

УДК 681.7.055

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИМИТАТОРОВ ЗВЁЗДНОГО НЕБА, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ РАСТРОВЫЕ ЭКРАНЫ

© А. О. Жуков^{1,2,3,4}, А. И. Гладышев⁵, М. С. Тучин⁶, А. И. Захаров⁶,
Н. Л. Крусанова⁶, А. В. Миронов⁶, В. Г. Мошкалева⁶, М. Е. Прохоров⁶,
О. Ю. Стекольников⁶, И. В. Кузнецова⁶

¹Акционерное общество «Особое конструкторское бюро Московского энергетического института» (ОКБ МЭИ),

111250, Москва, Красноказарменная ул., 14

²Экспертно-аналитический центр Минобрнауки России,

109316, Москва, ул. Талалигина, 33, стр. 4

³Институт астрономии Российской академии наук (ИНАСАН),

119017, Москва, Пятницкая ул., 48

⁴МИРЭА — Российский технологический университет (РТУ МИРЭА),

119454, Москва, просп. Вернадского, 78

⁵Секция прикладных проблем при Президиуме РАН,

119333, Москва, ул. Губкина, 3

⁶Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова (ГАИШ МГУ),

119991, Москва, Университетский просп., 13

E-mail: mike@sai.msu.ru

Для лабораторных испытаний цикла функционирования звёздного датчика ориентации предназначены динамические стенды, в состав которых входят имитаторы звёздного неба. В последнее время для получения изображения звёздного неба чаще всего используются растровые экраны (компьютерные или телевизионные). Однако изображения звёзд на таких экранах имеют существенные отличия от реального звёздного неба, что необходимо учитывать при проведении динамических испытаний звёздных датчиков и обработке их результатов.

Ключевые слова: звёздные датчики ориентации, динамические стенды, имитаторы звёздного неба, растровые экраны.

DOI: 10.15372/AUT20210413

Введение. Для исследования реального цикла функционирования звёздного датчика (ЗД) ориентации [1, 2] предназначены динамические стенды, в состав которых входят имитаторы звёздного неба (ИЗН). Имитаторы строятся на разных принципах: проекция на плоские или сферические экраны (планетарий) [3], имитация звёздного неба с помощью светодиодов или лазерных диодов [4]. В последнее время для получения изображения звёздного неба чаще всего используются растровые экраны (компьютерные или телевизионные) [5].

Преимущества использования для имитации неба подобных экранов, управляемых компьютерами, очевидны: на них можно воспроизвести любой участок звёздного неба до разных звёздных величин, добавить любое число объектов-помех с заданными свойствами, привести небо в движение и т. д.

Однако изображения звёзд на таких экранах имеют существенные отличия от реального звёздного неба. Их необходимо учитывать при проведении динамических испытаний звёздных датчиков и обработке результатов испытаний.

1. Отличия растровых изображений звёзд от реальных. Два наиболее важных отличия связаны с конечными размерами дискретных элементов растрового экрана — пикселями. Угловые размеры звёзд на небе можно считать нулевыми — они на несколько порядков меньше угловых размеров дифракционного изображения звезды, создаваемого объективом ЗД в фокальной плоскости. Таким образом, реальные звёзды для ЗД — идеальные точечные источники света. При этом положения звёзд в поле зрения ЗД могут изменяться на сколько угодно малую величину по любой из небесных координат.

На экране минимальный размер изображения равен пикселю (для цветного экрана пиксель состоит из нескольких элементов разных цветов), в то время как звёзды на реальном небе — точечные источники. Перемещение точки по экрану возможно только на величину, кратную пикселю.

Влияние дискретности экрана ИЗН снижается, если угловой размер пикселя экрана становится в несколько раз меньше углового размера пикселя фотоприёмника ЗД, т. е. когда в один пиксель фотоприёмника попадают изображения нескольких (лучше многих) пикселей экрана ИЗН.

Такая ситуация реализуется не всегда. В табл. 1 приведены разрешения типичных экранов, используемых в ИЗН, и ПЗС/КМОП-матриц, применяемых в ЗД.

Другое отличие изображения на экране от реального неба состоит в существенно меньшем динамическом диапазоне яркости экрана, т. е. чёрный фон экрана гораздо ярче чёрных областей неба, а яркость изображений звёзд меняется в ограниченном диапазоне дискретным, а не непрерывным образом. Однако для динамических испытаний ЗД это отличие существенно менее важно, чем вышерассмотренное.

