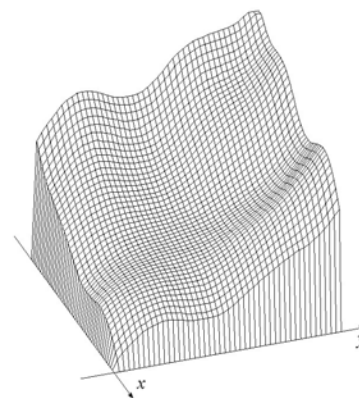
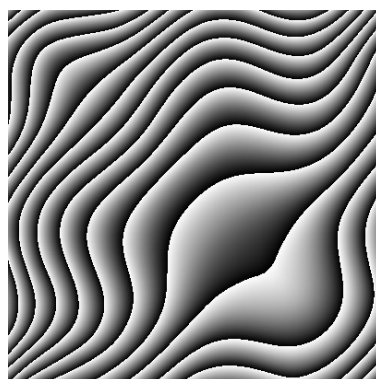
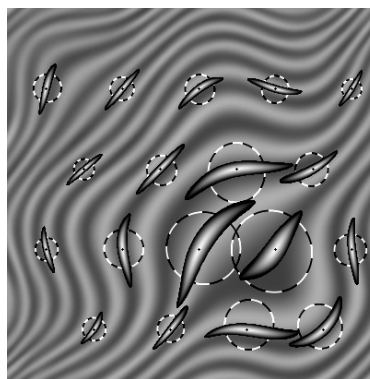
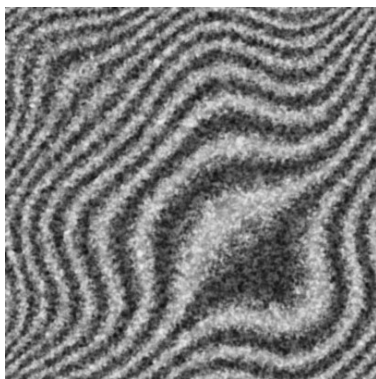


**М.В. Волков, Н.Б. Маргарянц**

**МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ  
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИГНАЛОВ И  
КАРТИН ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС**

**Учебное пособие**



**Санкт-Петербург  
2018**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**М.В. Волков, Н.Б. Маргарянц**

**МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ  
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИГНАЛОВ И  
КАРТИН ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлениям подготовки 09.04.03 – "Прикладная информатика" и 12.04.02 –  
"Оптотехника" в качестве учебного пособия для реализации основных  
профессиональных образовательных программ высшего образования  
магистратуры

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**

**2018**

Волков М.В., Маргарянц Н.Б. Методы обработки интерференционных сигналов и картин интерференционных полос: Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 107 с.

Рецензент: Коняхин Игорь Алексеевич, д.т.н., профессор, Университет ИТМО.

В данном учебном пособии рассмотрены особенности формирования интерференционных сигналов, представлены методы обработки интерференционных сигналов и картин интерференционных полос, методы восстановления и развертывания фазы двумерных интерференционных полос, рассмотрены особенности применения специализированного ПО для обработки интерференционных данных.

Пособие адресовано студентам, обучающимся по направлению подготовки 09.04.03 – "Прикладная информатика", по дисциплине "Компьютерная обработка экспериментальных данных", по направлению подготовки 12.04.02 – "Оптотехника", по дисциплине "Методы обработки интерферограмм", студентам при проведении НИР в рамках перечисленных направлений подготовки, а также аспирантам и специалистам, интересующимся проблематикой интерференционных измерений.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2018

© Волков Михаил Владимирович, Маргарянц Никита Борисович, 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1.	МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	8
1.1.	Обобщенное описание интерферометрических систем	8
1.2.	Классификация методов восстановления фазы по способу регистрации интерференционного сигнала	12
1.3.	Классификация методов обработки двумерных картин интерференционных полос	12
Глава 2.	ОБРАБОТКА ОДНОМЕРНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ	17
2.1.	Адаптивная фильтрация с определением локальной частоты сигнала	17
2.2.	Адаптивная нелинейная фильтрация с определением локальной частоты сигнала	23
2.3.	Адаптивная нелинейная фильтрация с определением локальной частоты сигнала при исключении фоновой составляющей	27
2.4.	Выравнивание фона и амплитуды сигнала	28
2.5.	Восстановление фазы сигнала	29
Глава 3.	ОБРАБОТКА ДВУМЕРНЫХ КАРТИН ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС	30
3.1.	Метод устранения помех и дефектов картин интерференционных полос	30
3.2.	Определение локального шага полос	31
3.3.	Определение локального направления полос	34
3.4.	Определение размеров областей фильтрации	36
3.5.	Формирование областей фильтрации и получение итерационных оценок сигнала полос	39
3.6.	Преобразование сигнала для сохранения его амплитуды при обработке картин интерференционных полос с сильно изменяющимися характеристиками или шумом, неравномерным по полю	42
3.7.	Применение нелинейного метода при подавлении помех интерференционных полос	45
3.8.	Реализация методов обработки зашумленных картин интерференционных полос	48

Глава 4.	ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФАЗЫ ПО ЛИНИЯМ ЭКСТРЕМУМОВ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС	53
4.1.	Восстановление линий интерференционных экстремумов	53
4.2.	Восстановление фазы по линиям экстремумов	57
5.	ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФАЗЫ ДВУМЕРНЫХ КАРТИН ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС	63
5.1.	Восстановление фазы интерференционных полос	63
5.2.	Развертывание полной фазы полос с устранением локальных дефектов приведенной фазы	67
5.3.	Оценка погрешностей разработанных методов подавления помех и восстановления фазы интерференционных полос	69
5.4.	Восстановление рельефа кратеров лазерной абляции, наблюдаемых при воздействии на исследуемую поверхность фемтосекундных лазерных импульсов	70
Глава 6.	ПРОГРАММА FRINGE ANALISER, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ АДАПТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФАЗЫ ДВУМЕРНЫХ КАРТИН ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС	81
6.1	Общие сведения о программе.	81
6.2	Интерфейс программы	82
6.3	Настройка параметров программы для анализа интерференционных полос и итерационного подавления помех	92
6.4	Обработки интерференционных картин большого размера	96
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	102
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	103

## ВВЕДЕНИЕ

Классические интерференционные методы позволяют сравнивать мало отличающиеся друг от друга волновые фронты – исследуемый и эталонный. В качестве эталонного фронта обычно используют плоскую или сферическую волну. Вследствие этого, в классической интерферометрии исследуются оптически совершенные объекты, такие как зеркала, пластины и линзы.

Использование лазерных источников излучения позволяет расширить возможности интерферометрии, в том числе на основе методов голографии [1-4]. Методы голографической интерферометрии [5-13] позволяют исследовать свойства разнообразных объектов.

Голографические методы позволяют сравнивать объекты с эталонными, определять смещения поверхности объектов, деформации, измерять амплитуды вибраций и др. Широкое распространение получили также методы муаровой интерферометрии [14-17] и спекл-интерферометрии [9-12].

Интерференционные методы позволили осуществить переход от измерения пространственно распределенных величин в дискретных точках к получению измерительной информации сразу по всему полю исследуемого объекта бесконтактным способом с высокими точностью и быстродействием. В перечисленных методах требуется анализировать картины интерференционных полос, представленных отсчетами интенсивности излучения.

При решении качественных (оценочных) задач характер картины полос позволяет делать выводы о состоянии объекта или изменении его параметров. Однако в большинстве практических задач нужна не только качественная картина, но и количественная информация об исследуемых объектах или процессах. Для этого требуются системы, представляющие собой измерительно-вычислительные комплексы, предназначенные для получения интерферометрической информации при преобразовании, обработке и расшифровке картин полос.

В настоящее время наиболее перспективной является разработка оптико-электронных систем [9, 13], в которых в качестве первичного преобразователя используется интерферометр, преобразующий значения измеряемых величин в поле яркости картины интерференционных полос, которое с помощью оптико-электронных устройств преобразуется в цифровую форму для последующей компьютерной обработки.

Во многих задачах неразрушающего контроля информация об исследуемом объекте содержится в фазе зарегистрированных картин полос, однако извлечение этой информации может быть осложнено влиянием помех и значительными изменениями локальных характеристик полос. Разработка методов восстановления фазы интерференционных

полос в условиях помех и при значительных изменениях характеристик полос является важной задачей, от эффективности которой зависит точность определения характеристик исследуемого объекта.

В данном учебном пособии рассмотрены особенности применения помехоустойчивого метода нелинейной локально-адаптивной фильтрации. При обработке картин интерференционных полос метод позволяет практически без снижения видности полос и без внесения существенных фазовых погрешностей эффективно подавлять помехи и локальные дефекты, в частности, устранять разрывы полос. Метод обеспечивает улучшение качества и анализ характеристик весьма сложных интерферограмм, обработка которых при традиционных подходах представляется весьма проблематичной.

Получение оценок локальных характеристик интерференционных полос при предварительном подавлении помех позволяет реализовать два различных подхода к задаче восстановления фазы. Первый подход заключается в построении линий интерференционных экстремумов и развертывании полной фазы по этим линиям. При этом полная фаза картины полос может быть восстановлена по линиям экстремумов интерференционных полос с помощью линейной интерполяции. Второй подход состоит в построении локально-достоверной модельной картины полос, получении приведенной фазы методом минимизации среднего квадратичного отклонения между модельной и реальной картинами полос, и развертывании полной фазы по значениям приведенной фазы.

Известные методы построения линий экстремумов на основе алгоритмов отслеживания полос часто неэффективны при наличии разрывов в картине полос. Разработанный метод восстановления линий экстремумов на основе анализа локальных характеристик полос позволяет получить корректную картину линий экстремумов при наличии разрывов в картине полос. Разработан метод нумерации линий интерференционных экстремумов, позволяющий развернуть полную фазу полос, в том числе при наличии разрывов в картине линий экстремумов.

В данном учебном пособии представлен новый метод восстановления полной фазы, характеризующийся значительно более высокой точностью. Оценки локального шага и локального направления полос, полученные в процессе предварительного подавления помех, позволяют получить значения фона и огибающей сигнала полос, и в окрестности каждой точки картины полос построить локально-достоверное модельное поле разности фаз. Значение фазы в рассматриваемой точке может быть восстановлено с заданной точностью по критерию минимума среднего квадратичного отклонения между реальной и модельной картинами полос в пределах выбранной окрестности. Разработаны методы последующего развертывания полной фазы полос, позволяющие определить области с дефектами фазы, развернуть фазу вне этих областей,

и доопределить полную фазу внутри рассмотренных областей методом экстраполяции.

Применение адаптивных методов анализа, обработки и восстановления фазы двумерных картин интерференционных полос, зарегистрированных оптико-электронными интерферометрическими приборами на основе методов голографической, муаровой и спекл-интерферометрии при решении задач неразрушающего контроля объектов является важной частью учебного процесса и подготовки студентов по ряду дисциплин. В учебном пособии рассмотрены следующие методы.

1. Методы получения оценок параметров, подавления помех и восстановления фазы одномерных интерферометрических сигналов, анализа параметров и адаптивного нелинейного подавления влияния помех в двумерных картинах интерференционных полос.

2. Методики определения локального шага полос, направления полос и формирования импульсного отклика пространственно-неинвариантного фильтра по значениям шага полос и локального направления полос.

3. Метод восстановления полной фазы полос на основе выделения линий интерференционных экстремумов с корректным восстановлением фазы при наличии повреждений в картине полос.

4. Метод восстановления фазы полос на основе минимизации среднего квадратичного отклонения локальной модельной картины полос, синтезированной по вычисленным значениям шага и локального направления полос, и обрабатываемой картины полос, и развертывания полной фазы полос по значениям приведенной фазы, содержащей локальные дефекты.

Рассмотренные в данном учебном пособии методы анализа параметров картин интерференционных полос, подавления помех и восстановления фазы полос основаны на положениях теории когерентности и формирования интерференционных полос, теории оптико-электронных приборов и систем, теоретических положениях интерферометрии, теории обработки сигналов.

Изложенные в данном пособии теоретические и практические материалы могут быть использованы в процессе обучения студентов по направлениям подготовки 09.04.03 – "Прикладная информатика" и 12.04.02 – "Оптотехника".



# Глава 1. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

## 1.1. Обобщенное описание интерферометрических систем

Интерферометрическая система [18] содержит источник излучения, расположенный со стороны входного зрачка, приёмник излучения, расположенный у выходного люка в поле интерференции, и ветви интерферометра, имеющие общий входной зрачок и общее поле. Следовательно, интерферометрическую систему можно представить [19] в виде структурной схемы, содержащей источник с комплексной амплитудой электрического поля  $E$ , два или несколько трактов  $w_1, w_2, \dots, w_n$ , распространения когерентных световых волн с результирующей комплексной амплитудой  $E_\Sigma$  (см. рис. 1.1). Передаточная функция тракта  $w_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , является комплексной величиной  $w = |w| \exp(j2\pi \arg w)$ . Характеристики исследуемого объекта определяются значениями оптических длин трактов, т.е. значениями  $\Delta \arg w = \varphi / 2\pi$ , где  $\varphi$  – разность фаз интерферирующих волн.

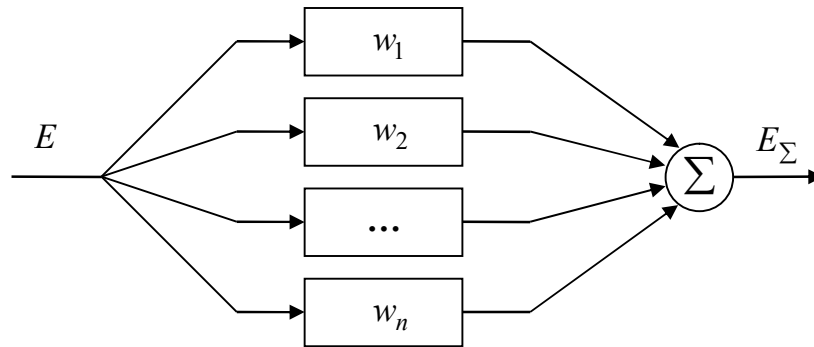


Рис. 1.1. Структурная схема интерферометрической системы

Структурную схему, приведенную на рис. 1.1, можно представить в обобщенном виде (см. рис. 1.2).

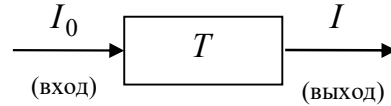


Рис. 1.2. Обобщенная схема интерферометрической системы

В схеме рис. 1.2 исходное излучение  $I_0$  преобразуется в выходное излучение  $I$ . Преобразование оптической информации определяется оператором  $T$  интерферометрической системы, представляющим собой аппаратную функцию интерферометра.

Наибольшее распространение получили двухлучевые интерферометрические системы, в которых используется два тракта распространения оптических волн  $w_1$  и  $w_2$  (см. рис. 1.1).

Интерференция когерентных монохроматических плоских световых волн с комплексными амплитудами  $E_1 = A_1 \exp(j\varphi_1)$ ,  $E_2 = A_2 \exp(j\varphi_2)$ , как известно, наблюдается при квадратичном детектировании суммарного колебания  $E = E_1 + E_2$ , а именно,

$$I = |E|^2 = EE^* = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \varphi, \quad (1.1)$$

где  $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi\Delta/\lambda$  – разность фаз,  $\Delta$  – оптическая разность хода,  $\lambda$  – длина волны.

Обозначим  $A_1^2 + A_2^2 = I_0$ ,  $2A_1A_2/(A_1^2 + A_2^2) = V$ , тогда в соответствии с рис. 1.2, выражение (1.1) можно записать в форме

$$I = T(\varphi)I_0, \quad (1.2)$$

где аппаратная функция интерферометра

$$T(\varphi) = 1 + V \cos \varphi. \quad (1.3)$$

Разность фаз  $\varphi$  определяется свойствами исследуемого объекта или процесса и одновременно является аргументом аппаратной функции (1.3). Следовательно, в математической формулировке обработки информации в интерферометрической системе в общем случае следует рассматривать как решение обратной задачи идентификации аппаратной функции в (1.2) [20]. Можно попытаться получить искомую оценку этой функции методом прямого обращения

$$\hat{T}(\varphi) = I/I_0, \quad (1.4)$$

после чего из (1.3) определить разность фаз как

$$\hat{\varphi} = \arccos\{[\hat{T}(\varphi) - 1]/V\}. \quad (1.5)$$

Проблема заключается в том, что значения  $I_0$ ,  $V$  в (1.4), (1.5) априори известны со значительными погрешностями. Кроме этого, формирование интерферометрических данных в (1.1) на практике

сопровождается воздействием комплекса шумов и помех. В результате при вычислениях согласно формуле (1.5) решение не удовлетворяет условиям единственности и устойчивости.

Преодолеть указанные трудности можно при помощи методов регуляризации решения обратной задачи [21], которые основываются на использовании априорной информации об исследуемом процессе. Практически при получении соотношений вида (1.1) нужно учитывать [22]:

- спектральные (временные и пространственные) характеристики источника излучения и связанные с ним параметры когерентности;
- отклонения формы волнового фронта, направления векторов поляризации, волновых векторов и значения показателей преломления среды в рабочей зоне интерферометра;
- геометрические размеры в сечении световых пучков и чувствительной площадки фотодетектора.

Важное значение имеют также такие параметры, как коэффициенты отражения отдельных рабочих поверхностей и параметры шумов источника излучения, пространственных шумов, вызванных остаточной шероховатостью поверхностей оптических элементов, шумов приемника излучения.

Интенсивность света (1.1) в целях последующей обработки данных подвергается дискретизации по одной или двум независимым переменным, фотоэлектрическому преобразованию и квантованию по уровню. В реальных условиях данные искажаются воздействием помех, которое характеризуется оператором  $D$ , при этом выходная последовательность для одномерного случая имеет вид:

$$s_e(k, \theta) = D(\mu\{I(k), \Delta s_q\}) \quad , \quad (1.6)$$

где  $k = 1, \dots, L$ ,  $L$  – объем выборки,  $\theta = (\varphi, I_0, V)^T$  – вектор параметров модели,  $I(k)$  – значения интенсивности, полученные в результате дискретизации на  $k$ -м шаге,  $\mu$  – постоянный коэффициент фотоэлектрического преобразования,  $\Delta s_q$  – вектор, компонентами которого являются элементарные (кодовые) квантованные сигналы. Процесс формирования интерферометрических данных иллюстрируется схемой рис. 1.3.

Учитывая воздействие влияющих факторов, можно выделить три основные вида модели (1.6), а именно:

$$s_e(k, \theta) = s(k, \theta) + N_1(k); \quad (1.7)$$

$$s_e(k, \theta) = s(k, \theta)\{1 + N_2(k)\}; \quad (1.8)$$

$$s_e(k, \theta) = s(k, \theta + \delta\theta_k), \delta\theta_k = \mathbf{N}(k), \quad (1.9)$$

где  $s(k, \theta)$  – идеализированная модель данных;  $N_1, N_2$  – случайные шумовые последовательности;  $\mathbf{N}(k)$  – вектор, компонентами которого являются шумовые последовательности, соответствующие компонентам вектора  $\theta$ .

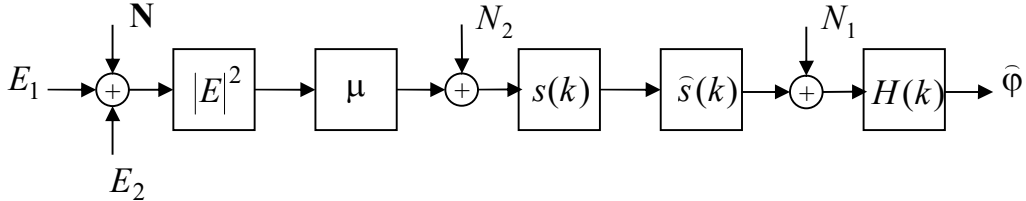


Рис. 1.3. Обобщенная схема реальной двухлучевой интерферометрической системы:  $s(k)$  – последовательность данных при дискретизации по независимой переменной;  $\hat{s}(k)$  – квантованные по уровню данные;  $H(k)$  – обобщенный оператор обработки;  $N_1, N_2, \mathbf{N}$  – составляющие помех.

Оператор  $D$  в (1.6) характеризует в соответствии с (1.7)–(1.9) воздействие аддитивного шума  $N_1$ , не зависящего от полезных данных  $s(k, \theta)$ , шума  $N_2$ , коррелированного с этими данными, параметрического шума  $\mathbf{N}$ , в частности, в виде флуктуаций фазы (рис. 1.3).

Интерферометрические данные с шумами вида (1.7) в основном относятся к случаю влияния шума квантования при аналого-цифровом преобразовании данных.

Из (1.1) – (1.3) следует, что дробовой шум источника и приемника излучения, флуктуации направления векторов поляризации, изменения коэффициентов отражения рабочих поверхностей порождают модель вида (1.8). Модель (1.9) в общем случае учитывает влияние неравномерности яркости источника, параметров когерентности, остаточной шероховатости, флуктуаций показателя преломления и ряда других факторов.

Следует отметить, что в (1.7) – (1.9) параметры идеализированной модели интерферометрических данных  $s(k, \theta)$ , как правило, априори неизвестны с требуемой точностью. Известен лишь вид модели двухлучевого интерференционного одномерного сигнала:

$$s(k, \theta) = s_0(k) + s_m(k) \cos \varphi(k). \quad (1.10)$$

Следовательно, необходимо дополнительно оценивать или исключать влияние сопутствующих параметров  $s_0(k)$  и  $s_m(k)$  в выражении (1.10).

Важно отметить, что отдельные варианты модели (1.6), такие как композиции моделей (1.7) – (1.9), изучены еще недостаточно полно. Известны общие принципы обработки исходных данных в оптико-электронных системах, повышающие помехозащищенность и, следовательно, точность искомых оценок: метод модуляции, методы

спектральной обработки, метод управляемого фазового сдвига и ряд других методов, которые рассмотрены в следующем разделе.

Для описания двумерных картин интерференционных полос вида

$$s(i, j, \theta) = s_0(i, j) + s_m(i, j) \cos \varphi(i, j), \quad (1.11)$$

рассматриваются двумерные модели (1.7-1.9),

$$s_e(i, j, \theta) = s(i, j, \theta) + N_1(i, j); \quad (1.12)$$

$$s_e(i, j, \theta) = s(i, j, \theta) \{1 + N_2(i, j)\}; \quad (1.13)$$

$$s_e(i, j, \theta) = s(i, j, \theta + \delta\theta_{i,j}), \delta\theta_{i,j} = N(i, j). \quad (1.14)$$

## 1.2. Классификация методов восстановления фазы по способу регистрации интерференционного сигнала

Можно выделить две группы интерференционных методов, принципиально отличающихся по способу восстановления фазы.

К первой группе относятся методы, в которых восстановление фазы производится по значениям сигнала или по серии интерферограмм, полученных при известном изменении параметров интерферометра. При этом основным изменяющимся параметром является фазовый сдвиг между интерферирующими пучками. По способу внесения фазового сдвига различаются модуляционная интерферометрия, гетеродинная интерферометрия и интерферометрия дискретного фазового сдвига.

Модуляционные и гетеродинные интерферометрические системы исследовались в течение длительного времени, начиная с работ [23-26], результаты исследований представлены в многочисленных научных статьях (см., например, [26, 27]), обзорах [23, 28] и в ряде монографий (см., например, [29-31]). Основным преимуществом интерферометрических систем этой группы является перенос спектра интерферометрического сигнала в область высоких временных частот при последующей обработке сигналов на переменном токе, что обеспечивает повышение чувствительности и помехоустойчивости интерферометрических систем. Во многих случаях в силу принципиальных физических ограничений, вносимых особенностями интерферометрического процесса, использование модуляционных и гетеродинных интерферометрических систем оказывается невозможным.

Методы дискретного фазового сдвига [9, 10, 32, 33], основаны на регистрации нескольких картин полос с известными фазовыми сдвигами отсчетов интерференционного сигнала, по которым фазу можно восстановить с помощью простых тригонометрических преобразований.

Ко второй группе относятся методы, в которых восстановление фазы производится по сигналу или интерферограмме, полученной при фиксированных параметрах интерферометра.

Согласно (1.11), интерферометрический сигнал, представляющий неподвижную интерференционную картину, содержит фоновую составляющую  $s_0(i, j)$  и, в общем случае, неизвестную локальную амплитуду  $s_m(i, j)$ . Для исключения фоновой составляющей интерференционного сигнала первоначально использовали следующие основные методы [23]:

метод дифференциальных фотоэлектрических сигналов, основанный на вычитании сигналов приемников излучения со смещенными полями зрения;

метод сканирования неподвижной интерференционной картины, заключающийся в том, что с помощью сканирующего устройства, например, в виде качающегося зеркала, сканируют поле интерференции и таким образом осуществляют модуляцию фототока, гармонический анализ которого позволяет выделить информативные составляющие интерферометрического сигнала.

Перечисленные методы и соответствующие устройства можно отнести к классу интерферометрических систем первого поколения, которые основывались на использовании блоков оптико-механического сканирования, поскольку такие системы разрабатывались до создания многоэлементных приемников оптического излучения.

В связи с активным развитием технологии многоэлементных приёмников оптического излучения с повышенным разрешением и современных компьютерных технологий в настоящее время получил наибольшее распространение метод дискретизации распределения интенсивности в интерференционной картине. Метод дискретизации имеет повышенную помехозащищенность, так как дает возможность оценивать параметры и осуществлять фильтрацию двумерного распределения интенсивности в картине полос. С помощью данного метода возможны исследования динамических процессов, и его применение не требует дополнительных принципиальных модификаций известных интерферометров.

### 1.3. Классификация методов обработки двумерных картин интерференционных полос

Методы и алгоритмы обработки интерферометрической информации в двумерных картинах интерференционных полос основываются на нескольких подходах, которые можно подразделить на следующие основные группы: методы обработки в двумерной области пространственных частот; методы аппроксимации двумерного распределения интенсивности в области независимых переменных; методы двумерной фильтрации в области независимых переменных; методы отслеживания линий экстремумов интерференционных полос.

Наибольшее распространение получили методы восстановления фазы на основе выделения координат полос [10, 34-37], преобразования Фурье-Гильберта [38-40], аппроксимации интерференционных полос нелинейными полиномами [41, 42]. В последнее время получены результаты восстановления фазы на основе нелинейной фильтрации Калмана [43-45]. Все перечисленные методы имеют различные недостатки.

Методы на основе выделения координат полос характеризуются относительно низкой точностью восстановления фазы и требуют предварительного подавления помех. Методы на основе преобразования Фурье-Гильберта неэффективны при обработке картин полос с помехами, близкими по частоте с сигналом полос. Кроме того, в случаях малого числа полос в поле интерферограммы при применении таких методов возникают проблемы с краевыми эффектами. Методы на основе аппроксимации полос полиномами сложны в настройке, недостаточно помехоустойчивы и требуют значительных вычислительных ресурсов. Методы на основе нелинейной фильтрации Калмана требуют значительного объема априорной информации и характеризуются недостаточной помехоустойчивостью при обработке сильно зашумленных картин интерференционных полос в случае использования упрощенных моделей эволюции параметров сигнала и помех.

Перечисленные методы восстановления фазы эффективны при обработке картин полос, полученных методами классической интерферометрии, которые характеризуются относительно низким уровнем помех. При обработке картин полос, искаженных значительными помехами, в голографической, муаровой или спекл-интерферометрии, перечисленные методы восстановления фазы сложны в настройке и часто оказываются совершенно неэффективными из-за невозможности разделения сигнала и помех.

Проблему обработки сильно зашумленных картин полос позволяет разрешить разработанный метод нелинейной локально-адаптивной фильтрации. Метод основан на итерационном оценивании параметров картин полос, синтезировании адаптивной импульсной реакции фильтра на основе этих параметров и подавлении помех на каждом шаге итерационной обработки. После подавления помех и получения оценок параметров сигнала полос, значения полной фазы полос могут быть получены либо на основе выделения линий интерференционных экстремумов, либо на основе минимизации среднего квадратичного отклонения локальной модельной картины полос, синтезированной по вычисленным параметрам, и обрабатываемой картины полос.

В отличие от методов подавления помех и восстановления фазы на основе преобразования Фурье-Гильберта, рассмотренный метод позволяет подавлять помехи, близкие по частоте с сигналом полос. В отличие от метода нелинейной фильтрации Калмана, разработанный метод не требует

значительной априорной информации, так как основан на итерационном адаптивном оценивании параметров сигнала полос. По сравнению с методами на основе аппроксимации полос полиномами, разработанный метод фильтрации характеризуется более высокими быстродействием и помехоустойчивостью. Проведенные исследования показали высокую эффективность разработанных методов подавления помех и восстановления фазы сильно зашумленных картин полос, полученных методами голографической, муаровой и спекл-интерферометрии.

### **Контрольные вопросы по введению и главе1:**

1. Какие ограничения по области применения характерны для методов классической интерферометрии?
2. В чем состоит основное предназначение интерферометров, что является целью измерения, что является результатом измерения и как обеспечивается разрешение противоречия?
3. Перечислите отличия в методах классической, голографической, муаровой и спекл-интерферометрии.
4. Какие преимущества при интерферометрических измерениях дает использование лазерного источника?
5. Почему в ряде интерференционных измерений используются малокогерентные источники вместо лазеров?
6. Перечислите области применения спекл-интерферометрии.
7. Перечислите основные источники помех при интерференционных измерениях.
8. Почему наиболее распространены системы с двухлучевой интерференцией?
9. Какие преимущества дает применение методов многоволновой интерферометрии? В чем недостатки таких систем?
10. Перечислите основные методы обработки интерферометрической информации в виде двумерных картин интерференционных полос.
11. Почему значительное распространение получили интерференционные системы на основе внесения управляемого фазового сдвига?
12. Перечислите основные методы расшифровки фазы при использовании интерференционных систем с управляемым фазовым сдвигом.
13. В каких случаях применение систем на основе управляемого фазового сдвига невозможно, и фазу приходится восстанавливать по единственной картине интерференционных полос?
14. В чем состоят недостатки методов обработки интерференционных полос на основе выделения координат полос?



15. Какие преимущества и недостатки у методов обработки интерференционных полос на основе преобразования Фурье-Гильберта?
16. Какие преимущества и недостатки у методов обработки интерференционных полос на основе аппроксимации интерференционных полос нелинейными полиномами?
17. Какие преимущества и недостатки у методов обработки интерференционных полос на основе двумерной фильтрации Калмана?

## Глава 2. ОБРАБОТКА ОДНОМЕРНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

### 2.1. Адаптивная фильтрация с определением локальной частоты сигнала

Пусть одномерный интерферометрический сигнал  $\xi(x_k)$  определяется моделью:

$$\xi(x_k) = s(x_k) + n(x_k) = B(x_k) + A(x_k) \cos \varphi(x_k) + n(x_k), \quad (2.1)$$

где  $s(x_k)$  – идеальный сигнал,  $B(x_k)$ ,  $A(x_k)$  соответственно фон и амплитуда сигнала,  $\varphi(x_k) = \varphi(x_{k-1}) + 2\pi\Delta x[(f(x_k) + f(x_{k-1}))/2]$  – полная фаза сигнала, при этом известно  $\varphi(x_0)$ ,  $f(x_k)$  – локальная пространственная частота сигнала,  $n(x_k)$  – аддитивный шум с нулевым средним,  $\langle n(x_k) \rangle = 0$ ,  $x_k = k\Delta x$  – точки дискретизации сигнала,  $\Delta x$  – шаг дискретизации.

Задачи определения частоты подобных квазигармонических сигналов решаются, в частности, Доплеровской оптической когерентной томографией [46-48]. В этом случае частота сигнала содержит информацию о скорости движения рассеивающей среды, и если скорость различна в различных точках, что характерно для многих сред, то частота сигнала является случайно изменяющейся и характеризует динамические свойства среды. При обработке интерферометрических сигналов значения локальной частоты используются в задачах подавления помех и восстановлении фазы.

В настоящей работе предложен метод итерационного определения оценки  $T^q(x_c)$  локального периода  $T(x_c)$  идеального сигнала в точке  $x_c$  по зашумленному сигналу  $\xi(x_k)$ , где  $q$  – номер шага итерационной обработки. Под термином “локальный период сигнала” будем понимать величину  $T(x_k) = 1/|f(x_k)\Delta x|$ , обратную модулю локальной частоты сигнала. При постоянной частоте сигнала локальный период сигнала эквивалентен количеству шагов дискретизации между точками сигнала с разностью фаз  $|\Delta\varphi(x_i, x_j)| = |\varphi(x_j) - \varphi(x_i)| = 2\pi$ . Оценки  $T^q(x_k)$  могут быть корректно определены только на отрезках сигнала с постоянным знаком частоты, и все рассмотренные ниже методы обработки одномерных сигналов справедливы только для таких сигналов.

Предлагается следующий способ вычисления локального периода одномерного сигнала. На нулевом шаге обработки задается начальное приближение локального периода  $T^0(x_c) = T_{\min}$ , соответствующее максимальной локальной частоте сигнала. На каждом последующем  $q$ -ом шаге итерационной обработки производится вычисление оценок  $T^q(x_c)$

локального периода по значениям сигнала и значениям оценки локального периода  $T^{q-1}(x_k)$  на предыдущем шаге обработки. Сходимость оценки  $T^q(x_c)$  к реальному значению  $T(x_c)$  локального периода обеспечивается локальной периодичностью сигнала, то есть малой разностью значений сигнала для точек с разностью фаз  $\Delta\varphi(x_i, x_j) = 2\pi$ .

Для каждой точки сигнала  $x_c$  определяется  $M \geq 11$  точек с координатами  $x(m)$ , соответствующими различным предполагаемым фазовым отклонениям от  $\varphi(x_c)$ ,

$$x(m) : \Delta\varphi(x_c, \mu, m) = \varphi(x(m)) - \varphi(x_c) = \text{signf } \mu[-\pi + 2\pi(m-1)/(M-1)], \quad (2.2)$$

$m = 1, \dots, M$ ,  $x([M/2] + 1) = x_c$ ,  $\mu > 1$  – коэффициент итерационной устойчивости. Предполагаемая максимальная разность фаз для построенного набора точек составляет  $|\Delta\varphi(x(1), x(M))| = 2\pi\mu$ , но достигается лишь при получении корректной оценки локального периода  $T^{q-1}(x_k) \approx T(x_k)$ . Координаты точек с предполагаемыми фазовыми отклонениями вычисляются по известным значениям локального периода  $T^{q-1}(x_k)$  на предыдущем шаге итерационной обработки,

$$x(m) = x(m, \mu) = x_c + r(n(m), m, \mu), \quad (2.3)$$

$$r(n1, m, \mu) = \text{sign}(m - (M + 1)/2) \sum_{i=0}^{n1-1} \frac{\mu \Delta x T^{q-1}(x_c + r(i, m, \mu))}{M - 1}, \quad (2.4)$$

где  $r1(0, m, \mu) = 0$ ,  $n(m) = |m - (M + 1)/2|$  – формула пересчета номеров точек для рекурсивного вычисления смещения координат,  $\text{sign}(\cdot)$  – функция, возвращающая знак выражения (-1 или 1).

При этом для определения значений локального шага полос в точках с произвольными координатами следует воспользоваться формулой, позволяющей определить значение любой медленно изменяющейся дискретизированной функции  $I(x_k)$  с шагом дискретизации  $\Delta x$  в точке с произвольной координатой  $y$ ,

$$I(y) = [I(\text{int}[y/\Delta x]\Delta x)(\text{int}[y/\Delta x]\Delta x + \Delta x - y) + I(\text{int}[y/\Delta x]\Delta x + \Delta x)(y - \text{int}[y/\Delta x]\Delta x)]/\Delta x, \quad (2.5)$$

где  $\text{int}[\cdot]$  – функция, возвращающая целую часть числа. До вычисления значений  $T^{q-1}(x_k) \approx T(x_k)$ , координаты точек  $x(m)$  не соответствуют координатам точек с заданными фазовыми отклонениями.

По полученному набору точек вычисляются оценки амплитуды сигнала

$$A^q(x_c) = 0.5[\max_{m=1, \dots, M} (\xi(x(m))) - \min_{m=1, \dots, M} (\xi(x(m)))], \quad (2.6)$$

и модулей приращений сигнала,

$$D^q(x_c) = \sum_{m=2}^M |\xi(x(m)) - \xi(x(m-1))|, \quad (2.7)$$

при вычислении значений сигнала для произвольных координат, используется формула (2.5). Значения локального периода  $T^q(x_c)$  в точке  $x_c$  на  $q$ -ом шаге обработки определяются по следующей формуле:

$$T^q(x_c) = (1 - \mu_1)T^{q-1}(x_c) + \mu_1 \max(T_{\min}; \mu T^{q-1}(x_c) 4A^q(x_c)/D^q(x_c)), \quad (2.8)$$

где коэффициент  $\mu_1 \in [0, 1]$  определяет скорость возрастания оценки локального периода и характер сходимости при значениях, близких к  $T(x_c)$ . Так как значения производных сигнала зависят от фазы, точное значение локального периода  $T(x_c)$  для всех точек  $x_c$  сигнала устанавливается лишь при значениях коэффициента  $\mu$  кратных 0.5. Полученное отношение  $4A^q(x_c)/D^q(x_c)$  принимает значение, примерно равное единице, если  $\mu T^{q-1}(x_c) \approx T(x_c)$ , значение меньше единицы, если  $\mu T^{q-1}(x_c) > T(x_c)$  и значение в диапазоне  $[1, 2]$ , если  $\mu T^{q-1}(x_c) < T(x_c)$ . В любом случае формула (2.8) при значениях коэффициента  $\mu \in (1, +\infty)$  обеспечивает сходимость оценки  $T^q(x_c)$  от  $T_{\min}$  к истинному значению локального периода  $T(x_c)$ .

Точность определения оценки локального периода  $T(x_c)$  в каждой точке  $x_c$  сигнала зависит от изменений фона и амплитуды сигнала на отрезке  $(y_1, y_2)$ , границы которого определяются максимальными разностями фаз  $|\Delta\varphi(y_1, x_c)| = |\varphi(x_c) - \varphi(y_1)| = \pi\mu$  и  $|\Delta\varphi(x_c, y_2)| = |\varphi(y_2) - \varphi(x_c)| = \pi\mu$ . Коэффициент  $\mu$  определяет размер области вычисления локального периода и обычно выбирается в пределах  $\mu \in (1, 3]$ .

При  $\mu T^{q-1}(x_c) \leq 0.5T(x_c)$  значение  $T^q(x_c)$  зависит от производной идеального сигнала в окрестности точки  $x_c$ . В экстремумах сигнала, где производная близка к нулю,  $4A^q(x_c)/D^q(x_c) \approx 1$ , в максимумах функции модуля производной сигнала оценка периода возрастает в два раза быстрее,  $4A^q(x_c)/D^q(x_c) \approx 2$ . Таким образом, сходимость  $T^q(x_c)$  к  $T(x_c)$  можно ускорить и без увеличения коэффициента  $\mu$ , влияющего на точность.

Пусть для всех точек сигнала  $x_i$  по формуле (2.8) вычислены значения  $T^q(x_i)$ . Для того, чтобы увеличить значения  $T^q(x_i)$  в окрестностях экстремумов сигнала, нужно для всех точек сигнала  $x_k$  и для

всех  $x_i \in [x_k - \Delta x T^q(x_k)/\chi, x_k + \Delta x T^q(x_k)/\chi]$  переопределить значения  $T^q(x_i)$ , а именно,

$$T^q(x_i) = \max[T^q(x_i), T^q(x_k) - \chi|i - k|], \quad (2.9)$$

где  $\chi \geq \max_{x_k} |T(x_k) - T(x_{k+1})|$  – коэффициент, определяющий максимально допустимое изменение локального периода сигнала в соседних точках. Увеличение оценок  $T^q(x_i)$  за счет ограничения изменения функции локального периода позволяет значительно повысить эффективность обработки зашумленных сигналов.

Другим решением проблемы зависимости оценки периода сигнала от фазы является вычисление усредненных значений периода  $\hat{T}^q(x_i, \hat{T}^q(x_k))$ , как это реализовано при усреднении значений сигнала в (2.11). Подобное усреднение не приводит к искажению оценки локального периода даже для сигналов с быстро изменяющейся частотой.

