

06;07;12

## Построение двойной синтезированной апертуры на фотоприемниках Мультискан для определения положения фронта перепада яркости слабоконтрастных оптических сигналов

© Б.Г. Подласкин, Е.Г. Гук, Е.В. Носенко

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 14 ноября 2001 г.)

Предложена модель двойной синтезированной апертуры на основе фотоприемников Мультискан, позволяющая определять и отслеживать в реальном времени положение фронта перепада яркости слабоконтрастных сигналов. Показано, что с помощью такой апертуры определение координаты фронта сводится к интегральной операции измерения медианы распределения фототоков модифицированных сигналов.

Особое место в практике обработки оптической информации занимает задача определения положения слабоконтрастной оптической границы двух сред. С такими проблемами связано обнаружение и определение формы нефтяных пятен на поверхности моря [1,2], определение границ морского шельфа и океанских течений [3]. Важное практическое значение регистрация положения слабоконтрастной границы перепада яркости имеет в области экологии при определении концентрации различных газов с помощью индикаторных газоанализаторных трубок [4], где определение положения фронта перепада яркости осложнено наличием сильных пространственных неравномерностей.

В известной практике положение фронта перепада яркости определяется с помощью дифференциальных методов, т.е. по положению максимума первой производной сигнала, по пересечению им некоторого достаточно произвольно заданного уровня, по пересечению нулевого уровня его второй производной. Всем этим методам присущи недостатки, связанные с необходимостью дифференцирования сигнала по времени. Так, в случае использования первой и второй производных сигнала положение фронта зависит как от самой формы этого фронта, так и особенно сильно от влияния шумов. В свою очередь определение положения фронта по пересечению заданного уровня зависит от стабильности этого уровня, от изменения постоянной составляющей оптического распределения, величины перепада яркости, ширины и формы этого перепада. Отсюда становятся понятными причины, по которым, по данным [1,2], точность определения положения фронта в реальных условиях слабоконтрастных сигналов в присутствии шумов не лучше чем 5–50%.

Наибольшая точность таких измерений достигается в рефрактометрии, где, в частности, в качестве координаточувствительных детекторов используются четырехквadrантные фотодиоды [5]. Однако и в этом случае при необходимости разделения сред с близкими показателями преломления точность является недостаточной.

В ряде работ было показано, что повышения точности определения различных информативных параметров

оптических распределений можно добиться с помощью использования интегральных методов обработки изображений [6,7]. Разработанные принципы формирования интегральных оценок координат информативных признаков изображения основываются на измерении положения медиан оптических сигналов, наборов их квантильных отсчетов или интегральных моментов, на основе которых формируются необходимые информативные признаки. Как следует из литературных данных [8], медиана является хорошей координатной оценкой положения пространственно локализованных оптических сигналов. При этом преимущества интегральных методов связаны с более полным использованием энергии входного сигнала и интегрированием шума в более узкой пространственной и временной полосах частот за счет отсутствия необходимости сканирования всего интервала задания распределения оптического сигнала. Так, по данным работы [7], при использовании интегральной оценки пространственного положения источника светового сигнала точность регистрации координаты его медианы достигает 0.02–0.002% от поля зрения.

Переход от сканирующих методов к использованию интегральных функционалов предполагает применение фотоприемников, способных реализовать интегральный метод преобразования сигнала во всем интервале задания распределения оптического сигнала. Таким требованиям в настоящее время отвечает только координаточувствительный фотоприемник интегрального типа Мультискан [9].

