

На правах рукописи

Стариков Георгий Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО  
ВЕЙВЛЕТ–ПРОЦЕССОРА**

Специальность 01.04.03 – радиоп физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук

Санкт–Петербург

2001

Работа выполнена в Санкт–Петербургском государственном техническом  
университете

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор Петрунькин В.Ю.

Официальные оппоненты:

доктор физико–математических наук, профессор Гуревич С.Б.;

кандидат физико–математических наук, доцент Соколов В.К.

Ведущая организация: Институт аналитического приборостроения РАН

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2002 года в \_\_\_ час. \_\_\_ мин. на заседании  
диссертационного совета Д212.229.01 в Санкт-Петербургском государственном  
техническом университете по адресу: 195251, С.-Петербург, Политехническая  
ул., 29, II учебный корпус, ауд. 257.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-  
Петербургского государственного технического университета

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.229.01,

доктор физ.-мат. наук, профессор

Водоватов И.А.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ВЕЙВЛЕТ–ПРОЦЕССОРА

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие современных и перспективных информационных систем характеризуется непрерывным возрастанием объемов передаваемой и обрабатываемой информации. Для этого в современных системах связи и радиолокации широко используются сложные сигналы, которые содержат существенные локальные неоднородности. Одной из основных задач, решаемых современными радиотехническими системами связи, является одновременный прием и распознавание множества случайных сигналов в широкой мгновенной полосе частот при большом динамическом диапазоне входных сигналов. Требования, предъявляемые к системам связи для решения такой задачи, вызывают необходимость привлечения новых методов обработки сигналов, в частности – оптических. Последние позволяют сравнительно просто и с высоким быстродействием выполнять такие операции, как спектральный анализ, вычисление свертки и взаимной корреляционной функции и т.д. Основным достоинством методов оптической обработки информации является параллельность обработки двумерных массивов информации, а также простота и естественность реализации преобразования Фурье.

Оптоэлектронные системы, анализ информации в которых осуществляется на основе преобразования Фурье (Фурье–процессоров), к настоящему времени хорошо исследованы и нашли широкое практическое применение. Известны их достоинства и недостатки, проявляющиеся при обработке сигналов и изображений. Наличие задач, решение которых с помощью Фурье–процессоров затруднено, вызывает необходимость поиска новых методов обработки информации в оптических системах. К таким задачам относится обнаружение и анализ структуры сложных широкополосных сигналов, особенно шумоподобных. Решение задач обнаружения и анализа сложных сигналов с использованием традиционных методов, основанных на Фурье–анализе, приводит к существенному усложнению алгоритма обработки, но, несмотря на это, не всегда позволяет достигнуть положительных результатов.

Около десяти лет назад возник интерес к использованию методов вейвлет–анализа для обработки сигналов и изображений. Вейвлет–преобразование, положенное в основу вейвлет–анализа, представляет собой время–частотное распределение, обладающее определенной спецификой. Особенность такого подхода состоит в разложении исследуемого сигнала по базису локализованных функций. В отличие от анализа сигналов посредством преобразования Фурье, дающего информацию о спектре мощ-

ности, вейвлет–преобразование обеспечивает перевод исследуемого одномерного сигнала в двухмерное пространство (время – частота), при этом частота и время рассматриваются как независимые переменные. В результате появляется возможность анализировать свойства сигнала в пространстве время–частота. Таким образом, вейвлет–преобразование позволяет проводить локальный спектральный анализ, в отличие от преобразования Фурье. Этот метод позволяет исследовать внутреннюю структуру неоднородного сигнала, т.е. осуществлять анализ нестационарных сигналов; обнаруживать кратковременные изменения сигнала. Эти, а также некоторые другие возможности методов вейвлет–анализа явились преимущественной мотивацией выполнения значительного объема исследований и разработок, посвященных внедрению методов вейвлет–анализа для обработки сигналов различной природы, изображений, и – в более общем смысле – информации, проводящихся в настоящее время. Подавляющее число работ, посвященных использованию вейвлет–преобразования для обработки и анализа сигналов, ориентировано на применение цифровой вычислительной техники – универсальных или специализированных компьютеров и процессоров. Поэтому разработка и исследование оптических вейвлет–процессоров, предназначенных для обработки реальных сигналов, имеет несомненный научный и практический интерес.

Цель работы. Целью работы является разработка и экспериментальное исследование оптико–электронного процессора для обработки нестационарных сигналов на базе вейвлет–преобразования (оптического вейвлет–процессора); определение его возможностей и ограничений и выработка рекомендаций по использованию.