При обработке сигналов с близкой к нулю частотой, для получения оценок локального периода, в (2.11) следует усреднять значения локальной частоты, а значения локального периода определять по следующей формуле:

$$\hat{T}^q(x_i) = 1 / [\Delta x |\hat{f}(x_i, T^q(x_k))|]. \quad (2.10)$$

Если в исходном сигнале содержатся высокочастотные аддитивные помехи, то точное определение периода возможно только после полного подавления помех. Влияние высокочастотных помех при обработке зашумленных сигналов приводит к значительному возрастанию суммы модулей приращений сигнала  $D^q(x_c)$  и незначительному увеличению оценки амплитуды  $A^q(x_c)$ . Следовательно, оценка  $T^q(x_c)$  становится значительно меньше  $T(x_c)$ . Условием увеличения  $T^q(x_c)$  является хотя бы частичное подавление высокочастотных помех на каждом шаге итерационной обработки.

Предлагается на каждом шаге итерационной обработки подавлять высокочастотные помехи усреднением значений сигнала  $\xi^{q-1}(x_k)$ ,  $\xi^0(x_k) = \xi(x_k)$ , по набору точек (2.2) с предполагаемыми максимальными фазовыми отклонениями  $\Delta\varphi(x_c, \delta, m)$ ,

$$\xi^q(x_c) = \sum_{i=1}^M \xi^{q-1}(x(m, \delta)) g(m) / \sum_{i=1}^M g(m), \quad (2.11)$$

где  $g(m) = (M + 1) / 2 - |m - (M + 1) / 2|$  является весовой функцией, а в формулы (2.6), (2.7) подставлять значения  $\xi^{q-1}(x(m))$ . Коэффициент

$\delta \in (0, 0.5]$  задает степень подавления высокочастотных помех и влияет на уменьшение амплитуды выходного сигнала.

По мере подавления высокочастотных помех оценка периода  $T^q(x_c)$  увеличивается от  $T_{\min}$  до  $T(x_c)$ . Соответственно, приблизительный размер области фильтрации изменяется от  $\delta T_{\min}$  до  $\delta T(x_c)$ . Так как для построенного набора точек  $\sum_{i=1}^M \Delta\phi(x_c, x(m, \delta))g(m) \approx 0$ , то взвешенное усреднение (2.11) сигнала (2.1) не приводит к значительному смещению значений фазы. Изменяется только амплитуда сигнала.

На рис. 2.1-2.4 показаны результаты компьютерного моделирования рассмотренного метода подавления помех, основанного на определении локального периода сигнала.

На рис. 2.1 приведены идеальный сигнал с изменяющимися частотой и фоном, сигнал с равномерным шумом и сигнал с импульсными помехами (импульсные помехи в интерференционных сигналах обычно связаны с повреждениями поверхности исследуемого объекта или дефектами оптической системы). Приведены также результаты оценивания локального шага полос для каждой точки сигнала, при этом графики модельного сигнала и результата оценивания шага полос совмещены, а нулевое значение (положение оси) задано только для значений шага полос.

Оценка локального периода идеального сигнала рис. 2.1, *a* построена при  $\mu = 1$  и  $\chi = 0.25$ .

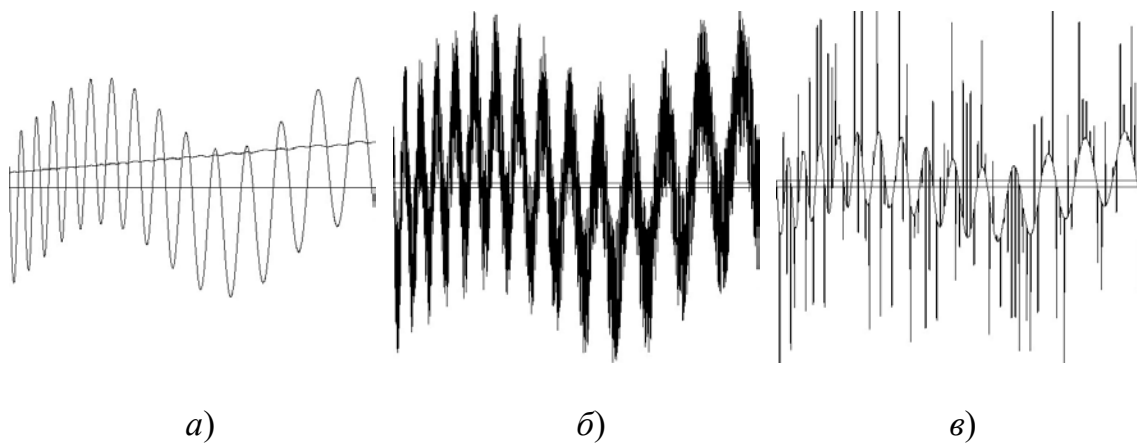


Рис. 2.1. Идеальный сигнал (*a*), сигнал с аддитивным шумом (*б*), сигнал с импульсными помехами (*в*)

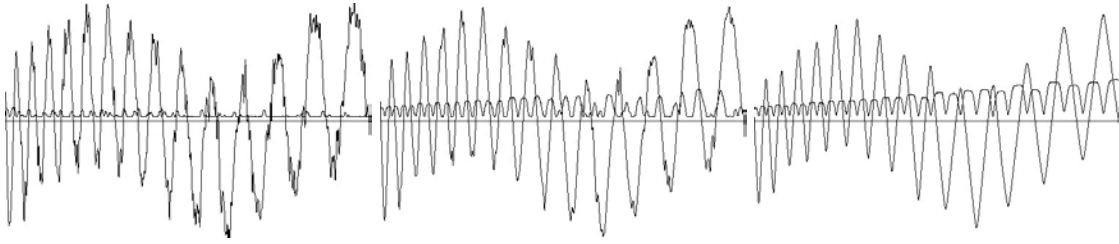


Рис. 2.2. Оценки сигнала и его локального периода после 5, 10 и 25 шагов итерационной обработки зашумленного сигнала (рис. 2.1, б) при значениях параметров  $\mu = 1$ ,  $\chi = 8$ ,  $\delta = 0.25$

На рис. 2.2 иллюстрируются результаты обработки зашумленного сигнала, рис. 2.1, б, с параметрами, при которых оценка периода  $T^q(x_c)$  в окрестностях экстремумов сигнала равна начальному приближению периода  $T_{\min}$ , и не зависит от  $q$ . При таких параметрах количество шагов итерационной обработки, гарантирующее подавление помех, определяется начальным приближением периода  $T_{\min}$ . Снижение амплитуды сигнала на одном шаге обработки определяется отношением  $T_{\min} / T(x_c)$ . Недостатками подобного подхода являются большое число шагов обработки и фазовые искажения выходного сигнала.

На рис. 2.3 приведены результаты обработки зашумленного сигнала (рис. 2.1, б) с параметрами, позволяющими получить достаточно точную оценку локального периода за 9 шагов обработки. Из рисунка видно, что дальнейшая обработка приводит к одинаковому снижению амплитуды для всех точек сигнала, независимо от локальной частоты. Но снижение амплитуды при наличии фоновой составляющей влечет завышение оценки локального периода, и дальнейшая обработка приведет к полному подавлению сигнала и потере информации о фазе. Усредненная погрешность вычисления оценки локального периода приведенного на рисунке сигнала для 9-го шага обработки составила 2%, а для 20-го шага обработки – 6%. Увеличение погрешности связано со снижением амплитуды сигнала при наличии значительной фоновой составляющей.

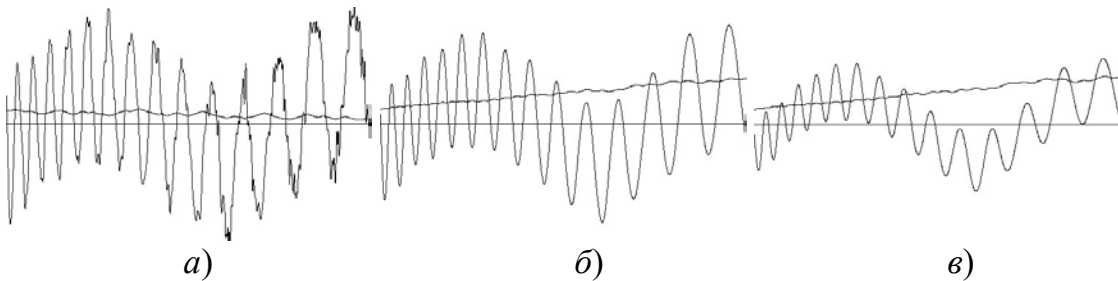


Рис. 2.3. Оценки сигнала и его локального периода после 4, 9 и 20 шагов итерационной обработки зашумленного сигнала (рис. 2.1, б) при значениях параметров  $\mu = 1$ ,  $\chi = 0.3$ ,  $\delta = 0.25$

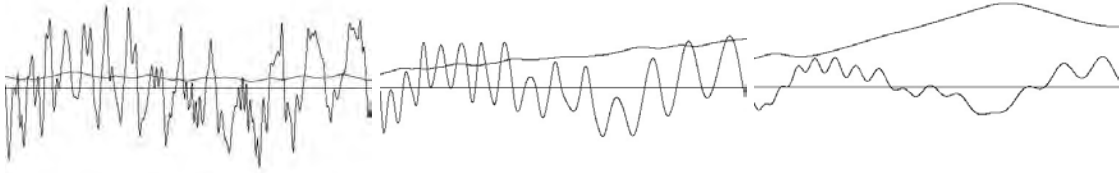


Рис. 2.4. Оценки сигнала и его локального периода после 3, 7 и 15 шагов итерационной обработки сигнала с импульсными помехами (рис. 2.1, в) при значениях параметров  $\mu = 1$ ,  $\chi = 0.3$ ,  $\delta = 0.35$

Основным недостатком рассмотренного метода подавления помех является снижение амплитуды сигнала на каждом шаге обработки. Метод характеризуется недостаточной помехоустойчивостью при подавлении импульсных помех (рис. 2.1, в) как это видно из рис. 2.4. Рассмотренный в последующем разделе метод нелинейной фильтрации позволяет преодолеть указанные недостатки.

## 2.2. Адаптивная нелинейная фильтрация с определением локальной частоты сигнала

Недостатком рассмотренного выше метода подавления помех является снижение амплитуды сигнала на каждом шаге обработки. При большом количестве шагов обработки амплитуда сигнала уменьшается значительно (рис. 1.4), и влияние изменяющегося фона сигнала может привести к завышению оценки локального периода сигнала, что влечет еще большее снижение амплитуды сигнала.

Для сохранения амплитуды сигнала при подавлении полос можно воспользоваться тем свойством, что сигнал (2.1) является локально-выпуклой функцией на отрезках с разностями фаз  $|\Delta\varphi(y_1, y_2)| < 2\pi\delta$ ,  $\delta \in (0, 0.25]$ . Повысить эффективность подавления помех и обеспечить сохранение амплитуды сигнала можно за счет уменьшения относительного веса части минимальных и максимальных значений сигнала. Уменьшение относительного веса более отдаленных от среднего значений сигнала позволяет увеличить амплитуду выходного сигнала.

Пусть в процессе обработки сигнала для некоторой точки  $x_c$  получен набор точек (2.2) с предполагаемыми максимальными отклонениями фазы  $\Delta\varphi(x_c, \delta, m)$ , известны значения  $\xi^{q-1}(x(m, \delta))$  и  $g(m)$ .

Пары  $(\xi^{q-1}(x(m)), g(m))$  сортируются по возрастанию значений сигнала. Отсортированные значения сигнала обозначаются  $\xi_1^{q-1}(i)$ , соответствующие значения весовой функции –  $g_1(i)$ ,  $i = 1, \dots, M$ .



Вычисляются средние значения сигнала по полному набору значений и по частичным наборам для минимальных и максимальных значений сигнала,

$$M_0 = \sum_{i=1}^M \xi_1^{q-1}(i) g_1(i) / S,$$

$$M_{min} = \left[ \xi_1^{q-1}(i_{min} + 1)(S_0 - S_{min}(i_{min})) + \sum_{i=1}^{i_{min}} \xi_1^{q-1}(i) g_1(i) \right] / S_0,$$

$$M_{max} = \left[ \xi_1^{q-1}(i_{max} - 1)(S_0 - S_{max}(i_{max})) + \sum_{i=i_{max}}^M \xi_1^{q-1}(i) g_1(i) \right] / S_0, \quad (2.12)$$

где  $S_0 = 0.5\varepsilon_0 S$ ,  $S = \sum_{i=1}^M g_1(i)$ , коэффициент  $\varepsilon_0 \in (0, 1)$  определяет сумму весовых функций для вычисления асимметричности сигнала,  $i_{min} = \max(i): S_{min}(i) < S_0$ ,  $i_{max} = \min(i): S_{max}(i) < S_0$ ,  $S_{min}(k) = \sum_{i=1}^k g_1(i)$ ,

$S_{max}(k) = \sum_{i=k}^M g_1(i)$ . Суммы изменяемых весовых функций для минимальных

и максимальных значений сигнала определяются следующими формулами:

$$S_{min0} = \varepsilon S (M_0 - M_{min})^\eta / ((M_{max} - M_0)^\eta + (M_0 - M_{min})^\eta),$$

$$S_{max0} = \varepsilon S (M_{max} - M_0)^\eta / ((M_{max} - M_0)^\eta + (M_0 - M_{min})^\eta), \quad (2.13)$$

где коэффициент  $\varepsilon \in [0, 1)$  задает общую сумму изменяемых весовых функций, коэффициент  $\eta \in [0, +\infty)$  влияет на нелинейность и позволяет регулировать отношение сумм уменьшаемых весовых функций для минимальных и максимальных значений сигнала в зависимости от асимметричности сигнала на отрезке. После этого по полученным значениям  $S_{min0}$  и  $S_{max0}$  вычисляются новые пороговые значения  $i_{min} = \max(i): S_{min}(i) < S_{min0}$ ,  $i_{max} = \min(i): S_{max}(i) < S_{max0}$ , определяющие границы уменьшаемых весовых функций. Весовая функция переопределяется следующим образом ( $\nu \in [0, \infty)$ ):

$$\left\{ \begin{array}{l} g_2(i) = g_1(i) [(S_{max}(i) - g_1(i) / 2) / S_{max0}]^\nu, \quad i \in [i_{max}, M]; \\ g_2(i) = g_1(i) - [g_1(i) + S_{max0} - S_{max}(i)] \times \\ \quad \times (1 - [(S_{max}(i) - g_1(i) + S_{max0}) / (2S_{max0})]^\nu), \quad i = i_{max} - 1; \\ g_2(i) = g_1(i), \quad i \in (i_{max} - 1, i_{min} + 1); \\ g_2(i) = g_1(i) - [g_1(i) + S_{min0} - S_{min}(i)] \times \\ \quad \times (1 - [(S_{min}(i) - g_1(i) + S_{min0}) / (2S_{min0})]^\nu), \quad i = i_{min} + 1; \\ g_2(i) = g_1(i) [(S_{min}(i) - g_1(i) / 2) / S_{min0}]^\nu, \quad i \in [1, i_{min}]. \end{array} \right. \quad (2.14)$$

Коэффициенты  $\nu \in [0; +\infty)$  и  $\eta \in [0; +\infty)$  влияют на изменение формы и амплитуду выходного сигнала. При  $\nu > 10$  практически для всех  $i \in [1, i_{min})$  и  $i \in (i_{max}, M]$   $g_2(i) \approx 0$ , и соответствующие значения  $\xi_1^{q-1}(i)$  не оказывают влияния на выходной сигнал, что приводит к искажениям выходного сигнала. Для уменьшения искажений сигнала рекомендуется выбирать  $\nu \approx 1$ , это позволяет учитывать положение подавляемых значений сигнала  $\xi_1^{q-1}(i)$  на оси  $x$ . С учетом новых значений весовой функции  $g_2(i)$  вычисляется очередная оценка сигнала,

$$\xi^q(x_c) = \frac{\sum_{i=1}^M \xi_1^{q-1}(i) g_2(i)}{\sum_{i=1}^M g_2(i)}. \quad (2.15)$$

При многошаговой обработке происходит изменение формы сигнала, так как уменьшается относительный вес значений сигнала, более удаленных от экстремумов. Изменение формы сигнала приводит к увеличению асимметрии значений сигнала для построенных наборов точек и, согласно (2.13), к уменьшению снижения амплитуды сигнала на каждом шаге обработки, как это видно из рис. 2.3-2.7. Следует учитывать, что нелинейное искажение формы сигнала является причиной незначительного завышения оценки локального периода.

Как и в методе (2.11), коэффициент  $\delta$  одновременно определяет соотношение между степенью подавления высокочастотных помех на каждом шаге обработки и сохранением амплитуды сигнала после подавления помех. В случае, когда для размера области фильтрации выполняется неравенство

$$(x(M) - x(1)) \approx \delta T^q(x_c) \Delta x < 0.4 T(x_c) \Delta x,$$

или

$$T^q(x_c) < T(x_c) 0.4 / \delta, \quad (2.16)$$

остальные параметры данного метода  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon$ ,  $\eta$ ,  $\nu$ , могут быть настроены так, что амплитуда сигнала после подавления помех и деформации сигнала не будет изменяться. Нелинейная деформация сигнала позволяет с помощью коэффициента  $\delta$  задать допустимые значения оценки локального периода (2.16), при которой сигнал перестанет изменяться после подавления помех. Следует учитывать, что при таком режиме обработки, в отличие от метода линейного усреднения (2.11), при занижении коэффициента  $\delta$  из-за локальных погрешностей вычисления оценки  $T^q(x_c)$ , подавление помех может также прекратиться.

Таким образом, можно сохранить амплитуду сигнала даже при значительных погрешностях вычисления локального периода. Например, при  $\delta = 0.25$ , параметры метода  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon$ ,  $\eta$ ,  $\nu$ , могут быть настроены так, что после подавления помех сигнал перестанет изменяться даже при завышении оценки локального периода в полтора раза,  $T^q(x_c) / T(x_c) = 1.5$ .

Применение нелинейного метода позволяет значительно повысить эффективность обработки неравномерно зашумленных сигналов и определить в качестве критерия окончания обработки прекращение изменения сигнала на очередном шаге обработки.

Метод нелинейной фильтрации позволяет эффективно подавлять импульсные помехи за счет уменьшения относительного веса значений сигнала, более удаленных от среднего. Эффективность подавления импульсных помех, рис. 2.1, в, с помощью рассмотренного метода нелинейной фильтрации можно оценить при сравнении рис. 2.4 и рис. 2.7.

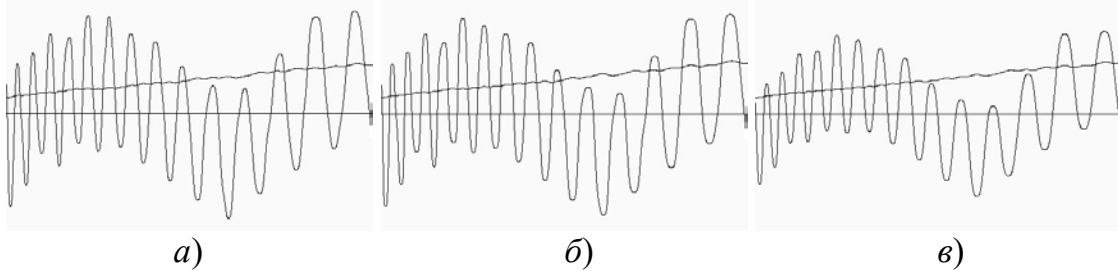


Рис. 2.5. Оценки сигнала и его локального периода после 4, 9 и 20 шагов итерационной обработки зашумленного сигнала, рис. 1.1, б, при значениях параметров  $\mu = 1$ ,  $\chi = 0.3$ ,  $\delta = 0.25$ ,  $\varepsilon_0 = 0.5$ ,  $\varepsilon = 0.5$ ,  $\eta = 1$ ,  $\nu = 3$

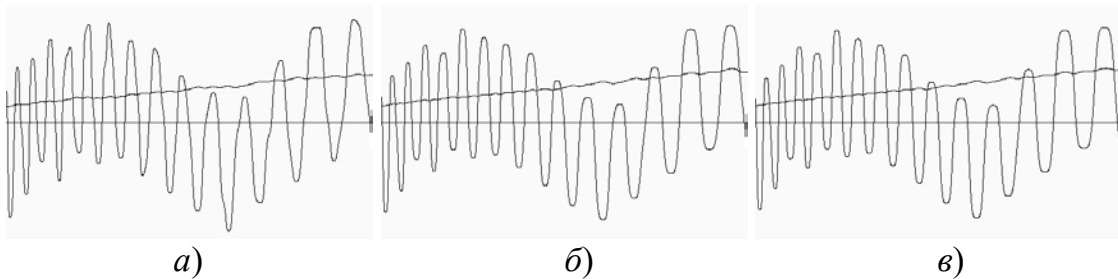


Рис. 2.6. Оценки сигнала и его локального периода после 4, 9 и 20 шагов итерационной обработки зашумленного сигнала, рис. 1.1, б, при значениях параметров  $\mu = 1$ ,  $\chi = 0.3$ ,  $\delta = 0.25$ ,  $\varepsilon_0 = 0.5$ ,  $\varepsilon = 0.9$ ,  $\eta = 1$ ,  $\nu = 3$

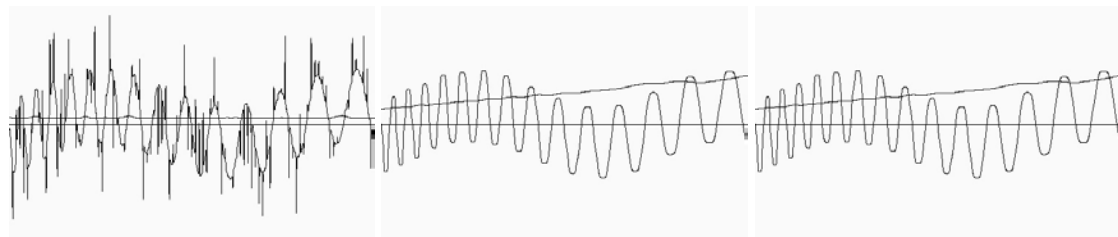


Рис. 2.7. Оценки сигнала и его локального периода после 1, 4 и 15 шагов итерационной обработки сигнала с импульсными помехами, рис. 1.1, в, при значениях параметров  $\mu = 1$ ,  $\chi = 0.3$ ,  $\delta = 0.3$ ,  $\varepsilon_0 = 0.5$ ,  $\varepsilon = 0.9$ ,  $\eta = 1$ ,  $\nu = 3$

В отличие от предложенного ранее метода фильтрации на основе модификации локальных гистограмм [49-54], разработанный метод нелинейной фильтрации не требует квантованности значений сигнала. Это позволяет избежать погрешностей округления при многошаговой

обработке сигнала. Недостатком разработанного метода является необходимость сортировки значений сигнала, так как это довольно медленная операция. В предельном случае ( $g(m) = \text{const}$ ,  $v > 10$ ,  $\eta = 0$  и  $\varepsilon = 1$ ) разработанный фильтр аналогичен адаптивному медианному фильтру.

### 2.3. Адаптивная нелинейная фильтрация с определением локальной частоты сигнала при исключении фоновой составляющей

Известно, что обработка картин полос с малой видностью представляет сложную задачу. Рассмотренный ранее нелинейный метод позволяет лишь сохранить амплитуду сигнала при начальном соотношении производных сигнала и фона, достаточном для получения корректных оценок локального периода. В случае обработки сигнала со значительно изменяющейся фоновой составляющей, оценки локального периода, вычисленные по формулам (2.6) - (2.8) при фиксированном коэффициенте  $\mu = 1.5$ , могут значительно превышать истинное значение периода сигнала, и условие сохранения амплитуды сигнала (2.16) может быть выполнено лишь за счет уменьшения коэффициента  $\delta$ . Но при этом из-за нелинейности метода невозможно гарантировать полное подавление помех по всему полю.

Решение проблемы достигается исключением фоновой составляющей при вычислении локального периода сигнала в (2.6) – (2.8) на каждом шаге обработки, а именно:

$$A^q(x_c) = 0.5 \left[ \max_{m=1, \dots, M} (\xi(x(m)) - B^q(x(m))) - \min_{m=1, \dots, M} (\xi(x(m)) - B^q(x(m))) \right], \quad (2.17)$$

$$D^q(x_c) = \sum_{m=2}^M \left| \xi(x(m)) - B^q(x(m)) - \xi(x(m-1)) + B^q(x(m-1)) \right|, \quad (2.18)$$

при этом оценки фона  $B^q(x_k)$  вычисляются методом усреднения (2.11) значений сигнала  $\xi^{q-1}(x_k)$  на предыдущем шаге обработки с учетом оценок локального периода  $T^{q-1}(x_k)$  на предыдущем шаге обработки с весовой функцией  $g(m) = \text{const}$  по набору точек с максимальным фазовым отклонением  $|\Delta\varphi(x_c, 1, m)| = \pi$ .

При применении метода оценки локального периода на основе устранения фоновой составляющей (2.17), (2.18), количество шагов обработки, необходимое для полного локального подавления помех сильно зависит от локальной частоты сигнала. Метод линейного усреднения (2.11) при этом неэффективен, так на первых шагах обработки происходит полное подавление помех для участков сигнала с большей частотой, и дальнейшая обработка приводит к значительному снижению амплитуды сигнала на этих участках. Из-за того, что точность вычисления оценок

локального периода сигнала также зависит от изменений амплитуды сигнала, такая обработка может привести к потере информации о фазе. Локальное снижение амплитуды сигнала из-за помех может привести к завышению оценок локального периода сигнала полос и, соответственно, к большему снижению амплитуды. Значительное локальное снижение амплитуды видно при сравнении сигналов, приведенных на рис. 2.11 б, в.

В то же время, параметры нелинейного метода (2.15) могут быть настроены так, что оценки локального периода при всех погрешностях вычисления будут соответствовать условию (2.16), и обработка сигнала после подавления помех не приведет к снижению амплитуды. При предположении, что фон значительно отличается от сигнала по частоте, можно ускорить подавление помех за счет дополнительных проходов усреднения фона перед вычислением локального периода сигнала.

Исключение фоновой составляющей  $B^q(x_k)$  и на этапе подавления помех (2.12) - (2.15) позволяет уменьшить влияние нелинейных искажений сигнала при восстановлении фазы. Очередная оценка сигнала при этом определяется как сумма фоновой составляющей  $B^q(x_k)$  и значения, вычисленного по формуле (2.15). При такой обработке нелинейная деформация сигнала происходит относительно фоновой составляющей  $B^q(x_k)$ , а не вдоль оси  $x_k$ .

#### 2.4. Выравнивание фона и амплитуды сигнала

Как уже было отмечено ранее, изменение фона и амплитуды сигнала приводит к погрешности вычисления локального периода. Исключить влияние этих параметров можно за счет выравнивания фона и амплитуды сигнала. Выравнивание амплитуды и фона сигнала, не приводящее к существенным фазовым погрешностям, может быть произведено после предварительного подавления помех даже при приближительных оценках шага полос  $T^q(x_c)$ ,

$$\xi_{BA}(x_c) = (\xi^q(x_c) - B(x_c))A_{\text{const}} / A(x_c), \quad (2.19)$$

при этом фоновая составляющая  $B(x_k)$  вычисляется усреднением в (2.11) значений сигнала с весовой функцией  $g(m) = \text{const}$  по набору точек с максимальным фазовым отклонением  $|\Delta\varphi(x_c, 1, m)| = \pi$ , а амплитуда сигнала  $A(x_c)$  определяется следующей формулой,

$$A(x_c) = \max_{m=1, \dots, M} (|\xi(x(m, 0.75)) - B(x(m, 0.75))|). \quad (2.20)$$

При необходимости верхняя и нижняя огибающая сигнала могут быть получены независимо друг от друга. Дополнительное усреднение оценок амплитуды сигнала также позволяет снизить влияние помех.

Полное выравнивание фона и амплитуды сигнала за один проход

обработки из-за погрешностей вычисления локального периода, фона и амплитуды часто оказывается невозможным, однако повторное выравнивание сигнала после определения очередных оценок локального периода позволяет разрешить данную проблему.

## 2.5. Восстановление фазы сигнала

Приблизительные оценки локального периода сигнала, полученные в процессе предварительного подавления помех позволяют восстановить оценки фона  $B(x_k)$  и амплитуды  $A(x_k)$  сигнала, сформировать для каждой точки  $x_c$  сигнала набор точек  $x(m, \mu_\varphi)$  с известным максимальным фазовым отклонением  $|\Delta\varphi(x_c, \mu_\varphi, m)| = \pi\mu_\varphi$ ,  $m = 1, \dots, M$ , и построить модельный сигнал

$$\begin{aligned} \widehat{\xi}(m, \varphi_r(x_c)) = B(x(m)) + A(x(m))\cos(\varphi_r(i, j) + \\ + \text{sign}(m - (M + 1)/2)\Delta\varphi(x(m), x_c)), \end{aligned} \quad (2.21)$$

зависящий от значения фазы  $\varphi_r(x_c)$  в исходной точке. Параметр  $\mu_\varphi$  определяет баланс точности и помехоустойчивости восстановления фазы. В большинстве случаев рекомендуется выбирать значение  $\mu_\varphi = 1$ .

Таким образом, значение приведенной фазы  $\varphi(x_c)$  в рассматриваемой точке может быть восстановлено с заданной точностью  $\Delta\varphi$  по критерию минимума среднего квадратичного отклонения между реальным и модельным сигналами как

$$\varphi(x_c) = \varphi_r(x_c) = r\Delta\varphi \in [0, 2\pi):$$

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M [|\widehat{\xi}(m, \varphi_r(x_c)) - \xi^q(x(m))| / A(x(m))]^2 = \\ = \min_{v=0, \dots, \text{int}[2\pi/\Delta\varphi]} \sum_{m=1}^M [|\widehat{\xi}(m, v\Delta\varphi) - \xi^q(x(m))| / A(x(m))]^2. \end{aligned} \quad (2.22)$$

После вычисления приведенной фазы с достаточной точностью возможно развертывание полной (непрерывной) фазы  $\varphi_p(x_k)$ ,

$$\varphi_p(x_k) = \begin{cases} \text{signf}(x_k) \varphi(x_k) + 2\pi n(\varphi_p(x_{k-1})) & k > i \\ \varphi_p(x_i) & k = i, \\ \text{signf}(x_k) \varphi(x_k) + 2\pi n(\varphi_p(x_{k+1})) & k < i \end{cases} \quad (2.23)$$

при этом в некоторой точке  $x_i$  должно быть известно значение полной (непрерывной) фазы  $\varphi_p(x_i)$  и должен быть определен знак частоты  $\text{signf}(x_k)$ .

## Глава 3. ОБРАБОТКА ДВУМЕРНЫХ КАРТИН ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС

### 3.1 Метод устранения помех и дефектов картин интерференционных полос

В работах [49-54] рассмотрен метод подавления помех, основанный на независимой обработке одномерных сигналов в различных сечениях картины полос. Проведенные исследования показали, что такая обработка неэффективна для случаев сильно искривленных полос. Разработан новый метод подавления помех интерференционных полос, в котором оценка сигнала полос определяется значениями сигнала внутри двумерной области, формируемой адаптивно для каждой точки по локальным характеристикам полос. Новый метод позволяет эффективно подавлять помехи в картинах полос со сложной топологией, обработка которых исходным методом приводила к заметной потере контраста на участках со значительными искривлениями полос.

Разработанный метод подавления помех многошаговый. На каждом шаге обработки в каждой точке картины полос определяются значения локального направления, локального шага полос, формируется двумерная область фильтрации и по значениям сигнала внутри области с помощью разработанного метода нелинейной фильтрации определяется новая оценка сигнала полос. Определение локальных характеристик полос на каждом шаге обработки позволяет сохранить контраст полос при подавлении помех.

Блок-схема метода приведена на рис. 3.1. На каждом  $q$ -ом шаге обработки,  $q \geq 1$ , новые значения сигнала полос  $\xi^q(i, j)$  определяются по значениям сигнала полос на предыдущем шаге обработки  $\xi^{q-1}(i, j)$  в пределах областей фильтрации, сформированных для каждой точки адаптивно с учетом оценок локального направления полос  $\alpha_f^q(i, j)$  и локального шага полос  $T^q(i, j)$ . Оценки  $\alpha_f^q(i, j)$  и  $T^q(i, j)$  вычисляются по значениям  $\xi^{q-1}(i, j)$  и  $T^{q-1}(i, j)$ , причем  $\xi^0(i, j) = \xi(i, j)$ ,  $T^0(i, j) = T_{min}$ , где  $\xi(i, j)$  – исходный сигнал полос,  $T_{min}$  – минимальное значение шага полос в обрабатываемой интерферограмме. Адаптивное формирование области фильтрации для каждой точки картины полос позволяет с высокой эффективностью устранять влияние различных помех, в том числе близких по частоте с сигналом полос.

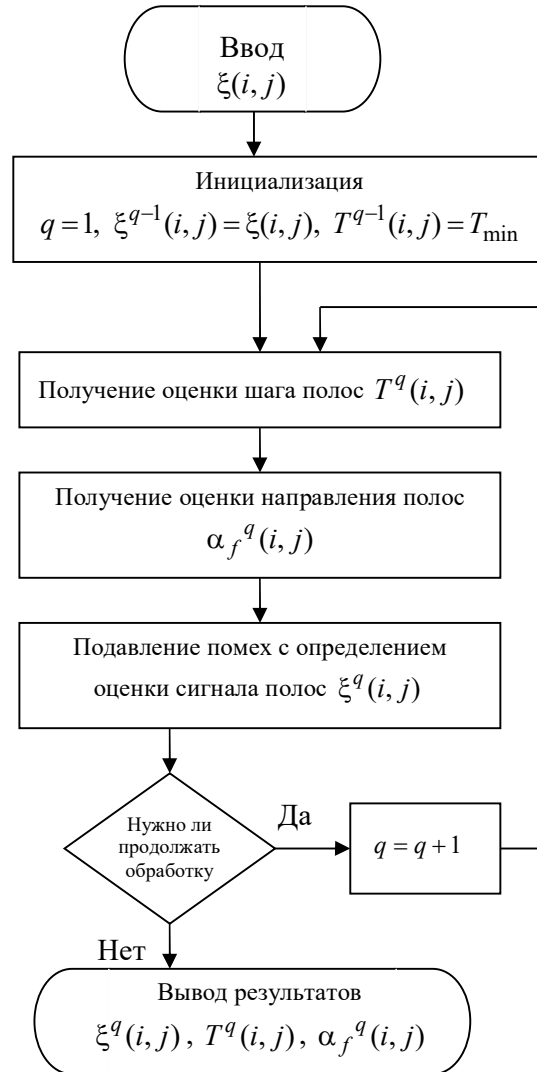


Рис. 3.1. Блок-схема метода подавления помех и определения характеристик картин полос

### 3.2 Определение локального шага полос

В отличие от случая обработки одномерного сигнала, при обработке двумерных интерферограмм приходится учитывать изменения локального направления полос  $\alpha_f^q(i, j)$ . При наличии помех в картине полос точное определение локального направления полос, и соответственно, направления максимального изменения фазы, затруднительно. Таким образом, двумерная задача определения шага полос не может быть эффективно сведена к одномерной путем определения локального периода одномерного сигнала в сечении картины полос, перпендикулярном локальному направлению полос. Предлагается вычислять очередную оценку шага полос не по отрезку, а по адаптивному замкнутому контуру,



рис. 3.2, что позволяет снять проблему неточности вычисления направлений.

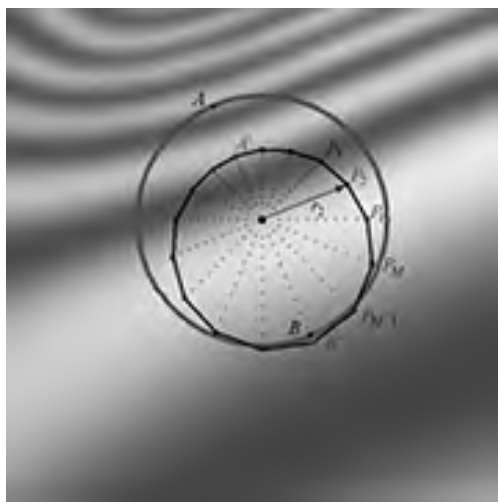


Рис. 3.2. Вычисление оценки шага полос по замкнутому контуру, не содержащему точек изменения знака частоты

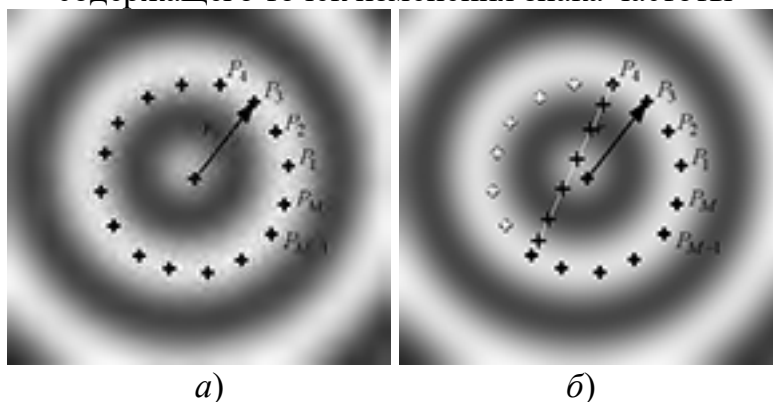


Рис. 3.3. Вычисление оценки шага полос. Исходный контур (а), и контур после исключения точек изменения знака фазы (б)

Для всей картины полос перед началом обработки в соответствии с блок-схемой, приведенной на рис. 3.1, задается начальное приближение шага полос  $T^0(i, j) = T_{\min}$ .

Определение шага полос  $T^q(i, j)$  на каждом шаге  $q$  итерационной обработки осуществляется следующим образом. Для каждой точки  $(i, j)$  выбираются  $M \geq 8$  направлений  $\alpha(m) = 2\pi m / M$ ,  $m = 1, \dots, M$ , и в каждом направлении определяются координаты точки  $P(m)$  с предполагаемой максимальной разностью фаз  $|\Delta\phi(P(m), (i, j))| = \mu\pi$ , как это показано на рис. 3.2, с учетом предположений, что выбранное направление совпадает с направлением максимального увеличения фазы, и что оценка шага полос позволяет адекватно оценить разность фаз,  $\mu > 1$  – коэффициент итерационной устойчивости. Точки или области изменения знака фазы,

см. рис. 3.2, *а*, исключаются из контура, см. рис. 3.2, *б*. Значения предполагаемой фазой разности определяются также, как и для одномерного сигнала (2.3, 2.4), по известным значениям  $T^{q-1}(i, j)$ .

Координаты точек вычисляются по следующим формулам,

$$P(m) = P(m, N) = P(i, j, m, N) \Leftrightarrow (x(i, m, r(m, N)), y(j, m, r(m, N))) \\ = (i + r(m, N) \cos \alpha(m), j + r(m, N) \sin \alpha(m)), \quad (3.1)$$

$$r(m, n) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{0.5 \mu T^{q-1}(x(i, m, r(m, k)), y(j, m, r(m, k)))}{N}, \quad (3.2)$$

где коэффициент  $N$  определяет количество промежуточных точек уточнения шага полос.

Аналогично одномерному случаю (2.6-2.8), вычисляются значения амплитуды,

$$A^q(i, j) = 0.5 \left[ \max_{m=1, \dots, M} (\xi^{q-1}(P(m))) - \min_{m=1, \dots, M} (\xi^{q-1}(P(m))) \right], \quad (3.3)$$

и оценки модулей приращений сигнала на данном контуре,

$$D^q(i, j) = 0.5 \sum_{m=1}^M \left| \xi^{q-1}(P(m)) - \xi^{q-1}(P(m-1)) \right|, \quad P(0) = P(M), \quad (3.4)$$

при этом следует отметить, что значение  $D^q(i, j)$ , вычисленное по замкнутому контуру, в два раза больше, чем вычисленное по отрезку при определении локального периода одномерного сигнала.

Оценка локального шага полос  $T^q(i, j)$  в точке  $(i, j)$  на  $q$ -ом шаге обработки вычисляется аналогично формуле (2.8),

$$T^q(i, j) = (1 - \mu_1) T^{q-1}(i, j) + \mu_1 \max[T_{\min}; \mu T^{q-1}(i, j) \frac{4A^q(i, j)}{D^q(i, j)}]. \quad (3.5)$$

Влияние высокочастотных помех при обработке зашумленной картины полос приводит к занижению оценки  $T^q(i, j)$  шага полос по сравнению с истинным значением шага полос  $T(i, j)$ , в то же время, низкочастотные помехи, изменения фона и амплитуды сигнала полос приводят к завышению оценки  $T^q(i, j)$ . На рис. 3.4 приведены вычисленные оценки локального периода в виде размеров контуров для зашумленной картины полос на различных этапах подавления помех (см. рис. 3.10).

