

звезде (гидирования) необходимо получать стабильную точность до сотой доли элемента (пиксела) ПЗС-матрицы прибора.

Точность работы прибора обусловлена параметрами его оптико-электронного тракта: функцией рассеяния точки, формируемой прибором; уровнем и неравномерностью сигнала темнового тока; внешними факторами — уровнем и неравномерностью фонового сигнала, — а также математическим методом определения астроориентации.

Основной вклад в ошибку определения ориентации в приборе, наряду с шумовой составляющей и дисторсией объектива прибора, вносит микродисторсия, величина которой зависит от положения изображений звезд относительно растровой структуры ПЗС-матрицы. Здесь мы исследуем микродисторсию.

1. Метод среднего взвешенного

Исследование микродисторсии было проведено в приложении к звездному координатору — прибору БОКЗ-М. Приведем краткое описание его основных параметров.

В приборе БОКЗ-М в качестве устройства, регистрирующего изображение участка звездного неба, используется матрица «Лев-2» 512×512 элементов с размером пиксела 16×16 мкм. Угловые размеры пиксела при фокусном расстоянии объектива прибора, равном 60 мм, составляют 55 угл.с. Диаметр кругового поля зрения 8°. Относительное отверстие 1:2,5. Прибор БОКЗ-М имеет 8-разрядное АЦП. Бортовой каталог включает 8350 звезд до +7,5 звездной величины.

Алгоритм работы прибора состоит из следующих основных процедур:

- регистрация кадра и вычитание низкочастотной составляющей изображения;
- локализация изображений звезд, определение координат энергетических центров и интегральной яркости;
- распознавание звезд в бортовом каталоге прибора;
- расчет элементов ориентации осей приборной системы координат во второй экваториальной системе координат.

Среднеквадратическая ошибка определения ориентации для прибора БОКЗ-М по результатам летных испытаний во внутренней системе координат составляет: $\sigma_{x,y} = 1,5$ угл.с, $\sigma_z = 15$ угл.с.

Точность работы прибора зависит от точности определения угловых расстояний между звездами, величины которых являются функциями от координат энергетических центров изображений звезд, зарегистрированных на растровой структуре ПЗС-матрицы, и измеряются в системе координат прибора с некоторыми аддитивными ошибками.

Координаты энергетического центра изображения звезды в приборе БОКЗ-М вычисляются с субпиксельной точностью с использованием метода среднего взвешенного на этапе локализации звездных объектов [1].

При вычислении центра координат звезды по методу среднего взвешенного расчет производится по следующим формулам:

$$\begin{aligned} x &= \sum_i p_i x_i, \\ y &= \sum_i p_i y_i, \end{aligned} \quad (1)$$

где x_i и y_i — координаты i -го пиксела ПЗС-матрицы, формирующего изображение звезды; $p_i = \frac{u_i}{\sum_i u_i}$ — весовые коэффициенты, определяемые как отношение яркости в i -м пикселе к интегральной яркости изображения звезды.

В долях пиксела ПЗС-матрицы и с учетом его линейного размера имеем

$$x_{mm} = \left(\frac{\sum_i \left[\left(\sum_j U_{ij} \right) i \right]}{\sum_i \sum_j U_{ij}} - I \right) \Delta, \quad y_{mm} = \left(\frac{\sum_j \left[\left(\sum_i U_{ij} \right) j \right]}{\sum_i \sum_j U_{ij}} - J \right) \Delta, \quad (2)$$

где I и J — координаты центра ПЗС-матрицы, Δ — линейный размер пиксела ПЗС-матрицы.

Среднеквадратическое отклонение функции (1) определяется как:

$$\sigma_{\tilde{x}}^2 = \frac{\sum_i (x_i - \tilde{x})^2}{\left(\sum_i u_i\right)^2} \sigma_u^2 + \sum_i p_i^2 \sigma_x^2, \quad (3)$$

$$\sigma_{\tilde{y}}^2 = \frac{\sum_i (y_i - \tilde{y})^2}{\left(\sum_i u_i\right)^2} \sigma_u^2 + \sum_i p_i^2 \sigma_y^2.$$

Из выражений (3) следует, что точность определения энергетического центра звезды зависит от размеров пиксела ПЗС-матрицы и от отношения сигнал/шум.

Вычисление координат энергетического центра изображения звезды по методу среднего взвешенного приводит к ошибке, зависящей от положения пятна изображения на дискретной структуре раstra ПЗС-матрицы.

2. Компьютерное моделирование

Для изучения основных закономерностей изменения величины методической ошибки было проведено компьютерное моделирование, выполненное в среде MatLab.

Изображение звезды моделировалось двумерным нормальным распределением:

$$f(x, y) = k \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}}, \quad (4)$$

где μ_x и μ_y — математические ожидания; σ_x и σ_y — среднеквадратические отклонения по осям X и Y , соответственно; k — коэффициент, учитывающий интегральную яркость звезды.

На рис. 1а показано распределение яркости изображения звезды, при $\sigma = \sigma_x = \sigma_y = 0,5$. Величина σ выражена в долях элемента дискретизации. Значение $\sigma = 0,5$ соответствует расфокусировке объектива в приборе БОКЗ-М. При этом звезда

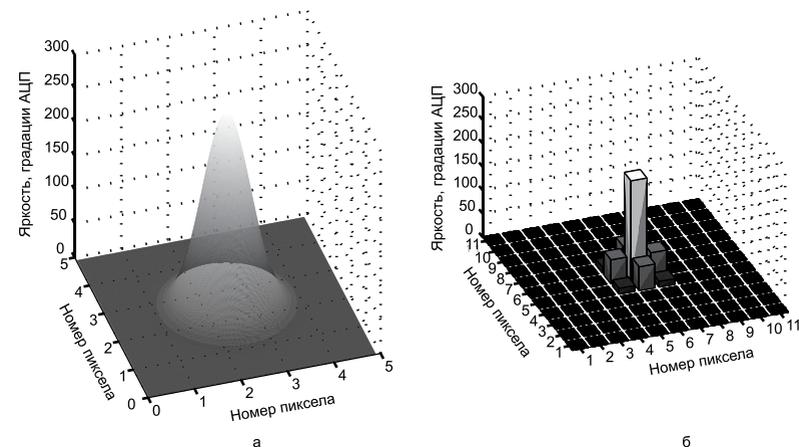


Рис. 1. Имитация изображения звезды: а — функция нормального распределения, имитирующая звезду; б — изображение имитируемой звезды на ПЗС-матрице

с интегральной яркостью 450 градаций АЦП (соответствующая пятой звездной величине) будет занимать окрестность 5×5 элементов на ПЗС-матрице (рис. 1б).

