

07;12

Оптический вейвлет-процессор для обработки сложных сигналов

© В.Ю. Петрунькин, Е.Т. Аксенов, Г.А. Стариков

Санкт-Петербургский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 21 июня 2001 г.

Обосновывается целесообразность создания оптических вейвлет-процессоров для обработки сложных сигналов, в том числе шумоподобных. Приведены результаты обработки фазоманипулированных сигналов разработанным оптическим вейвлет-процессором, подтверждающие возможность регистрации неоднородностей сигнала в реальном времени.

Известно, что оптические системы обработки информации характеризуются высоким быстродействием, фактически определяемым размерами входной и выходной апертур, а также продольными размерами системы. В настоящее время наиболее перспективными считаются системы обработки информации, сочетающие быстродействующий оптический процессор, выполняющий предварительную обработку сигнала в соответствии с фиксированным алгоритмом, и электронный цифровой процессор, выполняющий дальнейшую обработку. Расширение возможностей систем такого рода возможно за счет поиска и реализации новых алгоритмов предварительной обработки, выполняемой оптическим процессором. Одним из перспективных направлений является вычисление в оптическом процессоре вейвлет-преобразования исследуемого сигнала для формирования его времячастотного распределения. Вейвлет-преобразование позволяет эффективно анализировать нестационарные сигналы, выделять и локализовывать характерные детали и особенности сигналов и изображений, определять масштаб этих деталей. При анализе широкополосных и нестационарных сигналов вейвлет-преобразование позволяет с высокой точностью локализовывать особенности и неоднородности сигнала.

Вейвлет-преобразование состоит в разложении сигнала по базису, сформированному из локализованной функции $\psi(t)$, посредством изменения масштаба и переноса [1]:

$$\psi_{\alpha,\beta}(t) = |\alpha|^{-1/2} \cdot \psi[(t - \beta)/\alpha]. \quad (1)$$

Интегральное вейвлет-преобразование функции $f(t)$ записывается в виде

$$\begin{aligned} [W_\psi f](\alpha, \beta) &= |\alpha|^{-1/2} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi^*[(t - \beta)/\alpha] dt \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi_{\alpha, \beta}^*(t) dt, \end{aligned} \quad (2)$$

где звездочкой отмечено комплексное сопряжение. Существует значительная свобода при выборе функции, порождающей базис вейвлет-преобразования (базисного вейвлета), что является одним из достоинств, поскольку можно выбрать вейвлет, позволяющий наилучшим образом решить поставленную задачу. Имеется множество функций, используемых для построения базисов вейвлет-преобразования. Одним из них является вейвлет Морле, представляющий собой произведение гармонической функции на функцию Гаусса:

$$\psi(t) = \exp(-t^2/2) \cdot \exp(i\omega_0 t), \quad \Psi(\omega) = \exp[-(\omega - \omega_0)^2/2], \quad (3)$$

где $\psi(t)$ и $\Psi(\omega)$ — вейвлет Морле и его Фурье-образ, i — мнимая единица, а частота ω_0 определяет число осцилляций функции. Вейвлет-преобразование можно рассматривать как корреляцию или свертку исследуемой функции (сигнала) с набором анализирующих вейвлетов (1), поэтому для вычисления вейвлет-преобразования в оптических системах используются различные схемы оптических корреляторов [2].

В современных системах связи и радиолокации широко применяются сложные сигналы, в том числе шумоподобные. Среди шумоподобных сигналов достаточно распространены фазоманипулированные сигналы, в которых несущая частота промодулирована по фазе в соответствии с двоичной псевдослучайной последовательностью. Одной из задач, возникающих при анализе таких сигналов, является создание устройств, способных выделять скачки фазы исследуемого сигнала в реальном времени.

В настоящей работе проводились исследования, направленные на определение возможностей вейвлет-преобразования, перспективных областей применения оптических вейвлет-процессоров, а также отработка концепции построения оптических вейвлет-процессоров. Проведены эксперименты по выявлению скачка фазы в фазоманипулированном