Основные задачи, решаемые в данной работе:

1. Рассмотрение основных время–частотных распределений, используемых для анализа нестационарных сигналов для определения их возможностей и ограничений.
2. Выявление особенностей вейвлет–преобразования, открывающих дополнительные возможности анализа сигналов.
3. Проведение сравнительного анализа время–частотных распределений и вейвлет–преобразования на основании расчета для выявления характерных особенностей, типичных для нестационарных связных и радиолокационных сигналов.
4. Определение концептуальной модели оптико–электронного вейвлет–процессора для обработки нестационарных сигналов. Разработка его математической модели.
5. Разработка и экспериментальное исследование лабораторной модели оптического вейвлет–процессора, позволяющей решать задачи анализа внутренней структуры сложных сигналов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Показаны преимущества вейвлет–преобразования по сравнению с время–частотными распределениями, нашедшими широкое практическое применение: спектрограммой и распределением Вигнера. Отмечены их возможности и ограничения.
2. Разработана математическая модель, описывающая концепцию построения оптического вейвлет–процессора.
3. Разработан и изготовлен лабораторный макет оптического вейвлет–процессора, позволяющий получать на выходе вейвлет–преобразование статического входного сигнала. Впервые разработан и изготовлен оптический вейвлет–процессор для обработки реальных сигналов, в котором применена синхронизация входного сигнала с импульсным лазером.
4. Разработана система регистрации выходной информации, основанная на использовании импульсного лазера, синхронизированного с сигналом. Такая система позволяет регистрировать выходное распределение при использовании сравнительно «медленных» и, соответственно, дешевых, устройств съема.
5. Определены возможности и ограничения разработанных вейвлет–процессоров, предложены пути их совершенствования.
6. Обозначены перспективные направления применения оптических вейвлет–процессоров.

Научная и практическая значимость работы. Проведенное в работе систематическое теоретико–экспериментальное исследование возможностей применения вейвлет–преобразования для анализа нестационарных сигналов показало, во-первых, несомненную практическую значимость такого подхода. Созданный впервые лабораторный макет оптико–электронного вейвлет–процессора может стать основой для создания достаточно широкого круга таких устройств, решающих разнообразные практические задачи обработки нестационарных сигналов различной природы.

Полученные в работе теоретические результаты могут быть с успехом использованы как при выполнении соответствующих научных исследований, так и в учебном процессе. В целом, полученные в работе результаты позволяют существенно расширить возможности методов оптоэлектронной обработки информации, найти новые области их применения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Оптико–электронный вейвлет–процессор является принципиально новым типом оптико–электронных процессоров, обладающим новыми возможностями анализа нестационарных, кратковременных сигналов и переходных процессов по сравнению с Фурье– и вигнеровскими процессорами.
2. Предложенные концептуальные модели оптико–электронных вейвлет–процессоров как с пространственным, так и с временным интегрированием могут служить основой для создания разнообразных практических функциональных устройств такого типа.
3. Результаты исследования разработанной лабораторной модели оптико–электронного вейвлет–процессора подтверждают практическую возможность реализации такого типа процессоров с хорошо прогнозируемыми характеристиками.
4. Разработанные вейвлет–процессоры значительно расширяют области возможных применений оптико–электронных процессоров. Для создания оптико–электронных вейвлет–процессоров может применяться существующая и перспективная элементная база.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы обсуждались на семинарах кафедры квантовой электроники СПбГТУ, а также докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика'99» (Санкт–Петербург, 1999);
2. IV всероссийская научно–методическая конференция (Санкт–Петербург, 2000);
3. Межвузовская научная конференция в рамках XXIX недели науки СПбГТУ (Санкт–Петербург, 2000);
4. 12-я межвузовская научно–техническая конференция «Военная радиоэлектроника: опыт использования и проблемы подготовки специалистов» (Петродворец, 2001);
5. Лазеры, измерения, информация (Санкт–Петербург, 2001).

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 11 печатных работах в отечественных и зарубежных изданиях и журналах. Список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 147 страниц, в том

числе 70 рисунков и 8 таблиц. Список литературы включает 79 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации, определена цель работы, определены научная и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Содержатся сведения об апробации работы и кратко изложено ее содержание.

В первой главе диссертации проведено теоретическое рассмотрение основных время–частотных распределений, применяемых для анализа нестационарных сигналов – спектрограммы и распределения Вигнера, а также вейвлет–преобразования. Рассмотрение спектрограммы и распределения Вигнера выполнено с единых позиций – как распределений билинейного класса [1]. Приведены математические основы вейвлет–преобразования [2], определения и признаки вейвлетов, примеры вейвлетообразующих функций, а также свойства вейвлет–преобразования.