Таблица 1

Типичные разрешения экранов и ПЗС/КМОП-матриц

Растровые экраны		Звёздные датчики	
Тип экрана	Разрешение, пкс	Модель ЗД	Разрешение матрицы, пкс
Sony Vaio VGNUX ¹⁾	1024 × 600	АД-1 (МОКБ «Марс» ²⁾ БОКЗ-М,МФ,М60 ^{3,4)}	512 × 512
Смартфон, планшет	1024 × 768	БОКЗ-М60/1000 ^{3,4)} 348К «Геофизика» ⁴⁾	1024 × 1024
Экран десктопа, HD-телевизор	1920 × 1080	БОКЗ-МД-01 ³⁾ ОГ-24,36,60/4 ⁵⁾	2048 × 2048
4K CDI	4096 × 2160	ОГ-60,90,200/20 ⁵⁾ ОГ-90,200/5000 ⁶⁾	4500 × 4500 5000 × 4000
Dell UP2715K ⁷⁾ , HPZ27q ⁷⁾	6016 × 3384	АИНС (ЗД) ⁸⁾	8176 × 6132
8K UHD 10K UHD	8192 × 4320 ⁹⁾ 10 240 × 5760 ¹⁰⁾	250Мр КМОП-сенсор 2U250MRXSAA ¹¹⁾	19 580 × 12 600

Примечания: ¹⁾ Используется в КБИЗ [6, 7]. ²⁾ Официальный сайт ФГУП МОКБ «Марс» [8]. ³⁾ Официальный сайт ООФИ ИКИ [9]. ⁴⁾ [10]. ⁵⁾ [11]. ⁶⁾ [12]. ⁷⁾ Наибольшее разрешение экранов на market.yandex.ru по состоянию на 30.12.2020 г. ⁸⁾ Астроинерциальная навигационная система [13]. ⁹⁾ [14]. ¹⁰⁾ [15]. ¹¹⁾ Самый большой фотосенсор на конец 2020 г. [16].

2. Отображение экрана ИЗН на матрицу ЗД. Предположим, что мы хотим, чтобы изображение участка звёздного неба на экране ИЗН целиком перекрывало всё поле зрения ЗД и при этом размер изображения пикселя экрана в фокальной плоскости был меньше размера пикселя матрицы фотоприёмника. Тогда из табл. 1 видно, что для «старых» моделей ЗД с матрицами размера 512×512 для достижения этой цели с некоторыми оговорками достаточно экранов размером 1024×600 или 1024×768 пикселей (именно малогабаритные компьютеры Sony Vaio VGN UX используются в переносных блоках ИЗН, разработанных в Отделе оптико-физических исследований Института космических исследований (ООФИ ИКИ) для своих датчиков [6]).

Спроецировать на матрицу размера 1024×1024 экран HD-разрешения (1920×1080) можно, если только его края будут (почти) параллельны краям матрицы. При их произвольном развороте нужно уже использовать экран 4K UHD. Экранов, которые можно отобразить пиксель-в-пиксель на матрицы больших размеров (при произвольной ориентации), сегодня просто не существует.

Вместо одного монолитного экрана можно использовать мультиэкранную систему*. Вопрос о взаимной привязке (механической и программной) экранов в таких системах сегодня уже решён практически.

Изображение на экране ИЗН может занимать только часть поля зрения ЗД, в этом случае результаты, полученные при испытаниях, могут сильно отличаться от истинных значений параметров ЗД.

Таким образом, при использовании одиночного экрана в динамическом стенде размер его пикселя на фокальной плоскости в лучшем случае будет равен пикселю фотоприёмника, а возможно, будет превышать его (в несколько раз).

При любом размере пикселя изображение на экране без изменения его формы и размеров можно перемещать только на целое число пикселей вдоль строк или/и вдоль столбцов экрана.

3. Ошибка определения фотоцентра квадратного пикселя на матричном фотоприёмнике. Рассмотрим систематическую ошибку определения положения фотоцентра пикселя, которая может возникать при проецировании пикселя экрана конечного размера на матричный фотоприёмник.

Пусть пиксели экрана и фотоприёмника имеют форму квадрата. Линейный размер стороны пикселя фотоприёмника примем за единицу, размер стороны проекции пикселя экрана на светочувствительную поверхность фотоприёмника равен L (L может быть как меньше, так и больше 1).

Пусть на экране светится только один пиксель, все остальные тёмные. Также предположим, что изображение этого светящегося пикселя на фокальной плоскости имеет равномерную яркость. Геометрический центр яркого пикселя попадает в некий (нулевой) пиксель фотоприёмника в точку с координатами (x_0, y_0) , которые отсчитываются от его левого нижнего угла. Стороны изображения светящегося пикселя образуют угол α со сторонами пикселей фотоприёмника $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$.

Координаты фотоцентра изображения светящегося пикселя (x_p, y_p) вычисляются как взвешенное среднее по формулам

$$x_p = \sum_{i,j} x_{ij}^{(c)} s_{ij} / \sum_{i,j} s_{ij}; \quad y_p = \sum_{i,j} y_{ij}^{(c)} s_{ij} / \sum_{i,j} s_{ij}, \quad (1)$$

здесь i, j — номер пикселя (нулевой пиксель занимает координаты $0 \leq x < 1$ и $0 \leq y < 1$); $x^{(c)}$ и $y^{(c)}$ — координаты центра пикселя: $x_{ij}^{(c)} = i + 0,5$, $y_{ij}^{(c)} =$

*В мультиэкранной системе отдельные экраны могут стоять не вплотную друг к другу.

$= j + 0,5$; s_{ij} — сигнал в пикселе. Координаты фотоцентра будут отличаться от истинных координат центра проекции светящегося пикселя на фотоприёмник, это отличие будет зависеть от x_0, y_0, α и L .