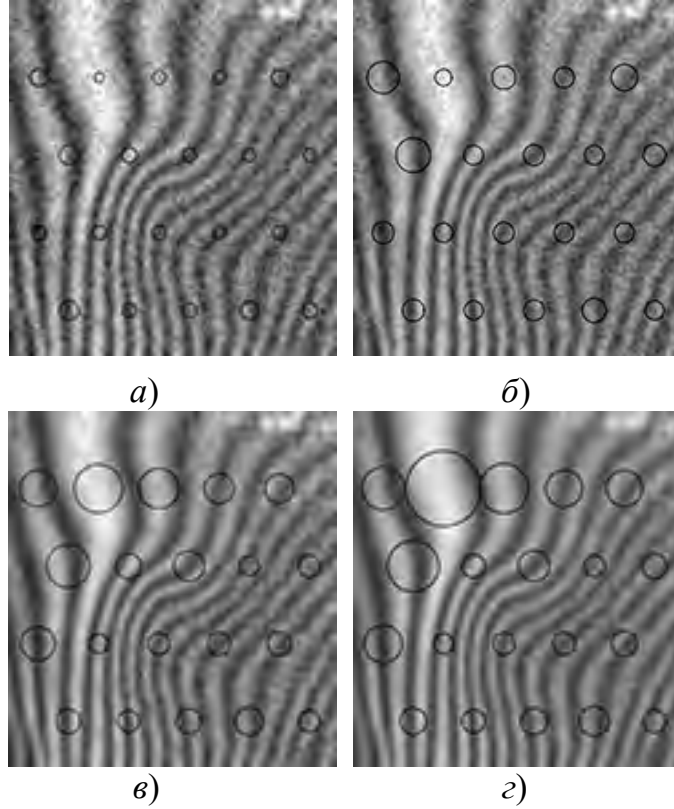


Рис. 3.4. Результаты вычисления шага полос на различных этапах подавления помех

### 3.3 Определение локального направления полос

Для каждой точки  $(i, j)$  картины полос для углов  $\alpha_l = \pi l / L$ ,  $l \in [0, L - 1]$ ,  $L \geq 3$  – количество анализируемых направлений, вычисляются модули производных:

$$d(i, j, l) = 0.5 \left\{ \left| \xi^{q-1}(i + \cos(\alpha_l), j - \sin(\alpha_l)) - \xi^{q-1}(i, j) \right| + \left| \xi^{q-1}(i - \cos(\alpha_l), j + \sin(\alpha_l)) - \xi^{q-1}(i, j) \right| \right\}. \quad (3.6)$$

Шаг квадратной сетки, в узлах которой определены значения двумерного сигнала полос принимается равным единице. Значения сигнала полос  $\xi$  для нецелых значений координат в (3.6) определяются по следующей формуле интерполяцией по четырем соседним точкам с целыми значениями координат,

$$I(x, y) = (\text{int}[x] + 1 - x)(\text{int}[y] + 1 - y)I(\text{int}[x], \text{int}[y]) + (x - \text{int}[x])(\text{int}[y] + 1 - y)I(\text{int}[x + 1], \text{int}[y]) + (\text{int}[x] + 1 - x)(y - \text{int}[y])I(\text{int}[x], \text{int}[y + 1]) + (x - \text{int}[x])(y - \text{int}[y])I(\text{int}[x + 1], \text{int}[y + 1]). \quad (3.7)$$

На рис. 3.4 иллюстрируется пример вычисления модуля производной для некоторого угла  $\alpha_l \in (0, \pi/2)$ .

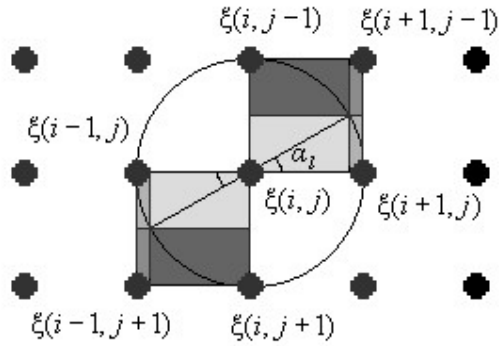
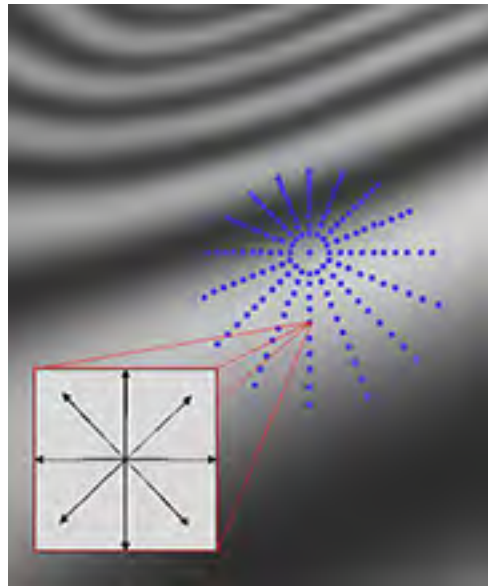


Рис. 3.5. К вычислению модулей производных

Для каждой точки  $(i, j)$  картины полос вычисляются локальные модули производных, см. рис. 3.6,

$$D(i, j, l) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N nT(P(i, j, m, n))d(P(i, j, m, n), l), \quad (3.8)$$

полученные усреднением значений  $d(i, j, l)$  по точкам  $P(i, j, m, n)$  внутри адаптивной области с размерами, зависящими от шага полос. Координаты точек определяются по формулам (3.1, 3.2) с переопределенными значениями  $T_{\min} \leftrightarrow 2R_\alpha$  и  $\mu \leftrightarrow \mu_\alpha$ , отвечающими за минимальное и относительное значения размера области усреднения производных при вычислении локального направления полос. Значения модулей производных в точках с вещественными координатами вычисляются по формуле (3.7).

Рис. 3.6. Набор точек усреднения производных при  $\mu_\alpha = 1$

Локальное направление полос  $\alpha_f^q(i, j) \in [0, \pi)$  определяется как угол, отличающийся на  $\pm \pi/2$  от угла  $\beta$ , для которого сумма модулей проекций (на направление  $\beta$ ) усредненных модулей производных максимальна, т.е.

$$\alpha_f^q(i, j): C[i, j, \alpha_f^q(i, j) \pm \pi/2] = \max_{\beta} C(i, j, \beta), \quad (3.9)$$

где  $C(i, j, \beta)$  – сумма модулей проекций  $D(i, j, l)$  на направление, определяемое углом  $\beta$ ,

$$C(i, j, \beta) = \sum_{0 \leq l < L} |D(i, j, l) \cos(\beta - \alpha_l)|. \quad (3.10)$$

Операция вычисления проекций  $C(i, j, \beta)$  выполняется медленно, и угол  $\beta$ , соответствующий в (2.6) максимуму проекций, можно определить лишь приблизительно, например, с точностью до  $\pm \Delta\alpha_f$ . При количестве рассматриваемых направлений  $L = 16$  коэффициент  $\Delta\alpha_f$ , задающий точность определения локального направления полос, целесообразно выбрать порядка  $\Delta\alpha_f \approx \pi/360$ .

### 3.4 Определение размеров областей фильтрации

Очередная оценка сигнала полос  $\xi^q(i, j)$  определяется по значениям сигнала на предыдущем шаге обработки  $\xi^{q-1}(i_1, j_1)$  в пределах области фильтрации. Форма области фильтрации определяет импульсный отклик фильтра и существенно влияет на выходной сигнал. Выбор в качестве формы области фильтрации эллипса с большой осью, ориентированной вдоль локального направления полос  $\alpha_f^q(i, j)$ , позволяет подавлять помехи без существенного снижения амплитуды сигнала полос.

Размер малой и большой осей эллипса фильтрации, определяется следующими формулами,

$$e_{min}(i, j) = \delta T^q(i, j),$$

$$e_{max}(i, j) = \delta T^q(i, j) \left\{ 1 + (\gamma - 1) [(C_{om}^q(i, j) - 1) / (C_{om0} - 1)]^{\gamma_{nel}} \right\}, \quad (3.11)$$

где коэффициент  $\delta$  определяет размер области фильтрации относительно оценки локального шага полос,

$$C_{om}^q(i, j) = [C(i, j, \pi/2 + \alpha_f^q(i, j)) + C_0] / [C(i, j, \alpha_f^q(i, j)) + C_0], \quad (3.12)$$

$C_0$  – малая константа, обеспечивающая корректность при нулевых производных в окрестности точки  $(i, j)$ ,  $C_{om}^q(i, j) \in [1, 1.585]$ , коэффициент  $C_{om0} \in (1.3, 1.585]$  есть среднее отношение сумм проекций производных  $C_{om}^q(i, j)$  для типичной интерферограммы рассматриваемого класса после

полного подавления помех (коэффициент зависит от степени изменения локального направления полос в интерферограммах рассматриваемого класса), коэффициент  $\gamma \geq 1$  определяет максимальный относительный размер большой оси эллипса, который достигается после подавления помех, коэффициент  $\gamma_{nel} \in [0, +\infty)$  определяет изменение относительного размера большой оси эллипса (множитель в фигурных скобках) в пределах  $[1, \gamma]$  в зависимости от степени подавления помех. С помощью коэффициента  $\delta$  можно варьировать количество шагов обработки, необходимое для подавления помех. Коэффициент  $\gamma$  позволяет регулировать процесс сшивания разрывов полос при фильтрации. Коэффициент  $\gamma_{nel}$  позволяет устранить высокочастотные помехи картины полос, с зависящими от направления характеристиками. Такие помехи могут привести к неправильному определению локального направления полос. Выбор коэффициента  $\gamma_{nel} > 1$  приводит к уменьшению размера большой оси эллипса фильтрации до подавления высокочастотных помех.

По мере подавления помех, отношение сумм проекций производных  $C_{om}^q(i, j)$  изменяется в пределах от 1 до 1.585. При этом, значения  $C_{om}^q(i, j) \approx 1.585$  достигаются только для картин полос с практически неизменным локальным направлением полос. Предельно зашумленным картинам полос (предполагается, что характеристики шума не зависят от направления), или картинам полос со значительными изменениями локального направления полос, соответствуют значения  $C_{om}^q(i, j) \approx 1$ .

Наличие высокочастотных помех приводит к снижению точности определения оценок локального направления полос, и одновременно к уменьшению оценок локального шага полос, влияющих на размер соответствующих областей фильтрации. Это позволяет сохранить контраст полос при первых шагах обработки, когда оценки локального направления полос неточны из-за влияния помех.

На рис. 3.7 показаны области фильтрации для различных шагов обработки зашумленной картины полос, рис. 3.7, а. Области фильтрации сформированы без учета изменения локальных характеристик полос в пределах каждой области. Видно, что из-за смещения фазы сигнала полос в пределах каждой области фильтрации, такая обработка приводит к фазовому сдвигу для фрагментов картины полос, в которых значительно изменяется локальное направление полос.

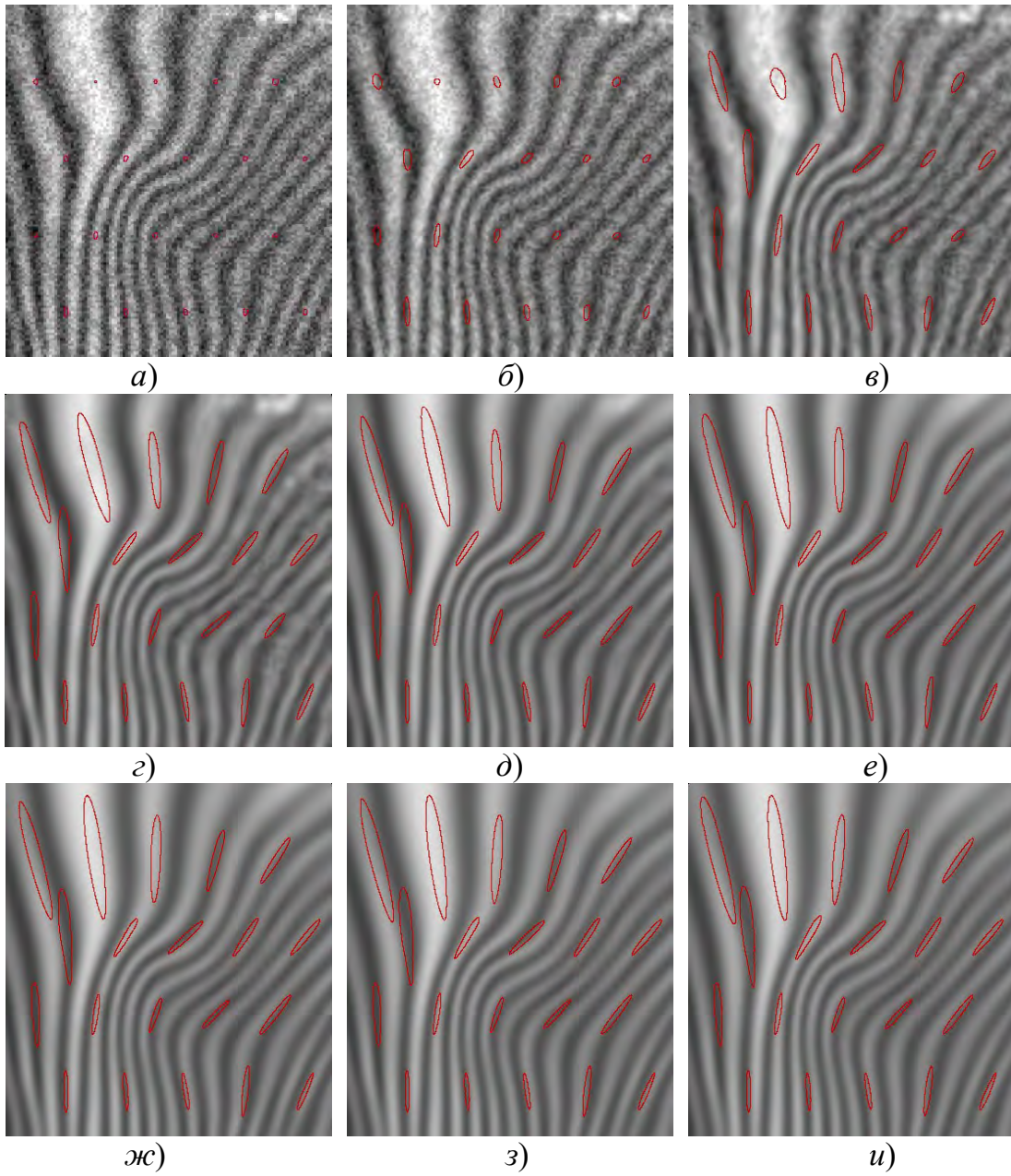


Рис. 3.7. Исходная картина полос (*a*), результаты обработки и области фильтрации после 1-8 шагов обработки (*б-и*)

### 3.5 Формирование областей фильтрации и получение итерационных оценок сигнала полос

Рассмотренный выше способ формирования областей фильтрации недостаточно эффективен, так как не учитывает локальные изменения формы полос. При формировании областей фильтрации должны быть учтены изменения оценок локального направления и локального шага полос в пределах каждой области фильтрации.

Область фильтрации, по которой определяется значение  $\xi^q(i, j)$  формируется от точки  $(i, j)$ . В качестве исходной формы области фильтрации принимается эллипс, но в каждой точке большой оси эллипса производится корректировка направления большой оси и размеров эллипса.

Результат обработки не должен зависеть от масштаба картины полос, следовательно, новая оценка сигнала полос должна вычисляться по значениям сигнала в упорядоченном наборе точек внутри области фильтрации, количество которых не зависит от масштаба картины полос и размера области фильтрации, а координаты – вещественны. В этом случае обработка остается эффективной даже при размере области фильтрации меньшем одного пикселя картины полос.

Точки области фильтрации, в которых определяются значения сигнала  $\zeta(k)$ ,  $k$  – номер точки в пределах области фильтрации, расположены на сечениях эллипса, перпендикулярных большой оси (с учетом изменяющегося направления). Количество точек в каждом сечении постоянно и равно  $2N_{pmin} + 1$ . Общее количество сечений равно  $\min \{2 \text{int}[(N_{pmin} e_{max}(i, j) / e_{min}(i, j)] + 1; 2N_{pmax} + 1\}$ . Для учета изменения размеров сечений в каждой точке вычисляется корректировочный вес  $G(k)$ , пропорциональный отношению размера сечения к размеру малой оси эллипса, заданному значением  $e_{min}(i, j)$ . Ограничение количества сечений с помощью параметра  $N_{pmax}$  позволяет в ряде случаев значительно повысить скорость обработки.

Для того чтобы получить оценку  $\xi^q(i, j)$ , нужно для упорядоченного набора точек внутри области фильтрации определить интерполяцией значения сигнала полос  $\zeta(k)$  и соответствующие им значения весовой функции  $W(k) = G(k)g(k)$ . Дополнительная весовая функция  $g(k)$  принимает значение равно 1 в точке с координатами  $(i, j)$  и значение 0 на границе области фильтрации.

После этого оценка сигнала полос может быть определена либо на основе нелинейного метода фильтрации (2.15), описанного в разделе 2.2,



либо вычислением средневзвешенного значения сигнала в соответствии с формулой:

$$\xi^q(i, j) = \sum_k \zeta(k)W(k) / \sum_k W(k). \quad (3.13)$$

Процесс формирования области фильтрации и вычисления весовой функции  $W(k)$  для произвольной точки картины полос при различных значениях параметров  $N_{pmin}$  и  $N_{pmax}$  показан на рис. 3.8.

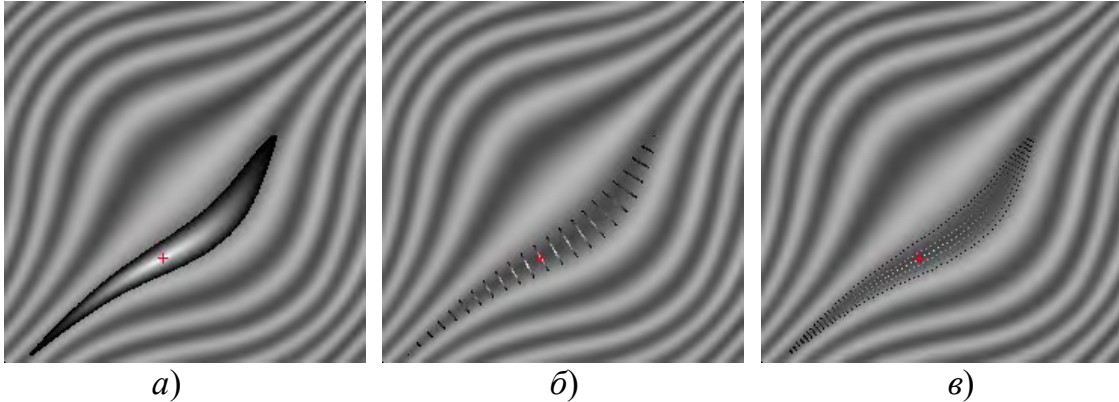


Рис. 3.8. Весовая функция  $W(k)$  внутри области фильтрации, с помощью которой вычисляется новая оценка сигнала полос в указанной точке для параметров  $N_{pmin} = 25$ ,  $N_{pmax} = 250$  (а),  $N_{pmin} = 25$ ,  $N_{pmax} = 11$  (б) и  $N_{pmin} = 3$ ,  $N_{pmax} = 50$  (в)

Приведенная на рис. 3.8 картина полос характеризуется незначительным изменением локального направления полос, поэтому в данном случае нет необходимости дополнительно корректировать расстояние между сечениями области фильтрации. Многие реальные интерферограммы, подобные показанной на рис. 3.9, содержат изломы полос, которые очень сложно отследить с помощью рассмотренного метода определения локального направления полос. Для того чтобы избежать искажений при обработке таких интерферограмм, приходится дополнительно корректировать расстояние между сечениями области фильтрации пропорционально отношению  $[e_{max}(i_1, j_1)/e_{min}(i_1, j_1)][e_{min}(i, j)/e_{max}(i, j)]$ , где  $(i_1, j_1)$  – координаты точки пересечения сечения с большой осью эллипса. Следует учитывать, что такая корректировка усложняет сшивание полос, разорванных помехами.

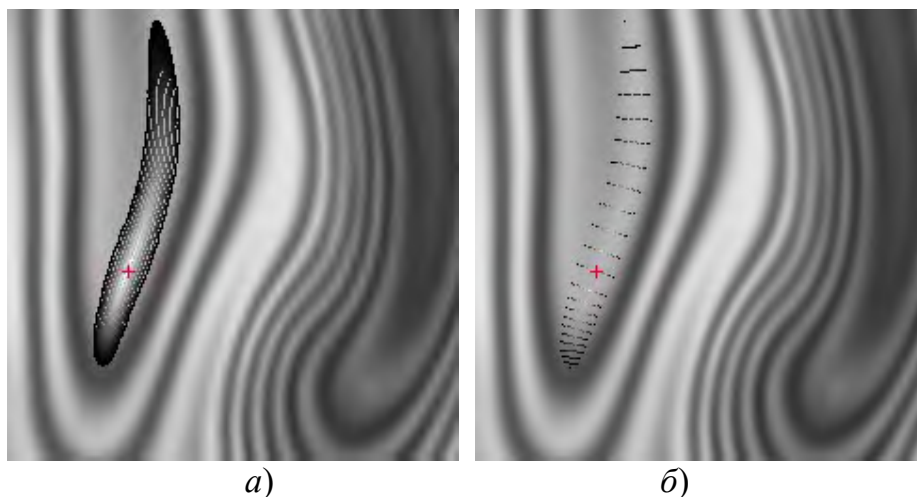


Рис. 3.9. Весовая функция  $W(k)$  внутри области фильтрации, с помощью которой вычисляется новая оценка сигнала полос в указанной точке для параметров  $N_{pmin} = 20$ ,  $N_{pmax} = 100$  (а),  $N_{pmin} = 20$ ,  $N_{pmax} = 11$  (б)

На рис. 3.10 показаны области фильтрации для различных шагов обработки зашумленной картины полос (рис. 3.10, а), сформированные с учетом изменения локальной формы полос в пределах каждой области фильтрации. Новые оценки сигнала получались по формуле (3.13). Видно, что в результате учета изменения локального направления полос в пределах каждой области фильтрации, обработка искривленных полос не приводит к сдвигу фазы сигнала полос (см. рис. 4.4).

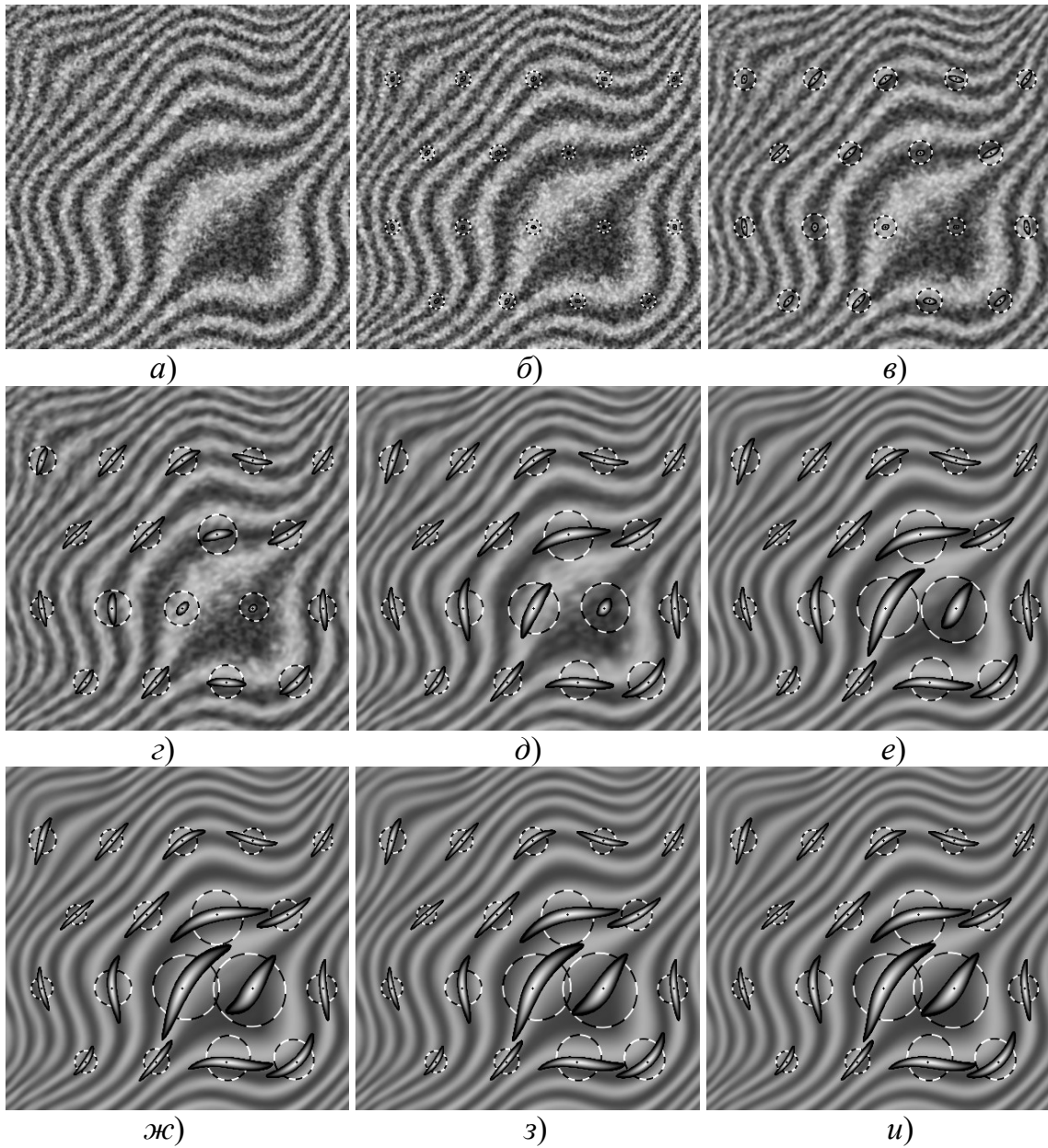


Рис. 3.10. Исходная картина полос (а), результаты обработки, вычисленные значения шага полос и области фильтрации после 1-8 шагов обработки (б-и)

3.6 Преобразование сигнала для сохранения его амплитуды при обработке картин интерференционных полос с сильно изменяющимися характеристиками или шумом, неравномерным по полю

При обработке картин полос с шумом, неравномерным по полю, появляется проблема при получении оценок локального шага полос. Для малозашумленных фрагментов картин полос, оценки локального шага

полос  $T^q(x_c)$  стабилизируются вблизи истинного значения локального шага полос  $T(x_c)$  значительно быстрее (по количеству шагов обработки), чем для более зашумленных фрагментов. Обработка фрагментов картин полос с низким уровнем помех приводит к более значительному снижению локальному снижению амплитуды сигнала полос. Похожая проблема возникает и при обработке картин полос со значительно изменяющимся локальными параметрами. При достаточно большом количестве шагов обработки, нужном для подавления всех помех некоторой картины полос, снижение амплитуды сигнала полос для фрагментов с меньшим уровнем шума или локальным шагом полос может оказаться критическим.

Проблема снижения амплитуды сигнала может быть разрешена без использования нелинейного метода (2.15). Для уменьшения снижения амплитуды сигнала после подавления помех, предлагается корректировать сигнал в конце каждого шага обработки,

$$\xi'^q(i, j) = \left[ \left\{ \gamma_1 [(C_{om} - 1)/(C_{om0} - 1)]^{\gamma_{nel1}} \right\} [1 - \theta_1] \xi^{q-1}(i, j) + \theta_1 \xi^q(i, j) \right] / \left[ \left\{ \gamma_1 [(C_{om} - 1)/(C_{om0} - 1)]^{\gamma_{nel1}} \right\} [1 - \theta_1] + \theta_1 \right], \quad (3.14)$$

где  $\xi^q(i, j)$  – оценка сигнала полос, полученная на очередном шаге обработки в соответствии с (3.13) или (2.15),  $\xi'^q(i, j)$  – модифицированная оценка сигнала полос, коэффициент  $\gamma_1 \geq 0$  задает уменьшение снижения амплитуды сигнала после полного подавления помех, коэффициент  $\gamma_{nel1} \in [0, +\infty)$  позволяет регулировать снижение амплитуды сигнала на каждом шаге обработки в зависимости от уровня помех, коэффициент  $\theta_1 \in [0, 1]$  позволяет принудительно регулировать снижение амплитуды сигнала.

Оценить эффективность предложенного способа сохранения амплитуды сигнала можно при сравнении результатов обработки картины полос с неравномерным по полю картины полос шумом, рис. 3.11, *a*, показанных на рис. 3.11 и рис. 3.12. На рис. 3.11 приведены результаты обработки картины полос, показанной на рис. 3.11, *a*, при  $\theta_1 = 1$ . На рис. 3.12 показаны результаты обработки картины полос, рис. 3.11, *a*, при  $\theta_1 = 0.5$ ,  $\gamma_1 = 3$ ,  $\gamma_{nel1} = 2$ . Видно, что модификация выходного сигнала в соответствии с (3.14) позволяет повысить амплитуду выходного сигнала без снижения эффективности подавления помех.

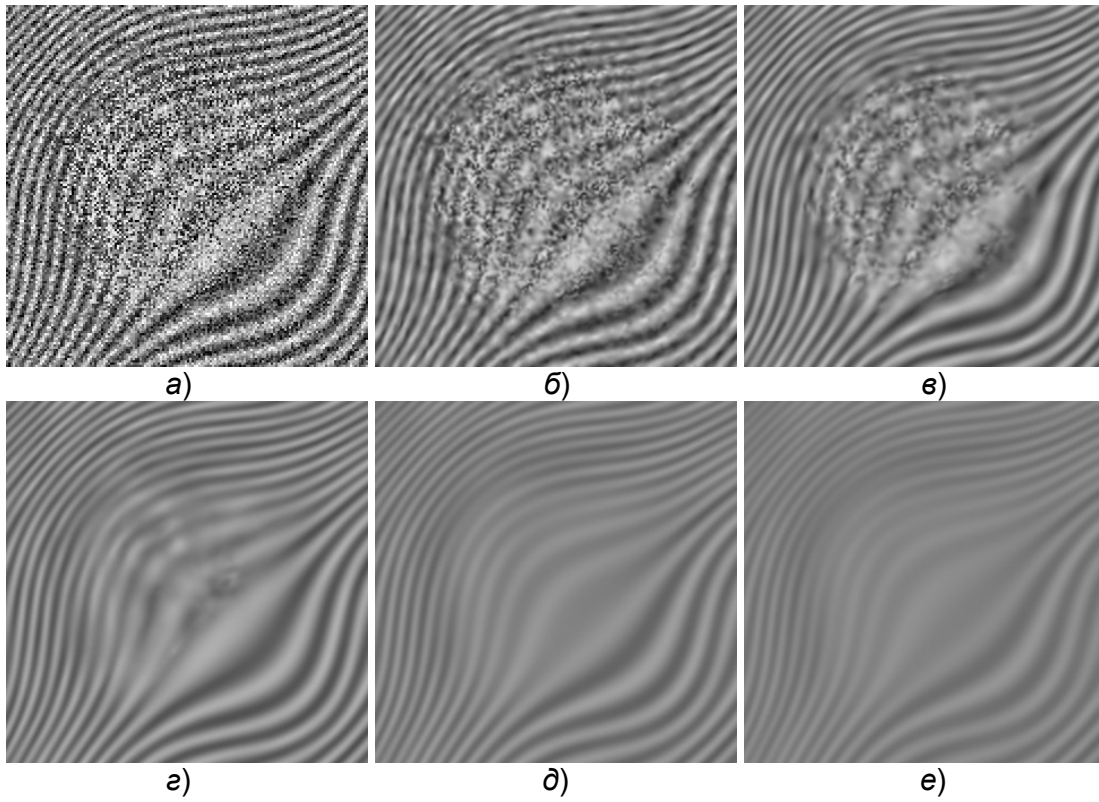


Рис. 3.11. Исходная картина полос (а) и результаты после 2, 3, 5, 10 и 15 шагов обработки картины полос (б-е)

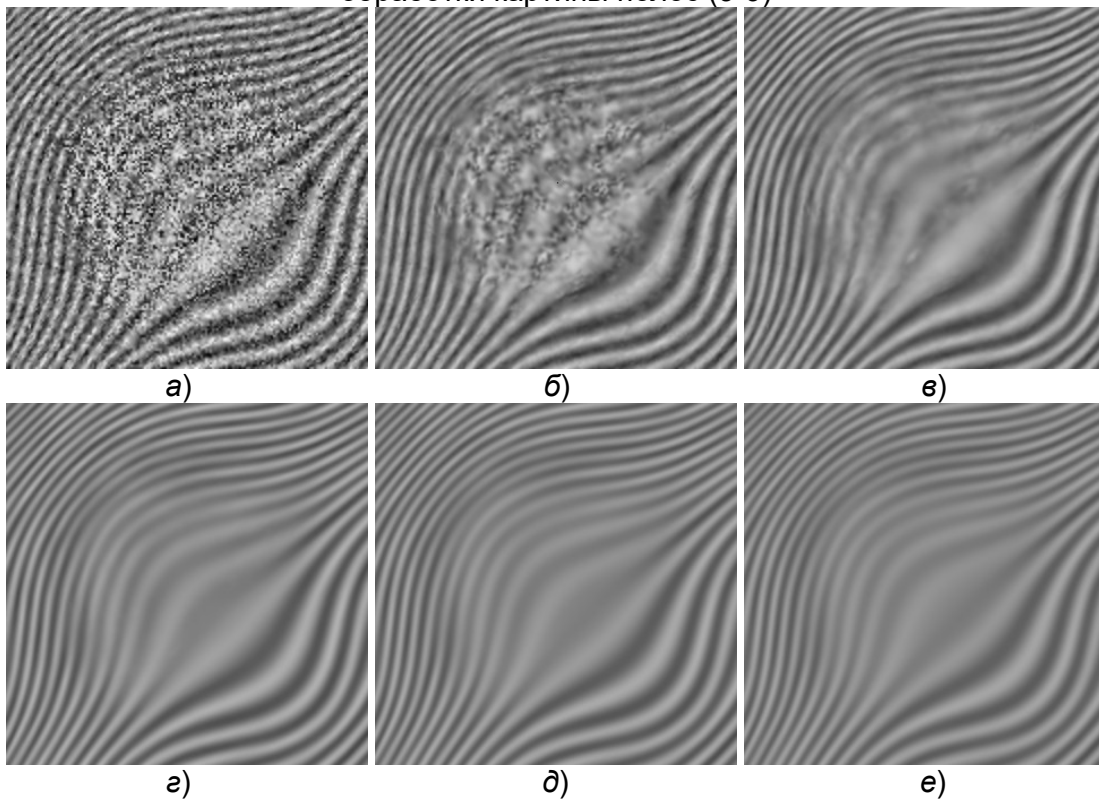


Рис. 3.12. Результаты обработки картины полос, показанной на рис. 3.11, а, с параметрами  $\theta_1 = 0.5$ ,  $\gamma_1 = 3$ ,  $\gamma_{nel} = 2$  после 1, 3, 5, 10, 15 и 20 шагов

Условие окончания обработки на  $q$ -ом шаге можно задать следующим образом,

$$C_{otns}^q = \sum_{j=0}^{VSize} \sum_{i=0}^{HSize} C_{otn}^q(i, j) \geq C_{otmstop}, \quad (3.15)$$

где коэффициент  $C_{otmstop} \in [1.3, 1.585)$  определяет среднее отношение сумм проекций производных, гарантирующее остановку обработки после полного подавления помех для заданного класса интерферограмм. Выбор коэффициента  $C_{otmstop}$  обуславливается кривизной обрабатываемой картины полос и значениями коэффициентов  $R_\alpha$  и  $\mu_\alpha$ , отвечающими за минимальное и относительное значения размера области усреднения производных при вычислении локального направления полос.

Для интерферограмм со сложной топологией, содержащих изломы полос, приходится задавать меньшее значение коэффициента  $C_{otmstop}$ , не гарантирующее подавления помех. Если значение коэффициента  $C_{otmstop}$  завышено, то обработка будет продолжаться до полного устранения изломов полос.

На рис. 3.13 приведены результаты обработки картины полос, показанной на рис. 3.11, после автоматического завершения обработки при различных значениях коэффициента  $C_{otmstop}$ .

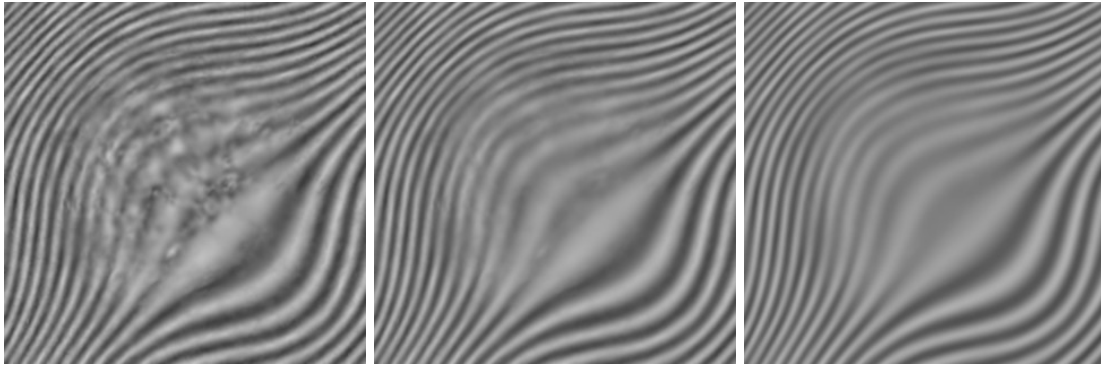


Рис. 3.13. Результаты обработки картины полос, показанной на рис. 3.11,  $a$ , после автоматического завершения обработки, обусловленного значениями  $C_{otmstop} = 1.3$ ,  $C_{otmstop} = 1.45$ ,  $C_{otmstop} = 1.52$

### 3.7 Применение нелинейного метода при подавлении помех интерференционных полос

При получении оценок сигнала на очередном шаге обработки с помощью формулы (3.13), амплитуда сигнала уменьшается на каждом шаге обработки. Преобразование сигнала (3.14) позволяет лишь замедлить этот процесс. Неправильный выбор коэффициента  $C_{otmstop}$  может привести

к завышению количества шагов обработки, необходимого для подавления помех и, соответственно, к снижению амплитуды выходного сигнала.

На рис. 3.14, *а* показана зашумленная картина интерференционных полос. Обработка этой картины полос с параметрами  $L=16$ ,  $R_\alpha=10$ ,  $\mu_\alpha=0.2$ ,  $\Delta\alpha_f=\pi/360$ ,  $T^0=10$ ,  $\theta=0.95$ ,  $\mu=1.1$ ,  $\chi=1.5$ ,  $\gamma=15$ ,  $\gamma_{nel}=1.5$ ,  $\theta_1=1$ ,  $\delta=0.3$ , при получении очередной оценки сигнала вычислением средневзвешенного значения в пределах области фильтрации по формуле (3.13), показана на рис. 3.14, *б-е*. Полное подавление помех происходит уже на третьем шаге обработки, и дальнейшая обработка приводит только к снижению амплитуды сигнала полос.

Применение метода нелинейной фильтрации, рассмотренного в разделе 2.2, позволяет за счет изменения формы сигнала уменьшить снижение амплитуды сигнала, как это видно из рис. 3.15, 3.16.

Нелинейный метод фильтрации также позволяет с высокой эффективностью устранять импульсные помехи интерференционных полос, например, дефекты оптической системы. На рис. 3.17, *а* показана картина полос, искаженная импульсными помехами с ненулевым средним, обработка которой при получении очередных оценок сигнала полос по формуле (3.13) приводит к изменению фона и амплитуды сигнала рис. 3.17, *б*. Обработка нелинейным методом, рис. 3.17, *в*, позволяет подавить помехи без изменения фона и амплитуды сигнала. Можно заметить, что при применении нелинейного метода помехи локализируются и не “размазываются” вдоль полос.

