(\Delta X) d\Delta X, \quad (3)$$

$$E_Y(\Delta Y) = \int S_Y(\Delta Y) d\Delta Y, \quad (4)$$

где $\Delta X, \Delta Y$ — дробные части измерений координат по осям OX и OY элемента ПЗС-матрицы; $S_X(\Delta X), S_Y(\Delta Y)$ — нормированные гистограммы распределения энергетических центров по осям OX и OY ; $E_X(\Delta X), E_Y(\Delta Y)$ — функции методической ошибки по осям OX и OY . Вывод соотношений основан на том, что в идеальном случае (при равномерном распределении координат объектов) и при наличии методической погрешности общее количество звёзд на гистограммах должно совпадать.

Предлагаемый метод компенсации методической ошибки на основе неравномерности распределения измерений координат выполняется по следующему алгоритму:

- 1) построение гистограмм распределения исходных координат объектов по полю пикселя;
- 2) нормирование гистограмм распределения;
- 3) аппроксимирование нормированных гистограмм гармоническими функциями вида:

$$S_X(\Delta X) = A_{X_1} \sin(2\pi\Delta X + \varphi_{X_1}) + A_{X_2} \sin(4\pi\Delta X + \varphi_{X_2}) + C_X,$$

$$S_Y(\Delta Y) = A_{Y_1} \sin(2\pi\Delta Y + \varphi_{Y_1}) + A_{Y_2} \sin(4\pi\Delta Y + \varphi_{Y_2}) + C_Y;$$

- 4) вычисление функций методической погрешности на основе соотношений (3), (4);
- 5) коррекция координат объектов с учётом функций $E_X(\Delta X), E_Y(\Delta Y)$:

$$X_{\text{кор}} = X_{\text{изм}} - E_X(\Delta X),$$

$$Y_{\text{кор}} = Y_{\text{изм}} - E_Y(\Delta Y).$$

На *рис. 5* приведены графики функций методической погрешности, рассчитанные по результатам наблюдения траектории перемещения отдельно взятой звезды и на основе анализа распределения координат объектов по полю пикселя. Видно, что результаты, полученные двумя разными способами, достаточно хорошо согласуются между собой. На *рис. 6* представлено распределение координат объектов по полю пикселя после компенсации методической погрешности. На гистограмме продемонстрировано равномерное распределение координат объектов по полю пикселя, которое свидетельствует об успешной компенсации методической погрешности.

Рис. 5. Функции методической погрешности прибора серии БОКЗ, построенные на основе наблюдения траектории звезды и анализа распределения координат по полю пикселя

Рис. 6. Распределение скорректированных измерений координат звёзд: *a* — распределение координат по полю пикселя; *б, в* — гистограммы распределения координат по осям *OX* и *OY* соответственно

Основное преимущество оценки методической погрешности на основе распределения координат объектов заключается в том, что при этом нет необходимости поиска длительного ряда наблюдений одной звезды. В связи с этим по многочисленным, но кратковременным участкам переориентаций космического аппарата, функционирующего в режиме поддержания солнечной ориентации, можно успешно выделить функцию методической погрешности и компенсировать её влияние на точность измерений.

С использованием описанного метода на основе анализа распределения координат объектов были построены функции методической погрешности для шести однотипных приборов серии БОКЗ. На основе сравнительно анализа было выявлено, что методическая погрешность является индивидуальной для каждого прибора, однако её амплитуда по оси *OY* всегда на 10–20 % больше, чем по оси *OX*. Различие функций методической ошибки по осям *OX* и *OY* вызвано неоднородной структурой чувствительного элемента ПЗС-матрицы.

