

07;12

# Анализ компенсации искажений оптических сигналов с помощью позиционно-чувствительного фотоприемника мультискан методом формирования квазимедианы

© 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 13 июня 2006 г.)

Рассмотрен механизм перераспределения фототоков фотоприемника мультискан под воздействием сложной синтезированной апертуры, позволяющий сформировать оценку положения искаженных оптических сигналов, максимально приближенную к медиане неискаженного сигнала, определяющей направление на источник оптического сигнала.

PACS: 85.60.Jz

## Введение

В работе [1] нами была рассмотрена задача построения на фотоприемнике мультискан синтезированной апертуры, позволяющей не только определять направление на источник локального оптического сигнала по положению его медианы, но и в случае искажения формы оптических сигналов формировать оценку, максимально приближенную к значению медианы неискаженного сигнала  $S^0(x)$ .

В качестве модели искаженных сигналов было использовано семейство функций  $S^k(x)$ , полученных с помощью экспоненциальной аппроксимации, набор которых приведен в [1]. Медианы этих сигналов  $S^k(x)$  соответственно имеют значения  $M_{S^k(x)}$ .

Была показана возможность синтеза такой составной апертурной характеристики мультискана  $\mathfrak{R}(x)$ , при которой для всех  $k$  искаженных сигналов  $S^k(x)$  справедливо

$$\int_{-L/2}^{\mathfrak{J}_{S^k(x)}} \mathfrak{R}(x) S^k(x) dx - \int_{\mathfrak{J}_{S^k(x)}}^{L/2} \mathfrak{R}(x) S^k(x) dx = 0, \quad (1)$$

так что для наперед заданной малой величины  $\varepsilon$

$$|M_{S^0(x)} - \mathfrak{J}_{S^k(x)}| \leq \varepsilon. \quad (2)$$

Здесь  $M_{S^0(x)}$  является значением медианы неискаженного сигнала, а  $\mathfrak{J}_{S^k(x)}$  представляет собой модифицированную оценку, называемую нами в дальнейшем квазимедианой искаженных сигналов  $S^k(x)$ , которая, как видно из (2), максимально приближена к значению  $M_{S^0(x)}$ .

Синтез апертуры  $\mathfrak{R}(x)$  был осуществлен на основе ряда, заданного на длине мультискана  $x \in [-L/2, +L/2]$  и состоящего из функций, представленных в виде гиперболических тангенсов, симметричных относительно точки  $x = 0$  и имеющих различные взаимные пространствен-

ные сдвиги  $\Delta_n$ , весовые коэффициенты  $b_n$  и крутизну  $A_n$ :

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}(x) = & b_1 \tanh \frac{x}{A_1} + b_2 \left( \tanh \frac{x - \Delta_2}{A_2} + \tanh \frac{x + \Delta_2}{A_2} \right) \\ & + b_2 \left( \tanh \frac{x - \Delta_3}{A_3} + \tanh \frac{x + \Delta_3}{A_3} \right) + \dots \\ & \dots + b_n \left( \tanh \frac{x - \Delta_n}{A_n} + \tanh \frac{x + \Delta_n}{A_n} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Соответствующие вычисления [1] при условии  $\varepsilon = 10^{-4}$  mm позволяют определить коэффициенты ряда в виде

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}(x) = & -0.47 \tanh \frac{x}{0.2} + \left( \tanh \frac{x - 0.3}{0.35} + \tanh \frac{x + 0.3}{0.35} \right) \\ & - \left( \tanh \frac{x - 0.3}{0.03} + \tanh \frac{x + 0.3}{0.03} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

На рис. 1 представлена форма синтезированной апертуры  $\mathfrak{R}(x)$  на интервале  $\pm L/16$  (2.5 mm) и в качестве примера два сигнала из семейства функций  $S^k(x)$ , медианы которых имеют значения  $M_{S^1(x)}$  и  $M_{S^8(x)}$ .

