

01;07

# Аналоговый процессор на основе фотоприемника мультискан для апертурной коррекции медианы искаженного оптического сигнала

© Б.Г. Подласкин, Е.Г. Гук

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: bgp@holo.ioffe.rssi.ru

(Поступило в Редакцию 12 января 2006 г.)

Показана возможность построения на базе матрицы мультисканов аналогового процессора, совмещающего в себе регистрацию оптических сигналов с новой нетрадиционной функцией их обработки, заключающейся в определении максимально точного направления на источник сигнала при нарушении симметрии оптического изображения, попадающего на фотоприемную матрицу. Впервые предложена оценка распределения искаженного оптического сигнала в виде квазимедианы, доказавшей свою эффективность при определении направления на источник сигнала в отсутствие априорной информации о форме искажения сигнала и положении исходного неискаженного сигнала.

PACS: 07.07.Df

## Введение

Прецизионное измерение положения светового сигнала для определения направления на его источник требует в современных задачах высокой точности. Эта точность достигает  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  от поля зрения фотоприемника, что соответствует допустимым пространственным ошибкам  $1$ – $0.1 \mu\text{m}$ .

Внимание к этом вопросу в настоящее время отражено в ряде работ, относящихся к построению аналоговых процессоров оптического сигнала, например в [1,2], где обсуждаются их теория, устройство и применение. Как правило, каждый из таких процессоров предназначен для решения комплекса специализированных задач. В работе [3] предложен метод коррекции медианы электрического сигнала. Однако задача коррекции координат медианы оптических сигналов до сих пор не была решена ввиду ее информационной сложности.

## Построение модели и расчет параметров

Существующие методы определения угла падения оптического сигнала на фотоприемник обычно используют такой функционал, как медиана распределения этого сигнала  $M_{f(x)}$ , позволяющая получить в общем случае более правильную оценку направления на источник сигнала, чем математическое ожидание или мода [4].

Для определения текущего значения медианы оптического сигнала в следящем режиме необходимо обеспечить непрерывное интегральное „взвешивание“ фототоков в условиях реального времени.

Обозначим функцию распределения оптического сигнала  $f(x)$ . Определение медианы при этом производится

в соответствии с каноническим уравнением [5]

$$\int_{-a}^{M_{f(x)}} f(x) dx - \int_{M_{f(x)}}^a f(x) dx = 0. \quad (1)$$

Именно такой пример определения положения медианы распределения  $f(x)$  при автоматическом поддержании равенства интегралов справа и слева от медианы  $M_{f(x)}$ , т. е. удовлетворении условия (1), реализуется в фотоприемнике мультискан, принцип действия которого изложен нами в [6].

Фотоприемник мультискан обладает вольт-амперной характеристикой (ВАХ) вида  $I(u) = \tanh \frac{u-v}{\Delta U}$ , где  $\Delta U$  — ширина переходной области между участками насыщения этой характеристики, а  $v$  — положение нуля этой характеристики в пространстве напряжения  $u$ , распределенного вдоль оси  $x$  фотоприемника. Поскольку  $x$  пропорционально  $u$ , здесь и далее будем работать в пространстве переменной  $x$ , т. е.  $I(x) = \tanh \frac{x-\xi}{A}$ , где  $\xi$  и  $A$  с точностью до постоянного множителя соответствуют  $v$  и  $\Delta U$ . Тогда (1) имеет вид

$$\int_{-a}^{+a} f(x) \tanh \frac{x - M_{f(x)}}{A} dx = 0. \quad (2)$$

Решение этого уравнения, реализуемое с помощью фотоприемника мультискан, выходное напряжение которого пропорционально  $M_{f(x)}$ , устойчиво и не содержит методической ошибки.

Однако практика показывает, что временные нестабильности источников оптического сигнала, влияние среды распространения света и ряд других причин, например, воздействие фоновых засветок, приводят к искажению формы функции  $f(x)$ , что вызывает изменения значения медианы, равные  $\pm \Delta M_{f(x)}$ , не связанные с

пространственным смещением источника сигнала и, следовательно, к ошибкам в определении направления на его источник. Важно отметить, что формы искаженных сигналов  $\varphi(x)$  при этом неизвестны.