Существует множество время–частотных распределений, полученных в разное время для решения различных задач, которые в той или иной мере соответствуют представлениям о свойствах идеализированного время–частотного распределения. Оказывается, что ряд ранее выведенных распределений можно получить из распределения вида

$$P(t, \omega) = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \iiint \phi(\theta, \tau) \cdot \exp[i(u\theta - t\theta - \tau\omega)] \cdot s^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) \cdot s\left(u + \frac{\tau}{2}\right) du d\tau d\theta, \quad (1)$$

где  $s(t)$  – исследуемый сигнал, а  $\phi(\theta, \tau)$  – ядро распределения. Распределения, получающиеся путем подстановки ядер, не зависящих от сигнала, относятся к билинейному классу, поскольку сигнал входит в выражение для распределения только дважды. К билинейным распределениям относятся распределение Вигнера и спектрограмма, которым соответствуют ядра  $\phi(\theta, \tau)=1$  и  $\phi_s(\theta, \tau) = \int h^*(t - \tau/2) \cdot h(t + \tau/2) \cdot \exp(-i\theta t) dt$ , соответственно. Распределение Вигнера в классическом виде записывается как

$$W[s](t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot \exp(-i\omega\tau) d\tau. \quad (2)$$

Спектрограмма, фактически, представляет собой квадрат модуля кратковременного преобразования Фурье со скользящим окном  $h(t)$ :

$$S_i(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) \cdot h(\tau - t) \cdot \exp(-i\omega\tau) d\tau. \quad (3)$$

Вейвлет–преобразование определено над функциями  $f(t)$ , принадлежащими пространству  $L^2(R)$  функций, определенными на всей действительной оси и обладающими конечной энергией (нормой). Вейвлеты, являющиеся базисом пространства  $L^2(R)$ , должны стремиться к нулю на  $\pm\infty$ , причем чем быстрее, тем лучше. Для того, чтобы перекрыть всю частотно–временную плоскость, вводится система сдвигов и изменения масштаба. Вейвлет–преобразование состоит в разложении исследуемого сигнала по набору функций вида [2]

$$\psi_{i,j}(t) \equiv \psi_{\alpha_i, \beta_j}(t) = \frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} \psi\left(\frac{t - \beta_j}{\alpha_i}\right), \quad (4)$$

где  $\alpha_i$  – параметр масштабирования, а  $\beta_j$  – параметр сдвига. При этом каждая функция  $f(t) \in L^2(R)$  может быть представлена в виде ряда

$$f(t) = \sum_{i,j=-\infty}^{+\infty} c_{i,j} \cdot \psi_{i,j}(t), \quad (5)$$

а коэффициенты разложения определяются соотношением

$$c_{i,j} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi_{i,j}^*(t) dt. \quad (6)$$

Вейвлет–преобразование обладает локализованным одновременно в пространстве частот и во времени частотно–временным окном, параметры которого зависят от частоты. На низких частотах оно обладает более высоким разрешением по частоте и более низким – по времени, а на высоких частотах – наоборот: более высоким разрешением по времени и более низким – по частоте. При этом остается постоянной относительная разрешающая способность по частоте и «площадь» частотно–временного окна:

$$\delta\omega/\omega = const, \quad \delta\omega \cdot \delta t = const; \quad (7)$$

Во второй главе диссертации проведен сравнительный анализ время–частотных распределений, обсуждавшихся в первой главе, с точки зрения возможностей анализа сложных сигналов, используемых в современных системах связи и радиолокации. Рассмотрены характерные особенности типичных нестационарных сигналов; приведены время–частотные распределения модельных сигналов, полученные в результате расчета.

В связи с развитием радиотехнических средств в системах связи и радиолокации все более широкое распространение находит использование сложных сигналов, в том числе шумоподобных (ШПС). Шумоподобными называют такие сигналы [3], у которых база  $B$ , определяемая как произведение эффективной ширины спектра  $\Delta f$  на дли-



тельность  $T$ , намного больше единицы:

$$B = \Delta f \cdot T \gg 1. \quad (8)$$

Одной из задач, возникающих при обработке сигналов, является выявление и исследование структуры неизвестного сигнала, необходимое для успешного подавления радиолокатора или канала связи или для перехвата сообщений, передаваемых по каналам связи, использующим ШПС. Решение подобных задач осложняется, в частности, вследствие отсутствия априорной информации о структуре сигнала. Поэтому сначала стоит задача обнаружения канала связи, которая становится особенно сложной при использовании ШПС, работающего под мощным прикрытием, например в одной полосе с телевизионным, радиовещательным или каким-либо другим передатчиком. После обнаружения, необходимо выявить структуру входящих в ансамбль сигналов для построения приемника или средств подавления. Следует отметить, что для успешного перехвата сообщений недостаточно информации о структуре и параметрах сигналов. Канал может использовать средства шифрования сообщений перед передачей. В этом случае требуются дополнительные усилия, направленные на расшифровку перехваченных сообщений, однако рассмотрение способов расшифровки выходит за рамки данной работы.

Среди ШПС особое место занимают фазоманипулированные ШПС. Они обладают рядом особенностей, делающих использование именно этих сигналов предпочтительным. У ФМ ШПС уровень несущей оказывается сильно подавленным (значительно ниже уровня «шума», создаваемого кодовой модуляцией), поэтому процесс обнаружения таких сигналов затруднен и требует привлечения нетривиальных способов обработки. Среди таких способов наиболее перспективным является использование время–частотных распределений, многообразие которых приводит к необходимости выбора оптимального распределения для решения каждой конкретной задачи.