Мультискан представляет собой кремниевую структуру, содержащую набор встречно включенных фотодиодов, которые при приложении к резистивному делителю постоянного напряжения оказываются под воздействием линейно распределенного потенциала. Принцип действия Мультискана как прибора с подвижной апертурой и интегральным методом формирования сигнала основан на особенностях его интегральной апертурной характеристики, положение точки перегиба  $U_0$  которой определяется взаимным соответствием потенциалов резистивного делителя и выходной шины прибора таким образом, что величина фототока с выходной шины

Мультискана имеет вид [9]

$$I = \alpha \int_0^L f(x) \operatorname{th} \frac{x - \xi_0}{A_x} dx$$

или в масштабе напряжения, приложенного к прибору,

$$I = \beta \int_{-E}^E f(u) \operatorname{th} \frac{u - U_0}{A_u} du, \quad (1)$$

где  $L$  — длина фоточувствительного слоя Мультискана;  $\xi_0$  — пространственное положение точки перегиба апертурной характеристики;  $E$  — напряжение, приложенное к резистивному слою;  $A_x$  — пространственная ширина апертуры;  $A_u$  — ширина апертуры в масштабе напряжений;  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты пропорциональности (здесь и далее принято  $\alpha = \beta = 1$ );  $f(x)$  и  $f(u)$  — распределения оптического сигнала в масштабе координат  $x$  и  $u$  соответственно.

Определение положения фронта перепада яркости оптического сигнала и использование для этого интегрального принципа формирования данной оценки встречает в отличие от задачи регистрации координаты локализованного светового пятна принципиальные затруднения. Это связано с тем, что при решении задач определения координаты фронта слабоконтрастного перепада яркости обычно приходится иметь дело с оптическими распределениями, имеющими значительную плотность по обе стороны от определяемого фронта. В этом случае положение медианы распределения практически не связано с координатой фронта перепада яркости.

Целью данной работы является поиск возможности преодоления этого противоречия путем сведения измерения координат положения фронта слабоконтрастного сигнала к измерению медианы сигнала, модифицированного с помощью системы фотоприемников, обладающей двойной синтезированной апертурой.

Двухапертурный синтез представляет собой такой метод обработки оптического сигнала, при котором с помощью одного или нескольких фотоприемников осуществляются преобразования, эквивалентные сложению или вычитанию оптических сигналов с приданием им заданных весовых коэффициентов и введением в эти операции необходимого пространственного сдвига оптических распределений. Тем самым в ряде случаев удается производить такие модификации оптических сигналов, которые позволяют определять координаты информативных признаков исходных распределений по интегральным характеристикам модифицированных сигналов.

Ранее метод двойной синтезированной апертуры был разработан нами для повышения точности координатуказания на фотоприемнике Мультискан при воздействии мощных фоновых засветок [10]. Однако особенности задачи определения положения фронта перепада яркости, о которых говорилось выше, требуют нахождения принципиально другого подхода, позволяющего так

трансформировать исходное распределение, что положение медианы нового распределения непосредственно связано с координатой фронта перепада яркости. Очевидно, что для решения этой задачи искомая интегральная операция должна обладать свойствами, способными выявить такой дифференциальный признак без затраты времени на операцию сканирования интервала задания функции освещенности и на дальнейшие операции обработки сигнала по его сглаживанию и фильтрации.

Переход к интегральным методам формирования сигнала позволяет определять координаты информативных признаков в следящем режиме, т. е. полностью использовать все заданное время наблюдения  $t'$  на формирование полезного сигнала. Именно в этом смысле применительно к таким методам нами используется термин „работа в реальном времени“.

Для того чтобы работа системы производилась в следящем режиме реального времени, необходимо, чтобы информационный признак (в нашем случае координата фронта оптического сигнала) определялся не в результате сканирования всей реализации, а формировался в виде непрерывного текущего значения  $U_{\text{control}}^0$ , автоматически устанавливающегося в виде значения потенциала, соответствующего положению фронта перепада яркости в масштабе напряжений всего интервала  $\pm E$ . С этой целью необходимо связать значение величины разностного тока  $I$  с координатами точек перегиба ( $U_0 + \varepsilon$ ) и ( $U_0 - \varepsilon$ ) апертурных характеристик Мультисканов. Будем формировать управляющее напряжение  $U_{\text{control}}$  как результат интегрирования во времени текущей величины выходного тока Мультисканов