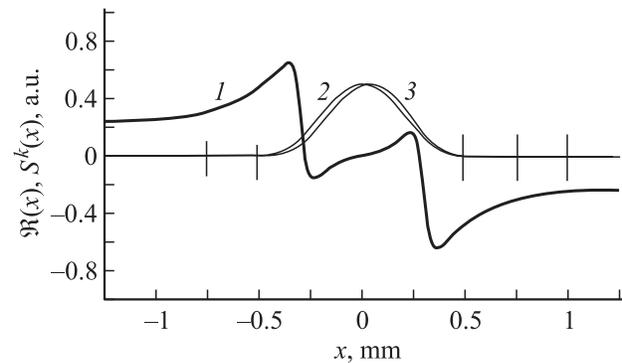


Рис. 1. Форма синтезированной апертуры  $\mathfrak{R}(x)$  (кривая 1) и пример двух искаженных сигналов со смещенными медианами (2 —  $S^1(x)$ , 3 —  $S^8(x)$ ).

## Результаты и их обсуждение

Результаты действий синтезированной апертуры для всех  $k$  приведены на рис. 2, где сравниваются решения уравнений (5) и (6) относительно  $M_{S^k(x)}$  и  $\mathfrak{J}_{S^k(x)}$  соответственно

$$\int_{-L/2}^{M_{S^k(x)}} R(x-x_1)S^k(x)dx - \int_{M_{S^k(x)}}^{L/2} R(x-x_1)S^k(x)dx = 0, \quad (5)$$

$$\int_{-L/2}^{\mathfrak{J}_{S^k(x)}} \mathfrak{R}(x-x_1)S^k(x)dx - \int_{\mathfrak{J}_{S^k(x)}}^{L/2} \mathfrak{R}(x-x_1)S^k(x)dx = 0, \quad (6)$$

в первом из которых (5) семейство искаженных сигналов  $S^k(x)$  обрабатывается с помощью традиционной апертуры  $R(x) = \tanh \frac{x-x_1}{0.3}$ , а во втором (6) эти же сигналы обрабатываются с помощью синтезированной апертуры  $\mathfrak{R}(x)$ . Физические процессы преобразования падающего светового потока в пространственное распределение фототоков под действием потенциалов  $p$ - $n$ -переходов, задаваемых формой апертурной характеристики, подробно рассмотрены в [2,3].

Однако в [1] не были рассмотрены физические процессы, непосредственно обуславливающие компенсацию искажений формы оптических сигналов  $S^k(x)$  и формирование квазимедианы  $\mathfrak{J}_{S^k(x)}$ . Поскольку  $\mathfrak{J}_{S^k(x)}$  является решением уравнения (6), условием которого является равенство нулю суммы фототоков справа и слева от  $\mathfrak{J}_{S^k(x)}$ , необходимо рассмотреть механизм формирования фототоков фотоприемника мультискан как результат взаимодействия синтезированной апертуры с оптическим сигналом, при котором интегральный фототок стремится к нулю при возможно малом смещении синтезированной апертуры.

Сравним процессы формирования медиан набора искаженных оптических сигналов из семейства  $S^k(x)$  в случае синтезированной  $\mathfrak{R}(x)$  и традиционной  $R(x)$

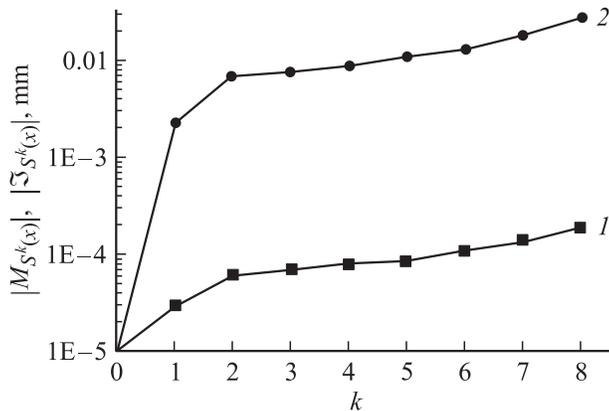


Рис. 2. Значения  $\mathfrak{J}_{S^k(x)}$  (кривая 1) по сравнению с  $S^k(x)$ , симметрия которых увеличивается с ростом  $k$  (кривая 2).