Стандартная длина фоточувствительной области мультискана равна 20 mm, при этом ширина оптических сигналов обычно составляет  $\sim 1$  mm и менее. На основе этого определим интервал задания оптического сигнала  $[-a, a]$  равным  $[-0.4, 0.4]$  mm.

Для проведения прецизионных измерений необходимо использование оценок, максимально устойчивых к изменению формы оптического сигнала при сохранении чувствительности к его пространственному перемещению. Если имеется распределение сигнала  $f(x)$  с медианой  $M_{f(x)}$ , которое вследствие некоторых причин деформируется в некое распределение  $\varphi(x)$  с медианой  $M_{\varphi(x)}$  при неизменном положении источника сигнала, то максимальную точность определения направления на неподвижный источник сигнала имеет такая оценка  $\mathfrak{S}_{\varphi(x)}$  распределения  $\varphi(x)$ , которая отличается от медианы  $M_{\varphi(x)}$  оптического распределения  $f(x)$  не более чем на заданную малую величину  $\varepsilon$ .

Точность определения положения медианы оптического сигнала с помощью мультискана составляет величину порядка 1  $\mu\text{m}$ , в то время как оптические искажения неподвижного сигнала могут вносить ошибку до 30  $\mu\text{m}$ .

Целью данной работы является анализ возможности синтеза такой составной апертурной характеристики мультискана  $\mathfrak{R}(x)$ , при которой для всех  $k$  искаженных сигналов  $\varphi^k(x)$  справедливо

$$\int_{-a}^{\mathfrak{S}_{\varphi^k(x)}} \mathfrak{R}(x) \varphi^k(x) dx - \int_{\mathfrak{S}_{\varphi^k(x)}}^a \mathfrak{R}(x) \varphi^k(x) dx = 0, \quad (3)$$

так что для заданной малой величины  $\varepsilon$  справедливо

$$|M_{f(x)} - \mathfrak{S}_{\varphi^k(x)}| \leq \varepsilon. \quad (4)$$

Оценку  $\mathfrak{S}_{\varphi^k(x)}$  будем называть модифицированной медианой сигналов  $\varphi^k(x)$ . Сущностью модифицированной медианы как оценки направления на источник сигнала является ее максимальное приближение к значению медианы  $M_{f(x)}$  неискаженного сигнала при возможных искаженных в широких пределах сигналах  $\varphi^k(x)$ .

Поскольку для точного решения уравнения (3) требуется знание формы искаженных сигналов  $\varphi^k(x)$ , задача нахождения  $\mathfrak{R}(x)$ , удовлетворяющего условию (4), становится информационно недостаточной.

Это противоречие может быть разрешено в том случае, если фотоприемник совмещает в себе функции регистрации падающего светового потока и функции аналогового процессора параллельного действия, вычисляющего значения модифицированных медиан  $\mathfrak{S}_{\varphi^k(x)}$  по реальным распределениям освещенностей на его фоточувствительном слое в соответствии с программой,

задаваемой синтезированной апертурной характеристикой фотоприемника  $\mathfrak{R}(x)$ .

Искомая синтезированная апертура  $\mathfrak{R}(x)$  должна удовлетворять следующим требованиям:

— для обеспечения чувствительности к сдвигу как неискаженного, так и искаженных оптических сигналов, апертурная характеристика  $\mathfrak{R}(x)$  должна обладать свойством нечетности, т.е.  $\mathfrak{R}(x) = \mathfrak{R}(-x)$ , и обеспечивать  $\frac{d\mathfrak{R}(x)}{dx} \neq 0$  при  $x = 0$ ;

— для однозначности определения положения медианы сигнала по всей зоне фоточувствительности мультискана  $L$  необходимо, чтобы суммарное значение результатов интегрирования произведения синтезированной апертуры и сигнала удовлетворяло условию

$$\int_{-L/2}^{x_1} \mathfrak{R}(x) \varphi^k(x - x_1) dx + \int_{x_1}^{L/2} \mathfrak{R}(x) \varphi^k(x - x_1) dx \begin{cases} > 0 & \text{при } x_1 > \mathfrak{S}_{\varphi^k(x)} \\ < 0 & \text{при } x_1 < \mathfrak{S}_{\varphi^k(x)} \end{cases}; \quad (5)$$

—  $\mathfrak{R}(x)$  должна быть представима в виде набора традиционных функций, описывающих апертурную характеристику мультискана и отличающихся различной крутизной переходных областей ( $A$ ) и различными пространственными сдвигами этих функций ( $\Delta$ ), определяющими положение их первой производной. Реализация таких функций с набором необходимых параметров осуществляется с помощью различных внешних напряжений, прикладываемых к соответствующему набору фотоприемников мультискана.