Проведено компьютерное моделирование, в котором для заданного набора параметров x_0, y_0, α и L вычисляются положения вершин светящегося пикселя, затем вокруг него на матричном фотоприёмнике строится описанный пиксельный прямоугольник, стороны которого параллельны строкам и столбцам фотоприёмника, и для каждого входящего в него пикселя вычисляется регистрируемый сигнал s_{ij} , пропорциональный площади пересечения пикселя фотоприёмника и изображения светящегося пикселя экрана. Будем считать, что изображение пикселя достаточно яркое, чтобы шумами сигнала можно было пренебречь. Для описанного прямоугольника по формулам (1) вычисляются координаты фотоцентра (x_p, y_p) , после чего находятся отклонения фотоцентра от истинного центра по каждой из координат: $dx = x_p - x_0, dy = y_p - y_0$, а также полное смещение $dr = \sqrt{dx^2 + dy^2}$.

Было проведено компьютерное моделирование 1000 случайно выбранных прямоугольников, для которых параметры x_0, y_0 разыгрывались в интервале $[0; 1]$, угол α — в интервале $[0^\circ; 90^\circ]$, а размер пикселя экрана L — в интервале $[0,8; 5,0]$, который перекрывает возможные отношения размеров пикселей. Во всех случаях разыгрывались равномерно распределённые случайные величины. Результаты моделирования показаны на рис. 1 и 2.

В среднем отклонения невелики и не превышают 0,01–0,02 пикселя фотоприёмника, в выбросах отклонение доходит до 0,10–0,14 пикселя. За исключением выбросов такие отклонения фотоцентра несущественны для функционирования сегодняшних ЗД в большинстве случаев.

На рис. 1 приведена зависимость отклонения фотоцентра светящегося пикселя от размера его проекции. Видно, что при целых значениях L отклонения минимальны, а максимумы приходятся на полуцелые L . Амплитуда максимумов убывает по экспоненциальному закону

$$dr_{\max} = 10^{-0,17L}.$$

На рис. 2 показана зависимость величины фотоцентра отклонения от угла взаимного разворота растров α . Видно, что значительные выбросы наблюдаются только при углах, близких к 0° или к 90° , несколько меньший пик выбросов — вблизи 45° .

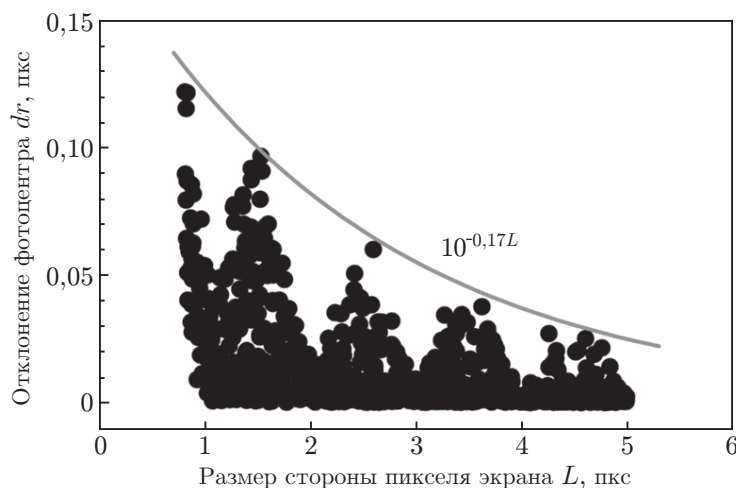


Рис. 1. Зависимость отклонения фотоцентра светящегося прямоугольного пикселя dr от размера освещённого пикселя экрана L . Смещения даны в пикселях приёмника излучения

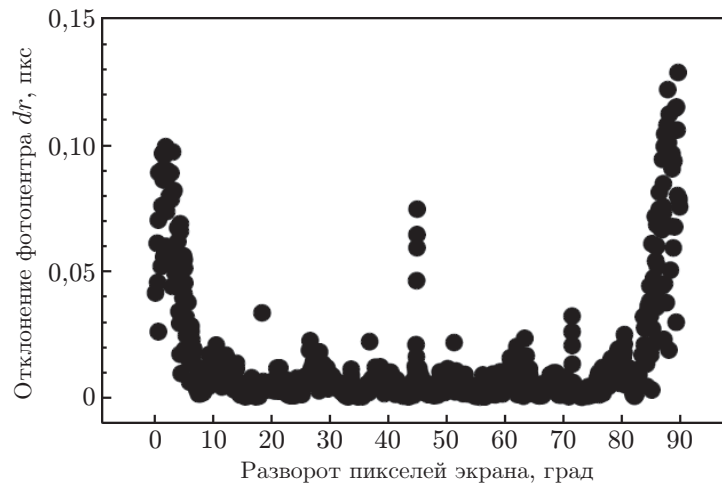


Рис. 2. Зависимость отклонения фотоцентра dr от угла разворота освещённого пикселя экрана α . Смещения даны в пикселях приёмника