В работе проведены расчеты время–частотных распределений модельных сигналов: спектрограммы; распределения Вигнера; модифицированного распределения Вигнера; вейвлет–преобразования с двумя различными базисами. Результаты расчетов (приведены в диссертационной работе) показали, что вейвлет–преобразование позволяет наилучшим образом проводить частотно–временной анализ нестационарных сигналов. Кроме того, за счет выбора базиса вейвлет–преобразования можно добиться наилучшего решения какой–либо конкретной задачи, например, выделения и локализации перескока фазы сигнала.

В третьей главе диссертации рассмотрены основные типы существующих оптических Фурье–процессоров, предназначенных для обработки сигналов: анализаторы спектра, корреляторы, конвольверы, вignerовские процессоры, а также попытки создания вейвлет–процессоров для обработки сигналов. Перечислены возможности и ограничения, приведены примеры результатов обработки сигналов.

В четвертой главе диссертации приведено описание разработанных и изготовленных лабораторных макетов оптических вейвлет–процессоров для обработки сигналов; представлены результаты эксперимента. Дано описание математической модели вейвлет–процессора; приведены результаты расчетов. Рассмотрены перспективы развития оптических вейвлет–процессоров для обработки сигналов, а также обозначены другие возможные области применения оптических вейвлет–процессоров.

В качестве основы для построения оптического вейвлет–процессора выбрана схема многоканального оптического коррелятора с пространственным интегрированием [4]. В работе предложена математическая модель оптического вейвлет–процессора. В предложенной модели рассматривается статический входной сигнал. Для модельного эксперимента это соответствует действительности, а в случае эксперимента с реальным сигналом этот подход может быть соответствующим образом модифицирован.

Схема вейвлет–процессора, использованная для проведения расчетов (рис. 1), включает источник света 1, формирователь оптического пучка 2 и два оптических каскада. Первый каскад выполняет одномерное преобразование Фурье входного сигнала, записанного на транспаранте 3, расположенном во входной плоскости первого

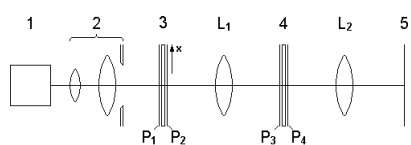


Рис. 1. Схема вейвлет–процессора, использованная для проведения расчетов.

каскада, являющейся входной плоскостью вейвлет–процессора в целом. Входной сигнал является одномерным (вдоль оси  $x$ ), и однородным – вдоль ортогональной координаты. На выходе первого оптического каскада расположен вейвлет–фильтр 4, на котором записан базис вейвлет–

преобразования. Математическая модель использовалась для расчета параметров схемы вейвлет–процессора, а также для вычисления отклика на модельные сигналы, использовавшиеся в экспериментах.

В ходе работы построено два макета вейвлет–процессора. Схема первого, предназначенного для работы со статическими входными сигналами, представлена на рис. 2. Пучок света от гелий–неонового лазера 1 ( $\lambda=0.6328$  мкм) поступает на формирователь пучка, включающий расширитель 2, после которого установлена диафрагма. Этим

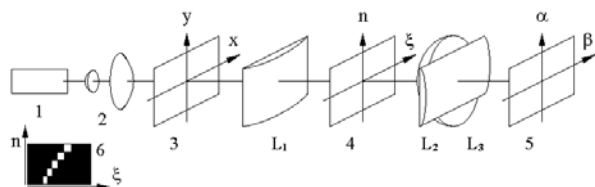


Рис. 2. Схема оптического вейвлет-процессора. В левом нижнем углу показан фрагмент вейвлет-фильтра.

пучком освещается исследуемый сигнал, записанный на TRANSPARANTE, помещаемом во входной плоскости системы 3. В модельном эксперименте в качестве исследуемого сигнала использовалась амплитудная периодическая решетка, содержащая «скачок фазы».

За транспарантом установлена цилиндрическая линза  $L_1$ , осуществляющая преобразование Фурье вдоль горизонтального направления. В Фурье-плоскости линзы  $L_1$  располагается вейвлет-фильтр 4, представляющий собой банк Фурье-образов функций, образующих базис вейвлет-преобразования. За вейвлет-фильтром расположена система линз  $L_2, L_3$ , выполняющая преобразование Фурье вдоль горизонтального направления и отображение вдоль вертикального. Результаты эксперимента в виде распределений интенсивности светового поля на выходе оптического вейвлет-процессора регистрируются при помощи телевизионной ПЗС-камеры, расположенной в выходной плоскости 5 оптической системы. Сигнал с выхода камеры поступает на монитор для непосредственного наблюдения, а также в компьютер для регистрации. На основании полученных распределений светового поля в выходной плоскости системы построены совместные «время-частотные» распределения сигналов.