Исследование неравномерной чувствительности пикселя

Ячейка ПЗС-матриц серии «Лев» и «Сфера» производства корпорации «Элар» (Санкт-Петербург), которые используются в приборах серии БОКЗ, имеет следующую структуру (рис. 7, см. с. 75): одну часть занимает зона «виртуальной фазы» (~40 % общей площади пикселя),

а другую покрывают поликремниевые электроды (~60 % общей площади пикселя). В области виртуальной фазы коэффициент пропускания в видимом диапазоне излучения составляет около 80 %, в остальной части этот показатель снижается до 30 %, что приводит к неравномерной чувствительности элемента ПЗС-матрицы.

Рис. 7. Топология ячейки ПЗС-матрицы серии «Лев» и «Сфера» (размеры указаны в микрометрах)

Неравномерную чувствительность ячейки ПЗС-матрицы можно экспериментально подтвердить, проанализировав изменение яркости изображений звёзд в процессе орбитального вращения аппарата. На рис. 8 дан график изменения интегральной яркости звезды 4,4 G5 в единицах младшего разряда (ЕМР) при перемещении центра её изображения по траектории, проходящей вдоль столбцов через всю ПЗС-матрицу разрешением 1024×1024, аналогично траектории, приведённой на рис. 1.

Рис. 8. Изменение интегральной яркости звезды 4,4 G5 в процессе орбитального движения

На графике хорошо прослеживаются две тенденции: уменьшение яркости при удалении от центра ПЗС-матрицы, обусловленное эффектом виньетирования объектива, а также гармонические колебания, амплитуда которых достигает 20 % от яркости звезды. Период гармонических колебаний интегральной яркости совпадает с периодом ошибки измерения координат по оси ОУ и составляет 45 пикселей (см. рис. 2), что обусловлено последовательным изменением дробной части координаты по оси ОУ на один пиксель.

На рис. 9 приведена зависимость яркости этой же звезды от дробной части координат по осям OX и OY после компенсирования эффекта виньетирования. По графикам отчётливо видна зависимость интегральной яркости объекта от дробной части координаты его энергетического центра по оси OY с ярко выраженным максимумом при $\Delta Y = 0,42$ пикселя, в то время как по оси OX подобная зависимость отсутствует. Это наглядно подтверждает неравномерность чувствительности элемента ПЗС-матрицы по оси OY по наблюдениям интегральной яркости одной звезды.

Рис. 9. Зависимость интегральной яркости звезды 4,4 G5 от дробной части координат её энергетического центра

Чтобы продемонстрировать это явление на основе статистической выборки, включающей измерения всех звёзд, зарегистрированных прибором в течение длительного времени, введём цветовую градацию измерений яркости объектов. Для этого обозначим как $\{I_{\min}, I_{\max}\}$ симметричный относительно среднего значения ($I_{\text{ср}}$) диапазон, в котором содержатся 90 % значений интегральной яркости наблюдаемой звезды. К примеру, на рис. 9 $I_{\min} = 2880$ EMR, $I_{\text{ср}} = 3220$ EMR, $I_{\max} = 3540$ EMR. Далее введём величину относительной яркости объекта:

$$P_I = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}.$$

На рис. 10 представлено распределение дробных частей координат всех звёзд, зарегистрированных тремя приборами БОКЗ приблизительно за 1,5 ч штатной работы в соответствии со следующей цветовой градацией: те измерения, которым соответствует относительная интегральная яркость $P_I \leq 0,25$, нанесены голубым цветом; $0,25 < P_I \leq 0,5$ — зелёным; $0,5 < P_I \leq 0,75$ — жёлтым; $P_I > 0,75$ — оранжевым.

Рис. 10. Зависимость интенсивности сигнала от дробной части координат энергетического центра звезды для трёх приборов БОКЗ

Полученные картины распределения интенсивности сигнала от звезды, зарегистрированного прибором, подтверждают неоднородность чувствительности элемента ПЗС-матрицы по оси OY . Несовпадение расположения максимального значения интегральной яркости с областью виртуальной фазы, по-видимому, вызвано тем, что площадь изображения звезды составляет не один, а несколько десятков пикселей и именно при попадании центра объекта на границу раздела областей сигнал от звезды перераспределяется таким образом, что интегральная яркость зарегистрированного объекта достигает наибольшего значения.

