

Цифрами на рис. 8 обозначены кривые: 1 — нормированные значения разности максимального уровня сигнала в кластерах и темного сигнала ПЗС-линейки, облучаемой при мощности дозы 1 рад/с во **включенном** состоянии; 2 — нормированные значения разности максимального уровня сигнала в кластерах и темного сигнала ПЗС-линейки, облучаемой при мощности дозы  $1,2 \cdot 10^{-3}$  рад/с во **включенном** состоянии; 3 — нормированные значения разности максимального уровня сигнала в кластерах и темного сигнала ПЗС-линейки, облучаемой при мощности дозы  $1,2 \cdot 10^{-3}$  рад/с в **выключенном** состоянии.

Графики показывают, что значительных отличий в характере изменения наблюдаемых параметров при испытаниях образцов ПЗС Sony ILX751B на источниках различной интенсивности не отмечено, в отличие от ПЗС-линейки Sony ILX703A, радиационная стойкость которой повышалась при уменьшении интенсивности излучения.

### Выводы

При проведении экспериментальных работ были получены следующие основные результаты.

1. Характеристики ПЗС-линеек подвержены деградации вследствие влияния радиационно-индуцированных дефектов.
2. На скорость изменения характеристик ПЗС может оказывать влияние как электрический режим их работы, так и интенсивность излучения.
3. Наибольшую радиационную стойкость показали образцы ПЗС-линеек, облучавшиеся при низком темпе вноса дозы в выключенном состоянии.
4. При испытаниях ПЗС-линеек Sony ILX703A наблюдалось существенное замедление деградации параметров при понижении интенсивности излучения, в случае ПЗС-линеек Sony ILX751B эффект понижения мощности дозы не оказывал значительного влияния на темп изменения контролируемых параметров.
5. Для использования в существующих проектах в составе ОСД пригодны как ПЗС-линейки Sony ILX703A, так и ПЗС-линейки Sony ILX751B.

## ИСПЫТАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО СОЛНЕЧНОГО ДАТЧИКА НА ПРОТОННОМ УСКОРИТЕЛЕ

*С.В. Воронков, Т.Ю. Дроздова*

Институт космических исследований  
Российской академии наук, Москва

Представлен сравнительный анализ математического моделирования протонного воздействия на работу оптического солнечного датчика и результатов испытаний ОСД на протонном ускорителе.

A comparative analysis of mathematical modeling the proton influence on the optical solar sensor operation together with results of the optical solar sensor testing on the proton accelerator are presented.

При выполнении программы полета космические аппараты и бортовая аппаратура подвергаются воздействию заряженных частиц, в том числе протонов солнечных космических лучей (СКЛ) и галактических космических лучей (ГКЛ). Оптический солнечный датчик предназначен для работы в системах управления ориентацией космических аппаратов. Испытания оптического солнечного датчика (ОСД) на протонном ускорителе проводились с целью получения оценки стойкости электронных компонентов прибора к возникновению одиночных сбоев при воздействии протонов космического пространства.

Вызванные попаданием протонов в микросхемы ОСД одиночные сбои могут приводить к нарушениям штатного функционирования прибора или его отказу. Кроме того, воздействие протонов на оптический блок ОСД приводит к образованию помеховых объектов на изображениях ПЗС-линейки, что в свою очередь может стать причиной возникновения ошибок при определении ориентации.

Исследования влияния протонного излучения на работу оптического солнечного датчика проводились в два этапа:

1. Испытания фотоприемного элемента прибора — ПЗС-линейки — в составе макета ОСД на стойкость к протонному излучению и оценка работоспособности прибора при протонном воздействии с помощью математического моделирования.

2. Испытания штатного оптического солнечного датчика на стойкость к воздействию протонного излучения с точки зрения возникновения одиночных сбоев и возможности определения направления на источник света с заданной точностью.

Первым этапом исследования влияния протонного воздействия на работу ОСД стали испытания лабораторного макета прибора, которые были выполнены на ускорителе протонов в Институте теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ).

К основным задачам, решаемым в ходе выполнения первого этапа эксперимента, относились следующие:

- проверка работоспособности светочувствительного элемента прибора — ПЗС-линейки — в условиях воздействия потока протонов;
- получение данных для математического моделирования и анализа последствий воздействия потока протонов на прибор в режиме штатной работы.

