

Рисунок 4 – Вторые производные ВАХ кремниевого диода с концентрацией мелкой примеси  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  и глубокой примесью золота ( $T = 77 \text{ К}$ )

Нелинейности ВАХ р–n-переходов с концентрацией мелких примесей  $10^{16} \dots 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и менее могут отражать наличие глубоких примесей (рисунок 4), либо особенности технологии, вносящей высокие концентрации структурных дефектов, например ионной имплантации, которая для бракованных элементов дает картину, сходную с рисунком 4.

УДК 681.723.078, 681.775.078, 681.777.078

## МЕТОД СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ШУМОВ ФОНОВОГО СИГНАЛА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ОЭП

Старосотников Н.О., Фёдорцев Р.В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В связи с совершенствованием технологии создания фотоприёмников, в схемах работы оптико-электронных приборов (ОЭП), таких как цифровые автоколлиматоры [1], микроскопы, системы астроориентации [2], пеленгаторы [3], фотоприёмник выступает не только в виде регистрирующего устройства, но и в качестве отсчётного, поскольку его элементы – пиксели – имеют высокую точность пространственной периодичности. Таким образом, точность работы данных ОЭП зависит от точности определения координат энергетического центра тяжести изображения, формируемого на фотоприёмнике ОЭП [4]. Одним из факторов, оказывающим существенное влияние на выходные параметры системы, являются шумы электронного тракта ОЭП.

Для ПЗС матриц работающих в видимом спектральном диапазоне на точность регистрации измерительного сигнала значительное влияние (по уровню значимости), оказывают: дробовый шум темнового тока, шум считывания, фотонный (дробовый) шум. В КМОП матрицах дополнительно присутствует геометрический шум. Носители заряда в фотоприёмнике могут иметь свободную генерацию и в отсутствие внешней засветки. Поэтому различают две составляющие дробового шума: шум, создаваемый фотогенерированными зарядами (фотонный), и шум темнового сигнала [5].

Часто на фотоприёмник поступает не только основной измерительный сигнал, но и фоновый, который в свою очередь приводит к появлению дополнительных шумов, которые способствуют увеличению погрешности определения координат энергетического центра тяжести

измерительного сигнала.

Для экспериментального определения степени влияния шумов электронного тракта на точность определения координат энергетического центра тяжести изображения тест-объекта, использовались две модели цифровых видеокамер:

- CV-M2CL, JAI, в качестве фотоприёмника используется ПЗС матрица Kodak KAI-2020;
- Genie HM1400 XDR CR-GM01-H1400, в качестве фотоприёмника используется Teledyne DALSA КМОП матрица.

Схема эксперимента заключалась в проецировании круглого тест-объекта, подсвечиваемого осветителем со светодиодом LXML-PL01-0030, на фотоприёмник. Величина сигнала в изображении тест-объекта была такой, что генерировала 70% электронов от величины потенциальной ямы в пикселе фотоприёмника. За счёт случайных составляющих, в основном шумов фотоприёмника и электронного тракта, изображение тест-объекта на фотоприёмнике не было статичным. Влияние температурного дрейфа пикселей фотоприёмника сводилось к минимуму за счёт его термостабилизации (предварительный прогрев в течение 1,5 – 2 часов), которая позволила на 13,5135 пикселя уменьшить полученные значения; а во время съёмки – за счёт введения калибровочного коэффициента, в значения координат энергетического центра тяжести изображения тест-объекта.

Съёмка проводилась с кадровой частотой 0,83 кадров/секунду (100 снимков в течение 2 минут). Кадры снимались через равные промежутки времени. По каждому кадру определялись координаты энергетического центра тяжести

изображения тест-объекта ( $C_x$  и  $C_y$ ) в долях пикселя по формуле [6]

$$C_x = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m} \cdot n}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m}}, \quad C_y = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m} \cdot m}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m}},$$

где  $I_{n,m}$  – величина сигнала в пикселе  $n, m$ ;  $N, M$  – число столбцов и строк фрагмента фотоприёмника яркостей принятого для расчёта (на 10 пикселей больше размера изображения тест-объекта с каждой стороны);  $n, m$  – порядковые номера пикселей по столбцам и строкам фотоприёмника.

