

07;12

©1995 г.

ФИЛЬТРАЦИЯ МЕДИАНЫ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА НА ФОНЕ МОЩНЫХ ПОСТОРОННИХ ЗАСВЕТОК С ПОМОЩЬЮ ФОТОПРИЕМНИКА МУЛЬТИСКАН

Б.Г. Подласкин, Н.А. Токранова, К.Е. Чеботарев, Е.А. Чежулаев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Поступило в Редакцию 1 ноября 1994 г.)

Рассмотрен вопрос о выделении медианы как информативного признака изображения, на фоне посторонних засветок. Проанализированы режимы работы мультискана в условиях световых засветок различной мощности. Показана возможность выделения медианы модулированного сигнала при мощности фоновых помех, превышающих мощность сигнала в 10^3 .

Медиана оптического сигнала является одним из важнейших информационных признаков, используемых для определения положения, перемещения в пространстве, измерения угловых и линейных размеров объектов. Измерение этого параметра может производиться с помощью фотоприемников различного типа: четырехквadrантных фотодиодов, ФПЗС матриц и др. Однако использование этих приборов значительно усложняется в том случае, если помимо измеряемого оптического сигнала на фотоприемник попадает мощная посторонняя засветка. Данная работа посвящена исследованию возможностей использования для решения этой задачи многоэлементного фотоприемника мультискан, позволяющего проводить измерения положения медианы оптического сигнала без последовательного сканирования всего поля изображения.

Исследование фотоприемника мультискан в режиме координатуказания положения медианы одиночного светового пятна показали высокую пространственную чувствительность (до 0.01 мкм) и точность, определяемую линейностью координатной характеристики $\sim 1\%$ [1]. Использование мультисканов в различных пространственных прецизионных измерениях подтвердило высокие точностные параметры прибора. Так, в работе [2] описан лазерный бесконтактный измеритель кривизны поверхности параболических диффузных отражателей, для которого в пространстве измерений 30 мм, приведенном к поверхности

фотоприемника, получена систематическая погрешность 1.4 мкм. В работе [3] приведены данные специальных исследований различных точностных параметров мультискана в режиме координатоуказания. Показано, что прибор обеспечивает измерения положения медианы одиночного светового пятна с точностью порядка 0.5 мкм при систематической погрешности 0.5% и статистической погрешности 0.2 мкм. Там же приведены данные по стабильности координатной характеристики мультискана в зависимости от величины отношения тока сигнала к темновому току прибора.

Тем не менее практика сталкивается с необходимостью измерения координат сигнала при наличии внешних фоновых засветок. Величина фототока, вызываемая этими засветками, может оказаться существенно больше, чем темновые токи прибора, а в ряде случаев и превышать фототок светового сигнала, пространственное положение которого подлежит определению. Кроме того, фоновые засветки могут оказаться переменными во времени.

Известно, что особенностью фотоприемника мультискан в ряду координаточувствительных датчиков являются наличие подвижной апертуры и отсутствие накопления заряда на элементных емкостях [1]. Последняя особенность позволяет обеспечить высокий динамический диапазон фотоприемника мультискан, близкий к динамическому диапазону одиночного фотодиода. Учитывая, что максимальное значение фототока мультискана ограничивается величиной тока, протекающего через резистивный делитель напряжения ($\sim 1 \cdot 10^{-3}$ А), а минимальное может составлять величину 10^{-10} А (при величине темнового тока 10^{-11} А), рабочий динамический диапазон мультискана может быть оценен величиной $\sim 10^6 - 10^7$, что обеспечивает возможность работы прибора в широком диапазоне отношений фона и сигнала.

Задачи координирования одиночного светового сигнала в условиях посторонних засветок могут быть разделены на два принципиально различных типа. К первому типу задач отнесем измерения координат оптического сигнала на фоне слабых засветок, мощность которых значительно меньше мощности самого сигнала. Ко второму типу — измерения в условиях интенсивных фоновых засветок, мощность которых сравнима или превышает мощность сигнала. Такое разделение вызвано необходимостью применения принципиально различных подходов к методике координатных измерений и соответственно использования различных схемных решений.