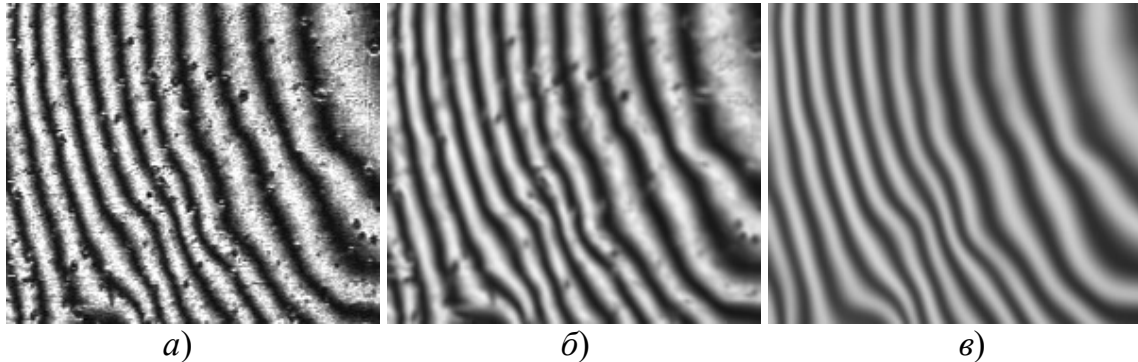


Рис. 3.14 (*а, б, в*). Исходная картина полос (*а*) и результаты после 1 (*б*) и 3 (*в*) шагов обработки

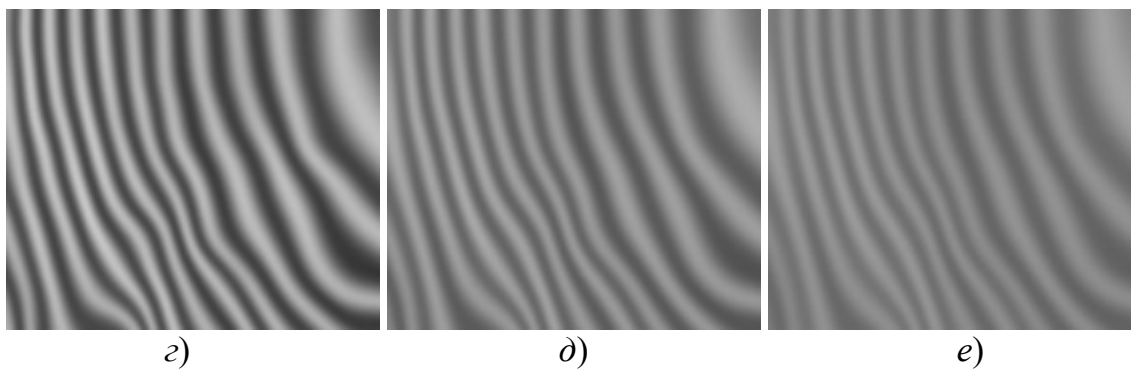


Рис. 3.14. (з-е). Результаты после 5, 10 и 15 шагов обработки

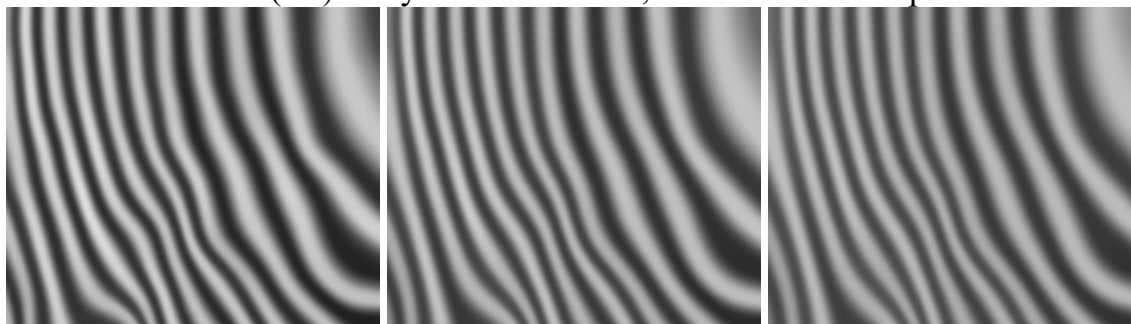


Рис. 3.15. Результаты после 5, 10 и 15 шагов обработки картины полос, показанной на рис. 3.13, а, с параметрами  $\varepsilon_0 = 0.5$ ,  $\varepsilon = 0.35$ ,  $\eta = 1$ ,  $\nu = 3$

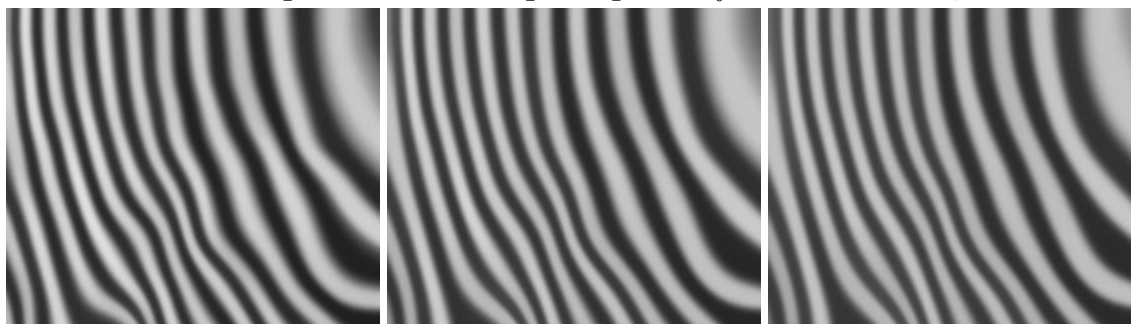


Рис. 3.16. Результаты после 5, 10 и 15 шагов обработки картины полос, показанной на рис. 3.13, а, с параметрами  $\varepsilon_0 = 0.5$ ,  $\varepsilon = 0.5$ ,  $\eta = 2.5$ ,  $\nu = 3$

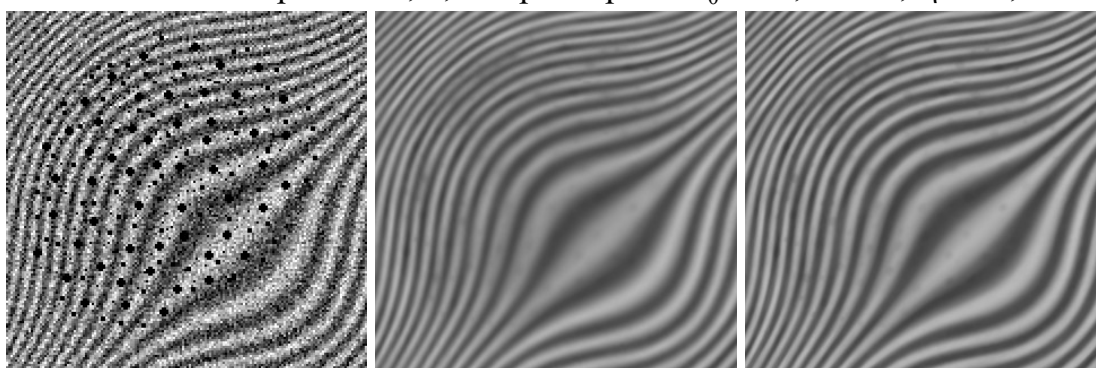


Рис. 3.17. Картина полос с импульсными помехами, результат обработки этой картины полос с применением формулы (3.13) и результат обработки картины полос с применением рассмотренного в разделе 2.2 нелинейного метода (2.15)



### 3.8 Реализация методов обработки зашумленных картин интерференционных полос

Адаптивное формирование области фильтрации для каждой точки картины полос позволяет с высокой эффективностью подавлять различные помехи, в том числе и близкие по частоте с сигналом полос.

На рис. 3.18 приведена картина интерференционных полос форматом  $512 \times 400$  точек, искаженная импульсными помехами, близкими по частоте с сигналом полос. В центральной области и левом нижнем углу картины полос видны горизонтальные “царапины”, вызванные дефектами оптической системы. Так как эти протяженные дефекты не совпадают по направлению с полосами, то они существенно мешают настройке метода. Тем не менее, разработанный метод позволил подавить все помехи без значительного снижения видности полос, как это видно из рис. 3.19.

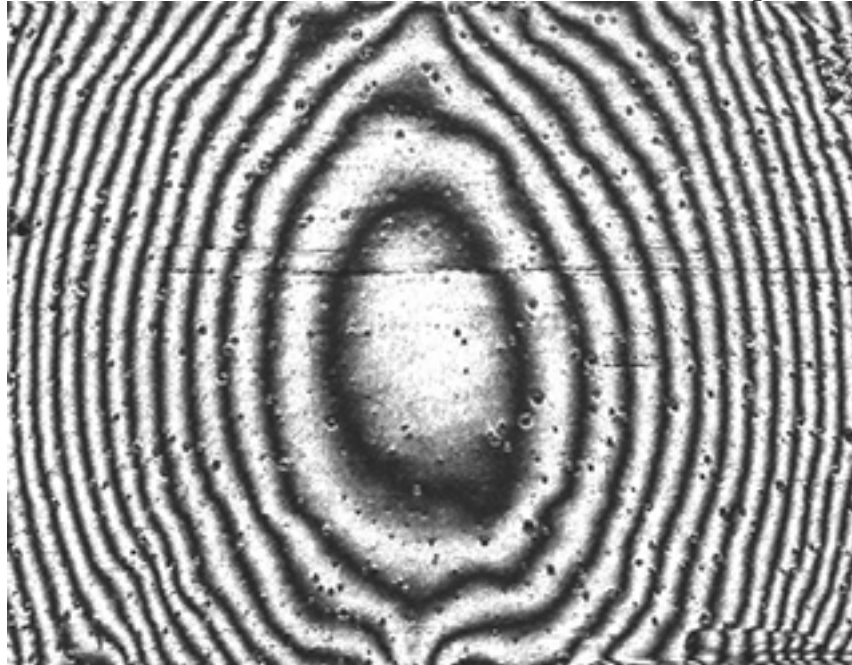


Рис. 3.18. Картина интерференционных полос, искаженная импульсными помехами, формат  $512 \times 400$  пикселей

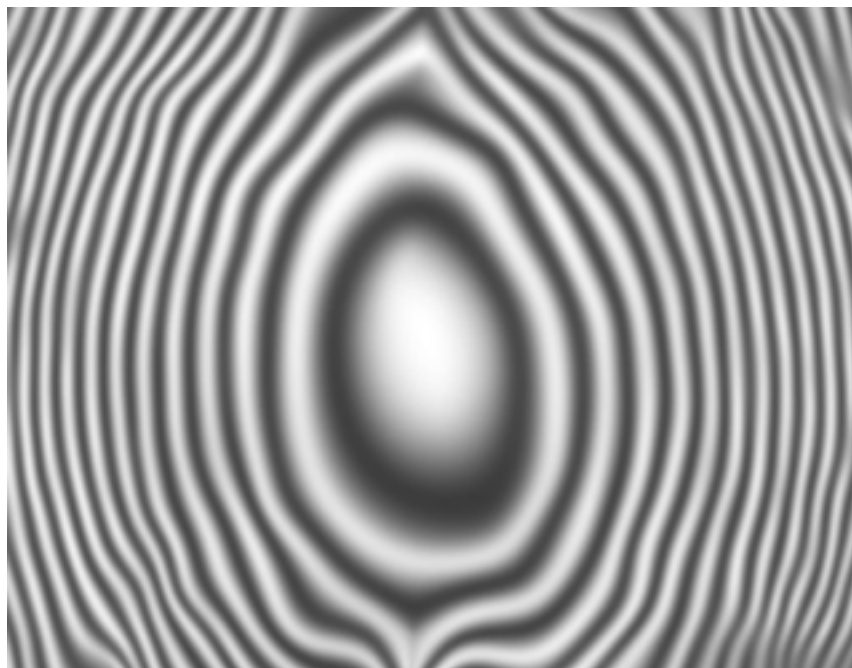


Рис. 3.19. Результат обработки картины полос, приведенной на рис. 3.18

На рис. 3.20 представлена интерферограмма, характеризующаяся значительными изменениями локального шага полос, при этом полосы с малым шагом полос могут включать всего 2-3 спекл-пятна. Особенности данной интерферограммы не позволяют однозначно определить границу картины полос и выделить области с различной топологией. Из-за значительного изменения шага полос (в несколько десятков раз) известные методы спектральной обработки являются практически неработоспособными.

На рис. 3.21 показан результат обработки данной интерферограммы. Видно, что обработка интерферограммы не привела к снижению видности полос. Сравнение картин полос на рис. 3.20 и рис. 3.21 позволяет сделать вывод об эффективности метода определения локального шага полос.

На рис. 3.22 приведен пример обработки похожей по топологии интерферограммы, искаженной неравномерным по полю шумом. Данный пример позволяет сделать вывод о хорошей помехозащищенности метода при определении локального шага полос.

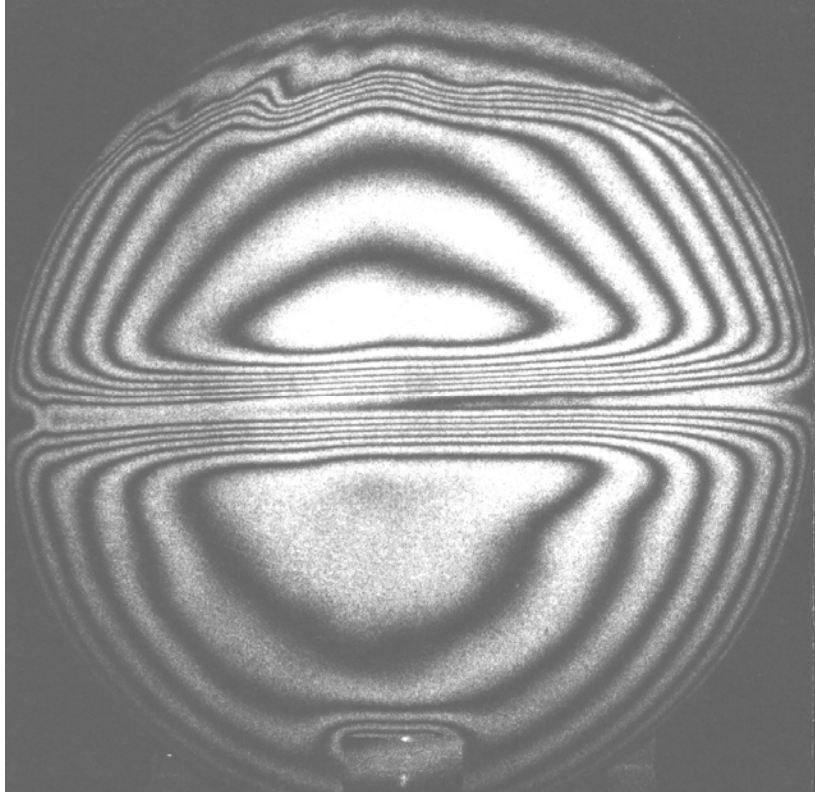


Рис. 3.20. Картина полос со сложной топологией

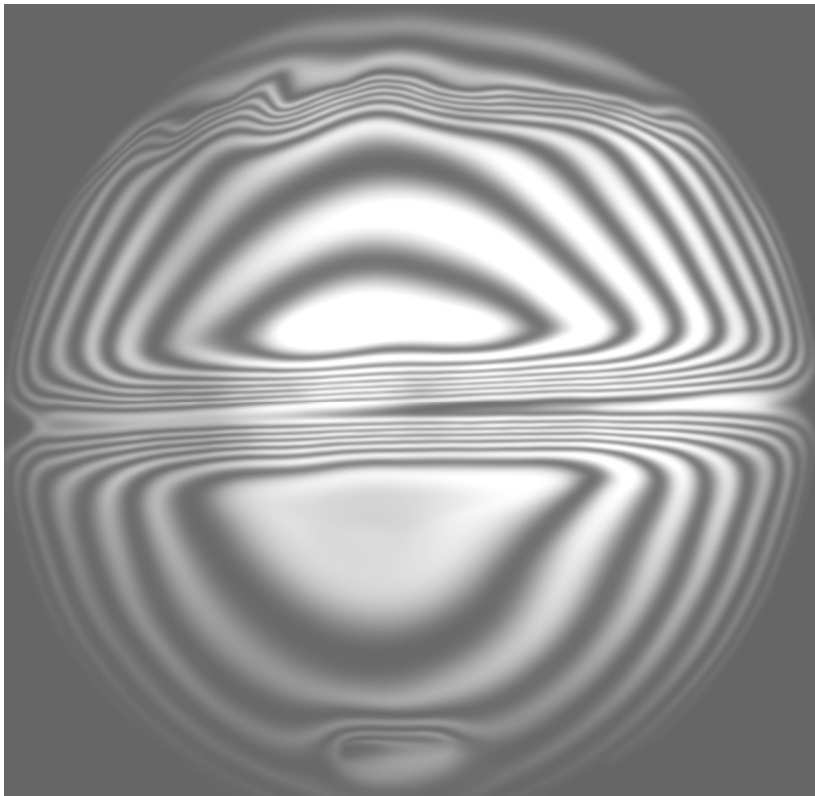


Рис. 3.21. Результат обработки картины полос рис. 3.20.

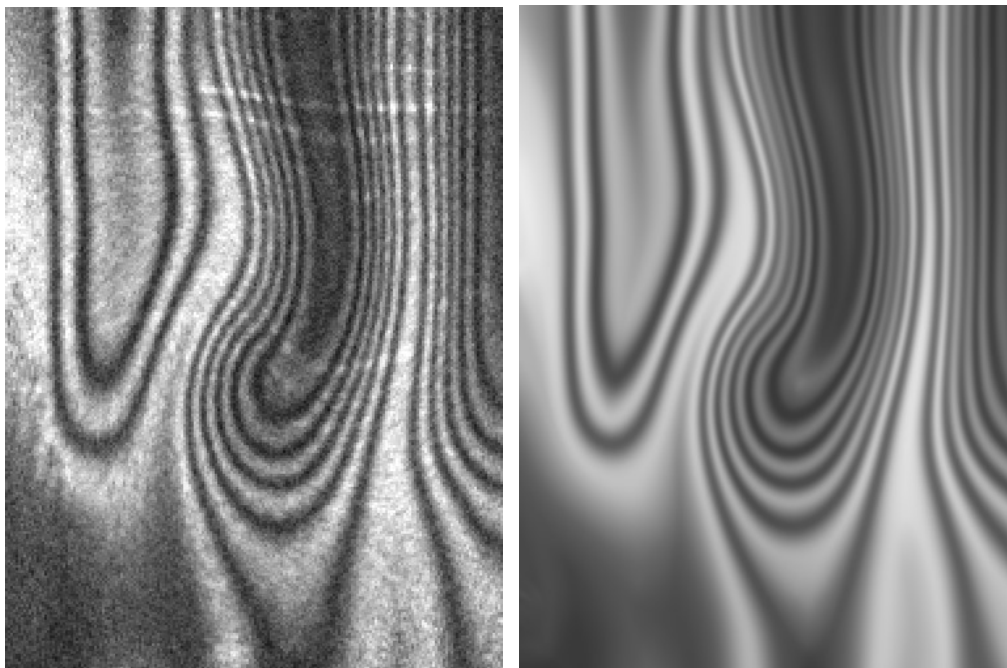


Рис. 3.22. Исходная картина полос и результат после 7-го шага обработки

Адаптивная настройка разработанного метода подавления помех позволяет доопределять разорванные интерференционные полосы. На рис. 3.23 приведена сильно зашумленная интерферограмма, содержащая области с нулевой видимостью полос. Как видно из рис. 3.24, обработка данной интерферограммы разработанным методом позволяет сшить разорванные интерференционные полосы.

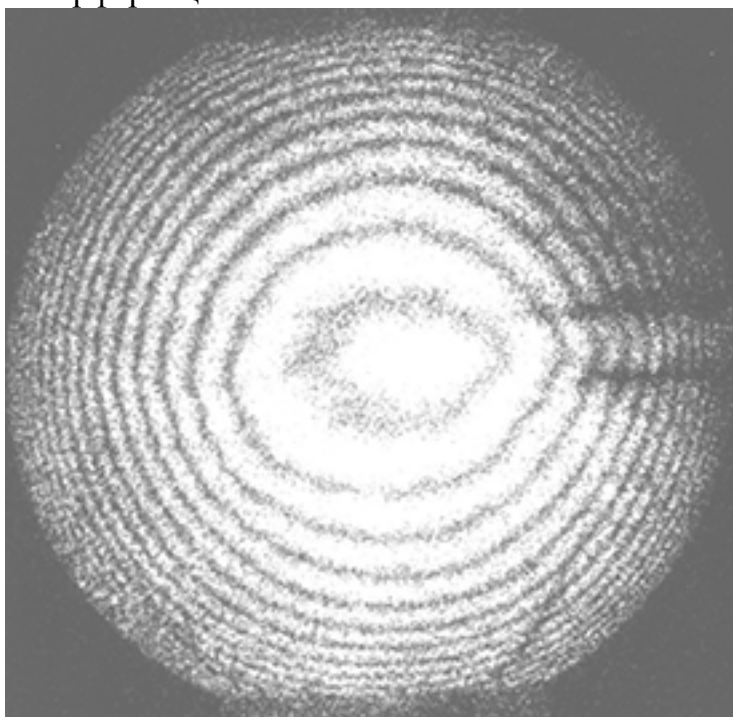


Рис. 3.23. Пример сильно зашумленной картина полос

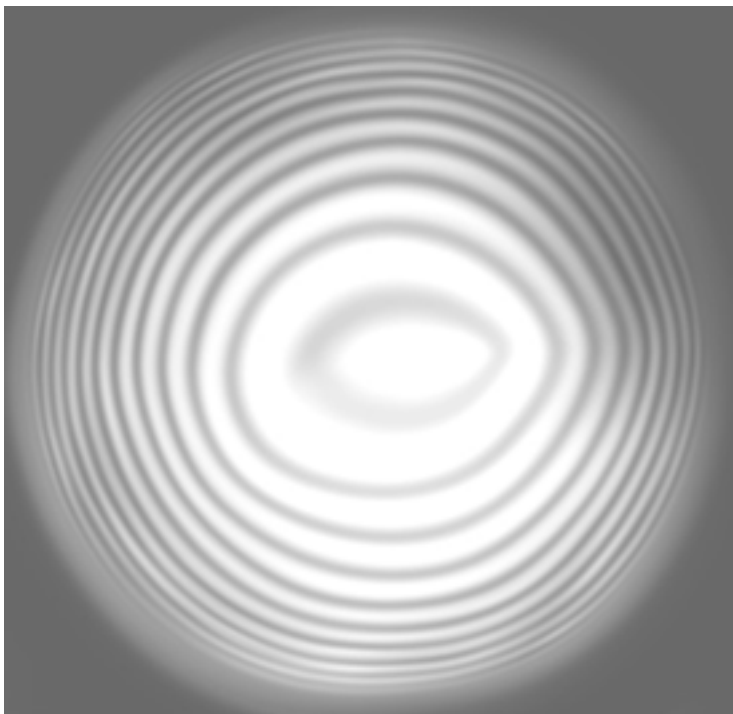


Рис. 3.24. Результат обработки картины полос рис. 3.23

Рассмотренные примеры позволяют сделать вывод о высокой эффективности разработанных методов подавления помех интерференционных полос. Погрешности восстановления фазы после подавления помех более подробно рассмотрены в главе 4.

## Глава 4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФАЗЫ ПО ЛИНИЯМ ЭКСТРЕМУМОВ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС

### 4.1. Восстановление линий интерференционных экстремумов

Одной из задач обработки зашумленных картин интерференционных полос является восстановление линий интерференционных экстремумов [34-37]. Для решения некоторых задач оказывается достаточным только восстановление линий интерференционных минимумов. В настоящем разделе рассмотрен метод восстановления линий интерференционных минимумов. Рассмотренный далее метод может быть применен к инвертированной интерферограмме для восстановления линий максимумов, но важно отметить, что линии минимумов и максимумов в этом случае будут построены независимо друг от друга.

После предварительной обработки в каждой точке  $(i, j)$  картины полос становится известна оценка локального направления полос  $\alpha_f^q(i, j)$ . Задачу восстановления линий интерференционных минимумов можно решить, проверив для каждой точки предварительно улучшенной картины полос, достигается ли в ней минимум одномерного сигнала в сечении, перпендикулярном локальному направлению полос. Дополнительная логическая обработка позволяет выровнять толщину линий и устранить слишком короткие отрезки линий.

Предварительная обработка не всегда позволяет устранить все помехи исходной картины полос, и восстановление линий минимумов как обычных минимумов одномерных сигналов не всегда является эффективным. Наличие помех приводит к возникновению разрывов линий. Для помехоустойчивого определения принадлежности точки  $(i, j)$  картины полос к линии минимумов предлагается проверять наличие в этой точке минимума заданной глубины  $S$  одномерного сигнала  $s(p_k)$  в сечении картины полос, проходящем через данную точку в направлении  $\alpha_f^q(i, j) + \pi/2$ .

Пусть точке  $(i, j)$  соответствует точка  $p_0$  одномерного сигнала  $s(p_k)$ . Назовем точками минимума глубины  $S$  набор  $p_k$ ,  $k_1 \leq k \leq k_2$  соседних точек одномерного сигнала  $s(p_k)$ , таких что

$$\begin{aligned} 1) & \max(s(p_{k_1}), \dots, s(p_{k_2})) - \min(s(p_{k_1}), \dots, s(p_{k_2})) \leq S; \\ 2) & s(p_{k_1-1}) - \min(s(p_{k_1}), \dots, s(p_{k_2})) > S; \\ 3) & s(p_{k_2+1}) - \min(s(p_{k_1}), \dots, s(p_{k_2})) > S. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Если рассматриваемая точка  $p_0$  является точкой минимума глубины  $S$ , то точка  $(i, j)$  принадлежит линии минимумов. Параметр  $S$ , позволяет при восстановлении линий минимумов игнорировать часть помех. Значение  $S$  не должно превышать удвоенной минимальной амплитуды сигнала. Неточное определение локального направления полос может оказаться причиной возникновения разрывов картины линий минимумов. Устранить разрывы линий минимумов, связанные с неточностью оценки локального направления полос можно, если в каждой точке  $(i, j)$  картины полос проверить на наличие минимума заданной глубины все одномерные сигналы для  $2N_{cr} + 1$  сечений, соответствующих направлениям  $\alpha_f^q(i, j) + \pi/2 + (l_1 - N_{cr})\alpha_e$ , где  $l_1 = [0, 2N_{cr}]$  – номер направления,  $\alpha_e$  – предположительная ошибка оценки локального направления полос. Если хотя бы для одного сечения точка  $(i, j)$  является минимумом глубины  $S$  соответствующего одномерного сигнала, то это точка линии минимумов.

Приведенный метод позволяет восстановить лишь грубую картину линий минимумов, представляющую собой набор связных компонентов (областей), содержащих линии минимумов. Дополнительная логическая обработка позволяет выделить линии за счет выравнивания толщины компонентов и устранить слишком короткие отрезки линий, соответствующие помехам. Обработка производится в три этапа.

На первом этапе обработки отбрасываются короткие отрезки линий, соответствующие помехам, производится проверка замкнутости, и для незамкнутых линий определяются координаты двух точек разрыва.

По грубой картине линий минимумов осуществляется поиск всех связных компонентов, содержащих в себе линии минимумов. Для каждого найденного компонента выполняются следующие операции (рис. 4.1).

От первой его известной точки  $A$  производится поиск наиболее удаленной от нее (по компоненту) точки  $B$ . При этом расстоянием по связному компоненту между двумя точками будем считать количество промежуточных точек в кратчайшем пути по компоненту, связывающим эти две точки. От точки  $B$  производится поиск наиболее удаленной от нее (по компоненту) точки  $C$ . Если расстояние по компоненту меньше заданного значения  $r(B, C) < L_{\min}$ , то компонент соответствует короткому отрезку линий, и его точки стираются. Для достаточных по размеру компонентов проверяется расстояние от средней точки  $D$  до наиболее удаленной от нее (по компоненту) точки  $E$ . Если расстояние  $r(D, E) > 0.75r(B, C)$ , то рассмотренному компоненту соответствует замкнутая линия, в противном случае точки  $B$  и  $C$  помечаются как точки разрыва незамкнутой линии.

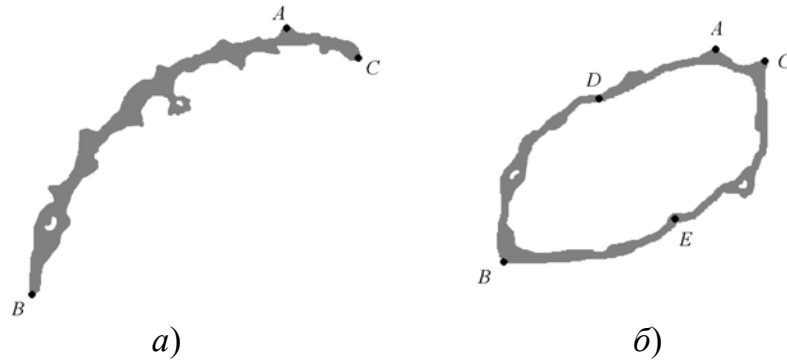


Рис. 5.1. Определение замкнутости линии. Пример незамкнутой линии (а), пример замкнутой линии (б)

На втором этапе (рис. 4.2) производится выделение линий за счет сужения компонентов связности. Сужение компонентов осуществляется за счет последовательного отбрасывания точек, лежащих на их границе и обладающих свойством локальной связности. Точка компонента лежит на его границе, если из восьми соседних к ней точек три и более не принадлежат компоненту. Точка компонента обладает свойством локальной связности, если все соседние к ней точки компонента связны между собой.

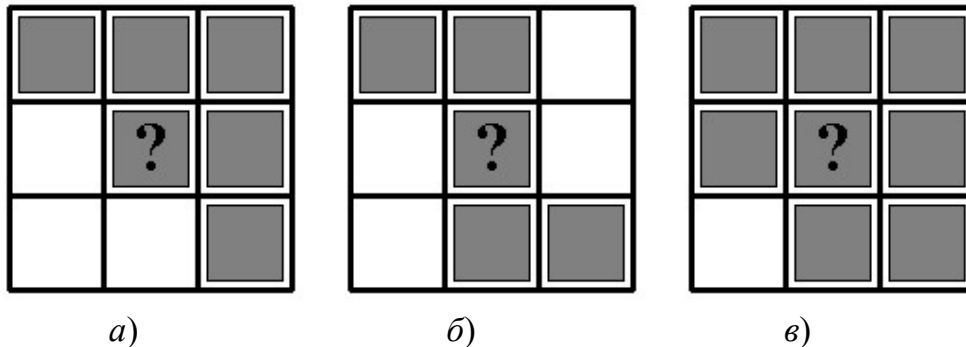


Рис.4.2. Точка линии может быть отброшена (а); не выполняется условие локальной связности (б); точка лежит не на границе линии (в)

Если рассматриваемый компонент соответствует замкнутой линии, то сужение возможно без дополнительных условий. Для компонента, соответствующего незамкнутой линии необходимо зафиксировать две точки разрыва, которые не могут быть отброшены при сужении линий.

Метод многопроходный, на каждом проходе отбрасываются все незаблокированные точки, лежащие на границах компонентов, устранение которых не приводит к потере локальной связности. Для того чтобы сужение не приводило к сдвигу линий центров компонентов, точки должны отбрасываться равномерно с двух сторон каждого компонента. Это достигается путем блокирования всех точек, соседних к отброшенной точке, компонента до конца текущего прохода. Критерием окончания



обработки является отсутствие отброшенных точек после очередного прохода.

Предложенный метод сужения компонентов не позволяет устранить разветвления линий, возникающие из-за помех, см. рис. 4.3, *а*, *б*. Устранение ложных разветвлений линий, вызванных помехами, производится на третьем этапе логической обработки картины линий, см. рис. 4.3, *в*, *г*.

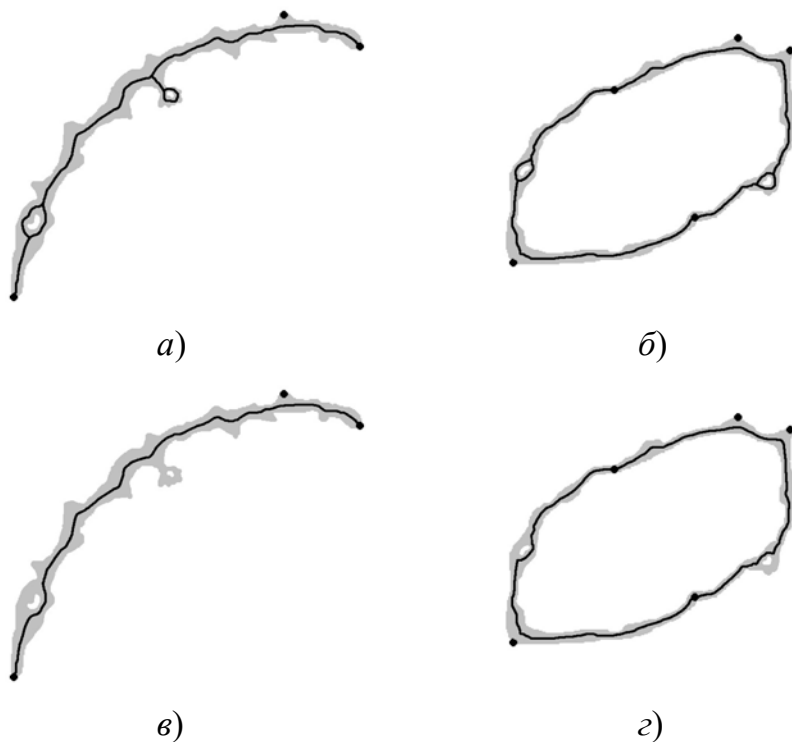


Рис. 4.3. Результаты сужения линий.

Разработанный метод восстановления линий центров полос характеризуется хорошей помехоустойчивостью и может быть применен к зашумленным картинам полос. Пример восстановления линий минимумов зашумленной картины полос приведен на рис. 4.4.

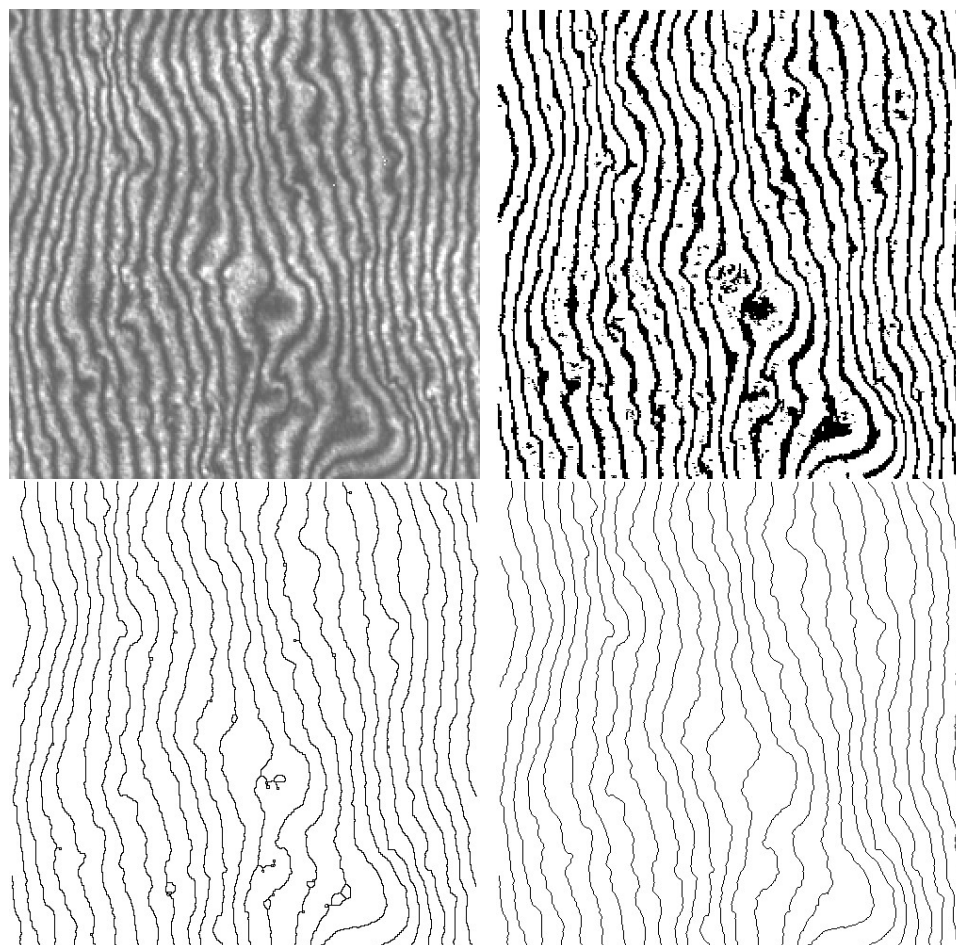


Рис. 4.4. Этапы восстановления линий минимумов

#### 4.2. Восстановление фазы по линиям экстремумов

Развертывание фазы полос реальных интерферограмм, содержащих области с нулевой видностью полос, представляет собой сложную задачу, часто не имеющую однозначного решения. Одним из подходов к разрешению проблемы является восстановление линий интерференционных экстремумов [34-37], определение значений полной фазы в линиях экстремумов и развертывание фазы во всех остальных точках картины полос [37] по известным значениям. При таком способе восстановления фазы оператор может устранить влияние существенных искажений картины полос на этапах восстановления линий интерференционных экстремумов и определения значений фазы в точках линий.

Значения полной фазы в точках линий центров полос, соответствующих интерференционным минимумам, могут быть представлены в виде  $\Phi_N = \Phi_{N_1} + 2\pi(N - N_1)$ , где  $N$  – номер линии,  $N_1$  – номер любой линии, для которой известна фаза. При этом значения фазы

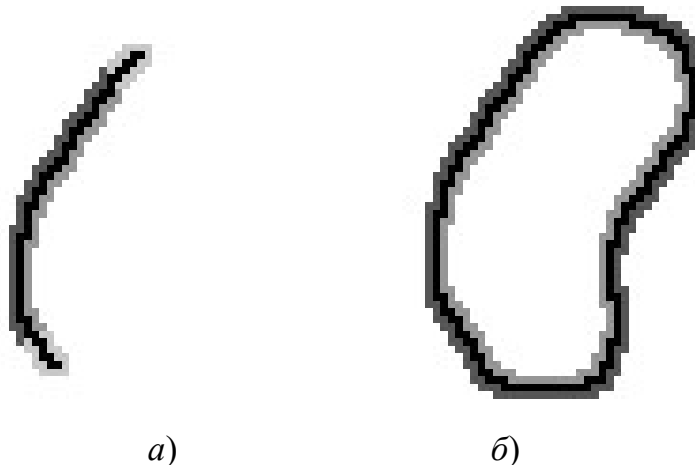
для соседних линий могут быть равными или отличаться на  $\pm 2\pi$ . Задача восстановления полной фазы в точках линий интерференционных минимумов может быть сведена к задаче нумерации линий. Применение алгоритмов сшивания разрывов линий до нумерации во многих случаях недопустимо, так как может привести к искажению фазы. Таким образом, задачу нумерации линий приходится решать с учетом возможных разрывов картины линий минимумов.

Для каждой пронумерованной линии должно быть определено направление возрастания (или убывания) фазы, как сторона линии, соответствующая увеличению номеров соседних линий. В простейшем случае нумерация начинается от линии, для которой задается значение фазы. Направление возрастания фазы для этой линии определяется случайно, но при необходимости оператор может инвертировать восстановленную фазу относительно начальной фазы.

Положение любой точки  $(i, j)$  относительно некоторой линии совпадает с положением ближайшей к ней и соседней к линии точки, следовательно, достаточно определить и запомнить значения стороны линии только для всех соседних к линии точек.

Для замкнутой линии все окружающие её точки можно классифицировать на две группы: внутренние – лежащие с одной стороны от неё и внешние – лежащие с другой стороны.

Для незамкнутой линии появляются точки, которые по своему положению могут являться продолжением данной линии, рис. 4.5, *a*, определяющиеся как соседние к точкам разрыва линии. Такие точки при нумерации не рассматриваются, сторона линии для них считается неопределенной.



