

УДК 621.383.724

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ПРОТОНОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СТРОЧНО-КАДРОВОЙ ПЗС МАТРИЦЫ, РАБОТАЮЩЕЙ В КАДРОВОМ РЕЖИМЕ И В РЕЖИМЕ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ И НАКОПЛЕНИЯ

Г. А. Щербина ^{1,2}

¹ Московский физико-технический институт (государственный университет)

² ЗАО «НПО «ЛЕПТОН»

Статья получена 16 апреля 2015 г.

Аннотация. В работе исследованы дефекты, возникающие в строчно-кадровой ПЗС матрице при облучении высокоэнергетичными протонами с энергией 1 ГэВ. Было произведено изучение радиационных дефектов при различных режимах работы фотоприемного устройства (ФПУ): кадровом режиме и режиме временной задержки и накопления (ВЗН). Специальная организация режима ВЗН позволяет локализовать радиационные дефекты вертикального регистра с точностью до пикселя. Произведено исследование поведения дефектов при различных параметрах работы ФПУ, таких как: температура, время накопления в кадровом режиме, время накопления на каждом шаге накопления в режиме ВЗН, период хранения заряда под фазами вертикального регистра, количество шагов накопления. Также разработана и протестирована методика устранения влияния радиационных дефектов непосредственно при проведении лётных испытаний.

Ключевые слова: строчно-кадровая ПЗС матрица, режим временной задержки и накопления, высокоэнергетичные протоны, дистанционное зондирование Земли.

Abstract: In this paper the defects in interline CCD matrix were studied, which appear as a result of its irradiation with high-energy protons. Defects were studied in different operation modes: in frames mode and in time delay and integration (TDI) mode. By using a special organization of TDI mode we were able to localize defects

in vertical register with a precision of one pixel. The dependence of the defects behavior on different system parameters was also studied, such as: temperature, exposure time in frame mode, exposure time of every step of integration in TDI mode, charge storage time in vertical register and number of integration steps in TDI mode. Also a method of removal of the influence of these defects directly during flight tests was developed and tested.

Key words: interline CCD matrix, time delay and integration mode, high-energy protons, Earth remote sensing.

Введение

В настоящее время происходит активное развитие космического оптико-электронного приборостроения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. Неотъемлемой частью таких устройств является фотоприёмное устройство (ФПУ), регистрирующее излучение. Использование в качестве ФПУ строчно-кадровых ПЗС-матриц позволяет решать сразу несколько задач разного типа [1]. Данный фотоприёмник способен решать задачу кадровой съёмки при наблюдении за космическим мусором, звёздами, кометами и др. ФПУ на базе строчно-кадровых матриц также могут быть использованы при решении, казалось бы, несвойственной им задачи дистанционного зондирования Земли с высоким разрешением с использованием ВЗН режима.

При эксплуатации оптико-электронного прибора в околоземном космическом пространстве происходит деградация его компонент вследствие воздействия космической радиации. В магнитосфере Земли можно выделить две области: первая расположена примерно на расстоянии от 300 км (Бразильская аномалия) до 6000 км – внутренний радиационный пояс Земли (РПЗ), вторая область располагается от 12000 км до 40000 км (внешний пояс Земли). Основным компонентом космической радиации для внутреннего пояса Земли являются протоны. Причем максимальная плотность протонов с большей энергией располагается ниже, чем для протонов с меньшей энергией. Так максимальная плотность протонов с энергией 400 МэВ располагается на высоте

1200 км в плоскости экватора, а у протонов с энергией 1 МэВ на высоте 6000 км. Более подробно состав и структура РПЗ рассмотрена в работе [2].

Один из способов минимизации эффектов воздействия радиации является защита основных компонентов прибора. В качестве защиты может выступать алюминиевый или стальной кожух. И чем больше толщина стенок такого кожуха, тем меньше вероятность преодолеть барьер радиационными частицами с малой энергией. Также стоит отметить, что защитный барьер более эффективен для электронов и значительно менее эффективен для протонов [3]. Так суммарная доза за защитой 7,5 мм алюминия практически полностью состоит из протонов. А значит, устранение влияния дефектов, возникающих при воздействии протонов на ФПУ, является приоритетной задачей.

Изменение некоторых параметров, влияющих на работоспособность строчно-кадрового ФПУ при воздействии протонов с разными энергиями, также рассмотрено в работах [4,5].

Таким образом, основная задача данной работы состоит в исследовании радиационных дефектов, а также способов устранения влияния для различных режимов работы строчно-кадрового ПЗС ФПУ, в том числе для нестандартного ВЗН режима.

В процессе данной работы ФПУ облучалось пучком высокоэнергетичных протонов. К основным дефектам ФПУ, возникающим при этом воздействии, относятся: увеличение темновых токов, генерируемых в вертикальных регистрах и в фотодиодах.

В данной работе рассматривается поведение дефектов при различных параметрах и режимов работы ФПУ. К таким параметрам относятся: время накопления в кадровом режиме, скорость переноса заряда по ФПУ, количество шагов накопления, время накопления на каждом шаге накопления, период хранения заряда в вертикальном регистре на каждом шаге накопления. Заметим, что в процессе космической съёмки температура может существенно измениться в первую очередь вследствие выделения тепла самого ФПУ. Поэтому исследование зависимости темнового тока центров повышенной

генерации от температуры, а также устранение влияния этих дефектов на изображении также являются задачами данной работы.

1. Эксперимент

Испытания производились при нормальном падении протонов с энергией 1 ГэВ. Доза облучения составила $1.43 \cdot 10^{10}$ Прот/см². В качестве объекта облучения выступала строчно-кадровая ПЗС матрица КАИ-16070 [6]. Данный фотоприёмник обладает следующими параметрами:

- размер пикселя 7.4×7.4 мкм²;
- шириной вертикального регистра 2.8 мкм;
- ширина фотодиода 2.0 мкм;
- высота фотодиода 5.5 мкм.

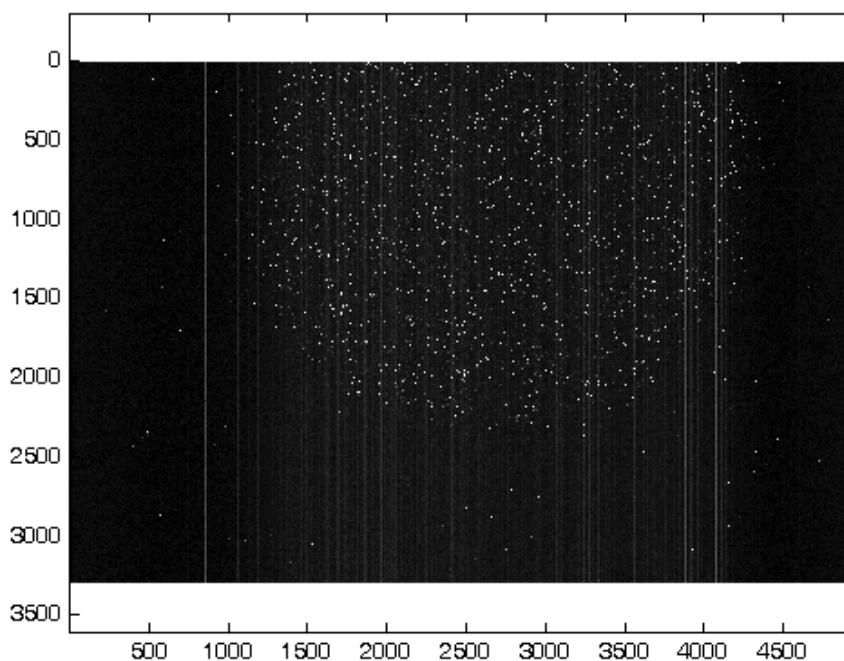


Рисунок – 1 Кадр строчно-кадровой ПЗС матрицы после облучения протонами с энергией 1 ГЭв

В процессе эксперимента фотоприемное устройство облучалось пучком протонов диаметром 20 мм, рисунок – 1. Заметим, что размер пучка был меньше фоточувствительной области ФПУ. Данный факт позволил наблюдать и сравнивать облученные и необлученные образцы непосредственно на одном фотоприёмном устройстве.