10	28	33	39	12
48	1004	100	100	34
43	100	100	100	41
37	100	100	100	48
20	56	50	46	19

Рис. 3. Распределение сигналов от изображения светящегося пикселя. Внутренний квадрат — изображение светящегося пикселя экрана. Числа — сигнал в процентах от максимума

Объяснение этого эффекта приведено на рис. 3, где показан контур светящегося пикселя и описанный прямоугольник пикселей приёмника. В центре прямоугольника сигнал составляет 100 %, в крайних пикселях меняется от 0 до 100 % (на рис. 3 от 10 до 48 %). Малый сигнал означает, что только узкая освещённая полоска попадает в этот пиксель (как вблизи верхнего края на рис. 3), и это приводит к сдвигу фотоцентра в этом направлении при его вычислении по формуле (1). При малых углах разворота заполнение всех пикселей вдоль каждого края одинаково и сдвиги фотоцентра, вызванные отдельными пикселями, складываются, при больших углах разворота сдвиги от пикселей частично компенсируют друг друга. Этот эффект похож на рассмотренный в работе [17], где фигурировали изображения реальных звёзд, имеющие круглую форму.

4. Ошибки определения ориентации по кадру, в котором звёзды изображаются одиночными пикселями. Рассмотрим фрагмент звёздного неба на растровом экране динамического стенда, в котором все звёзды изображены одиночными светящимися пикселями. В таком кадре звёзды расположены не в их истинных положениях на небесной сфере, а в центрах ближайших к ним пикселей экрана. Какие погрешности будут возникать при попытке определить ориентацию по такому кадру?

Если звезда с произвольными (случайными) координатами целиком попадает внутрь

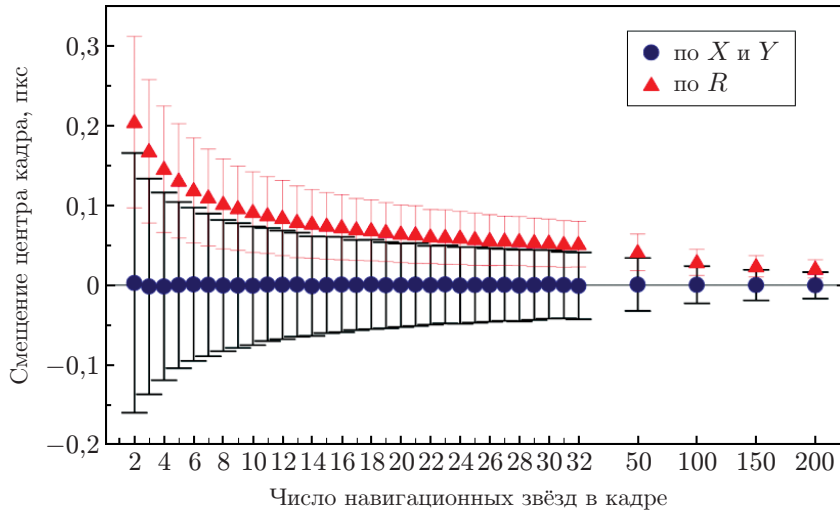


Рис. 4. Отклонение положения центра кадра по отдельным координатам и по радиусу при определении ориентации по растровому экрану в зависимости от числа навигационных звёзд в кадре. Отклонения даны в долях пикселя экрана

пикселя единичного размера, то её среднеквадратичное отклонение (СКО) от центра этого пикселя будет составлять $1/2\sqrt{3} \approx 0,289$. Если положение центра звезды вдоль одной из сторон пикселя является случайной величиной ξ , которая равномерно распределена в интервале $[0; 1]$, то её среднее значение равно $\bar{\xi} = 0,5$, а дисперсия при равномерном распределении вероятности $\sigma_{\xi}^2 = \int_0^1 (x - \xi)^2 dx = \frac{1}{3} (x - \xi)^3 \Big|_0^1 = \frac{1}{12}$. Всё это относится к одиночным звёздам.

Для получения оценки систематической ошибки определения ориентации по кадру с однопиксельными звёздами методом наименьших квадратов (МНК) решалась задача нахождения минимума невязки. В качестве невязки бралась сумма квадратов расстояний между фотоцентрами изображений звёзд на экране и их истинными положениями, яркость звёзд и конечность их размеров на экране при этом не учитывались (см. разд. 3). Минимум невязки соответствует решению задачи Вахбы [18]. Параметрами МНК являлись координаты центра кадра и угол его поворота вокруг центра. Другими параметрами этой задачи являлись разрешение экрана M (по одной стороне) и число навигационных звёзд в кадре N . Для разрешения экрана брались значения $M = 256, 512, 1024, 2048$ и 4096 , равные 2^n , а число звёзд — из интервала $[2; 200]$. Для каждого сочетания параметров M и N проводилось определение ориентации для 10 000 случайных кадров. Звёзды на небесной сфере до некоторой предельной величины располагаются в соответствии с их реальными координатами. Для каждого кадра случайным образом выбирается положение его центра на небесной сфере и разворот стороны кадра относительно направления на Северный полюс мира. Центр кадра — случайная величина, равномерно распределённая по сфере, угол разворота равномерно распределён в интервале $[0^\circ; 360^\circ]$. По каждому кадру определялись отклонения центра кадра (x, y) , установленные по однопиксельным изображениям звёзд в кадре, от истинного положения центра кадра (x_0, y_0) : $dx = x - x_0$, $dy = y - y_0$ и $dr = \sqrt{dx^2 + dy^2}$, а также угол поворота кадра ψ . Для этих величин находились средние значения и СКО.