Одним из наиболее важных компонентов оптического вейвлет-процессора является вейвлет-фильтр, при помощи которого определяется базис вейвлет-преобразования. В данной работе в качестве базисного использовался вейвлет Морле, определяемый во временной и частотной областях выражениями:

$$\psi_M(t) = \exp(i\omega_0 t) \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right), \quad \Psi_M(\omega) = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2}\right]. \quad (9)$$

Здесь  $\psi_M(t)$  и  $\Psi_M(\omega)$  – вейвлет Морле и его Фурье-образ, соответственно. Типичный график функции типа вейвлета Морле представлен на рис. 3А, а его Фурье-образ – на рис. 3В. При разработке вейвлет-фильтра использована «прямоугольная аппроксимация» вейвлета Морле (рис. 3С). К характеристикам вейвлет-фильтра предъявлялись следующие требования: должно быть обеспечено разрешение по частоте (параметру масштабирования) – не хуже 10%; число каналов не должно быть слишком велико, чтобы не усложнять процесс изготовления фильтра. В результате был изготовлен вейвлет-фильтр с общей полосой пропускания около двух октав (рис. 4). Истинный размер фильтра равен  $1.27 \times 1.27 \text{ см}^2$ .

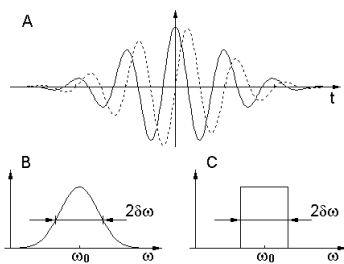


Рис. 3. Вейвлет Морле. На рисунке обозначены: А – вейвлет Морле; В – его Фурье–образ; С – аппроксимация Фурье–образа прямоугольной функцией.

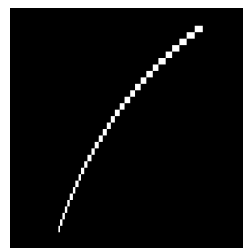


Рис 4. Вейвлет–фильтр.

В эксперименте регистрировалось распределение интенсивности светового поля в выходной плоскости оптического вейвлет–процессора в зависимости от вида входного сигнала и его положения в пределах входной апертуры. Регистрация осуществлялась при помощи телевизионной ПЗС–камеры. В ходе эксперимента во входной плоскости вейвлет–процессора устанавливалась маска, за счет перемещения и поворота которой достигались различные виды и состояния входного сигнала. Моделировалось два вида сигналов: фазоманипулированный, содержащий скачок фазы  $\pi$ , и частотно–модулированный сигнал с медленным изменением частоты несущей.

На основании полученных данных построены совместные время–частотные распределения входных сигналов, представленные на рис. 5. Видно, что построенный

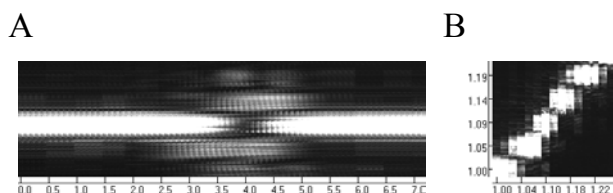


Рис. 5. Вейвлет–преобразования сигналов, полученные в ходе модельного эксперимента: А – для сигнала, содержащего скачок фазы; В – для сигнала с медленно изменяющейся час–

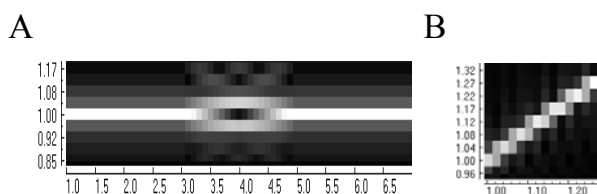


Рис. 6. Вейвлет–преобразования сигналов, полученные в результате математического моделирования: А – для сигнала, содержащего скачок фазы; В – для сигнала с медленно изменяющейся частотой.

вейвлет–процессор подходит для выявления и локализации скачка фазы, а также для определения мгновенного значения частоты сигнала. Результаты математического моделирования представлены на рис. 6. Налицо идентичность результатов эксперимента и расчета, что свидетельствует об адекватности выбранной математической модели.

Таким образом, разработан и построен оптический вейвлет–процессор, позволяющий на статических входных сигналах исследо–

вать особенности работы подобных устройств и их элементов. Полученные экспериментальные результаты (рис. 5) свидетельствуют о том, что даже использование сравнительно простого вейвлет-фильтра позволяет исследовать локальные характеристики, и, следовательно, внутреннюю структуру, входных сигналов.

Наибольший интерес представляет обработка сигналов в реальном времени, поэтому для исследования возможности обработки оптическим вейвлет-процессором реальных сигналов, был проведен соответствующий эксперимент. Схема этого варианта вейвлет-процессора представлена на рис. 7.