Заключение

В настоящее время возникла необходимость существенного повышения точностных параметров приборов звёздной ориентации. Решение этой задачи требует комплексного рассмотрения всех составляющих погрешностей измерения звёздных датчиков. Разработанные способы определения одной из составляющих погрешностей звёздных датчиков — методической ошибки — позволяют при необходимости компенсировать этот вид погрешности и тем самым повысить точность определения параметров ориентации космического аппарата. Необходимость компенсации методической ошибки определяется её вкладом в совокупную погрешность измерения ориентации и отношением её величины к другим составляющим ошибки. Для приборов серии БОКЗ с фотоприёмными элементами «Лев» и «Сфера», как правило, требуется компенсация методической погрешности, если её амплитуда превышает 0,05 пикселя или 2,5 угл. с. Представленные в работе методы определения и компенсации методической ошибки позволяют использовать их как в алгоритмах приборов, так и в наземных комплексах потоковой обработки бортовых данных.

Результаты в рамках данной работы получены на основе анализа значительного объёма телеметрической информации о координатах звёзд, передаваемой с приборов серии БОКЗ в процессе их лётной эксплуатации. Предложенные методы применимы и в условиях наземных наблюдений небесной сферы, но их реализация оказывается значительно более трудоёмкой. Для накопления достаточной статистики для каждого звёздного датчика требуется длительный период времени, что зачастую бывает затруднительно при проведении испытаний большой серии приборов, особенно с учётом нестабильности погодных условий. Кроме того, при лётной эксплуатации в безвоздушной среде многие характеристики оптической системы подвержены изменению в сравнении с наземной работой в условиях атмосферы, поэтому и величина методической ошибки, определённая при натурных испытаниях, может существенно отличаться. Полученные результаты ещё раз подтверждают актуальность работ по накоплению телеметрической информации в процессе штатной работы приборов серии БОКЗ на борту космических аппаратов для исследования характеристик звёздных датчиков в условиях вакуума и поисков методов повышения точности информации об ориентации.

Литература

1. Аванесов Г.А., Кондратьева Т.В., Никитин А.В. Исследование смещения энергетического центра изображений звезд относительно геометрического центра на ПЗС-матрице и коррекция методической ошибки // Всероссийская научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. Таруса. 22–25 сент. 2008. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 421–446.
2. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Сметанин П.С. Технология наземной обработки данных о координатах звезд в целях повышения точности геопривязки снимков Земли из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 31–38. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-31-38.
3. Беличенко М.Л., Бессонов Р.В., Завгородний Д.С., Эльяшев Я.Д., Прохорова С.А. Классификация и анализ погрешности измерения координат объектов на кадрах звездного неба // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 67–77. DOI: 10.21046/2070-7401-14-3-67-77.

4. Бессонов Р. В., Белинская Е. В., Брысин Н. Н., Воронков С. В., Прохорова С. А., Строилов Н. А., Форш А. А. Стендовое исследование погрешности определения энергетического центра яркости изображения звёзд в звёздных датчиках // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 82–89. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-82-89.
5. Немальцына В. А., Шекин А. М. Объективный метод контроля формы изображения при взаимной выставке светосильного объектива со средним угловым полем и матричного приемника излучения на примере звездного прибора точного класса 361К // 6-я Всероссийская научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. Таруса. 11–13 сент. 2018. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 213–222.