Перемещение изображения звезды осуществлялось по дискретной структуре, имитирующей фрагмент раstra ПЗС-матрицы размером 11×11 пикселей (рис. 2).

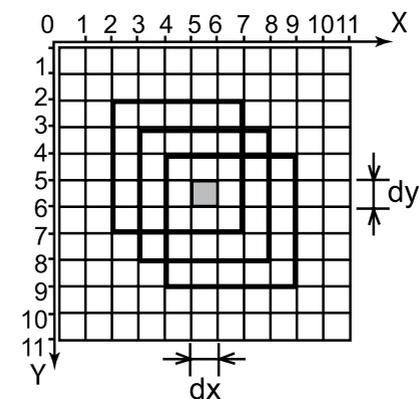


Рис. 2. Перемещение изображения звезды на ПЗС-матрице

Перемещение осуществлялось в пределах пиксела ПЗС-матрицы с шагом $dx/49$, $dy/49$ по осям X и Y , соответственно, где dx , dy — линейные размеры пиксела. Для каждого положения изображения звезды по методу среднего взвешенного с использованием выражения (2) вычислялись координаты энергетического центра изображения звезды. Методическая ошибка определялась как разность между рассчитанной и заданной координатой энергетического центра изображения звезды:

$$\begin{aligned} F(x) &= x_c - x_0, \\ F(y) &= y_c - y_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Закон изменения величины методической ошибки имеет периодический характер и в одномерном случае (рис. 3а) описывается следующей функцией:

$$F(x) \approx S_x(x) \approx \sin(2\pi f_x x), \quad (6)$$

где $f(x)$ — пространственная частота ($f_x = 1/dx$), зависящая от линейного размера пиксела ПЗС-матрицы (dx).

В точках с координатами $x = 0$, $dx/2$ и dx методическая ошибка равна нулю, а в точках $x = dx/4$ и $3dx/4$ отклонение ошибки от нуля достигает максимума.

В более точной формулировке для двумерного случая методическая ошибка описывается произведением двух функций, зависящих от координат x и y :

$$F^2(x, y) \approx S_x(x)S_y(y). \quad (7)$$

Или

$$F(x, y) = A_0 \frac{S_x(x)S_y(y)}{\sqrt{S_x(x)S_y(y)}}, \quad (8)$$

где A_0 — коэффициент, определяющий максимальное значение ошибки. Деление на квадратный корень в выражении (8) сделано для нормирования и сохранения знака функции.

Из выражения (7) видно, что величина методической ошибки зависит одновременно от двух координат (x, y). На рис. 3в показан график изменения методической ошибки при перемещении центра яркости изображения звезды в об-

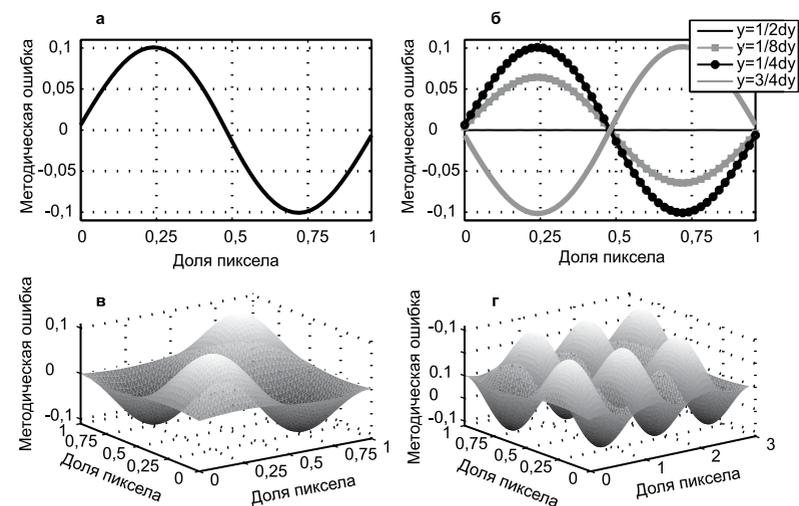


Рис. 3. Графики методической ошибки: а — в одномерном случае при смещении центра яркости изображения звезды в пределах одного пиксела; б — при перемещении центра яркости изображения звезды вдоль оси X , значение координаты Y является константой: $y = (1/8)dy$; $(1/4)dy$; $(1/2)dy$; $(3/4)dy$; в — при перемещении центра яркости изображения звезды в области 1×1 пиксел ПЗС-матрицы; г — при перемещении центра яркости изображения звезды в области 3×1 пиксел ПЗС-матрицы

ласти, равной 1 пикселу ПЗС-матрицы, на рис. 3г — в пределах 3 пикселей.

На рис. 3б приведены графики изменения методической ошибки при перемещении центра звезды вдоль оси X . При этом значение координаты Y является константой и $S_y(y)$ играет роль дополнительного амплитудного множителя для всего выражения (7); на графике (см. рис. 3б) это показано в виде изменения амплитуды синусоиды для значений $y = (1/8)dy$; $(1/4)dy$; $(1/2)dy$; $(3/4)dy$. При значении Y , равном $1/2$ пиксела, что соответствует центру пиксела, ошибка равна нулю. При Y , равном $1/4$ и $3/4$ пиксела, методическая ошибка имеет максимальное значение, при этом фаза методической ошибки меняется на противоположную, что объясняется изменением знака функции $S_y(y)$.

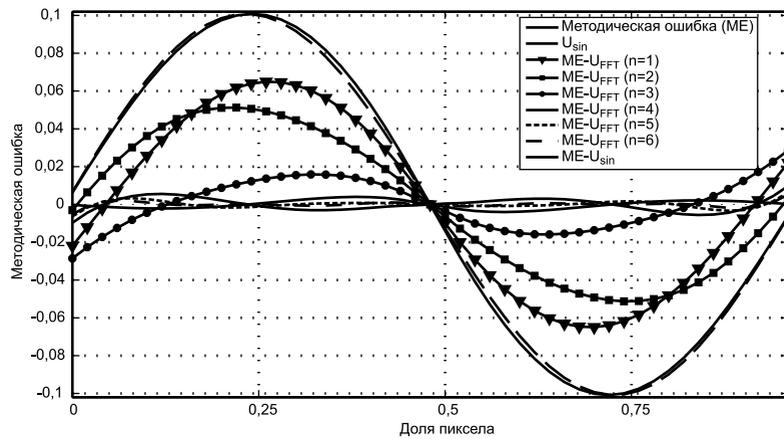


Рис. 4. Аппроксимация методической ошибки

Функция, описывающая закон изменения методической ошибки, близка к синусоидальной. На рис. 4 приведены график функции методической ошибки (МЕ) $S_x(x)$ и график функции $U_{sin}(x)$:

$$U_{sin}(x) = k \sin(2\pi f_x x). \tag{9}$$

Функции имеют одинаковую амплитуду, равную 0,1008 в долях пиксела.