Моделирование показало, что в вышезаданном диапазоне параметров систематические ошибки смещения центра экрана от его разрешения практически не зависят. На рис. 4

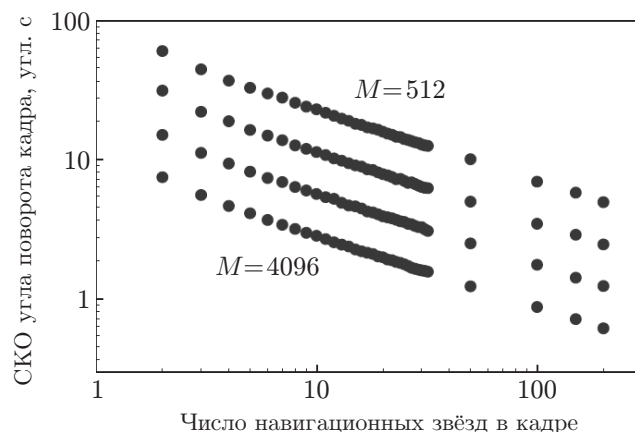


Рис. 5. Среднеквадратическое отклонение угла поворота в зависимости от числа навигационных звёзд в кадре и от разрешения экрана. Верхняя последовательность точек соответствует $M = 512$, нижняя — $M = 4096$. Величины СКО в последовательностях различаются примерно в 2 раза. Зависимость СКО от числа звёзд степенная: СКО составляет приблизительно $N^{-0,5}$

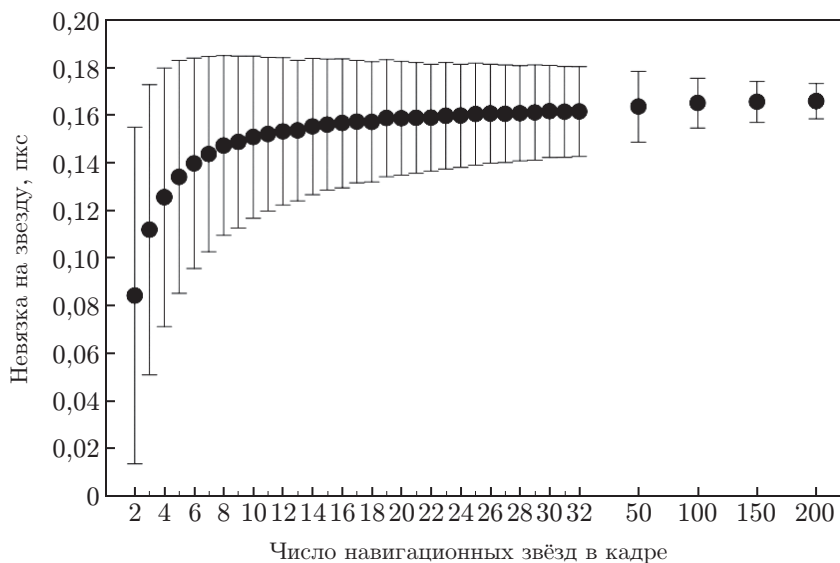


Рис. 6. Зависимость невязки на одну звезду от числа навигационных звёзд в кадре

показана зависимость смещения фотоцентра пикселя по осям координат (dx, dy) и по радиусу dr от числа навигационных звёзд в кадре. Отклонения по осям X и Y практически одинаковы, их средние значения близки к нулю. Среднее значение dr убывает с ростом N от 0,11 пикселя экрана при $N = 2$ до 0,012 пикселя при $N = 200$. При $N = 10$ среднее значение dr равно 0,051 пикселя. Среднеквадратические отклонения всех указанных величин убывают с ростом N .

Значения угла поворота ψ не превышают нескольких угловых минут. Средние значения угла ψ очень близки к нулю. На рис. 5 показана зависимость СКО поворота кадра ψ от числа навигационных звёзд в кадре и от разрешения экрана.

На рис. 6 приведена зависимость средней величины и СКО невязки, приходящейся на одну навигационную звезду, от числа звёзд в кадре. Заметим, что невязка возрастает от

0,08 пикселя для двух звёзд до 0,15–0,16 пикселя, когда звёзд более 20. Среднеквадратическое отклонение с ростом числа звёзд уменьшается. Зависимость невязки от разрешения экрана отсутствует.

