

## НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ЗАШУМЛЕННЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС С ПРОСТРАНСТВЕННО ЗАВИСИМОЙ ИМПУЛЬСНОЙ РЕАКЦИЕЙ СИСТЕМЫ

М.В. Волков

Научный руководитель доктор техн. наук И.П. Гуров

В работе исследован метод нелинейной обработки сигналов и изображений с пространственно зависимой импульсной реакцией фильтра, формируемой на основе локальных статистик данных первого порядка. В отличие от традиционных методов фильтрации, в предлагаемом методе импульсная реакция фильтра формируется в процессе модификации локальных эмпирических гистограмм с весовой функцией, учитывающей пространственное расположение точек в отрезке фильтрации. Проведенные исследования показали высокую эффективность предложенного метода применительно к улучшению сильно зашумленных сигналов и сложных картин интерференционных полос, обработка которых при традиционных подходах представляется весьма проблематичной.

Анализ зашумленных интерференционных сигналов и картин интерференционных полос имеет важное значение для задач бесконтактного контроля объектов. Во многих случаях интерференционные полосы искажены влиянием шума и локальных дефектов, вследствие чего затруднена оценка фазы полос, содержащей информацию об исследуемом объекте или процессе. Известные методы обработки интерференционных полос на основе преобразования Фурье [1] или аппроксимации интерференционных полос нелинейными полиномами [2] во многих случаях не обеспечивают необходимой помехоустойчивости и требуют значительных вычислительных ресурсов при анализе реальных интерференционных картин. Указанные недостатки в значительной мере преодолеваются в предлагаемом методе модификации локальных эмпирических гистограмм [3].

Известен метод улучшения качества изображений путем модификации гистограмм полутоновых уровней яркости [4], основанный на том, что, зная вид идеальной гистограммы для заданного класса изображений, можно модифицировать эмпирическую гистограмму полутонов и на этой основе в результате обратного преобразования получить улучшенное изображение. Недостатками метода [4] являются необходимость использования предварительной информации о статистике изображений и глобальный характер обработки, вследствие чего не удается эффективно устранять влияние отдельных дефектов.

Предлагаемый метод носит локальный характер и позволяет улучшить

изображение без знания идеальной гистограммы. Для обработки не требуется существенной предварительной информации, так как параметры фильтрации определяются автоматически для каждой точки. При обработке картин интерференционных полос метод позволяет практически без снижения видности полос эффективно подавлять шум и локальные дефекты, в частности, устранять разрывы интерференционных полос.

Рассмотрим вначале случай обработки одномерного сигнала  $s(x)$ , который представляет собой сигнал в сечении двумерной интерференционной картины.

Пусть реальный сигнал  $o(x)$  определяется моделью

$$o(x) = s(x) + n(x), \quad (1)$$

где  $n(x)$  – аддитивная помеха с нулевым средним,  $\langle n(x) \rangle = 0$ ,  $\langle n^2(x) \rangle = \sigma_n^2$ , а  $o(x)$  может принимать дискретные значения (уровни)  $o_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ . Выделим в области независимой переменной некоторый отрезок  $[a, b]$  и обозначим его среднюю точку  $x_c$ . Будем считать, что оценка идеального сигнала  $s(x_c)$  может быть определена по значениям  $o(x)$  в точках дискретизации  $x_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , на выбранном отрезке. Для отрезка  $[a, b]$  построим эмпирическую гистограмму  $p(o_i)$ , т.е. оценку плотности вероятности, соответствующей закону распределения значений  $o(x_k)$ ,  $x_k \in [a, b]$ , по дискретным уровням  $o_i$ . Значение гистограммы для некоторого уровня  $o_i$  равно количеству точек  $x_k \in [a, b]$ , в которых  $o(x_k) = o_i$ . Гистограмма  $p(o_i)$  позволяет вычислить усредненную величину для выборки  $o(x_k)$  на заданном отрезке, а именно

$$\hat{s}(x_c) = \frac{\sum_{i=1}^N o_i p(o_i)}{\sum_{i=1}^N p(o_i)}. \quad (2)$$

Сдвигая отрезок на один шаг дискретизации  $\Delta x$ , можно вычислить значение  $\hat{s}(x_c + \Delta x)$ , и т.д. Согласно (1), операция усреднения в (2) позволяет уменьшить влияние аддитивного шума  $n(x)$ .

Таким образом, обработка данных при вычислении среднего значения на отрезке заключается в выполнении следующих операций:

- выбирается отрезок усреднения  $[a, b]$ , и на нем строится гистограмма  $p(o_i) = Q(o_i)$ , где  $Q(o_i)$  – количество точек  $x_k \in [a, b]$  сигнала, для которых  $o(x_k) = o_i$ ;

- вычисляется среднее значение  $\hat{s}(x_c)$  по формуле (2), которое

соответствует значению  $\hat{s}(x)$  в средней точке отрезка;

■ отрезок  $[a, b]$  сдвигается на один шаг дискретизации, после чего вновь строится гистограмма, и т.д.