Максимальное значение функции рассогласования (разности функций (МЕ) $S_x(x)$ и $U_{sin}(x)$), также представленной на рисунке, равно 0,004 в долях пиксела.

Была проведена аппроксимация функции методической ошибки рядом Фурье:

$$U_{FFT}(x) = a_0 + \sum_n a_n \sin(2\pi n f_x x + \varphi_n). \tag{10}$$

На рис.4 представлены графики функций рассогласования функции методической ошибки (МЕ) $S_x(x)$ и функции $U_{FFT}(x)$ для $n = 1, 2, \dots, 6$.

Когда функция аппроксимации учитывает шесть членов ряда Фурье ($n = 6$), максимум ошибки рассогласования составляет 0,0052 в долях пиксела.

В табл. 1 представлены результаты аппроксимации функции методической ошибки. Видно, что функция $U_{sin}(x)$ хо-

рошо аппроксимирует методическую ошибку. Максимум методической ошибки $S_x(x)$, который составляет 5,544 угл.с, может быть уменьшен до 0,22 угл.с. Среднеквадратическое отклонение (СКО) методической ошибки при этом уменьшается с 3,982 до 0,12 угл.с. Такой же результат уменьшения методической ошибки дает аппроксимация рядом Фурье при учете пяти членов ($n = 5$). (В табл. 1 эти значения выделены полужирным шрифтом.)

Таблица 1. Результаты аппроксимации функции методической ошибки

Функция	Параметр					
	максимум, доли пиксела	максимум, угл.с	максимум, мкм	СКО, доли пиксела	СКО, угл.с	СКО, мкм
методической ошибки (МЕ) $S_x(x)$	0,1008	5,5440	1,6128	0,0724	3,9820	1,1584
$U_{sin}(x)$	0,1008	5,5440	1,6128	0,0720	3,9600	1,152
рассогласования	0,0040	0,2200	0,064	0,0023	0,1265	0,0368
рассогласования $n = 1$	0,0683	3,7565	1,0928	0,0500	2,7500	0,8
рассогласования $n = 2$	0,0588	3,2340	0,9408	0,0492	2,7060	0,7872
рассогласования $n = 3$	0,0287	1,5785	0,4592	0,0180	0,9900	0,288
рассогласования $n = 4$	0,0097	0,5335	0,1552	0,0045	0,2475	0,072
рассогласования $n = 5$	0,0063	0,3465	0,1008	0,0022	0,1210	0,0352
рассогласования $n = 6$	0,0052	0,286	0,0832	0,0016	0,088	0,0256

Зависимость методической ошибки от параметров изображения звезды

Исследовалась зависимость методической ошибки от параметров нормального распределения. Величина среднеквадратического отклонения (σ) функции нормального распределения, которой моделируется изображение звезды, определяет

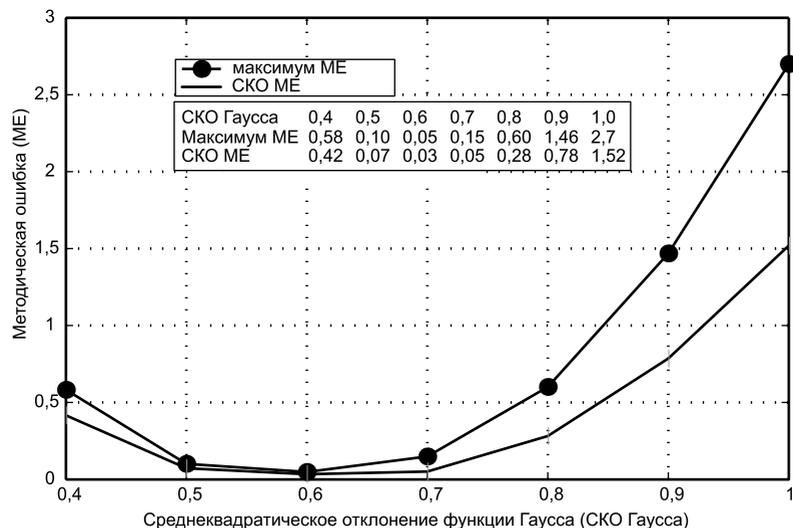


Рис. 5. Зависимость методической ошибки от параметров изображения звезды

расфокусировку объектива в приборе БОКЗ-М. На рис. 5 представлен график изменения методической ошибки в зависимости от величины σ .

Оптимальным с точки зрения минимизации ошибки является значение $\sigma = 0,6$ в долях пиксела. Максимум ошибки при этом равен 0,05 в долях пиксела (2,75 угл.с.), среднеквадратическое отклонение 0,03 (1,65 угл.с.) (табл. 2; в таблице эти значения выделены полужирным шрифтом).

Таблица 2. Изменения методической ошибки в зависимости от величины σ

Параметры методической ошибки	Параметры функции нормального распределения, СКО, доли пиксела						
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Максимум методической ошибки, доли пиксела	0,58	0,1	0,05	0,15	0,6	1,46	2,7
СКО методической ошибки, доли пиксела	0,42	0,07	0,03	0,05	0,28	0,78	1,52

Процедура обработки изображений зарегистрированных звезд обычно включает «пороговую обработку» — вычитание из общего сигнала некоторого постоянного порогового значения сигнала с целью исключения влияния шумовой составляющей (которая, как полагается, лежит ниже уровня порога) на дальнейшую обработку полезного сигнала.

В приборе БОКЗ-М нижний порог рассчитывается как некоторая постоянная составляющая яркости (зависящая от уровня общего фона, в том числе, от уровня темнового тока) плюс 3σ , где под σ понимают среднеквадратическое отклонение яркости, рассчитанное по всему кадру изображения.

Результаты исследования зависимости методической ошибки от величины порога представлены на рис. 6. Видно, что «пороговая обработка» оказывает значительное влияние на величину методической ошибки, максимум которой может превышать размер пиксела. Объясняется это тем, что «пороговая обработка» искажает изображение звезды на ПЗС-матрице, что приводит к увеличению методической ошибки.

