

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 // Оптико-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

приборов. В настоящей работе рассматриваются вопросы, касающиеся эффектов воздействия радиационных факторов космического пространства на ПЗС-матрицы.

1. Постановка задачи и цель проведения эксперимента

В силу того, что ПЗС-матрица является одним из важнейших компонентов звездного датчика, разработчики приборов должны предъявлять высокие требования к ее основным характеристикам, в том числе к радиационной стойкости. В приборах семейства БОКЗ используются ПЗС-матрицы «Лев-2» производства ГУП НПП «Электрон-Оptronик», г. Санкт-Петербург. Стойкость ПЗС-матриц в составе прибора к воздействию радиации обуславливается как уровнем стойкости самой ПЗС, так и уровнем конструктивной защиты ПЗС в приборе. Увеличение толщины стенок конструкции прибора приводит к повышению его массы, что нежелательно, поэтому при проектировании прибора разработчики должны по возможности выбирать ПЗС-матрицы, обладающие высоким уровнем радиационной стойкости. Радиационная стойкость ПЗС-матрицы «Лев-2», используемой до настоящего времени во всех приборах семейства БОКЗ, подтверждена, с одной стороны, результатами наземных испытаний на моделирующих установках на базе Co^{60} и на протонных ускорителях, а с другой стороны — результатами многолетней эксплуатации в космосе на различных космических аппаратах — от низкоорбитальных до геостационарных.

К сожалению, обладая несомненными достоинствами, разработанная в 80-х гг. прошлого века ПЗС-матрица «Лев-2» в настоящее время не отвечает всем требованиям, предъявляемым к современным и конкурентоспособным датчикам звездной ориентации, и не может быть использована в некоторых вновь создаваемых приборах. В связи с этим в течение нескольких лет в ИКИ РАН проводился анализ рынка ПЗС-матриц отечественного и зарубежного производства, целью которого был выбор новых моделей ПЗС-матриц, предназначенных для использования в будущих поколениях датчиков звездной ориентации и съемочных систем. Сложность задачи усугублялась тем, что производство ПЗС в России недоста-

точно развито, а зарубежные производители ПЗС-матриц не всегда готовы делиться с российскими специалистами характеристиками производимых ими устройств, а зачастую и не готовы продавать эти ПЗС-матрицы на российском рынке.

Результатом проведенного анализа явился выбор ПЗС-матрицы KODAK KAF-0261E, предназначенной для использования в составе звездного датчика БОКЗ-МФ на космическом аппарате (КА) «Фобос-Грунт», и ПЗС-матрицы KODAK KAI-1020M, которую планируется применять в составе телевизионной системы навигации и наведения (ТСНН) на том же КА.

В табл. 1 приведены основные характеристики указанных ПЗС-матриц и ПЗС-матрицы «Лев-2».

Таблица 1

Характеристика	ПЗС-матрица		
	«Лев-2»	KAF-0261E	KAI-1020M
Фирма-изготовитель	«Электрон-Оptronик»	KODAK	KODAK
Тип переноса	Полнокадровый	Полнокадровый	Строчнокадровый
Количество элементов	512×512	512×512	1000×1000
Размер элемента, мкм	16×16	20×20	7,4×7,4
Охладитель	Встроенный	Нет	Нет
Радиационная стойкость по ТУ, крад	10	Нет данных	
Использование	БОКЗ-М	БОКЗ-МФ	ТСНН

В условиях открытого космоса к основным радиационным факторам, воздействующим на приборы, относятся заряженные частицы радиационных поясов Земли, солнечных вспышек и галактических космических лучей.

Опыт работы звездных датчиков в космосе на орбитах, подверженных воздействию протонов солнечных вспышек или радиационных поясов Земли, показывает, что в результате такого воздействия на ПЗС-матрицах приборов образуется множество звездоподобных объектов, трудноотличимых от изображений настоящих звезд. Большая часть таких объектов стирается при очистке матрицы, и их положение на

изображениях меняется от экспонирования к экспонированию. В то же время при протонном воздействии в объеме матрицы могут образовываться структурные повреждения, приводящие к появлению на изображении устойчивых дефектов изображения (УДИ), то есть пространственных объектов, положение которых не меняется при обновлении изображения. Появление УДИ приводит к уменьшению полезной площади изображения, потому что занятые этими объектами элементы матрицы не генерируют сигнал при попадании в них квантов света. Накопление числа таких дефектов в процессе полета может приводить к снижению эффективности работы приборов, в состав которых входит рассматриваемая матрица.