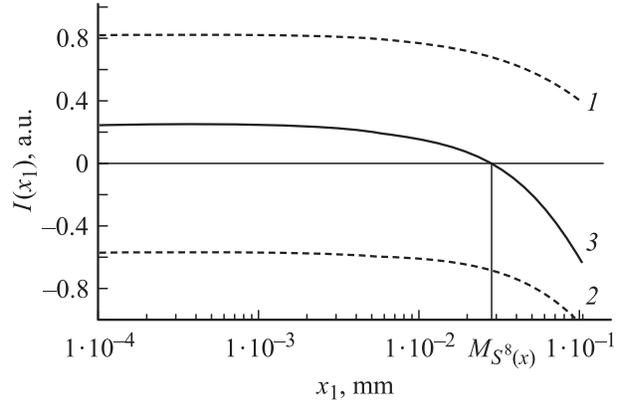


Рис. 3. Положительная и отрицательная составляющие фототока, определяющие положение медианы  $M_{S^8(x)}$  с помощью апертуры  $R(x)$  (1 —  $I^1(x_1)$ , 2 —  $I^2(x_1)$ , 3 —  $I^\Sigma(x_1)$ ).

апертур. С этой целью исследуем процесс сходимости фототоков к нулю в том и другом вариантах. В случае обычной апертуры  $R(x-x_1)$  изменения тока в отрицательной и положительной областях при нормировке на интегральное значение фототока при  $x_1 = 0$  набора сигналов  $S^k(x)$  описываются следующим образом:

$$I^1(x_1) = \frac{\int_{-L/2}^{x_1} R(x-x_1)S^k(x)dx}{\int_{-L/2}^{L/2} R(x)S^k(x)dx},$$

$$I^2(x_1) = \frac{\int_{x_1}^{L/2} R(x-x_1)S^k(x)dx}{\int_{-L/2}^{L/2} R(x)S^k(x)dx}. \quad (7)$$

Их сумма  $I^\Sigma(x_1) = I^1(x_1) + I^2(x_1)$  иллюстрирует процесс достижения суммарным фототоком значения, равного нулю, в точке  $x_1$ , соответствующей положению медианы  $M_{S^k(x)}$  сигнала  $S^k(x)$ . Здесь и ниже приведены графики этого процесса для сигнала с максимально искаженной формой  $S^8(x)$ . На рис. 3 изображены зависимости  $I^1(x_1)$  и  $I^2(x_1)$ , определяющие изменения положительной и отрицательной составляющих тока, и график поведения их суммы,  $I^\Sigma(x_1) = I^1(x_1) + I^2(x_1)$ , определяющий пересечения им нулевой линии в точке  $M_{S^8(x)} = 29 \mu\text{m}$ . На рис. 3 видно, что с увеличением  $x_1$  положительная составляющая тока (компонента  $I^1(x_1)$ ) монотонно уменьшается, а абсолютное значение отрицательной компоненты тока ( $I^2(x_1)$ ) растет, что естественно для апертуры, форма которой описывается с помощью гиперболического тангенса  $R(x) = \tanh \frac{x-x_1}{A}$ . Вследствие наличия у гиперболического тангенса участков насыщения вклад в суммарный ток от краевых участков искаженного сигнала происходит с максимальными весовыми коэффициентами, практически неизменными при малых сдвигах апертуры.