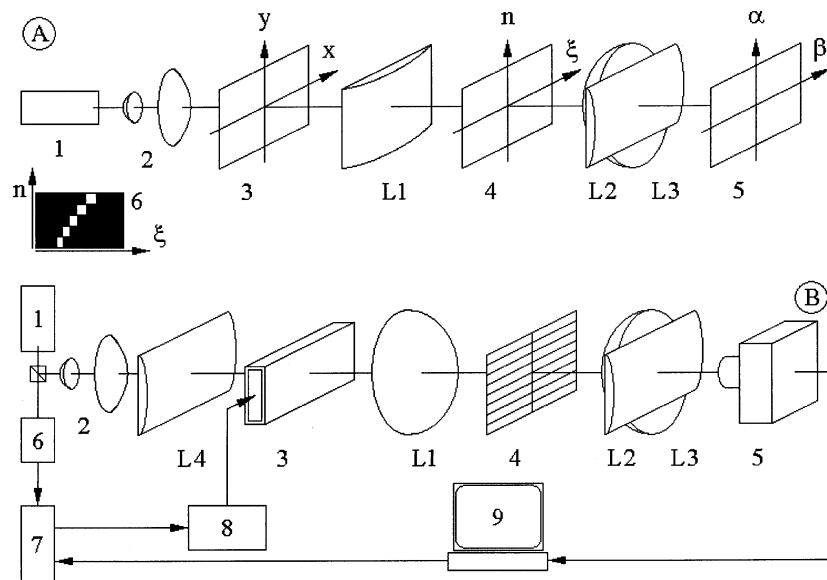


Рис. 1. Схема экспериментальной установки в модельном эксперименте (А) и в эксперименте с реальным сигналом (В). А: 1 — гелий-неоновый лазер; 2 — формирователь оптического пучка; 3 — входная плоскость; L1 — цилиндрическая линза; 4 — плоскость вейвлет-фильтра (ξ — пространственная частота, η — номер вейвлета); L2, L3 — система линз, выполняющая преобразование Фурье вдоль горизонтальной оси и отображение вдоль вертикальной; 5 — выходная плоскость; 6 — фрагмент маски. В: 1 — импульсный лазер; 2 — формирователь оптического пучка; L4 — фокусирующая линза; 3 — акустооптический модулятор; L1 — сферическая линза; 4 — вейвлет-фильтр; L2, L3 — система линз, выполняющая преобразование Фурье вдоль горизонтальной оси и отображение вдоль вертикальной; 5 — телевизионная ПЗС-камера; 6 — фотоприемник; 7 — устройство синхронизации; 8 — источник сигнала; 9 — компьютер.

сигнале с использованием вейвлет-преобразования. Для этого использовался многоканальный оптический коррелятор с пространственным интегрированием (рис. 1, А). Пучок света от гелий-неонового лазера ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$) после расширителя попадает на маску, расположенную во входной плоскости 3 и содержащую модель исследуемого

сигнала. В качестве модели сигнала использовалась амплитудная маска, представляющая собой периодическую штриховую решетку. Период решетки составляет $100\ \mu\text{m}$; в середине решетки введен сбой фазы ($1/2$ периода). Цилиндрическая линза L1 выполняет преобразование Фурье вдоль горизонтальной координаты; на маске 4 записаны Фурье-образы базиса вейвлет-преобразования. В данной работе в качестве базисного использовался вейвлет Морле 3. При изготовлении маски требуемая функция пропускания (функция Гаусса) аппроксимирована прямоугольной [3]; фрагмент маски приведен на рис. 1, А в левом нижнем углу (для наглядности показано только 5 частотных каналов). Система линз (L2, L3) выполняет преобразование Фурье вдоль горизонтального направления и изображение вдоль вертикального. Для регистрации распределения светового поля на выходе системы использована ПЗС-матрица телевизионной камеры, расположенная в плоскости 5. Сигнал с выхода камеры поступает на монитор для непосредственного наблюдения, а также в компьютер для регистрации. В эксперименте регистрировалось распределение поля в выходной плоскости оптической системы в зависимости от положения скачка фазы входного сигнала на апертуре. Также исследовалось распределение в зависимости от периода решетки; изменение пространственной частоты достигалось поворотом маски, имитирующей входной сигнал, вокруг вертикальной оси. Результаты эксперимента представлены на рис. 2: зависимость распределения от положения скачка фазы на апертуре (рис. 2, А) и от пространственной частоты входного сигнала (рис. 2, В).