В связи с этим необходимо на этапе принятия решения о выборе ПЗС-матрицы для использования в космическом приборе иметь информацию о стойкости такой ПЗС, в том числе и к протонному воздействию. Отсутствие подобной информации для упомянутых выше ПЗС-матриц KODAK KAF-0261E и KODAK KAI-1020M привело к необходимости проведения специалистами ИКИ РАН испытаний на протонном ускорителе. Целью испытаний являлось получение оценки вероятности возникновения УДИ на ПЗС-матрицах KODAK при облучении их потоками протонов и сравнение полученных оценок с показателями ПЗС-матрицы «Лев-2».

2. Экспериментальная оценка стойкости ПЗС-матриц к возникновению устойчивых дефектов изображения

Экспериментальный метод исследований стойкости ПЗС-матрицы к образованию УДИ заключается в облучении ее потоком протонов заданной энергии под различными углами и получении оценки вероятности возникновения УДИ в элементе матрицы. Искомая вероятность определяется для набранного в течение эксперимента флюенса протонов на основе числа элементов матрицы, занятых УДИ.

Испытания ПЗС-матриц в составе приборов (рис. 1) проводились на базе Института теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ). Облучение осуществлялось протонами с энергиями 155 МэВ. Ускоритель работал в импульсном режиме, время вывода пучка из ускорителя со-

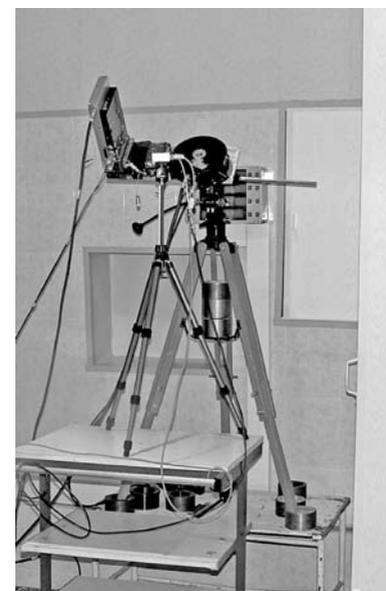


Рис. 1. Облучение ПЗС-матриц в составе приборов

ставляло около 200 нс, частота следования импульсов — примерно один раз в три секунды. За импульс выводился пучок с флюенсом около 9000 частиц/см².

В процессе облучения каждый из приборов находился в активном электрическом режиме, и периодически осуществлялось экспонирование и сохранение темновых изображений ПЗС-матриц.

При облучении ПЗС-матрицы «Лев-2» под разными углами падения протонов к ее поверхности было показано, что в зависимости от угла прохождения частиц через чувствительный слой ПЗС на получаемых изображениях образуются точечные или вытянутые объекты (рис. 2), которые исчезают при очистке матрицы перед следующим экспонированием. В ходе эксперимента было установлено, что ПЗС-матрица «Лев-2» показала высокий уровень стойкости к возникновению УДИ при воздействии протонов. После внесения в ПЗС суммарного флюенса $1,83 \cdot 10^7$ частиц/см² на ней не было зарегистрировано ни одного устойчивого дефекта изображения.

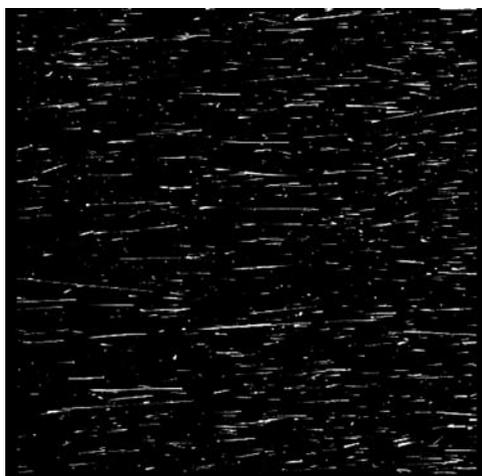


Рис. 2. Изображение, полученное с ПЗС-матрицы «Лев-2» при падении протонов под скользящими углами к поверхности

На рис. 3, 4 представлены образцы изображений, полученных с ПЗС-матриц KODAK KAF-0261E и KODAK KAI-1020M при облучении их протонами с энергиями 155 МэВ.