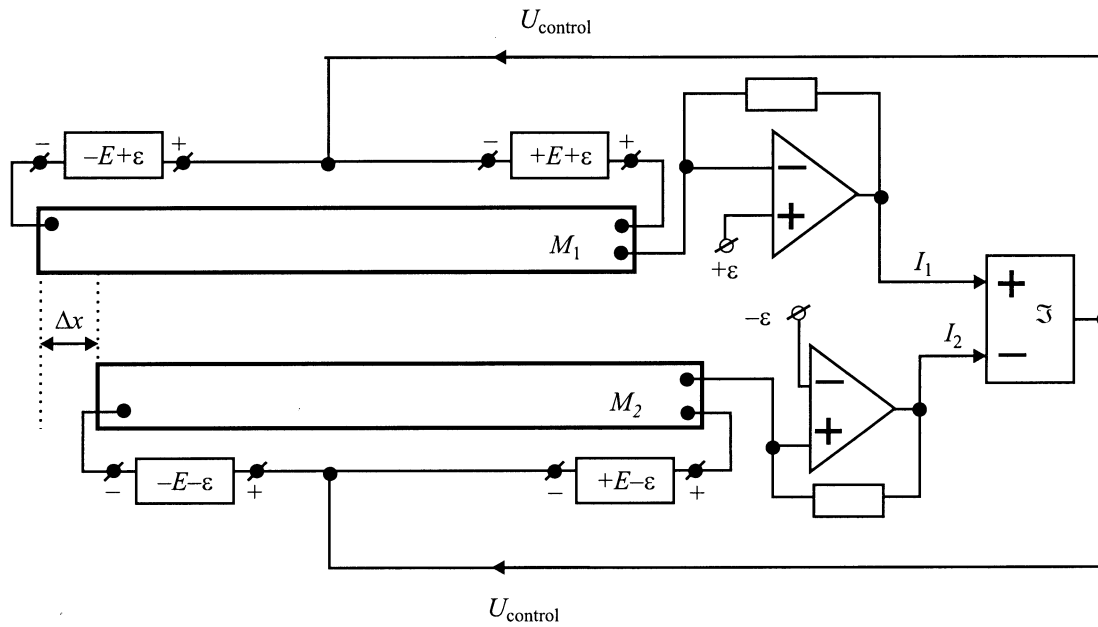
$$U_{\text{control}} = \frac{1}{C} \int_0^{t'} I_{\Sigma} dt,$$

где  $C$  — емкость интегрирующего устройства.

Очевидно, что  $U_{\text{control}}$  достигает некоего установившегося значения при  $I_{\Sigma} = 0$ , что, по определению, соответствует положению медианы оптического распределения. Таким образом, очевидно, что величина  $U_{\text{control}}^0$  может быть получена из условия  $I_{\Sigma} = 0$ .

Это условие является универсальным условием определения медианы оптического распределения при работе фотоприемников в следящем режиме реального времени. Поскольку  $I_{\Sigma}$  складывается из токов двух Мультисканов  $I_1$  и  $I_2$ , то величина и характер изменения  $I_{\Sigma}$  определяются правилами, по которым  $f(u)$  преобразуется в  $I_1$  и  $I_2$ , т. е. величиной взаимного сдвига потенциалов на резистивных делителях Мультисканов, расположением точек перегиба их апертурных характеристик, крутизной вольт-амперных характеристик, коэффициентами усиления токов и другими параметрами.

Применительно к задаче отслеживания положения фронта перепада яркости с помощью фотоприемников Мультискан определим модель формирования токов  $I_1$  и  $I_2$  следующим образом. Представим себе, что два параллельных фотоприемника Мультискан ( $M_1$  и  $M_2$ )



**Рис. 1.** Схема включения фотоприемников Мультискан в режиме синтезированной апертуры для определения положения границы фронта перепада яркости.