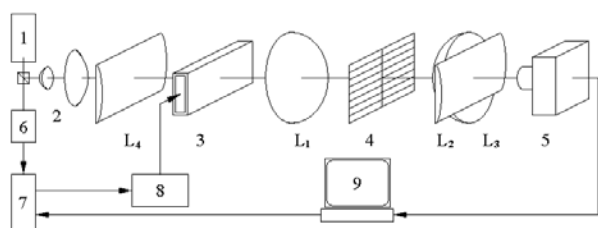


Рис. 7. Схема оптического вейвлет-процессора для обработки реальных сигналов.

Для ввода сигнала используется акустооптический модулятор 3, помещенный во входной плоскости системы. Для того, чтобы регистрировать результаты при помощи той же ПЗС-камеры, в эксперименте использован импульсный лазер 1.

Для формирования исследуемого сигнала изготовлен специальный генератор 8 и устройство синхронизации 7. Устройство синхронизации, управляемое компьютером 9, обеспечивает формирование заданной задержки между началом сигнала и импульсом лазера.

В качестве источника излучения в эксперименте использовался сравнительно маломощный импульсный лазер, работающий в режиме пассивной синхронизации мод насыщающимся поглотителем. Отсутствие возможности синхронизации лазера от внешнего источника потребовало разработки специального устройства синхронизации. В ходе эксперимента оценены параметры импульсной последовательности лазера, по результатам которых ожидаемая точности синхронизации составляет в среднем около  $\pm 0.3$  мкс. Рассмотрены также другие методы синхронизации.

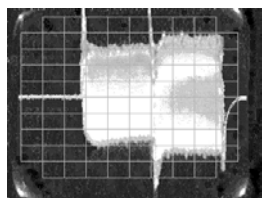


Рис. 8. Оциллограмма сигнала. Масштаб по вертикальной оси: 0.5 В/дел; по горизонтальной: 1 мкс/дел.

В качестве исследуемого сигнала использовался фазоманипулированный сигнал, представляющий собой последовательность двух радиопульсов, фазы которых отличаются на  $\pi$  (рис. 8). Длительность импульсов составляет 3.3 мкс, они следуют друг за другом без задержки, несущая частота равна 38.5 МГц. Для формирования исследуемого сигнала разработан и изготовлен специальный генератор, синхронизируемый от внешнего источника.

В ходе эксперимента на акустооптический модулятор, расположенный во входной плоскости оптического вейвлет–процессора, подавались различные сигналы, синхронизированные с источником излучения (импульсным лазером). При фиксированной задержке выходное распределение, регистрируемое ПЗС–камерой, остается постоянным до тех пор, пока не изменится значение задержки. Контрастность распределений в области особенности сигнала оказалась несколько меньше, чем в модельном эксперименте в связи с некоторой неточностью синхронизации.

В ходе эксперимента получено время–частотное распределение фазоманипулированного сигнала, представленное на рис. 9А. В области скачка фазы наблюдается значительное ослабление отклика на частоте несущей и появление дополнительных компонент в спектре сигнала. Это позволяет идентифицировать наличие скачка фазы в исследуемом сигнале и локализовывать его во времени. Для оценки работы вейвлет–процессора при наличии помех, на вход подавалась сумма фазоманипулированного сигнала и гармонического сигнала, близкого по частоте. Частота помехи составляла 40.0 МГц. Соответствующее время–частотное распределение представлено на рис. 9В. Видно, что скачок фазы может быть обнаружен и локализован при наличии близкой по частоте интенсивной гармонической помехи.

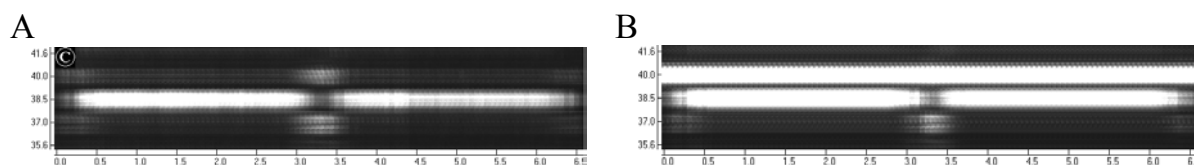


Рис. 9. Вейвлет–преобразование фазоманипулированного сигнала, полученное в ходе эксперимента: А – без помехи; В – в присутствии гармонической помехи.

Таким образом, по результатам эксперимента можно утверждать о пригодности разработанного оптического вейвлет–процессора для анализа внутренней структуры сигналов.

Проведено математическое моделирование, результаты которого представлены на рис. 10. Наличие внутренней структуры в откликах на частотах, отличных от несущей, вызвано дискретностью времени при вычислениях. Для оценки влияния неточности синхронизации на вид время–частотного распределения проведено сглаживание полученных для точной синхронизации результатов расчета. Видно, что несмотря на сглаживание при помощи функции значительной протяженности (около 300 нс), в распределении присутствуют основные особенности, характерные для время–частотного распределения сигнала, содержащего скачок фазы. Сопоставление результатов эксперимента (рис. 9) с результатами расчета позволяет отметить их идентичность, что свидетельствует об адекватности выбранной математической модели.