Облучение ПЗС-матриц KODAK осуществлялось как при фронтальном падении протонов на ПЗС, так и при падении протонов под углом 45° к плоскости матриц. Суммарный флюенс составил $1,83 \cdot 10^7$ частиц/см². В табл. 2 приведены данные о числе объектов на изображениях, полученных с ПЗС-матрицы KODAK KAF-0261E до, в процессе и после эксперимента при времени экспонирования 0,4 с.

Таблица 2

Флюенс	Число УДИ размером в 1 элемент	Число УДИ размером от 2 до 9 элементов
0	15	3
$0,86 \cdot 10^7$ частиц/см ²	282	93
$1,83 \cdot 10^7$ частиц/см ²	518	167
Через трое суток после окончания облучения	266	14
Через 14 суток после окончания облучения	157	10

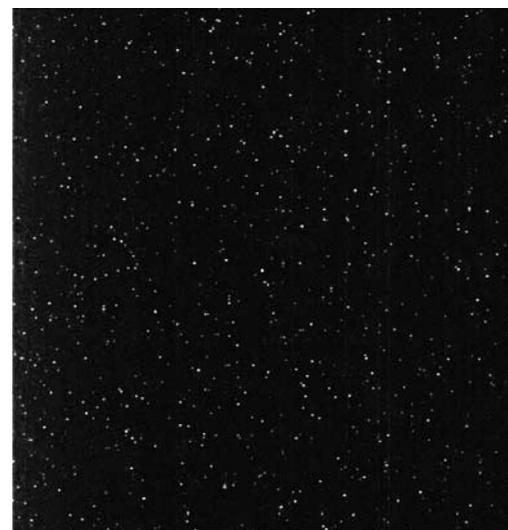


Рис. 3. Изображение, полученное с ПЗС-матрицы KODAK KAF-0261E при фронтальном падении протонов



Рис. 4. Изображение, полученное с ПЗС-матрицы KODAK KAI-1020M при падении протонов под углом к поверхности

В табл. 3 приведены аналогичные данные для ПЗС-матрицы KODAK KAI-1020M.

Таблица 3

Флюенс	Число УДИ размером в 1 элемент	Число УДИ размером от 2 до 9 элементов
0	126	0
$0,86 \cdot 10^7$ частиц/см ²	487	2
$1,83 \cdot 10^7$ частиц/см ²	730	10
Через трое суток после окончания облучения	444	4
Через 14 суток после окончания облучения	424	2

Воздействие протонов приводит к возрастанию темного сигнала и удержанию его на этом уровне в ряде элементов ПЗС-матриц. При этом устойчивым дефектом изображения считается такой элемент (или группа соседних элементов) матрицы, яркость которого превышает некое пороговое значение P , определяемое по формуле

$$P = M + 3\sigma,$$

где M — среднее значение яркости по полю ПЗС-матрицы; σ — дисперсия M .

Как видно из табл. 2, 3, с ростом числа попавших на ПЗС-матрицу протонов на изображениях наблюдалось увеличение числа устойчивых дефектов, большинство из которых имели площадь в один элемент ПЗС, но часть из них содержала от 2 до 9 элементов. После окончания облучения ПЗС-матрицы находились при комнатной температуре, что привело к отжигу части образованных дефектов в течение первых четырнадцати суток, но в дальнейшем отжиг практически прекратился, и число УДИ на ПЗС осталось постоянным.

Так как ПЗС-матрица KODAK KAF-0261E предназначена для использования в составе звездного датчика, рассмотрим, каким образом радиационно-индуцированные дефекты могут оказывать негативное воздействие на решение задачи распознавания звездоподобных объектов и определения параметров ориентации.

При обработке полученного прибором изображения группы звезд выполняется локализация объектов, т. е. выделение пространственно связанных элементов ПЗС, яркости которых превышают пороговое значение. При этом в дальнейшую обработку не берутся объекты, размеры и интегральная яркость которых выходят за определенные границы. Затем для каждого локализованного объекта выполняется расчет координат его энергетического центра и проводится распознавание объектов в бортовом звездном каталоге.