расположены вдоль общей для них оси напряжений  $u$  с пространственным сдвигом  $\Delta x$  таким образом, что пределы их интегрирования сдвинуты относительно друг друга по оси  $u$  на некоторую величину  $\pm \varepsilon$ . Взаимное же расположение точек перегиба апертурных характеристик Мультисканов определим при  $U_{\text{control}} = 0$  потенциалами  $+\varepsilon$  и  $-\varepsilon$ , приложенными соответственно к общим шинам  $M_1$  и  $M_2$ .

Тогда величины токов  $I_1(U_{\text{control}})$  и  $I_2(U_{\text{control}})$  определяются следующим образом:

$$I_1 = \int_{-E+\varepsilon}^{E+\varepsilon} f(u) \operatorname{th} \frac{u - U_{\text{control}} - \varepsilon}{A_u} du,$$

$$I_2 = \int_{-E-\varepsilon}^{E-\varepsilon} f(u) \operatorname{th} \frac{u - U_{\text{control}} + \varepsilon}{A_u} du \quad (2)$$

и уравнение баланса токов примет вид

$$\int_{-E+\varepsilon}^{E+\varepsilon} f(u) \operatorname{th} \frac{u - U_{\text{control}} - \varepsilon}{A_u} du - \int_{-E-\varepsilon}^{E-\varepsilon} f(u) \operatorname{th} \frac{u - U_{\text{control}} + \varepsilon}{A_u} du = 0. \quad (3)$$

Блок-схема, которая показывает принцип построения двойной синтезированной апертуры с использованием комбинации сдвига питающих напряжений пространственным сдвигом Мультисканов, приведена на рис. 1.

При идентичном освещении Мультисканов оптическим сигналом  $f(u)$  величина  $U_{\text{control}}$  начинает изменяться под действием разностного фототока до тех пор, пока апертурные характеристики Мультисканов не установятся в такое положение относительно входного сигнала, при котором величина суммарного фототока не станет равной нулю.

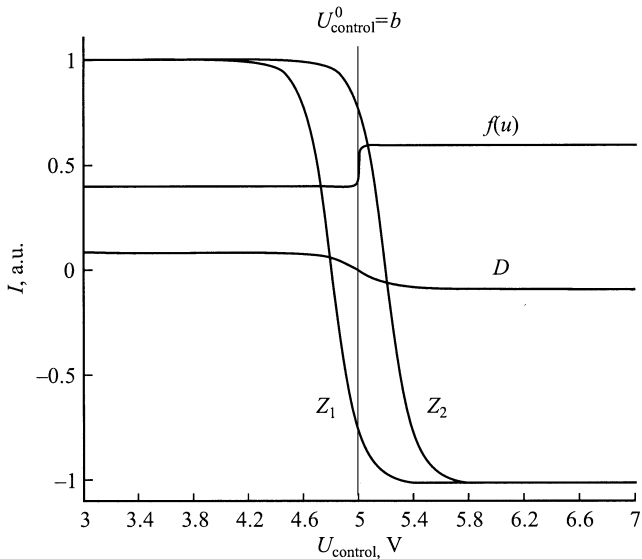
Поскольку такая схема двухапертурного синтеза предназначена для измерения положения фронта перепада яркости оптического сигнала, определим  $f(u)$  как

$$f(u) = p + q \operatorname{th} \frac{u - b}{B}. \quad (4)$$

При этом параметр  $b$  определяет положение фронта на интервале  $\pm E$ , параметр  $B$  определяет крутизну фронта, параметры  $q$  и  $p$  характеризуют величину перепада яркости и постоянную составляющую оптического сигнала соответственно. Тогда уравнение (3) принимает вид

$$\int_{-E+\varepsilon}^{E+\varepsilon} \left[ p + q \operatorname{th} \frac{u - b}{B} \right] \operatorname{th} \frac{u - U_{\text{control}} - \varepsilon}{A_u} du - \int_{-E-\varepsilon}^{E-\varepsilon} \left[ p + q \operatorname{th} \frac{u - b}{B} \right] \operatorname{th} \frac{u - U_{\text{control}} + \varepsilon}{A_u} du = 0. \quad (5)$$