Аналогичные зависимости для случая синтезированной апертуры (для сигнала  $S^8(x)$ )

$$J^1(x_1) = \frac{\int_{-L/2}^{x_1} \mathfrak{R}(x - x_1) S^8(x) dx}{\int_{-L/2}^{L/2} \mathfrak{R}(x) S^8(x) dx},$$

$$J^2(x_1) = \frac{x_1 \int_{-L/2}^{L/2} \mathfrak{R}(x - x_1) S^8(x) dx}{\int_{-L/2}^{L/2} \mathfrak{R}(x) S^8(x) dx}; \quad (8)$$

$$J^\Sigma(x_1) = J^1(x_1) + J^2(x_1) \quad (9)$$

представлены на рис. 4: видно, что сумма  $J^\Sigma(x_1)$  идет существенно круче и проходит через нуль в точке, соответствующей квазимедиане  $\mathfrak{J}_{S^8(x)} = 0.28 \mu\text{m}$ . Таким образом, показано, что искажение оптического сигнала, при котором происходит смещение медианы сигнала по сравнению с медианой неискаженного сигнала на  $29 \mu\text{m}$ , с помощью синтезированной апертуры компенсируется. Причем ошибка в определении направления на источник сигнала, выраженная через смещение медианы относительно медианы неискаженного сигнала, уменьшается более чем на два порядка.

Сравнительный график значений медиан  $M_{S^k(x)}$  и  $\mathfrak{J}_{S^k(x)}$  приведен на рис. 5. Полученные результаты означают, что в случае синтезированной апертуры крутизна уменьшения суммарного фототока на выходе мультискана при изменении  $x_1$  должна быть на два порядка больше, чем при обычной апертуре. Этот факт подтверждается рис. 6, где показаны зависимости  $I(x_1)$  и  $J(x_1)$  в линейном масштабе при соответствующей нормировке.

Как указано в [1], физический механизм компенсации асимметрии сигнала происходит за счет двух интегральных процессов. Один из них определяется компенсацией фототока за счет асимметрии вольт-амперной характеристики, возникающей при ее сдвиге в центральной

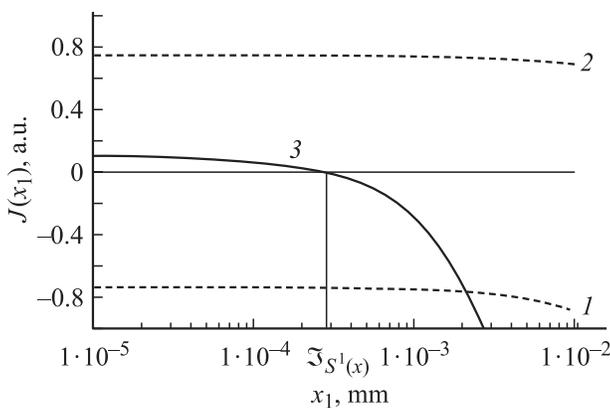


Рис. 4. Составляющие фототока, определяющие положение квазимедианы  $\mathfrak{J}_{S^8(x)}$  с помощью апертуры  $\mathfrak{R}(x)$  (обозначения те же, что и на рис. 3).

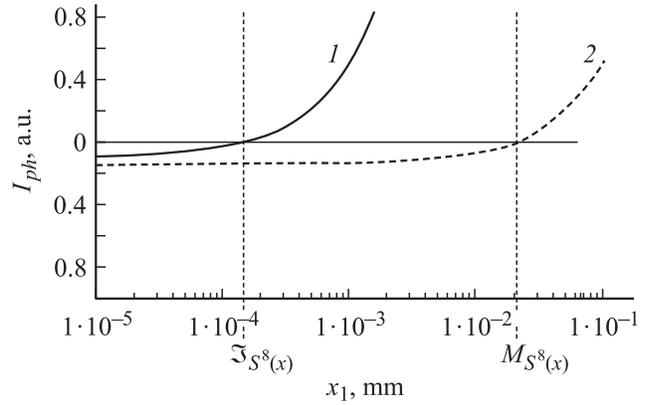


Рис. 5. Сравнение процессов формирования квазимедианы  $\mathfrak{J}_{S^8(x)}$  с помощью  $\mathfrak{R}(x)$  (кривая 1) и медианы  $M_{S^8(x)}$  с помощью  $\mathfrak{R}(x)$  (кривая 2).