В нашем случае компенсацию искаженной формы оптического сигнала с помощью синтезированной апертуры  $\mathfrak{R}(x)$  будем основывать на создании участка ВАХ, проходящей через нулевую точку, с первой производной, имеющей минимум в точке „нуль“ и увеличивающей свое значение симметрично с увеличением  $|\pm x|$ . При нарушении симметрии оптического сигнала нулевая точка апертуры в соответствии с (2) будет стремиться к положению медианы  $M_{\varphi^k(x)}$ , которая смещена в область большей интенсивности искаженного сигнала. При наличии изгиба производной ВАХ участки сигнала с большей интенсивностью попадают на более пологий участок, а с меньшей — на участок с большей крутизной. Таким образом, возникает асимметрия преобразования оптического сигнала в фототок, замедляющая движение апертуры к точке  $M_{\varphi^k(x)}$  и останавливающая процесс выравнивания токов в точке значения модифицированной медианы  $\mathfrak{S}_{\varphi^k(x)}$ , в которой удовлетворяются требования уравнения (3).

Будем искать  $\mathfrak{R}(x)$  в виде ряда, состоящего из набора функций, представленных как гиперболические тангенсы, симметричные относительно точки  $x = 0$  и имеющие различные взаимные пространственные сдвиги  $\Delta_n$ , несо-

вые коэффициенты  $b_n$  и крутизну  $A_n$ :

$$\begin{aligned} \Re(x) = & b_1 \tanh \frac{x}{A_1} + b_2 \left( \tanh \frac{x - \Delta_2}{A_2} + \tanh \frac{x + \Delta_2}{A_2} \right) \\ & + b_3 \left( \tanh \frac{x - \Delta_3}{A_3} + \tanh \frac{x + \Delta_3}{A_3} \right) \\ & \dots + b_n \left( \tanh \frac{x - \Delta_n}{A_n} + \tanh \frac{x + \Delta_n}{A_n} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Форма ВАХ с перепадом производной может быть построена с помощью двух пересекающихся гиперболических тангенсов противоположного знака, в аргумент одного из которых введен сдвигающий параметр  $\Delta_2$  (рис. 1, *a*). Используем для этого два первых члена ряда (6), придав отрицательное значение коэффициенту  $b_1$

$$I_1(x) = -b_1 \tanh \frac{x}{A_1}, \quad (7)$$

$$I_2(x) = b_2 \left( \tanh \frac{x - \Delta_2}{A_2} + \tanh \frac{x + \Delta_2}{A_2} \right). \quad (8)$$

В результате суммирования (7) и (8) получается центральный участок синтезированной апертур

$$\begin{aligned} I_{(1+2)}(x) &= I_1(x) + I_2(x) \\ &= -b_1 \tanh \frac{x}{A_1} + b_2 \left( \tanh \frac{x - \Delta_2}{A_2} + \tanh \frac{x + \Delta_2}{A_2} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

При этом величина параметра  $\Delta_2$  в  $I_2(x)$  определяет положение максимумов производной  $\frac{dI_{(1+2)}(x)}{dx}$  на участке  $[-a, a]$  (рис. 1, *b*), а соотношение величин  $b_1$  и  $b_2$  в совокупности с  $A_1$  и  $A_2$  обуславливает значение минимума производной в точке  $x = 0$  и ее максимума в точках  $x = \pm\Delta_2$ . При выборе этих параметров мы сталкиваемся со следующим противоречием. Увеличивая величину  $\Delta_2$ , мы расширяем участок ВАХ, обладающий перепадом производной, приближая его к ширине оптического сигнала. Однако увеличение ширины этого участка ВАХ приводит к уменьшению крутизны его перепада, т.е. к уменьшению его второй производной, что снижает эффективность компенсации искажения сигнала при смещении ВАХ в сторону его медианы.