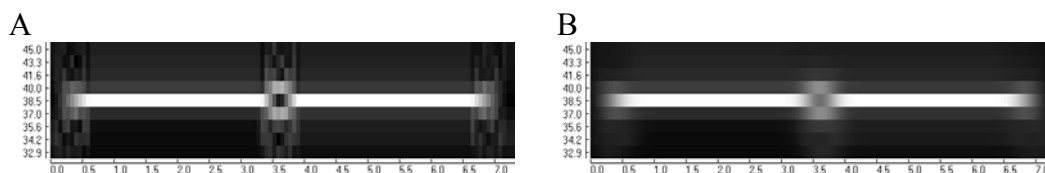


Рис. 10. Вейвлет–преобразование фазоманипулированного сигнала, полученное в результате математического моделирования: А – для случая идеальной синхронизации; В – после сглаживания окном в виде функции Гаусса,  $\sigma=150$  нс.

Таким образом, разработан и построен оптический вейвлет–процессор, позволяющий получать вейвлет–преобразование реальных сигналов. Полученные экспериментальные результаты (рис. 9) свидетельствуют о том, что такой оптический процессор позволяет исследовать локальные характеристики реальных сигналов. Для этого в предложенной схеме требуется синхронизация сигнала с импульсным лазером, что может вызывать затруднения в процессе обнаружения сигнала. Тем не менее, подобная схема может найти практическое применение в следящих системах. Предложенная математическая модель оптического вейвлет–процессора позволяет определять выходное распределение процессора, предназначенного для работы с реальными сигналами. Это подтверждается результатами математического моделирования (рис. 10), сравнение которых с результатами эксперимента (рис. 9) наглядно иллюстрирует их идентичность.

Применение быстродействующих фотоприемников позволит регистрировать вейвлет–преобразование сигнала в реальном времени.

Кроме того, в главе рассмотрены пути улучшения характеристик оптических вейвлет–процессоров за счет использования ПЗС–фотоприемников, функционирующих в специальных режимах. В том числе, рассмотрена схема вейвлет–процессора на основе коррелятора с интегрированием по времени (рис. 11). Входной сигнал  $s(t)$  используется для модуляции точечного источника излучения 1.

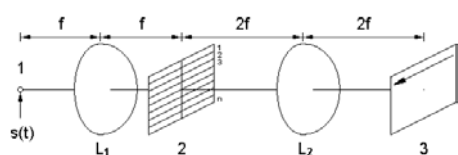


Рис. 11. Схема оптического вейвлет–процессора на базе коррелятора с интегрированием по времени. На рисунке обозначены: 1 – точечный источник излучения; 2 – вейвлет–фильтр; 3 – матрица ПЗС–фотоприемников в выходной плоскости;  $L_1$  и  $L_2$  – линзы.

Сферическая линза  $L_1$  формирует параллельный пучок достаточного размера для обеспечения равномерной засветки всей апертуры вейвлет–фильтра 2. Вейвлет–фильтр содержит образы функций, образующих базис вейвлет–преобразования.

Линза  $L_2$  обеспечивает отображение плоскости вейвлет–фильтра 2 на выходную плоскость 3, в которой расположена матрица ПЗС–фотоприемников. При работе происходит сдвиг строк ПЗС–матрицы в направлении, указанном стрелкой.

К числу особенностей вейвлет–процессора на базе коррелятора с интегрированием по времени относится возможность анализ низкочастотных сигналов (с частотами менее 10 МГц) – вплоть до речевых сигналов. По той же причине возможна обработка протяженных во времени сигналов, причем максимальная длительность обрабатываемого фрагмента сигнала может достигать сколь угодно больших значений (при достаточно малой скорости сдвига строк в ПЗС–матрице). При этом значение базы обрабатываемых сигналов определяется числом строк ПЗС–матрицы.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Рассмотрены основные время–частотные распределения, используемые для анализа нестационарных сигналов – спектрограмма и распределение Вигнера. Показаны их возможности и ограничения с точки зрения обработки сигналов.
2. Выявлены особенности вейвлет–преобразования, открывающие дополнительные возможности анализа нестационарных сигналов. К ним относятся возможность построения базиса, позволяющего наилучшим образом решать поставленную задачу, и свойства частотно–временного окна, обеспечивающие высокое разрешение по частоте при низком разрешении по времени на низких частотах и высокое разрешение по времени при низком разрешении по частоте на высоких частотах.
3. Проведен сравнительный анализ время–частотных распределений и вейвлет–преобразования с точки зрения возможностей и перспектив анализа нестационарных сигналов, на основании которого показаны преимущества вейвлет–преобразования по сравнению с такими время–частотными распределениями, как спектрограмма и распределение Вигнера.
4. Определена концептуальная модель оптико–электронного вейвлет–процессора для обработки нестационарных сигналов. Разработана его математическая модель, на основании которой проведены расчеты реакции оптического вейвлет–процессора на различные виды входного сигнала.
5. Разработана и изготовлена лабораторная модель оптического вейвлет–процессора, позволяющего получать вейвлет–преобразование статического входного сигнала.
6. Впервые разработан и изготовлен оптический вейвлет–процессор для обработки реальных сигналов, в котором применена синхронизация входного сигнала с импульсным лазером.
7. Разработана система регистрации выходной информации, основанная на использовании импульсного лазера, синхронизированного с сигналом. Такая система позволяет регистрировать выходное распределение при использовании сравнитель-