Сравним возникающие погрешности с точностями ЗД. Для примера возьмём датчик БОКЗ-М (или БОКЗ-М60), который в качестве приёмника излучения использует ПЗС-матрицу размера 512×512 и имеет поле зрения размером $8 \times 8^\circ$. Угловой размер пикселя этих ЗД составляет $56''$, а типичное значение ошибки определения центра кадра, равное 0,1 пикселя (взято на рис. 4), будет равно соответственно $5,6''$, что примерно в 10 раз больше, чем погрешность этих датчиков, составляющая $0,5''$ [9]. Такая погрешность достигается, если размеры пикселей экрана и ПЗС примерно равны (например, при использовании ИЗН на основе SonyVaioVGUNIX для ЗД с матрицей размера 512×512 пикселей, табл. 1), в противном случае она будет ещё выше.

Видно, что погрешность определения ориентации, связанная с дискретностью растрового экрана динамического стенда, достаточно велика и её необходимо учитывать при проведении испытаний ЗД.

5. «Составные» звёзды: изображение звёзд несколькими пикселями растрового экрана. Изображение звезды одиночным светящимся пикселем на динамическом экране позволяет добиться наименьшего размера её изображения. Однако расчёты, приведённые в разд. 3, показывают, что такой подход имеет ряд недостатков, поскольку приводит к большой систематической ошибке при определении ориентации и обеспечивает минимальный диапазон воспроизведения яркости звёзд. Можно ли решить эту проблему?

Наиболее простой из возможных вариантов — использовать «составные» звёзды, изображения которых на экране ИЗН воспроизводятся несколькими соседними светящимися с различной интенсивностью пикселями. Сами пиксели и интенсивности их свечения выбираются так, чтобы фотоцентр изображения был как можно ближе к истинному положению звезды.

Следует заметить, что подавляющее большинство современных компьютерных и телевизионных экранов независимо от используемой в них технологии цветные. У таких мониторов пиксель состоит из нескольких независимо управляемых субпикселей, которые излучают красный, синий и зелёный свет. Поскольку чувствительность приёмника излучения ЗД к каждому из этих цветов различна, то при одинаковом уровне выходного сигнала изображения пикселей разных цветов на монохромной матрице фотоприёмника будут иметь разную интенсивность. Это различие приводит к «хроматическому сдвигу» — систематическому смещению изображений разных цветов относительно друг друга. Для его устранения проводится процедура калибровки — подбор значений множителей для интенсивности различных цветов, минимизирующих сдвиг. Хроматический сдвиг зависит как от спектров излучения пикселей разных цветов используемого в ИЗН экрана, так и от кривой чувствительности приёмника излучения ЗД. Поэтому калибровка хроматического сдвига должна проводиться для каждой пары: экран — звёздный датчик. Вопросы хроматической калибровки выходят за рамки данной работы и далее рассматриваться не будут.

Хроматический сдвиг отсутствует у монохромных экранов. Сегодня производятся монохромные экраны в основном для двух целей: настольные чёрно-белые (gray scale) средних форматов используются в медицине (анализ рентгеновских снимков и компьютерных томограмм) и малогабаритные одноцветные LED-дисплеи для различных экранов-индикаторов. Последние бывают чёрно-белыми (серыми) и цветными (одноцветными): зелёными, жёлтыми и т. д. Характеристики этих экранов приведены в табл. 2.

В зависимости от технологии изготовления пиксель монитора состоит из 3 или 4 субпикселей красного, синего и зелёного цветов. Большинство экранов являются 8-битными, в них светимость каждого из субпикселей может принимать 256 различных значений, что

Таблица 2

Монохромные серийные экраны (мониторы)

Модель	Разрешение	Размер экрана (диагональ)	Дополнительные сведения
Медицинские дисплеи			
Siemens SMM 21103L	1600 × 1280	21"	\$2000
NEC MD211G3	2048 × 1536	21,3"	цвет 10 бит из цветовой гаммы 15,5 бит (48 961)
Beacon G52SP+	2560 × 2048	21,3"	цвет 12 бит (4096 уровней)
EIZO RadiForce GX1030	4096 × 2560	30"	цвет 10 бит, белое или голубое свечение, \$25 770
Миниатюрные экраны			
Olightek OLED micro SXGA060SW(G) V1R1	1280 × 1024	0,6"	цвет белый, зелёный
JasperDisplayCorp. JD27E2	1920 × 1080	0,7"	цвет 10 бит, синее свечение

позволяет воспроизвести примерно 16 млн цветов и примерно 750 уровней интенсивности на экране. Производятся также более редкие и дорогие 10- и 12-битные экраны, субпиксели которых имеют 1024 и 4096 градаций соответственно.

Для определения положения фотоцентра пикселя на цветном экране, кроме геометрии субпикселей и их интенсивности, для каждого из уровней яркости необходимо знание калибровочных коэффициентов для компенсации хроматического сдвига. Их определение является достаточно сложной процедурой. Это можно исключить, если зажигать во всех пикселях экрана только субпиксели одного цвета (предпочтительно зелёный или красный при 3 и красный при 4 субпикселях), что превращает цветной экран в эффективно монохромный. В таком случае положение фотоцентра не будет зависеть от спектра излучения субпикселя и от спектральной чувствительности фотоприёмника ЗД, но при этом диапазон интенсивности пикселя уменьшится, а светящиеся пиксели не будут примыкать друг к другу.