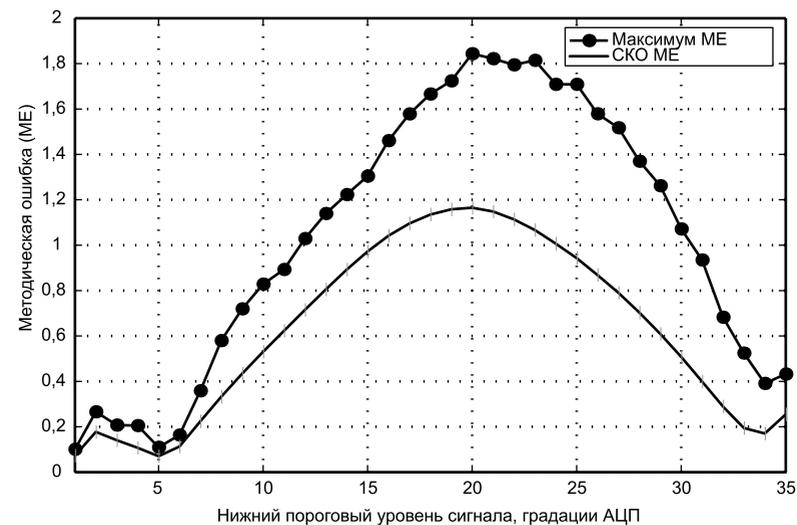


Рис. 6. Зависимость методической ошибки от нижнего порогового уровня сигнала

3. Эксперименты на стенде динамических испытаний

Эксперименты по исследованию методической ошибки были проведены на стенде динамических испытаний (СДИ), созданном в оптико-физическом отделе ИКИ РАН для проведения испытаний звездных координаторов [2]. СДИ позволяет в реальном времени имитировать орбитальное движение КА, динамику движения, воздействие внешних условий космического пространства на звездный координатор.

На рис. 7 представлен общий вид СДИ и показаны его основные части.

Светооптические условия моделируются на СДИ с помощью цифрового жидкокристаллического монитора, коллиматорного объектива, светозащиты и специального программного обеспечения.

На экран цифрового монитора с помощью специального программного обеспечения, заложенного в персональный компьютер СДИ, проецируется участок небесной сферы со звездами. Плоскость экрана цифрового монитора находится в фокальной плоскости коллиматорного объектива.

Коллиматорный объектив преобразовывает световые потоки от точечных источников («звезд»), имеющих размер пиксела цифрового монитора, в плоскопараллельные свето-

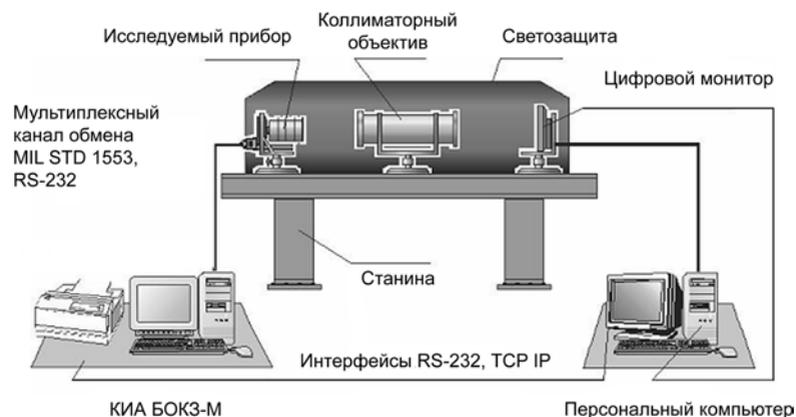


Рис. 7. Стенд динамических испытаний астронавигационных приборов

вые пучки, которые под разными углами, в зависимости от расположения звезд на экране цифрового монитора относительно оптической оси коллиматорного объектива, приходят на входной зрачок объектива прибора. Таким образом, на СДИ моделируются оптические условия, при которых звезды находятся на бесконечности от прибора.

При проведении экспериментов по исследованию методической ошибки на экран имитатора звезд выводился участок небесной сферы с центральными координатами: прямое восхождение $\alpha = 34^\circ$, склонение $\delta = 44^\circ$.

На экране имитатора СДИ звезды имели размер 2×2 пиксела. Изображения звезд регистрировались прибором БОКЗ-М в статике. Данные о звездах, взятых в обработку, приведены в табл. 3.

Угловые смещения звезд осуществлялись с шагом по $d\alpha = 2$ угл.с в диапазоне изменения α , равном трем пикселям ПЗС-матрицы (≈ 180 угл.с), и по δ путем изменения δ с шагом $d\delta = 10$ угл.с в диапазоне (60 угл.с). Таким образом, смещение изображений звезд происходило в области, равной трем пикселям ПЗС-матрицы, расположенным вдоль строки.

Сканирование вдоль столбцов осуществлялось аналогичным образом также в диапазоне, равном трем пикселям. В каждой точке экспонирование проводилось несколько раз ($6 \dots 7$ раз), и для каждой звезды рассчитывались усредненные координаты центра энергетической яркости (x, y), вычисленные по методу среднего взвешенного.

Таблица 3. Данные о звездах, взятых в обработку

№ звезды	Координата X (в элементах ПЗС-матрицы)	Координата Y (в элементах ПЗС-матрицы)	Интегральная яркость (в единицах младшего разряда АЦП)	Число пикселей, занимаемых изображением звезды
1	412,36	68,89	354	10
2	353,82	382,24	1231	10
3	296,25	244,43	331	8
4	241,99	259,34	777	9
5	233,82	46,84	484	8
6	212,90	25,12	348	9
7	175,66	112,27	498	9

Поскольку растровые структуры имитатора звезд и ПЗС-матрицы прибора были развернуты относительно друг друга, смещение происходило не строго вдоль строк или столбцов ПЗС-матрицы. На графике смещения центра изображения звезды (рис. 8) это наблюдается в виде постоянного тренда. Предварительная обработка включала аппроксимацию тренда прямой и его вычитание из величины методической ошибки. Были также вычтены постоянные значения, соответствующие начальным координатам центров звезд.