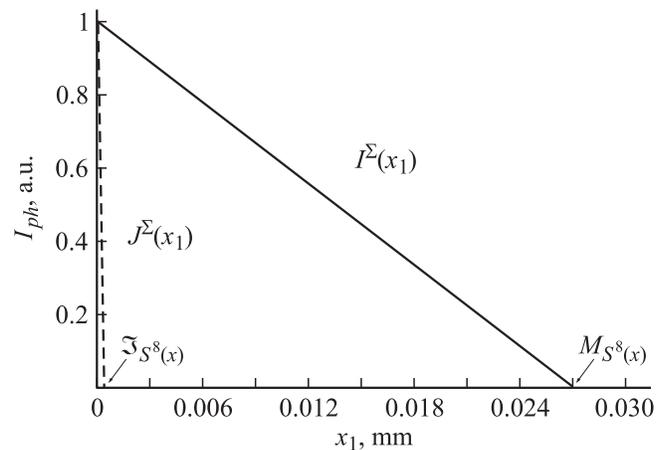
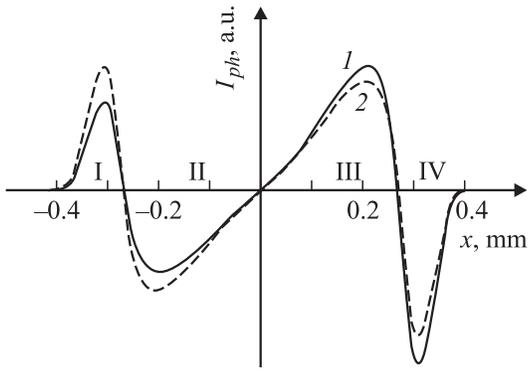


Рис. 6. Крутизна изменения фототоков при установлении  $\mathfrak{J}_{S^8(x)}$  и  $M_{S^8(x)}$  в случае синтезированной и обычной апертур соответственно.

области апертуры 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  $\mathfrak{J}_{S^k(x)}$  за счет обратного знака преобразования фототоков в области краев распределения оптического сигнала.

Рассмотрим более детально процесс изменения фототоков на различных участках синтезированной апертуры. С этой целью покажем для  $S^k(x)$  распределение фототоков вдоль фотоприемника  $I_{k(x)} = \mathfrak{R}(x) S^k(x)$  (рис. 7). Из соображений наглядности нами приведены распределения фототоков для случаев минимально и максимально искаженных по форме сигналов, т.е. для  $S^1(x)$  и  $S^8(x)$ , для которых значения  $M_{S^k}$  имеют значения 2.7 и  $29 \mu\text{m}$  соответственно.

Из рис. 7 видно, что при воздействии синтезированной апертуры  $\mathfrak{R}(x)$  на оптический сигнал распределение фототоков вдоль фотоприемника распадается на 4 характерных участка — 2 центральных: II —  $[-\Delta, 0]$  и III —  $[0, +\Delta]$ , и два крайних: I —  $[-L/2, -\Delta]$  и IV —  $[+\Delta, L/2]$ .



**Рис. 7.** Изменения распределения фототоков по участкам синтезированной апертуры при изменении искажения оптического сигнала (1 —  $J(x)$ , 2 —  $J^8(x)$ ).

Здесь, как и в [1],  $\pm\Delta$  — положение максимумов производной  $\Re(x)$  слева и справа от центра апертуры. Как центральные (II, III), так и краевые (I, IV) участки содержат по две области с фототоками противоположных знаков.