В ходе испытаний прибор ОСД подвергался воздействию потоков протонов с энергиями от 20 до 100 МэВ. Прибор работал в автоматическом режиме, кадры ПЗС-линейки сохранялись на компьютере контрольно-испытательной аппаратуры (КИА). В дальнейшем осуществлялась обработка полученных изображений с целью вычленения тех кадров, которые содержали сигналы, вызванные попаданием протонов на ПЗС-линейку. Путем обработки экспериментальных данных были построены распределения амплитуд сигналов, вызываемых протонами разных энергий при попадании их на ПЗС. Эти распределения характеризуют частоту появления сигналов соответствующих амплитуд при воздействии протонов в пересчете на общее число кадров. Анализ распределений показал, что с увеличением энергии воздействующих на прибор протонов вероятность появления сигналов в ячейках ПЗС-линейки уменьшается. Распределения амплитуд полученных сигналов, независимо от энергий протонов, имеют примерно один и тот же вид, средние значения распределений лежат в диапазоне 10...20 градаций 8-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Переходя от результатов испытаний к работе датчика в условиях космоса при регистрации солнечного света, можно сказать следующее. В соответствии с алгоритмом работы прибора при каждом экспонировании рассчитывается значение порога для последующей отбраковки пикселей, сигналы в которых по амплитуде не превышают данное пороговое значение. Величина порога варьируется от кадра к кадру, но не может быть меньше 20 градаций АЦП. Из результатов эксперимента следует, что значительная часть протонов, попавших на ПЗС-линейку вне изображений щелей (кластеров), будет отсеяна по данному признаку. В дополнение к этому при обработке кадра производится отсев кластеров, ширина которых не превышает 5 пикселей ПЗС-линейки, а сигналы, вызванные попаданием протонов в ПЗС, занимают не более двух пикселей ПЗС-линейки. Таким образом, влияние на алгоритм определения ориентации могут оказать только протоны, вызвавшие появление сигналов в уже засвеченных Солнцем пикселях ПЗС, что может привести к смещению положений энергетических центров кластеров и ошибкам при определении направления на Солнце.

С целью проверки степени влияния сигналов, оставленных протонами, на алгоритм определения направления на Солнце было выполнена следующая процедура. Брался кадр, полученный с прибора ОСД при натурных съемках Солнца. На него накладывались кадры, содержащие образованные протонами сигналы, и производилось суммирование по абсолютному значению амплитуд сигналов соответствующих пикселей ПЗС-линейки. В случае если суммарный сигнал превышал максимальное число градаций АЦП (255), ему присваивалось значение 255 градаций АЦП. После этого суммированный кадр обрабатывался процессорной программой прибора, которая в результате формировала файл, содержащий значения углов направления на Солнце. Описанная процедура наложения и обработки кадров была последовательно выполнена для четырех солнечных кадров, каждый из которых соответствовал разным направлениям на Солнце.

Результаты моделирования показали, что максимальная ошибка определения направления на Солнце составляет 43 угл.с, подавляющее же большинство ошибок мало и не

превышает 5 угл.с. Учитывая, что точность солнечного датчика составляет 1 угл.мин, такими ошибками можно пренебречь.

Не стоит забывать и тот факт, что данные, полученные в результате эксперимента, являются результатом воздействия на прибор высокоинтенсивного пучка протонов. В условиях космического полета такие плотности потока наблюдаться не будут.

В ходе второго этапа испытаний, который также проводился на ускорителе ИТЭФ, воздействию протонного излучения подвергался штатный образец оптического солнечного датчика, который испытывался по штатной циклограмме работы с использованием имитатора Солнца.

К основным задачам, решаемым в ходе выполнения второго этапа эксперимента, относились следующие:

- проверка стойкости электроники ОСД к одиночным сбоям в условиях воздействия протонов;
- проверка работоспособности ПЗС-линейки и программно-алгоритмического обеспечения прибора в условиях воздействия потока протонов, подтверждение правильности математического моделирования воздействия по результатам первого этапа эксперимента.

Прибор ОСД с закрепленным на нем имитатором Солнца располагался на штативе (рис. 1), который позволял изменять угловое положение прибора относительно оси рассеянного пучка в процессе эксперимента. Облучение осуществлялось протонами с энергиями около 150 МэВ.

Управление прибором ОСД и имитатором Солнца выполнялось с помощью компьютера КИА, установленного в пультовой. Эксперимент проводился при трех положениях прибора.