Наибольший интерес представляет обработка сигналов в реальном времени. Для работы с реальным сигналом экспериментальная установка была модифицирована следующим образом (рис. 1, В). Для ввода информации использован акустооптический модулятор на молибдате свинца. Пучок света после расширителя фокусируется на акустооптическом модуляторе цилиндрической линзы L4; линза L1 заменена на сферическую для компенсации расходимости пучка в вертикальной плоскости, вызванного введением линзы L4. Кроме того, поскольку для регистрации вейвлет-преобразования сигнала в реальном времени требуются быстродействующие устройства регистрации [3], в схеме использованы импульсный лазер ($\lambda = 0.531\ \mu\text{m}$) и устройство синхронизации лазера и источника сигнала, управляемое компьютером. Устройство синхронизации обеспечивает формирование заданной задержки между началом сигнала и импульсом лазера, что позволило регистрировать результаты при помощи той же ПЗС-камеры. Исследуемый

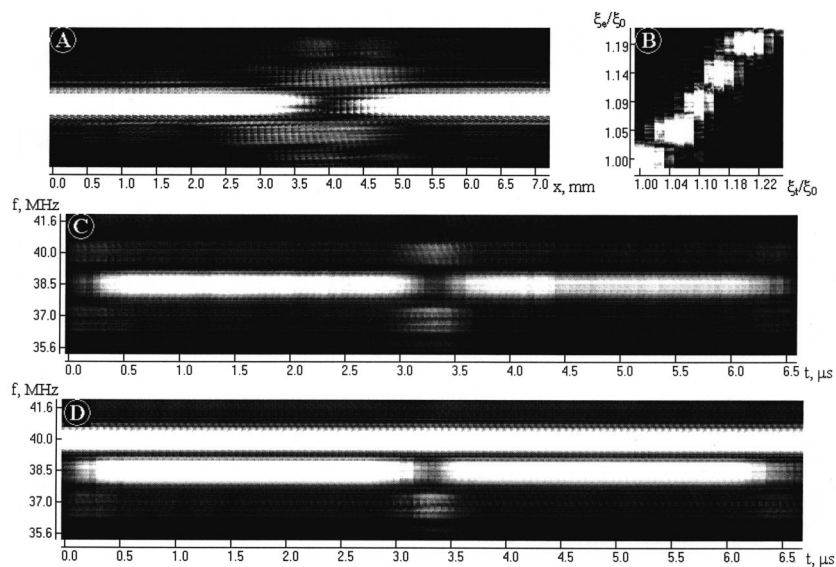


Рис. 2. Сигналы на выходе вейвлет-процессора в модельном эксперименте (A, B) и при работе с реальными сигналами (C, D). A — вдоль горизонтальной оси отложена координата скачка фазы x ; B — по осям отложены пространственные частоты ξ_e — «экспериментальная», соответствующая номеру канала, и ξ_t — «теоретическая», соответствующая углу поворота маски, нормированные на пространственную частоту маски ξ_0 . C и D — вдоль горизонтальных осей отложено время, отсчитываемое от переднего фронта импульса, а вдоль вертикальной — центральная частота вейвлета в соответствующем канале.

сигнал представляет собой последовательность двух радиоимпульсов с несущей частотой 38.5 MHz длительностью 3.3 μ s, фазы которых отличаются на π . В эксперименте регистрировалось распределение светового поля в выходной плоскости системы в зависимости от задержки между началом сигнала и импульсом лазера. Помимо того, зарегистрированы результаты при одновременном воздействии на входе импульсного фазоманипулированного и непрерывного гармонического сигналов. Результаты эксперимента представлены на рис. 2, C и D в виде времячастотных распределений фазоманипулированного сигнала без помехи и с гармонической помехой соответственно. Из рис. 2, D

видно, что регистрация скачка фазы возможна даже при наличии близкой по частоте интенсивной гармонической помехи.

Таким образом, в настоящей работе рассмотрены возможности применения оптического вейвлет-процессора для анализа структуры шумоподобных сигналов; впервые реализован оптический вейвлет-процессор, в котором использован импульсный лазер, синхронизированный с исследуемым сигналом. На основании результатов эксперимента можно сделать заключение о перспективности применения оптических вейвлет-процессоров для обработки сложных сигналов в реальном времени. Применение различных базисных вейвлетов позволит дополнительно расширить возможности вейвлет-процессора.

Список литературы

- [1] Астафьева Н.М. // УФН. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
- [2] DeCusatis C., Koay J., Litynsky D.M., Das P. // Proc. SPIE. V. 2643. P. 17–37.
- [3] Yulong Sheng, Danny Roberge, Harold H. Szu // Optical Engineering. 1992. V. 31 (9). P. 1840–1845.