Операция линейной дискретной фильтрации сигнала  $o(x_k)$ , как известно (см., например, [1]), может быть представлена в форме дискретной свертки

$$\hat{s}(x_k) = \sum_{l=1}^K h(x_l) o(x_k - x_l), \quad (3)$$

где  $h(x_l)$  - отсчеты импульсного отклика фильтра протяженностью  $K$  точек. В случае нормированного импульсного отклика прямоугольной формы  $\sum_{l=1}^K h(x_l) = 1$ ,  $h(x_l) = 1/K$ , и результат свертки совпадает со средним арифметическим значением

$$\hat{s}(x_k) = (1/K) \sum_{l=1}^K o(x_k - x_l). \quad (4)$$

Поскольку при вычислении среднего арифметического (4) не учитывается взаимное расположение отсчетов  $o(x_k)$ ,  $k = 1, \dots, K$ , по оси  $x$ , это значение совпадает со значением, вычисленным согласно (2), где  $x_c = x_k + \Delta x(K-1)/2$ . Таким образом, в результате вычисления “скользящего среднего” получим эффект, аналогичный низкочастотной фильтрации, как это иллюстрируется на рис. 1, а.

Рассмотренный способ фильтрации характеризуется существенным недостатком, который заключается в том, что при фильтрации происходит значительное снижение амплитуды полезного сигнала, особенно если отрезок фильтрации соизмерим с его периодом.

Покажем, что изменение способа построения гистограммы позволяет не только осуществить традиционные методы фильтрации, но и реализовать новые возможности обработки сигналов.

Выполним модификацию локальной гистограммы  $p(o_i)$  в соответствии с некоторым нелинейным функциональным преобразованием  $T$ , а именно

$$p'(o_i) = T[p(o_i)], \quad (5)$$

где  $p(o_i)$  - исходная эмпирическая гистограмма. Преобразование (5) означает, что каждому  $i$ -му уровню сигнала,  $i = 1, \dots, N$ , присваивается новый “вес”, не зависящий от положения отсчетов  $x_k$ ,  $x_k \in [a, b]$ , в которых  $o(x_k) = o_i$ ,  $k = 1, \dots, K$ . При этом усредненное значение  $\hat{s}(x)$  будет зависеть от характера изменения сигнала внутри отрезка  $[a, b]$  и поэтому, очевидно, не может быть вычислено путем свертки (3) с импульсным откликом

пространственно-инвариантного линейного фильтра. Следовательно, метод модификации локальных гистограмм является методом нелинейной фильтрации, осуществляемой с использованием пространственно зависимого импульсного отклика фильтра.

Рассмотрим в качестве примера квазигармонический сигнал вида (1), где  $s(x) = \sin(x)$ . При относительно малом значении аддитивного шума  $n(x)$  окну уровней  $o_i$  гистограммы  $p(o_i)$ , близких к экстремальным значениям  $s(x)$ , соответствует большее число точек по сравнению с другими окнами уровней. Таким образом, если на выбранном отрезке фильтрации сигнала  $o(x)$  идеальный сигнал  $s(x)$  принимает максимальное или минимальное значение, то положение уровня  $o_i$ , в котором  $p(o_i)$  достигает максимума, будет примерно совпадать с этим значением. Однако за счет усреднения по всем уровням гистограммы построенная оценка  $\hat{s}(x)$  будет меньше по амплитуде, чем идеальный сигнал  $s(x)$ , (см. рис. 1, а).