В первой части работы проведен анализ координатной характеристики фотоприемника мультискан в режиме координатоуказания при различных соотношениях сигнала и фона, причем при расчетах темновой ток прибора считается составляющей фона и отдельно не выделяется.

Известно [1], что в установившемся режиме при измерении координаты светового пятна нулевой эквипотенциаль прибора устанавливается так, что полный ток, вытекающий с сигнальной шины фотоприемника, равен 0. Запишем полное уравнение баланса токов для случая одиночного светового пятна и равномерно распределенной фоновой засветки по интервалу L . Будем считать, что форма пятна описывается

нормальным распределением, тогда

$$\int_0^L \left[\frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\xi)^2}{2\sigma^2}} + \frac{B}{L} \right] \operatorname{th} \left(\frac{x-x_0}{\varepsilon} \right) dx = 0, \quad (1)$$

где A — интегральное значение фототока сигнала, B — интегральное значение тока фона с учетом темнового тока мультискана, σ — дисперсия нормально распределенного светового пятна, ξ — положение медианы светового пятна, x_0 — положение нулевой эквипотенциали, L — длина фотоприемной площадки мультискана, ε — апертура вольт-амперной характеристики мультискана.

При решении задачи определения координатной характеристики мультискана в условиях фоновых засветок влиянием ширины действующей апертуры ε в (1) на характер получаемых зависимостей $x_0(\varepsilon)$ можно пренебречь. Тогда

$$\int_0^{x_0} \left[\frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\xi)^2}{2\sigma^2}} + \frac{B}{L} \right] dx - \int_{x_0}^L \left[\frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\xi)^2}{2\sigma^2}} + \frac{B}{L} \right] dx = 0. \quad (2)$$

В этом интегральном уравнении искомой величиной является находящаяся в пределах интегрирования величина x_0 , соответствующая положению эквипотенциали, разделяющей фоточувствительную площадку мультискана на участки с противоположным направлением токов. Зависимость x_0 от ξ представляет собой координатную характеристику прибора, форма которой зависит от отношения A/B как параметра.

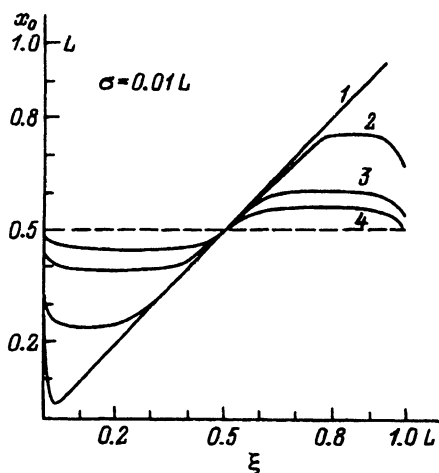


Рис. 1. Координатные характеристики $x_0(\xi)$ для различных соотношений величин фототоков сигнала A и фоновой засветки B .

1 — 1.0, 2 — 0.5, 3 — 0.2, 4 — 0.1.

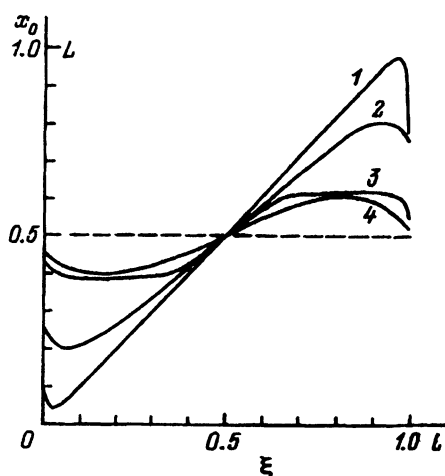


Рис. 2. Координатные характеристики $x_0(\xi)$ для различных σ при $A/B = 1.0$ (1, 2), 0.2 (3, 4); $\sigma = 0.01$ (1, 3), 0.1 (2, 4).