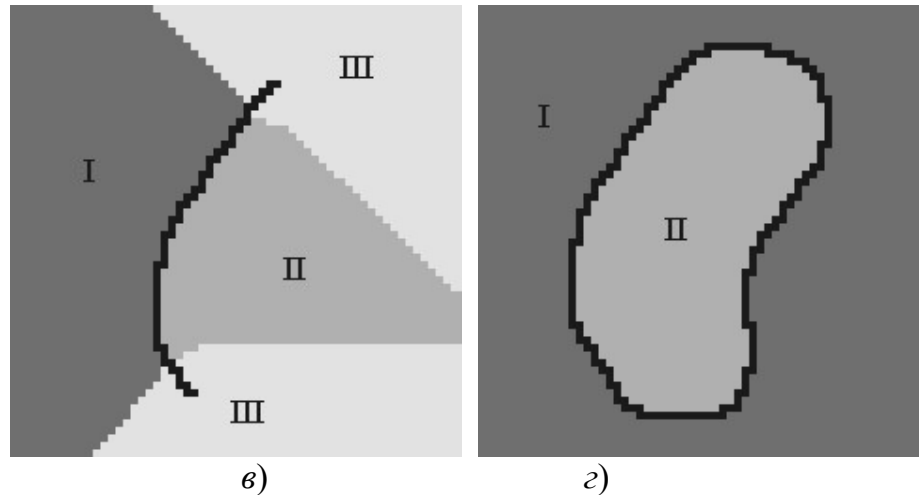


Рис. 4.5. Определение стороны для соседних к линии точек: для незамкнутой линии (а), для замкнутой линии (б); Определение стороны для всех точек картины линий: для незамкнутой линии (в), для замкнутой линии (г)

Для решения задачи нумерации линий предлагается следующий многопроходный метод. В список пронумерованных линий заносится линия с номером  $N_1$ , для которой известна фаза и сторона линии, соответствующая направлению увеличения фазы.

На каждом шаге обработки список пронумерованных линий фиксирован и не обновляется. От каждой пронумерованной линии из этого списка осуществляется поиск соседних к ней пронумерованных линий, каких, что:

- 1) между ними нет других линий
- 2) для новой линии может быть однозначно определена сторона, соответствующая возрастанию фазы.

Для таких линий определяются значения фазы и направления возрастания фазы, после чего они заносятся в новый список пронумерованных линий.

В конце каждого шага обработки в список пронумерованных линий заносятся все пронумерованные на данном шаге линии. Новый список пронумерованных линий обнуляется. Обработка заканчивается, когда после очередного шага новый список пронумерованных линий оказывается пустым. Все остальные пронумерованные линии стираются.

После перенумерования линий, для каждой точки линий минимумов становится известна полная фаза полос. Определить значения фазы во всех остальных точках картины полос можно по ближайшим точкам линий минимумов с различной фазой.

Для картин полос с простой топологией, не содержащих замкнутых линий, проблем при восстановлении фазы не возникает.

Разработанные методы восстановления линий интерференционных экстремумов и развертывания фазы полос были успешно применены для обработки интерферограмм, полученных при отражении измерительной волны от поверхности цинка, подвергнувшейся воздействию фемтосекундных лазерных импульсов. Интерферограммы предоставлены В. Темновым, университет Эссена, Германия. Пример восстановления полной фазы для фрагмента одной из таких интерферограмм приведен на рис. 4.6.

Эффективность развертывания фазы можно оценить по восстановленной картине полос с выровненной амплитудой.

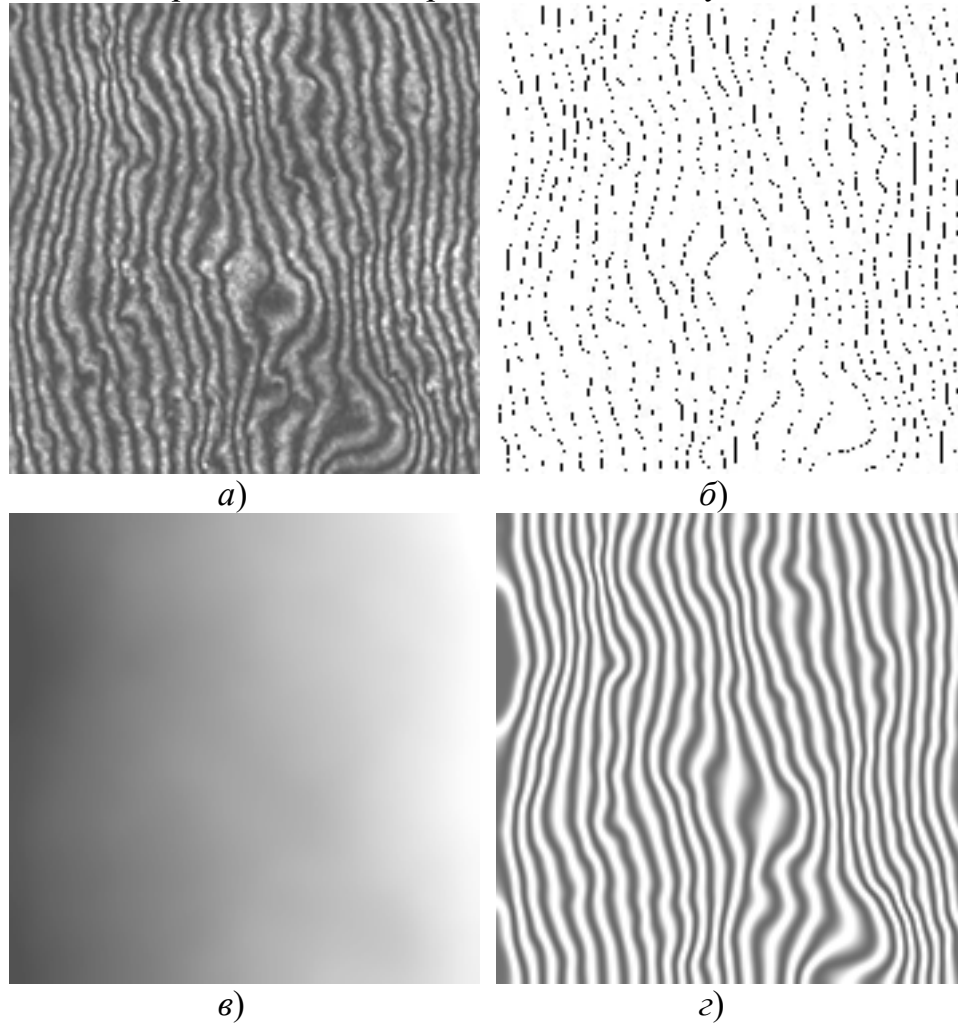


Рис. 4.6. Зашумленная картина интерференционных полос (*а*), восстановленная картина линий интерференционных минимумов (*б*), развернутая фаза полос (*в*) и восстановленная по развернутой фазе картина полос с выровненной амплитудой (*г*)

На рис. 4.7, *а* приведена картина полос, для которой значения фазы в центральной области не могут быть однозначно определены по линиям

интерференционных минимумов. В таких точках фаза доопределена константой, а погрешность фазы достигает значения  $\pm 2\pi$ .

На рис. 4.8 показан результат восстановления фазы для картины полос со сложной топологией, рис. 4.8 *а*.

На основании рассмотренных примеров можно сделать вывод об эффективности методов предварительного подавления помех интерференционных полос, восстановления линий интерференционных экстремумов и развертывания фазы полос по этим линиям.

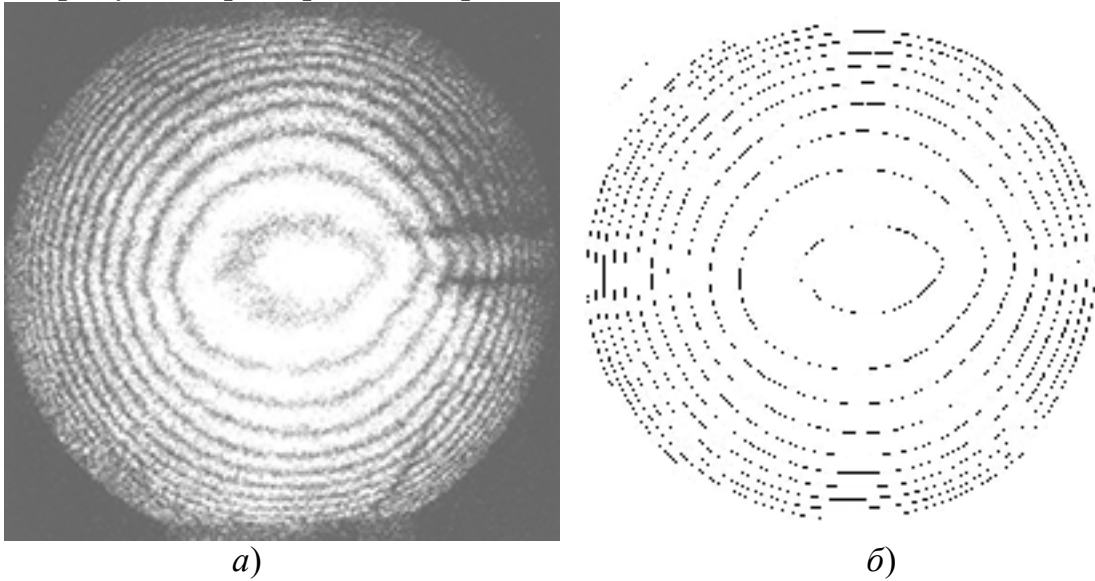


Рис. 4.7 (*а*, *б*). Сильно зашумленная картина интерференционных полос (*а*), восстановленная картина линий интерференционных минимумов (*б*)

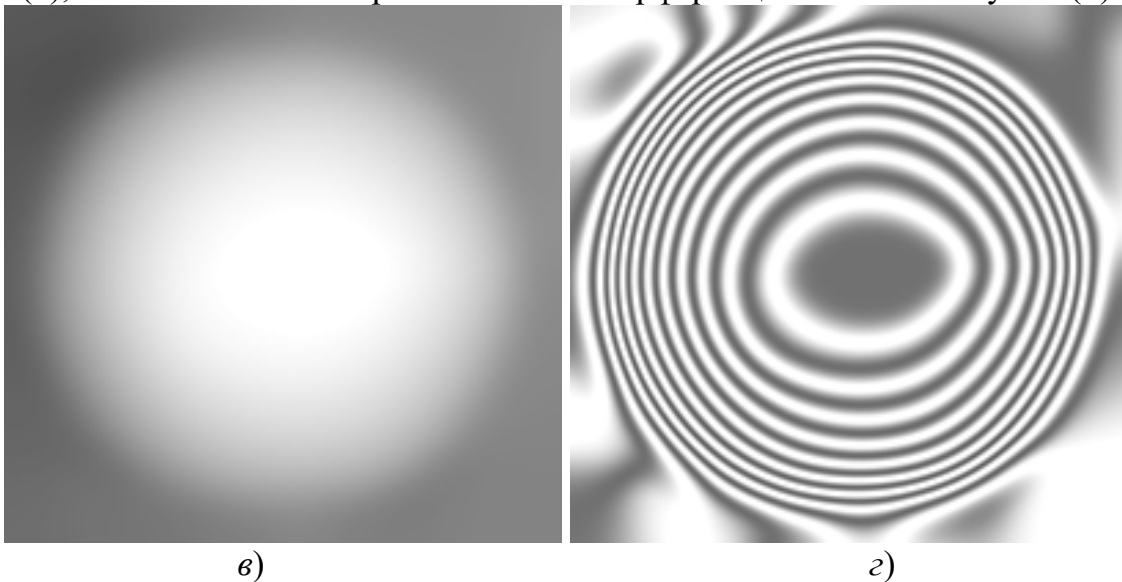


Рис. 4.7 (*в*, *г*). Развернутая фаза полос (*в*) и восстановленная по развернутой фазе картина полос с выровненной амплитудой (*г*)

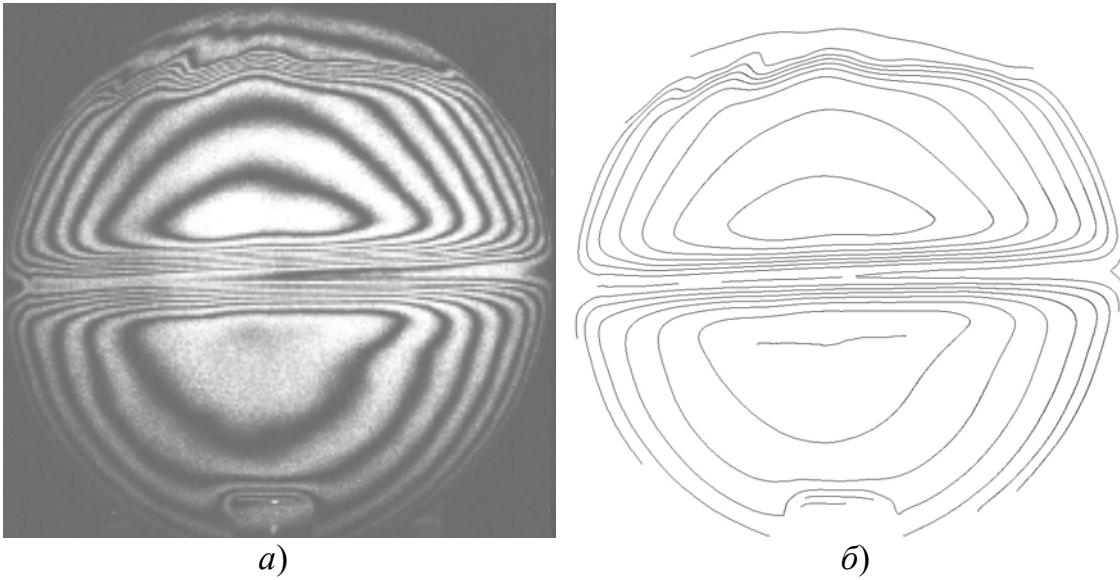


Рис. 4.8 (а, б). Зашумленная картина полос со сложной топологией (а), восстановленная картина линий интерференционных минимумов (б)

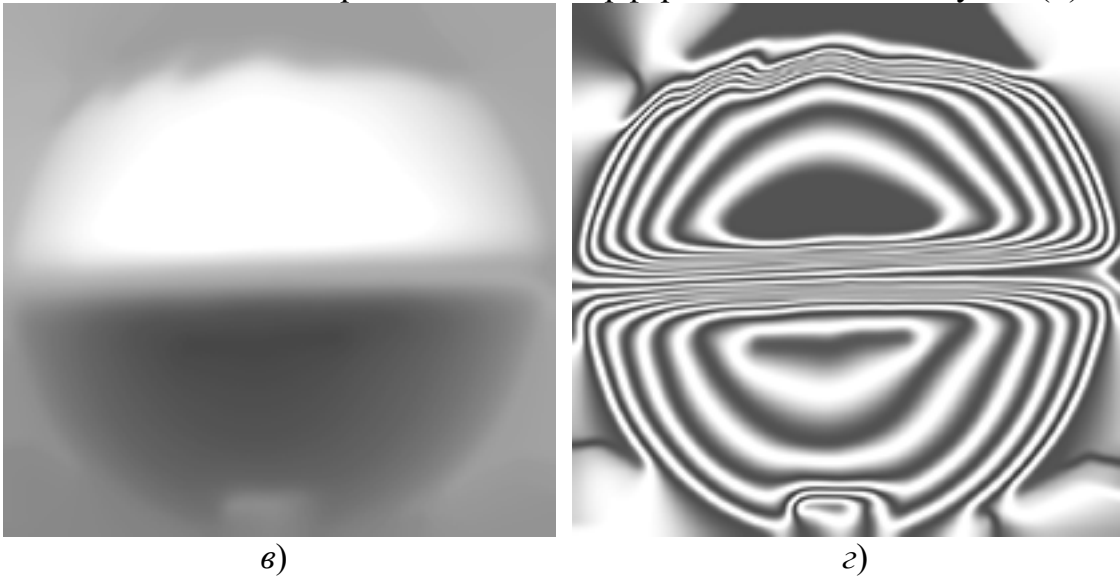


Рис. 4.8 (в, з). развернутая фаза полос (в) и восстановленная по развернутой фазе картина полос с выровненной амплитудой (з)

## Глава 5. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФАЗЫ ДВУМЕРНЫХ КАРТИН ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС

### 5.1 Восстановление фазы интерференционных полос

Вычисленное по формуле (3.9) в разделе 3.3 локальное направление полос  $\alpha_f^q(i, j) \in [0, \pi]$  не позволяет однозначно определить направление возрастания фазы. Для восстановления фазы необходимо задать локальное направление полос однозначно,  $\alpha_f(i, j) \in [0, 2\pi]$ . Если обрабатываемая картина полос имеет простую топологию, то во многих случаях достаточно задать точку или непрерывную двумерную область, обход которой в направлении против часовой стрелки определяет направление полос однозначно, см. рис. 5.3, в.

При недостаточной точности вычисления локального шага полос, производится выравнивание фона и амплитуды картины полос, аналогичное выравниванию одномерного сигнала, см. раздел 2.4.

Для каждой точки  $(i, j)$  картины полос по формулам (3.1, 3.2), с переопределенным коэффициентом  $\mu \leftrightarrow \mu_\phi$ , формируется набор  $P(m, n)$  точек, расположенных упорядоченно в пределах области вычисления фазы. Коэффициент  $\mu_\phi$  определяет баланс точности и помехоустойчивости восстановления фазы. В большинстве случаев рекомендуется выбирать значение  $\mu_\phi = 1$ .

Для каждой точки  $P(m, n)$  вычисляется сдвиг фазы  $\Delta\phi((i, j), P(m, n)) = \phi(P(m, n)) - \phi(i, j)$  относительно неизвестного значения фазы в точке  $(i, j)$

$$\Delta\phi((i, j), P(m, n)) = (0.5\mu 2\pi / N) z \sum_{k=0}^{n-1} \sin(\alpha(m) - \alpha_f(P(m, k))), \quad (5.1)$$

а также значения фона  $B(P(m, n))$  и амплитуды  $A(P(m, n))$  картины полос, которые могут быть вычислены по формулам раздела 2.4 для одномерных сигналов, коэффициент  $z$  определяет знак производной фазы, или направление возрастания фазы по отношению к однозначно определенному локальному направлению полос. Значение фазы  $\phi(i, j) \in [0, 2\pi)$  для сформированного набора точек области вычисления фазы полос порождает модельную картину полос,

$$\widehat{\xi}(P(m, n), \phi(i, j)) = B(P(m, n)) + A(P(m, n)) \cos(\phi(i, j) + \Delta\phi((i, j), P(m, n))), \quad (5.2)$$

наиболее близкую к реальной картине полос, и может быть вычислено как  $\phi_k = k\Delta\phi \in [0, 2\pi)$  с заданной точностью по критерию минимума среднего квадратичного отклонения модельной картины полос от реальной,



$\varphi(i, j) \approx \varphi_k(i, j) = k\Delta\varphi \in [0, 2\pi)$ :

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N n \left[ \frac{\xi(P(m, n)) - \widehat{\xi}(P(m, n), \varphi_k)}{A(P(m, n))} \right]^2 =$$

$$= \min_{v=0, \dots, \text{int}[2\pi/\Delta\varphi]} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N n \left[ \frac{\xi(P(m, n)) - \widehat{\xi}(P(m, n), v\Delta\varphi)}{A(P(m, n))} \right]^2 \quad (5.3)$$

Восстановление фазы зашумленных картин интерференционных полос с промежуточными результатами показано на рис. 5.1 - 5.4. При обработке картины полос, приведенной на рис. 5.4., средняя квадратичная погрешность фазы составила  $0.1\pi$ . Но эта погрешность возникает в процессе предварительного подавления помех и не связана с методом восстановления фазы.

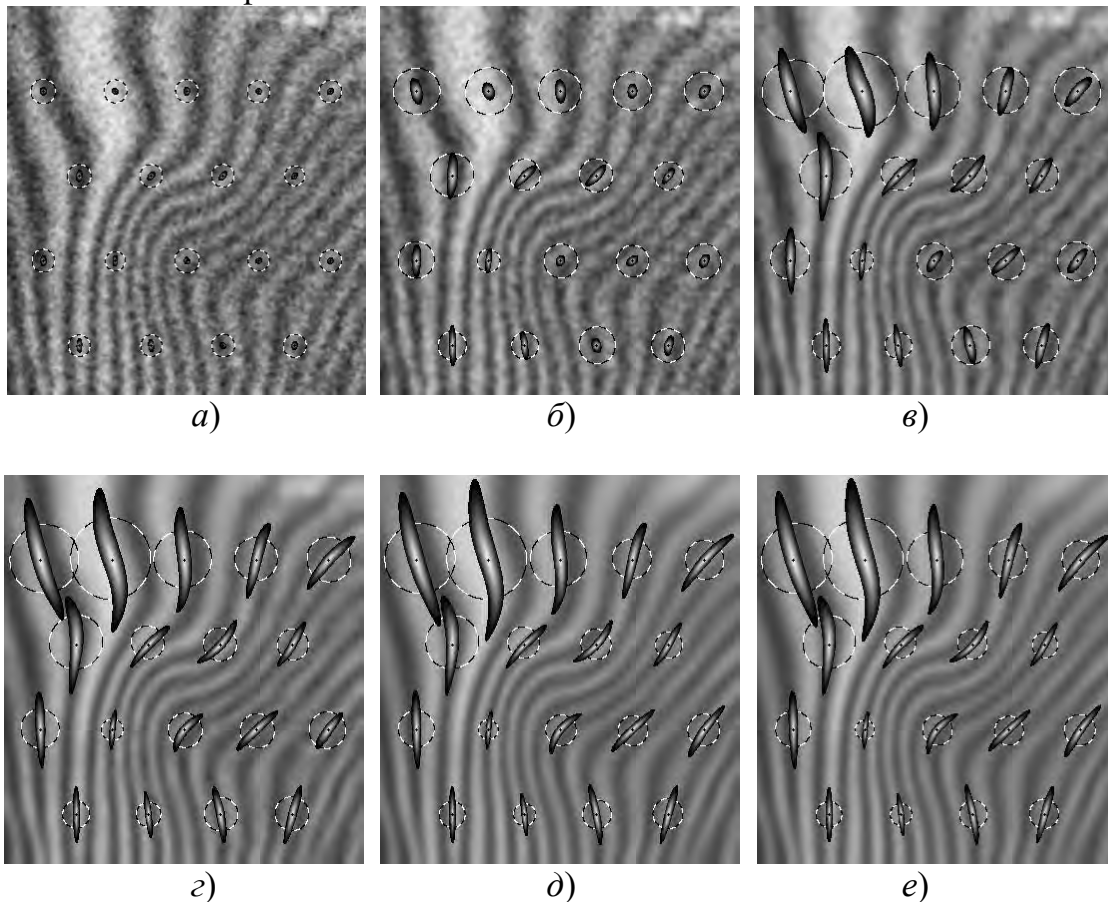


Рис. 5.1. Результаты итерационной обработки зашумленной картины полос; для некоторых точек приведены оценки шага полос, сформированные области фильтрации и весовые функции внутри каждой области фильтрации

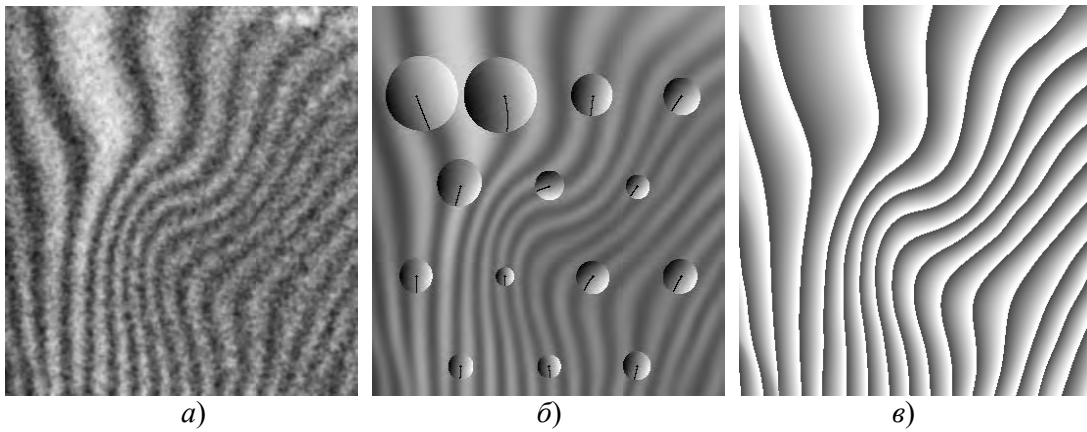


Рис. 5.2 (*a*, *б*, *в*). Восстановление фазы полос: исходная картина полос (*a*), обработанная картина полос с отображенными для некоторых точек областями вычисления фазы и фазовыми разностями внутри (*б*), результат вычисления фазы (*в*)

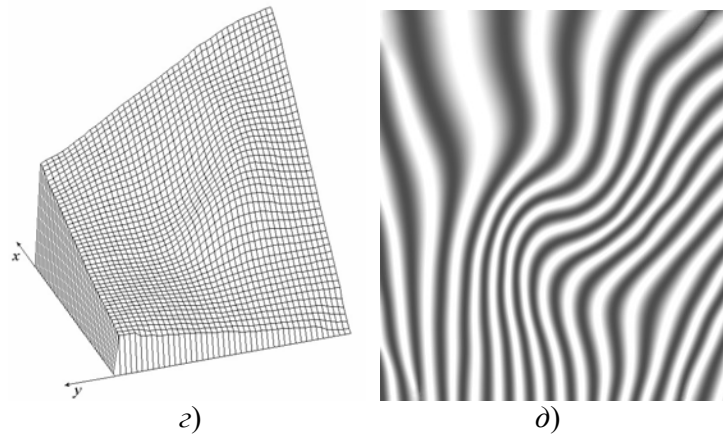


Рис. 5.2 (*z*, *д*). Восстановленная полная фаза (*z*) и развернутая по значениям фазы картина полос (*д*)

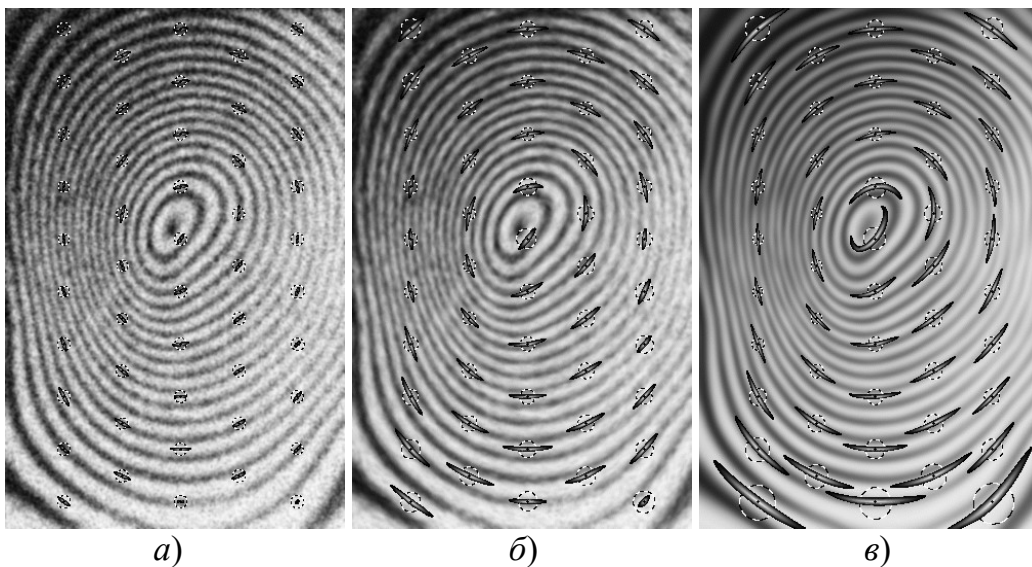


Рис. 5.3 (*a*, *б*, *в*). Подавление помех на различных этапах обработки

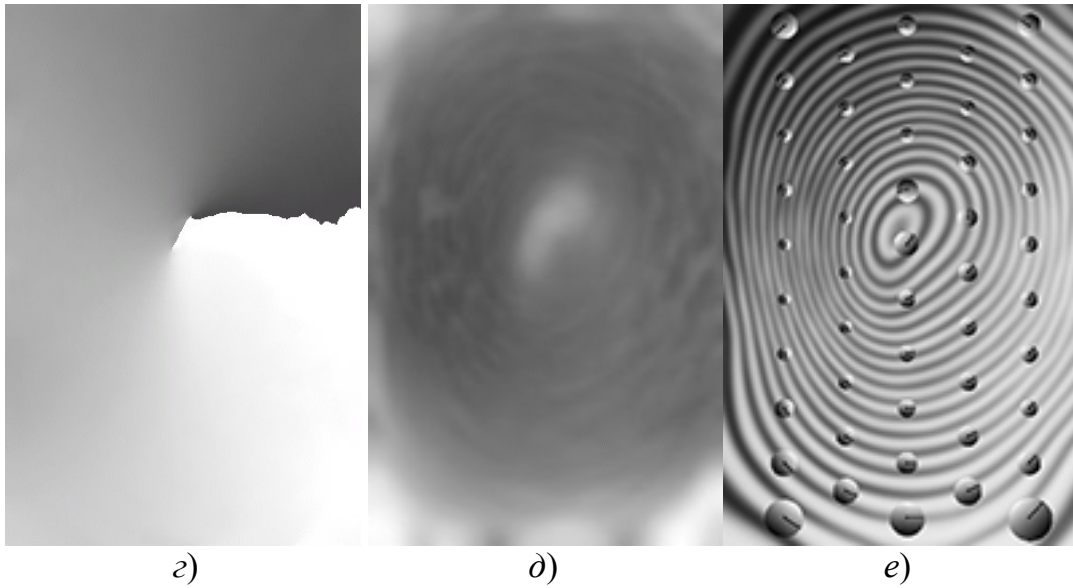


Рис. 5.3 (*z*, *d*, *e*). Оценки локального направления полос (*z*) и шага (*d*), отклонения фазы (*e*)

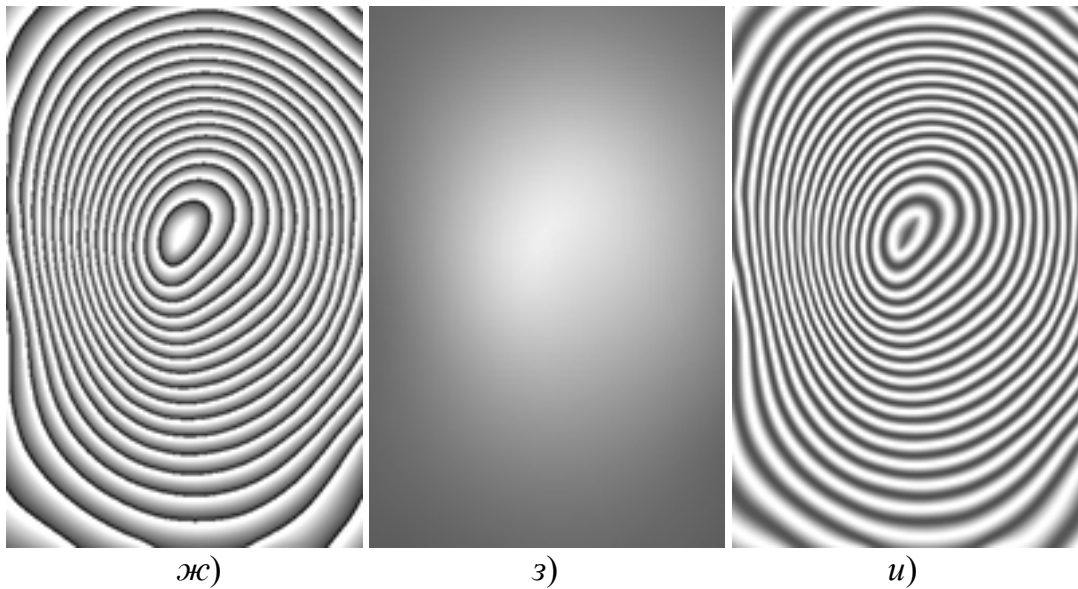


Рис. 5.3 (*ж*, *з*, *и*). Приведенная фаза (*ж*), развернутая полная фаза (*з*) и восстановленная по ней картина полос (*и*)

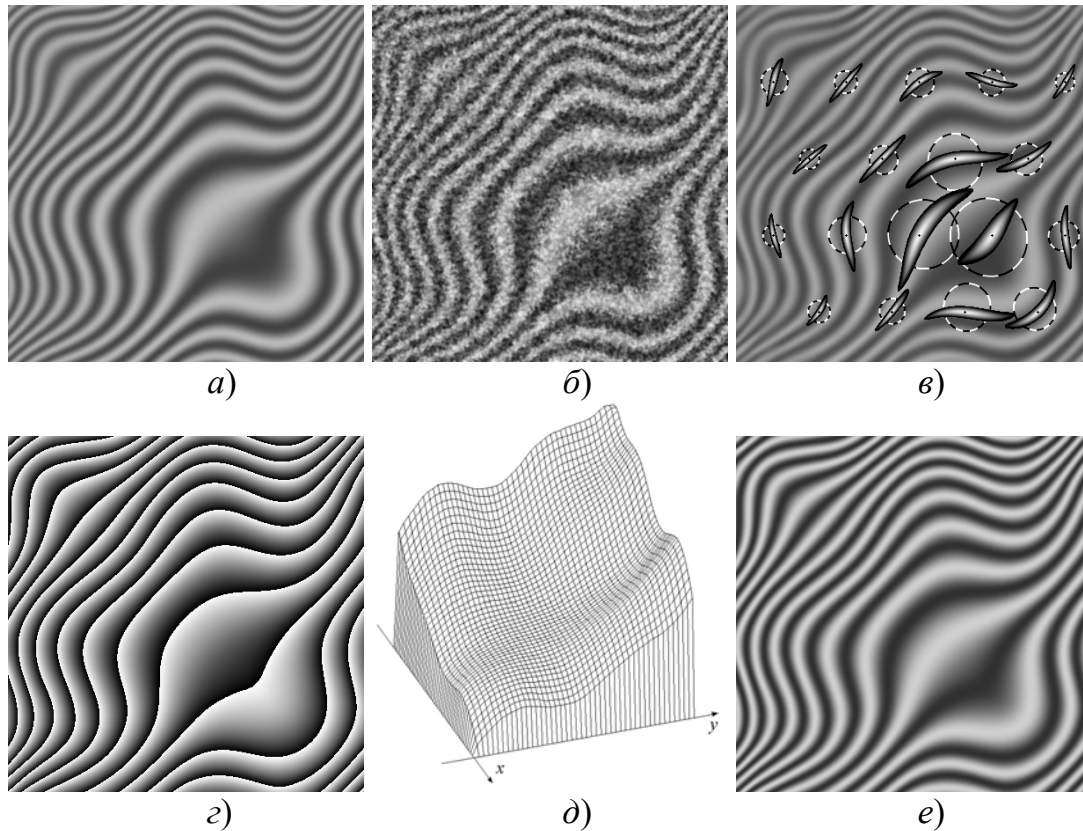


Рис. 5.4. Модельная картина полос (а), модельная картина полос искаженная аддитивным шумом (б), картина полос после подавления помех с отображенными областями фильтрации и значениями шага полос (в), результат восстановления фазы (г), полная фаза полос (д) и картина полос, построенная по значениям фазы (е)

## 5.2 Развертывание полной фазы полос с устранением локальных дефектов приведенной фазы

При обработке одномерного сигнала локальные погрешности приведенной фазы приводили к невозможности корректного развертывания полной фазы (2.23) по всему полю сигнала. При развертывании фазы двумерных картин полос, такие погрешности во многих случаях можно локализовать и устранить.

Развертывание полной фазы полос по значениям приведенной фазы, вычисленным по формуле (5.3), является сложной задачей. Для корректного восстановления фазы необходимо определить линии скачка фазы, при пересечении которых значения приведенной фазы изменяются больше, чем на  $\pm\pi$ , локализовать области разрыва линий скачка фазы, получить полную фазу вне этих областей, после чего доопределить полную фазу внутри этих областей по значениям полной фазы на их границах.

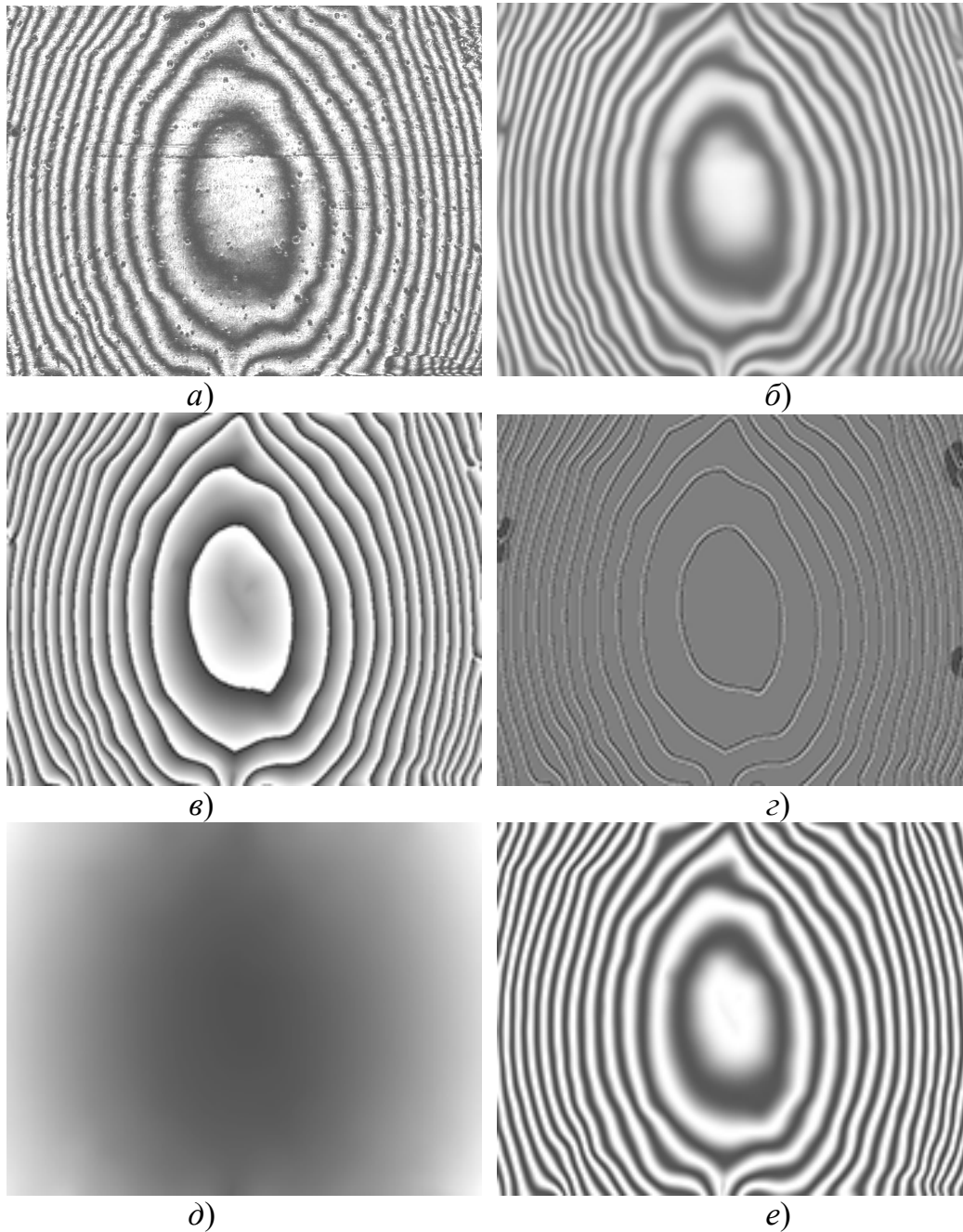


Рис. 5.5. Исходная картина полос (а), картина полос после подавления помех (б), восстановленные значения приведенной фазы (в), картина линий скачка фазы, точки разрыва линий и области, в которых запрещено развертывание полной фазы (г), результат восстановления полной фазы (д) и картина полос, построенная по значениям полной фазы

Точки  $(i_k, j_k)$ , принадлежащие линиям скачка фазы определяются следующим образом,  $(i_k, j_k): |\varphi(i_k, j_k) - \varphi(i_k \pm 1, j_k \pm 1)| > \pi$ . Для каждой линии скачка фазы, имеющей разрыв в поле картины полос, могут быть определены точки разрыва  $(i_{err}, j_{err})$ , не принадлежащие данной линии,

такие, что среди соседних к ним точек есть точки данной линии со значениями полной фазы  $\varphi(i_1, j_1) \in [0, \pi)$  и  $\varphi(i_2, j_2) \in [\pi, 2\pi)$  одновременно.