На рис. 9а представлена двумерная функция методической ошибки, вычисленная для звезды № 1 (см. табл. 3) в области 3×1 пиксела. График имеет вид, аналогичный графику (рис. 3з), приведенному выше и полученному при компьютерном моделировании. На рис. 9а видны периодические изменения величины ошибки с характерными максимумами и минимумами. На рис. 9б более детально можно видеть изменения ошибки в одномерном случае. Максимальное значение методической ошибки составляло 0,088 пиксела (1,4 мкм, или 4,84 угл.с), СКО было равно 0,017 пиксела (0,272 мкм, или 0,94 угл.с).

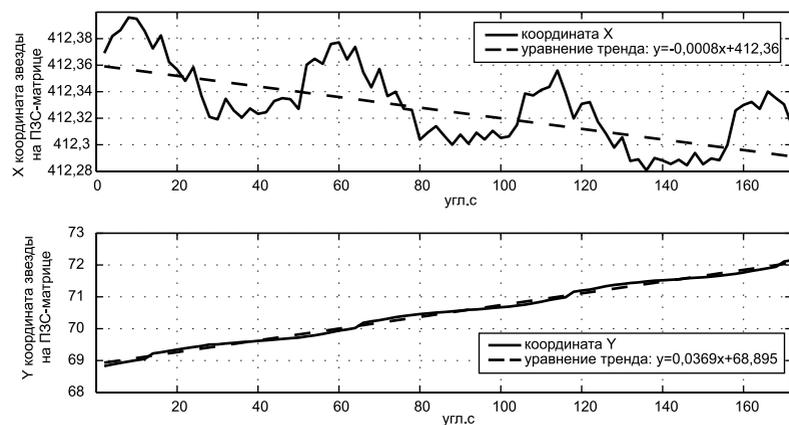


Рис. 8. Микроперемещения центра интегральной яркости звезды (с начальными координатами (412,36; 68,89)) на ПЗС-матрице по осям X и Y

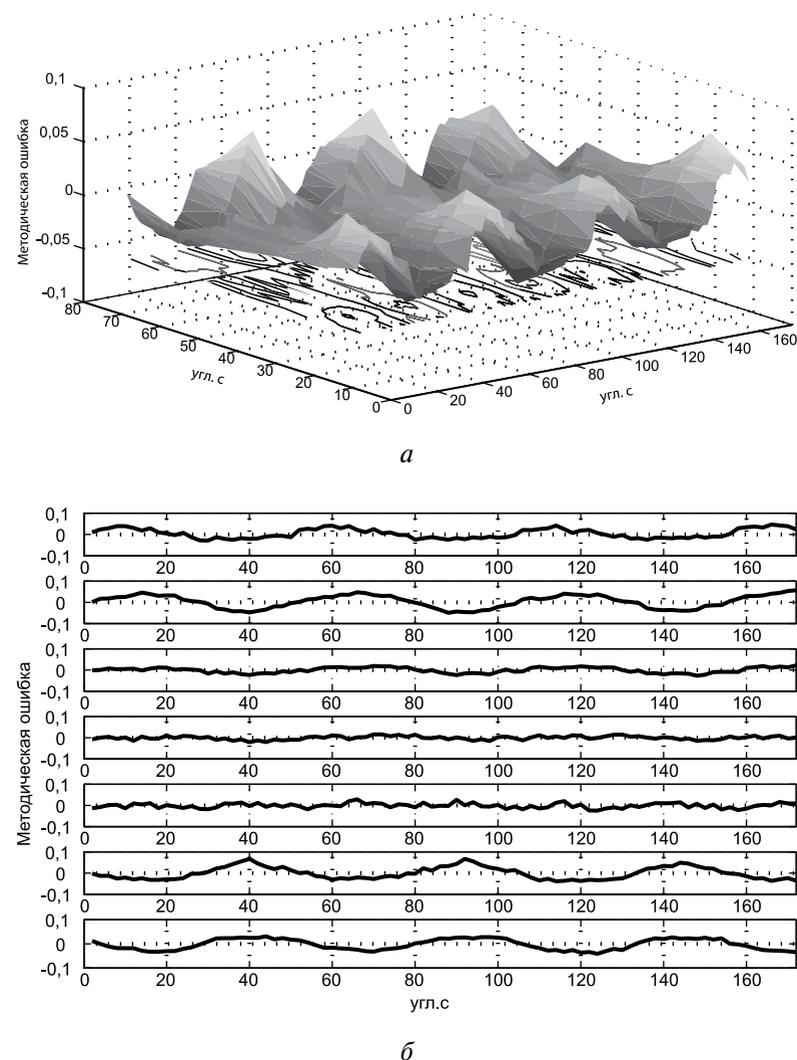


Рис. 9. Функция методической ошибки в области 3×1 пиксел ПЗС-матрицы: *a* — график двумерной функции методической ошибки; *б* — серия графиков изменения методической ошибки в диапазоне 3×1 пиксел ПЗС-матрицы

При смещениях в диапазоне 60 угл.с по δ для звезд, зарегистрированных на кадре, были рассчитаны ошибки единицы веса по координатам X и Y , суммарное среднеквадратическое отклонение ошибки единицы веса, среднеквадратические отклонения по координатам: прямое восхождение, склонение, азимут. Результаты представлены на рис. 10 и в табл. 4.

Из данных таблицы следует, что средняя среднеквадратическая ошибка по совокупности звезд зависит от методической ошибки — график среднеквадратической ошибки имеет квазисинусоидальный характер. Аппроксимация средней СКО уравнением прямой позволяет оценить выигрыш от устранения методической ошибки, который в среднем составляет 0,4 угл.с по α и δ и 6,6 угл.с — по азимуту.

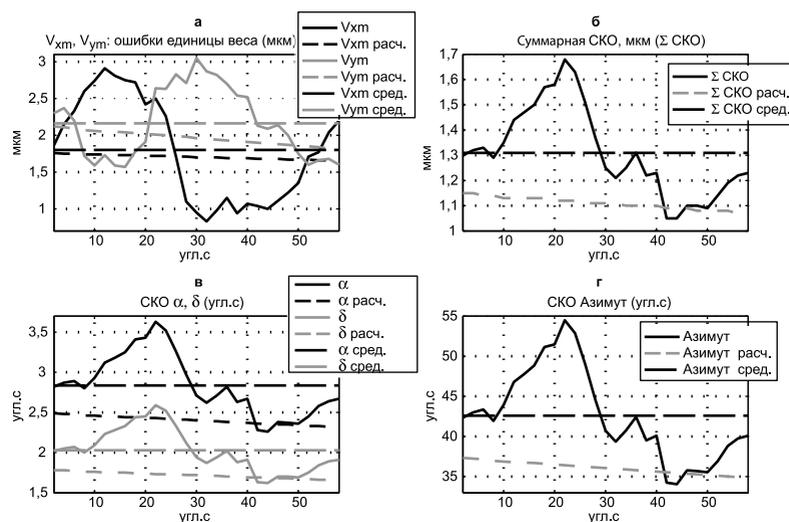


Рис. 10. Изменения методической ошибки при микроперемещениях внутри пиксела, рассчитанные для совокупности звезд: *а* — графики среднеквадратических ошибок (ошибок единицы веса) по координатам X и Y ; *б* — график суммарного среднеквадратического отклонения ошибки единицы веса; *в* — графики среднеквадратических отклонений по координатам «прямое восхождение» (α) и «склонение» (δ); *г* — график среднеквадратического отклонения по координате «азимут»