6. Погрешность определения фотоцентров составных звёзд. Пусть пиксели экрана ИЗН имеют квадратную форму и состоят из 4 субпикселей размером (2×2) также квадратной формы. Для воспроизведения на экране составной звезды в пикселях будет зажигаться только один субпиксель. Цвет этого субпикселя один для всех пикселей (например, красный). Будем также считать, что во включённом состоянии субпиксель светится равномерно по всей площади.

Проведём контур (квадрат), соединяющий центры субпикселей выбранного цвета у 4 соседних пикселей размером (2×2) . Эта конфигурация при ненулевом угле поворота раstra экрана относительно строк и столбцов матрицы фотоприёмника показана на рис. 7. Если истинный центр звезды попадает внутрь построенного контура, то составная звезда строится путём включения этих 4 пикселей.

Будем считать, что интенсивность излучения I пикселей линейно зависит от заданного уровня яркости пикселя n :

$$I_n = I_{\text{фон}} + n \Delta I,$$

где $I_{\text{фон}}$ — фоновое излучение выключенного ($n = 0$) пикселя, ΔI — разность излучения соседних уровней яркости, n — целое в интервале $[0; 255]$.

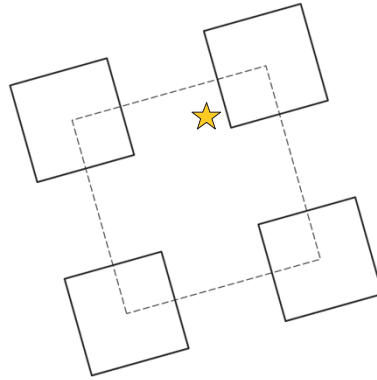


Рис. 7. Субпиксели цветных пикселей, из которых строится составная звезда

Отметим, что в составной звезде не обязательно должны включаться все субпиксели четвёрки, показанной на рис. 7. Если звезда лежит вблизи диагонали контура (квадрата), то для её воспроизведения необходимо включить пиксели на концах этой диагонали. Если звезда не лежит на диагонали, то включаются три пикселя: наиболее близкий к звезде и два соседних с ним. В обоих случаях уровни яркости включаемых субпикселей связаны с координатами звезды линейными соотношениями.

Было проведено следующее моделирование. Звезда случайно «бросалась» внутрь квадрата, соединяющего центры 4 субпикселей. Вычислялись интенсивности пикселей для составной звезды, положение фотоцентра составной звезды, и находилось его отклонение dr от истинного положения звезды. Процедура была проведена 1000 раз.

На рис. 8 приведена гистограмма распределения отклонений dr по величине. Видно, что возможны отклонения до 0,05 пикселя, но в большинстве случаев их величина заметно меньше. Медиана в приведённой гистограмме составляет $dr_m = 0,0045$ пикселя.

Таким образом, использование составных звёзд даже в рассмотренном простейшем варианте позволяет сделать систематическую погрешность, связанную с дискретностью экрана ИЗН, меньше случайной погрешности ЗД.

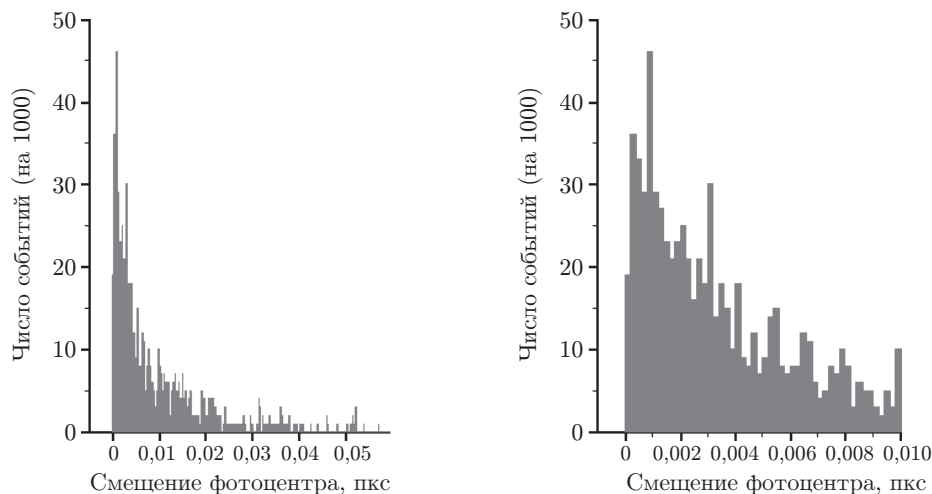


Рис. 8. Распределение смещений фотоцентра составной звезды относительно истинного положения звёзд (в долях пикселя экрана). Слева — полная диаграмма распределения, справа — область малых смещений. Ширина бина диаграммы 0,0002 пикселя

Заключение. Рассмотрен ряд систематических ошибок, появляющихся при динамических испытаниях звёздных датчиков из-за дискретной природы растровых экранов, используемых в имитаторах звёздного неба. Проведённое моделирование позволяет дать следующие рекомендации для таких испытаний.