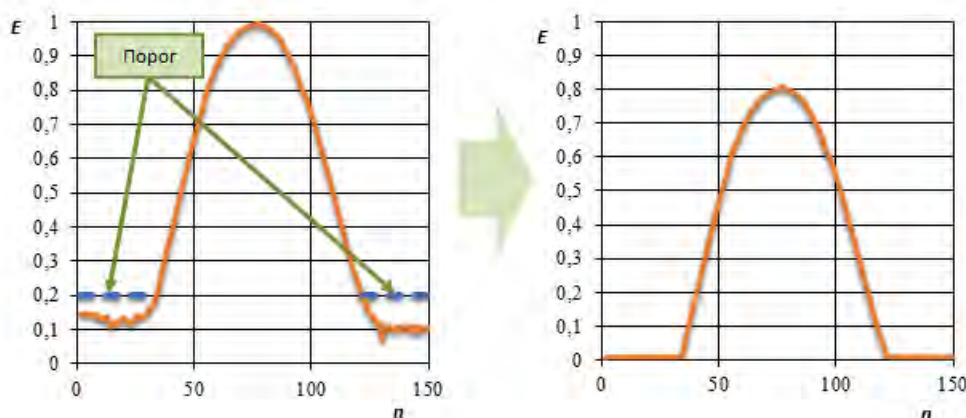


Рисунок 1 – Профиль сигнала  $E$  в части  $n$  строки фотоприёмника с частью изображения тест-объекта

Среднеквадратическое отклонение (СКО) координаты энергетического центра тяжести изображения тест-объекта серии кадров составило для:

- CV-M2CL, JAI – 0,0375 пикселя;
- Genie HM1400 XDR CR-GM01-H1400 – 0,0373 пикселя.

Полученные результаты являются практически идентичными для двух цифровых видеокамер.

Рассмотрим суть способа на примере профиля  $E$  в части  $n$  строки фотоприёмника с частью изображения тест-объекта, представленного на рисунке 1. Метод заключается в фильтрации зашумлённого фонового сигнала: сигнал меньше определённого значения, принимается равным величине порога шумов. Величина порога шумов определяется таким образом, чтобы отфильтровать все значения зашумлённого фонового сигнала в области расчёта. Таким образом, фильтруется не только зашумлённый фоновый сигнал, но и края изображения тест-объекта, что ведёт к несущественному снижению точности определения координат энергетического центра тяжести тест-объекта для оптимального отношения сигнал/шум более 9. При низком отношении сигнал/шум менее 9 необходимо при расчётах энер-

С помощью данной формулы для определения координат энергетического центра тяжести производится непосредственно оценка координат изображения тест-объекта, а также осуществляется интерполяция результатов измерений дискретной матричной структурой фотоприёмника на внутренние точки интервалов дискретизации. При этом погрешность определения координат энергетического центра тяжести изображения тест-объекта будет меньше, чем интервал дискретизации фотоприёмника, то есть оценка производится на субпиксельном уровне. Определась относительное смещение координат энергетического центра тяжести изображения тест-объекта на фотоприёмнике.

гетического центра тяжести использовать значения интенсивности в квадрате, что приводит к уменьшению фильтрации краёв изображения тест-объекта. Оптимальное отношение сигнал/шум установлено экспериментально.

Применив способ уменьшения влияния шумов фонового сигнала, заключающийся во введении величины порога шумов, значения ниже которого принимаются нулевыми, были получены следующие СКО серии кадров:

- CV-M2CL, JAI – 0,0106 пикселя;
- Genie HM1400 XDR CR-GM01-H1400 – 0,0037 пикселя.

Таким образом, для цифровой камеры CV-M2CL, JAI улучшение составило ~ 3 раза, а для цифровой камеры Genie HM1400 XDR CR-GM01-H1400 – ~ 1 порядок.

1. Старосотников Н.О., Фёдорцев Р.В. Высокоточный цифровой автоколлиматор для измерения малых углов. 7-я международная студенческая научно-техническая конференция «Новые направления развития приборостроения». Минск, Изд-во «Техническая литература» БНТУ, 2014. – С. 244.
2. Аванесов Г.А., Кондратьева Т.В., Никитин А.В. Исследование смещения энергетиче-

- ского центра изображений звёзд относительно геометрического центра на ПЗС матрице и коррекция методической ошибки. // Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов». Таруса, 22-25 сентября 2008. Сборник трудов. ИКИ РАН, 2009. – С. 421-446.
3. Савинков В.В. Исследование и разработка алгоритмов обработки сигналов в оптико-электронных пеленгаторах: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.11.07 / Савинков В. В.; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана] Москва, 2007. – 16 с.
  4. Старосотников Н.О., Фёдорцев Р.В. Оценка точности определения координат энергетического центра тяжести тест-объекта коллиматора в схемах контроля оптико-электронных приборов с матричными фотоприёмниками. Наука и техника. 2015, №5. С. 71-76.
  5. Ляшко О.М. Проектирование оптико-электронных приборов наблюдения: учебно-методическое пособие / О.М. Ляшко. – Минск: БНТУ, 2009. – 77 с.
  6. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. – 2-е изд., испр. – М.: Физмалит, 2003. – 784 с.

УДК 621.373.8:375

## ОПТИМИЗАЦИЯ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕСКОПА

Стасилович В.А., Фёдорцев Р.В.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

В идеальном случае (при отсутствии атмосферных искажений) телескоп с объективом диаметром в 1 м дает угловое разрешение около  $0,1'$ , а с объективом в 5 м дает разрешение в  $0,02'$ . Однако влияние оптических неоднородностей атмосферы Земли таких как: рефракция, турбулентность, поглощающие излучение газы и аэрозоли существенно снижают эти показатели. В результате на фотографиях, полученных телескопами, угловой размер мельчайших деталей составляет  $2-3'$ ; на лучших обсерваториях он изредка составляет  $0,5'$ .

Пассивный метод борьбы с атмосферными искажениями заключается в том, что обсерватории строят на вершинах гор, обычно на высоте  $2-3$  км, выбирая при этом места с наиболее прозрачной и спокойной атмосферой.

Тем не менее, наиболее эффективным считается применение адаптивных оптических систем способствующих выравниванию волнового фронта путём введения в конструкцию телескопов управляемых оптических элементов, обеспечивающих уменьшение влияния нерегулярных искажений и неоднородностей атмосферы за счёт постоянной коррекции входного сигнала по системе обратной связи.

Адаптивные оптические системы предназначены для решения двух основных задач:

- повышения предела разрешающей способности наблюдательных приборов;
- концентрации оптического излучения на приёмнике или мишени.

Среди существующих адаптивных оптических компонентов линейной фазовой коррекции волнового фронта различают:

- активные системы первого и второго порядка, построенные на базе гибких сплошных деформируемых зеркал или составных зеркал с когерентной апертурой;

- управляемые фазовые транспаранты.

Форму зеркала корректируют различными методами: посредством пресса, при помощи электростатического поля или изменением расположения частей сегментного зеркала при помощи пьезоэлементов. В каждом из случаев присутствует система обратной связи, которая играет важнейшую роль в определении наклона пучка. В качестве системы обратной связи используют датчик интерференционного типа и типа Шака-Гартмана, а также их модификации.

Действие интерференционных датчиков основано на когерентном сложении двух световых волн и формировании интерференционной картины с зависящей от измеряемого волнового фронта интенсивностью. При этом, в качестве второй (опорной) световой волны может использоваться волна, полученная из исследуемого излучения путём пространственной фильтрации.

Датчик типа Шэка-Гартмана состоит из матрицы микролинз и расположенного в их фокальной плоскости фотоприёмника [1]. Каждая линза обычно имеет размеры от 1 мм и меньше (рисунок 1). Линзы датчика разделяют исследуемый волновой фронт на субапертуры (апертура одной микролинзы), формируя в фокальной плоскости совокупность фокальных пятен. Положение каждого из пятен зависит от локального наклона волнового фронта пучка, пришедшего на вход датчика. Измеряя поперечные смещения фокальных пятен, можно вычислить средние углы наклонов волнового фронта в