Research and compensation for the methodological error in measuring the coordinates of stars by orientation sensors during flight operation

G. A. Avanesov, R. V. Bessonov, E. V. Belinskaya, N. N. Brysin,
S. V. Voronkov, A. N. Kurkina, P. S. Smetanin

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: kurkinaan@mail.ru

The paper presents the results of a study of one of the components of the error in measuring the coordinates of the energy centers of stars recorded on CCD-matrices of orientation sensors. The main material for research was accumulated during the operation of stellar sensors of the BOKZ family on board spacecraft in near-Earth orbit. A systematic dependence of the error of determining the location of the star on the fractional part of the coordinates of the star in the image is obtained, which obeys the harmonic law and is called the methodological error. This type of error is due to the calculation of the energy center of the object using the weighted average method, as well as the heterogeneity of the structure of the elements of the CCD-matrix. Two methods for its determination are proposed: one of them is based on long-term observation of the error in measuring the location of a single star, and the other on the estimation of the distribution of the coordinates of stars over the pixel field. The possibility of effective compensation of a methodological error by the example of several stellar sensors of the BOKZ family is demonstrated. One of the causes of the methodological error related to the heterogeneity of the cells of the CCD-matrices that are used in the devices of the BOKZ family is considered in detail. An assessment of the non-uniformity of the sensitivity of the element of the CCD-matrix, based on observations of changes in the integral brightness of stars as they move through the image, confirms the heterogeneity of the cell structure along one of the axes.

Keywords: star tracker, astrometry, orientation errors, methodical error, CCD, uneven pixel sensitivity

Accepted: 24.01.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-68-79

References

1. Avanesov G. A., Kondrat'eva T. V., Nikitin A. V., Issledovanie smeshcheniya energeticheskogo tsentra izobrazhenii zvezd otnositel'no geometricheskogo tsentra na PZS-matritse i korrektsiya metodicheskoi oshibki (The study of the displacement of the energy center of the images of stars relative to the geometric center on the CCD-matrix and the correction of the methodological error), *Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy opredeleniya orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (All-Russia Scientific and Technical Conf. "Modern Problems of Determining the Orientation and Navigation of Spacecraft"), Proc., Tarusa, 22–25 Sept. 2008, Moscow: IKI RAS, 2009, pp. 421–446.
2. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Kurkina A. N., Smetanin P. S., Tekhnologiya nazemnoi obrabotki danykh o koordinatakh zvezd v tselyakh povysheniya tochnosti geopriv'yazki snimkov Zemli iz kosmosa (Technology for ground processing of data on the stars' coordinates in order to improve the accuracy

- of georeferencing Earth images from space), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 31–38, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-31-38.
3. Belichenko M. L., Bessonov R. V., Zavgorodnii D. S., Elyashev Ya. D., Prokhorova S. A., Klassifikatsiya i analiz pogreshnosti izmereniya koordinat ob"ektov na kadrakh zvezdnogo neba (Classification and analysis of errors in estimating coordinates of objects in images of starry sky), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 67–77, DOI: 10.21046/2070-7401-14-3-67-77.
 4. Bessonov R. V., Belinskaya E. V., Brysin N. N., Voronkov S. V., Prokhorova S. A., Stroilov N. A., Forsh A. A., Stendovoe issledovanie pogreshnosti opredeleniya energeticheskogo tsentra yarkosti izobrazheniya zvezd v zvezdnykh datchikakh (The test bench study of star image energy center determination error in star trackers), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 82–89, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-82-89.
 5. Nemaltsyna V. A., Shchekin A. M., Ob"ektivnyi metod kontrolya formy izobrazheniya pri vzaimnoi vystavke svetosil'nogo ob"ektiva so srednim uglovym polem i matrichnogo priemnika izlucheniya na primere zvezdnogo pribora tochnogo klassa 361K (An objective method of image shape control during mutual exposure of a fast aperture lens with an average angular field and a matrix radiation detector using the example of a stellar instrument of the exact class 361K), *6-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy opredeleniya orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (6th All-Russia Scientific and Technical Conf. "Modern Problems of Determining the Orientation and Navigation of Spacecraft"), Proc., Tarusa, 11–13 Sept. 2018, Moscow: IKI RAS, 2019, pp. 213–222.