Компромиссные значения параметров, позволяющих сохранить значительный перепад функции  $I_{(1+2)}(x)$  на 80% участка задания сигнала  $[-0.4, 0.4]$  выбраны следующими:  $\Delta_2 = 0.3$ , параметры  $A_1$  и  $A_2$ , регулирующие крутизну изгиба в точке  $x = 0$ , равны 0.2 и 0.35 соответственно при значении коэффициента  $b_2 = 1$ , а  $b_1 = 0.5$ . Необходимое уточнение значения  $b_1$  будет проведено позже в результате модельных вычислений для заданной величины ошибки  $\varepsilon$ .

Величина  $\varepsilon$  по постановке задачи должна быть малой, т.е. составлять величину порядка  $10^{-4}$  mm, или  $10^{-2}$  от  $(M_{\phi^k(x)}^k - M_{f(x)})$ , что требует не только большого

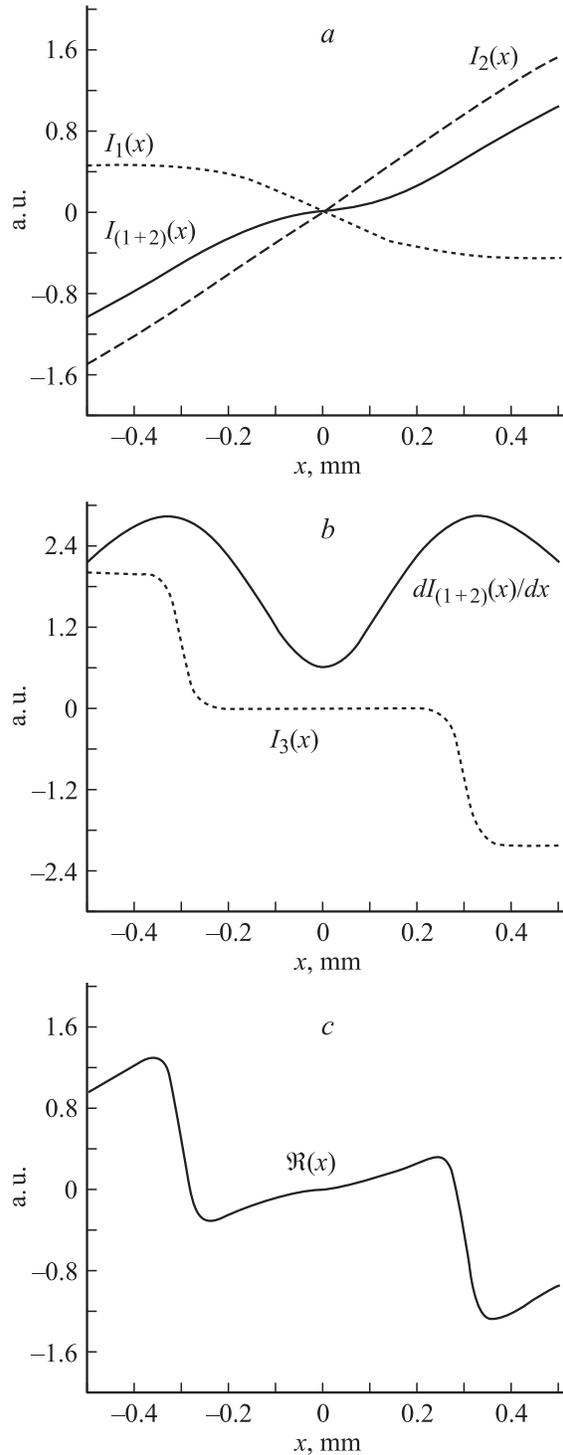


Рис. 1. Последовательность формирования синтезированной апертур.

перепада величины производной ВАХ на пространственной области, соизмеримой с шириной сигнала, но и создания дополнительных участков ВАХ с обратным знаком преобразования фототока для компенсации мощных краевых участков распределений оптического сигнала.

