

# Анализ амплитудно-фазовых характеристик изменяющихся во времени оптических сигналов и передаточных функций

В.А.Зубов

*Анализируются возможности получения информации об изменении во времени амплитуды и фазы оптического сигнала с помощью модуляционно-спектрального метода. Рассмотрены три варианта анализа сигналов: непосредственный анализ исследуемого сигнала, характеристики которого изменяются во времени, исследование изменения во времени оптических характеристик анализируемого объекта или среды путем зондирования их излучением с известной структурой и измерения параметров прошедшего через анализируемый объект излучения и одновременное определение и анализ изменяющихся во времени структуры сигнала и структуры передаточной функции, описывающей воздействие передающей среды, объекта или оптической системы на распространяющийся сигнал.*

*Ключевые слова:* фазовая проблема в оптике, измерение ультракоротких импульсов.

## 1. Введение

Проблемы получения информации об амплитудной и фазовой структурах изменяющихся во времени оптических сигналов, о комплексных аппаратных функциях, характеризующих внутреннюю структуру сред распространения сигналов и их воздействие на сигналы, а также о параметрах оптических неоднородностей, присутствующих в передающих средах или исследуемых объектах, вызывают большой интерес. Это обусловлено тем, что решение подобных задач представляется весьма существенным как для фундаментальных оптических исследований, так и для технических приложений [1–3].

Для изменяющихся во времени оптических сигналов решение задач об амплитудно-фазовом характере сигналов и передаточных функций связано с исследованием процессов передачи сигналов через искажающие среды с учетом соответствующих искажений и уменьшения их влияния, с анализом структуры сред или объектов, вызывающих в результате разного рода физических, химических или биологических воздействий модуляцию во времени зондирующего излучения, с изучением явлений, происходящих в результате взаимодействия излучения с веществом и вызывающих изменения во времени структуры и оптических характеристик объектов или сред.

Представляют интерес и важные прикладные вопросы, которые имеют отношение к обработке информации в оптических системах при использовании изменяющихся во времени амплитудно-фазовых воздействий, к распространению излучения и передаче информации о структуре сигналов в оптических и световодных линиях связи при наличии изменяющихся во времени возмущающих факторов и оптических неоднородностей, а также к лазерной локации в оптическом диапазоне, в процессе которой приходится учитывать изменяющиеся во вре-

мени амплитудное и фазовое воздействия структуры исследуемых объектов или передающих сред.

В литературе неоднократно рассматривались методы измерения длительности и структуры сигналов сверхкороткого лазерного излучения ( $10^{-9}$  –  $10^{-14}$  с), и прежде всего – прямые методы регистрации сигналов с применением скоростных электронно-оптических преобразователей [4–6]. Измеряемым параметром в таких методах является распределение интенсивности в регистрируемом сигнале или его амплитудная структура. Достижимое при этом временное разрешение ограничивается динамическим разрешением электронной оптики и предельными скоростями электронных разверток и составляет  $\sim 1$  пс.

Среди существующих в настоящее время косвенных методов измерения наивысшее разрешение по времени обеспечивают разного рода корреляционные методы [2–4, 7, 8]. Именно с их использованием можно получить не только структуру корреляционной функции, но и информацию об амплитудной структуре сигналов. В этом случае для однозначной интерпретации результатов требуются дополнительные сведения о сигнале. Подобные данные обеспечиваются с помощью методов, в которых используются скоростные затворы, работающие на основе эффектов Керра, Поккельса или на основе насыщающегося поглощения [4].

Для получения информации об амплитудной и фазовой структурах сигналов применяются и голографические методы, позволяющие регистрировать амплитуды и фазы отдельных спектральных компонент анализируемого сигнала. К ним относятся методы с использованием нестационарной опорной волны [8–10], развитием которых стали методы спектральной голографии [11–14]. Нужно также отметить красивый с физической точки зрения подход, основанный на выжигании провалов в спектрах поглощения спектрально-селективных сред [15–17]. Для регистрации используются среды, обладающие узкой линией с однородным уширением и широкой полосой поглощения, обусловленной неоднородным уширением.

Однако и голографические методы, и методы регистрации в спектрально-селективных средах требуют создания опорного сигнала в виде одиночного импульса, длительность которого должна быть меньше характерного масштаба изменений во времени анализируемого сигнала, т.к. для регистрации требуется формирование спектра, охватывающего весь диапазон спектра исследуемого сигнала. Частичную информацию о сигнале дают спектральные методы [18–20].

Таким образом, все перечисленные методы имеют определенные ограничения или трудности реализации – либо регистрируется лишь часть информации о сигнале (длительность, функция корреляции, спектр), либо требуется использование специально сформированной опорной волны, либо необходимо применение специальных регистрирующих сред, работающих при низких температурах.

Современное развитие лазерной техники и методов физической и когерентной оптики [21–23] позволяет ставить и эффективно решать фундаментальные проблемы регистрации, обработки и анализа амплитудных и фазовых характеристик изменяющихся во времени оптических сигналов произвольной структуры, т.е. рассматривать и решать фазовую проблему в оптике применительно к изменяющимся во времени сигналам.