При первом положении протоны падали на прибор под углом не более  $10^\circ$  к нормали оптической поверхности ПЗС-линейки, интенсивность потока протонов составляла около  $3000$  частиц/см<sup>2</sup> за импульс. Импульсы выводились из ускорителя каждые четыре секунды. Во время облучения прибор работал в штатном режиме. Облучение прибора при заданной интенсивности потока продолжалось до накопления суммарного флюенса  $8,1 \cdot 10^6$  частиц/см<sup>2</sup>.



Рис. 1. Прибор ОСД и имитатор Солнца

При втором угловом положении прибора во время облучения угол между направлением протонного излучения и оптической поверхностью ПЗС-линейки составил около  $45^\circ$ . При этом интенсивность потока протонов составила около  $8100$  частиц/см<sup>2</sup> за импульс. В указанном положении был набран флюенс протонов, равный  $3,66 \cdot 10^6$  частиц/см<sup>2</sup>.

В третьем угловом положении прибора ОСД направление протонного пучка было параллельно оптической поверхности ПЗС-линейки. Интенсивность потока протонов в заданном угловом положении составила около  $7700$  частиц/см<sup>2</sup> за импульс. На третьем этапе был набран флюенс, равный  $3,48 \cdot 10^6$  частиц/см<sup>2</sup>.

В итоге суммарный флюенс составил  $1,52 \cdot 10^7$  частиц/см<sup>2</sup>.

При облучении прибор выполнял штатную циклограмму определения направления на источник света имитатора Солнца. Результаты измерений показали, что значения среднеквадратического отклонения направления на источник света не превышают 1 угл.мин (максимальное значение

ошибки составило 48 угл.с) как при воздействии потока протонов, так и после окончания воздействия.

Непрерывность и неизменная частота выдачи информации прибором при облучении его потоком протонов с энергиями порядка 150 МэВ позволяют сделать заключение о работоспособности прибора ОСД в условиях протонного воздействия. За все время эксперимента ни одного сбоя в работе его электронных компонентов зафиксировано не было.

Анализ полученных в ходе эксперимента изображений сигнала ПЗС-линейки показал, что параметры отклика ПЗС-линейки на воздействие протонов значительно отличаются от параметров сигналов, образованных прохождением светового потока имитатора Солнца через маскирующую диафрагму. В указанных изображениях амплитуда сигналов ПЗС-линейки, обусловленных воздействием протонов, не превышает 60 градаций АЦП, а максимальная ширина составляет 5 пикселей. На рис. 2–4 представлены сигналы ПЗС-линейки, полученные при различных условиях эксперимента.

При расчете направления на источник света программно-алгоритмическое обеспечение ОСД позволит парировать отдельно расположенные помеховые объекты на ПЗС-линейке, образованные в результате воздействия протонов.

При совпадении координат сигнала, вызванного попаданием протона на ПЗС, и сигнала, вызванного прохождением света через маскирующую диафрагму, может возникнуть смещение расчетного энергетического центра изображения кластера. Однако вероятность такого события крайне мала, а незначительное смещение расчетного энергетического центра одной из 6...9 щелей не приведет к ухудшению точности определения направления на источник света хуже чем на 1 угл.мин.

Результаты проведенных испытаний показали:

1. Протоны космического пространства могут вызывать появление сигналов различных амплитуд на ПЗС-линейке ОСД. Диапазон амплитуд таких сигналов охватывает все 255 градаций АЦП, но наиболее вероятными являются значения в 10...60 градаций АЦП. Одиночные сигналы, имеющие амплитуды до 20 градаций АЦП, будут отсеяны программным обеспечением