В окрестностях точек разрыва линий скачка фазы  $(i_{err}, j_{err})$  корректное восстановление полной фазы невозможно, такие области исключаются из рассмотрения при развертывании полной фазы, а значения в них доопределяются по уже развернутым значениям полной фазы.

Результат восстановления полной фазы по приведенной фазе с помехами приведен на рис. 5.5.

### 5.3 Оценка погрешностей разработанных методов подавления помех и восстановления фазы интерференционных полос

Погрешности рассмотренных методов подавления помех и восстановления фазы могут быть оценены при обработке модельных интерферограмм, с различным отношением сигнал/шум. На рис. 5.6 приведена зашумленная картина колец Ньютона [45, 53, 55, 56] с отношением сигнал/шум  $A_s/\sigma_n=1$ , результат ее обработки методом двумерной фильтрации Калмана [43-45], и результат ее обработки разработанным методом локально-адаптивной фильтрации. Видно, что фазовые искажения выходного сигнала после применения разработанного метода фильтрации значительно меньше фазовых искажений после применения двумерной фильтрации Калмана. Высокая эффективность подавления помех позволяет применить разработанный метод адаптивной нелинейной фильтрации для предварительного подавления помех зашумленных картин полос при восстановлении фазы методом двумерной фильтрации Калмана.

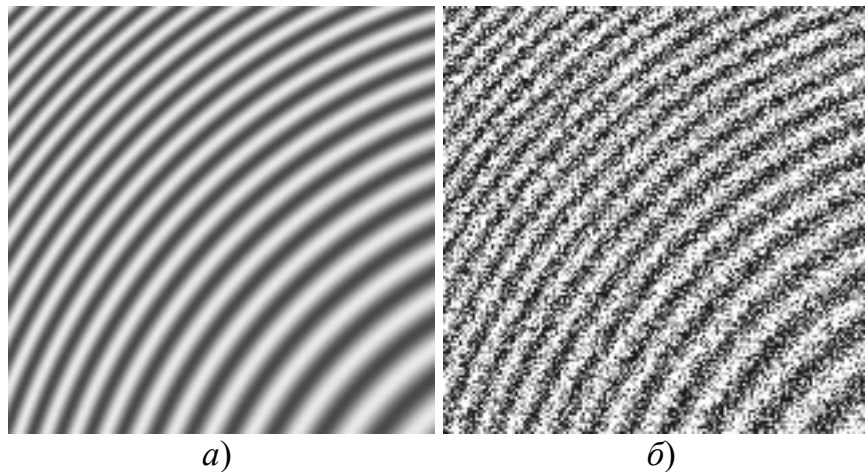


Рис. 5.6 (а, б). Модельная (а) и зашумленная (б) картины колец Ньютона

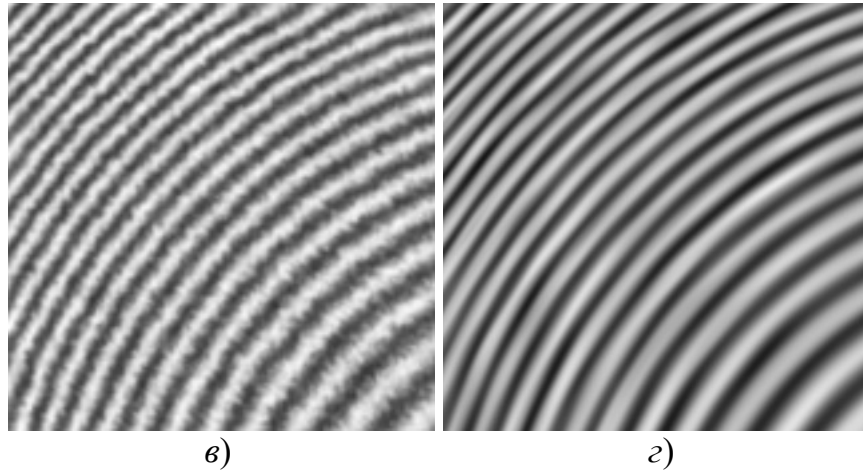


Рис. 5.6 (б, в). Результаты обработки зашумленной картины полос Ньютона (б) методом двумерной фильтрации Калмана (б) и разработанным методом адаптивной нелинейной фильтрации (в)

Получены следующие результаты обработки колец Ньютона для различных значений отношения сигнал/шум, см. таблицу 5.1. На основании данных результатов можно сделать вывод о высокой эффективности разработанных методов подавления помех интерференционных полос и восстановления фазы.

Таблица 5.1. Значения погрешности оценки фазы.

Отношение сигнал/шум	Метод двумерной фильтрации Калмана		Метод двумерной фильтрации Калмана после подавления помех разработанным методом адаптивной фильтрации		Восстановление фазы разработанным методом (5.3)	
	СКО фазы, рад.	Максимальная погрешность фазы, рад.	СКО фазы, рад.	Максимальная погрешность фазы, рад.	СКО фазы, рад.	Максимальная погрешность фазы, рад.
1.6	0.2	0.99	0.11	0.57	0.07	0.18
1,0	0.28	1.34	0.16	0.91	0.09	0.24
0.66	0.43	2.25	0.2	0.88	0.14	0.32
0.5	0.70	7.12	0.27	1.45	0.17	0.41

#### 5.4 Восстановление рельефа кратеров лазерной абляции, наблюдаемых при воздействии на исследуемую поверхность фемтосекундных лазерных импульсов

Процесс удаления вещества с поверхности твердого тела под воздействием сверхкоротких лазерных импульсов (лазерная абляция) представляет интерес с точки зрения исследования слабо изученных фундаментальных механизмов взаимодействия лазерного излучения с веществом [57, 58]. Технологии модификации поверхности фемтосекундными лазерными импульсами широко используются при

обработке различных материалов, микроструктурировании поверхностей, в медицине, при реставрации произведений искусства и в других областях.

Методика интерферометрической диагностики с использованием освещения интерферометра фемтосекундными лазерными импульсами, разработанная с целью изучения динамики процессов на поверхности твердого тела при воздействии мощных фемтосекундных лазерных импульсов, рассмотрена в [43, 58]. Методика позволяет количественно охарактеризовать рельеф кратеров абляции, типичная глубина которых составляет несколько десятков нанометров. Особую роль при этом играют компьютерные алгоритмы, необходимые при обработке и восстановлении двумерной функции фазы интерференционных полос.

На рис. 5.7 приведены интерферограммы поверхности арсенида галлия, полученные до воздействия на образец мощного фемтосекундного лазерного импульса с энергией, несколько превышающей порог абляции (рис. 5.7, *а*), и после воздействия импульса (рис. 5.7, *б*).

На рис. 5.7, *к* в форме картины полутонов представлена вычисленная методом нелинейной двумерной фильтрации Калмана [43-45] разность развернутых двумерных фазовых функций, полученных при фильтрации картин полос рис. 5.7, *а*, *б*. Глубина кратера прямо пропорциональна измеренной разности фаз, с коэффициентом пропорциональности  $\lambda/4\pi$ , где  $\lambda=400$  нм - длина волны излучения пробного импульса. Полученная глубина кратера около 50 нм совпадает с результатами непосредственных измерений профиля кратеров, выполненных дополнительно с использованием атомно-силового микроскопа [43].

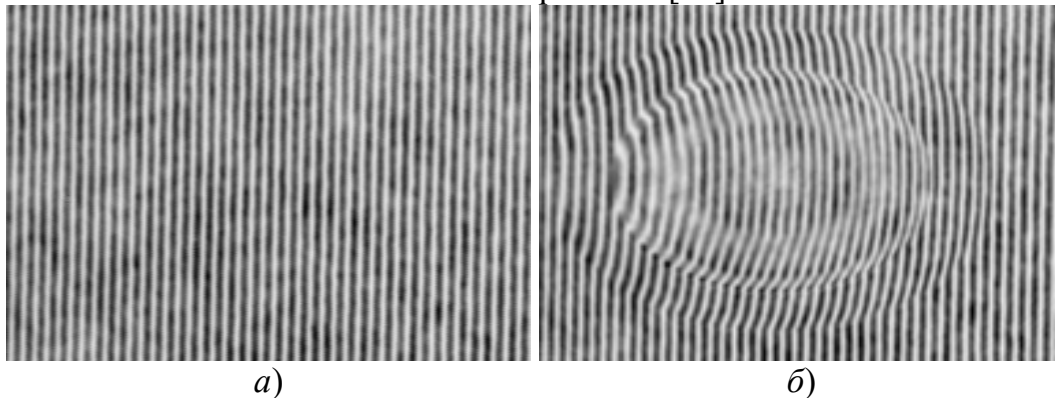


Рис. 5.7 (*а*, *б*). Интерферограммы поверхности арсенида галлия до (*а*), и после (*б*) воздействия фемтосекундного лазерного импульса

На рис. 5.7, *в-з* показан процесс восстановления полной фазы для интерферорограммы, приведенной на рис. 5.7, *б*. Приведены результаты подавления помех интерференционных полос, выравнивания фона и амплитуды, оценки локального направления и шага полос, восстановления приведенной и полной фазы. После определения полной фазы и для картины полос, показанной на 5.7, *а*, получен следующий результат для



разности полных фаз, 5.7, и. Сравнение результатов рис. 5.7, и, з позволяет сделать вывод, что разработанные методы подавления помех и восстановления фазы превосходят по точности и помехоустойчивости не уступают методу двумерной нелинейной адаптивной фильтрации Калмана.

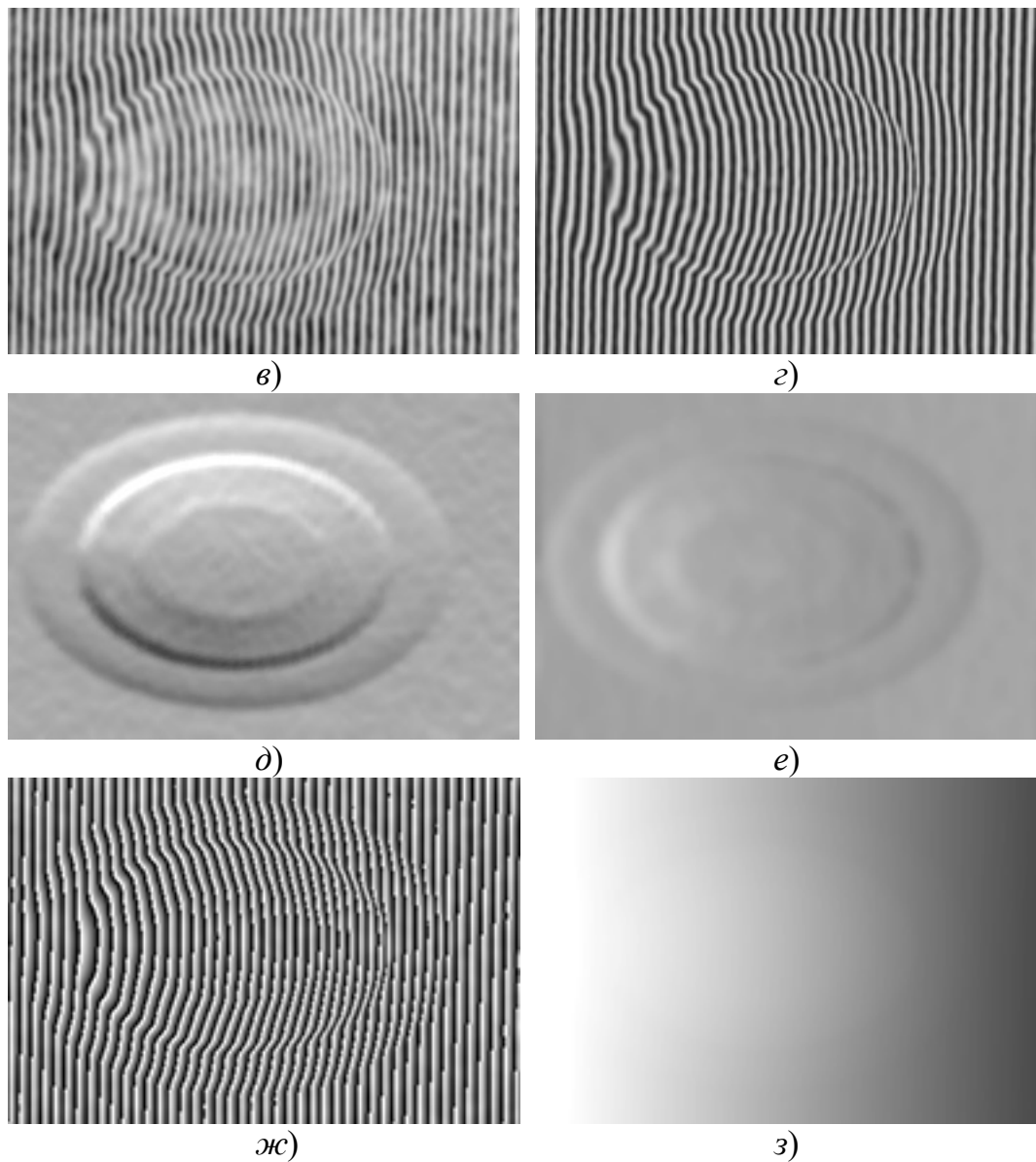


Рис. 5.7 (б-з). Результаты обработки интерферограммы 4.7, б (б, з), оценки локального направления и шага полос (д, е), восстановленные значения приведенной (ж) и полной (з) фазы

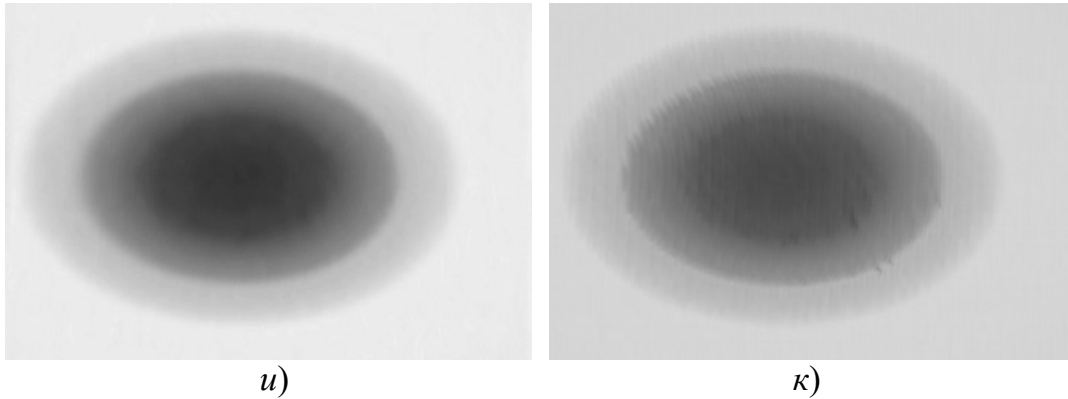


Рис. 5.7 (*u-k*). Восстановленные отклонения функций фазы с помощью разработанных методов (*u*) и нелинейной двумерной адаптивной фильтрации Калмана (*к*)

Экспериментальные интерферограммы, которые были получены для неровной поверхности цинка (см. рис. 5.8, *а*, рис. 5.9, *а*), подвергнутой травлению, являются более сложными для обработки. Для данных картин интерференционных полос характерны резкие изменения частоты, амплитуды, фона и направления полос. Кроме того, многие помехи не отличаются по частоте от сигнала полос. Обработка осложняется недостаточным разрешением, вся картина полос имеет разрешение 512 на 512 пикселей, и минимальный шаг полос составляет 4 пикселя.

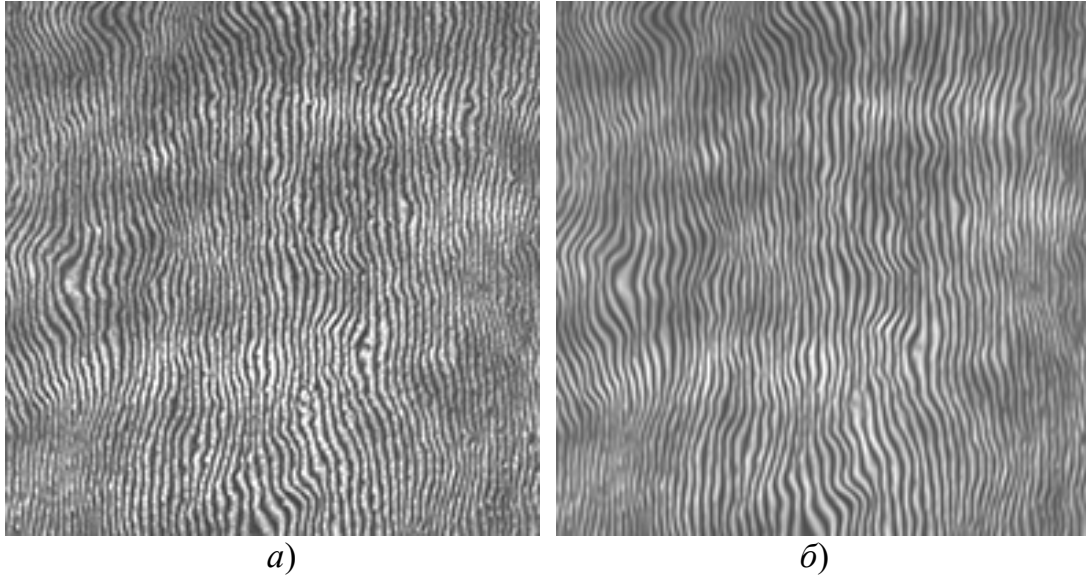
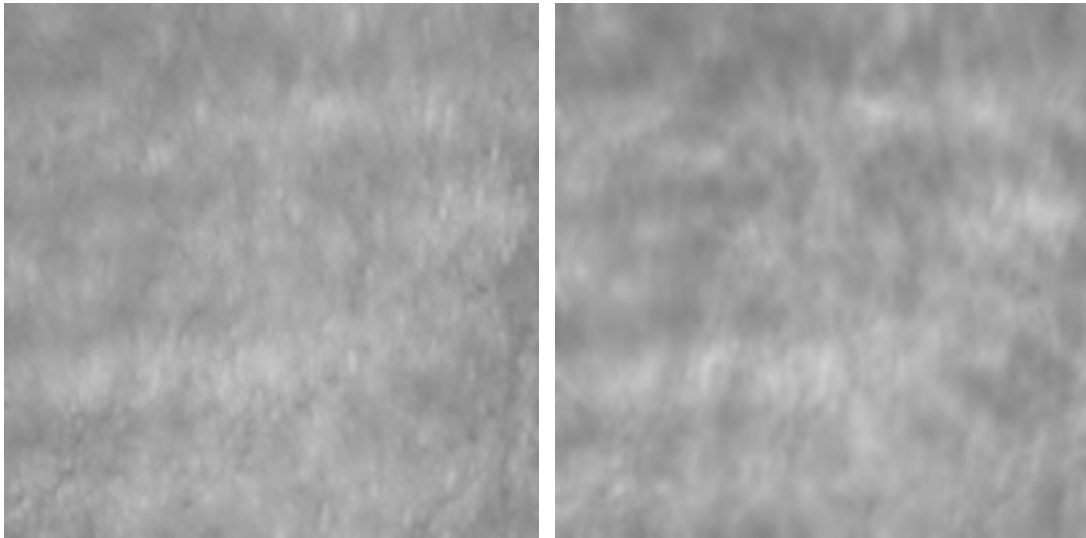


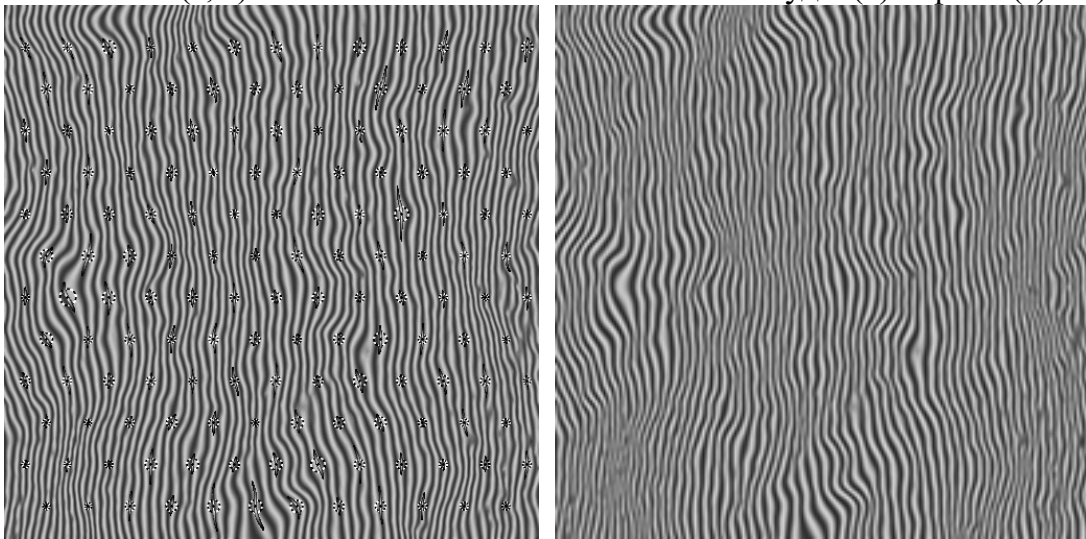
Рис. 5.8 (*а, б*). Исходная картина полос (*а*), картина полос после подавления помех (*б*)



в)

г)

Рис. 5.8. (в, г) Восстановленные значения амплитуды (в) и фона (г)



д)

е)

Рис. 5.8. (д, е) Результаты выравнивания картины полос (д) и дополнительного подавления помех (е)

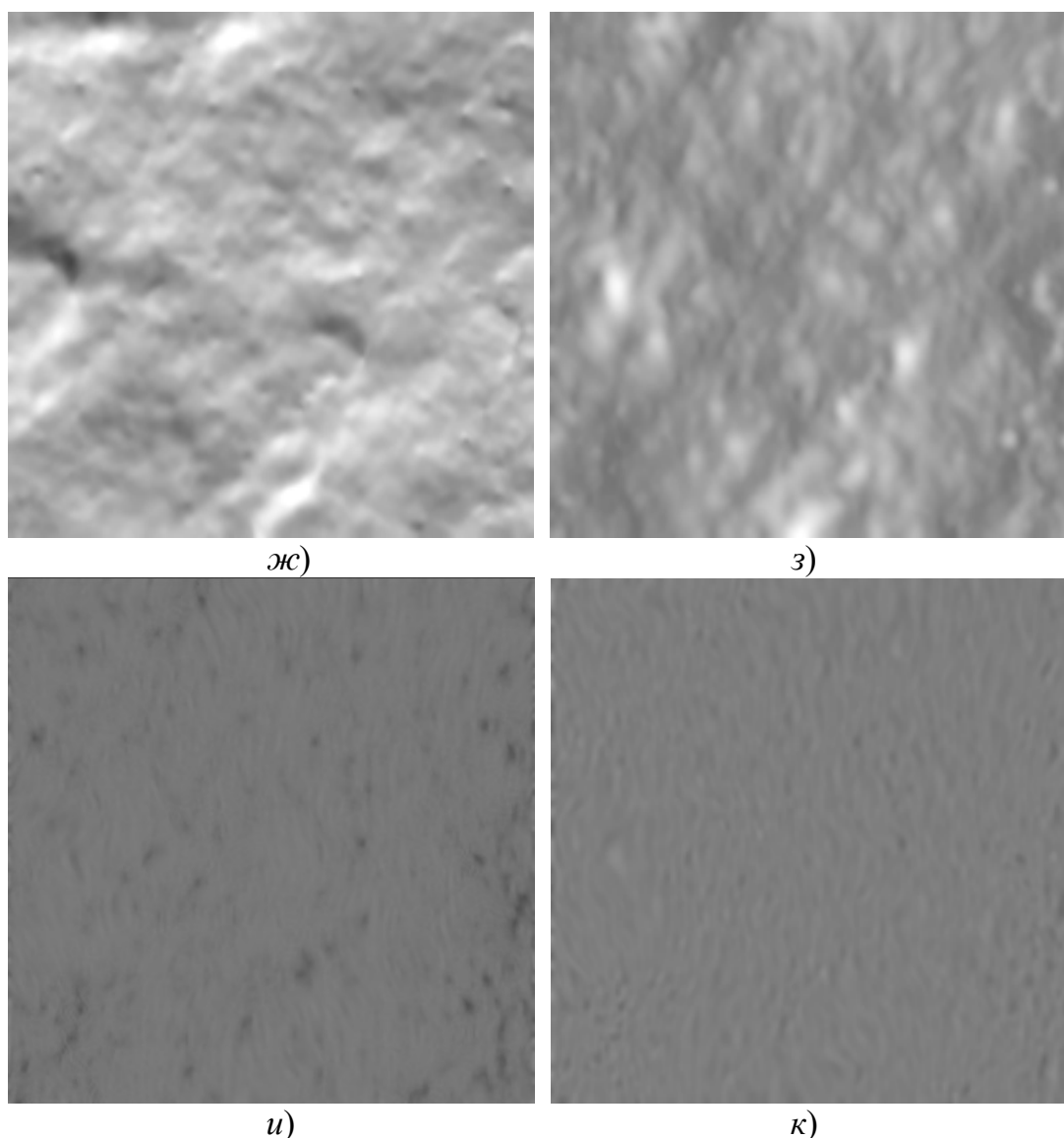


Рис. 5.8 (а-д). Оценки направления (а), шага (б), амплитуды (в) и фона полос (г) выровненной картины полос

Прямое восстановление разности фаз данных интерферограмм методами на основе преобразования Фурье и нелинейной адаптивной фильтрации Калмана, оказалось невозможным. Восстановить разность фаз с заметными погрешностями удалось только после предварительного подавления помех методом модификации гистограмм с детектированием линий экстремумов интерференционных полос, см. рис. 5.10, б. Часть погрешностей может быть обусловлена тем, что картины полос оказались сдвинуты друг относительно друга на 1 пиксель по вертикали и горизонтали.

Разработанные методы подавления помех и восстановления фазы позволили восстановить разность фаз данных интерферограмм рис. 5.10, а, без подобных искажений, кроме того, были локализованы все области

ненадежного восстановления фазы. Глубина кратера абляции, пропорциональная разности фаз интерферограмм с коэффициентом  $\lambda/4\pi$ , составляла около 60 нм, что существенно меньше характерной амплитуды исходной шероховатости поверхности. Это подтверждает высокую помехоустойчивость примененных методов.

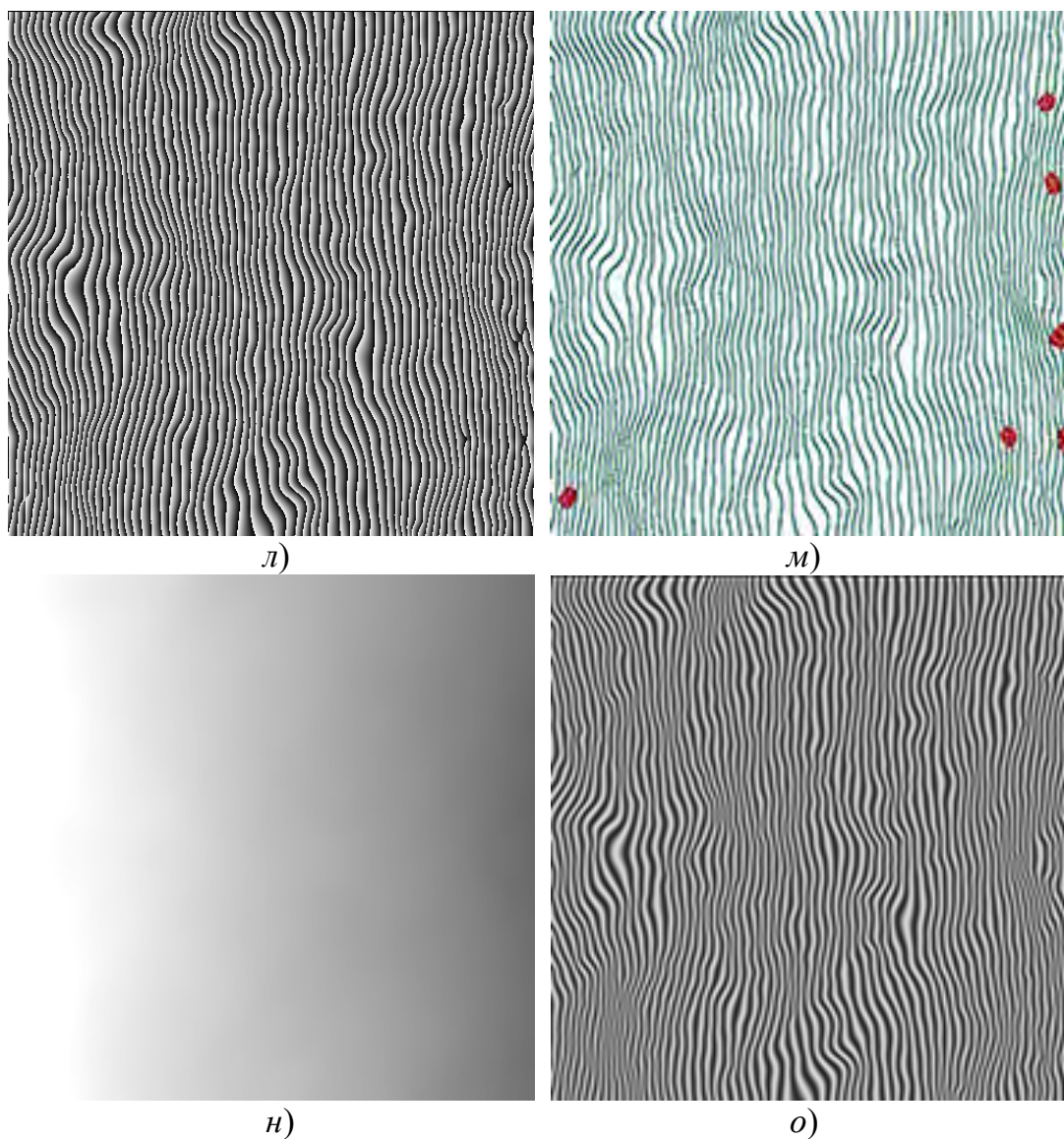


Рис. 5.8 (л-о). Значения приведенной фазы (л), детектированные ошибки восстановления фазы (м), значения полной фазы (н) полученные экстраполяцией, картина полос, картина полос, восстановленная по значениям полной фазы (о)

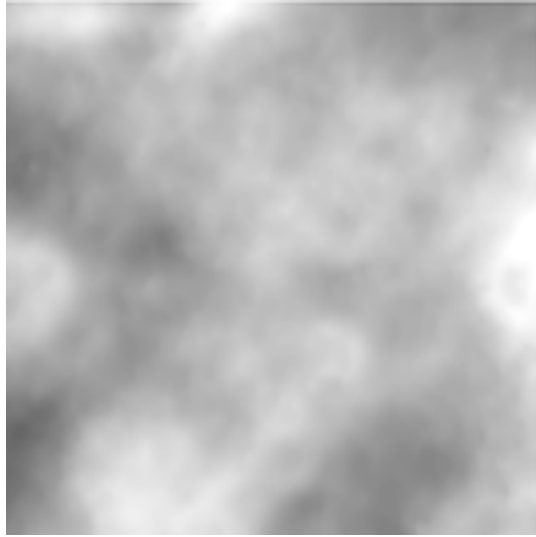


Рис. 5.8 (n). Отклонение фазы от плоскости (рельеф поверхности)

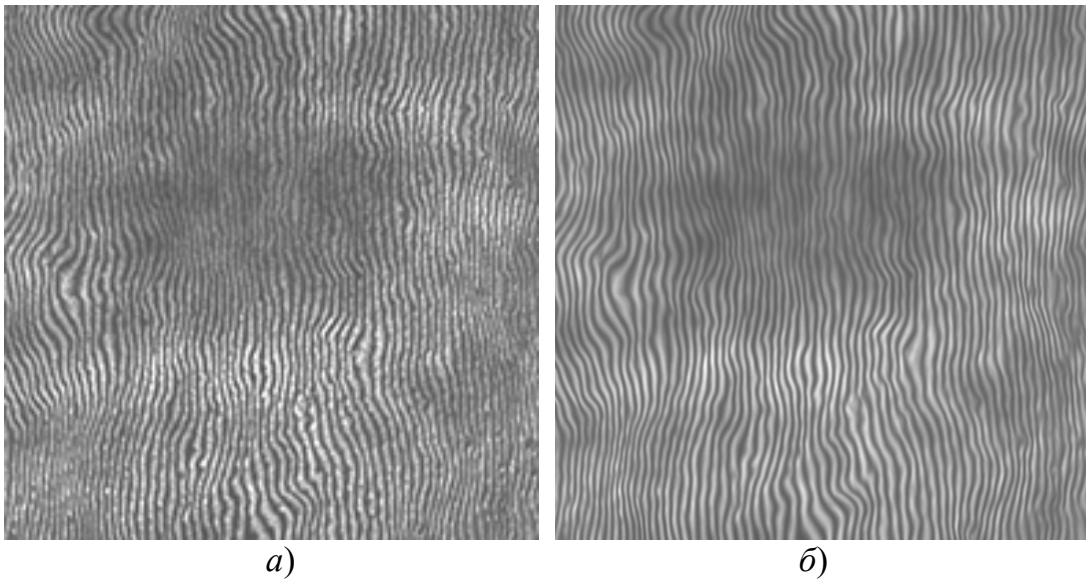


Рис. 5.9 (a, б). Исходная картина полос (a), картина полос после подавления помех (б)

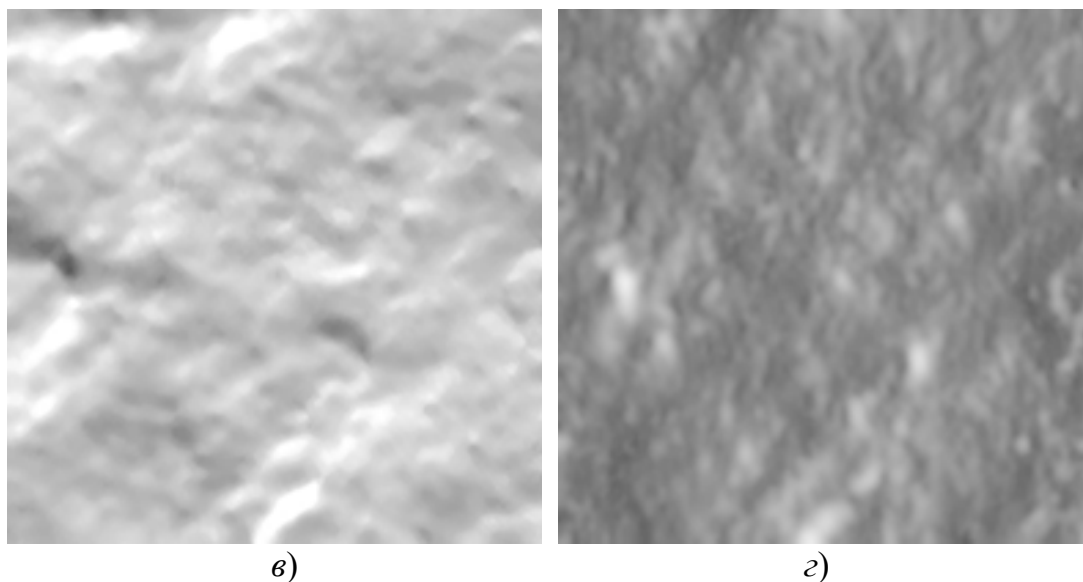


Рис. 5.9 (в,г). Восстановленные значения локального направления (в) и шага полос (г)

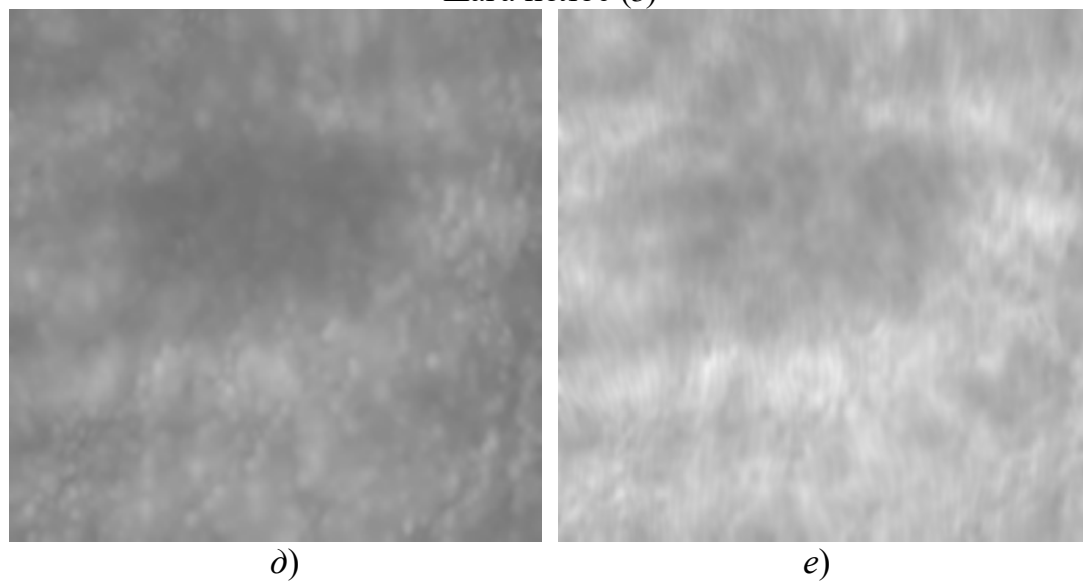


Рис. 5.8 (д, е). Оценки фона (д) и амплитуды (е) интерференционных полос

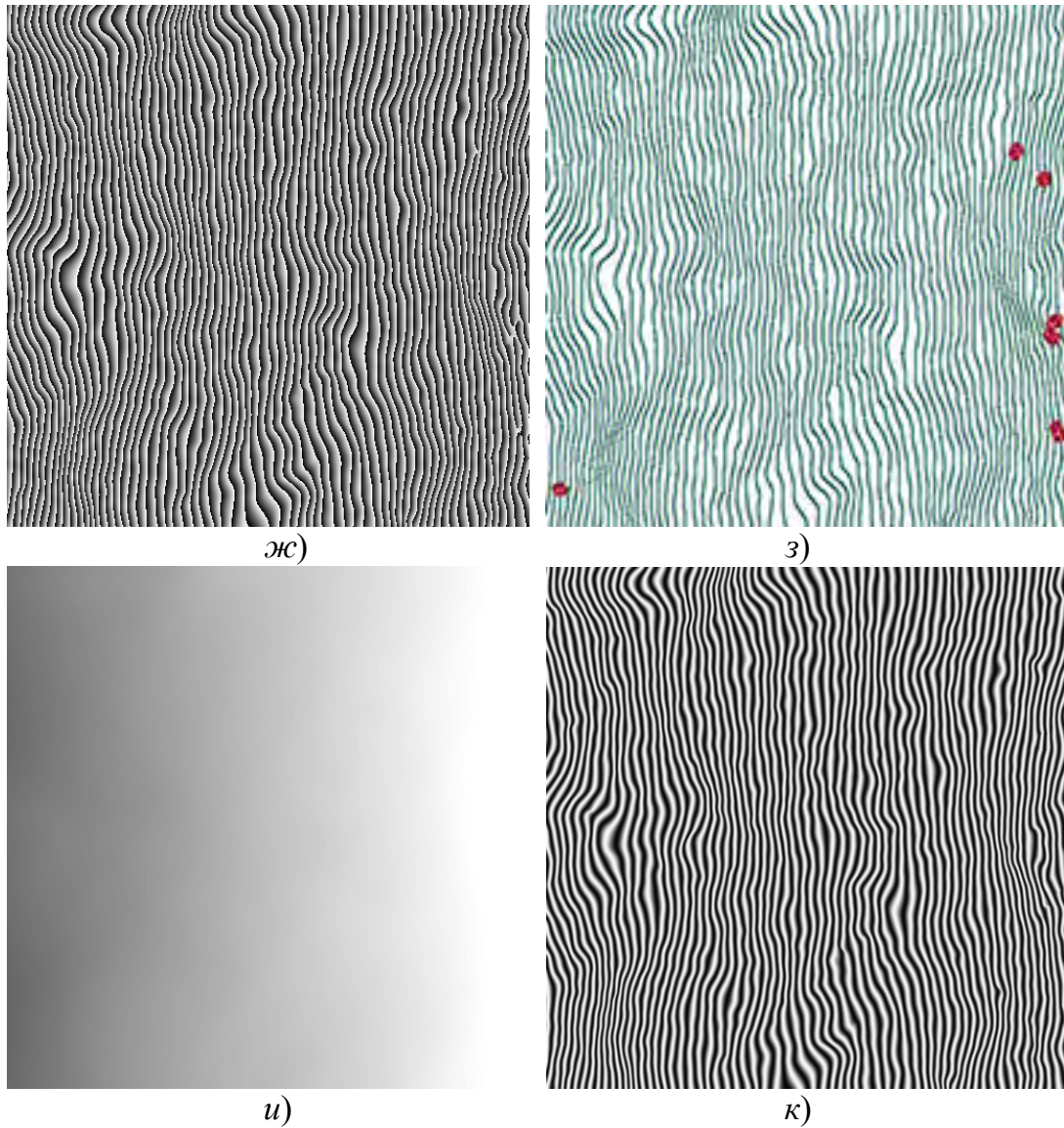
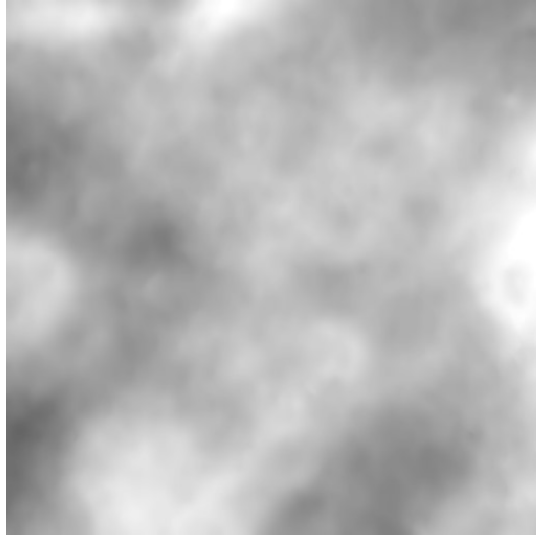


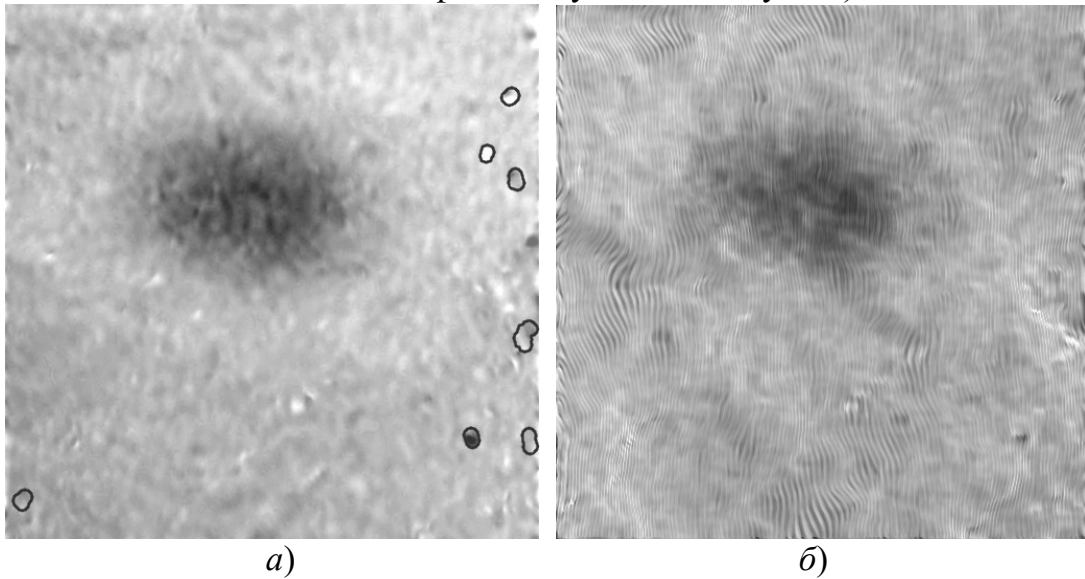
Рис. 5.8 (ж-к). Значения приведенной фазы (ж), детектированные ошибки восстановления фазы (з), значения полной фазы (и) полученные экстраполяцией, картина полос, картина полос, восстановленная по значениям полной фазы (к)





л)

Рис. 5.9 (л). Отклонение фазы от плоскости (рельеф поверхности после воздействия фемтосекундного импульса)



а)

б)

Рис. 5.10. Результаты восстановления разности фаз двумерных картин интерференционных полос разработанными методами, отмечены области недостоверного восстановления фазы, (а), и методом двумерной адаптивной нелинейной фильтрации Калмана после предварительного подавления помех (б).