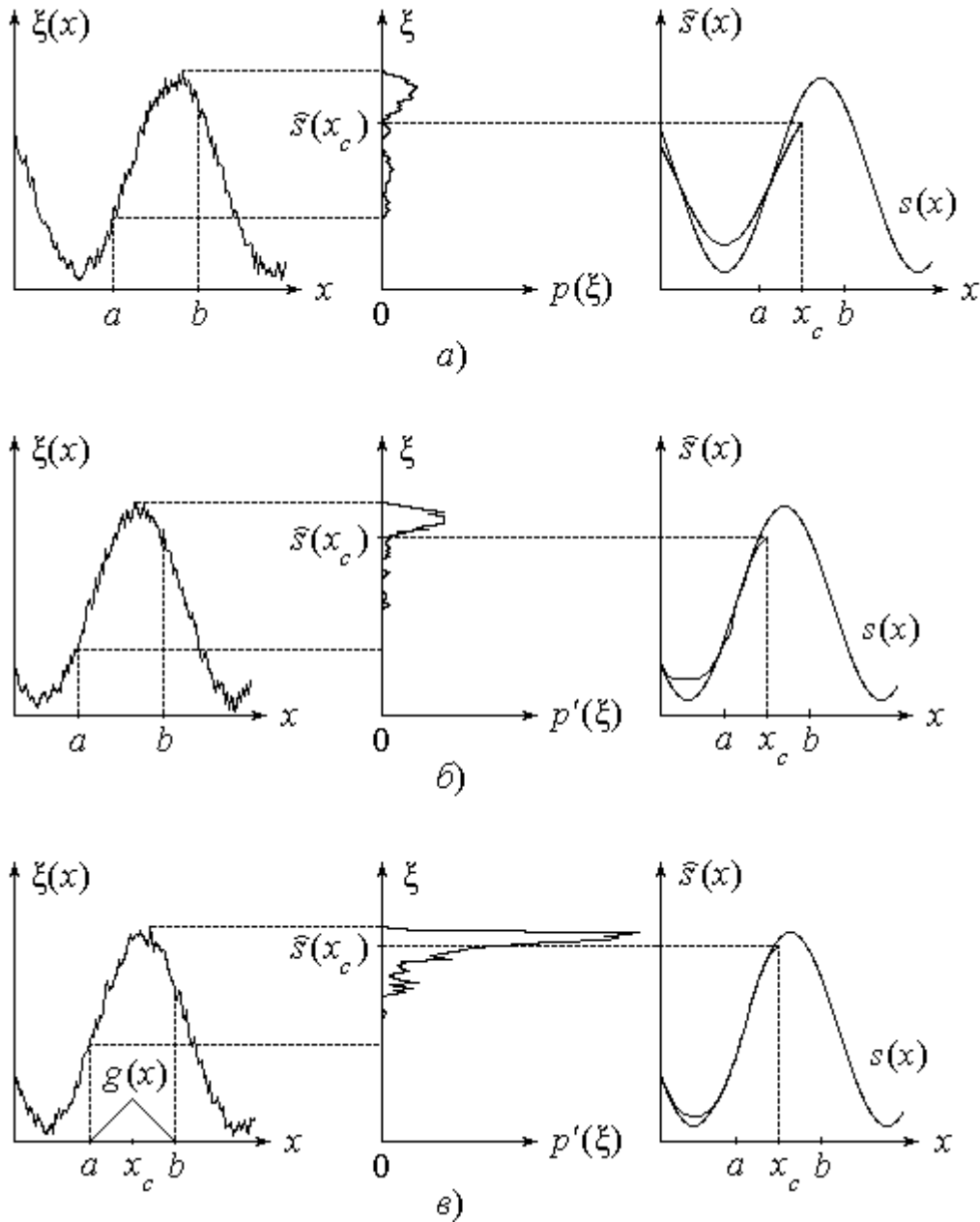
Как будет показано далее, модификация (5) гистограммы перед усреднением (2) позволяет построить метод фильтрации без значительного снижения амплитуды сигнала.

Рассмотрим примеры изменения оценки сигнала при модификации локальных гистограмм. Примем, что функциональное преобразование  $T[.]$  в (5) относится к классу степенных функций. Построим модифицированную гистограмму вида

$$p'(o_i) = [p(o_i)]^{\bar{b}}. \quad (6)$$

Как показали исследования, коэффициент  $\bar{b}$  следует выбирать в пределах  $\bar{b} = 1 \dots 3$ . Такое преобразование приводит к увеличению “веса” более заполненных уровней  $o_i$ , что для слабо зашумленного сигнала в форме гармонической функции приведет к увеличению амплитуды по сравнению с обычной фильтрацией средним вида (3) при  $h(x_l) = 1/K$ , как это видно при сравнении рис. 1, а и рис. 1, б. Модификация локальных гистограмм позволяет при изменяющихся параметрах сигнала использовать один и тот же размер отрезка фильтрации и получать при этом результаты фильтрации без существенного снижения амплитуды полезного сигнала.

Следует учитывать, что модификация гистограммы приводит к искажению оценки сигнала. Это связано с тем, что оценка значения  $s(x_c)$  зависит от распределения значений сигнала  $o(x_k)$ ,  $x_k \in [a, b]$ , по дискретным уровням  $o_i$ . В частности, если значительное число точек сигнала в пределах отрезка фильтрации случайно попадет на один уровень  $o_i$ , то “вес” этих точек существенно увеличится, и произойдет искажение формы сигнала.



**Рис. 1.** Обработка зашумленного сигнала: фильтрация средним по отрезку (а), фильтрация с помощью модифицированной гистограммы (б) и фильтрация с применением весовой функции и модификации гистограммы (в)

Преимуществом использования модифицированных гистограмм является снижение влияния импульсных помех на результирующий сигнал. Если производная полезного сигнала на выбранном отрезке близка к нулю, т.е. на некоторых уровнях  $o_i$  гистограмма  $p(o_i)$  принимает достаточно большие значения, и лишь в нескольких точках отрезка фильтрации значения сигнала  $o(x)$  сильно отличаются от средних (присутствуют сильные импульсные помехи), то эти значения практически не скажутся на

выходном сигнале  $\hat{s}(x)$ .