Таблица 4. Результаты коррекции методической ошибки

Параметр	Ошибка					
	ошибка единицы веса по X , мкм	ошибка единицы веса по Y , мкм	СКО ошибки единицы веса, мкм	СКО прямого восхождения, α , угл.с	СКО склонения, δ , угл.с	СКО азимута, A , угл.с
Методическая ошибка по результатам измерений	1,8 (6,2 угл.с)	2,2 (7,56 угл.с)	1,3 (4,4 угл.с)	2,84	2,1	42,6
Результаты коррекции методической ошибки	1,7 (5,8 угл.с)	1,9 (6,53 угл.с)	1,1 (3,7 угл.с)	2,4	1,7	36,0
Выигрыш от коррекции ошибки	0,1 (0,4 угл.с)	0,3 (1,03 угл.с)	0,2 (0,7 угл.с)	0,44	0,4	6,6

4. Определение параметров двумерной функции Гаусса

Альтернативным подходом к уменьшению методической ошибки является аппроксимация изображения звезды, зарегистрированного на ПЗС-матрице функцией Гаусса.

Определение параметров двумерной функции Гаусса, аппроксимирующей изображение звезды, было выполнено по следующему алгоритму.

1. Вокруг максимума изображения звезды выделялся фрагмент размером 5x5 элементов. При этом полагалось, что каждый элемент изображения является двумерным интегралом искомой функции:

$$I_{ij} = k_m \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right) dx dy, \quad (11)$$

где x_0, y_0 — координаты центра изображения звезды; k_m — масштабный коэффициент; σ_x, σ_y — среднеквадратические отклонения, ширина функции рассеяния (11) по X и Y по уровню 1/3.

2. Для каждого элемента составлялось одно уравнение связи функции Гаусса с яркостью элемента:

$$F_k = I_k - I_k^{\text{изм}} = 0, \quad (12)$$

где I_k — интегральная яркость элемента с номером k , вычисленная по формуле (11); $I_k^{\text{изм}}$ — измеренная яркость элемента с номером k ; k — номер элемента изображения звезды (от 0 до 24).

Система состояла из 25 уравнений с пятью определяемыми параметрами: $x_0, y_0, k_m, \sigma_x, \sigma_y$.

3. Данная система нелинейных уравнений была линеаризована и решалась по способу наименьших квадратов методом последовательных приближений. В результате решения за счет избыточности системы были определены ошибка аппроксимации распределения и ошибки каждого из определяемых параметров. Интерес представляют ошибки определения параметров центра искомой функции. Они, по сути, и являются точностью определения координат центра звезды по методу Гаусса:

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} V_i^2}{25-5}}, \quad (13)$$

$$\sigma_{x0} = \mu \sqrt{q_{22}}, \quad (14)$$

$$\sigma_{y0} = \mu \sqrt{q_{33}}, \quad (15)$$

где V_i — разности между значением аппроксимирующей функции и реальным распределением яркости изображения звезды в i -м элементе; q_{ii} — диагональные элементы обратной матрицы нормальных уравнений; μ — среднеквадратическая ошибка единицы веса; σ_{x0}, σ_{y0} — среднеквадратические отклонения, ширина распределения по осям X и Y по уровню 1/3.

4. Проводилась оценка точности определения параметров аппроксимации.

Применение предложенного метода аппроксимации яркости изображения звезды двумерной функцией Гаусса в алгоритме работы прибора БОКЗ-М на этапе локализации позволяет уменьшить среднеквадратическую ошибку определения направления на звезды до 0,9 мкм (3,09 угл.с). Среднеквадратическая ошибка определения направлений на звезды методом среднего взвешенного составляет 1,4 мкм (4,8 угл.с).

5. Проецировалось изображение имитатора звезды на ПЗС-матрицу прибора БОКЗ-М

Эксперименты по исследованию методической ошибки были проведены с помощью имитатора звезды. Общая схема эксперимента представлена на рис. 11. В качестве имитато-

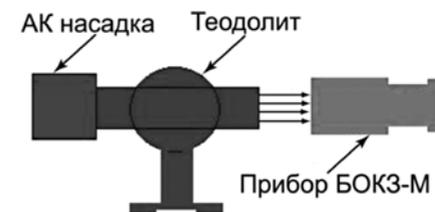


Рис. 11. Проецирование имитатора звезды на ПЗС-матрицу прибора БОКЗ-М. Схема эксперимента

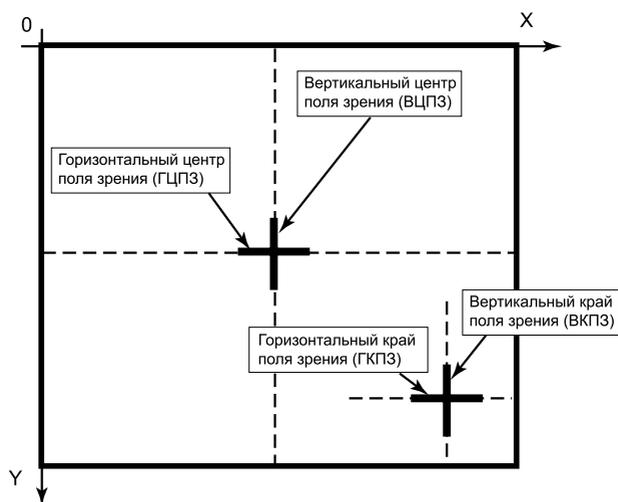


Рис. 12. Области проецирования изображения звезды на ПЗС-матрицу

ра звезды была использована автоколлимационная насадка (АК) на теодолит, с помощью которой был сформирован параллельный пучок лучей. Изображение имитатора звезды было спроецировано на ПЗС-матрицу прибора БОКЗ-М.