Будем решать это уравнение относительно  $U_{\text{control}}$ , задав для определенности фиксированное положение фронта перепада яркости  $b = 5$ . Остальные параметры определим в виде следующих констант: напряжения, подаваемые на резистивные делители Мультисканов  $E = \pm 10 \text{ V}$ ; величина дополнительного смещения



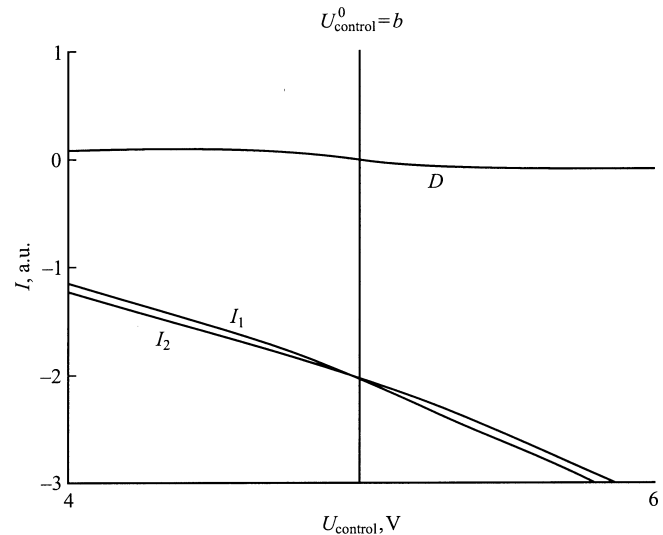
**Рис. 2.** Результаты анализа уравнения баланса токов.  $Z_1$  и  $Z_2$  — апертурные характеристики Мультиканов;  $f(u)$  — функция, имитирующая входное распределение;  $D$  — распределение величины разностного тока  $I_1 - I_2$  в области расположения фронта перепада яркости.

$\varepsilon = 0.2$  В; ширина переходной зоны апертурной характеристики Мультиканов  $A_u = 0.2$  В; ширина фронта перепада яркости оптического сигнала  $B = 0.02$  В; параметр  $q = 0.1$ ; параметр, характеризующий постоянную составляющую и контраст оптического распределения  $p = 0.5$ .

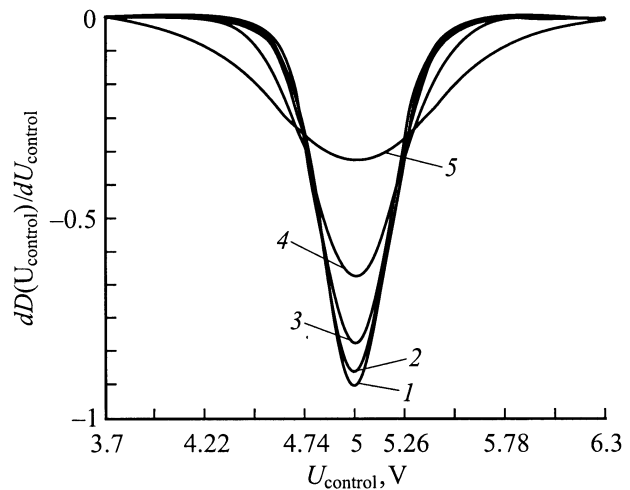
На рис. 2 представлен результат анализа уравнения баланса токов (5). Показаны функция  $f(u)$ , имитирующая исходное оптическое распределение при положении фронта в точке  $b = 5$ , и апертурные характеристики Мультиканов М1 и М2 ( $Z_1$  и  $Z_2$ ), сдвинутые относительно друг друга на величину  $u = 2\varepsilon$ . Кривая  $D(U_{\text{control}}) = I_1(U_{\text{control}}) - I_2(U_{\text{control}})$  показывает, что значение  $D(U_{\text{control}}^0) = 0$ , которое является решением уравнения (5), находится в точке  $U_{\text{control}}^0 = b$ , соответствующей заданному положению фронта вплоть до заложенной точности расчета.