2. Кадровый режим

Дополнительные темновые токи образуются вследствие наличия центров повышенной генерации электронно-дырочных пар в области фотодиодов и вертикальных регистров. Ясно, что сигнал радиационного дефекта определяется временем нахождения зарядового пакета вблизи рассматриваемого центра повышенной генерации. При работе ФПУ в кадровом режиме темновой заряд фотодиода зависит от времени накопления, и равен нулю при нулевом времени. Темновой заряд вертикального регистра в свою очередь зависит только от тактовой частоты переноса заряда. Таким образом, если в кадровом режиме время накопления равно или близко к нулю, то сигнал фотоприемника будет состоять только из темнового тока вертикального регистра рисунок – 2. Данный факт позволяет выделить дефекты связанные только с вертикальным регистром.

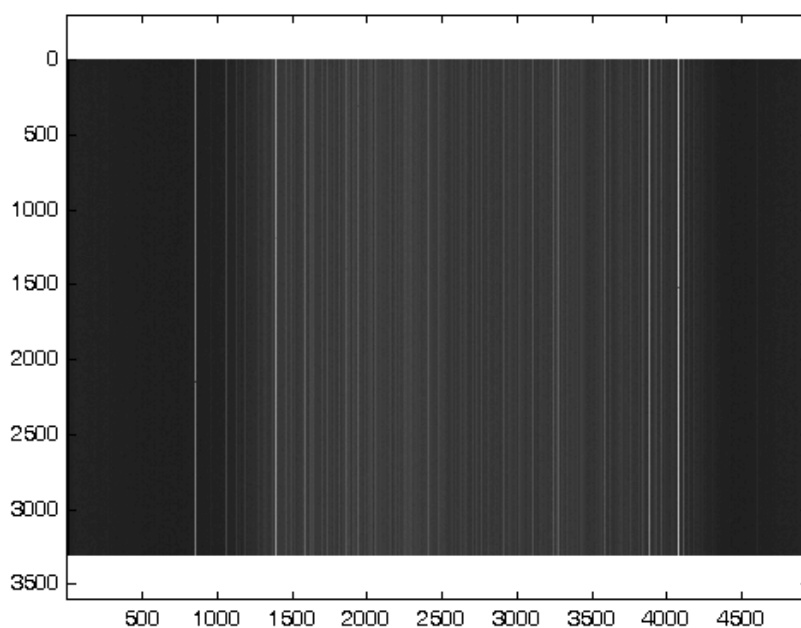


Рисунок – 2 Темновой кадр ФПУ в кадровом режиме
при времени накопления, равном нулю

2.1 Темновой ток в вертикальном регистре в кадровом режиме

В кадровом режиме дефекты вертикального регистра проявляются в виде столбцов с повышенным значением темнового тока рисунок – 2. Это происходит в виду наличия единичных центров повышенной генерации

электронно-дырочных пар под фазами вертикального регистра. Данный факт будет обоснован в пункте 3 данной работы. Рассмотрим поведение таких дефектов при изменении параметров матрицы: времени накопления и температуры.

2.1.1 Темновой ток вертикальных регистров от времени накопления

Интенсивность сгенерированного сигнала определяется временем нахождения зарядового пакета вблизи центра повышенной генерации. Для кадрового режима интенсивность сигнала вертикального регистра определяется временем чтения одной строки ФПУ, и не зависит от времени накопления (рисунок 3).

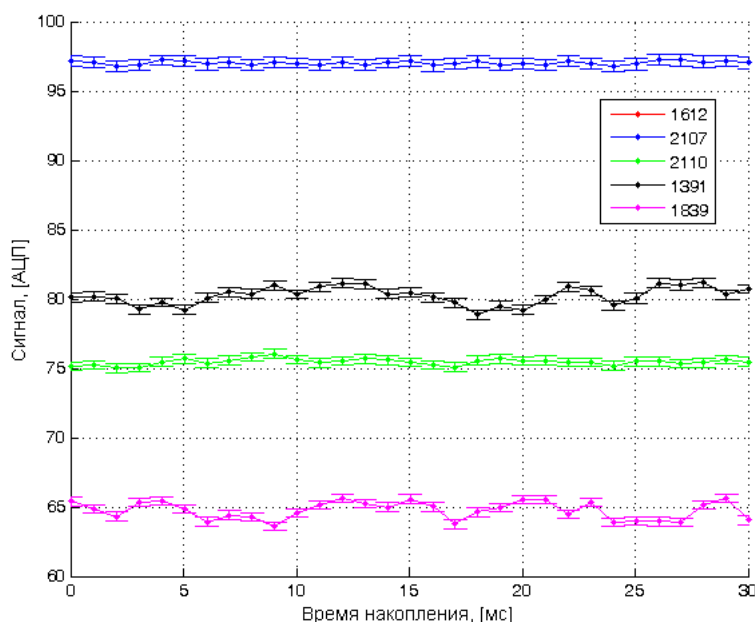


Рисунок – 3 Зависимость сигнала от времени накопления для некоторых (ярких) столбцов

2.1.2 Зависимость темнового тока вертикальных регистров от температуры

К одному из параметров, которые существенно влияют на ионизационные дефекты, можно отнести температуру ФПУ. В качестве основного процесса генерации выступает генерация через промежуточные уровни в запрещенной зоне. Основную роль в процессе генерации играют уровни расположенные вблизи середины запрещенной зоны. Поэтому при

описании величины темнового тока от температуры в стандартном подходе используют формулу[7-9]:

$$I = A \cdot T^{1,5} \cdot e^{\frac{-E_g}{2kT}}$$

где A – коэффициент пропорциональности (для каждого дефекта различный),
 T – температура в градусах Кельвина,
 E_g – ширина запрещённой зоны,
 k – постоянная Больцмана.

Но в случае если разрешенный уровень лежит не строго посередине запрещенной зоны коэффициент в знаменателе показателя экспоненты должен быть варьируемым параметром:

$$\text{Тогда } I = A \cdot T^{1,5} \cdot e^{\frac{-E_g}{\alpha kT}} \quad (1)$$

α – коэффициент характеризующий расположение разрешенного уровня в запрещенной зоне, для случая когда разрешенный уровень находится в середине запрещенной зоны $\alpha = 2$.

Согласно формуле (1) в процессе эксперимента сигнал в каждом столбце аппроксимируется функцией: $S = A \cdot T^{1,5} \cdot e^{\left(\frac{-E_g}{\alpha \cdot k \cdot T}\right)} + B$ (2)

Параметр уровня черного B определяется в процессе наземной калибровки и в дальнейшем его исправление не требуется.

Так как промежуточные уровни различных центров генерации темнового тока располагаются в разных местах запрещенной зоны, параметр α для центров генерации различен. Параметр темпа генерации A также необходимо определить при проведении калибровки. Таким образом, для корректного устранения последствий радиационного излучения для каждого центра генерации необходимо определить два параметра α и A . При исследовании аппроксимация производилась по методу наименьших квадратов. Заметим, что для адекватного представления темпа генерации следует использовать значение нормированного сигнала S для некоторой определенной температуры, например $T=300$ К. Нормировка интенсивности производилась по

вертикальным регистрам, не подвергшихся воздействию облучения. На рисунке 4 представлена зависимость для нескольких центров генерации.

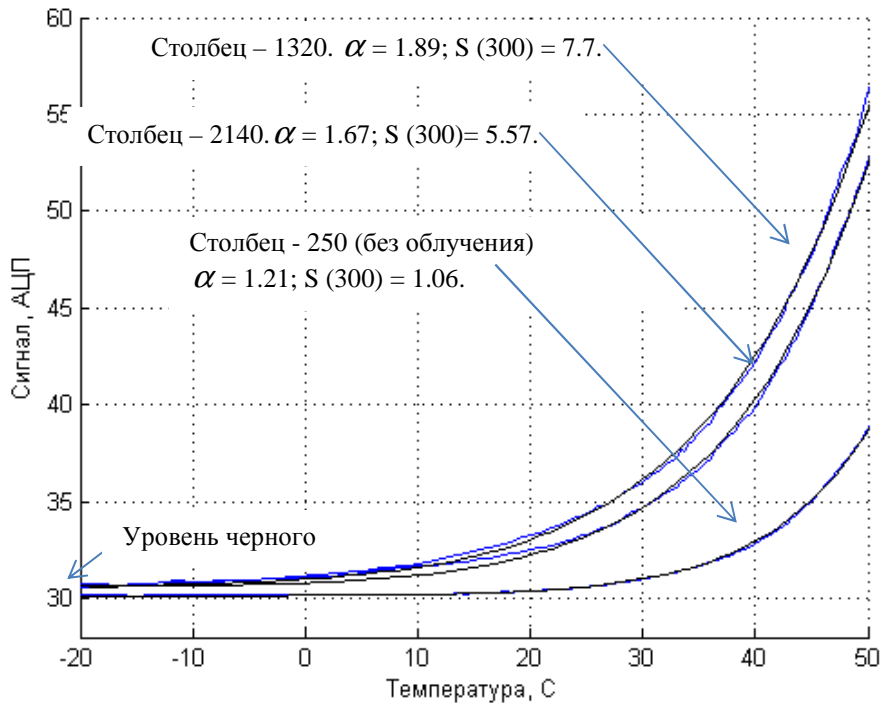


Рисунок – 4 Зависимость сигнала от температуры для нескольких столбцов (вертикальных регистров).

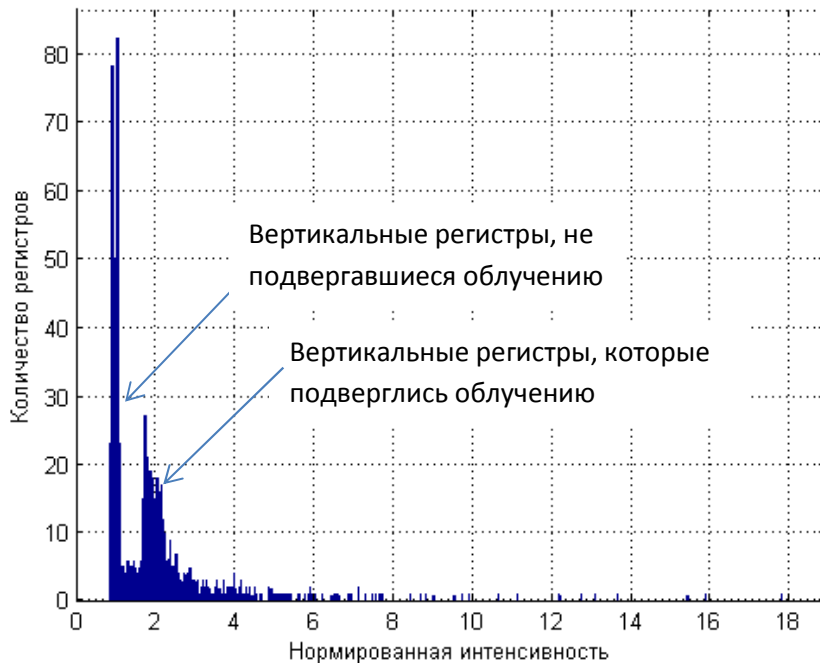


Рисунок – 5 Гистограмма нормированной интенсивности центров повышенной генерации в вертикальных регистрах

На рисунке – 5 представлена гистограмма распределения относительной

интенсивности каждого вертикального регистра. Нормировка интенсивности производилась по вертикальным регистрам, не подвергшихся воздействию облучения.

2.1.3 Корректировка темнового тока вертикального регистра при проведении космических испытаний

При проведении космической съемки возникает задача исправлять дефекты, связанные с радиацией. Один из возможных путей коррекции изображения является последовательное устранение влияния радиационных дефектов. В кадровом режиме сначала при нулевом времени накопления измеряется интенсивность сигнала вертикальных регистров, а потом соответствующий сигнал вычитается из кадра с ненулевым временем экспозиции. Заметим, что вычитаемый сигнал должен учитывать поправку на температуру.

Также калибровочные кадры не должны содержать никакой посторонней засветки. Использование электрической крышки или съемка звездного неба могут удовлетворить это требование.

При эксплуатации оптико-электронного прибора в околоземном космическом пространстве происходит постоянная деградация прибора. Поэтому необходимо производить калибровку устранения последствия радиации непосредственно перед или во время съемки. В процессе проведения съемки температура ФПУ может изменяться в большом диапазоне температур. В первую очередь на изменение температуры непосредственно влияет тепловыделение самой ФПУ. Как было сказано выше дефект характеризуется двумя параметрами – α и A , а, следовательно, необходимо произвести съемку темновых кадров как минимум при двух различных значениях температур ФПУ. Например, измерить темновой сигнал до и после проведения съемки. Данной информации необходимо и достаточно для определения характеристики (формула 2).

Пусть $S_1(n)$ и $S_2(n)$ калибровочные сигналы при температурах T_1 и T_2 радиационного дефекта с порядковым номером n , тогда из (2)

параметры $\alpha(n)$ и $A(n)$ выражаются следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha(n) &= \frac{E_g \cdot (T_1 - T_2)}{k \cdot \lg \left(\left(\frac{S_1(n)}{S_2(n)} \right) \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1.5} \right)} \cdot T_1 \cdot T_2; \\ A(n) &= \frac{S_1(n) \cdot e^{\left(\frac{E_g}{\alpha(n) \cdot k \cdot T_1} \right)}}{T_1^{1.5}}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

И искомый сигнал от дефекта вертикального регистра n при температуре T :

$$S(n) = A(n) \cdot T^{1.5} \cdot e^{\left(\frac{E_g}{\alpha(n) \cdot k \cdot T} \right)}; \quad (4)$$

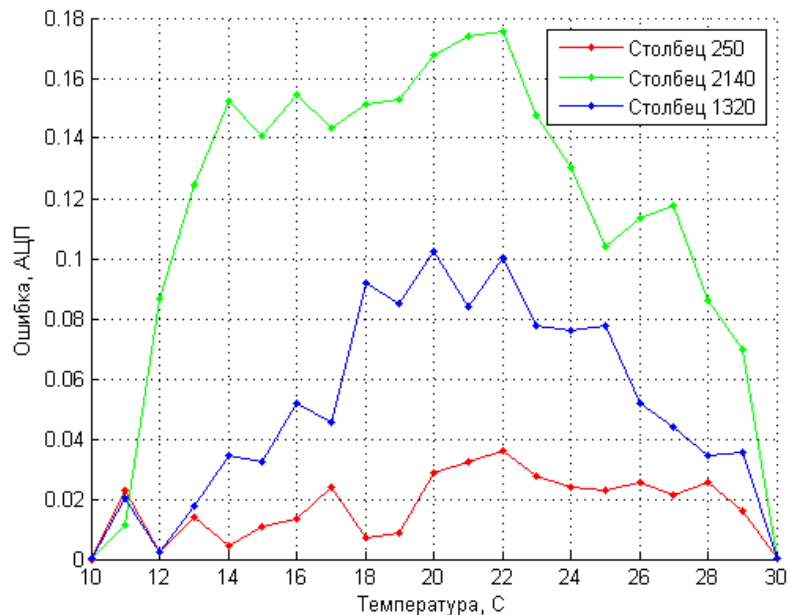


Рисунок – 6 Ошибка аппроксимации для нескольких столбцов. Ошибка аппроксимации не превышает долей уровня АЦП, что значительно меньше шума считывания и квантования.

Пусть температура до начала съемки T_1 , после проведения съемки T_2 . Определим коэффициент эффективности устранения влияния радиации в этом диапазоне температур: $T_1 - T_2$. На рисунке 6 показана ошибка аппроксимации для нескольких столбцов в диапазоне температур: $T_1=10$ С, $T_2=30$ С. Подавление темнового тока в данном диапазоне температур составило более 30 раз.

Также из пункта 2.1.1 видно, что поправка на изменение времени

накопления не требуется.

2.2 Темновой ток фотодиода в кадровом режиме

Для корректного исследования характеристик темнового тока фотодиода необходимо устранить влияние дефектов вертикального регистра. Исправление подробно описано в пункте 2.1.3 данной работы. Рассмотрим поведение темнового тока фотодиодов для различных значений температуры ФПУ и времени накопления.

2.2.1 Зависимость темнового тока фотодиода от времени накопления

Интенсивность сигнала определяется временем нахождения заряда рядом с центром повышенной генерации электронно-дырочных пар. Для фотодиодов таким определяющим временем является время накопления ФПУ – T_n . Также ясно, что при нулевом времени накопления в фотодиоде не успевает накопиться никакой сигнал, а, следовательно, данная зависимость является линейной и проходит через точку (0,0).

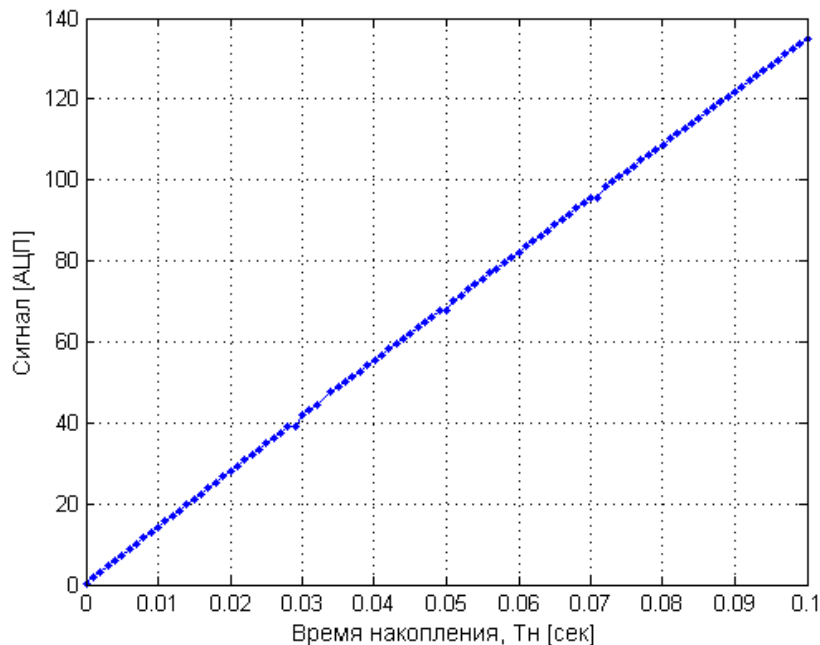


Рисунок – 7 Зависимость темнового тока горячих пикселей от времени накопления

На рисунке 7 представлена зависимость темнового тока фотодиодов содержащих дефекты от времени накопления. Рассматриваемая зависимость аппроксимируется линейной характеристикой с началом в точке (0,0) с

точностью не хуже 1.4 %.

2.2.2 Зависимость темнового тока фотодиода от температуры

Температурная зависимость темновых токов фотодиодов измерялась по серии кадров. Температура в этой серии изменялась от минус 15 градусов до плюс 50 градусов Цельсия.

Подробно рассмотрим зависимость сгенерированного сигнала от температуры. Формула, описывающая данную зависимость совпадает с соответствующей формулой (1) для вертикальных регистров и выглядит следующим образом:

$$I = A \cdot T^{1.5} \cdot e^{\frac{-E_g}{\alpha k T}} \quad (5)$$

где A – коэффициент пропорциональности (для каждого пикселя различный),

T – температура в градусах Кельвина,

E_g – ширина запрещённой зоны кремния (1.12 Эв для $T=300$ К),

α – коэффициент характеризующий расположение разрешенного уровня в запрещенной зоне, для случая когда разрешенный уровень находится в середине запрещенной зоны $\alpha = 2$,

k – постоянная Больцмана.

Согласно (5) в процессе эксперимента сигнал в каждом фотодиоде аппроксимировался соответствующей функцией с параметрами α и A . Методика нахождения основана на аппроксимации температурной зависимости сигнала методом наименьших квадратов. Заметим также, что при измерении дефектов в вертикальном регистре, параметр уровня черного был учтен и дополнительно его вычитать не нужно.

На рисунке 8 представлена зависимость темнового тока фотодиода от температуры для нескольких горячих пикселей различной яркости. В качестве представления темпа генерации используется нормированное значение сигнала S для температуры 300 К. Нормировка производилась по области фотодиодов, не подвергавшихся воздействию радиации. Также видно, что параметр α

близок, но не равняется значению 2.

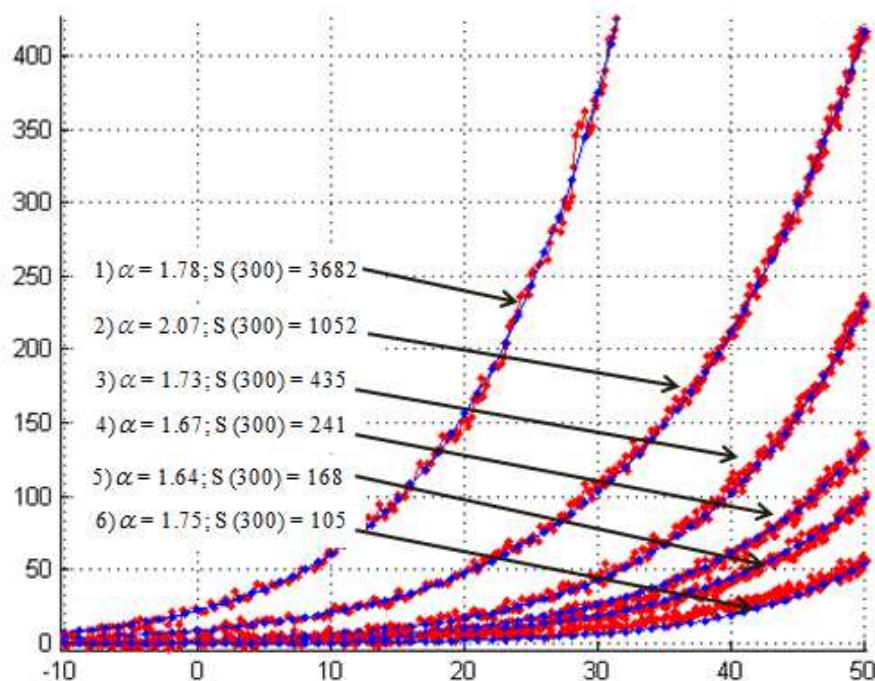


Рисунок – 8 Сигнал от некоторых горячих пикселей (красный график), и аппроксимация данного сигнала (синий график)

2.2.3 Корректировка темнового тока фотодиода

В пунктах 2.2.1 и 2.2.2 были подробно рассмотрены вопросы зависимости темнового тока фотодиодов от температуры и времени накопления. Используя данные зависимости, рассмотрим вопрос устранения влияния дефектов непосредственно при проведении летных испытаний.

Температурная поправка

В процессе космических испытаний не предполагается возможным производить полноценную калибровку в широком диапазоне температур. Поэтому, рассмотрим точность температурной аппроксимации по известному сигналу только при двух температурах до съемки T1 и после съемки T2. На рисунке – 9 представлена зависимость ошибки аппроксимации от температуры, для которой она производится.

Формулы для расчета параметров температурной зависимости аналогичные формулам для дефектов вертикальных регистров (формула 3).

Таким образом, используя всего два изображения при температурах T1 и

T2 можно исправить изображение ФПУ для произвольной температуре T. Так если T1=10 С, а T2=30 С, то абсолютная ошибка представлена на рисунке 9 и коэффициент подавления в данном диапазоне температур составляет более чем в 30 раз.

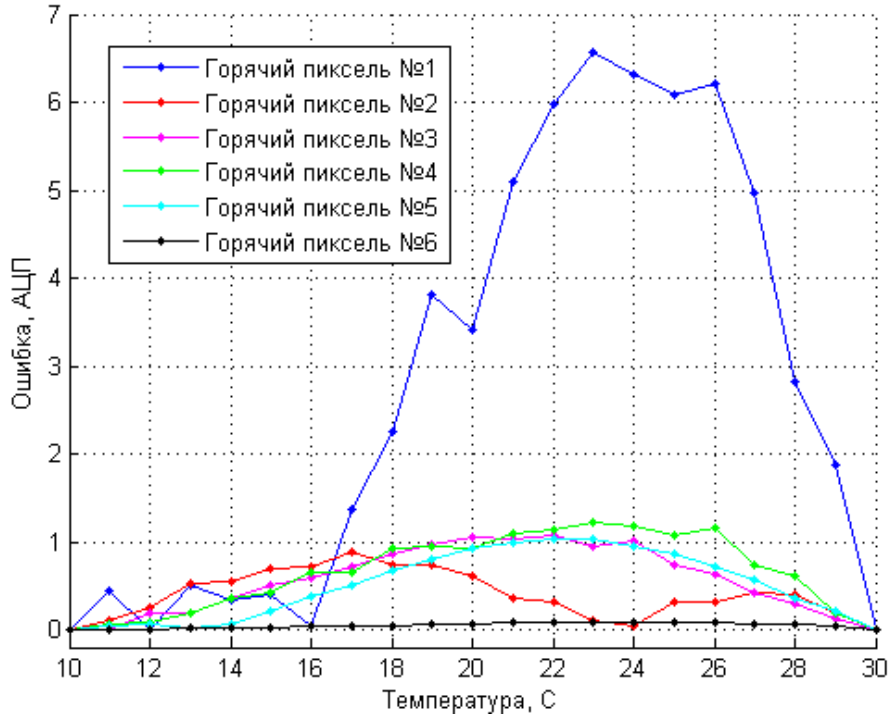


Рисунок – 9 Средняя ошибка аппроксимации, номера пикселей соответствуют номерам для рисунка 8.

Поправка на время накопления

Из пункта 2.2.1 следует, что зависимость сигнала горячих пикселей от времени накопления характеризуется линейным законом с началом в точке (0,0). Тогда для известной интенсивности $I_{hp,Tn0}$ при времени T_{n0} сигнал при времени накопления T_{n1} будет равняться:

$$I_{hp,Tn1} = \frac{I_{hp,Tn0} \cdot T_{n1}}{T_{n0}}$$

3. Устранение последствий воздействия ионизирующего излучения при работе в режиме ВЗН

Для систем дистанционного зондирования Земли часто используют линейные ПЗС фотоприёмники с временной задержкой и накоплением (ВЗН) [10-12]. В данной работе в качестве ФПУ используется строчно-кадровая ПЗС

матрица с реализованным на ней режимом ВЗН.

Режим ВЗН основан на синхронизации скорости изображения по матрице и движения зарядовых пакетов. В строчно-кадровых матрицах движение зарядового пакета происходит в вертикальном регистре, рисунок – 11.

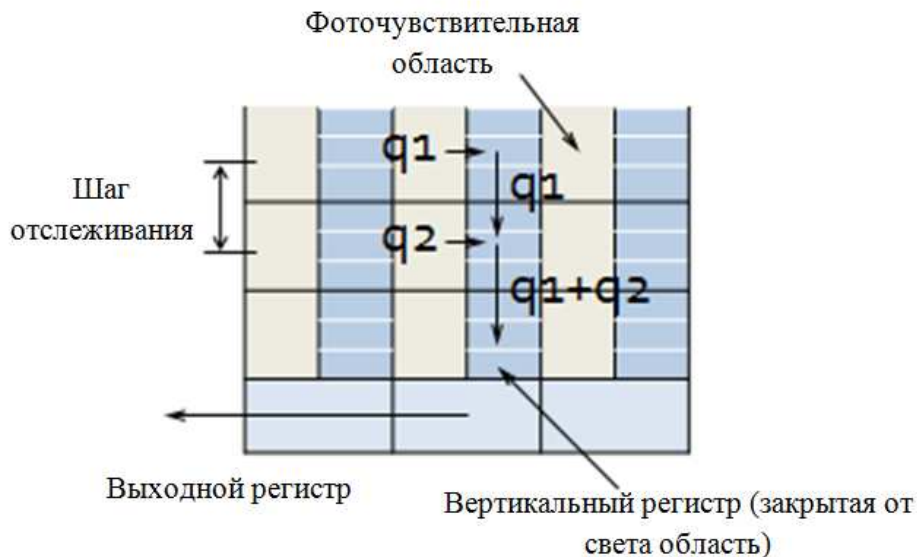


Рисунок – 11 Режим временной задержки и накопления (ВЗН) в строчно-кадровой матрице

При работе строчно-кадрового ФПУ в режиме ВЗН тактовые диаграммы переноса заряда сформированы таким образом, что под разными фазами вертикального регистра заряд находится разное время. А, следовательно, используя режим ВЗН можно локализовать места, в которых происходит генерация темнового тока в вертикальном регистре с точностью до пикселя.. Для корректного исправления изображения строчно-кадровой матрицы работающей в режиме ВЗН от радиационных дефектов необходимо учитывать время накопления на каждом шаге накопления, количество шагов накопления и места генерации темнового тока в фотодиоде и в вертикальном регистре с точностью до пикселя, а так же температуру кристалла ФПУ. Введение температурной поправки для дефектов в вертикальном регистре и в фотодиодах подробно рассмотрено в пункте 2 данной работы.