В случае, если размер дефекта составляет от одного до двух элементов ПЗС-матрицы и его координаты не совпадают с координатами ни одного из зарегистрированных объектов, такой дефект будет отбракован на этапе локализации как имеющий размер меньше минимально допустимого. В случае, если размер дефекта превышает два элемента ПЗС и его интегральная яркость будет больше минимально допустимой и меньше максимально возможной, этот дефект будет зарегистрирован в качестве отдельного объекта и сможет участвовать в процедуре распознавания. Учитывая, что алгоритм работы прибора предусматривает прогнозирование перемещения гидрируемых звезд по изображению, вероятность того, что радиационно-индуцированный дефект будет использован для распознавания, достаточно мала. Гораздо более неприятной представляется ситуация, при которой происходит примыкание дефекта к кластеру, содержащему изображение звезды. В этом случае координаты энергетического центра звездоподобного объекта будут рассчитаны с ошибкой, что, в свою очередь, приведет к уменьшению вероятности распознавания такого объекта в бортовом каталоге. Как следует из сказанного, наличие УДИ на изображениях может затруднять решение прибором задачи определения параметров ориентации с заданной частотой и точностью, поэтому для ПЗС-матриц, подверженных возникновению таких дефектов, необходимо разрабатывать меры по борьбе с этими дефектами.

Для исследования возможности парирования негативно-го эффекта воздействия протонов на ПЗС-матрицу с помощью изменения ее температурного режима были проведены соответствующие наблюдения за ПЗС при разных значениях

температур. В табл. 4 приведены данные о зависимости числа дефектов на ПЗС-матрице KODAK KAF-0261E от температуры после облучения.

Таблица 4

Температура, °С	Число УДИ размером в 1 элемент	Число УДИ размером от 2 до 9 элементов
-15	6	2
-5	5	4
0	7	4
+5	17	15
+10	43	5
+15	79	10
+25	265	17

Как следует из табл. 4, при охлаждении ПЗС-матрицы до температуры 0 °С и ниже яркости дефектов становятся меньше порогового значения, и такие дефекты не регистрируются в качестве отдельных объектов. При этом необходимо отметить, что уменьшение количества дефектов на изображениях ПЗС при понижении температуры является обратимым эффектом, т. е. после окончания охлаждения число дефектов вновь возрастает до исходного значения.

Наблюдаемый процесс уменьшения числа УДИ на ПЗС-матрице KODAK KAF-0261E при понижении температуры хорошо согласуется с результатами испытаний ПЗС-матрицы «Лев-2» на протонном ускорителе и данными эксплуатации таких матриц в космосе. Как было сказано выше, при воздействии на ПЗС «Лев-2» протонного потока с флюенсом $1,83 \cdot 10^7$ частиц/см² на ней не было зарегистрировано ни одного устойчивого дефекта изображения. Кроме того, на ПЗС-матрицах приборов БОКЗ, установленных на геостационарных спутниках, в течение девятилетней эксплуатации в космосе не было зафиксировано появления ни одного УДИ. ПЗС-матрица «Лев-2», в отличие от ПЗС KODAK, охлаждается в составе прибора до -18 °С. Как следует из вышесказанного, именно эта ее особенность и является определяющей с точки зрения стойкости к возникновению УДИ при воздействии протонов.

В случае с ПЗС-матрицей KODAK KAI-1020M, которая предназначена для использования в составе съемочных камер, воздействие протонов будет проявляться менее критично в связи с тем, что камеры будут работать с малыми временами экспонирования, составляющими несколько десятков миллисекунд. Кроме того, для получаемых с таких камер изображений поверхности космических объектов не является фатальным наличие одиночных УДИ, а число кластерных УДИ, образованных на ПЗС-матрице KODAK KAI-1020M под воздействием протонов, мало (см. табл. 3).

Заключение

Проведенные испытания ПЗС-матриц «Лев-2», KODAK KAF-0261E, KODAK KAI-1020M на протонном ускорителе показали, что неохлаждаемые ПЗС-матрицы подвержены возникновению устойчивых дефектов изображений при воздействии на них протонов, при этом наблюдаются как дефекты размером в 1 элемент ПЗС, так и кластерные дефекты. Наличие УДИ на ПЗС-матрицах, входящих в состав звездных датчиков, может приводить к невозможности определения прибором параметров ориентации, поэтому разработчикам необходимо искать пути по преодолению указанного негативного воздействия. В ходе проведенных экспериментов было установлено, что охлаждение ПЗС-матриц до отрицательных температур позволяет уменьшить число УДИ практически до нуля, что в сочетании с программно-алгоритмическими решениями позволит звездным датчикам на протяжении длительных сроков функционирования успешно решать свои целевые задачи. Сказанное подтверждает опыт работ в космосе звездных датчиков семейства БОКЗ, имеющих в своих составах охлаждаемые ПЗС-матрицы «Лев-2».