но «медленных» и, соответственно, дешевых, устройств съема. Она может найти применение в системах, функционирующих в режиме синхронизации.

8. Разработана методика расчета и изготовления вейвлет–фильтра, основанная на использовании компьютерной графики.
9. Определены возможности и ограничения изготовленных вейвлет–процессоров, предложены пути их совершенствования.
10. Обозначены перспективные направления применения оптических вейвлет–процессоров.

Таким образом, выполненные в данной работе теоретические и экспериментальные исследования позволили определить пути построения оптико–электронных вейвлет–процессоров для обработки связных и радиолокационных сигналов. Созданные в ходе подготовки диссертационной работы экспериментальные и теоретические методики могут быть положены в основу разработки оптических вейвлет–процессоров, предназначенных для обработки сигналов в реальном времени.

#### ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Коэн Л. Время–частотные распределения: обзор. ТИИЭР 1989, т. 77, № 10, с. 72–120.
2. Астафьева Н.М. Вейвлет–анализ: основы теории и примеры применения. УФН 1996, т. 166, № 11, с. 1145–1170.
3. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
4. Егоров Ю.В., Наумов К.П., Ушаков В.Н. Акустооптические процессоры. – М.: Радио и связь, 1991. – 160 с.

#### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Стариков. Г.А. «Оптимизация параметров сверхширокополосных акустооптических модуляторов», Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика’99»: тезисы докладов, С–Пб, 1999 г., стр. 197.
2. Стариков. Г.А. «Применение вейвлет–анализа для оптической обработки информации», Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика’99»: тезисы докладов, С–Пб, 1999, стр. 123.

3. Аксенов Е.Т., Стариков Г.А. «Вейвлет–анализ в системах оптической обработки информации: возможности и перспективы», *Фундаментальные исследования в технических университетах: материалы IV всероссийской научно–методической конференции*, С–Пб., изд. СПбГТУ, 2000 г., стр. 75-76.
4. Аксенов Е.Т., Стариков Г.А. «Подавление помех в системах оптической обработки шумоподобных сигналов с использованием методов вейвлет–анализа», *Фундаментальные исследования в технических университетах: материалы IV всероссийской научно–методической конференции*, С–Пб., изд. СПбГТУ, 2000 г., стр. 77-78.
5. Стариков Г.А., Аксенов Е.Т. «Вейвлет–преобразование в системах оптической обработки информации», *XXIX неделя науки СПбГТУ: материалы межвузовской научной конференции, часть VI*, С–Пб., изд. СПбГТУ, 2000 г., стр. 37-38.
6. Е.Т. Аксенов, Г.А. Стариков. «Обработка сигналов оптическими вейвлет–процессорами», *Материалы 12-й межвузовской научно–технической конференции «Военная радиоэлектроника: опыт использования и проблемы подготовки специалистов»*, Петродворец, 2001 г., стр. 23-24.
7. В.Ю. Петрунькин, Г.А. Стариков. «Вейвлет – преобразование в системах оптической обработки информации», *Материалы 12-й межвузовской научно–технической конференции «Военная радиоэлектроника: опыт использования и проблемы подготовки специалистов»*, Петродворец, 2001 г., стр. 48-49.
8. Петрунькин В.Ю., Аксенов Е.Т., Стариков Г.А.. «Возможности и перспективы применения вейвлет–преобразования в оптических процессорах» в тезисах докладов конференции «Лазеры, измерения, информация», С–Пб.: изд. БГТУ, 2001, с. 53-54.
9. Петрунькин В.Ю., Аксенов Е.Т., Стариков Г.А.. «Возможности и перспективы анализа сложных сигналов оптическими вейвлет–процессорами», *Современные технологии извлечения и обработки информации //Сборник научных трудов*, С–Пб.: ОАО «Радиоавионика», 2001, с. 192-198.
10. Petrunkin V. Yu., Aksyonov E.T., George A. Starikov, “Wavelet Transform in Optical Processors: Potentials and Perspectives”, *Proc. of the SPIE vol. 4680*.
11. В.Ю. Петрунькин, Е.Т. Аксенов, Г.А. Стариков. «Оптический вейвлет–процессор для обработки сложных сигналов», *Письма в ЖТФ*, 2001, т. 27, вып. 22, с. 24-29.