## Глава 6. ПРОГРАММА FRINGE ANALISER, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ АДАПТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФАЗЫ ДВУМЕРНЫХ КАРТИН ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС

### 6.1 Общие сведения о программе

При интерферометрических измерениях и в системах трехмерного сканирования с когерентной подсветкой информация об объектах содержится в фазе зарегистрированных картин интерференционных полос. В различных практических приложениях требуется решение задачи восстановления фазы из зарегистрированных картин интерференционных полос. Наиболее простым распространенным способом является восстановление фазы с помощью методов фазового сдвига, основанных на регистрации нескольких картин интерференционных полос. Методы фазового сдвига усложняют систему измерения, медленны и не позволяют исследовать быстро протекающие процессы. Разработанная программа обеспечивает восстановление фазы по единственной картине интерференционных полос, что позволяет регистрировать быстро протекающие процессы или сканировать быстро смещающиеся 3D объекты.

Программа «FringeAnalyser» (свидетельство № 2012618842 от 28.09.2012) предназначена для анализа параметров (фон, амплитуда, шаг полос, локальное направление полос), подавления помех и восстановления приведенной и развернутой фазы картин интерференционных полос, зарегистрированных при интерферометрических измерениях и в системах трехмерного (3D) сканирования объектов. Программа обеспечивает восстановление фазы по единственной картине интерференционных полос. Программа написана на языке C++ с использованием библиотеки MFC.

Для функционирования программы «FringeAnalyser» необходима операционная система Windows не ниже версии Windows XP. Никакого специального программного обеспечения для функционирования программы не требуется. Программа написана на языке C++ в среде Microsoft Visual Studio 2008 с использованием библиотеки MFC.

При работе программ использованы персональные компьютеры, оборудованные монитором, манипулятором «мышь» и клавиатурой. Требуется x86 архитектура вычислительной системы и наличие оперативной памяти не менее 256 мб. Для вызова программы необходимо запустить файл FringeAnalyser.exe с любого носителя данных. Входными данными программы являются файлы в формате BMP, в которых сохранены картины интерференционных полос в полутоновом представлении. Дополнительная граница кадра также загружается в виде BMP файла. На выходе программы формируются изображения (BMP) полутонового представления обработанной картины полос и фазы.

Значения фазы также сохраняются в текстовый файл в виде матрицы значений с плавающей точкой (тип float).

## 6.2 Интерфейс программы

По логической структуре программа состоит из 3 основных частей, обеспечивающих выполнение следующих основных задач:

- 1) Оценку параметров (фон, амплитуда, шаг полос, локальное направление полос) и подавление помех интерференционных полос.
- 2) Восстановление приведенной фазы интерференционных полос.
- 3) Восстановление развернутой (полной) фазы интерференционных полос (восстановление формы трехмерного объекта).

Решение основных задач обеспечивается с помощью подпрограмм, вызываемых с помощью набора иконок ToolBar'a основного окна программы, и обеспечивающих (см. рис. 6.1):

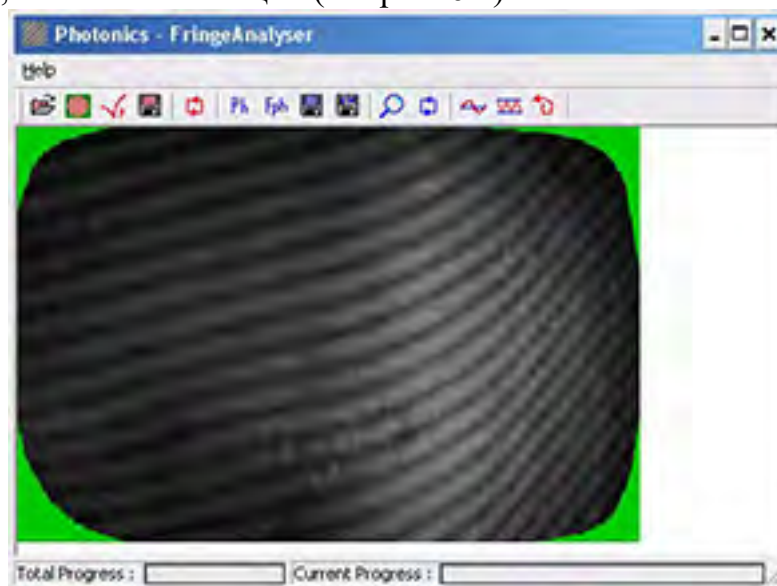


Рис. 6.1 Окно программы после загрузки картины полос и маски, определяющей границы исследуемого объекта

- а) Загрузку картины интерференционных полос в формате \*.bmp.
- б) Загрузку дополнительной маски в виде \*.bmp файла. Дальнейшая обработка выполняется только для точек маски с яркостью >127. Эта операция может быть пропущена при обработке.
- в) Задание параметров предварительной фильтрации (расширенный диалог), см. рис. 6.2, оценка параметров сигнала, таких как фон, амплитуда, шаг и направление полос в каждой точке, формирование адаптивного нелинейного фильтра и выполнение одного или нескольких шагов итерационной адаптивной фильтрации.

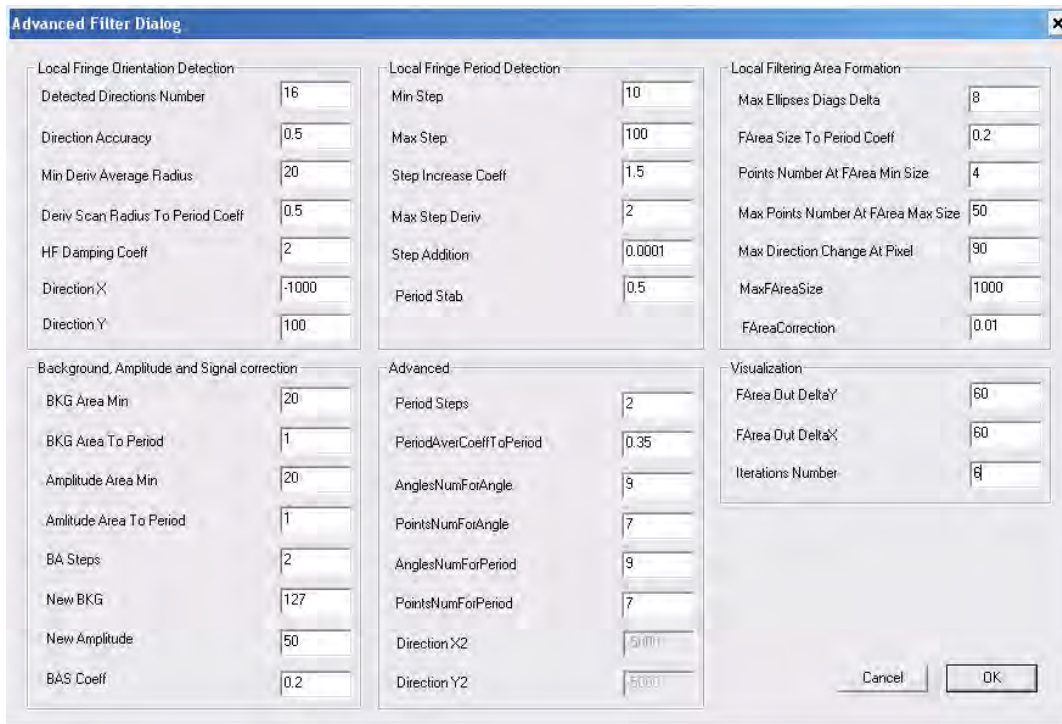


Рис. 6.2 Диалоговое окно с настройками методов, обеспечивающих итерационную оценку фона, амплитуды полос, направления полос, шага полос, выравнивание фона и амплитуды, формирование для каждой точки кадра адаптивного фильтра, обеспечивающего подавление помех без снижения видности полос и без искажения фазы

- г) Сохранение картины интерференционных полос на текущем шаге итерационной обработки. Эта операция может быть пропущена.
- д) Переключение режимов отображения результата обработки и детектированных локальных параметров сигнала полос (по циклу): обработанной картины полос с дополнительно приведенными значениями шага полос и границами областей фильтрации, см. рис. 6.3, фона, см. рис. 6.4, амплитуды, см. рис. 6.5, исходной картины полос, см. рис. 6.6, обработанной картины полос, см. рис. 6.7, смещений фазы с локальным направлением полос (работает только без загрузки границы, на рисунке приведен результат обработки без загрузки границы), см. рис. 6.8, периода в полутоновом представлении, см. рис. 6.9, направления полос в полутоновом представлении, см. рис. 6.10.

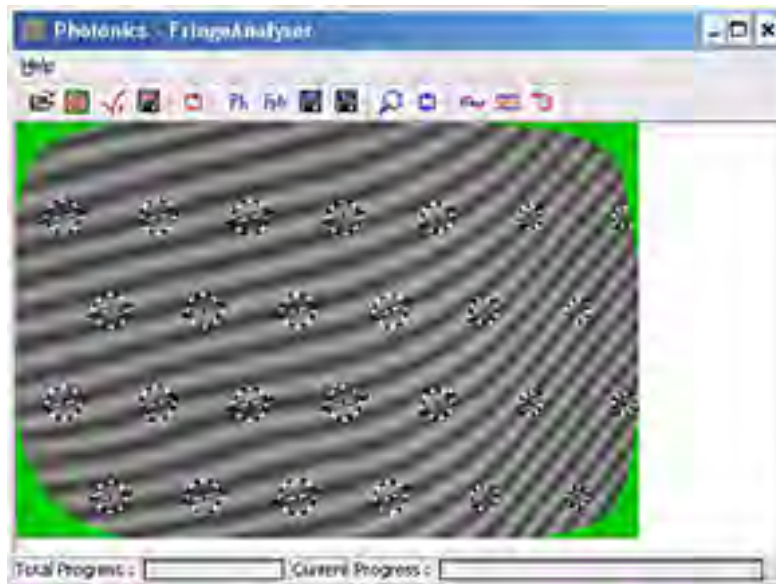


Рис. 6.3 Окно программы. Режим отображения обработанной картины полос с дополнительно приведенными значениями шага полос и границами областей фильтрации

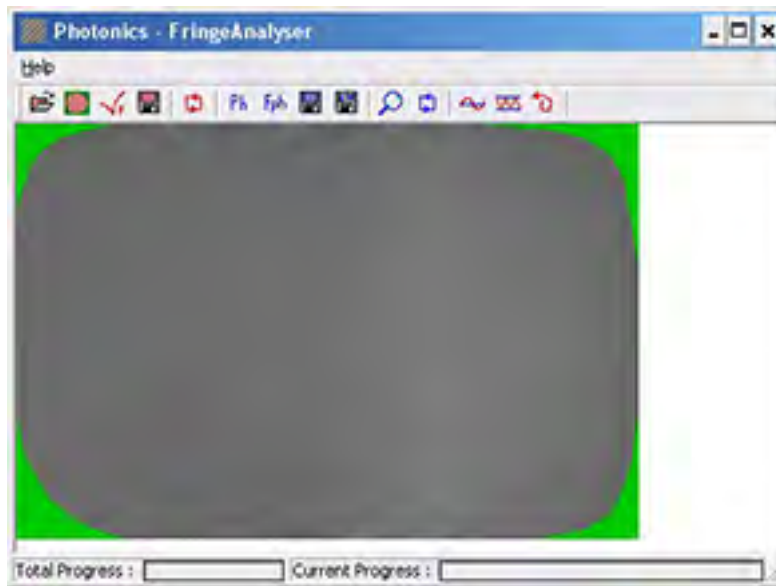


Рис. 6.4 Окно программы. Режим отображения фона

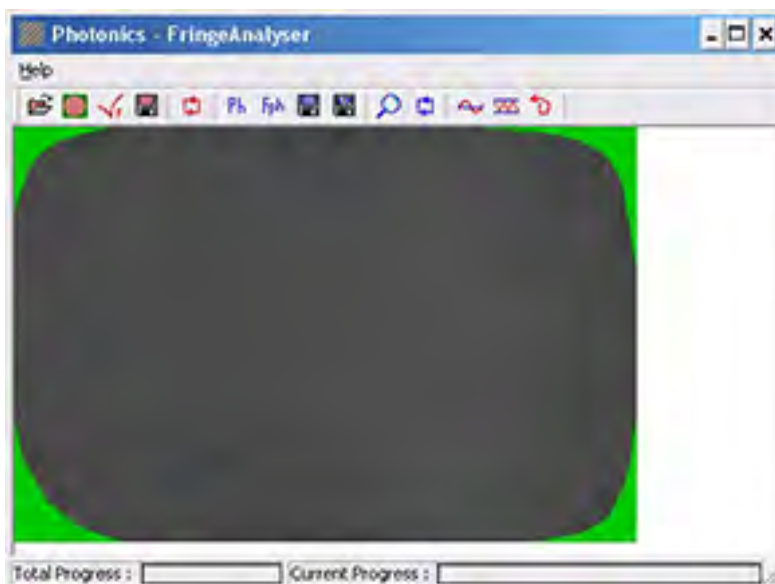


Рис. 6.5 Окно программы. Режим отображения амплитуды полос

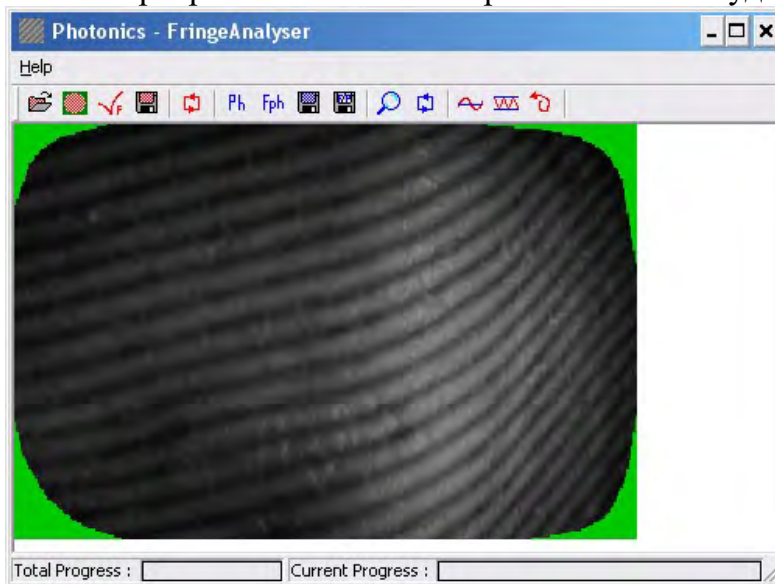


Рис. 6.6 Окно программы. Режим отображения исходной картины полос

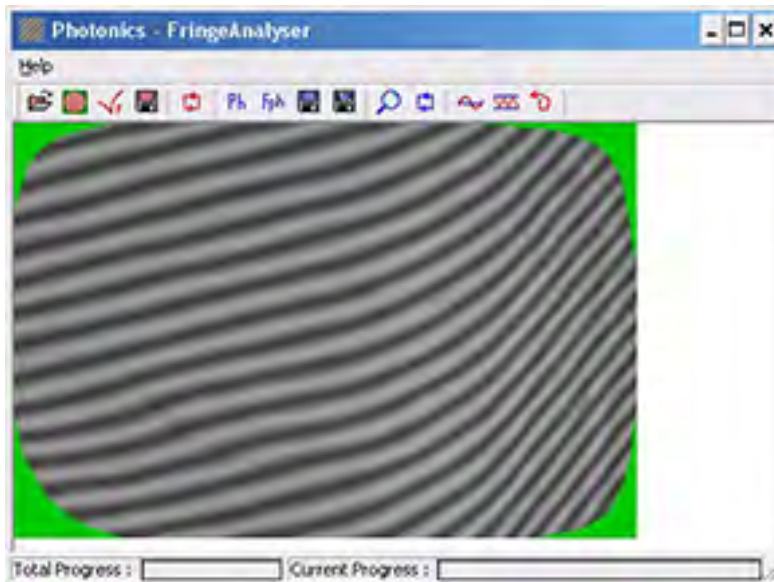


Рис. 6.7 Окно программы. Режим отображения обработанной картины ПОЛОС

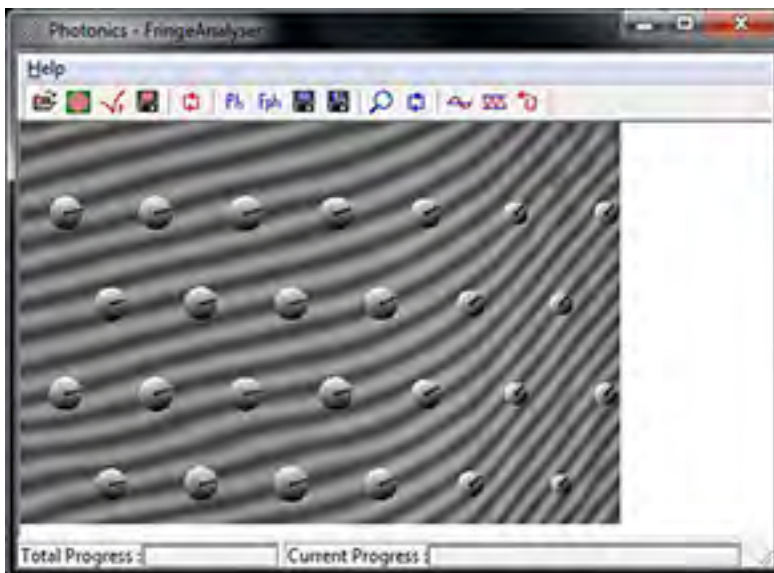


Рис. 6.8 Окно программы (без загрузки границы). Режим отображения обработанной картины полос, локального периода, локального направления полос и смещений фазы для некоторых точек

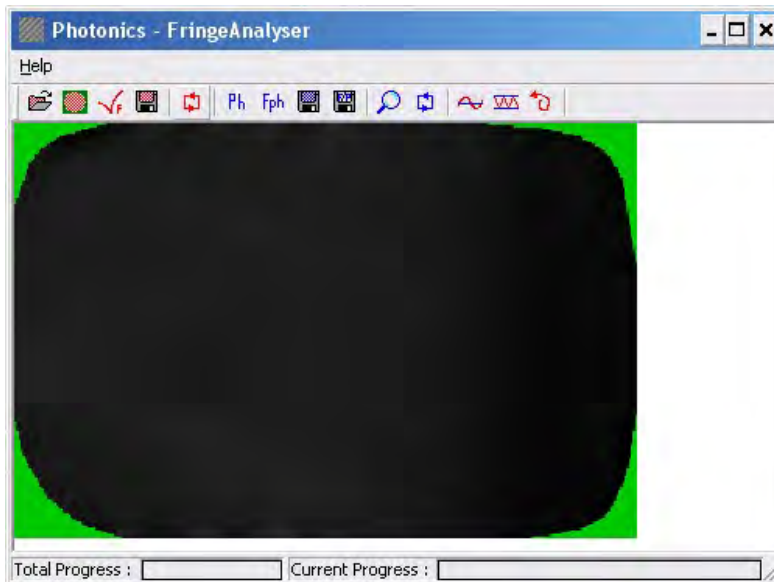


Рис. 6.9 Окно программы. Режим отображения шага полос (периода)

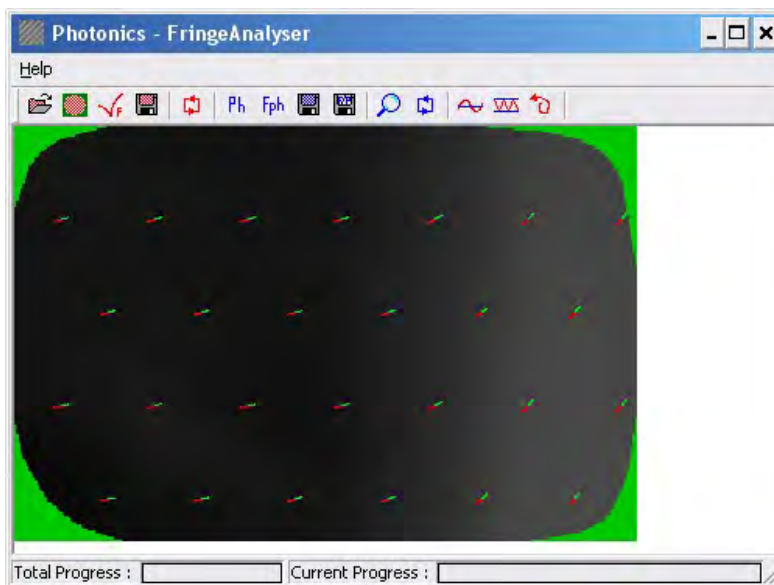


Рис. 6.10 Окно программы. Режим отображения локального направления полос

е) Вычисление приведенной фазы. Диалоговое окно с настройкой параметров вычисления приведенной фазы показано на рис. 6.11. Дополнительно вычисляются точные значения фона и амплитуды. После вычисления приведенной фазы становятся доступными режимы отображения приведенной фазы, фона и амплитуды, а также операции выравнивания фона и амплитуды (см. ниже).



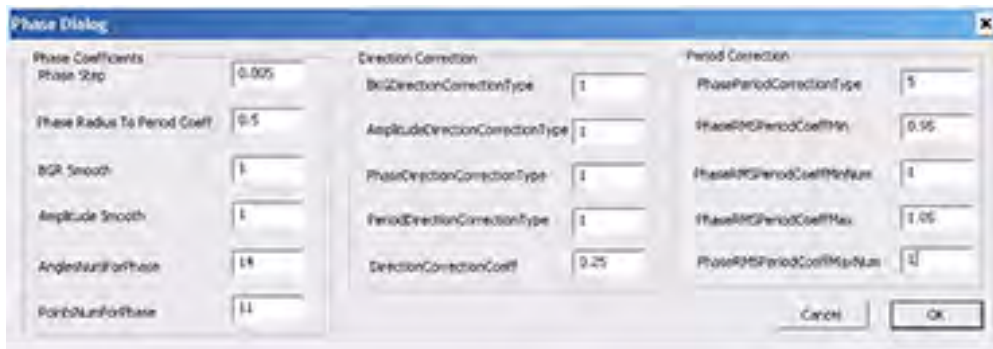


Рис. 6.11 Диалоговое окно с настройками методов, обеспечивающих вычисление точных значений фона, амплитуды, скорректированных значений периода и значений приведенной фазы

ж) Вычисление развернутой фазы. Диалоговое окно с настройками методов, обеспечивающих вычисление развернутой фазы приведено на рис. 6.12. При этом автоматически детектируются и устраняются сбойные участки восстановления развернутой фазы. Фаза разворачивается для полного кадра вне зависимости от заданных границ.

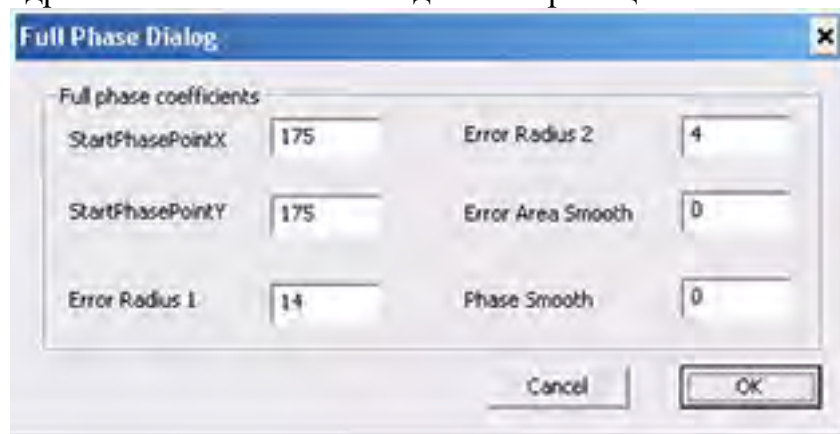


Рис. 6.12 Диалоговое окно с настройками методов, обеспечивающих вычисление развернутой фазы с устранением дефектов фазы и доопределением развернутой фазы по всему полю кадра

- и) Сохранение приведенной/развернутой фазы (в зависимости от режима отображения фазы) в полутоновом представлении в формате \*.bmp.
- к) Сохранение приведенной/развернутой фазы (в зависимости от режима отображения фазы) в текстовом представлении (float).
- л) Изменение контраста фазы в полутоновом представлении.
- м) Циклическое переключение режимов отображения фазы. До вычисления развернутой фазы: приведенная фаза, фон, амплитуда. После вычисления развернутой фазы: развернутая фаза, см. рис. 6.13, косинус развернутой фазы, см. рис. 6.14, фон, см. рис. 6.15, амплитуда, см. рис. 6.16, приведенная фаза, см. рис. 6.17, линии скачка приведенной фазы и сбойные области восстановления фазы, см. рис. 6.18.

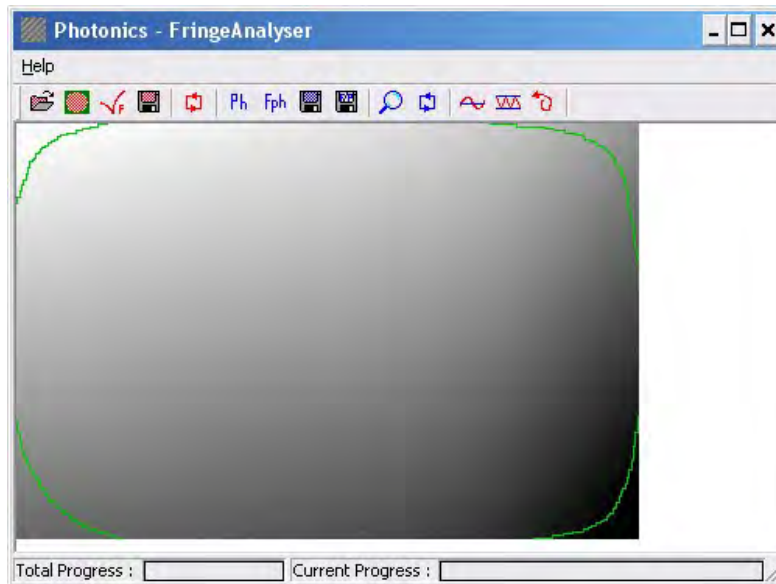


Рис. 6.13 Окно программы. Режим отображения развернутой фазы

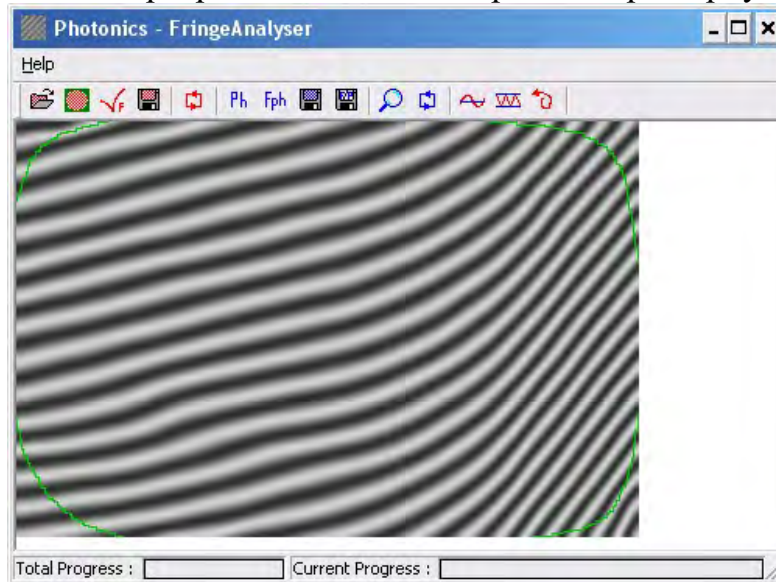


Рис. 6.14 Окно программы. Режим отображения косинуса развернутой фазы

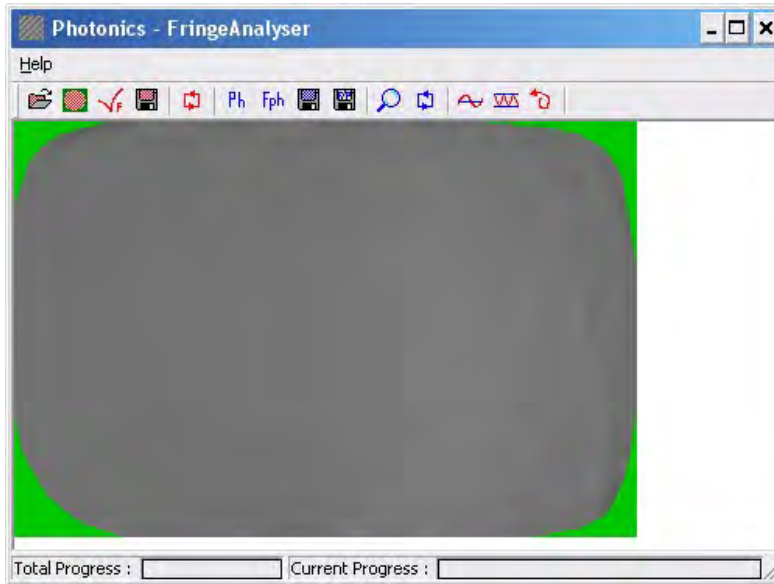


Рис. 6.15 Окно программы. Режим отображения точных значений фона  
ПОЛОС

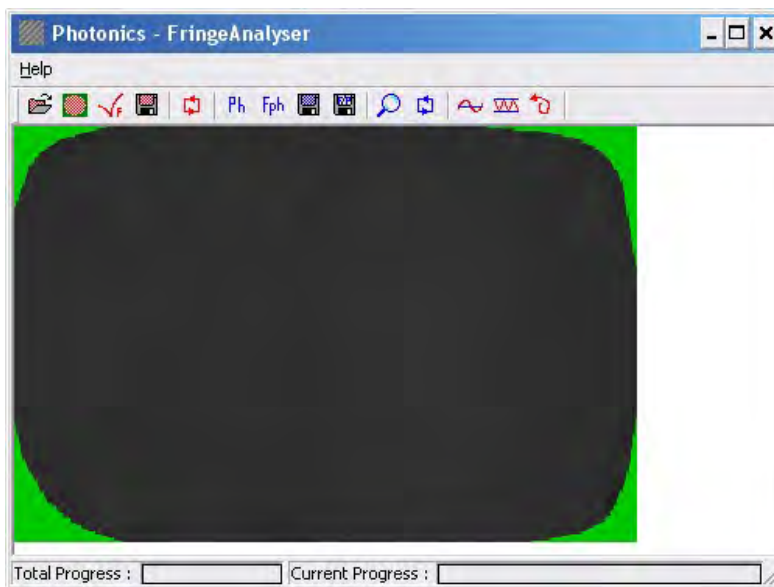


Рис. 6.16 Окно программы. Режим отображения точных значений  
амплитуды полос

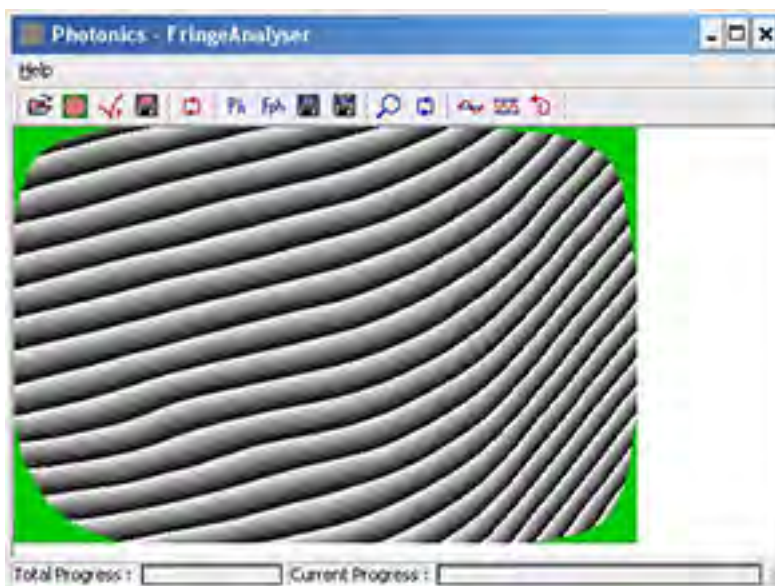


Рис. 6.17 Окно программы. Режим отображения значений приведенной фазы

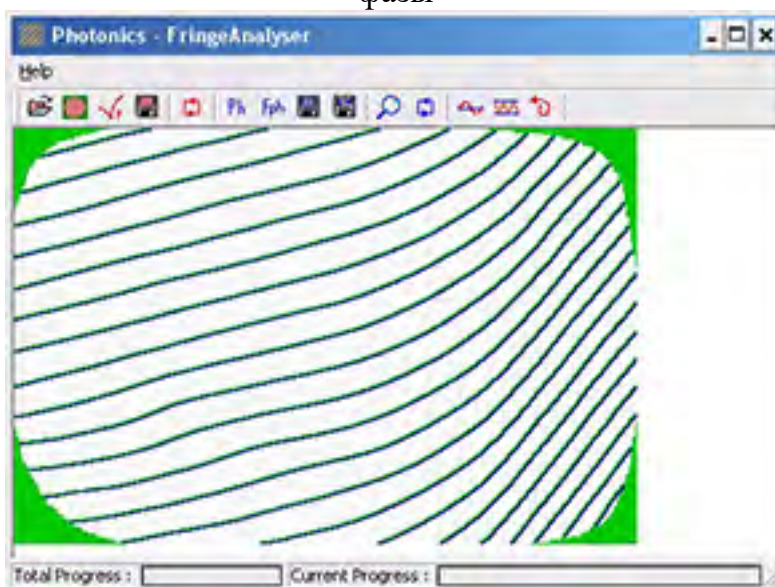


Рис. 6.18 Окно программы. Режим отображения линий скачка приведенной фазы и детектированных дефектов фазы

н) Последние 3 иконки предназначены для управления алгоритмами дополнительного выравнивания фона полос, выравнивания фона и амплитуды полос и отката внесенных изменений. Выполнение данных операций доступно после выполнения вычисления приведенной фазы, при котором значения периода, фона и амплитуды вычисляются с повышенной точностью. После дополнительного выравнивания фона и амплитуды можно продолжить фильтрацию или пересчитать фазу.

### 6.3 Настройка параметров программы для анализа интерференционных полос и итерационного подавления помех

Диалоговое окно программы, обеспечивающее настройку методов для анализа интерференционных полос и итерационного подавления помех, приведено на рис. 6.2.

Параметры сгруппированы в блоки наборов параметров:

Local Fringe Orientation Detection – набор параметров для вычисления локального направления полос;

Local Fringe Period Detection – набор параметров для вычисления локального шага полос;

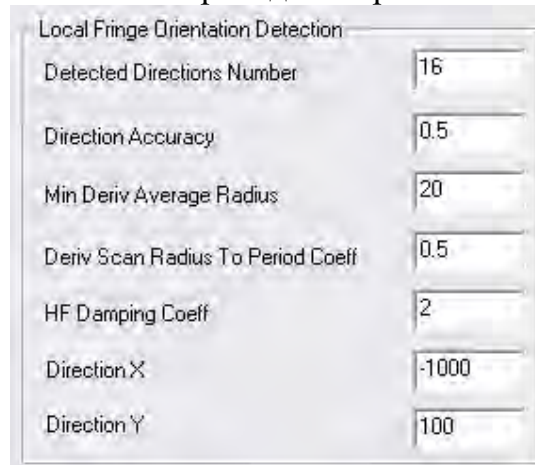
Local Filtering Area Formation – набор параметров для формирования импульсного отклика адаптивного фильтра;

Background, Amplitude and Signal Correction– набор параметров для автоматического выравнивания фона и амплитуды полос;

Advanced– набор параметров, позволяющих настроить усреднение шага полос и количество реальных анализируемых точек при вычислении шага полос и направления полос по заданной области;

Visualization– набор параметров, позволяющих настроить параметры отображения и задать количество шагов итерационной обработки;

Набор параметров Local Fringe Orientation Detection для вычисления локального направления полос приведен на рис. 6.19.