Изображение звезды проецировалось в двух областях ПЗС-матрицы: в центре и на краю поля зрения прибора (рис. 12).

В каждом положении поворот теодолита осуществлялся в диапазоне 3 угл. мин. (180 угл.с) отдельно по горизонтали и по вертикали с шагом 10 угл.с.

В табл. 5а и 5б приведены изображения звезд, спроецированных в центр и на край ПЗС-матрицы. На краю видна асимметричная форма распределения световой энергии в изображении звезды, что объясняется искажениями, вносимыми объективом прибора.

В табл. 6 представлены параметры функции рассеяния, аппроксимирующей изображение имитатора звезды и точность определения координат изображений (отклонение координат центра изображения звезды от истинного центра и среднеквадратические ошибки).

Таблица 5а. Распределение яркости изображения звезды в центре ПЗС-матрицы

Y	X				
	257	258	259	260	261
253	0	14	13	2	0
254	7	99	80	14	0
255	10	148	115	15	0
256	1	35	35	3	0
257	0	0	0	0	0

Таблица 5б. Распределение яркости изображения звезды на краю ПЗС-матрицы

Y	X				
	434	435	436	437	438
439	0	6	23	5	0
440	4	52	110	31	3
441	9	92	168	55	2
442	1	32	89	33	1
443	0	0	1	0	0

Таблица 6. Параметры функции рассеяния, аппроксимирующей изображение имитатора звезды

Интегральная яркость звезды	Координата X центра изображения звезды	Координата Y центра изображения звезды	Среднеквадратическое отклонение σ_x , пиксел	Среднеквадратическое отклонение σ_y , пиксел	Среднеквадратическая ошибка единицы веса, градации АЦП
584	258,42±0,01	254,71±0,02	0,56	0,68	4,7
717	435,88±0,02	440,89±0,02	0,68	0,85	3,9

При работе с изображением имитатора звезды метод среднего взвешенного и метод Гаусса позволяют определять координаты центра изображения звезды с одинаковой точностью, составляющей 0,02 в долях пиксела ПЗС-матрицы (1,1 угл.с).

Графики изменения методической ошибки представлены на рис. 13.

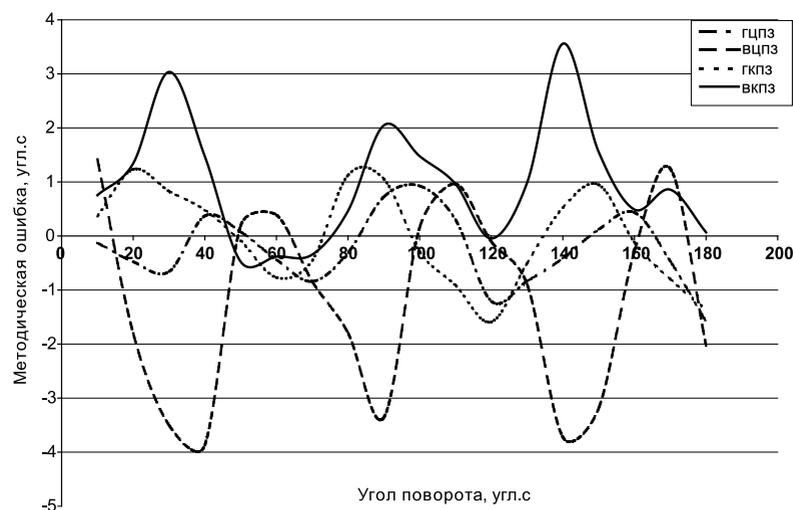


Рис. 13. Графики изменения методической ошибки

В табл. 7 для каждой серии измерений представлены средние значения методической ошибки и ее среднеквадратическое отклонение.

Таблица 7. Значения методической ошибки

Параметр	Область ПЗС-матрицы			
	горизонтальный центр поля зрения, ГЦПЗ	вертикальный центр поля зрения, ВЦПЗ	горизонтальный край поля зрения, ГКПЗ	вертикальный край поля зрения, ВКПЗ
Математическое ожидание (угл.с)	-0,24	-1,17	-0,017	0,99
Максимальное значение (угл.с)	0,93	1,74	1,23	3,56
Минимальное значение (угл.с)	-1,59	-3,87	-1,59	-0,47
Среднеквадратическая ошибка (угл.с)	0,64	1,74	0,854	1,08

Из приведенных данных видно, что при вертикальных перемещениях методическая ошибка имеет большие значения, чем при горизонтальных. Максимальное значение среднеквадратического отклонения методической ошибки составляет 1,74 угл.с. (в табл. 7 выделено полужирным шрифтом).

6. Проводилась съемка звездного неба.

Определение методической ошибки было проведено по результатам съемки звездного неба из обсерватории, находящейся на крыше здания ИКИ РАН. Прибор БОКЗ-М устанавливался на имитаторе посадочной плоскости, которая была выставлена в зенит. Реальные звезды перемещались относительно прибора за счет вращения Земли с угловой скоростью 15 угл.с/с. Снимались серии кадров с временным интервалом 10 с между кадрами. Время начала экспонирования фиксировалось по компьютерным часам.

Далее в процессе обработки на каждом кадре проводилась локализация изображений звезд и вычислялись их центры интегральной яркости.

Для каждой звезды, изображенной на серии кадров, рассчитывались измеренный угол поворота, средняя угловая скорость движения, теоретический угол поворота, ошибка определения угла.

Измеренный угол поворота определялся по формуле:

$$\alpha_{\text{изм}} = \arctg \frac{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}}{f}, \quad (16)$$

где x, y — текущие координаты центра звезды; x_0, y_0 — координаты центра изображения звезды на первом кадре; f — фокусное расстояние объектива.

Угловая скорость вычислялась для каждой звезды на соседних кадрах i и $i+1$:

$$\omega_i = \frac{\alpha_{\text{изм}}(i+1) - \alpha_{\text{изм}}(i)}{t_{i+1} - t_i}. \quad (17)$$

В качестве теоретической угловой скорости принималось усредненное значение ω_i .

Теоретический угол поворота был рассчитан следующим образом:

$$\alpha_m = \omega(t_i - t_0), \quad (18)$$

разность между теоретическим и измеренным углами характеризует методическую ошибку прибора. График методической ошибки представлен на рис. 14, максимум ошибки составил 4 угл.с, среднеквадратическое отклонение — 2,7 угл.с.