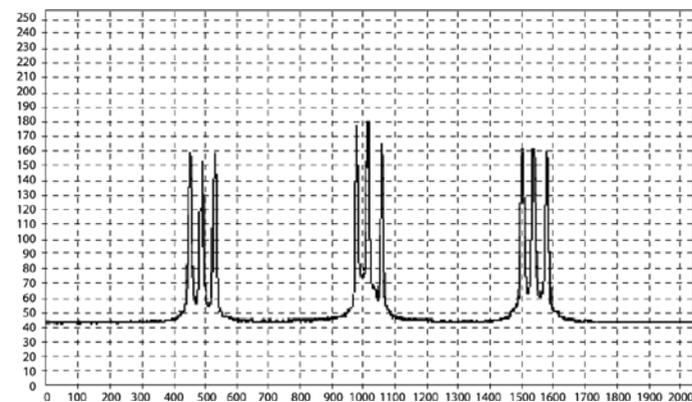


Рис. 2. Имитатор Солнца включен. Воздействия протонным потоком нет

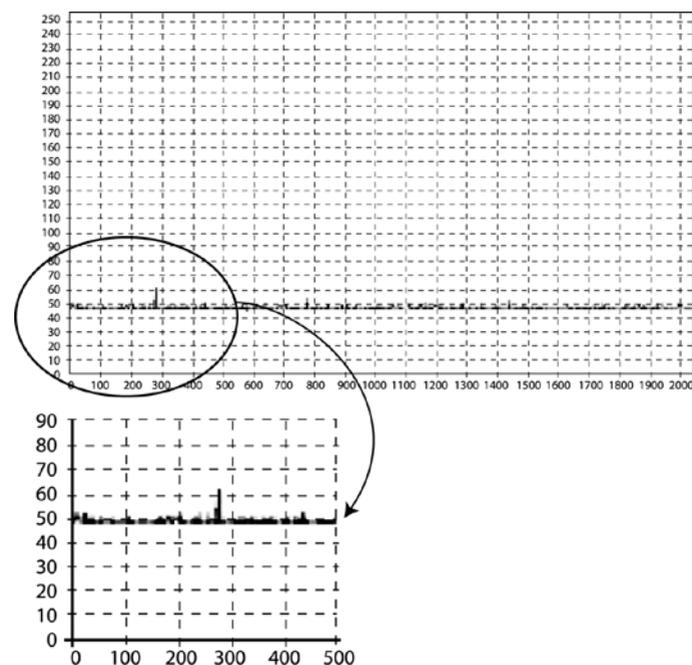
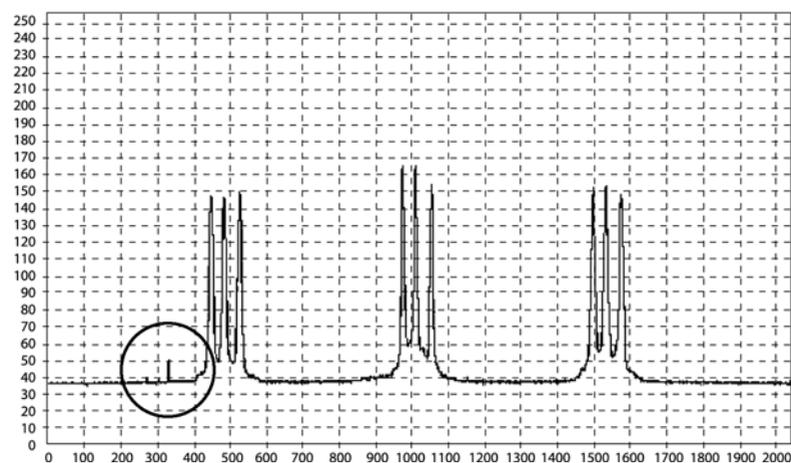


Рис. 3. Имитатор Солнца выключен. Есть воздействие протонным потоком



**Рис. 4.** Имитатор Солнца включен. Есть воздействие протонным потоком

прибора как недостаточно яркие. Так же будут отсеяны сигналы, избежавшие пороговой отсечки, но имеющие размер менее 5 пикселей ПЗС.

2. Ошибки при определении направления на Солнце могут внести лишь протоны, вызвавшие появление сигналов в засвеченных Солнцем ячейках ПЗС-линейки и тем самым приведшие к смещению энергетических центров изображений щелей, но, как показали расчеты, данные ошибки лежат в пределах точностных характеристик самого прибора.
3. В электронике прибора ОСД при суммарном флюенсе протонов  $\sim 1,5 \cdot 10^7$  частиц/см<sup>2</sup> одиночных сбоев не зарегистрировано.
4. С точки зрения стойкости к протонам космического пространства, прибор ОСД может быть признан годным к эксплуатации в составе КА на околоземных орбитах в условиях воздействия радиационных поясов Земли, на геостационарных орбитах и в межпланетных перелетах в условиях воздействия СКЛ и ГКЛ.

## Секция 4 МНОГОЗОНАЛЬНЫЕ СЪЕМОЧНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДЗЗ