

УДК 621.383.724

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА ВЗН НА БАЗЕ СТРОЧНО-КАДРОВОЙ ПЗС МАТРИЦЫ

Г. А. Щербина^{1,2}

¹ Московский физико-технический институт (государственный университет)

² ЗАО «НПО «ЛЕПТОН»

Статья получена 25 июня 2014 г.

Аннотация. В работе исследована возможность создания многофункциональной оптико-электронной системы, способной одновременно решать задачу наблюдения за земной поверхностью и осуществлять съемку космических объектов. Показано, что в качестве такой системы может выступать оптико-электронная камера на базе строчно-кадровой ПЗС матрицы. Произведено описание алгоритма работы матрицы в режиме временной задержки и накопления (ВЗН). Приведены результаты экспериментальных исследований основных частотных и энергетических характеристик строчно-кадровой ПЗС матрицы, работающей в режиме ВЗН.

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

Abstract: In this paper we study the possibility of creating a multifunctional optoelectronic system capable of performing both Earth surface observation and space objects survey. It is shown that an optoelectronic camera using an interline CCD matrix can act as such system. A description of the interline CCD matrix operating procedure in time delay and integration (TDI) mode is given. Measurement result data is provided for main energy and modulation transfer characteristics of the implementation of TDI mode interline CCD.

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

1. Введение

В 1970 г. Сотрудники фирмы Bell Laboratories Boyle и Smith предложили и реализовали экспериментальный образец, построенный по принципу зарядовой связи (ПЗС) [1]. Так как фотоприёмные устройства (ФПУ), построенные по этому принципу, обладают относительно малыми уровнями собственных шумов, высокой квантовой эффективностью, высоким динамическим диапазоном и широким спектральным диапазоном, то ПЗС ФПУ нашли широкое применение в промышленной и любительской фотографии, а так же при решении научных и военных задач [2].

ПЗС-фотоприемники широко используются в аппаратуре космических аппаратов (КА) при решении задач дистанционного зондирования Земли, наблюдения за звездами, космическим мусором [3].

Для систем дистанционного зондирования Земли обычно используются линейные ПЗС-фотоприемники или ПЗС ФПУ с временной задержкой и накоплением (ВЗН) [4-6]. Режим ВЗН позволяет значительно увеличивать чувствительность прибора по сравнению с линейным фотоприемником без ухудшения пространственного разрешения в режиме заметания "push broom".

При решении задач, связанных с астрономическими наблюдениями, наблюдением за космическим мусором, обычно используются кадровые ПЗС-матрицы.

В последнее время имеются примеры использования строчно-кадровых матриц и для решения задач дистанционного зондирования Земли. В таких строчно-кадровых матрицах реализован режим ВЗН, позволяющий получать высокую чувствительность не хуже, чем в традиционных ПЗС ВЗН матрицах.

При решении ряда задач, например при создании малых космических аппаратов, разрабатываемых в рамках студенческих проектов, перспективным направлением является создание аппаратуры, способной выполнять сразу несколько задач. Обычно к таким КА не предъявляется высоких требований по производительности, и поставленные задачи могут решаться последовательно одной и той же аппаратурой.

Основной целью настоящей работы является разработка фотоприемного устройства, способного одновременно решать следующие задачи:

съемка земной поверхности в широком диапазоне условий наблюдения;

наблюдение за звездами;

наблюдение за космическим мусором.

Для реализации высокого пространственного разрешения при неблагоприятных с точки зрения освещенности условиях наблюдения в первой задаче требуется использование режим ВЗН. Характерной особенностью двух последних задач является требование получения кадров изображения.

Таким образом, в процессе данной работы была произведена разработка фотоприемного устройства (ФПУ), способного работать как в режиме ВЗН, так и в режиме кадровой съемки.

За основу разработки такого ФПУ была взята строчно-кадровая ПЗС матрица, стандартный режим у которой - кадрковая съемка. В данной работе показана возможность реализации режима ВЗН на выбранной строчно-кадровой ПЗС матрице, разработано ФПУ, позволяющее по команде производить съемку или в кадровом режиме или в режиме ВЗН в зависимости от решаемой задачи, проведено исследование основных характеристик ФПУ на экспериментальном образце.

2. Организация режима ВЗН на базе строчно-кадровой ПЗС матрицы

Принцип работы режима ВЗН основан на накоплении сигнала от одного (движущегося) объекта. Движение объекта должно быть синхронизовано с движением зарядовых пакетов по матрице.

В ЗАО НПО «ЛЕПТОН» был реализован режим временной задержки и накопления на базе строчно-кадровой ПЗС матрицы. Принцип ВЗН в данной реализации достигается за счёт синхронизации движения зарядовых пакетов и скорости изображения на матрице. Заметим, что в стандартных ПЗС ВЗН фоточувствительная область и область переноса заряда совпадают. В свою очередь в строчно-кадровой реализации режима ВЗН накопление заряда производится в фотодиодах, а зарядовые пакеты перемещаются в защищенных

от света вертикальных регистров.

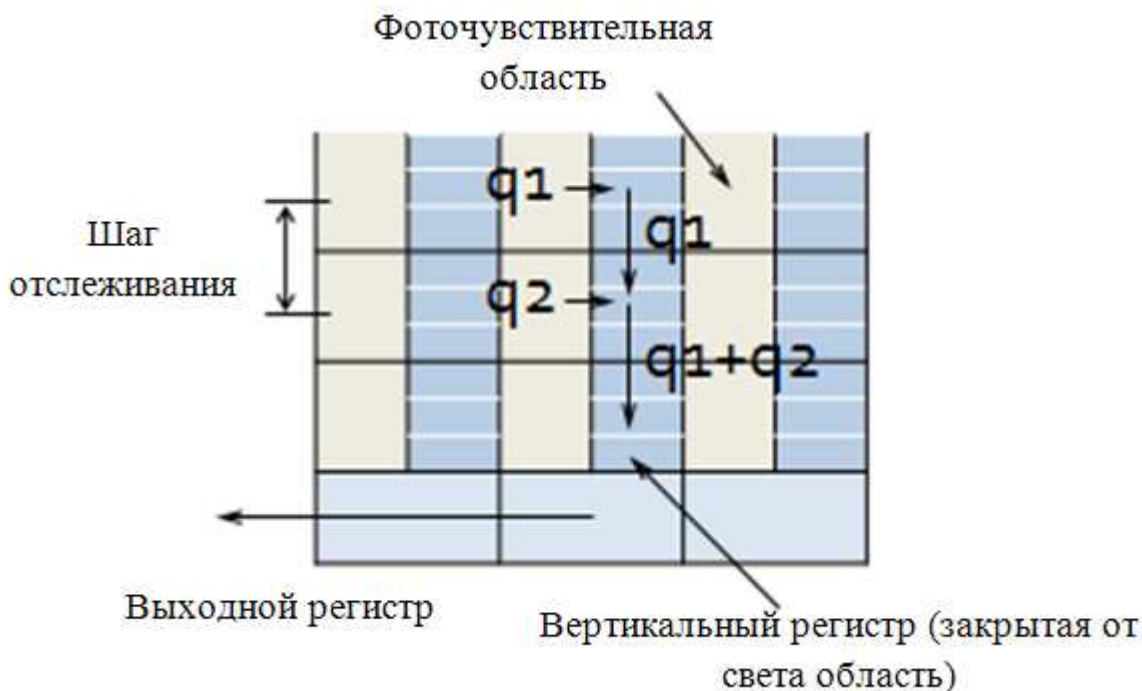


Рис. 1. Процесс накопления строчно-кадровой ПЗС матрицы, работающей в режиме ВЗН

На рисунке 1 показана работа строчно-кадровой ПЗС матрицы в ВЗН режиме. Функционирование ФПУ состоит из двух основных стадий: накопления и считывания.

Более подробно остановимся на процессе накопления сигнала. Рассмотрим элемент изображения, проецирующийся на первую строку матрицы. За время, равное времени перемещения изображения на один шаг отслеживания, произойдет накопление сигнала от объекта - q_1 . Сразу после этого сигнал q_1 перемещается под фазу вертикального регистра (голубой цвет) и на соседнюю снизу строку. В течение следующего шага накопления от выбранного элемента изображения формируется сигнал - q_2 , который добавляется к первоначальному сигналу. Таким образом, сигнальный заряд увеличился вдвое, а при использовании большего числа строк сигнальный заряд возрастает в пропорциональное количество раз.

На рисунке 2 представлен процесс считывания строчно-кадровой ПЗС матрицы, где количество шагов накопления равно $N_{\text{ВЗН}}$, а общее количество

строк $N_{\text{строк}}$.

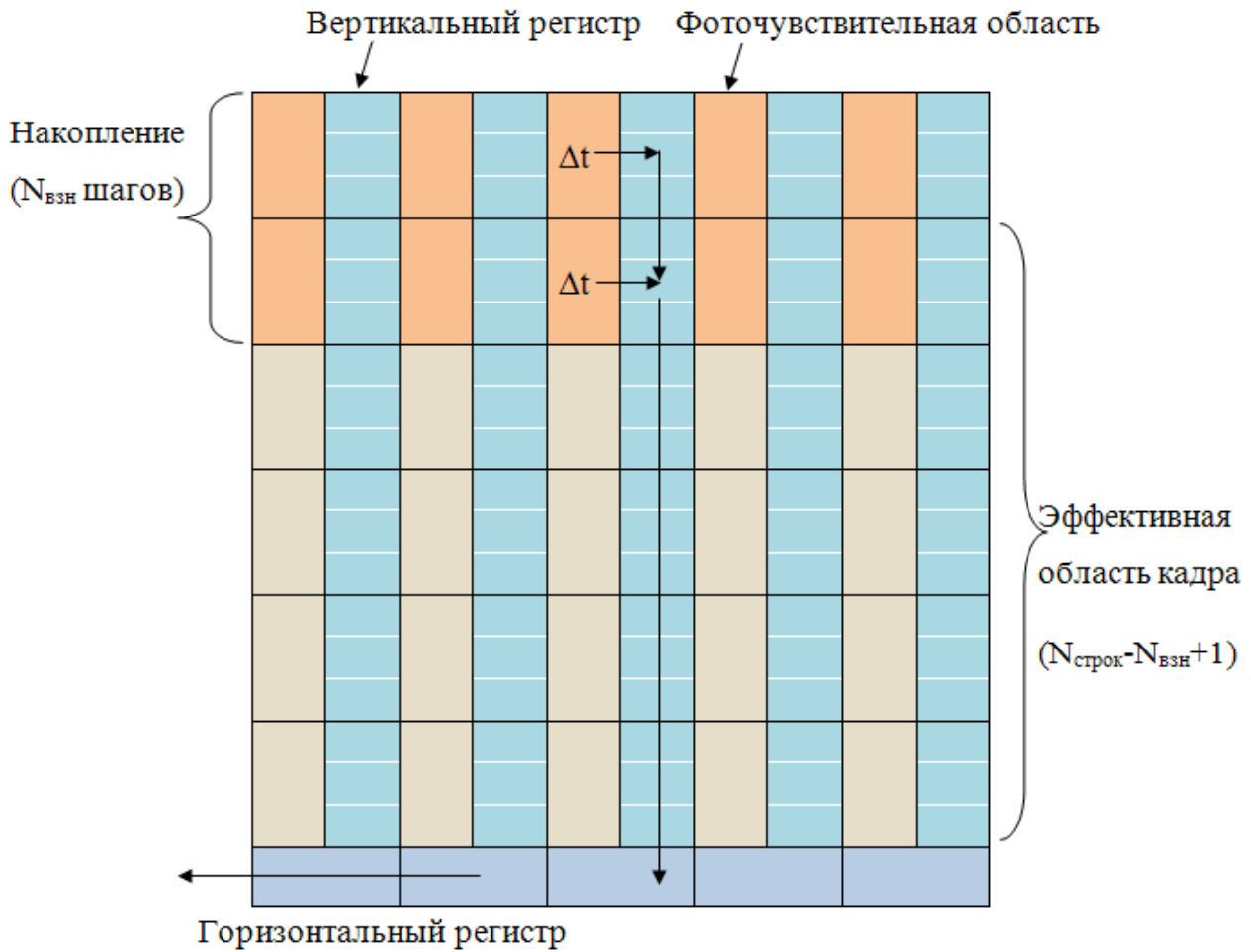


Рис. 2. Процесс считывания строчно-кадровой ПЗС матрицы работающей в режиме ВЗН

После операции накопления осуществляется процесс считывания накопившегося кадра. Из рисунка 2 видно, что верхние $N_{\text{взн}}-1$ строк не участвуют в формировании изображения. Заметим, что это значение значительно меньше общего количества строк стандартного широкоформатного строчно-кадрового ФПУ. Так же величина зарядового пакета ограничивается более глубокой зарядовой ёмкостью вертикального регистра, а не ёмкостью фотодиода.

Заметим, что на этапе накопления сигнала зарядовые пакеты могут перемещаться как вниз, так и вверх по вертикальному регистру. Поэтому строчно-кадровая реализация режима ВЗН опционально позволяет отслеживать

изображение в двух направлениях.

В стандартных ВЗН ПЗС матрицах режим реверсивного перетекания зарядов так же возможен [6], но для реализации “реверса” необходимо значительно усложнить внутреннее устройство фотоприёмника. А именно, в таких фотоприёмниках необходимо реализовать большее количество секций и выходных регистров.

3. Сравнительный анализ режима ВЗН на базе строчно-кадровой матрицы и стандартной ПЗС ВЗН матрицы

Перечислим преимущества предложенной организации режима ВЗН на базе строчно-кадровой ПЗС матрицы.

- Основное преимущество заключается в способности одновременного решения сразу нескольких типов задач. Используя эти ФПУ в режиме кадровой съёмки можно эффективно решать такие задачи, как наблюдение за звёздами или наблюдение за космическим мусором. А использование режима ВЗН позволяет осуществлять высокочувствительную съёмку земной поверхности.

- Количество шагов накопления может быть любым, и оно не ограничено количеством реализованных секций, как в ПЗС ВЗН матрицах.

- В стандартных ВЗН матрицах выходная информация представляется в виде последовательности линеек, а у предложенной реализации в виде последовательности кадров. Таким образом, в строчно-кадровых матрицах соблюдается жесткий растр пикселей в кадре.

- В строчно-кадровой реализации режим реверсивного отслеживания изображения выбирается опционально, а в стандартной ПЗС ВЗН матрице для этого необходимо существенно усложнить устройство ФПУ как на физическом, так и на алгоритмическом уровне. А именно, необходимо реализовать дополнительные секции накопления и увеличить количество выходных регистров.

В свою очередь, основным недостатком предложенной организации ВЗН на базе строчно кадровой матрицы является увеличенный смаз изображения. В

стандартных ПЗС ВЗН ФПУ перетекание зарядов происходит прямо в столбце пикселей, количество переносов заряда на один пиксель равняется количеству реализованных фаз. В сточно-кадровых матрицах перетекание зарядов происходит в защищённом от света вертикальном регистре с шагом дискретизации один пиксель. Таким образом, в стандартных ВЗН ПЗС матрицах осуществляется более детальное отслеживание изображения, а значит функция передачи модуляции (ФПМ) смаза изображения у стандартной реализации ВЗН выше, рисунок 3.

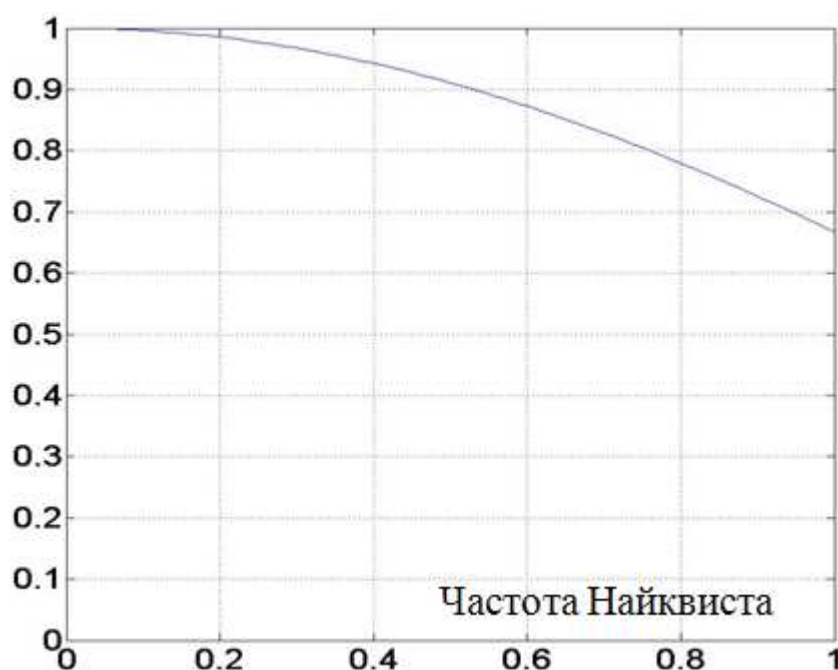


Рис. 3. Отношение $\text{ФПМ}_{\text{смаза}}$ строчно-кадровой ПЗС матрицы к $\text{ФПМ}_{\text{смаза}}$ стандартной трёхфазной ВЗН ПЗС при одинаковом размере пикселя ФПУ

4. Максимально допустимая скорость бега изображения строчно-кадровой ПЗС ФПУ, работающей в режиме ВЗН

Одним из важных параметров ФПУ, используемых при решении задач ДЗЗ, является общая скорость выходных регистров фотоприёмника. В режиме ВЗН выходная скорость накладывает ограничение на максимально допустимую скорость бега изображения.

Рассмотрим процесс формирования кадра и найдем максимально

допустимую скорость бега изображения для нашей реализации. В процессе накопления кадра в строчно-кадровой матрице, работающей в режиме ВЗН, происходит уменьшение эффективного количества строк на $N_{\text{взн}}-1$. Обычно вследствие рассогласования скоростей бега изображения максимальное число шагов накопления ограничивается 256. Помимо этого для сшивки кадров необходимо дополнительное количество строк - $N_{\text{сшивки}}$. Таким образом, если общее количество строк - $N_{\text{стр}}$, то:

$$N_{\text{эфф.стр}} = N_{\text{стр}} - (N_{\text{взн}} - 1) - N_{\text{сшивки}} / 2 \quad (1)$$

Максимальная скорость бега изображения тогда составляет:

$$V_{\text{б.и.}} = N_{\text{эфф.стр}} * d_{\text{рпх.стр}} * f_{\text{вых}} / (N_{\text{эфф.стр}} + N_{\text{сшивки}} / 2) / N_{\text{столбцов}} \quad (2)$$

где: $d_{\text{рпх.стр}}$ – размер пикселя по строке;

$f_{\text{вых}}$ – общая частота выходных регистров.

В ЗАО НПО ЛЕПТОН в качестве экспериментального образца использовалась строчно-кадровая ПЗС матрица КАИ-08050[8], основные параметры которой указаны в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики исследуемой строчно-кадровой ПЗС ФПУ КАИ-08050

Параметр	Значение
Архитектура	Строчно-кадровая ПЗС, прогрессивная развёртка
Количество эффективных пикселей	3320 x 2472
Размер пикселя [мкм]	5.5 x 5.5
Размер изображения [мм]	18.13 x 13.6
Количество выходов	1, 2 или 4
Зарядовая ёмкость фотодиода [e]	20000
Зарядовая ёмкость вертикального регистра [e]	45000
Шум считывания [e] (f=40 MHz)	12

Темновой ток [e/s]	
фотодиод	7
вертикальный регистр	140
Динамический диапазон [dB]	64
Максимальная частота выходного регистра [MHz]	40

Таким образом, если для сшивки используется 300 строк, то количество эффективных строк в одном кадре для выбранного фотоприёмника составляет $N_{\text{эфф.стр}} = 2059$. В таблице 2 представлены основные значения максимально допустимой скорости бега изображения при выходной частоте $f_{\text{вых}}$.

Таблица 2. Максимально допустимая скорость бега изображения

fout [MHz]	Максимально допустимая Vб.и. [мм/сек]
40	61
80	123
160	247

Заметим, что для высоты спутника – 500 км, размера пикселя - 5.5 мкм и пространственного разрешения - 1 м скорость бега изображения в плоскости ФПУ составляет – 39 мм/сек.

5. Экспериментальные исследования основных характеристик строчно-кадровой ПЗС матрицы работающей в режиме ВЗН

В качестве экспериментального образца использовалась строчно-кадровая ПЗС матрица КАИ-08050. Основные параметры исследуемого ФПУ приведены в таблице 1. В данной главе проверяется работоспособность реализованного

режима ВЗН, а именно: измеряется зависимость чувствительности режима ВЗН от числа шагов накопления, производится измерение величины максимальной зарядовой ёмкости и измерение основных частотно передаточных характеристик режима ВЗН.

5.1. Проверка чувствительности реализованного режима ВЗН для разного количества шагов накопления ВЗН

Режим ВЗН предназначен для увеличения чувствительности прибора. При увеличении количества задействованных шагов накопления происходит пропорциональное увеличение чувствительности ФПУ. Подтверждение этого свойства является неотъемлемым этапом проверки работоспособности режима ВЗН.

На рисунке 4 изображен стенд для измерения относительной чувствительности прибора. В качестве источника равномерного по времени и пространству излучения выступает фотометрический шар. Исследуемая камера расположена непосредственно рядом с выходным зрачком шара.

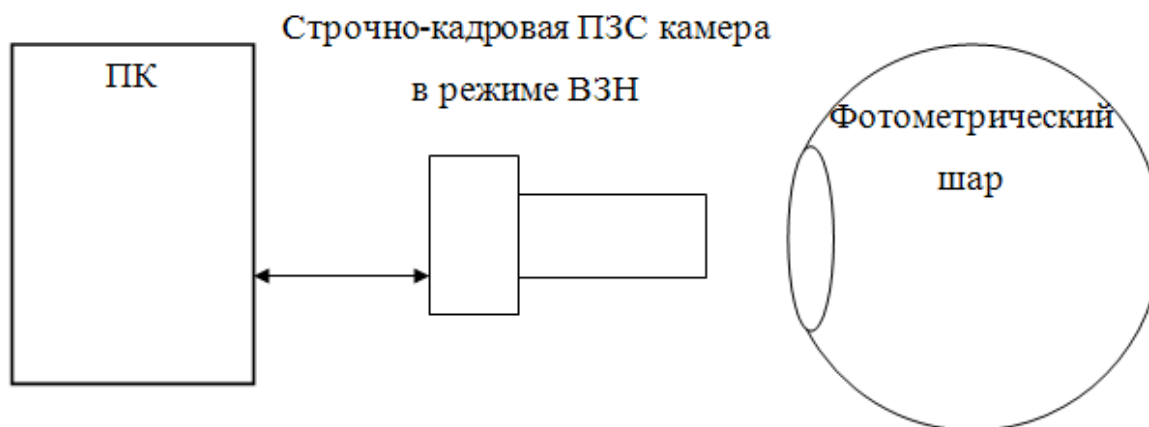


Рис. 4. Стенд для измерения чувствительности камеры и энергетических характеристик

Ввиду того, что динамический диапазон ямы ограничен, для определённых значений шагов накопления производилась корректировка времени экспозиции, красные точки на рисунке 5.

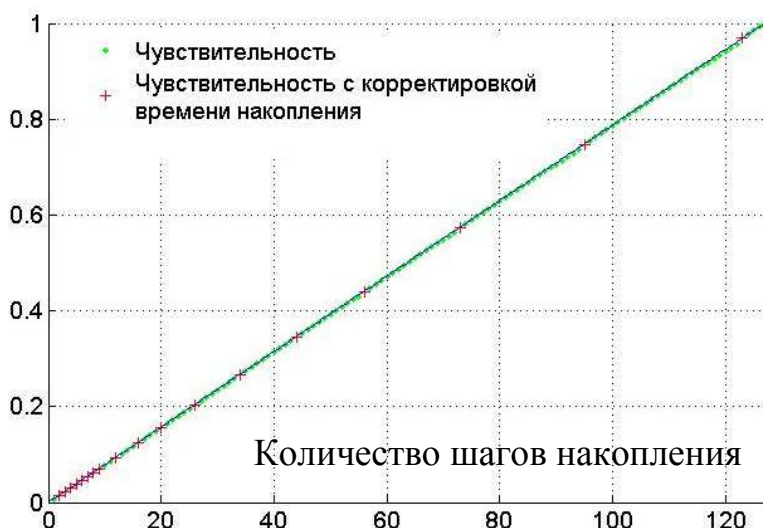


Рис. 5. Зависимость относительной чувствительности прибора от количества шагов накопления

Отклонение измеренной чувствительности от линейной аппроксимации с началом в точке (0,0) составляет 0.4%. Данное значение СКО меньше ошибки измерений, а, значит, зависимость чувствительности ФПУ от количества шагов накопления линейная.

5.2. Измерение величины максимальной зарядовой ёмкости в кадровом режиме и в режиме ВЗН

Важной характеристикой ФПУ является максимальная зарядовая ёмкость фотоприёмника. Максимальная зарядовая величина ограничивает потенциально достижимое разрешение прибора.

Выходная информация камеры после оцифровки представляется в виде уровней аналогового цифрового преобразователя (АЦП). Пусть K – коэффициент пропорциональности между значениями сигнала, выраженными в электронах и в уровнях АЦП, то есть:

$$K = (E_{\text{ацп}} - E_{\text{уч}}) / E_{\text{е-}}; \quad (3)$$

где $E_{\text{уч}}$ – уровень чёрного, выраженный в уровнях АЦП.

Известно [9], что случайный процесс, проходящий в ограниченном пространстве и в ограниченном интервале времени, описывается пуассоновским законом распределения. Ввиду этого обстоятельства считают,

что информационные электроны, являющиеся результатом случайного взаимодействия стохастического во времени и в пространстве потока квантов света с кристаллической решеткой матриц ПЗС, распределены также по этому закону. Для Пуассоновского распределения имеем:

$$E_{e^-} = D_{e^-}^{\phi}; \quad (4)$$

где $D_{e^-}^{\phi}$ - дисперсия фотонного сигнала выраженного в электронах.

Общая величина дисперсии есть сумма отдельных составляющих, а именно: $D_{e^-}^{\Sigma} = D_{e^-}^{\phi} + D_{e^-}^c$ (5)

Где $D_{e^-}^{\Sigma}$ – дисперсия суммарного шума, обусловленная пуассоновским и собственным шумами, выраженная в эквивалентных электронах;

$D_{e^-}^c$ – дисперсия собственного шума, выраженная в электронах.

Известно, что если K – коэффициент пропорциональности между математическими ожиданиями случайных величин, то K^2 – коэффициент пропорциональности дисперсий этих случайных величин.

$$K^2 = D_{\text{ацп}}^{\Sigma} / D_{e^-}^{\Sigma} \quad (6)$$

Из (3-6):

$$K = [D_{\text{ацп}}^{\Sigma}(\Theta^1) - D_{\text{ацп}}^{\Sigma}(\Theta^2)] / [E_{\text{ацп}}(\Theta^1) - E_{\text{ацп}}(\Theta^2)] \quad (7)$$

где Θ^1 и Θ^2 различные величины времени экспозиции.

Учитывая, что для нулевой экспозиции $M_a(\Theta=0) = U_a$, уровень собственных шумов будет определяться в соответствии с выражением:

$$D_{e^-}^c = D_{\text{ацп}}^{\Sigma}(\Theta=0) / K^2 \quad (8)$$

Таким образом, непосредственные измерения статистик выходного сигнала АЦП при принятых допущениях позволяют оценить коэффициент преобразования K и уровень собственных шумов $D_{e^-}^c$.

Эксперимент основан на наборе статистического материала путем

анализа большого количества измерений сигнала одного фотоэлемента. С усреднением величин по большому числу равномерно освещённых элементов ФПУ.

Установка для измерения основных сигнально шумовых характеристик идентична описанной в пункте 5.1 и изображена на рисунке 4.

Кадровый режим

На рисунке 6 представлена зависимость математического ожидания сигнала $E_{\text{ацп}}$ (Э) и величина дисперсии $D_{\text{ацп}}$ (Э) при работе камеры в кадровом режиме.

Уровень чёрного реализованного на ФПУ определяется аппроксимацией зависимости среднего сигнала в точку с нулевым временем экспозиции. При больших временах накопления сигнала наблюдается полное заполнение ямы фотоприёмника. В свою очередь, аппроксимация графика зависимости дисперсии в точку с нулевым временем накопления определяет собственный шум фотоприёмника, выраженный в единицах АЦП.

Из уравнений 5-6 и рисунка 6 видно, что количество электронов, приходящихся на один уровень АЦП, составляет 16.5 [e-/АЦП], а величина собственных шумов фотоприёмника равняется 20 [e-]. Полная зарядовая ёмкость потенциальной ямы составляет 23'100[e-]. Заметим, что это значение больше заявленной производителем ёмкости фотодиода (20'000 e-). Данное рассогласование может быть связано с недостаточно точным выставлением напряжения на фотодиоде.

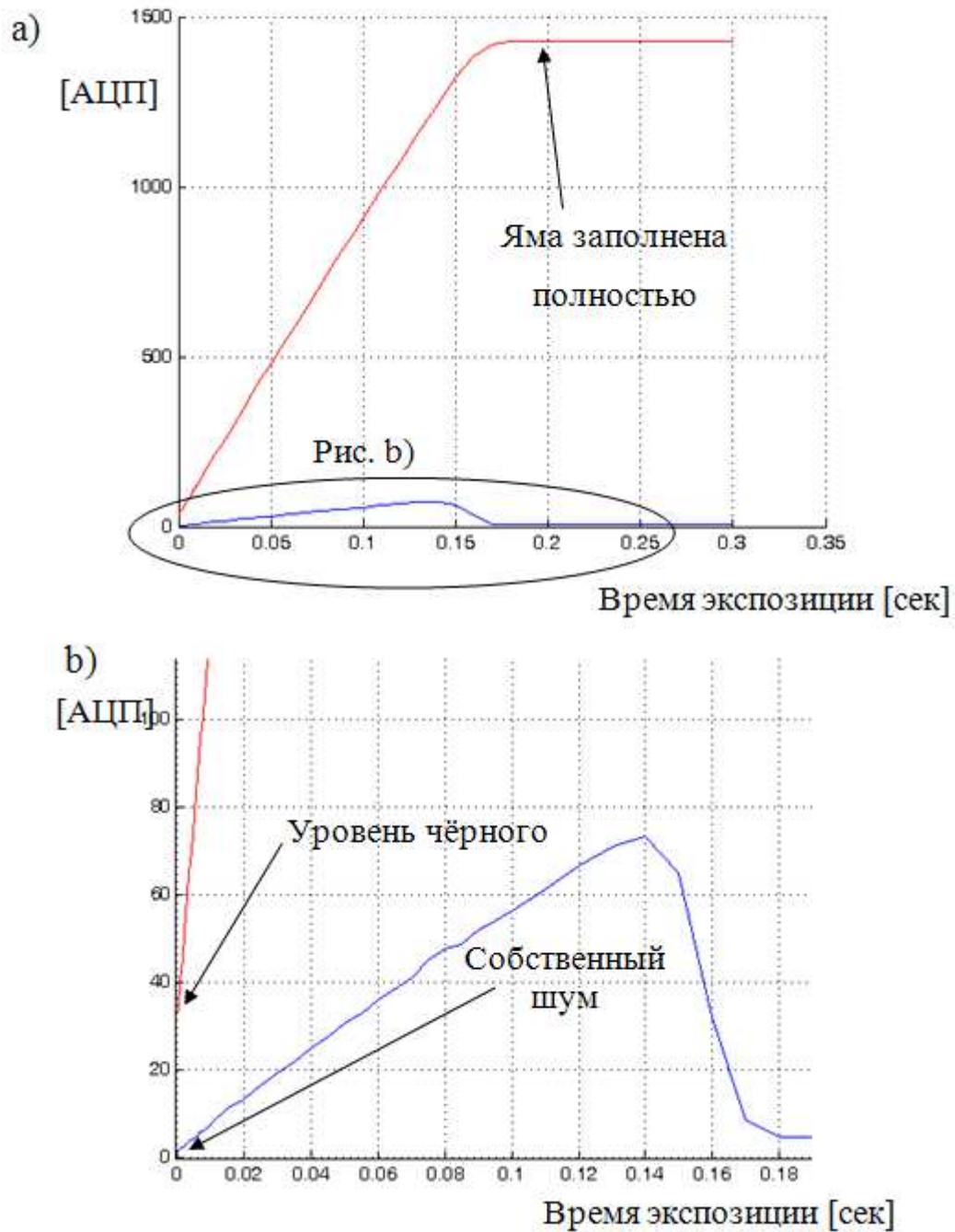


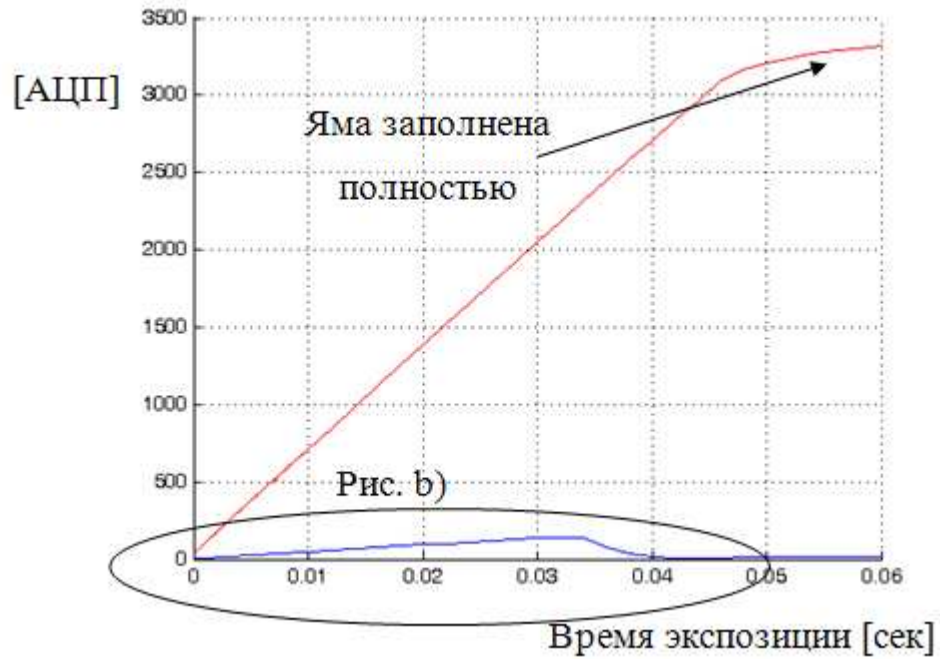
Рис. 6. Зависимость **среднего** и **дисперсии** в уровнях АЦП при работе в кадровом режиме

Режим временной задержки и накопления

На рисунке 7 представлена зависимость математического ожидания $E_{\text{ацп}}$ (Э) и дисперсии $D_{\text{ацп}}$ (Э) в единицах аналогового цифрового преобразователя при работе камеры в режиме ВЗН с количеством шагов накопления равное 32. Из уравнений 5-6 и рисунка 7 видно, что количество электронов приходящихся на один уровень АЦП составляет 15.04 [e-/АЦП], а величина собственных

шумов 18.7 [e-]. Полная зарядовая ёмкость потенциальной ямы составляет 46'160 [e-].

a)



b)

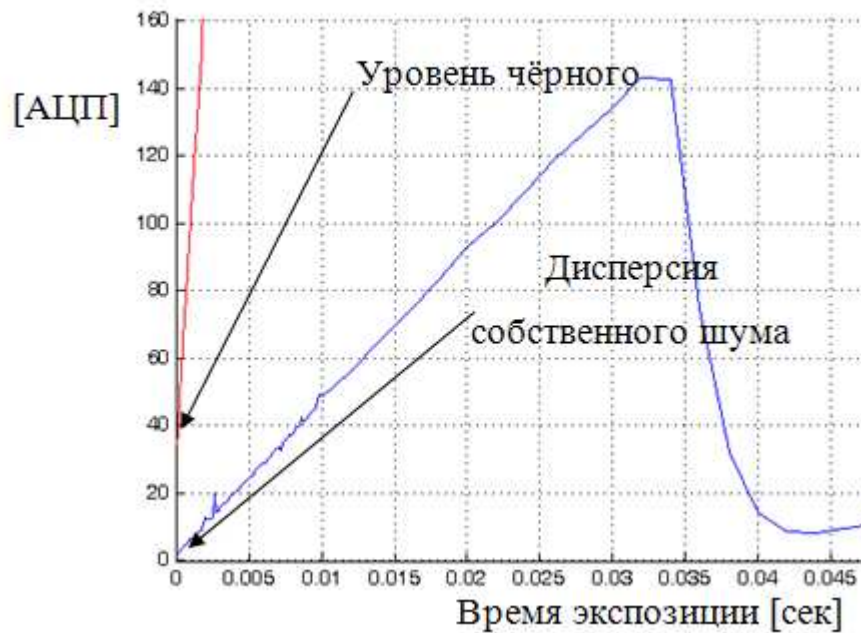


Рис. 7. Зависимость **среднего** и **дисперсии** в уровнях АЦП при работе в режиме временной задержки и накопления

Из полученных результатов видно, что как в кадровом режиме, так и в режиме ВЗН один уровень АЦП содержит примерно одинаковое количество

электронов – 15. Величина собственных шумов фотоприёмника в обоих случаях одинакова и составляет около 20 [e-].

Заметим, что произошло увеличение потенциальной зарядовой ямы фотоприёмника с 23 [ke-] до 46 [ke-]. Это произошло вследствие большей величины зарядовой ёмкости вертикального регистра относительно фотодиода.

5.3. Измерение частотно передаточных функций ФПУ

Одним из важных показателей качества передаточной системы, воспроизводящей изображение, является её частотно-контрастная характеристика или функция передачи модуляции (ФПМ). Функция передачи модуляции это безразмерная характеристика, определяемая как отношение величины контраста полученного изображения к величине контраста исходного объекта.

$$\text{ФПМ} = \frac{(E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min})}{(L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min})}$$

Где E_{\max} и E_{\min} – максимальный и минимальный сигнал итогового изображения, L_{\max} и L_{\min} – максимальная и минимальная яркость объекта.

Общая функция передачи модуляции прибора определяется уравнением:

$$\text{ФПМ}_{\text{общ}} = \text{ФПМ}_{\text{объектива}} * \text{ФПМ}_{\text{фпу}} \quad (9)$$

Где $\text{ФПМ}_{\text{объектива}}$ – функция передачи модуляции оптической системы объектива;

$\text{ФПМ}_{\text{фпу}}$ – общая функция передачи модуляции ФПУ. Данная функция состоит из 3-ёх основных зависимостей:

$$\text{ФПМ}_{\text{фпу}} = \text{ФПМ}_{\text{пикс}} * \text{ФПМ}_{\text{смаза}} * \text{ФПМ}_{\text{расс}} \quad (10)$$

Где: $\text{ФПМ}_{\text{пикс}}$ – функция передачи модуляции единичного элемента ФПУ;

$\text{ФПМ}_{\text{смаза}}$ – функция передачи модуляции звена “смаза”;

$\Phi\text{ПМ}_{\text{расс}}$ – функция передачи модуляции ВЗН рассогласования.

$\Phi\text{ПМ}_{\text{пикс}}$ удобно измерять совместно с передаточной функцией объектива в кадровом режиме, поэтому:

$$\Phi\text{ПМ}_{\text{общ}} = (\Phi\text{ПМ}_{\text{объектива}} * \Phi\text{ПМ}_{\text{пикс}}) * \Phi\text{ПМ}_{\text{смаза}} * \Phi\text{ПМ}_{\text{расс}} \quad (11)$$

Методика измерения влияния смаза (рассогласования) заключается в измерении общей передаточной характеристики на выбранной пространственной частоте в отсутствии смаза (рассогласования) изображения и при его наличии. Тогда, искомые передаточные характеристики равны:

$$\Phi\text{ПМ}_{\text{смаза}} = \frac{\Phi\text{ПМ}_{\text{общ+смаз}}}{\Phi\text{ПМ}_{\text{общ}}} \quad (12)$$

$$\Phi\text{ПМ}_{\text{расс}} = \frac{\Phi\text{ПМ}_{\text{общ+смаз+расс}}}{\Phi\text{ПМ}_{\text{общ+смаз}}} \quad (13)$$

Где $\Phi\text{ПМ}_{\text{общ}}$ – в кадровом режиме,

$\Phi\text{ПМ}_{\text{общ+смаза}}$ – в режиме ВЗН в присутствии смаза изображения при минимальном рассогласовании,

$\Phi\text{ПМ}_{\text{общ+смаза+расс}}$ – в режиме ВЗН в присутствии смаза и рассогласования изображения.

ФПМ суммарного тракта

Для измерения общей передаточной функции используется следующее оборудование: коллиматор, осветительное устройство, поворотное устройство SkyWatcher, держатель тест-объекта и тест-объект. В качестве тест-объекта выступает одна мира из набора содержащая черно-белый переход и штриховую структуру, формирующая в фокальной плоскости камеры изображение с заданной пространственной частотой. Стенд для измерения представлен на рисунке 8.

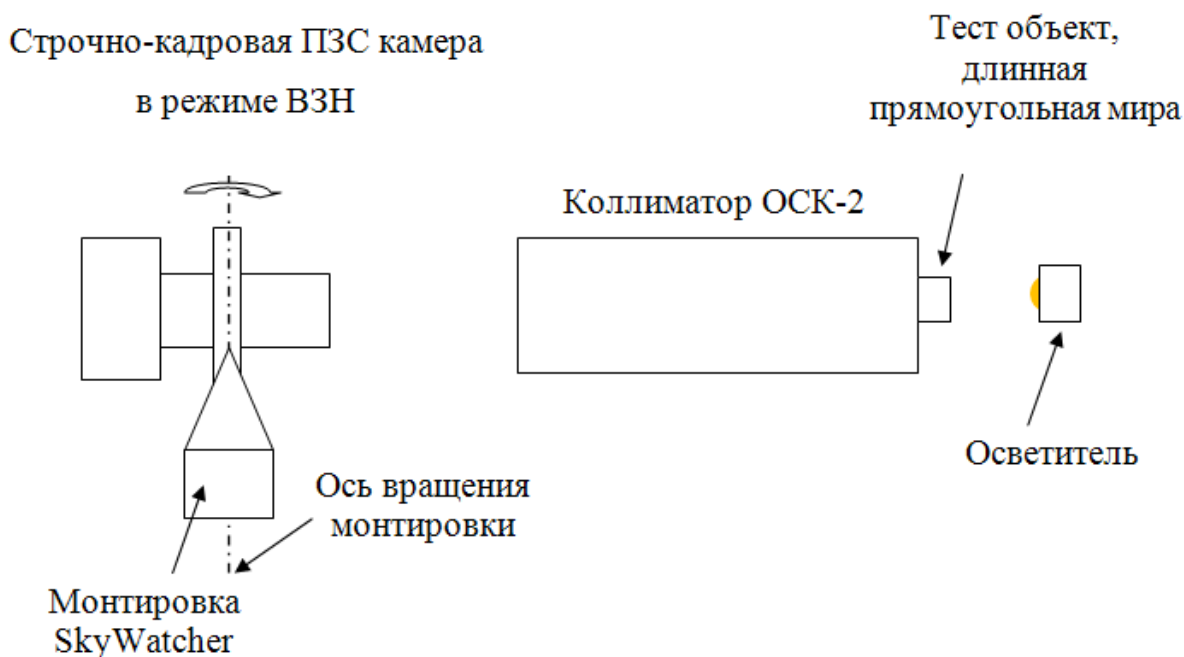


Рис. 8. Стенд измерения $\Phi\text{ПМ}_{\text{смаза}}$ и $\Phi\text{ПМ}_{\text{расс}}$

Технология измерения общей передаточной функции состоит в использовании в качестве тест-объекта длинную, прямоугольную, периодическую миру со скважностью 2 и черно-белого перехода. Изображение такого тест-объекта представлено на рисунке 9. Известно, что функция передачи модуляции является относительной характеристикой, и на нулевой частоте $\Phi\text{ПМ}$ равняется 1. Поэтому чёрно-белый переход необходим для нормировки искомой функции.

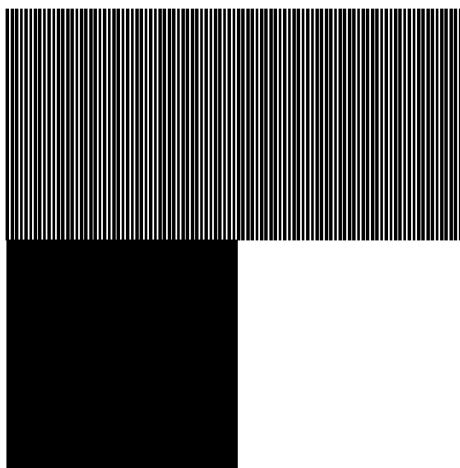


Рис. 9. Тест-объект: длинная, периодическая мира со скважностью 2 и черно-белый переход

Измерение передаточной характеристики на заданной пространственной частоте производится в следующей последовательности. Проецируется изображение миры в область исследуемой строчно-кадровой ПЗС матрицы. Время экспозиции и интенсивность излучения источника устанавливается так, чтобы значение сигнала от светлой части черно-белого перехода составило величину меньше зарядовой ёмкости ФПУ.

Добиваются поворотом миры, чтобы линия черно-белого перехода, параллельного штрихам миры, была параллельна строкам матрицы с точностью не хуже $1/50$ радиана.

Величина передаточной функции в одном измерении определяется следующим образом. Выбирается строчка матрицы не содержащая дефектных элементов. Полученное значение сигнала аппроксимируется синусоидой $B_k + A_k \sin(\pi v_k d + \phi_k)$, где v_k , A_k , B_k и ϕ_k подлежащие уточнению значения пространственной частоты, амплитуды, постоянной составляющей и фазы выходного сигнала. Коэффициенты аппроксимации вычисляются по методу наименьших квадратов с использованием стандартной процедуры вычислений, имеющейся в Matlab.

Тогда, итоговая передаточная функция на заданной пространственной частоте v_k будет равна:

$$\Phi_{\text{ПМ}_{\text{общ}}}(v_k) = \frac{2 \cdot A_k}{S_b - S_c} \quad (14)$$

Где S_c и S_b – сигналы от чёрно - белого перехода.

Измерение ФПМ смаза изображения

В реальных системах оптико-электронного наблюдения поверхности Земли, когда фотоприемником фиксируется бегущее изображение, всегда имеет место явление «смаза» изображения. Величина смаза изображения зависит от относительной скорости изображения в плоскости ФПУ и от времени экспозиции. Заметим, что для ФПУ работающих в режиме ВЗН на величину смаза изображения влияет время экспозиции на одном шаге накопления и не зависит от количества шагов накопления.

В дальнейшем будет определена зависимость частотной передаточной характеристики от времени накопления на каждом шаге накопления при определённой относительной скорости. Для этого рассмотрим процесс программирования архитектуры работы строчно-кадровой ПЗС матрицы работающей в режиме ВЗН. Тактовые диаграммы напряжений между фотодиодом и подложкой и фотодиодом и вертикальным регистром режима ВЗН представлены на рисунке 10. Тактовое время ВЗН равно времени перемещения элемента изображения на одну строчку матрицы. Данное время ограничено напряжениями сброса заряда из фотодиода под фазу вертикального регистра. После сброса заряда в подложку происходит процесс накопления нового заряда до тех пор, пока зарядовый пакет не переместится под фазу вертикального регистра.

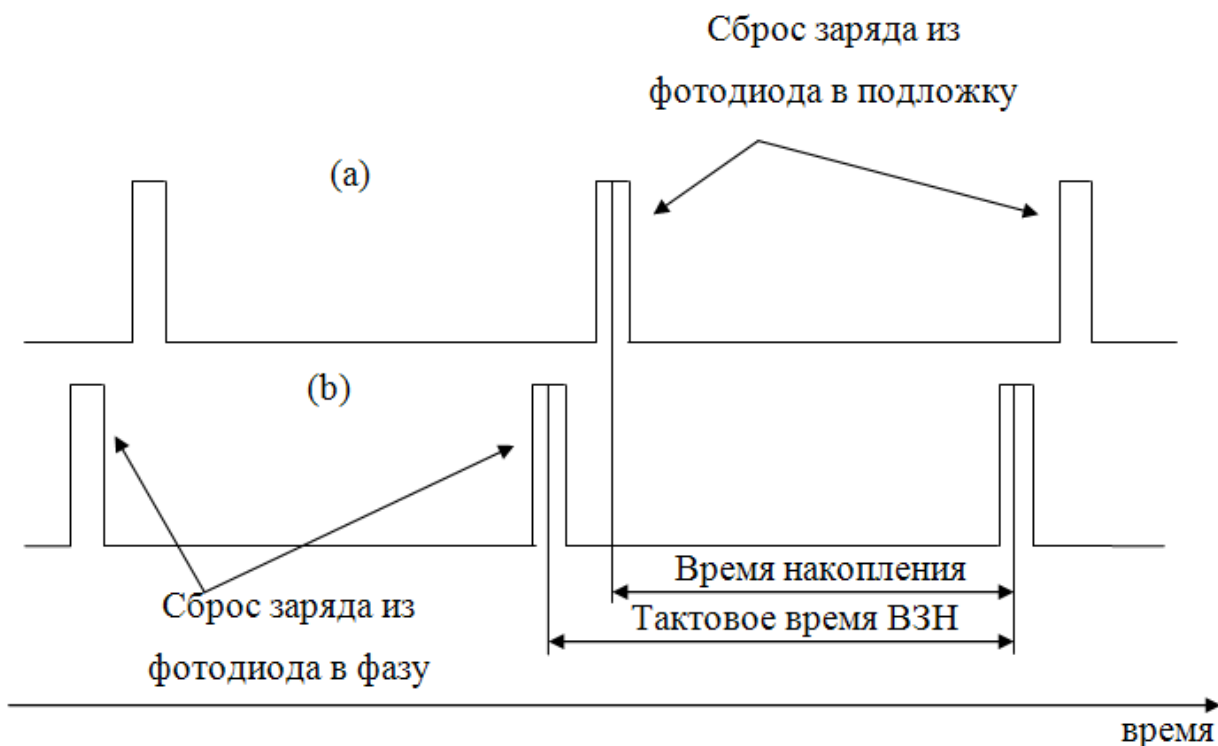


Рис. 10. Тактовая диаграмма напряжений на подложке (a) и на фазе (b)

Начало времени экспозиции сигнала определяется сбросом заряда из фотодиода в подложку матрицы, а конец накопления характеризуется перемещением зарядового пакета в вертикальный регистр. Таким образом, в данной реализации режима ВЗН существует возможность изменять время

накопления от 0 до тактового времени ВЗН. Далее будет показано, что уменьшение времени экспозиции на каждом шаге накопления влечет за собой улучшение передаточной характеристики. Заметим, что данной возможности лишены стандартные, строчные ВЗН матрицы.

Так как в качестве аппаратной функции смаза изображения выступает прямоугольная функция с шириной $d_{\text{смаз}}=V \cdot T_{\text{э}}$ (где V – скорость бега изображения в плоскости ФПУ, а $T_{\text{э}}$ – время накопления на каждом шаге). То расчётная передаточная функция определяется в соответствии с формулой:

$$\text{ФПМ}_{\text{смаз}} = \frac{\sin(\pi \cdot v \cdot d_{\text{смаз}})}{\pi \cdot v \cdot d_{\text{смаз}}} \quad (15)$$

На рисунке 11 представлено значение $\text{ФПМ}_{\text{смаз}}$ при различных величинах смаза (синий цвет). Расчётная функция представлена красным цветом. Данный график приведен для частоты Найквиста - 0.64, количества шагов накопления – 4, скорость бега изображения 14.5 мм/сек. Заметим, что наблюдается совпадение зависимостей в пределах ошибки измерений.

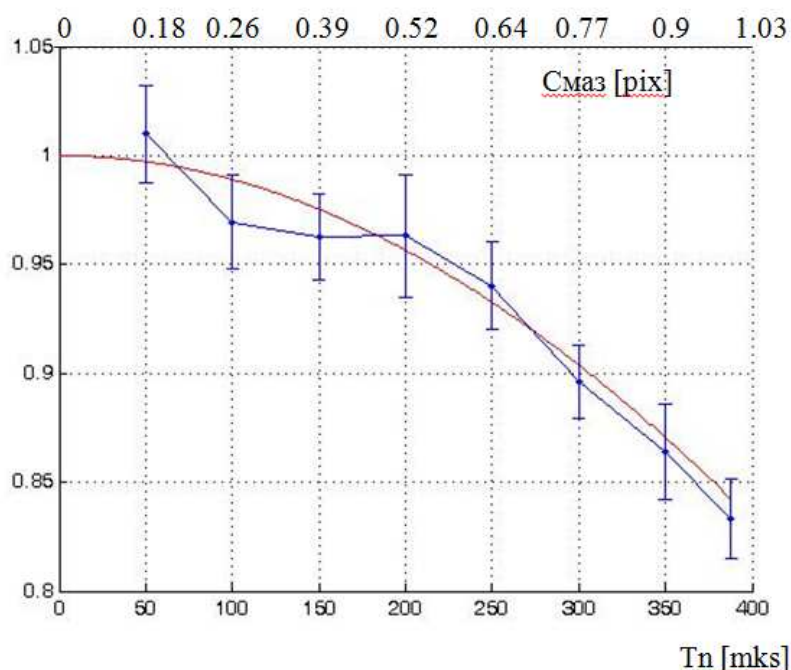


Рис. 11. $\text{ФПМ}_{\text{смаз}}$

Измерение ФПМ рассогласования

Если фотоприемник работает в режиме временной задержки и накоплением и имеет место рассогласование скорости бега изображения со скоростью переноса информационных пакетов, то возникают дополнительные частотные искажения. Основные причины рассогласования скоростей при решении задач ДЗЗ является недостаточная стабилизация космического аппарата и эффект паралакса.

Стенд для измерения ФПМ_{расс} представлен на рисунке 8. Передаточная характеристика рассогласования измерялась при следующих параметрах: пространственная частота – 0.64 Найквиста, количество задействованных шагов накопления – 16, скорость перемещения зарядовых пакетов изменялась от 17.2 до 29 [мм/сек], причем, время экспозиции каждого шага максимально и равно тактовому времени переноса заряда.

Теоретическая зависимость ФПМ_{расс} выражается формулой:

$$\text{ФПМ}_{\text{расс}} = \frac{\sin(\pi \cdot v \cdot d_{\text{расс}})}{\pi \cdot v \cdot d_{\text{расс}}} \quad (16)$$

Расчетная зависимость ФПМ_{расс} представлена на рисунке 12 красным цветом, а экспериментально измеренная зависимость представлена, синим цветом.

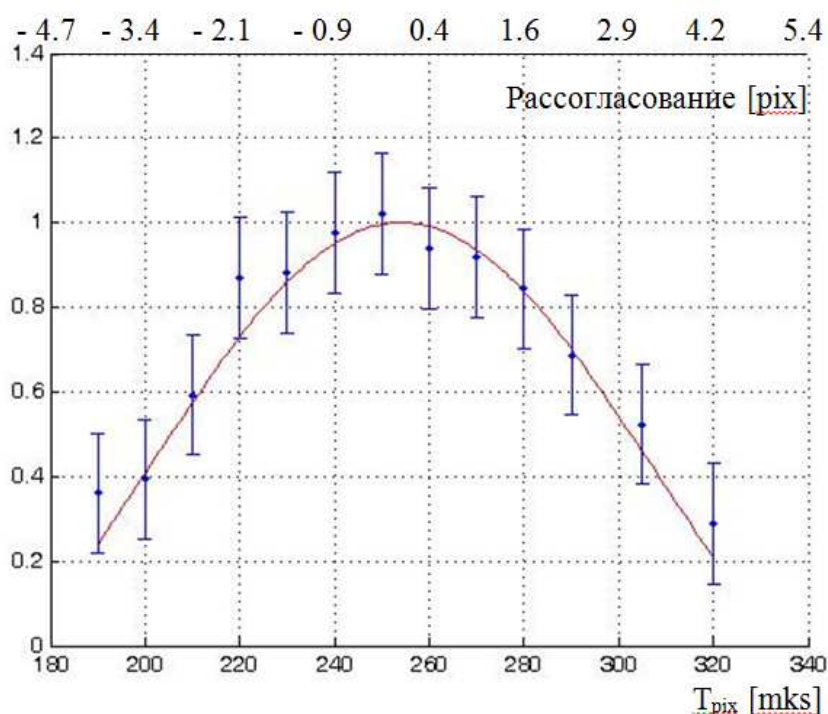


Рис. 12. ФПМ_{расс}

Заметим, что при измерении передаточных характеристик скорость бега изображения была значительно ниже максимально допустимой пункт 4. Для рассогласования скорость составляла 21.5 мм/сек, а для смаза 14.3 мм/сек.

Заключение

В процессе работы исследована возможность создания многофункциональной оптико-электронной системы высокого разрешения для наблюдения поверхности Земли и космических объектов. Показано, что данная задача может быть решена с помощью оптико-электронной камеры на базе строчно-кадровых матриц. При наблюдении космических объектов (например, таких как звёзды, космический мусор, астероиды, и т.д.) камера работает в кадровом режиме, а при решении задач ДЗЗ используется высокочувствительный режим ВЗН.

Проведён сравнительный анализ характеристик исследуемой системы при съёмке поверхности Земли с системой на базе стандартной матрицы ВЗН. Экспериментальное исследование ФПМ матрицы и её чувствительности подтвердило возможность реализации расчётных характеристик системы при решении задач наблюдения Земной поверхности звёзд и космического мусора.

Литература

1. W. S. Boyle and G. E. Smith. "Charge Coupled Semiconductor Devices", Bell Systems, Technical Journal, 1970, Vol. 49, pp. 587-593
2. Gerald C. Holst. "CCD arrays, cameras, and displays ", 1998
3. А. И. Бакланов, "Системы наблюдения и мониторинга", 2009, М.: БИНОМ.
4. B. Ostman. "TDI CCDs are still the sensors of choice for demanding applications ", Laser Focus World, 2010

5. H.-S. Wong, Y. L. Yao, and E. S. Schlig, "TDI Charge-Coupled Devices: Design and Applications," IBM Journal Research Development, 1992.
6. А. И. Бакланов, "Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения", 2010, Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета
7. "DALSA CL-F2 TDI Cameras", // [Электронный ресурс]. URL: http://www.ni.com/third_party/dalsa/pdf/cl_f2.pdf
8. "KAI-08050 Device Performance Specification", 2012. // [Электронный ресурс]. URL: http://www.ccd.com/pdf/ccd_8050.pdf
9. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и её инженерные приложения. – М.: Наука, 1988.- 480 с.