С этой целью в синтезированную апертуру вводится дополнительное слагаемое (рис. 1, b):

$$I_3(x) = -b_3 \left( \tanh \frac{x - \Delta_3}{A_3} + \tanh \frac{x + \Delta_3}{A_3} \right). \quad (10)$$

Совместим точки перегиба  $I_2(x)$  и  $I_3(x)$ , приравняв  $\Delta_3$  и  $\Delta_2$ , а величину  $A_3$  выберем возможно малой (0.03) для создания крутых фронтов функции  $I_3(x)$  и равенства ее нулю на участке  $\pm\Delta_2$ . В результате синтезированная апертура  $\mathfrak{R}(x)$  принимает вид (рис. 1, c):

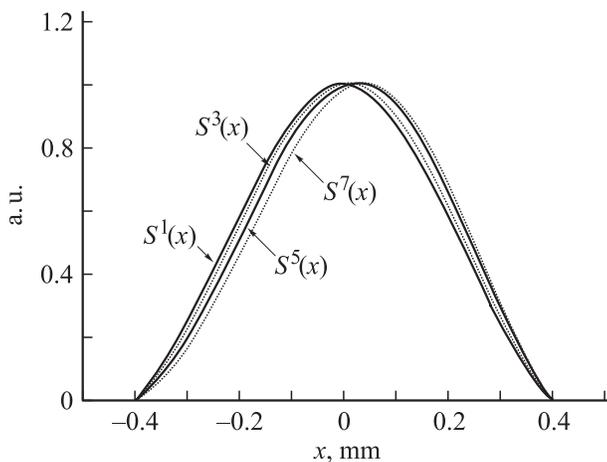
$$\begin{aligned} \mathfrak{R}(x) = & -b_1 \tanh \frac{x - \Delta_1}{A_1} \\ & + b_2 \left( \tanh \frac{x - \Delta_2}{A_2} + \tanh \frac{x + \Delta_2}{A_2} \right) \\ & - b_3 \left( \tanh \frac{x - \Delta_2}{A_3} + \tanh \frac{x + \Delta_2}{A_3} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Проверка показала, что  $\mathfrak{R}(x)$  удовлетворяет условию (5) при  $b_3 = 1$ .

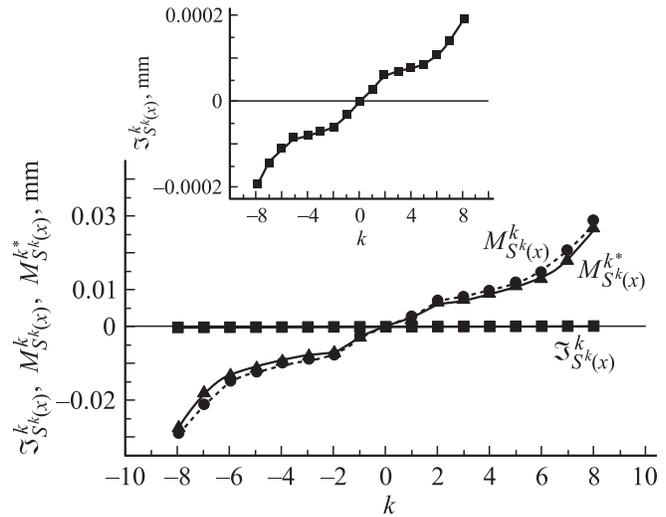
Для оценки действия синтезированной апертуры  $\mathfrak{R}(x)$  с точки зрения возможности компенсации асимметрии оптического сигнала и выполнения условия (4) необходимо использовать рабочую модель искаженных оптических сигналов, пространственно согласованную с рабочим диапазоном фотоприемника мультискан и действующей шириной синтезированной апертуры.

Построим на участке  $[-a, a]$  модель искаженных сигналов  $S^k(x)$  на основе экспоненциальной аппроксимации сигнала, придав им свойство  $S^k(-a) = S^k(a) = 0$ . На рис. 2 отображено семейство кривых для этой модели при различной степени искажения симметрии оптического сигнала, приводящей к сдвигу медиан сигналов относительно медианы неискаженного сигнала на величину от единиц до  $30 \mu\text{m}$ .

После того как из общей логики функциональных требований к синтезированной апертуре были выбраны



**Рис. 2.** Пример оптических сигналов  $S^k(x)$  с различной степенью искажения симметрии, увеличивающейся с ростом значения  $k$ .



**Рис. 3.** Значения квазимедиан  $\mathfrak{S}_{S^k(x)}^k$  по сравнению со значениями медиан сигналов  $S^k(x)$ , асимметрия которых увеличивается с ростом  $k$ . Здесь  $M_{S^k(x)}^k$  соответствуют медианам искаженных сигналов, а  $M_{S^k(x)}^{k*}$  — медианам, получаемым в результате обработки сигналов традиционной апертурой  $R(x)$ .