Local Fringe Orientation Detection	
Detected Directions Number	16
Direction Accuracy	0.5
Min Deriv Average Radius	20
Deriv Scan Radius To Period Coeff	0.5
HF Damping Coeff	2
Direction X	-1000
Direction Y	100

Рис. 6.19 Набор параметров Local Fringe Orientation Detection

Detected Directions Number - количество анализируемых направлений. Чем больше – тем точнее определяется направление полос. Существенно влияет на используемую память и на время обработки, так как для каждого направления вычисляется массив производных размером с исходное изображение.

Direction Accuracy – точность вычисления направления в градусах. Влияет на время обработки.

Min Deriv Average Radius – минимальный радиус усреднения производных при вычислении локального направления полос (пикс.). Чем больше этот параметр, тем более стабильно определяется направление полос в условиях помех. Влияет на скорость обработки. Данный параметр не должен превышать минимальный радиус кривизны полос.

Deriv Scan Radius To Period Coeff – коэффициент привязки радиуса области усреднения производных к текущему вычисленному значению шага полос. Основной коэффициент управления областью вычисления производных.

HF Damping Coeff – увеличение данного коэффициента приводит к уменьшению влияния ВЧ помех на направление полос. Лучше не трогать.

Direction X, Direction Y – Координаты точки, обход которой определяет знак фазы. В случае замкнутых полос – координаты точки центра полос. Для разомкнутых полос выбирается точка за пределами картины полос так, чтобы луч из этой точки пересекал все полосы в направлении возрастания фазы.

Набор параметров Local Fringe Period Detection для вычисления локального шага полос приведен на рис. 6.20.

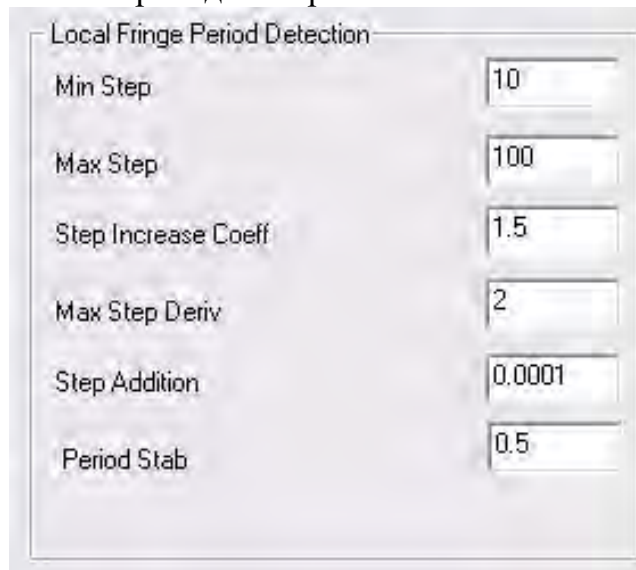


Рис. 6.20 Набор параметров Local Fringe Period Detection

Min Step - минимальный шаг полос. Данный параметр должен быть чуть меньше, чем вычисленное в пейнте минимальное расстояние между полосами.

Max Step - максимальный шаг полос. Должен быть больше, чем максимальное расстояние между полосами.

Step Increase Coeff – задает область вычисления шага полос для нового шага итерационного вычисления.

Параметр рекомендуется изменять с кратностью 0.5. Например, при значении 2, шаг полос (период полос) будет вычисляться по области, диаметров 2 шага полос. Чем больше этот коэффициент, тем меньше помехи влияют на процесс вычисления шага полос.

Max Step Deriv- ограничение производной уменьшения шага полос по полю кадра. Лучше не трогать.

Step Addition- считать константой. Лучше не трогать.

Period Stab – позволяет ограничить изменение шага полос для соседних шагов итерационного вычисления.

Local Filtering Area Formation – набор параметров для формирования импульсного отклика адаптивного фильтра, см. рис. 6.21. Области фильтрации (адаптивный импульсный отклик фильтра) формируются как деформированные эллипсы, минимальный размер которых привязан к шагу полос параметром FArea Size To Period Coeff, а максимальный в Max Ellipses Diags Delta раз больше минимального. Области фильтрации ориентированы максимальной диагональю вдоль локального направления полос.

Local Filtering Area Formation	
Max Ellipses Diags Delta	8
FArea Size To Period Coeff	0.2
Points Number At FArea Min Size	4
Max Points Number At FArea Max Size	50
Max Direction Change At Pixel	90
MaxFAreaSize	1000
FAreaCorrection	0.01

Рис. 6.21 Набор параметров Local Filtering Area Formation

Max Ellipses Diags Delta – отношение диагоналей эллипсов фильтрации. Чем больше этот параметр, тем сильнее помехи размываются вдоль полос. FArea Size To Period Coeff – коэффициент привязки минимальной диагонали к текущему значению шага полос. Остальные параметры определяют количество точек в пределах области фильтрации и влияют на скорость обработки.

Background, Amplitude and Signal Correction– набор параметров для автоматического выравнивания фона и амплитуды полос, см. рис. 6.22.

Background, Amplitude and Signal correction	
BKG Area Min	20
BKG Area To Period	1
Amplitude Area Min	20
Amplitude Area To Period	1
BA Steps	2
New BKG	127
New Amplitude	50
BAS Coeff	0.2

Рис. 6.22 Набор параметров Background, Amplitude and Signal Correction

BKG Area Min – минимальный размер области вычисления фона полос (в пикселях).

BKG Area To Period – коэффициент привязки области вычисления фона к текущему значению шага полос.

Amplitude Area Min – минимальный размер области вычисления амплитуды полос (в пикселях).

Amplitude Area To Period – коэффициент привязки области вычисления амплитуды полос к текущему значению шага полос.

New BKG – новое значение фона полос.

New Amplitude – новое значение амплитуды полос.

BAS Coeff – коэффициент задает степень коррекции амплитуды и фона за 1 шаг итерационной обработки.

Advanced – набор параметров, позволяющих настроить усреднение шага полос и количество реальных анализируемых точек при вычислении шага полос и направления полос по заданной области, см. рис. 6.23.





Рис. 6.23 Набор параметров Advanced

Period Steps – количество шагов дополнительного усреднения шага полос. Лучше не трогать.

Period Aver Coeff To Period – размер области усреднения шага полос по сравнению со значением шага полос. Остальные параметры задают количество точек в областях усреднения.

Visualization – набор параметров, позволяющих настроить параметры отображения и задать количество шагов итерационной обработки, см. рис. 6.24.

FArea Out DeltaY, FArea Out DeltaX – расстояние между точками отрисовки шага полос и областей фильтрации;

Iterations Number – количество шагов итерационной обработки.

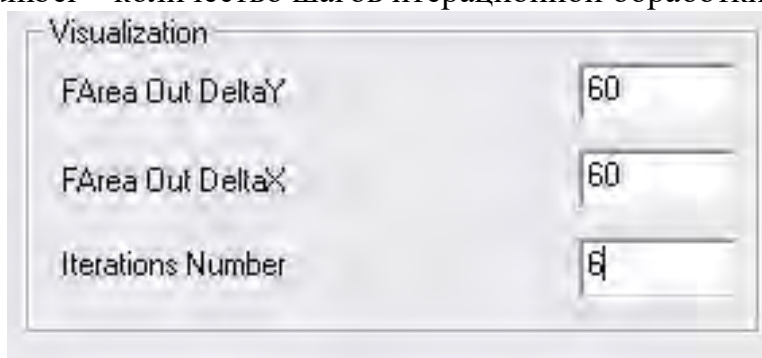


Рис. 6.24 Набор параметров Visualization

#### 6.4 Обработка интерференционных картин большого размера

В первоначальном варианте программа «FringeAnalyser» была скомпилирована под x32 системы. Это приводило к существенным ограничениям по использованию памяти, и не позволяло применять разработанную программу для обработки картин интерференционных

полос большого размера. Как правило, размер обрабатываемых картин полос не превышал 640x480 пикс. при анализе до 32 направлений полос.

В 2018 году программа была модернизирована для обработки изображений большого размера и собрана под x64 системы. Это позволило обеспечить обработку картин интерференционных полос размером до 2048x1536 пикс.

Примеры картин полос, см. рис. 6.25, рассмотренные в данном разделе получены в Центре Уникального Приборостроения РАН в рамках интерференционного контроля качества изготовления оптических деталей телескопов. Первая картина полос искажена изменением фона полос, характеризуется низким контрастом полос и высоким уровнем помех. Вторая картина полос пересвечена и искажена импульсными помехами.

Основной целью обработки было восстановление линий интерференционных экстремумов. С помощью рассмотренной программы выполнялось итерационное подавление помех с оценкой локального направления и шага полос, восстановление и развертывание фазы и восстановление линий экстремумов по значениям фазы.

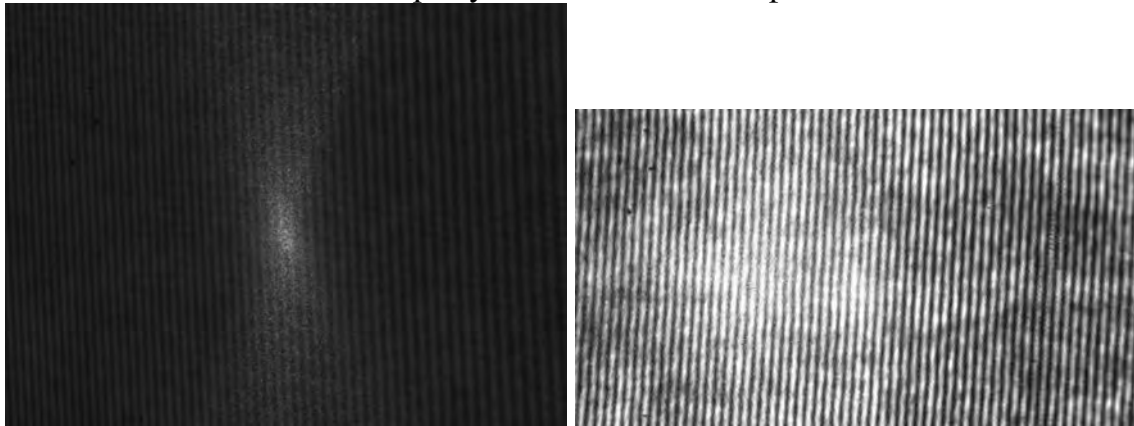


Рис. 6.25 Исходные картины интерференционных полос, искаженные различными помехами

На рис.6.26 приведено диалоговое окно с настройками параметров итерационного анализа параметров для первой картины полос. Результаты итерационной обработки приведены на рис. 6.27-6.29. В процессе адаптивной итерационной обработки выполняется автоматическое выравнивание фона и амплитуды полос. После 35 шага обработки выполняется восстановление приведенной и развернутой фазы, см. рис. 6.30. На рис. 6.31 приведены результаты восстановления картины полос по значениям фазы и результаты восстановления линий минимумов.



Рис. 6.26 Диалоговое окно с настройками параметров итерационного анализа параметров для первой картины полос

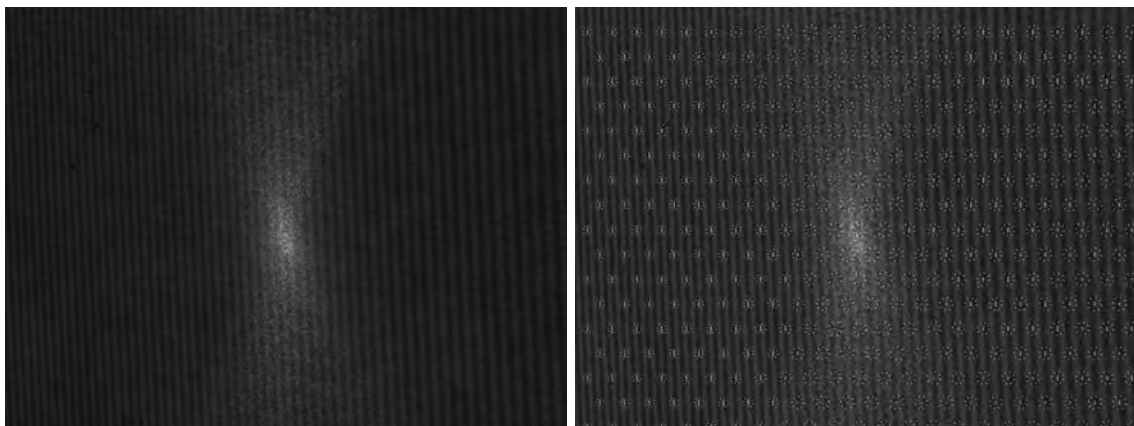


Рис. 6.27 Первая исходная картина полос и результат подавления помех и восстановления параметров полос для 3 шага обработки

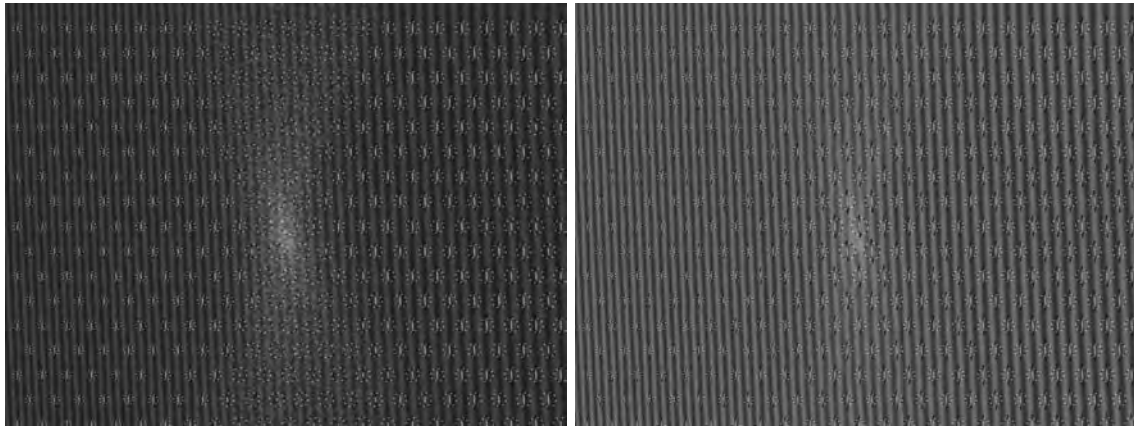


Рис. 6.28 Результаты подавления помех и восстановления параметров полос для 5 и 10 шагов обработки

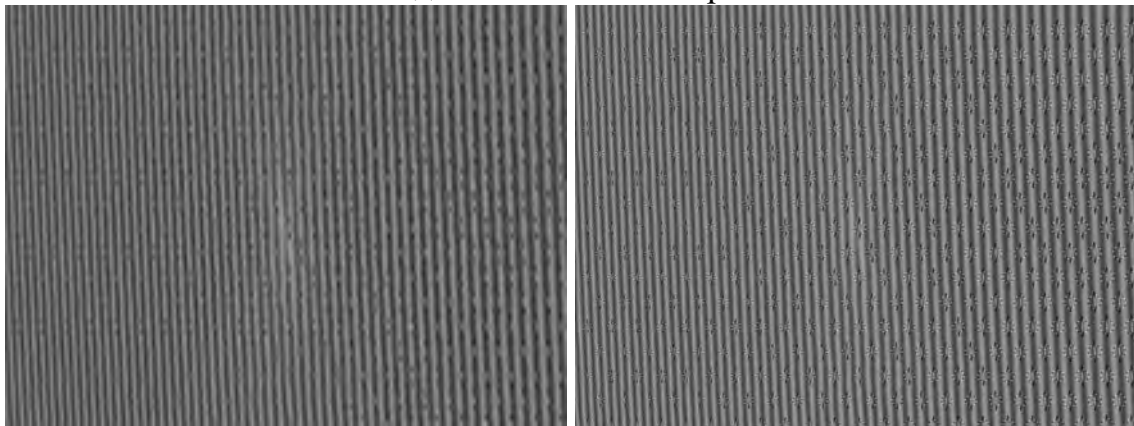


Рис. 6.29 Результаты подавления помех и восстановления параметров полос для 20 и 35 шагов обработки

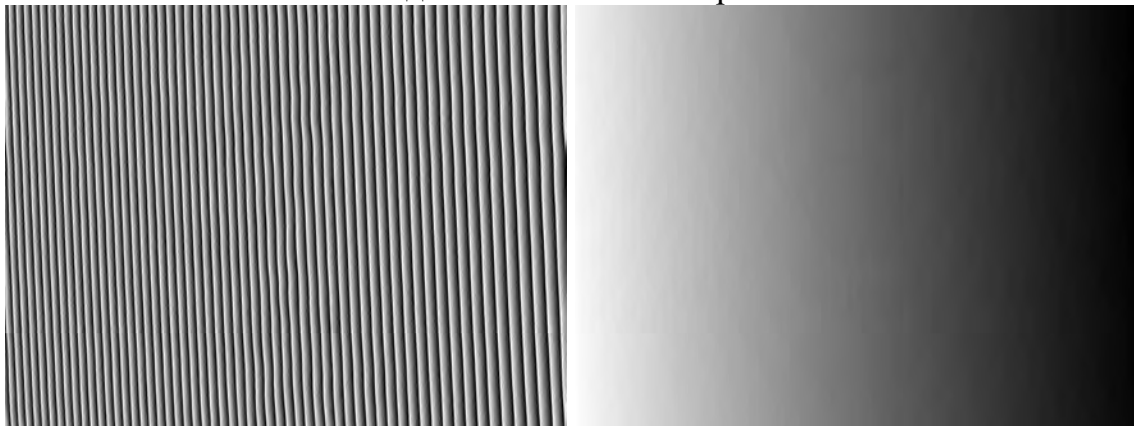


Рис. 6.30 Результаты восстановления приведенной и развернутой фазы



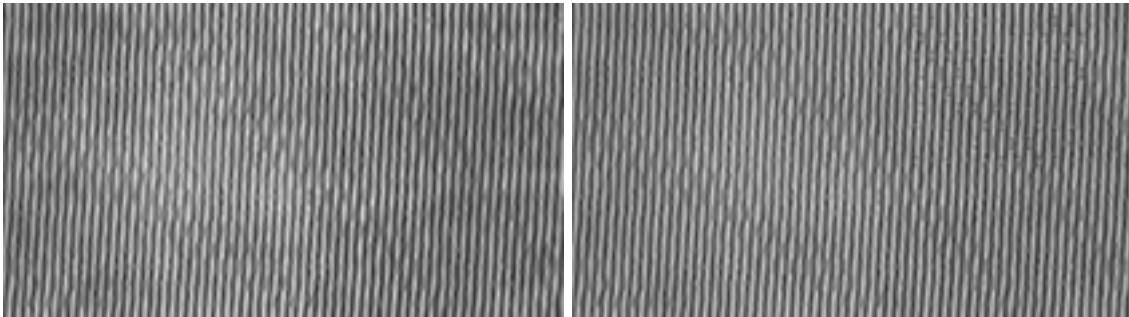
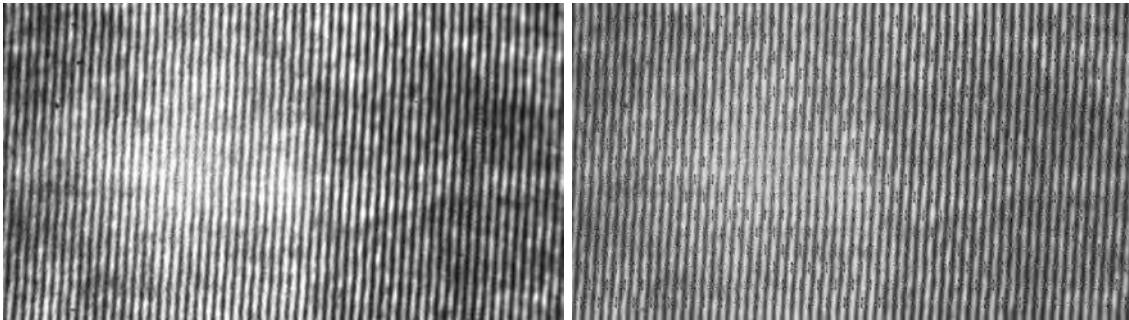


Рис. 6.33 Первая исходная картина полос и результаты подавления помех и восстановления параметров полос для 5, 10 и 15 шага обработки

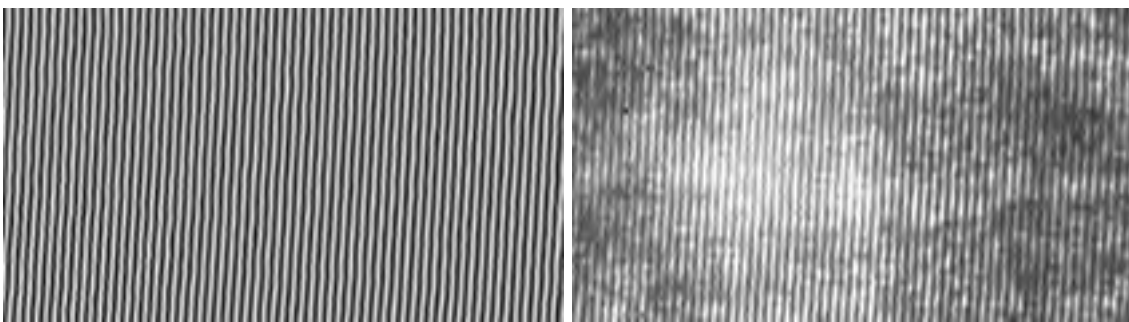
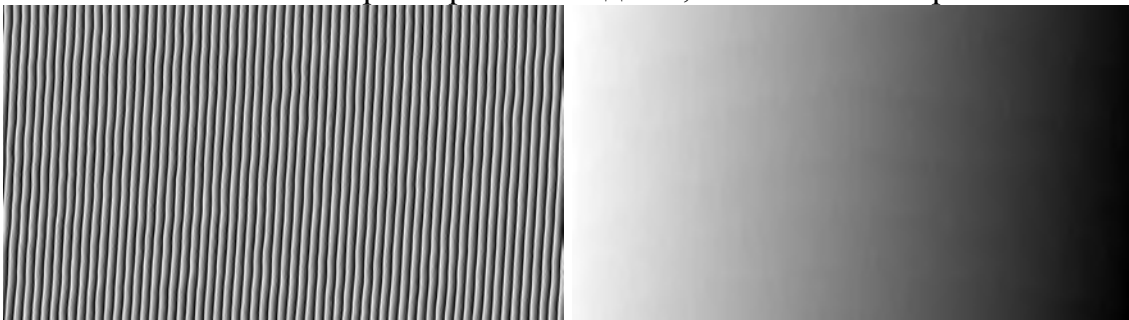


Рис. 6.34 Результаты восстановления приведенной и развернутой фазы восстановленная из значений фазы картина полос и результат построения линий минимумов на фоне исходной картины полос

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном учебном пособии рассмотрены особенности формирования интерференционных сигналов, представлены методы обработки интерференционных сигналов и картин интерференционных полос, методы восстановления и развертывания фазы двумерных интерференционных полос, рассмотрены особенности применения специализированного ПО для обработки интерференционных данных.

При разработке учебного пособия использовались материалы более чем 26 статей автора (Волков М.В.) на русском и английском языках, опубликованных в процессе подготовки материалов кандидатской диссертации, защищенной в 2009 году. Дополнительное исследование современных классических обзорных публикаций по компьютерной интерферометрии [59 – 61] показало, что существенного прорыва в методах обработки данных с момента разработки приведенных в данном учебном пособии методов и программного обеспечения не произошло, и данные методы являются актуальными и востребованными.

Приведенные в пособии методы обработки интерференционных данных, картины полос и ПО адресованы студентам, обучающимся по направлению подготовки 09.04.03 – "Прикладная информатика", по дисциплине "Компьютерная обработка экспериментальных данных", по направлению подготовки 12.04.02 – "Оптотехника", по дисциплине "Методы обработки интерферограмм", студентам при проведении НИР в рамках перечисленных направлений подготовки, а также аспирантам и специалистам, интересующимся проблематикой интерференционных измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 719 с.
2. Кольер Р., Беркхард К., Лин Л. Оптическая голография. – М.: Мир, 1973.
3. Голография. Методы и аппаратуры / Под ред. Гинзбурга В.М., Степанова Б.М. – М.: Сов. радио, 1974. – 260 с.
4. Ярославский Л.П., Мерзляков Н.С. Цифровая голография. – М.: Наука, 1982. – 419 с.
5. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. – М.: Мир, 1982. – 497с.
6. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. – М.: Наука, 1977. – 328 с.
7. Schnars U., Jüptner W.P.O. Digital recording and reconstruction of holograms in hologram interferometry and shearography // *Appl. Opt.* – 1994. – Vol.33. – P.4373-4377.
8. Голографические неразрушающие исследования / Под ред. Р.К. Эрф. – М.: Машиностроение, 1979. – 448 с.
9. Гужов В.И. Компьютерная интерферометрия: Учеб. Пособие. – Новосибирск : НГТУ, 2000. – 78 с.
10. Гужов В.И., Ильиных С.П. Компьютерная интерферометрия: Учеб. Пособие. – Новосибирск : НГТУ, 2004. – 252 с.
11. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
12. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. – М.: Наука, 1985.
13. Голографические измерительные системы. Вып. 1 // под ред. Казачка А.Г. – Новосибирск : НЭТИ, 1976. – 160 с.
14. Post D. Moiré Interferometry in *SEM Handbook on Experimental Mechanics*, A.S. Kobayashi .- New York, 1987.
15. Poon C.Y., Kujawinska M., Ruiz C. Spatial-carrier phase shifting method of fringe analysis for moiré interferometry // *J. Strain Analysis.* – 1993. – Vol.28. – P.79-88.
16. Гришанов А.Н., Де С.Т., Денежкин Е.Н., Хандогин В.А. Цифровая обработка интерферограмм на основе муаровых эффектов // *Автометрия*, 1986. – № 4. – С. 97-104.
17. De Nicola S., Ferraro P., Gurov I., Koviazin R., 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. – Vol.11, N9. – P.1328-1334.
18. Нагибина И.М. Интерференция и дифракция света. – Л.: Машиностроение, 1985.



19. Гуров И.П., Нагибина И.М. Структура многоканальных интерференционных измерительных систем для прецизионного контроля геометрических характеристик объектов // Известия ВУЗов. Приборостроение. 1991. – № 9. – С. 59-66.
20. Васильев В.Н., Гуров И.П. Оптическая интерферометрия и информационные технологии: оптическая обработка информации // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 1996. – № 5. – С. 5-13.
21. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. методы решения некорректных задач. – Москва: Наука, 1974.
22. Васильев В.Н., Гуров И.П. Оптическая интерферометрия и информационные технологии: обучающие системы. – 1996. – № 6. – С. 21-30.
23. Гуров И.П. Методы и техника автоматической обработки сигналов в интерференционных измерительных системах // Измерения, контроль, автоматизация. Выпуск 2, 1990. – С. 69-79.
24. Горелик Г.С. О применении модуляционного метода в оптической интерферометрии // ДАН СССР, 1952. – Т.83. – № 4. – С. 549-552.
25. Hunloon R.D., Weiss A., Smith W. Electronic fringe interpolator for an optical interferometer // J. Opt. Soc. Am. – 1954. – Vol. 44. – N 4. P. 264-269.
26. Эрцин И.Ш. Модуляционный метод измерения весьма малых смещений разности фаз в интерференционных схемах // Измерительная техника., 1968. – № 5. – С. 24-27.
27. Уонг К., Варвиг Р., Экман П. Применение акустооптического метода для измерения и задания субангстремных перемещений зеркала // приборы для научных исследований., 1982. – № 7. С. 28-33.
28. Шестопалов Ю.Н., Драпкин М.Я. Фотоэлектрические интерферометры для научных исследований. М., 1978. – 49 с. (Обзор информ. / ЦНИИТЭИ приборостроения; ТС-4).
29. Коломийцев Ю.В. Интерферометры. Основы инженерной теории. Применение. – Л.: Машиностроение, 1976. – 295 с.
30. Коронкевич В.П., Соболев В.С., Дубнищев Ю.Н. Лазерная интерферометрия. – Новосибирск: Наука, 1983. – 213 с.
31. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. Лазерное гетеродинамирование. – М.: Наука, 1985.
32. Wyant J.C. Interferometric optical metrology: basic principles and new systems // Laser Focus, 1982. – V. 18. – N. 5. – P. 65-71.
33. Creath K. Phase measurement interferometry techniques // Progr. Opt. - 1988. – Vol. 26, Ch.5. – P. 349-383.
34. Rimmer M.P., King C.M., Fox D.G. Computer program for the analysis of interferometric test data // Appl. Opt. – 1972. – Vol. 11, № 12. – P. 2790-2796.

35. Robinson D.W. Automatic fringe analysis with a computer image-processing system // *Appl. Opt.* – 1983. – Vol. 22, № 14. – P. 2169-2176.
36. Yatagai T., Nakadate S., Idesawa M., Saito H. Automatic fringe analysis using digital image processing techniques // *Opt. Eng.* – 1982. – Vol. 21, № 3. – P. 432-435.
37. Волков М.В. Восстановление линий экстремумов и фазы зашумленных интерференционных полос с применением метода нелинейной локально-адаптивной фильтрации // *Фундаментальные проблемы оптики-2002 СПб, 2002.* – С. 138-140.
38. Takeda M., Ina H., and Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry // *J. Opt. Soc. Am.* – 1982. – Vol.72. – P. 156-160.
39. Masy W.W. Two-dimencional fringe-pattern analysis // *Appl.Opt.* – 1983. – Vol. 22, № 3. – P. 3898-3901.
40. Roddier C., Roddier F. Interferogram analysis using Fourier transform techniques // *Appl.Opt.* – 1987. – Vol. 26, № 9. – P. 1668-1673.
41. Schemm J.B., Vest C.M. Fringe pattern recognition and interpretation using nonlinear regression analysis // *Appl. Opt.* .– 1983. .– Vol.22. .– P.2850-2853.
42. Cordero-Davila A., Cornejo-Rodrigues A., Cardona-Nunez O. Polynomial fitting of interferograms with Gaussian errors of fringe coordinates. I: Computer simulations // *Appl. Opt.* .– 1994. .– Vol.33. .– P.7339-7342.
43. Захаров А.С., Волков М.В., Гуров И.П., Темнов В.В., Соколовски-Тинтен К., фон дер Линде Д. Интерферометрическая диагностика кратеров абляции при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов // *Оптический журнал, 2002.* – Т.69, №7. – С.40-45.
44. Gurov I.P., Zakharov A.S. Dynamic nonlinear analysis of stochastic interference fields. In: *ICONO 2001: Nonlinear Optical Phenomena and Nonlinear Dynamics of Optical Systems* , Drabovich K.N., Kazak N.S., Makarov V.A., Voitovich A.P., eds. // *Proc. SPIE, 2002.* – V. 4751. – P. 402-409.
45. Захаров А.С. Восстановление фазы интерференционных полос методом нелинейной двумерной фильтрации Калмана // *Вестник СПбГИТМО(ТУ). Выпуск 6. Информационные, вычислительные и управляющие системы. Санкт-Петербург: СПбГИТМО(ТУ). 2002.* С. 157-161.
46. Bouma V.E., Tearney G.J. *Handbook of optical coherence tomography* - New York, USA: Marcel Dekker Inc., 2002.
47. Chen Z., Miller T.E., Dave D., Nelson J.S. Optical Doppler topographic imaging of fluid flow velocity in strongly scattering media // *Optics Letters.* - 1997. - V. 22. - P. 64-66.

48. Izatt J.A. In vivo bidirectional color Doppler flow imaging of picoliter blood volumes using optical Doppler tomography // *Optics Letters*. – 1997. – V. 22. – P. 1439-1441.
49. De Nicola S., Ferraro P., Gurov I., Koviazin R., Volkov M. Noise-immune interference fringe analysis by modification of local intensity histogram and 2D Fourier transform method // *Proc. SPIE*, 2001. – Vol.4353. – P.292-297.
50. Волков М.В. Нелинейная фильтрация зашумленных интерференционных полос с пространственно зависимой импульсной реакцией системы // *Проблемы когерентной и нелинейной оптики сборник статей ИТМО*. – СПб. – 2000. – С. 245-257.
51. Gurov I., Volkov M. Distorted images enhancement by the nonlinear local histogram modification method // *Proc. SPIE*, 2001. – Vol. 4541. – P. 393-400.
52. Gurov I., Volkov M. Distorted noisy interferograms enhancement and evaluation by the nonlinear 2D data-dependent fringe processing // *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection II: Application in Industrial Design*, Osten W., Jueptner W. P. O., and Kujawinska M., eds. *Proc. SPIE*, 2001. –Vol. 4398. – P. 255-264.
53. Gurov I. and Volkov M. Nonlinear filtering of noisy interference fringes with the 2-D spatially-dependent filter impulse response // *ICONO 2001: Quantum and Atomic Optics, High-Precision Measurements in Optics, and Optical Information Processing, Transmission, and Storage*, Bagayev S.N., Chesnokov S., Chirkin A.S. and Zadkov V.N., eds. *Proc. SPIE*, 2002. – Vol. 4750. – P. 256-265.
54. Volkov M. Nonlinear local-adaptive filtering of noisy interference fringes // *Advances in optics and electromagnetics of photonic band gap structures, Proceeding of the seminar "Optics of Photonic Crystals"*, International Conference for young scientists "Optics'2001", St. Petersburg, 2001. – P. 51-53. Chugunov V., De Nicola S., Ferraro P., Finizio A., Gurov I., Koviazin R., and Volkov M. Phase reconstruction method for wave front analysis in two beam shearing interferometry // *3<sup>rd</sup> Int. Workshop FRINGE'01*. – 2001.
55. Захаров А.С. Нелинейный анализ стохастических интерференционных полей // *2-ая международная конференция молодых ученых и специалистов "Оптика-2001". Сборник трудов*. – Санкт-Петербург, 2001. – С. 197.
56. Gurov I.P., Zakharov A.S. Dynamic nonlinear analysis of stochastic interference fields. In: *ICONO 2001: Nonlinear Optical Phenomena and Nonlinear Dynamics of Optical Systems* / K.N. Drabovich, N.S. Kazak, V.A. Makarov, A.P. Voitovich, eds. // *Proc. SPIE*, 2002. – V. 4751. – P. 402-409.

57. Sokolowski-Tinten K., Bialkowski J., Cavalleri A., von der Linde D., Oparin A., Meyerter-Vehn J., Anisimov S.I. Transient states of matter during short pulse laser ablation // *Phys. Rev. Lett.* – 1998. – V. 81. – P. 224-227.
58. Temnov V.V., Sokolowski-Tinten K., Zhou P., von der Linde D. Ultrafast imaging interferometry at femtosecondlaser-excited surfaces // *J. Opt. Soc. Am.* – 2006. – Vol. 23., № 9. – P. 1954-1964.
59. Гужов, В. И. Оптические измерения. Компьютерная интерферометрия : учебное пособие для бакалавриата и магистратуры / В. И. Гужов, С. П. Ильиных. — 2-е изд. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 258 с.
60. Гужов В.И., Ильиных С.П., Хайбулин С.В. / Восстановление фазовой информации на основе методов пошагового фазового сдвига при малых углах между интерферирующими пучками // *Автометрия.* - 2017. - Т. 53, №3. - С. 101-106.
61. Третьяк, Л.Н. Основы теории и практики обработки экспериментальных данных : учеб. пособие / А.Л. Воробьев, Оренбургский гос. университет, Л.Н. Третьяк.— Оренбург : ОГУ, 2015 .

**Миссия университета** – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

## **КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРНОЙ ФОТОНИКИ И ВИДЕОИНФОРМАТИКИ**

Достижения в оптической науке, технике и технологиях за последние годы способствовали появлению нового направления – фотоники. Этот термин охватывает область науки и техники, связанную с использованием светового излучения (или потока фотонов) в оптических элементах, устройствах и системах.

На рубеже XX – XXI веков электронные информационные технологии достигли фундаментальных и технических пределов производительности при продолжающемся росте потребительского спроса на скорость и объем обрабатываемой и передаваемой информации. Решение данной проблемы потребовало разработки нового поколения информационно – телекоммуникационных систем, основанных на технологиях фотоники. В фотонике появилось новое динамично развивающееся направление, определяющее прогресс мировой науки и техники, – «оптоинформатика». Под «оптоинформатикой» понимают область науки и техники, связанную с исследованием, разработкой, созданием и эксплуатацией новых материалов, технологий, приборов и устройств, направленных на передачу, прием, обработку, хранение и отображение информации.

Изучение фотоники основывается на знании принципов формирования, преобразования, анализа изображений, теории построения информационных систем. Интеграция фотоники и компьютерных технологий позволяет создавать методы, которые возможно реализовать исключительно средствами компьютерной фотоники, обеспечивая развитие технологий качественно нового уровня.

По многим направлениям фотоники и оптоинформатики Россия находится на уровне промышленно – развитых стран (интегральная оптика, системы приема, обработки и отображения информации и др.), а, по некоторым – даже опережает. Приоритетными направлениями являются: волоконная оптика (работы академика Дианова Е.М. – ИОФ РАН), голография (академик Денисюк Ю.Н. – ГОИ им. С.И. Вавилова), полупроводниковые лазеры (академик Алферов Ж.И – ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе), полифунк-

циональные оптические материалы (академик Петровский Г.Т. – ГОИ им. С.И. Вавилова) и др.

Ввиду большого научного и практического значения направления "Фотоника и оптоинформатика", а также спроса на него на потребительском рынке, в 2002 г. в СПбГУ ИТМО был организован факультет «Фотоники и оптоинформатики» под руководством доктора физ.-мат. наук, профессора С.А. Козлова. По инициативе профессорско-преподавательского состава, начиная с 2005 года, на факультете стала работать выпускающая кафедра «Компьютерной фотоники», которую возглавил доктор технических наук, профессор И.П. Гуров.

История кафедры началась в 1946 году. На всех этапах развития результаты научных исследований, проводимых сотрудниками кафедры, неизменно использовались в учебном процессе. Совершенствовались направления подготовки студентов, изменялось название кафедры, но всегда кафедра гордилась своими выпускниками.

Выпускники кафедры занимают видное место в оптической науке: академик РАН Ю.Н. Денисюк, изобретатель трехмерной голографии; член-корр. РАЕН, профессор Н.Г. Бахшиев, известный специалист в области спектроскопии межмолекулярных взаимодействий; Заслуженный деятель науки РФ, профессор Г.Н. Дульнев, крупный ученый в области теплофизики, долгие годы бывший ректором ЛИТМО; профессор И.М. Нагибина, исследования которой в области физической оптики получили широкое признание.

Одной из важнейших задач кафедры является организация учебного процесса и подготовка профессионалов в области компьютерной фотоники. Направление работы кафедры определяется развитием информационных технологий и компьютерных систем в области формирования, синтеза, обработки и анализа изображений на основе интеграции эффективных компьютерных систем с системами фотоники.

Проводимые исследования в области компьютерной обработки когерентных и некогерентных изображений обеспечивают решение научно-технических задач оптической томографии, цифровой голографии, синтеза, анализа, распознавания и классификации изображений.

Научным консультантом работ кафедры в области компьютерной обработки изображений – иконики – является член-корреспондент РАН М.М. Мирошников.

Кафедра проводит работы в рамках международных научных проектов в сотрудничестве с ведущими зарубежными университетами, институтами и исследовательскими лабораториями Италии, Финляндии, Франции, Германии, Великобритании, Японии, США и других стран в области оптической когерентной томографии для биомедицинских исследований, цифровой голографии для исследования микро- и наноструктур, трехмерной фо-

тографии микро- и макроскопических объектов, гиперспектральной обработки изображений.

В последнее время на кафедре активно развивается новое направление – видеоинформатика. Ввиду этого в 2010 году кафедра была переименована в кафедру Компьютерной фотоники и видеоинформатики. В 2011 году Университет получил статус Национального исследовательского университета, в этом есть и заслуга преподавательского коллектива кафедры Компьютерной фотоники и видеоинформатики. Эти обстоятельства позволяют обеспечивать и в дальнейшем подготовку высококлассных востребованных на рынке специалистов в области Компьютерной фотоники и видеоинформатики.

Волков Михаил Владимирович  
Маргарянц Никита Борисович

**Методы обработки интерференционных сигналов и  
картин интерференционных полос**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе



**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49