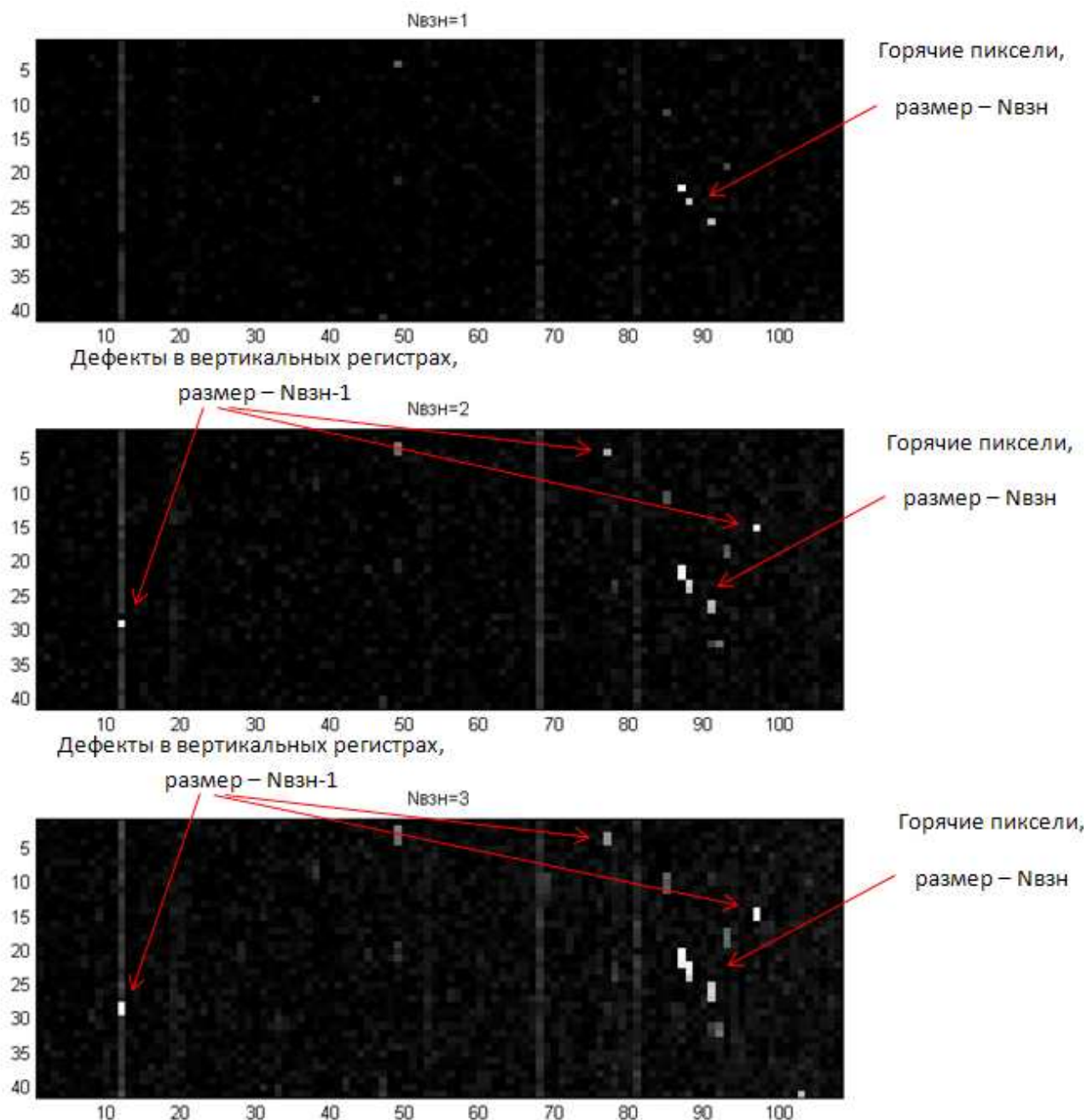


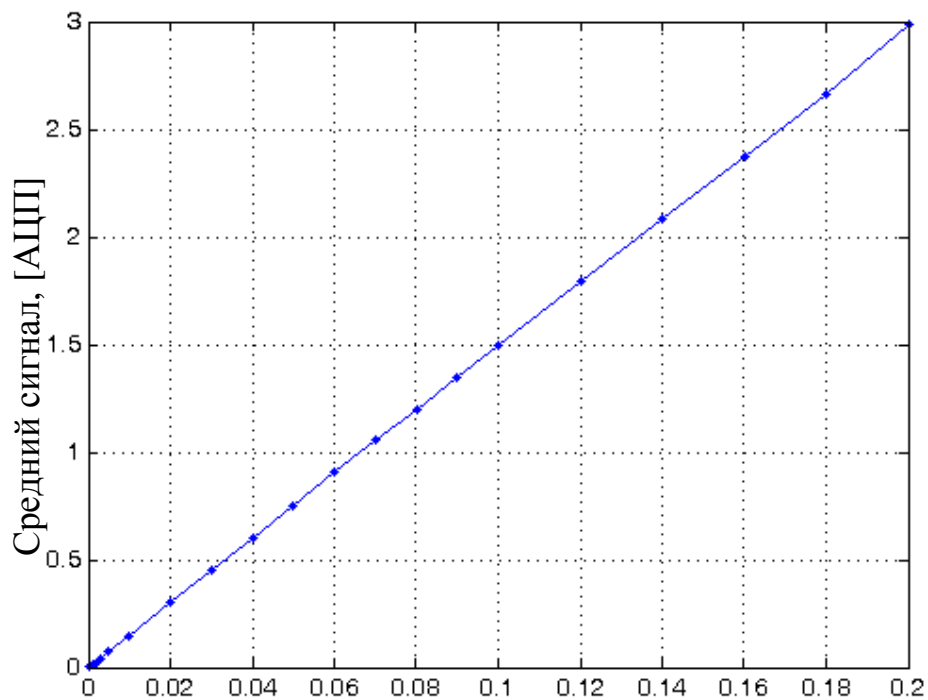
Рисунок – 12 Изображение при различных значениях $N_{взн}$. Дефекты в вертикальных регистрах появляются только при $N_{взн}=2$.

В режиме ВЗН движение зарядовых пакетов вдоль вертикального регистра состоит из двух составляющих: фаза накопления и фаза считывания. Во время фазы накопления заряд находится под фазами вертикального регистра время равное времени пролета изображением одного пикселя. Во время фазы считывания заряд перетекает на один пиксель по вертикальному регистру за тактовое время выходного устройства, умноженное на количество столбцов для данного выхода.

Если в фотоприемнике существует дефект в виде повышенной генерации электронно-дырочных пар в фотодиоде, то результатом будет светлая линия с длиной равной количеству шагов накопления ($N_{взн}$). Ведь именно столько шагов накопления было произведено. В случае если в вертикальном регистре присутствует центр повышенной генерации, то он проявляется в виде вертикальной линии длиной $N_{взн}-1$. Так как именно столько переносов заряда происходит в вертикальном регистре. На рисунке 12 показана последовательность кадров для различных значений количества шагов накопления ($N_{взн}$).

3.1 Дефекты в вертикальном регистре

Темновой ток в вертикальном регистре обусловлен наличием центров повышенной генерации под фазами вертикального регистра. Количество таких центров в одном вертикальном столбце обычно не превышает нескольких штук. В кадровом режиме данный эффект проявляется в виде ярких вертикальных столбцов, а в режиме ВЗН к таким столбцам добавляются дефекты в виде более ярких вертикальных линий длиной $N_{взн}-1$.



Время хранения заряда в вертикальном регистре, [с]

Рисунок – 13 Средний сигнал дефектов вертикального регистра от времени хранения под фазой вертикального регистра

Интенсивность темнового сигнала зависит от периода хранения зарядового пакета под фазой вертикального регистра. Заметим, что данный период хранения может отличаться и быть больше времени накопления. На рисунке – 13 показана такая характеристика для $N_{взн}=10$. График аппроксимируется линейным законом с началом в начале координат с точностью не хуже 1.5 %.