Раздельное поведение  $I_1$  и  $I_2$  в области их пересечения представлено на рис. 3. Видно, что токи  $I_1$  и  $I_2$  имеют одну точку пересечения, что означает единственность найденного решения. Рассмотрим поведение разностной кривой  $D$  и интегральных значений токов  $I_1$  и  $I_2$ , представленных на рис. 3, 4, с точки зрения физической аргументации совпадения решения уравнения (5) с положением фронта перепада яркости  $b$ . Величина  $|I_1 - I_2|$  в областях насыщения кривой  $D(U_{\text{control}})$  справа и слева от точки перегиба равна суммарной величине тока с концевых участков, сдвинутых в пространстве Мультиканов, т. е. с участков от  $(-E - \varepsilon)$  до  $(-E + \varepsilon)$  и от  $(+E - \varepsilon)$  до  $(+E + \varepsilon)$ . Обозначим этот ток насыщения как  $\Delta I$ . Неизменность величины  $\Delta I$  как справа, так и слева от положения фронта свидетельствует о том, что

в интервале от  $(-E + \varepsilon)$  до  $(+E - \varepsilon)$  при положениях точек перегиба апертурных характеристик  $Z_1$  и  $Z_2$  вне области расположения фронта фототока с первого и второго Мультиканов взаимно компенсируются. Наличие тока  $\Delta I$  обеспечивает изменение  $U_{\text{control}}$  и тем самым перемещение  $Z_1$  и  $Z_2$  вдоль оси  $u$ . Когда одна из апертурных характеристик достигнет координаты расположения фронта, то за счет разницы освещенности справа и слева от фронта возникает дополнительный фототок, знак которого противоположен знаку тока  $\Delta I$ . При дальнейшем движении апертурных характеристик и достижения ими симметричного расположения относительно координаты фронта  $\Delta I$  становится равным нулю. Тем самым прекращается процесс накопления заряда



**Рис. 3.** Поведение токов  $I_1$  и  $I_2$  и их разности  $D$  в районе расположения фронта перепада яркости.



**Рис. 4.** Семейство производных  $dD(U_{\text{control}})/dU_{\text{control}}$  при различных значениях ширины фронта перепада яркости.  $B$ : 1 — 0.02, 2 — 0.05, 3 — 0.1, 4 — 0.2, 5 — 0.5.

на интеграторе  $\int$  и формируется значение  $U_{\text{control}}^0$ , соответствующее положению координаты фронта перепада яркости.

Рассмотрим производную  $dD(U_{\text{control}})/dU_{\text{control}}$ , показывающую, за счет каких изменений интегральной разности  $I_1 - I_2$  обеспечивается переход кривой  $D$  через нуль. Именно эта производная позволяет определить распределение фототоков, медиана которого соответствует координате фронта и иллюстрирует, за счет чего такой дифференциальный признак исходного распределения, как координата фронта перепада яркости, определяется с помощью интегральной операции нахождения медианы, т.е. признака, наиболее устойчивого к изменению ширины и формы фронта, а также к влиянию пространственных и временных шумов [8].