Определим изменение фототоков на каждом из участков при смещении синтезированной апертуры на  $0.28 \mu\text{m}$ , что соответствует квазимедиане  $\tilde{J}_{S^8(x)}$  сигнала  $S^8(x)$  по сравнению с несмещенной апертурой, для которой  $x_1 = 0$ , нормируя их значения на величину фототока каждого из интегралов при несмещенной апертуре

$$\Delta J_I = \frac{\int_{-L/2}^{-\Delta} \Re(x - \tilde{J}_{S^8(x)}) S^8(x) dx}{\int_{-L/2}^{-\Delta} \Re(x) S^8(x) dx} - 1, \quad (10)$$

$$\Delta J_{II} = \frac{\int_{-\Delta}^0 \Re(x - \tilde{J}_{S^8(x)}) S^8(x) dx}{\int_{-\Delta}^0 \Re(x) S^8(x) dx} - 1, \quad (11)$$

$$\Delta J_{III} = \frac{\int_0^{+\Delta} \Re(x - \tilde{J}_{S^8(x)}) S^8(x) dx}{\int_0^{+\Delta} \Re(x) S^8(x) dx} - 1, \quad (12)$$

$$\Delta J_{IV} = \frac{\int_{L/2}^{+\Delta} \Re(x - \tilde{J}_{S^8(x)}) S^8(x) dx}{\int_{L/2}^{+\Delta} \Re(x) S^8(x) dx} - 1. \quad (13)$$

Вычисленные относительные разности  $\Delta J_I$ ,  $\Delta J_{II}$ ,  $\Delta J_{III}$ ,  $\Delta J_{IV}$  отражают интегральные изменения токов на участках I–IV, приведенных на рис. 7 для сигналов  $S^1(x)$  и  $S^8(x)$ . Их поведение свидетельствует о том, что в процессе формирования квазимедианы синтезированной

апертура производит перераспределение фототоков между определенными выше участками.

На участках I и II относительные значения токов в случае использования синтезированной апертуры увеличиваются ( $\Delta J_I = 1.001$ ,  $\Delta J_{II} = 1.005$ ), а на участках III и IV, на которых сосредоточена наибольшая часть мощности сигнала, значения токов уменьшаются ( $\Delta J_{III} = 0.997$ ,  $\Delta J_{IV} = 0.992$ ). В результате происходит выравнивание значений фототоков в левой и правой областях оптического сигнала.

При точных вычислениях и, как следует из рис. 4,

$$\int_{-L/2}^{L/2} \Re(x - \tilde{J}_{S^8(x)}) S^8(x) dx = 0 \quad (14)$$

разбаланс токов в случае сигнала  $S^8(x)$  при  $\tilde{J}_{S^8(x)} = 0$  составляет

$$\int_{-L/2}^0 \Re(x) S^8(x) dx + \int_0^{L/2} \Re(x) S^8(x) dx = 0.6 \cdot 10^{-3}, \quad (15)$$

что и определяет положение медианы  $M_{S^8(x)}$  в точке, отстоящей от нуля на  $29 \mu\text{m}$ .

## Заключение

Показано, что механизм компенсации искажений оптических сигналов сводится к формированию модифицированной оценки (квазимедианы), максимально приближенной к медиане неискаженного сигнала. Процесс формирования квазимедианы обеспечивается с помощью синтезированной апертуры, весовые коэффициенты преобразования фототоков которой обеспечивают большую крутизну изменения интегрального фототока при незначительном пространственном сдвиге апертуры. Величина этого сдвига, оставаясь в пределах заданного малого значения  $\varepsilon$ , адаптируется к степени искажения симметрии оптического сигнала, формируя значение квазимедианы, максимально соответствующее направлению на источник оптического сигнала.

## Список литературы

- [1] Подласкин Б.Г., Гук Е.Г. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 8. С. 93–98.
- [2] Подласкин Б.Г., Романова Е.П., Юферев В.С. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 10. С. 126–137.
- [3] Подласкин Б.Г., Токранова Н.А. // Тез. докл. конф. „Методы и средства измерения механических параметров в системах контроля и управления“. Пенза, 1994. С. 37–38.