В табл. 8а и 8б представлены распределения яркостей изображений звезд пятой и седьмой звездных величин.

Таблица 8а. Распределение яркости изображения звезд пятой звездной величины

Y	X				
	163	164	165	166	167
196	0	0	0	0	0
197	0	22	42	9	0
198	0	71	147	19	0
199	0	5	17	6	0
200	0	0	0	0	0

Таблица 8б. Распределение яркости изображения звезд седьмой звездной величины

Y	X				
	391	392	393	394	395
119	0	0	0	0	0
120	0	0	3	0	0
121	0	1	23	2	0
122	0	0	0	0	0
123	0	0	0	0	0

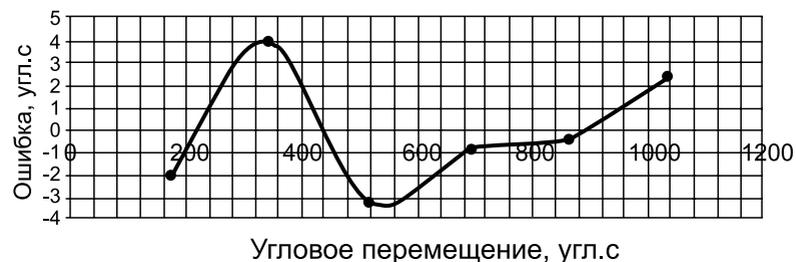


Рис. 14. График методической ошибки

Параметры функции рассеяния, аппроксимирующей изображения звезд и точность их определения, представлены в табл. 9.

Таблица 9. Параметры функции рассеяния, аппроксимирующей изображения звезд

Интегральная яркость звезды	Координата X центра изображения звезды	Координата Y центра изображения звезды	Среднеквадратическое отклонение σ_x , пиксел	Среднеквадратическое отклонение σ_y , пиксел	Среднеквадратическая ошибка единицы веса, градуса АЦП
338	164,772±0,01	197,863±0,01	0,52	0,45	1,4
29	393,039±0,01	120,877±0,01	0,338	0,32	0,1

Метод среднего взвешенного и метод Гаусса при работе с 5-й звездной величиной дают одинаковую точность определения центра изображения звезды (0,01 в долях элемента ПЗС-матрицы). При определении центра изображения звезды 7-й звездной величины точность метода среднего взвешенного составляет 0,03 (1,6 угл.с) в долях элемента, в то время как метод Гаусса сохраняет точность 0,01 (0,6 угл.с) элемента.

Основные результаты

В табл. 10 представлены основные результаты проведенных исследований величины методической ошибки.

Таблица 10. Основные результаты оценки величины методической ошибки

Вид эксперимента	Ошибка методическая, оцененная по методу среднего взвешенного, угл.с	Ошибка после коррекции, угл.с
Компьютерное моделирование (аппроксимация функцией sin)	4	0,12
Эксперименты на СДИ	4,4	3,7
Аппроксимация функцией Гаусса	4,8	3,09
Эксперименты с автоколлимационным теодолитом	1,7 (для одной звезды)	
Съемка звезд	2,7 (для одной звезды)	

Заключение

Результаты компьютерного моделирования продемонстрировали потенциальную возможность уменьшения методической ошибки с помощью аппроксимации закона ее изменения синусоидальной функцией.

Эксперименты, проведенные на СДИ, подтвердили результаты моделирования, закон изменения методической ошибки имеет синусоидальный характер. Однако в реальном случае, что видно по результатам экспериментов на СДИ, выигрыш от коррекции методической ошибки может составлять около 1 угл.с.

Аппроксимация изображения звезды на ПЗС-матрице двумерной функцией Гаусса приводит к уменьшению методической ошибки более чем на 1 угл.с. Причем преимущества аппроксимации функцией Гаусса становятся особенно заметны, когда звезда проецируется на край ПЗС-матрицы прибора, и изображение звезды становится более асимметричным.

Поскольку по результатам компьютерного моделирования при перемещениях по ПЗС-матрице изображения звезды, заданной двумерной функцией Гаусса, методическая ошибка составила 0,12 угл.с, при точной аппроксимации функции распределения звезды двумерной функцией Гаусса в пределе можно достичь указанной точности.

Литература

1. Аванесов Г.А., Алексахин Е.П., Алексахина Г.А., Балебанов В.И., Зиман Я.Л., Красиков В.А., Снеткова Н.И. Математическое обеспечение определения ориентации КА по изображениям звездного неба // Опτικο-электронные приборы в космич. экспериментах. М.: Наука, 1983. С. 124–157.
2. Кондратьева Т.В. Моделирование движения космических аппаратов и внешних условий космического пространства в процессе наземных испытаний звездных координаторов: Препринт. Пр-2120. М.: ИКИ РАН, 2005.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПЗС-МАТРИЦ РОССИЙСКОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ИСТОЧНИКАХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Г.А. Аванесов, В.В. Акимов, С.В. Воронков

Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва

Приведены результаты облучения ПЗС-матриц российского и зарубежного производства протонами с энергиями 155 МэВ. Показано, что при протонном воздействии на ПЗС-матрицах образуются устойчивые дефекты изображения. Установлено наличие зависимости количества дефектов на ПЗС от ее температуры, и обоснована необходимость охлаждения ПЗС-матриц в звездных датчиках для повышения их помехозащищенности при воздействии протонов.

Results of the Russian and foreign CCD arrays irradiation by protons with an energy of 155 MeV are presented. It is shown that stable image defects appear on a CCD array under proton impact. A dependence of the number of defects on a CCD on its temperature has been determined. The necessity of star trackers' CCD arrays cooling in order to improve their immunity to proton impact is substantiated.

Введение

Начиная с 1999 г. в космосе функционируют датчики звездной ориентации, разрабатываемые в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). К числу таких датчиков относятся приборы БОКЗ, БОКЗ-У, БОКЗ-М. Наибольшее время в космосе провели приборы БОКЗ, функционирующие на геостационарном спутнике «Ямал-100» с 1999 г. по настоящее время, и приборы БОКЗ-У, работающие на Международной космической станции (МКС) с 2000 г. Последнее поколение звездных датчиков — приборы БОКЗ-М — до настоящего времени использовались в менее длительных проектах, продолжительностью от нескольких месяцев до нескольких лет, хотя их срок активного существования составляет до 15 лет. В течение указанного срока приборы должны успешно выполнять задачу определения параметров ориентации, что обеспечивается надежной работой всех компонентов, входящих в состав