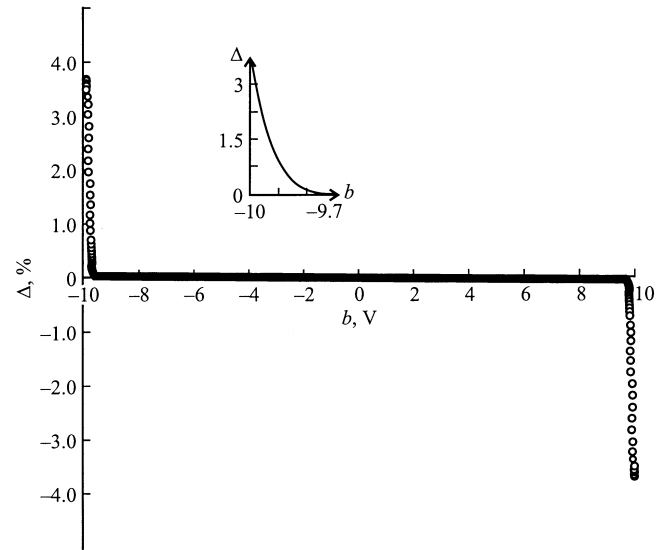
На рис. 4 приведено семейство  $dD(U_{\text{control}})/dU_{\text{control}}$  для различных значений ширины фронта сигнала  $B$ . Видно, что с увеличением ширины фронта  $B$  уменьшается величина максимума и увеличивается ширина функции  $dD(U_{\text{control}})/dU_{\text{control}}$ . Однако это расширение происходит значительно медленнее, чем увеличение ширины фронта  $B$ . Так, при  $B = 0.2 - 2 \text{ V}$ , т.е. при десятикратном расширении фронта, увеличение эффективного значения разностной апертуры происходит менее чем в 2 раза. Этот эффект связан со свойствами апертурных характеристик Мультиканов, которые близки по форме к функциям гиперболических тангенсов, разность которых достаточно быстро стремится к нулю.

Существенное влияние на форму  $dD(U_{\text{control}})/dU_{\text{control}}$  оказывают величина сдвига  $\varepsilon$  и крутизна апертурных характеристик  $A_n$ , которые являются параметрами системы, отображающими размер пространственного „окна“, образованного сдвинутыми апертурными характеристиками Мультиканов. В пределах этого окна происходит интегрирование разностного фототока и производится интегральная операция определения положения фронта перепада яркости.

Поскольку апертурные характеристики Мультиканов имеют достаточно пологий фронт (ширина переходного участка на уровне 0.8 от тока насыщения составляет 0.4 V), то при значениях  $b$ , близких к краям диапазона  $+E$  и  $-E$ , может возникать заметная ошибка при определении координаты положения фронта.

На рис. 5 приведена величина относительной ошибки  $\Delta = (U_{\text{control}}^0 - b)/b$  в % по всему диапазону  $\pm 10 \text{ V}$  для ширины фронта сигнала  $B = 0.2 \text{ V}$ . Видно, что при отсутствии шума практически на всем диапазоне рабочего интервала сохраняется точность определения координаты фронта, соответствующая заложенной точности расчета. На расстоянии 0.5% от края прибора точность падает до 1%. При существенном увеличении ширины фронта сигнала происходит увеличение ошибки на краях диапазона и сокращение зоны заданной точности рабочего интервала.

Расширение зоны высокоточных вычислений может производиться с помощью уменьшения параметра  $\varepsilon$ . Однако уменьшение  $\varepsilon$  и, следовательно геометрического



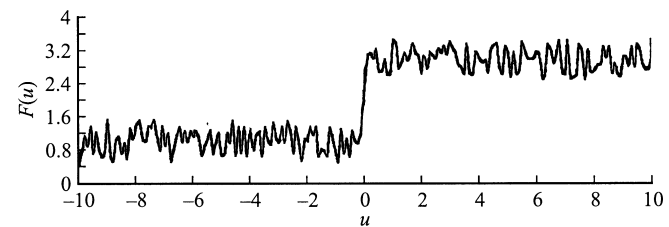
**Рис. 5.** Распределение относительной ошибки  $\Delta = (U_{\text{control}}^0 - b)/b \%$  в диапазоне  $\pm 10 \text{ V}$  при ширине фронта сигнала  $B = 0.2 \text{ V}$ . На вставке — величина относительной ошибки на краю рабочего диапазона.

сдвига приборов  $\Delta x$ , снижает величину разностного тока  $D(U_{\text{control}})$ , что уменьшает скорость и точность определения координаты фронта.