Алгоритм фильтрации отличается от рассмотренного выше только видом гистограммы:  $p'(o_i) = [Q(o_i)]^6$ , где  $Q(o_i)$ , как и ранее – количество точек сигнала, для которых  $o(x_k) = o_i$ ,  $x_k \in [a, b]$ . При этом интеграл по сигналу не сохраняется, и появляется зависимость от вида помех. Увеличение отрезка фильтрации, вообще говоря, не гарантирует снижения влияния помех и может приводить к увеличению искажений сигнала. Поэтому важно найти условия, при которых происходит эффективное подавление помех при минимальных искажениях сигнала.

В рассмотренном выше примере вклад в гистограмму значений сигнала  $o(x_k)$  не зависит от расстояния между точкой  $x_k$  и центром отрезка фильтрации  $x_c$ . Все точки отрезка фильтрации статистически равнозначны, и это приводит к тому, что значения модифицированной гистограммы могут сильно зависеть от того, на какой уровень  $o_i$  попадут значения сигнала  $o(x_k)$  в крайних точках отрезка фильтрации.

Указанный недостаток устраняется при использовании весовой функции  $g(x_k)$ , зависящей от независимой переменной в пределах отрезка фильтрации  $[a, b]$ . Функция  $g(x_k)$  позволяет обеспечить уменьшение вклада значений сигнала  $o(x)$  в гистограмму по мере удаления точек  $x_k$  от центра  $x_c$  отрезка фильтрации. При этом оказывается возможным увеличить амплитуду выходного сигнала  $\hat{s}(x)$ , что хорошо видно на рис. 1, в.

При построении оценки  $\hat{s}(x)$  в точках, близких к экстремумам сигнала  $s(x)$ , уменьшается вклад в гистограмму значений сигнала  $o(x)$  в точках  $x_k$ , лежащих на краю отрезка фильтрации. Таким образом, не происходит снижения амплитуды сигнала при усреднении, что дает большую свободу в выборе отрезка фильтрации.

Алгоритм фильтрации отличается от рассмотренного выше только видом модифицированной гистограммы:

$$p'(o_i) = \left[ \sum_{k=1}^K g'(x_k) \right]^6, \quad (7)$$

$$\text{где } x_k \in [a, b] \text{ и } g'(x_k) = \begin{cases} g(x_k) & \text{при } o(x_k) = o_i, \\ 0 & \text{при } o(x_k) \neq o_i. \end{cases}$$

Таким образом, при модификации гистограммы учитывается не только локальная статистика значений сигнала, но также расположение отсчетов внутри отрезка фильтрации. Следует отметить, что данный метод

фильтрации не сводится к рассмотренному выше, так как функциональное преобразование  $T[\cdot]$  в (6) применяется к гистограмме исходного сигнала  $o(x_k)$ , в то время как в (7) преобразование  $T[\cdot]$  применяется к гистограмме сигнала, который получен из исходного растяжением масштаба вдоль оси  $x$  в окрестности каждой точки дискретизации сигнала  $o(x_k)$  согласно значению весовой функции  $g(x_k)$  при эквивалентном размере отрезка

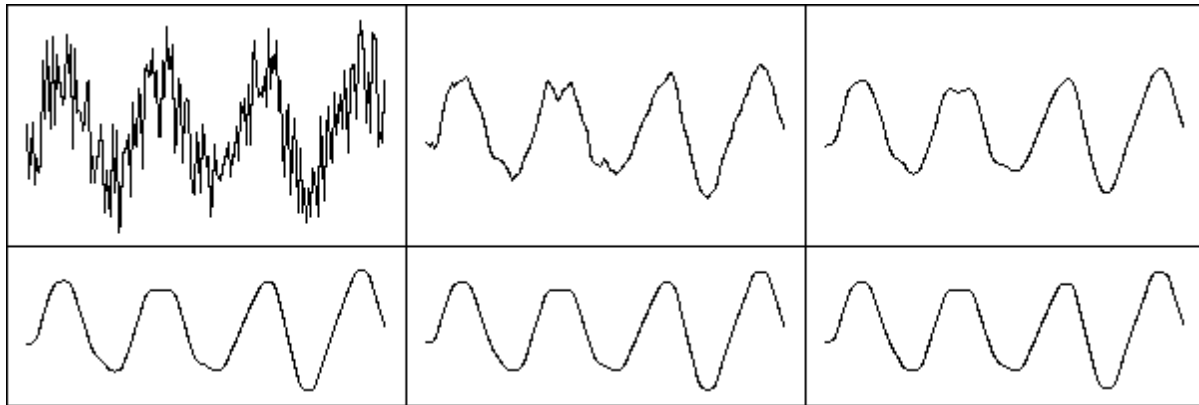
фильтрации  $\sum_{k=1}^K g(x_k)$ .