3.2 Дефекты в фотодиоде

Дефекты в фотодиодах возникают из-за наличия центров повышенной генерации в них, и проявляются в виде горячих пикселей в кадровом режиме или вертикальных полос длиной $N_{взн}$ в режиме ВЗН. Интенсивность таких полос в каждом пикселе равна и зависит от времени накопления в фотодиодах. Ясно, что данная зависимость линейная с началом в точке (0,0), то есть при нулевом времени накопления темновой сигнал равен нулю. Зависимость сигнала от времени накопления представлена на рисунке – 14.

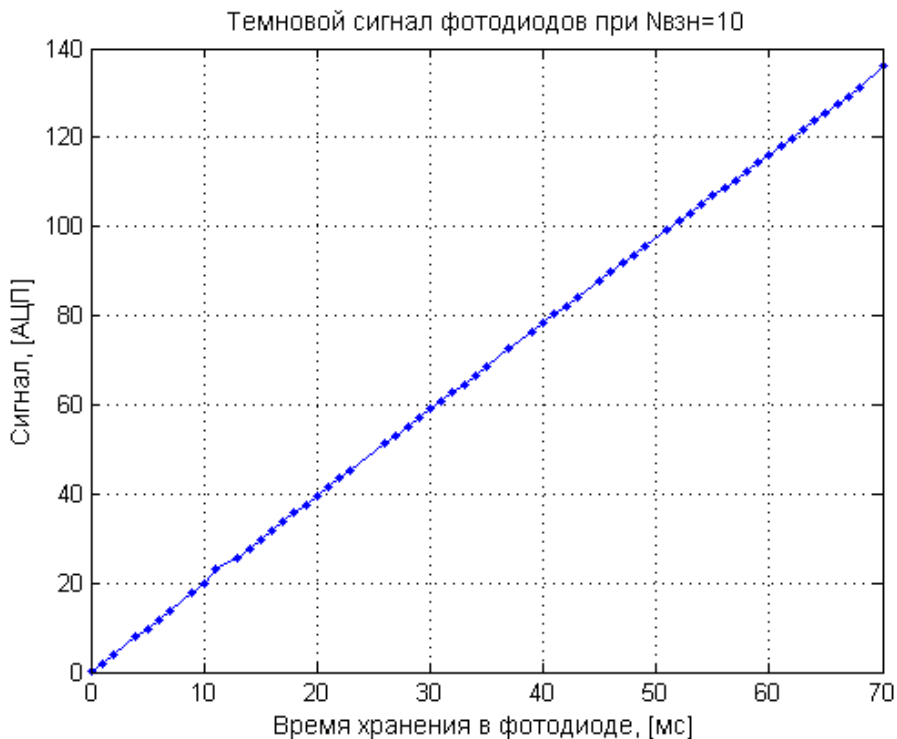


Рисунок – 14 Средний сигнал дефектов фотодиода от времени накопления на каждом шаге ВЗН

3.3 Исправление влияния всех дефектов при работе в режиме ВЗН

Для исправления влияния дефектов на изображение в режиме ВЗН строчно-кадровой ПЗС матрицы выделим отдельно темновые сигналы:

- 1) вертикального регистра фазы переноса;
- 2) вертикального регистра фазы накопления;
- 3) фотодиода.

Таблица – 1 Настройки для калибровки ФПУ в ВЗН режиме

Темновой сигнал	Время накопления в фотодиоде	Время хранения заряда под фазами вертикального регистра	Количество шагов накопления
вертикального регистра для фазы переноса	0	0	-
вертикального регистра для фазы накопления	0	$\neq 0$	≥ 2
фотодиода	$\neq 0$	-	1

В таблице 1 показаны настройки для выделения различных темновых сигналов. Темновой сигнал вертикального регистра накопленного за фазу переноса определяется для времен накопления в фотодиоде и под фазами хранения равными нулю, рисунок – 15а.

Темновой сигнал вертикального регистра накопленного за фазу накопления определяется для времени накопления в фотодиоде равном нулю, и ненулевом времени хранения под фазой вертикального регистра. Для конечного выделения сигнала нужно из рассматриваемого изображения вычесть темновой сигнал вертикального регистра для фазы переноса, рисунок – 15б.

Для выделения темнового сигнала фотодиода удобно использовать следующие настройки: $N_{взн}=1$ и время накопления не равно нулю. Если из такого сигнала вычесть темновой сигнал вертикального регистра, то темновой сигнал фотодиода будет найден рисунок – 15в.

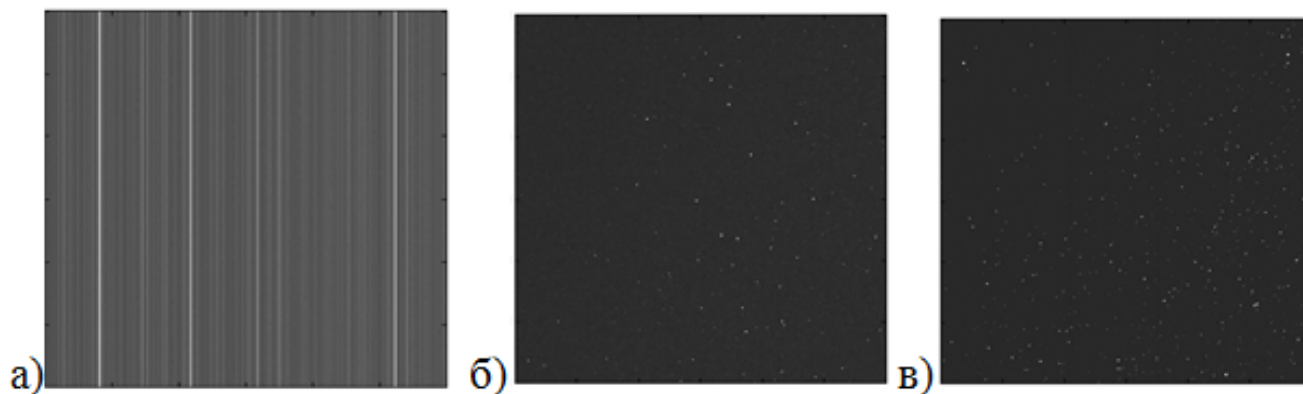
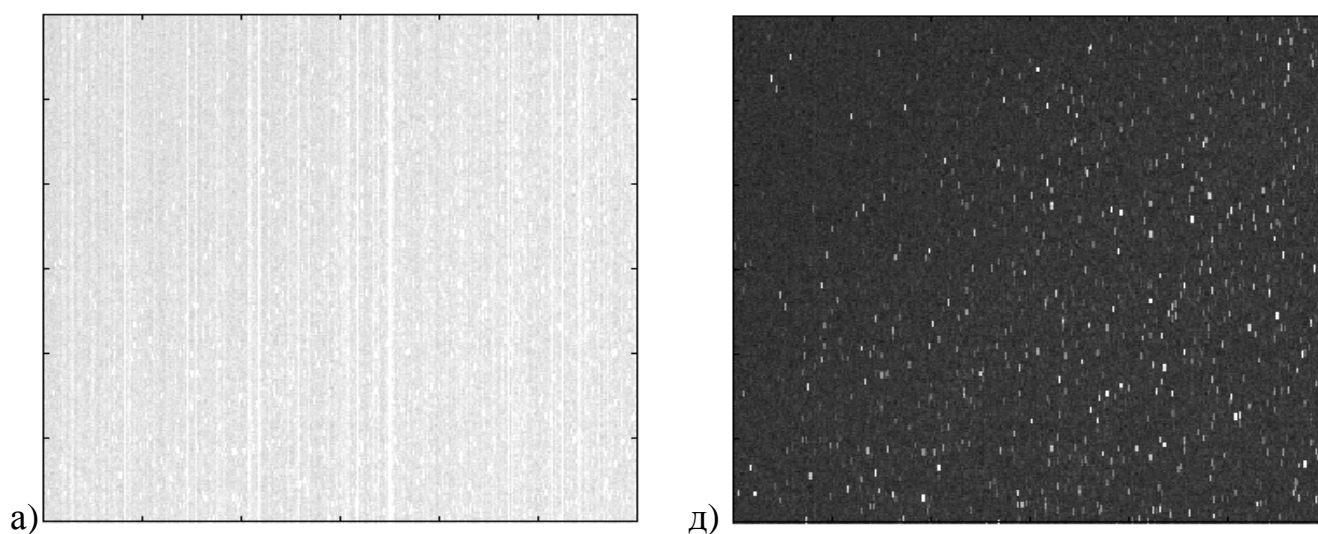