значения параметров  $b_2, b_3, \Delta_2, \Delta_3, A_1, A_2$  и  $A_3$ , значение  $b_1$  определялось из решения (3) для семейства сигналов  $S^k(x)$  при условии  $\varepsilon = 10^{-4} \text{ mm}$ . В результате решения уравнения (3) величина  $b_1$  была определена равной 0.47. Таким образом, выражение для синтезированной апертуры  $\mathfrak{R}(x)$  приобретает вид

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}(x) = & -0.47 \tanh \frac{x}{0.2} \\ & + \left( \tanh \frac{x - 0.3}{0.35} + \tanh \frac{x + 0.3}{0.35} \right) \\ & - \left( \tanh \frac{x - 0.3}{0.03} + \tanh \frac{x + 0.3}{0.03} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Подставив (12) в (3), найдем значения квазимедиан  $\mathfrak{S}_{\varphi^k(x)}^k$  для модели несимметричных сигналов на основе экспоненциальной  $S^k(x)$  аппроксимации

$$\int_{-a}^a \mathfrak{R}(x) S^k(x) dx - \int_{\mathfrak{S}_{S^k(x)}^k}^a \mathfrak{R}(x) S^k(x) dx = 0. \quad (13)$$

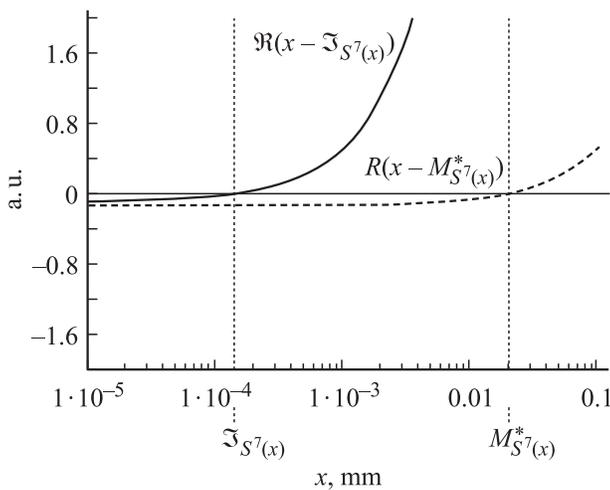
Результаты решения этого уравнения относительно  $\mathfrak{S}_{S^k(x)}^k$  представлены на рис. 3. Расчеты проведены для искаженных сигналов как  $S^k(x)$ , так и  $S^k(-x)$ . Там же представлены значения медиан  $M_{S^k(x)}^k$  и их значения  $M_{S^k(x)}^{k*}$ , получаемые в результате обработки сигнала не синтезированной, а традиционной апертурой вида  $R(x) = \tanh \frac{x-x_1}{0.3}$ . Из графиков, представленных на рис. 3, видно, что значения медиан  $M_{S^k(x)}^k$  искаженных сигналов смещаются относительно медианы неискаженного

сигнала на величину до  $30\ \mu\text{m}$  для сигнала  $S^8(x)$ . Значения  $M_{S^k(x)}^k$ , получаемые в результате использования традиционной апертюры, практически не отличаются от  $M_{S^k(x)}^k$ . В случае же использования синтезированной апертюры значения квазимедиан отличаются от значения медианы неискаженного сигнала не более чем на  $0.2\ \mu\text{m}$ , т.е. ошибка в определении направления на источник оптического сигнала уменьшается на два порядка.