Динамическое изменение весовой функции  $g(x_k)$  в зависимости от локальных параметров и числа точек, попадающих в окна уровней  $o_i$ , позволяет улучшить качество фильтрации и получить сигнал с большей амплитудой.

Особенностью метода (7) является то, что при итерационной обработке не происходит снижения амплитуды сигнала. Это обусловлено тем, что за счет небольшого искажения сигнала при первой итерации значительно увеличивается статистический “вес” точек вблизи экстремумов. Искажения сигнала более значительны при прямой модификации гистограммы (6), как это видно на рис. 1, б. При использовании весовой функции искажения существенно снижаются (см. рис. 1, в).

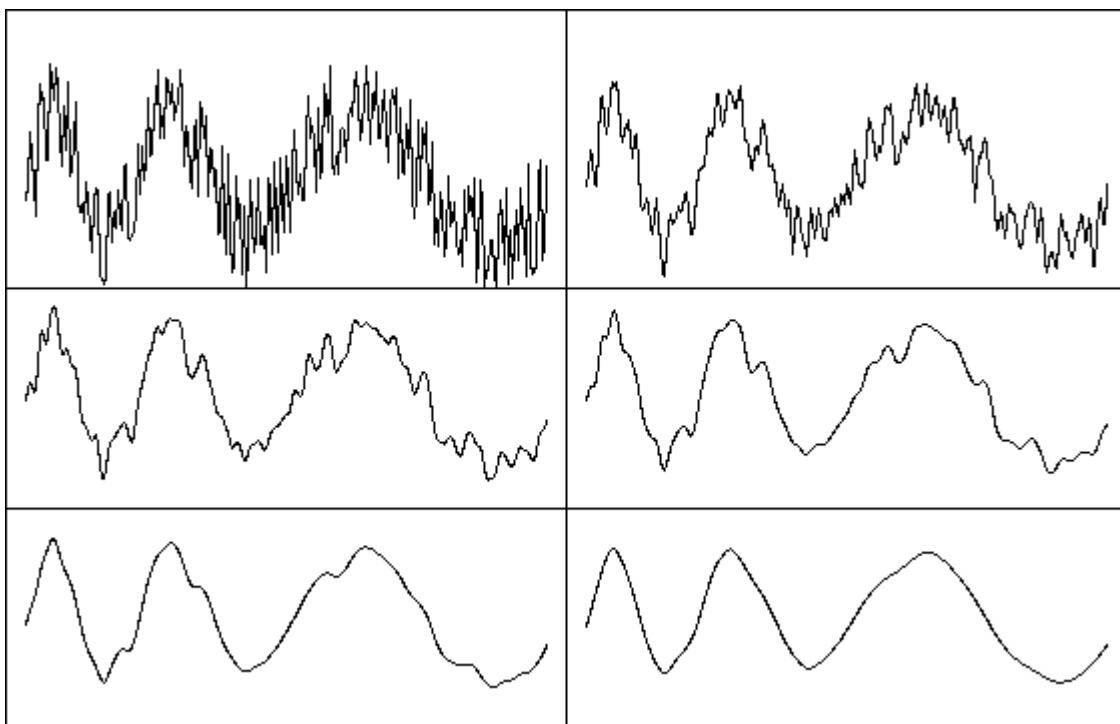
Рассмотренный метод (7) позволяет эффективно обрабатывать сильно зашумленные сигналы с малым числом точек дискретизации на периоде. В этом случае из-за влияния помех и малого числа точек уровни гистограммы заполнены слабо и почти равномерно, и модификация гистограммы не приводит к желаемому результату. Однако при итерационной обработке удается получить хорошие результаты для подобных сигналов, как это видно на рис. 2.

Нелинейность фильтрации приводит к незначительному искажению сигнала, и после нескольких итераций появляются достаточно заполненные уровни. В результате полностью прекращается снижение амплитуды сигнала, и дальнейшая обработка приводит лишь к уменьшению влияния помех. Когда помехи погашены, сигнал не изменяется. Это свойство сходимости итерационного алгоритма (7) очень важно при обработке сигналов, искаженных влиянием пространственно-нестационарных шумов и помех, которые характерны для реальных интерферограмм.



**Рис. 2.** Пример итерационного применения метода для фильтрации зашумленного сигнала. Изображен исходный сигнал и результаты фильтрации после 1, 2, 3, 4 и 5-го шагов итерации

Метод обеспечивает получение достаточно точных результатов при постоянном размере отрезка фильтрации, однако оптимизация выбора локальной длины отрезка позволяет заметно уменьшить искажения сигнала и улучшить качество фильтрации, как это видно на рис. 3.



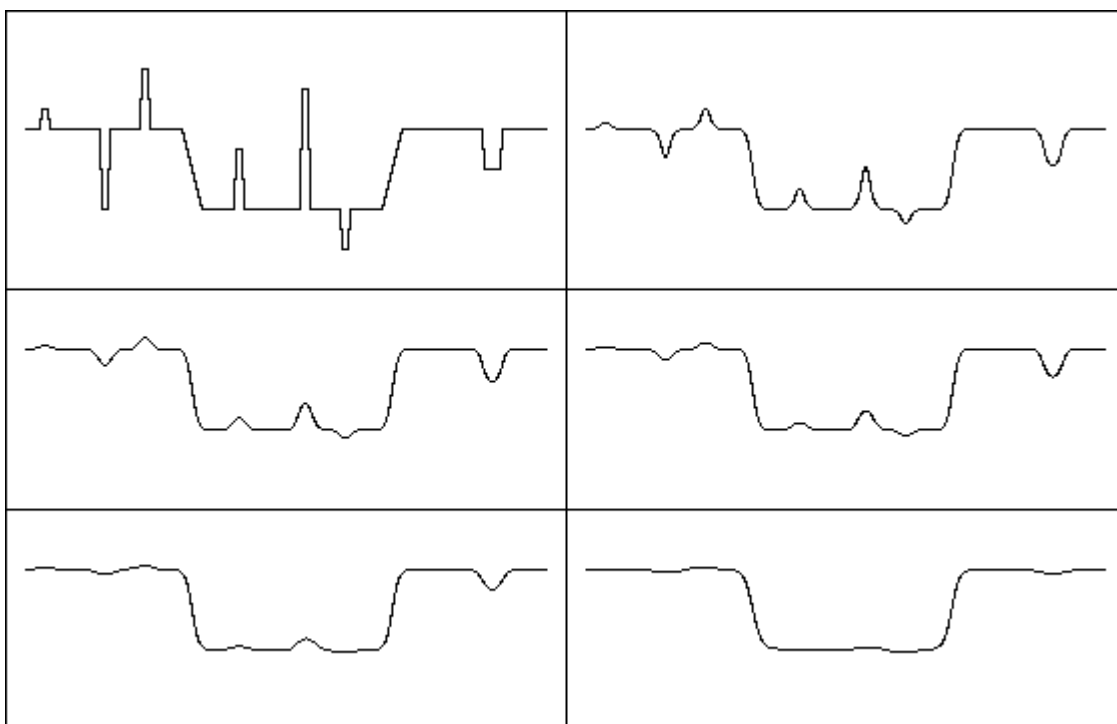
**Рис. 3.** Пример итерационной обработки зашумленного сигнала с изменяющейся локальной частотой при настройке размера отрезка фильтрации. Изображен исходный сигнал и результаты фильтрации после 1, 2, 3, 5 и 10-го шагов итерации

Наилучшие результаты достигаются при протяженности отрезка в  $1/6 - 1/3$  периода сигнала, и погрешность оценки параметров сигнала не



сказывается существенно на результатах фильтрации.

Важной особенностью метода является то, что для сигналов с близкой к нулю производной импульсные помехи в результате почти не оказывают влияния на выходной сигнал, как это показано на рис. 4. Это объясняется тем, что “вес” каждого значения сигнала  $o(x_{\bar{k}})$  при модификации гистограммы согласно (7) зависит от количества и удаленности значений сигнала  $o(x_k)$ , лежащих на том же уровне  $o_i$ . Значения на более заполненных “стабильных” уровнях являются более устойчивыми, поэтому импульсные помехи оказывают на них очень слабое влияние.



**Рис. 4.** Пример итерационной обработки сигнала, искаженного сильными импульсными помехами. Изображен исходный сигнал и результаты фильтрации после 1, 2, 3, 5 и 10-го шагов итерации

Интересно отметить, что полезный сигнал (рис. 4) имеет форму, близкую к прямоугольной, т.е. широкий спектр, перекрывающийся со спектром помехи. В результате нелинейной фильтрации с пространственно зависимой импульсной реакцией фильтра при итерационной обработке происходит подавление помех при незначительном изменении формы полезного сигнала. Это свидетельствует об эффективности спектральной фильтрации полезного сигнала на основе предложенного метода модификации локальных гистограмм.

Рассмотрим особенности обработки двумерных картин интерференционных полос. Локальный период сигнала зависит от направления сечения картины интерференционных полос. В случае, когда

направление сечения совпадает с локальным направлением полос, период сигнала максимален, и полезный сигнал в этом сечении имеет производную, наиболее близкую к нулю. Это позволяет с наибольшей эффективностью пользоваться свойствами предложенного метода.

При обработке картины интерференционных полос метод нелинейной фильтрации (7) дает наилучшие результаты, если направление сечения картины полос совпадает с локальным направлением полос. При этом помехи устраняются наиболее эффективно, и не происходит снижения видности полос. Однако задача определения локального направления интерференционных полос необработанного изображения не имеет точного решения. Погрешность оценки направления полос может привести к тому, что оценки в двух соседних точках изображения будут получены при обработке сигнала в сечениях вдоль разных направлений. Из-за этого может произойти искажение обработанной интерференционной картины.

Искажений такого рода можно избежать, если строить оценки сигнала во всех сечениях, проходящих через обрабатываемую точку, а затем с помощью некоторых “коэффициентов значимости” находить усредненное значение полученных оценок. Коэффициенты имеют смысл “веса” оценки сигнала в сечении вдоль соответствующего направления. Чем меньше отклонение направления сечения от предполагаемого направления полос, тем больше должен быть соответствующий коэффициент.

Для получения хороших результатов при обработке реальных интерференционных картин оказалось достаточно всего четырех направлений, однако в принципе увеличение числа направлений может заметно улучшить качество обработки.

Не имеет смысла для каждой точки отдельно получать оценки сигнала в различных сечениях. Целесообразно провести глобальную обработку всего изображения для каждого направления, т.е. для каждого направления перебрать все сечения интерференционной картины и с помощью модификации локальных гистограмм (7) построить оценки сигнала. После этого для каждой точки все требуемые оценки получаются из вычисленных с учетом ее координат.

Коэффициенты значимости можно оценить по модулям приращений сигнала вдоль соответствующих направлений. По каждому направлению для всего изображения строятся модули приращений  $Do(x) = |o(x) - o(x-1)|$ , где  $x$  и  $(x-1)$  – соседние точки сигнала в сечении вдоль указанного направления. Затем для всего изображения производится усреднение значений  $Do(x)$  по некоторой области  $A$ . Полученные результаты усреднения для некоторой точки обозначим через  $C_j$ , где  $j$  – номер направления сечения. Будем для простоты полагать, что помехи оказывают

одинаковое влияние на коэффициенты значимости  $C_j$ , т.е. не зависят от рассматриваемого направления. Тогда при совпадении направления полос с направлением сечения значение  $C_j$  минимально для данной точки. С другой стороны, если направление сечения перпендикулярно к интерференционным полосам, значение  $C_j$  максимально. Таким образом, можно рассчитать требуемые коэффициенты значимости для выполнения операции усреднения в форме

$$\hat{S} = \sum_j \hat{s}_j C_j^\perp / \sum_l C_l^\perp, \quad (8)$$

где  $\hat{s}_j$  – оценка сигнала в данной точке в сечении вдоль некоторого направления  $j$ ,  $C_j^\perp$  – значение  $C_j$  для направления, перпендикулярного указанному.

Погрешности, вызванные дефектами полос, устраняются выбором размера области усреднения  $A$  модулей приращений  $Do(x)$ . За счет использования данных от соседних полос удается сохранить оценку правильного направления даже при разрыве полосы. Размер области усреднения  $A$  ограничивается кривизной полос, т.е. если в изображении имеются участки с изломами полос, то область усреднения предпочтительно брать небольшой. Некоторое снижение видности полос может происходить из-за кривизны полос и ограниченного числа направлений обработки изображения.

Помехи оказывают сильное влияние на коэффициенты значимости  $C_j$ , и реально мы имеем дело с операцией усреднения в форме

$$\hat{S} = \sum_j \hat{s}_j \tilde{C}_j^\perp / \sum_j \tilde{C}_j^\perp,$$

где  $\tilde{C}_j^\perp = (C_j^\perp + n_D)$ ,  $n_D$  – влияние помех на модули приращений. Из-за влияния помех происходит неточное определение коэффициентов значимости  $C_j$ , следствием чего является снижение видности полос, что приводит к еще большему снижению точности оценок коэффициентов значимости. В то же время фильтрация приводит к снижению влияния помех, что позволяет точнее оценивать коэффициенты значимости. Выбор небольшого отрезка фильтрации при первой итерации и постепенное его увеличение позволяют избежать снижения видности полос, связанного с неверным определением оценки направления полос, т.е. коэффициентов значимости  $C_j$ .

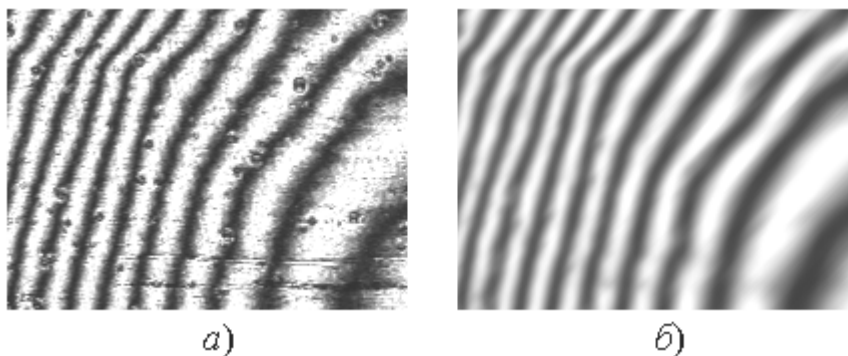
Локальный размер отрезка фильтрации также может быть получен с помощью соответствующих значений модулей приращений  $Do(x)$ . При

обработке сигнала в сечении вдоль направления полос размер отрезка фильтрации может быть достаточно большим, это позволяет лучше подавлять помехи и не приводит к снижению амплитуды полос. В то же время при обработке сигнала в сечении, перпендикулярном направлению полос, следует выбирать меньший отрезок фильтрации. Относительные размеры отрезков фильтрации в различных сечениях для некоторой точки могут быть определены с помощью коэффициентов значимости  $C_j$ .

Таким образом, рассмотренная последовательность операций включает в себя следующие шаги. Для каждой точки картины интерференционных полос получают оценки локальных направлений полос через коэффициенты значимости  $C_j$ , выбирают размеры отрезков фильтрации, находят оценки сигнала в выбранных сечениях и по ним с помощью формулы (8) получают результирующее значение. Перечисленные шаги должны быть выполнены для каждого шага итерации.

С каждым шагом итерации уменьшается влияние помех, более точно определяется оптимальное направление обработки изображения, следовательно, значение видности полос существенно не снижается. Из-за того, что приоритетное направление фильтрации совпадает с локальным направлением полос, и из-за особенностей нелинейного метода импульсные помехи практически не оказывают влияния на выходной сигнал.

В качестве примера на рис. 5 показана искаженная картина интерференционных полос форматом  $200 \times 150$  точек, квантованная по 256 уровням (см. рис. 5, а). В результате обработки после 5-ти итераций все импульсные помехи подавлены, видность полос практически не уменьшилась, как это видно из рис. 5, б).



**Рис. 5.** Пример обработки реальной двумерной интерференционной картины итерационным методом нелинейной фильтрации на основе модификации локальных гистограмм

## Заключение

В работе исследован метод нелинейной обработки сигналов и

изображений с пространственно зависимой импульсной реакцией фильтра, формируемой на основе локальных статистик данных первого порядка. В отличие от традиционных методов фильтрации, в предлагаемом методе импульсная реакция фильтра формируется в процессе модификации локальных эмпирических гистограмм с весовой функцией, учитывающей пространственное расположение точек в отрезке фильтрации. В результате импульсная реакция фильтра зависит от локальных свойств полезного сигнала, что позволяет подавлять помехи без существенного снижения амплитуды полезной составляющей сигнала сложной формы.

Ввиду нелинейности фильтра оптимизация его характеристик на генеральной совокупности данных представляет собой сложную проблему, которая должна быть исследована вне рамок настоящей работы. Проведенные исследования показали высокую эффективность предложенного метода применительно к улучшению сильно зашумленных сигналов и картин интерференционных полос. Предложенный подход открывает широкие перспективы для повышения эффективности обработки сложных картин полос за счет оптимизации вида функционального преобразования (5), весовой функции в (7), а также размеров области усреднения  $A$  при устранении дефектов полос.

Предложенный метод локально-адаптивной нелинейной фильтрации позволит обеспечить улучшение качества и анализ весьма сложных изображений, обработка которых при традиционных подходах представляется проблематичной. Метод имеет существенное преимущество в быстродействии по сравнению с методами спектральной обработки, поскольку оценка направлений и модификация гистограмм являются значительно менее трудоемкими операциями в вычислительном отношении по сравнению, например, с интегральным преобразованием Фурье.

### Список литературы

1. Васильев В.Н., Гуров И.П. Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам. – СПб: БХВ Санкт-Петербург, 1998. – 237 с.
2. Shemm J.B., Vest C.M. Fringe pattern recognition and interpretation using nonlinear regression analysis //Appl.Opt.1983. V.22. P.2850-2853.
3. De Nicola S., Ferraro P., Gurov I., Koviazin R. and Volkov M. Fringe analysis for moiré interferometry by modification of the local intensity histogram and use of a two-dimensional Fourier transform method //Meas.Sci.Technol.2000. V.11. № 9. P.1328-1334.
4. Woods R.E. and Gonzalez R.G. Real-time digital image enhancement //Proc.IEEE. 1981. T.69. C.643.