1. Наилучшие углы между строками экрана и строками матричного фотоприёмника для динамических испытаний составляют $20\text{--}25^\circ$ или $65\text{--}70^\circ$.

2. Изображение звёзд одиночными пикселями экрана приводит к систематической ошибке порядка $0,1\text{--}0,2$ углового размера пикселя экрана, что в большинстве случаев неприемлемо велико.

3. Составные звёзды из четырёх пикселей позволяют уменьшить эту погрешность в $10\text{--}30$ раз.

4. Для исключения хроматического сдвига изображения звёздного неба на экране имитатора следует давать только в одном из цветов субпикселей экрана (предпочтительно в красном).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Захаров А. И., Прохоров М. Е., Тучин М. С., Жуков А. О.** Минимальные технические характеристики звёздного датчика ориентации, необходимые для достижения заданной погрешности // Астрофизический бюллетень. 2013. **68**, № 4. С. 507–520.
2. **Жуков А. О., Захаров А. И., Прохоров М. Е. и др.** Комплексные системы ориентации космических аппаратов и контроль внутренней метрологии // Сб. II Всеросс. науч.-техн. конф. молодых конструкторов и инженеров, посвящённой 120-летию со дня рождения академика А. Л. Минца и 60-летию аспирантуры Радиотехнического института: «Минцевские чтения». М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. С. 206–213.
3. **Зеркальная проекционная система.** ООО «Эдвенче», 2019. URL: http://adventure.spb.ru/proekcionnye_sistemy/zerkalo/ 2019 (дата обращения: 30.12.2020).
4. **Бессонов Р. В., Брысин Н. Н., Строилов Н. А.** Многоколлиматорный стенд для отработки звёздных приборов с интегрированными датчиками угловых скоростей // Тез. III Всеросс. науч.-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». М.: ИКИ РАН, 2012. С. 27–28. URL: http://of.ikiweb.ru/publ/conf_2012_tez.pdf (дата обращения: 25.06.2021).
5. **Аванесов Г. А., Воронков С. В., Дунаев Б. С. и др.** Имитаторы звёздного неба для наземной отработки датчиков звёздной ориентации // Механика, управление и информатика: Сб. тр. I Всеросс. науч.-техн. конф. «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов». М.: ИКИ РАН, 2009. С. 372–386.
6. **Отдел оптико-физических исследований.** Институт космических исследований РАН. Динамические имитаторы звёзд. URL: http://of.ikiweb.ru/st_dynamic_im.php (дата обращения: 09.06.2021).
7. **Воронков С. В., Дунаев Б. С., Никитин А. В., Шамис В. А.** Динамические имитаторы звёздного неба, предназначенные для комплексной отработки астроприборов в составе космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. **10**, № 2. С. 307–315.
8. **Московское** опытно-конструкторское бюро «Марс». Системы управления и навигации, бортовые вычислители, астродатчики. Продукция. URL: <https://web.archive.org/web/20161204195205/http://www.mars-mokb.ru/product.html> (дата обращения: 30.12.2020).

9. **Отдел** оптико-физических исследований. Институт космических исследований РАН. Сравнительные характеристики звёздных датчиков ориентации семейства БОКЗ. URL: http://ofo.ikiweb.ru/bokz_table.php (дата обращения: 09.06.2021).
10. **Дятлов С. А., Бессонов Р. В.** Обзор звёздных датчиков ориентации космических аппаратов // Механика, управление и информатика: Сб. тр. I Всеросс. науч.-техн. конф. «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов». М.: ИКИ РАН, 2009. С. 11–31.
11. **Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Форш А. А., Куделин М. И.** Анализ современного состояния и перспектив развития приборов звёздной ориентации семейства БОКЗ // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 2015. **58**, № 1. С. 3–13.
12. **Оптико-физический** отдел. Буклет-презентация. М.: ИКИ РАН. URL: ofo.ikiweb.ru/publ/OFO-IKI_booklet.pdf (дата обращения: 09.06.2021).
13. **Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Брысин Н. Н. и др.** Астроинерциальная навигационная система // Механика, управление и информатика. 2015. **7**, № 2 (55). С. 21–37.
14. **Какие** бывают видеоразрешения? «Концепт-Group», 2021. URL: <http://concept-labinsk.ru/stati/kakie-byvayut-video-razresheniya> (дата обращения: 09.06.2021).
15. **10К (разрешение)**. URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/10К_\(разрешение\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/10К_(разрешение)) (дата обращения: 09.06.2021).
16. **250 MP Resolution** CMOS Sensor: 2U250MRXSAA. URL: <https://www.photonicsonline.com/doc/250mp-resolution-cmos-sensor-0001> (дата обращения: 30.12.2020).
17. **Захаров А. И., Никифоров М. Г.** Систематические и случайные ошибки определения положения фотоцентров звёзд на матричных фотоприёмниках // Механика, управление и информатика. 2011. № 2. С. 280–288.
18. **Wahba G.** A least squares estimate of spacecraft attitude // SIAM Rev. 1965. **7**, Iss. 3. P. 409–409.

Поступила в редакцию 25.06.2021

После доработки 22.07.2021

Принята к публикации 02.08.2021