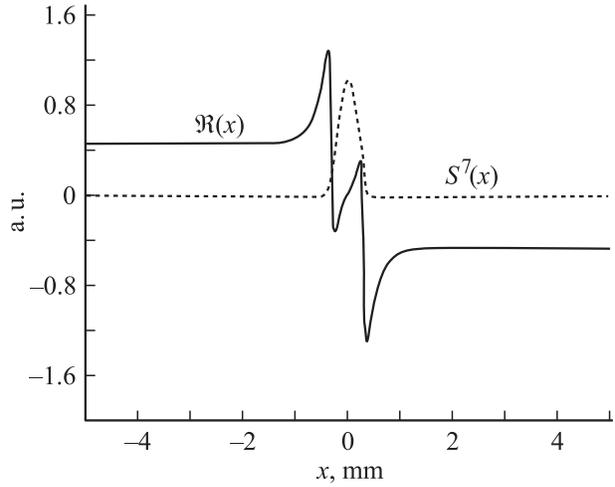
Этот же результат проиллюстрирован на рис. 4 с использованием апертюрных характеристик  $\mathfrak{R}(x)$  и  $R(x)$ , взаимодействующих с асимметричным сигналом  $S^7(x)$ . Из рисунка видно, что синтезированная апертюра, имеющая для данного сигнала вид  $\mathfrak{R}(x - \mathfrak{S}_{S^7(x)}^7)$ , пересекает прямую  $y = 0$  в точке, соответствующей квазимедиане  $\mathfrak{S}_{S^7(x)}^7$ , равной  $1.4 \cdot 10^{-4}\ \text{mm}$ . В то же время традиционная апертюра  $R(x)$  пересекает прямую  $y = 0$  в точке, равной медиане искаженного сигнала  $M_{S^7(x)}^7 = 2.5 \cdot 10^{-2}\ \text{mm}$ . Тем самым показано, что использование разработанной синтезированной апертюры  $\mathfrak{R}(x)$  позволяет получить оценку координаты асимметричного сигнала в виде квазимедианы  $\mathfrak{S}_{\varphi^k(x)}^k$ , расположенной относительно медианы неискаженного сигнала на два порядка ближе, чем медиана  $M_{\varphi^k(x)}^k$  искаженного сигнала.

На рис. 5 показаны взаимное расположение и форма синтезированной апертюры  $\mathfrak{R}(x)$  и искаженного оптического сигнала  $S^7(x)$  на интервале  $L/2$ .

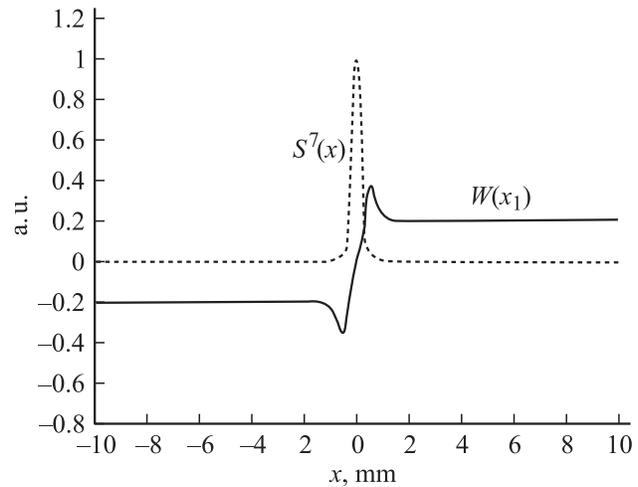
Физический механизм компенсации асимметрии сигнала заключается в двух интегральных процессах. Один из них определяется компенсацией фототоков за счет асимметричности ВАХ, возникающей при ее сдвиге в центральной области апертюры относительно точки  $x = 0$ , а другой — взаимной компенсацией фототоков на участках, разделенных точками  $x_1 = -\Delta_2$  и  $x_2 = +\Delta_2$ , справа и слева от  $\mathfrak{S}_{\varphi^k(x)}^k$  вследствие обратного знака преобразования фототоков, обеспечиваемого введением слагаемого  $I_3(x)$ .



**Рис. 4.** Взаимное расположение квазимедианы  $\mathfrak{S}_{S^7(x)}^7$  и медианы  $M_{S^7(x)}^*$ , полученных при использовании синтезированной апертюры  $\mathfrak{R}(x)$  и  $R(x)$  соответственно.



**Рис. 5.** Взаимное расположение и формы синтезированной апертюры  $\mathfrak{R}(x)$  и искаженного оптического сигнала  $S^7(x)$  на интервале  $L/2$ .



**Рис. 6.** К доказательству отсутствия ложных решений уравнения (3): свертка синтезированной апертюры  $\mathfrak{R}(x)$  и сигнала  $S^7(x)$  на всем диапазоне  $L$ .