Необходимой оценкой предложенной модели является проверка устойчивости решения при наличии пространственных неравномерностей и шумов. С этой целью нами была использована вычислительная модель, накладывающая на сигнал  $f(u)$  случайный процесс, моделирующий шум. При этом в задачу входило получение принципиальной оценки влияния шума на точность метода по сравнению с методами временного сканирования без подробного анализа его спектрального состава.

Модель сигнала с шумом  $F(u)$  приведена нами на рис. 6. Величина сигнал-шум оценивалась нами по соотношению между величиной перепада фронта и шириной шумовой дорожки. Эта величина в качестве параметра  $N$  в модельных расчетах выбиралась равной 1, 2, 10. Для этих моделей была рассчитана величина средней квадратической ошибки  $\sigma$  по 100 выборкам. Результаты приведены в таблице.

Для сравнения с традиционными методами был проведен расчет этой ошибки для  $N = 1$  при определении



**Рис. 6.** Пример реализации оптического сигнала  $F(u)$  при наличии шумов.

$N$	$\sigma$
1	$1.997 \cdot 10^{-3}$
2	$1.239 \cdot 10^{-3}$
10	$1.934 \cdot 10^{-4}$

координаты фронта по положению максимума первой производной  $F(u)$ . Полученная величина  $\sigma$  оказалась равной  $8 \cdot 10^{-2}$ , что в 40 раз превышает ошибку, получаемую при разработанном нами интегральном методе.

## Выводы

Исследование возможности определения положения фронта перепада яркости слабоконтрастного оптического сигнала с помощью интегральной методики, основанной на применении двойной синтезированной апертуры, позволяет сделать следующие выводы.

Совместное использование электрического смещения и пространственного сдвига фотоприемников Мультискан дает возможность создать методику определения координаты дифференциального признака сигнала в следящем режиме реального времени без сканирования интервала задания исходной функции.

Использование этой методики позволяет получить единственное решение, соответствующее положению фронта перепада яркости оптического сигнала, инвариантно к ширине этого фронта, величине и контрасту оптического распределения. Решение имеет высокую точность в широком интервале fotocувствительного участка используемых фотоприемников.

Методика обладает свойством снижения влияния шумов на точность определения координаты за счет их интегрирования в интервале  $2\varepsilon$ . Так, при значении отношения сигнал/шум, равном единице, средняя квадратическая ошибка составляет  $2 \cdot 10^{-3}$ .

Таким образом, предложенная в работе методика показала новые аспекты функциональных возможностей синтезированной апертуры, сформированной на основе фотоприемников Мультискан, что позволяет с ее помощью осуществить не только определение координат локальных сигналов, но и формировать текущие значения положения фронта перепада яркости оптических сигналов.

## Список литературы

- [1] Алешин И.В., Гончаров Э.Г., Зурбаян А.З. и др. // Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 5. С. 17–21.
- [2] Зурбаян А.З. // Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 11. С. 68–77.
- [3] Rockwell G., Kineke G.C. // J. Geophys. Res. 1995. Vol. 15. P. 2321–2340.
- [4] Подласкин Б.Г., Тульверт В.Ф., Чекулаев Е.А. // ПТЭ. 1994. № 4. С. 169–175.
- [5] Белоусова И.М., Буканов А.В., Леонов С.Н., Скепко А.Г. // ОМП. 1990. № 12. С. 15–18.
- [6] Дич Л.З., Подласкин Б.Г., Токранова Н.А. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 2. С. 169–175.
- [7] Podlaskin B.G., Tokranova N.A. // 4<sup>th</sup> Intern. Conf. on Ultraprecision in Manufacturing Engineering on Progress in Precision Engineering and Nanotechnology. 1997. Vol. 1. P. 140–143.
- [8] Ширяев А.Н. Вероятность. М.: Наука, 1989. 640 с.
- [9] Берковская К.Ф., Кириллова Н.В., Подласкин Б.Г. и др. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 10. С. 2015–2024.
- [10] Подласкин Б.Г., Васильев А.В., Гук Е.Г., Токранова Н.А. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 10. С. 110–116.