На рис. 1 представлено семейство координатных характеристик $x_0(\xi)$, рассчитанных с помощью уравнения (2), для различных соотношений величин фототоков сигнала A и фоновой засветки B . В качестве сигнала выбрано световое пятно гауссовой формы с дисперсией $0.01L$. На графиках видно, что при увеличении интенсивности фоновой засветки при постоянном сигнале ($A/B = 1.0, 0.5, 0.2, 0.1$) происходят сокращение участка линейности координатной характеристики и падение ее крутизны. Характерным явлением, связанным с увеличением фоновой засветки, является появление на координатных характеристиках плоских участков и возвратных ветвей на краях, что приводит к неоднозначности определения координат сигнала. Наличие участков насыщения объясняется компенсацией изменения фототока сигнала, возникающего при перемещении светового пятна, пропорциональным нарастанием разностного фототока фона. При достижении световым пятном края фоточувствительной области фотоприемника образуется падающий участок координатной характеристики вследствие резкого уменьшения фототока сигнала.

Расширение светового пятна (увеличение дисперсии распределения) в свою очередь приводит к уменьшению крутизны координатной характеристики и более быстрому выходу на падающий участок кривых (рис. 2).

Возможность использования мультискана в режиме координатоуказания положения светового пятна в присутствии фона определяется величиной допустимой ошибки (Δx_{\max}) и минимально допустимым сокращением рабочего поля прибора. На рис. 3 приведена зависимость ошибки координирования от отношения A/B (расчет проведен для точки $\xi = 0.74L$). Видно, что при значении $A/B > 1$ величина ошибки быстро падает от значения ~ 100 до ~ 10 мкм при $A/B = 10$. На рис. 4 показана зависимость изменения длины рабочего участка мультискана от отношения A/B . Для $A/B = 1.0$ линейный участок составляет 0.9 фоточувствительного поля мультискана, при уменьшении отношения A/B длина этого участка координатной характеристики быстро уменьшается.

Таким образом, анализ показал, что наличие фоновой засветки существенным образом влияет на форму и крутизну координатной характеристики мультискана в режиме измерения положения одиночного

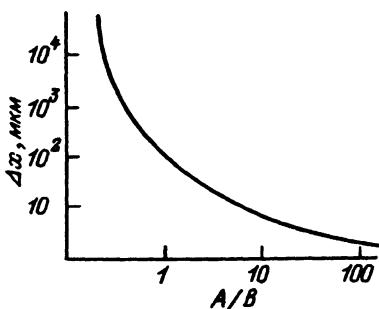


Рис. 3. Зависимость ошибки координирования от отношения A/B при $\xi = 0.75L$.

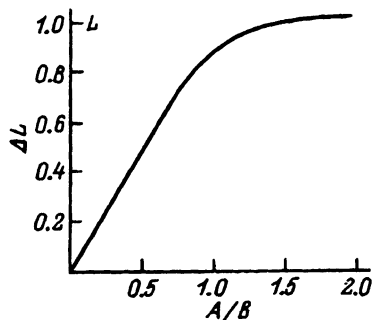


Рис. 4. Зависимость изменения длины линейного участка мультискана от отношения A/B .

светового пятна. Начиная с отношения $A/B = 0.5$ и ниже наблюдаются значительное сокращение рабочей области прибора и резкое возрастание ошибки координатоуказания, что не позволяет реализовать высокие точностные параметры фотоприемника.

Такой случай уже следует отнести к категории задач, в которых величина фоновых засветок соизмерима или на несколько порядков превышает мощность полезного сигнала.

Как упоминалось выше, фотоприемник мультискан обладает широким динамическим диапазоном и может использовать принцип прямого детектирования оптического сигнала, что в свою очередь позволяет производить фильтрацию переменных во времени сигналов, отстраиваясь от постоянных и медленно меняющихся фоновых засветок.

Во второй части работы описан режим работы и приведены экспериментальные результаты, полученные при использовании мультискана для координирования модулированного во времени оптического сигнала в условиях наличия фоновой засветки, превышающей мощность сигнала. Принципиальным отличием данного режима от режима координатоуказания немодулированного во времени сигнала, когда в качестве выходного сигнала используется потенциал сигнальной шины мультискана, является необходимость регистрации выходного тока фотоприемника. Сигналом, управляющим в этом случае положением эквипотенциала, является не потенциал сигнальной шины, соответствующий нулевому значению выходного тока фотоприемника, а напряжение, сформированное на выходе интегрирующего устройства, стационарное значение которого соответствует положению эквипотенциала в центре оптического сигнала. Функциональная блок-схема этого режима работы приведена на рис. 5. Выходной ток прибора через преобразователь ток-напряжение и фильтр верхних частот подается на узкополосный фильтр — синхронный детектор, синхронизованный с источником сигнала. Выход синхронного детектора соединяется со входом интегратора, выходное напряжение которого меняется под воздействием выходного сигнала синхронного детектора и приобретает стационарное состояние в тот момент, когда напряжение на выходе синхронного детектора равно нулю. Поскольку выходное напряжение интегратора управляет положением эквипотенциала, то такое стационарное состояние достигается при установлении эквипотенциала в центре оптического сигнала.

Для оценки скорости установления положения координаты сигнала при резком перемещении оптического сигнала вдоль фоточувствительной площадки фотоприемника может быть использована следующая

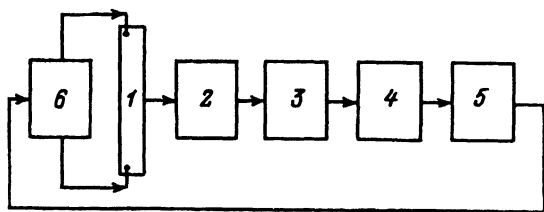


Рис. 5. Функциональная блок-схема режима координатоуказания медианы модулированного оптического сигнала.

1 — фотоприемник мультискана, 2 — преобразователь ток-напряжение, 3 — фильтр верхних частот, 4 — синхронный детектор, 5 — интегратор, 6 — управляемый источник смещения.

ЗАВИСИМОСТЬ:

$$\Delta t = \frac{CE(\xi_1 - \xi_2 \frac{\sigma}{2})}{kAL} + \frac{CE\sigma}{2kAL} \ln \frac{A}{C\psi}, \quad (3)$$

где E — напряжение питания мультискана; ξ_1 и ξ_2 — начальное и конечное положения медиан светового сигнала при его резком перемещении; k — коэффициент усиления схемы по току; C — емкость интегрирующего устройства; ψ — допустимая скорость изменения выходного напряжения, при которой процесс можно считать установившимся [4].

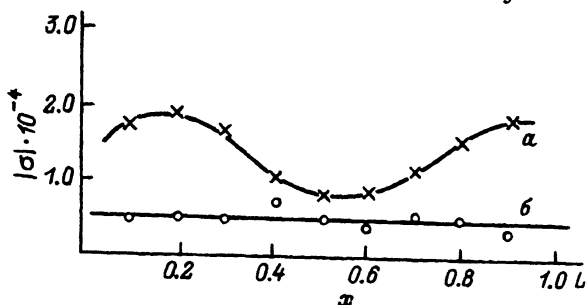


Рис. 6. Среднеквадратическая погрешность координирования сигнала вдоль всего рабочего участка мультискана при наличии (а) и отсутствии (б) фоновой засветки.

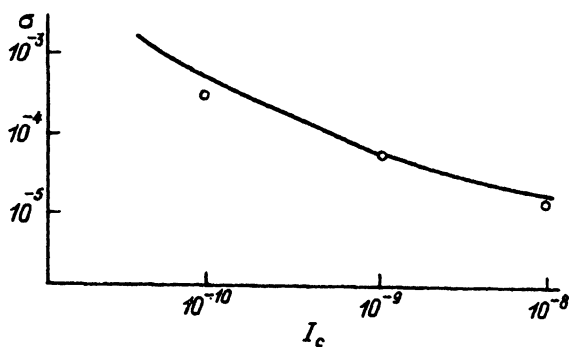


Рис. 7. Зависимость относительной погрешности измерений координаты медианы от величины сигнала при отсутствии фона.

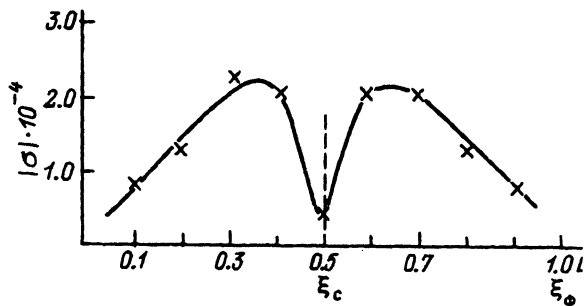


Рис. 8. Среднеквадратическая погрешность измерения координаты сигнала при различных положениях пятна фоновой засветки.

Таким образом, влияние фоновых и темновых токов из процесса установления координаты сигнала устраняется вплоть до шумовой составляющей фоновой засветки. Дополнительным фактором влияния фона на ошибку координирования является нарушение распределения потенциалов вдоль резистивного слоя фотоприемника за счет протекания фототоков мощной фоновой засветки. Это обстоятельство заставляет несколько ограничивать динамический диапазон световых потоков максимальной величиной фототока фоновой засветки порядка $10^{-5} - 10^{-6}$ А.

Были проведены экспериментальные исследования влияния фоновой засветки на точность координатоуказания модулированного оптического сигнала. Мощности сигнала и фоновой засветки, приведенные к фотоприемной площади мультискана, составляли $P_c = 10^{-9}$ Вт и $P_\phi = 10^{-6}$ Вт соответственно. Частота модуляции сигнала была выбрана 10 кГц. На рис. 6 приведены графики среднеквадратической погрешности координирования сигнала вдоль всего рабочего участка мультискана при наличии и отсутствии фоновой засветки. Видно, что наличие фона, в 10^3 раз превышающего мощность сигнала, приводит к увеличению среднеквадратической погрешности измерений в 2-3 раза, причем общая величина этой ошибки не превышает величину $2 \cdot 10^{-4}$, что при длине рабочей области мультискана 20 мм соответствует погрешности 4 мкм.

Зависимость относительной погрешности измерений от величины сигнала при отсутствии фона приведена на рис. 7.

Кроме того, исследовалась среднеквадратическая погрешность измерения координаты сигнала при различных положениях пятна фоновой засветки (рис. 8). Видно, что $\delta \sim 10^{-4}$ сохраняет свою величину на всем рабочем интервале фоточувствительной площадки.

Приведенные результаты показали, что при координатоуказании немодулированного оптического сигнала наличие фоновой засветки приводит к возникновению значительных погрешностей. Однако большой динамический диапазон и возможность работы в режиме прямого детектирования позволяют использовать мультискан для координатоуказания модулированных во времени сигналов без значительной потери точности вплоть до $A/B \sim 10^3$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, код 93-02-14865.

Список литературы

- [1] Берковская К.Ф., Кириллова Н.В., Подласкин Б.Г. и др. // Научно-технические достижения. М., 1992. № 2. С. 22-25.
- [2] Корноушкин А.В., Подласкин Б.Г. // ПТЭ. 1992. № 5. С. 206-210.
- [3] Подласкин Б.Г., Дич Л.З., Токранова Н.А. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 2. С. 30-34.
- [4] Подласкин Б.Г. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 8. С. 1610-1616 .