Поскольку, как видно из рис. 1, с, синтезированная апертюра имеет три точки пересечения с осью  $x$ , важно убедиться в единственности решения уравнения (3) относительно  $\mathfrak{S}_{\varphi^k(x)}^k$ . Отсутствие неоднозначности решений подтверждается графиком (рис. 6), представляющим интегральную свертку синтезированной апертюры с одним из искаженных сигналов  $S^7(x)$ :

$$W(x_1) = \int_{-L/2}^{x_1} \mathfrak{R}(x - x_1) S^7(x) dx + \int_{x_1}^{L/2} \mathfrak{R}(x - x_1) S^7(x) dx. \quad (14)$$

Видно, что  $W(x_1)$  пересекает ось  $x$  в единственной точке, соответствующей значению квазимедианы  $\mathfrak{S}_{S^7(x)}^7$ .

По постановке задачи значение квазимедианы  $\mathfrak{S}_{\varphi^k(x)}^k$  является смещенной оценкой, на величину которой должна оказывать влияние величина сигналов  $S^k(x)$  и соответственно процесса их нормировки. Однако исследование этой проблемы показало, что вследствие малости интеграла  $\int_0^{\mathfrak{S}_{\varphi^k(x)}^k} \Re(x)S^k(x)dx$  увеличение амплитуды  $S^k(x)$  на четыре порядка приводят к изменению оценки  $\mathfrak{S}_{\varphi^k(x)}^k$  не более чем на пренебрежимо малую величину ( $\sim 2 \cdot 10^{-6}$  mm).

## Заключение

Результаты, полученные в данной работе, показывают возможность построения на базе матрицы мультисканов аналогового процессора, совмещающего функцию регистрации оптических сигналов с новой нетрадиционной функцией их обработки, заключающейся в определении максимально точного направления на источник сигнала при нарушении симметрии формы сигнала, попадающего на фотоприемную матрицу.

В работе впервые предложена оценка распределения искаженного оптического сигнала в виде квазимедианы, доказавшей свою эффективность при определении направления на источник сигнала в отсутствие априорной информации о форме искажения сигнала и положении исходного неискаженного сигнала.

Экспериментальная проверка предложенной методики представляет значительные трудности вследствие невозможности моделирования искажений сигналов с необходимой точностью. Косвенные подтверждения работоспособности данной методики нами были получены с помощью схемы, использующей щелевую оптику, в эксперименте по устранению влияния мощной солнечной засветки на координату слабого модулированного сигнала. В результате ошибку в определении координат, достигавшую  $20 \mu\text{m}$ , удалось снизить до  $0.5 \mu\text{m}$  [7].

Отметим, что полученное эмпирически выражение для синтезированной апертуры  $\Re(x)$  не является единственным и требует более подробного анализа и уточнения. Также задачей дальнейших исследований является разработка алгоритма построения синтезированных апертур с определенными свойствами для решения различных задач обработки оптического сигнала. С этой точки зрения мультисканная матрица представляет собой устройство, позволяющее реализовать чрезвычайно широкий набор весовых функций, вплоть до создания универсального перестраиваемого оптического фильтра для проведения операций согласованной фильтрации оптических сигналов. Уникальной особенностью такой матрицы, как показано нами в [8], является формирование сигналов, текущие значения которых пропорциональны интегральным моментам оптических изображений вплоть до высоких порядков.

## Список литературы

- [1] Cabera R., Carlosena A. // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 1997. Vol. 12. N 2. P. 153–168.
- [2] Znamirovski L., Palusinski O.A., Vruthula B.K. // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 2004. Vol. 39. N 1. P. 55–73.
- [3] DiAz-za' Nchez A., Ramirez-Angulo J., and Lemus-Lopez J. // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 2003. Vol. 36. N 3. P. 207–213.
- [4] Леман Э. Теория точечного оценивания. М.: Наука, 1991. 374 с.
- [5] Ширяев А.Н. Вероятность. М.: Наука, 1989. 640 с.
- [6] Берковская К.Ф., Кириллова Н.В., Подласкин Б.Г., Столвицкий В.М., Токранова Н.А. // Научно-технические достижения. М.: ВИМИ, 1992. Вып. 2. С. 22.
- [7] Подласкин Б.Г., Васильев А.В., Гук Е.Г., Токранова Н.А. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 10. С. 110–116.
- [8] Подласкин Б.Г., Чекулаев Е.А. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 11. С. 95–102.