Рисунок – 15 Темновые сигналы: а) вертикального регистра для фазы переноса, б) вертикального регистра для фазы накопления, в) фотодиода.

Таким образом, чтобы исправить изображение строчно-кадровой ФПУ, работающего в режиме ВЗН, необходимо последовательно вычесть из него темновые сигналы:

- фотодиода, с корректировкой на изменения времени накопления, количества шагов накопления и температуры;
- вертикального регистра, с корректировкой на изменение времени хранения под фазой регистра, количества шагов накопления и температуры.



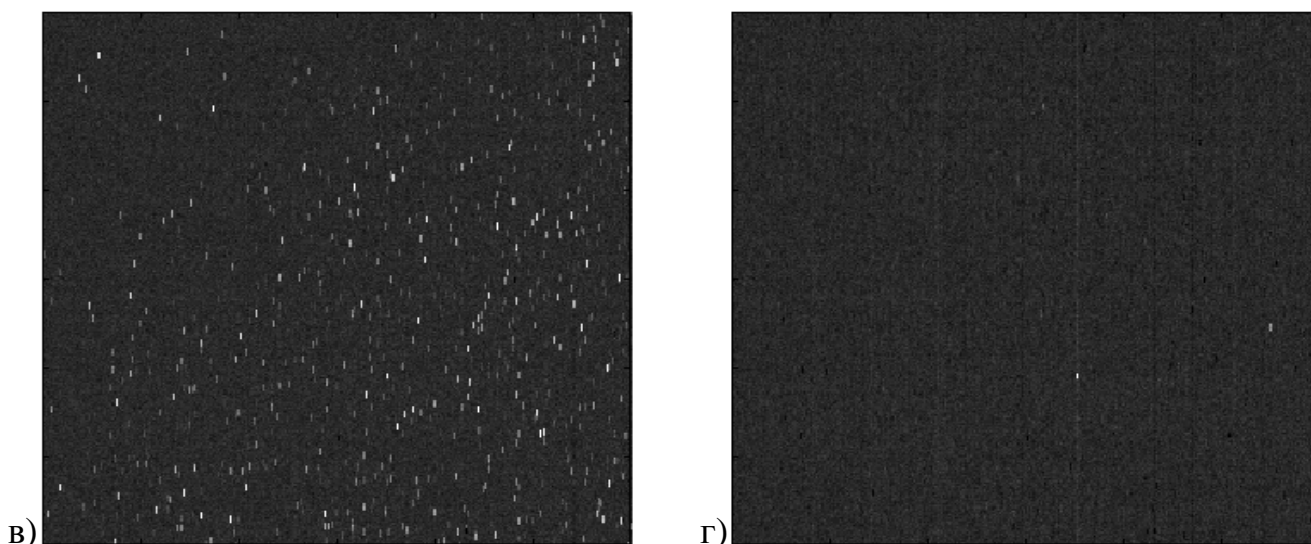


Рисунок – 16 а) Первоначальное изображение, б) после вычитания темнового сигнала вертикальных регистров для фазы переноса; в) после вычитания темнового сигнала вертикальных регистров; г) после вычитания всех темновых токов радиационных дефектов.

На рисунке 16 представлены изображения строчно-кадровой ПЗС матрицы работающей в режиме ВЗН до и после исправления.

Заключение

В данной работе было проведено исследование дефектов возникающих после воздействия высокоэнергетичными протонами в строчно-кадровой ПЗС матрице работающей как в кадровом, так и в ВЗН режимах. К основным дефектам ФПУ, возникающим при этом воздействии, относятся: увеличение темновых токов генерируемых в вертикальном регистре и в фотодиодах.

В работе исследовалось поведение радиационных дефектов для различных параметров фотоприемного устройства. В кадровом режиме рассматривалось поведение дефектов при различных временах накопления и температурах фотоприёмника.

Используя режим ВЗН строчно-кадровой матрицы можно локализовать центры повышенной генерации в вертикальном регистре с точностью до пикселя. В режиме ВЗН для адекватного исправления радиационных дефектов необходимо учитывать время накопления на каждом шаге накопления,

количество шагов накопления, период хранения заряда под фазами вертикального регистра, а также температуру кристалла ФПУ.

Стоит заметить, что поведение радиационных дефектов ФПУ от других производителей (Sony - Япония, Пульсар - Россия) являются схожими с поведением дефектов, рассмотренными в данной работе.

В процессе радиационного испытания, только часть матрицы ФПУ подвергалась воздействию протонов, рисунок – 1. Данный факт позволил произвести адекватное сравнение характеристик фотоприёмника с облучением и без облучения.

Также в данной работе показан алгоритм проведения калибровки радиационных дефектов непосредственно при проведении лётных испытаний. Данная калибровка устраняет влияние радиационных дефектов для произвольных параметров работы ФПУ как в кадровом режиме, так и в режиме ВЗН.

Литература

1. Щербина Г.А. “Реализация режима ВЗН на базе строчно-кадровой ПЗС матрицы”, Журнал Радиоэлектроники, №6, 2014
2. Панасюк М.И., Новиков Л.С., “Модель космоса”, Том 1, М-КДУ, 2007
3. Paul W. Marshall, Cheryl J Marshall, “Radiation Damage Mechanisms in CCD Imagers”, 2000
4. P.P.K.Lee, D.A.Thompson, D.L.Modney, “Total Ionizing Dose Gamma and Proton Radiation Testing on a COTS Interline CCD with Microlens”, Radiation Effects Data Workshop, IEEE, 2005
5. Gordon R. Hopkinson, “Comparison of CCD Damage Due to 10- and 60- MeV Protons”, Transactions of Nuclear Science, IEEE, 2003
6. “KAI-16070 Device Performance Specification”, 2013. // [Электронный ресурс]. URL: www.truesenseimaging.com/technologies/truesense-7-4-micron-interline-transfer-ccd-platform/43-KAI-16070
7. “CCD Image Sensor Noise Sources”, Kodak, 2005
8. С.М. Рывкин “Фотоэлектрические явления в полупроводниках”, 1963

9. В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников “Физика полупроводников”, 1990
10. В. Ostman. "TDI CCDs are still the sensors of choice for demanding applications ", Laser Focus World, 2010
11. H.- S. Wong, Y. L. Yao, and E. S. Schlig, "TDI Charge-Coupled Devices: Design and Applications," IBM Journal Research Development, 1992
12. А. И. Бакланов, “Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения”, 2010, Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета