

ных плоскостях поляризации записывающих УКИ плавно увеличивалась до 600 пс, при этом сигнал корреляции уверенно регистрировался до времени задержки 300 пс.

Таким образом, в данной работе показана возможность записи динамических голограмм (в том числе поляризационных) двумерных изображений с помощью УКИ на ННЗ в полупроводниковых эпитаксиальных структурах на основе тройных соединений $GaAs_xP_{1-x}$. Определен динамический диапазон при записи УКИ с длиной волны 0,54 мкм и длительностью 20 пс, составивший 25 дБ в случае параллельных плоскостей поляризации записывающих УКИ и 6 дБ в случае взаимно перпендикулярных плоскостей поляризации. Определено также «время жизни» голограмм (по уровню $1/e$), равное около 300 пс в первом случае и менее 2 пс — во втором. Получено, что для несущих частот голограммы 200–2000 mm^{-1} не происходит ухудшения контраста изображения. На основе записанных голографических согласованных фильтров показана возможность проведения корреляционного анализа изображений по направлению их штрихов с точностью 1° и по дискретному спектру пространственных частот с точностью выше $1 mm^{-1}$. При этом длительность цикла анализа, включающего запись голограммы и ее зондирование с определенной задержкой, может составлять от 20 до 400 пс, а максимальная частота таких циклов — 1,5–2 ГГц. Таким образом может обрабатываться поток информации около 10^4 Гбит/с при площади голограммы $1 mm^2$.

В заключение авторы выражают признательность Ю. А. Ершову за помощь в проведении эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Woerdman J. P. Formation of a transient free carrier hologram in Si // Opt. Commun.— 1970.— 2, N 5.— P. 242.
2. Вайткус Ю., Пятраускас М., Ярашюнас К. Определение субпикосекундных времен жизни в монокристаллах GaAs:Cr и CdTe методом динамических пикосекундных решеток // ФТИ.— 1982.— 16, вып. 6.
3. Завалин А. И., Караванский В. А., Ламский В. Ф. и др. Преобразование мод под воздействием лазерных УКИ в полупроводниковых плапарных волноводах // Квантовая электрон.— 1988.— 15, № 7.
4. Васильева М. А., Вищакас Ю., Дерягин А. и др. Решетки анизотропии в кремнии, наведенные пикосекундными световыми импульсами // Квантовая электрон.— 1984.— 11, № 12.
5. Борц А. А., Кухтарев И. В., Семионко В. П. Обращение волнового фронта при векторной самодифракции на поляризационных голограммах // Изв. АН СССР. Сер. физ.— 1987.— 51, № 2.
6. Данилюс Р., Пискаускас А., Сируткайтис В. и др. Параметрические генераторы света и пикосекундная спектроскопия.— Вильнюс: Мокслас, 1983.
7. Handbook of Electronic Materials.— N. Y.:IFI-Plenum, 1971–1972.— V. 7.
8. Оптическая голография/Под ред. Г. Коффилда.— М.: Мир, 1982.— Т. 2.

Поступила в редакцию 23 августа 1988 г.

УДК 681.3

А. В. БРОННИКОВ, Ю. Е. ВОСКОБОЙНИКОВ
(Новосибирск)

КОМБИНИРОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ЗАШУМЛЕННЫХ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

Методы линейной фильтрации, основанные на быстрых алгоритмах свертки, получили широкое распространение в цифровой обработке сигналов [1]. Однако в ряде случаев линейная фильтрация (как правило,

© 1990 Бронников А. В., Воскобойников Ю. Е.

низкочастотная) не удовлетворяет предъявляемым к обработке требованиям. Известно [2], что линейная фильтрация существенно сглаживает резкие изменения уровня (в дальнейшем — РИУ) сигнала или изображения. Кроме того, линейные алгоритмы плохо фильтруют импульсный шум. В то же время в таких важных приложениях фильтрации, как, например, устранение артефактов изображений, восстановленных алгоритмами вычислительной томографии [3, 4], желательно использование методов, которые были бы, с одной стороны, свободны от указанных недостатков, а с другой — достаточно хорошо отфильтровывали бы обычный квазибелый шум. В данной работе рассматриваются два алгоритма нелинейной фильтрации, отвечающие этим требованиям. Проведено сравнение этих алгоритмов, а также даны рекомендации по выбору их параметров.

Комбинированный фильтр, использующий порядковые статистики. В [5] для анализа временных рядов была предложена медианная фильтрация, осуществлявшаяся движением апертуры (некоторого окна) вдоль дискретного сигнала и заменой значения сигнала в центре апертуры медианой исходных значений внутри апертуры. Так, для зашумленных данных

$$\tilde{f}_j = f_j + \eta_j, \quad 1 \leq j \leq n, \quad (1)$$

где η_j — шум измерения, оценку \tilde{f}_i^M медианного фильтра можно записать в виде

$$\tilde{f}_i^M = M_L(\{\tilde{f}_j\}) = \text{med}(\tilde{f}_{i-L}, \tilde{f}_{i-L+1}, \dots, \tilde{f}_i, \dots, \tilde{f}_{i+L}), \quad (2)$$

где L — параметр, определяющий длину $N = 2L + 1$ фильтра. Двумерный медианный фильтр с апертурой A определяется как

$$\tilde{f}_{i,j}^M = \text{med}(\tilde{f}_{i+l, j+b}, (l, k) \in A). \quad (3)$$

В качестве апертуры могут использоваться крест, квадрат, круг и другие геометрические фигуры [2]. В целях упрощения записи расчетные соотношения будут приводиться для одномерных сигналов. Обработка двумерных сигналов (изображений) отличается тем, что последовательность $\{\tilde{f}_j\}$, элементы которой используются для построения соответствующей оценки, формируется уже из исходных значений изображения, попадающих в заданную апертуру A .

Медианные фильтры (МФ) успешно используются при обработке речи [6], изображений [7, 8]. Свойства МФ (в том числе и статистические) обсуждаются в [2, 9]. Отметим наиболее важные из них: а) МФ сохраняет РИУ сигналов и изображений; б) МФ хорошо устраняет искажение сигнала импульсным шумом, имеющим вид выбросов с очень большой дисперсией, но с малой вероятностью появления; в) МФ хуже по сравнению с фильтром скользящего среднего (ФСС) фильтрует шумы, имеющие малую дисперсию, но большую вероятность появления выброса. Так, в [2] приводится пример, где в случае нормального шума дисперсия оценки МФ превышает дисперсию оценки ФСС на 57 %.

Из этих свойств следует, что для обработки зашумленных сигналов с резкими изменениями уровня целесообразно использовать комбинированный фильтр, объединяющий МФ и ФСС [8, 10]. Работу такого фильтра (в дальнейшем обозначаемого КФ1) можно представить следующими шагами:

Шаг 0. Задаются параметры L, K , определяющие длину $2L + 1$ МФ и длину $2K + 1$ ФСС, при этом $K \geq L$. Для значений $i \in I = \{1, 2, \dots, n\}$ выполняются:

Шаг 1. Строится оценка МФ

$$\tilde{f}_i^M = \text{med}(\tilde{f}_{i-L}, \dots, \tilde{f}_i, \dots, \tilde{f}_{i+L}). \quad (4)$$

Шаг 2. Строится оценка

$$\tilde{f}_i^{K\Phi 1} = \text{aver}(\tilde{f}_j; i - K \leq j \leq i + K; |\tilde{f}_j - \tilde{f}_i^M| \leq F), \quad (5)$$

т. е. усреднению подлежат только значения сигнала \tilde{f}_j , попадающие в интервал $[\tilde{f}_i^M - F, \tilde{f}_i^M + F]$, и поэтому фильтр (5) можно назвать интервальным ФСС с амплитудой F . При $F = 0$ КФ1 превращается в медианный фильтр, а при $L = 0, F = \infty$ становится ФСС.

Определенным недостатком КФ1 является то, что в процедуре усреднения среди значений \tilde{f}_j , удовлетворяющих $|\tilde{f}_j - \tilde{f}_i^M| \leq F$, могут встретиться (при завышенных значениях F) значения, искаженные импульсным шумом, что отрицательно скажется на качестве работы интервального ФСС. Поэтому предлагается комбинированный фильтр (обозначаемый КФ2), в котором на шаге 2 строится оценка

$$\tilde{f}_i^{\text{КФ2}} = \text{aver}(\tilde{f}_j^M: i - K \leq j \leq i + K; |\tilde{f}_j^M - \tilde{f}_i^M| \leq F). \quad (6)$$

Заметим, что выбор величины F в (5), (6) играет определяющую роль в сохранении РИУ обрабатываемого сигнала. Приведем две рекомендации по выбору F : 1) если в обрабатываемом сигнале необходимо отфильтровать квазибелый шум с дисперсией σ_n^2 , то

$$F = C_\sigma \sigma_n, \quad (7)$$

где $C_\sigma \in [2; 3]$; 2) если же необходимо сохранить РИУ сигнала с амплитудой H и более, то

$$F = H - C_\sigma \sigma_n. \quad (8)$$

Очевидно, что эти рекомендации носят качественный характер, так как результат фильтрации зависит и от параметров L, K , выбор которых, в свою очередь, связан с предположениями о структуре сигнала [2]. Отметим, что если значение дисперсии шума σ_n^2 в точке i неизвестно, то в качестве оценки дисперсии можно использовать величину

$$\sigma_M^2 = M_L(|\tilde{f}_j - \tilde{f}_i^M|^2). \quad (9)$$

Комбинированный фильтр, основанный на локальных статистиках. В [11] для фильтрации нестационарных сигналов, искаженных шумом с дисперсией σ_n^2 , предложен алгоритм, имеющий вид

$$\tilde{f}_i = \mu_i \tilde{f}_i + (1 - \mu_i) \bar{f}_i, \quad (10)$$

где \bar{f}_i — локальное среднее, определяемое как

$$\bar{f}_i = \frac{1}{2K+1} \sum_{j=i-K}^{i+K} \tilde{f}_j.$$

Величина μ_i задается соотношением

$$\mu_i = 1 - \sigma_n^2 / \vartheta_i^2, \quad 0 \leq \mu_i \leq 1,$$

где ϑ_i^2 — локальная дисперсия:

$$\vartheta_i^2 = \frac{1}{2K+1} \sum_{j=i-K}^{i+K} (\tilde{f}_j - \bar{f}_i)^2.$$

Физическая сущность фильтра (10) достаточно проста: если $\sigma_n^2 / \vartheta_i^2 \approx 0$, т. е. локальная дисперсия обусловлена РИУ изображения, то $\mu_i \approx 1$ и \tilde{f}_i определяется значением \tilde{f}_i , благодаря чему сохраняется РИУ сигнала; если $\sigma_n^2 / \vartheta_i^2 \approx 1$, т. е. отклонения обусловлены шумом, то $\mu_i \approx 0$ и \tilde{f}_i в основном определяется ФСС. Таким образом, «управляющий» параметр μ_i связан с локальными статистиками обрабатываемого сигнала.

Исходя из приведенной трактовки работы фильтра (10) можно предположить, что данный фильтр будет неудовлетворительно обрабатывать РИУ сигнала, искаженного шумом (в том числе импульсным) с высоким уровнем. Для устранения этого недостатка предлагается следующий ком-

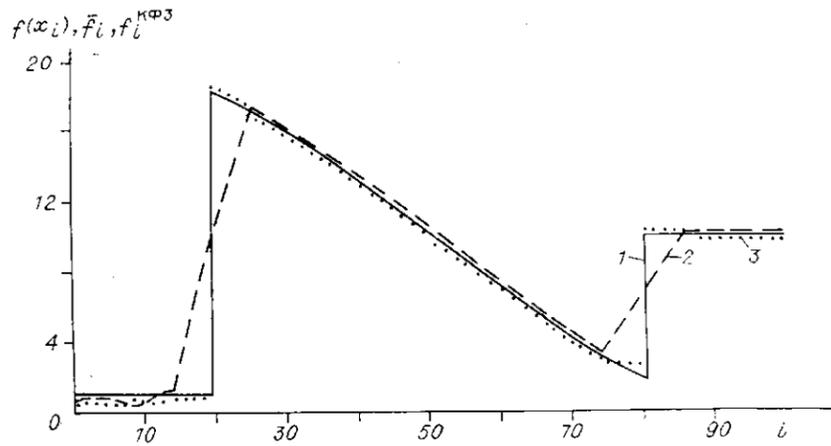


Рис. 1. Фильтрация одномерного сигнала:
1 — точные значения сигнала; 2 — значения ФСС; 3 — значения КФ2

бинированный фильтр (КФ3):

$$\tilde{f}_i^{KF3} = \begin{cases} M_L(\{\tilde{f}_j\}), & \text{если } 1 - \varepsilon < \mu_i \leq 1; \\ \mu_i M_L(\{\tilde{f}_j\}) + (1 - \mu_i) \tilde{f}_i, & \text{если } \varepsilon \leq \mu_i \leq 1 - \varepsilon; \\ \tilde{f}_i, & \text{если } 0 \leq \mu_i < \varepsilon, \end{cases} \quad (11)$$

где ε можно положить равной 0,05. Если шум нестационарен или дисперсия σ_n^2 неизвестна, то параметр μ_i оценим как

$$\mu_i = \begin{cases} 0, & \text{если } \hat{\mu}_i \leq 0; \\ \hat{\mu}_i, & \text{если } 0 < \hat{\mu}_i \leq 1; \\ 1, & \text{если } \hat{\mu}_i > 1, \end{cases} \quad (12)$$

где

$$\hat{\mu}_i = 1 - \frac{M_K(\{|\tilde{f}_j - \tilde{f}_i^M|^2\})}{\sigma_i^2}, \quad (13)$$

Результаты вычислительного эксперимента. Описанные алгоритмы нелинейной фильтрации реализованы в виде набора подпрограмм, написанных на языке Фортран-IV. Приведем результаты двух вычислительных экспериментов.

Таблица 1

Тип фильтра	Ошибка фильтрации Δ_1^2
ФСС ($K = 4$)	$3,01 \cdot 10^{-2}$
ФСС ($K = 5$)	$3,44 \cdot 10^{-2}$
КФ1 ($L = 3, K = 5, F = 2\sigma_M$)	$1,7 \cdot 10^{-3}$
КФ1 ($L = 3, K = 5, F = 5$)	$8,9 \cdot 10^{-4}$
КФ1 ($L = 4, K = 5, F = 5$)	$8,7 \cdot 10^{-3}$
КФ1 ($L = 3, K = 7, F = 2\sigma_M$)	$1,86 \cdot 10^{-3}$
КФ1 ($L = 3, K = 5, F = 2\sigma_M$) двойной проход	$9,9 \cdot 10^{-4}$
КФ2 ($L = 3, K = 5, F = 5$)	$7,24 \cdot 10^{-4}$
КФ3 ($L = 3, K = 5$)	$1,54 \cdot 10^{-3}$

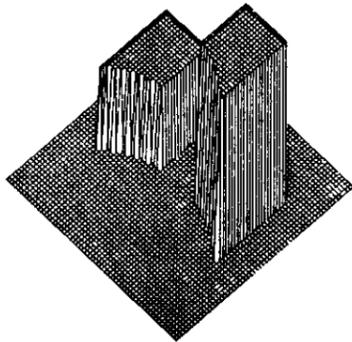


Рис. 2. Точное изображение

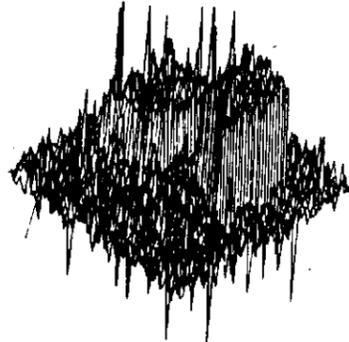


Рис. 3. Зашумленное изображение

В первом эксперименте значения функции $f(x)$ (рис. 1) в узлах x_i искажались шумом

$$\eta_i = \delta \xi_i' + (1 - \delta) \xi_i'', \quad 1 \leq i \leq 100, \quad (14)$$

где ξ_i' — нормально распределенная случайная величина с нулевым средним и дисперсией $\sigma_1^2 = 1,0$, а ξ_i'' — с дисперсией $\sigma_2^2 = 10,0$. Величина δ с вероятностью 0,95 принимала значение 1. Ошибка исходных данных характеризовалась отношением

$$\frac{\sum_{j=1}^{100} (\tilde{f}_j - f_j)^2}{\sum_{j=1}^{100} f_j^2} = 1,49 \cdot 10^{-2}.$$

В табл. 1 приведены значения среднеквадратической ошибки фильтрации, определяемой выражением

$$\Delta_1^2 = \frac{\sum_{j=1}^{100} (\tilde{f}_j - f_j)^2}{\sum_{j=1}^{100} f_j^2} \quad (15)$$

для разных фильтров: ФСС — фильтра скользящего среднего; КФ1 — фильтров (4), (5); КФ2 — фильтров (4), (6); КФ3 — фильтра (11). На рис. 1 нанесены выходные значения ФСС ($K=5$) — КФ2 ($L=3, K=5, F=5$). Анализ таблицы показывает высокую эффективность фильтров КФ1, КФ2, КФ3, сохраняющих РИУ сигнала и хорошо подавляющих импульсный и квазибелый шум.

Во втором эксперименте изображение с максимальной единичной амплитудой (рис. 2), заданное на сетке 60×60 , искажалось шумом (14) с дисперсиями $\sigma_1^2 = 0,01$, $\sigma_2^2 = 2,0$. Это зашумленное изображение (рис. 3) являлось исходным для обработки рассмотренными в работе фильтрами. При этом брались квадратные апертуры с размерами: $(2K+1) \times$

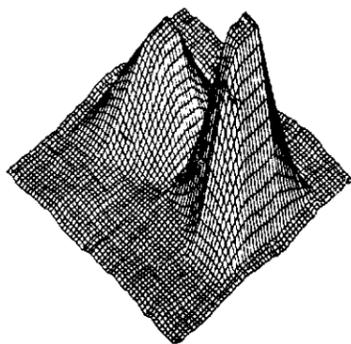


Рис. 4. Изображение, построенное фильтром скользящего среднего

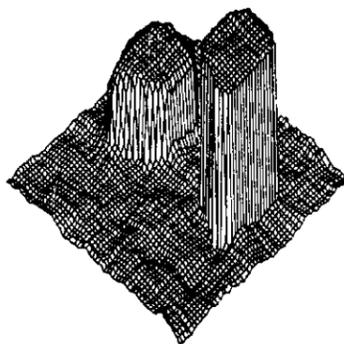


Рис. 5. Изображение, построенное медианным фильтром

Таблица 2

Тип фильтра	Ошибка фильтрации Δ_2
КФ1 ($L = 3, K = 7, F = 2\sigma_M$)	14,51
КФ1 ($L = 3, K = 5, F = 0,3$)	14,03
КФ2 ($L = 3, K = 5, F = 0,3$)	14,36
КФ3 ($L = 3, K = 5$)	14,41



Рис. 6. Изображение, построенное комбинированным фильтром КФ2

$\times(2K+1)$ — вычисление среднего, $(2L+1) \times (2L+1)$ — вычисление медианы. Обработанные изображения приведены на следующих рисунках: рис. 4 — ФСС ($K=5$), рис. 5 — МФ ($L=3$), рис. 6 — КФ2 ($L=3, K=5, F=0,3$). Видно, что: а) ФСС существенно искажает РИУ изображения; б) после медианной фильтрации наблюдается «остаточный» квазибелый шум, который устраняется применением комбинированного фильтра. В табл. 2 приведены значения относительной ошибки фильтрации

$$\Delta_2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{60} \sum_{j=1}^{60} (\bar{f}_{i,j} - f_{i,j})^2}{\sum_{i=1}^{60} \sum_{j=1}^{60} f_{i,j}^2} \right]^{1/2} 100 \%$$

для разных фильтров. Анализ этой таблицы и рисунков подтверждает целесообразность использования комбинированных фильтров для обработки сложных зашумленных изображений.

Отметим, что, несмотря на большую среднеквадратическую ошибку, фильтр КФ2 дает изображение, которое зрительно «привлекательнее», чем изображения, построенные КФ1, КФ3.

Изложенные комбинированные алгоритмы нелинейной фильтрации программно легко реализуемы и могут использоваться на персональных и мини-ЭВМ, входящих в состав автоматизированных систем научных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов.— М.: Мир, 1978.
2. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений/Под ред. Т. С. Хуанга.— М.: Радио и связь, 1984.
3. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям.— М.: Мир, 1983.
4. Пикалов В. В., Преображенский Н. Г. Реконструктивная томография в газодинамике и физике плазмы.— Новосибирск: Наука, 1987.
5. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений.— М.: Мир, 1981.
6. Rabiner L. R., Sambur M. R. Applications of nonlinear smoothing algorithm to speech processing // IEEE Trans. on Acous. Sign. and Sp. Proc.— 1975.— 22, N 6.— P. 552.
7. Протт У. Цифровая обработка изображений.— М.: Мир, 1982.
8. Ким В., Ярославский Л. П. Ранговые алгоритмы обработки изображений // Кодирование и обработка изображений.— М.: Наука, 1988.
9. Ataman E., Aatre B. K., Wong K. M. Some statistical properties of median filter // IEEE Trans. on Acous. Sign. and Sp. Proc.— 1981.— 29, N 10.— P. 1073.
10. Lee H. Y., Kassam S. A. Generalized median filtering and related nonlinear filtering techniques // IEEE Trans. on Acous. Sign. and Sp. Proc.— 1985.— 33, N 3.— P. 672.
11. Lee J. S. Digital image smoothing // IEEE Trans. on Patter. Analys. and Mach. Intell.— 1980.— 2, N 2.— P. 165.

Поступила в редакцию 23 декабря 1988 г.