В настоящей работе анализируется возможность получения информации об изменении во времени амплитуды и фазы оптического сигнала с помощью амплитудно-спектрального метода.

Для измерения спектральных, временных, амплитудных и фазовых характеристик сигналов лазерного излучения произвольной формы используется подход, основанный на регистрации специально сформированных с помощью модуляторов амплитудных распределений сигналов, предложенный ранее для анализа структуры стационарных световых полей [24]. Это модуляционно-спектральный метод анализа и решения фазовой проблемы в оптике. Его простейший вариант состоит в формировании картины спектра сигнала и картины спектра сигнала, преобразованного оптическим модулятором с изменяющимися во времени характеристиками [25].

Подобный модуляционно-спектральный подход используется и для исследования структуры изменяющихся во времени оптических неоднородностей в объектах или

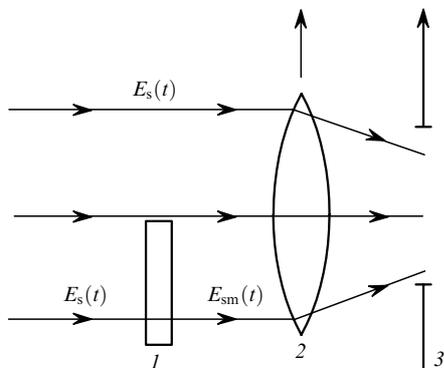


Рис.1. Принципиальная оптическая схема анализа амплитудной и фазовой структур изменяющегося во времени оптического сигнала  $E_s(t)$  при использовании двухканальной системы регистрации с применением в одном из каналов дополнительного модулятора: 1 – оптический модулятор; 2 – оптическая система; 3 – входная щель спектрального прибора.

средах. Анализируемый объект зондируется оптическим сигналом известной структуры. При прохождении излучения через объект происходит дополнительная модуляция сигнала, изменяются его амплитудные и фазовые характеристики. Кроме того, при решении ряда задач возникают такие ситуации, когда требуется одновременно определить амплитудно-фазовую структуру изменяющегося во времени сигнала и структуру комплексной передаточной или аппаратной функции, характеризующей воздействие на сигнал оптической системы или среды распространения излучения. Для решения задач такого рода также можно использовать модуляционно-спектральный подход, правда, несколько усложнив его [26]. Анализ и описание оптических схем в работе приводятся в рамках аппарата физической оптики [27–29].

## 2. Измерение амплитудно-фазовых характеристик изменяющихся во времени оптических сигналов

Модуляционно-спектральный метод измерения амплитудно-фазовой структуры изменяющегося во времени оптического сигнала произвольной структуры заключается в формировании и регистрации картины его спектра и картины спектра сигнала, преобразованного в результате дополнительной известной модуляции во времени анализируемого излучения.

Схема освещения входной щели спектрального прибора для реализации модуляционно-спектрального метода с использованием двух измерительных каналов, в одном из которых установлен модулятор 1, приведена на рис.1.

Исследуемый сигнал лазерного излучения с комплексной амплитудой  $\mathcal{E}_s(t)$  и средней частотой  $\omega_0$

$$E_s(t) = \mathcal{E}_s(t) \exp(-i\omega_0 t) \quad (1)$$

характеризуется длительностью  $T_s$  и комплексной амплитудой спектра  $\mathcal{E}_s(\omega)$ , сосредоточенного в окрестности частоты  $\omega_0$  и имеющего ширину  $\Delta\omega_s$ , причем  $\Delta\omega_s \ll \omega_0$ . Часть исследуемого сигнала пропускается через модулятор, воздействие которого на излучение описывается известной функцией  $M(t)$  или  $M(\omega)$ . Длительность воздействия модулятора на излучение  $T_m$  должно совпадать с длительностью сигнала или превышать ее ( $T_m \geq T_s$ ). В результате после модулятора формируется поле

$$E_{sm}(t) = \mathcal{E}_s(t) M(t) \exp(-i\omega_0 t). \quad (2)$$

С помощью оптической системы сигналы направляются на входную щель спектрального прибора. Для регистрации используется двухканальная схема. На одну часть щели непосредственно направляется исследуемое излучение, на вторую – излучение после модулятора.

На выходе спектрального прибора формируются спектры сигналов (1) и (2), которые описываются распределением комплексных амплитуд

$$\mathcal{E}_s(\omega) = A_s(\omega) \exp[i\Phi_s(\omega)], \quad (3)$$

$$\mathcal{E}_{sm}(\omega) = \int \mathcal{E}_s(\omega') M(\omega - \omega') d\omega'.$$

Регистрируемым параметром, как и во всех других оптических измерительных системах, является распределение интенсивности. С учетом амплитудной и фазовой структур спектра сигнала (3) регистрируемые распределения интенсивностей с точностью до несущественных для анализа множителей описываются следующими выражениями:

$$I_s(\omega) = A_s^2(\omega),$$

$$I_{sm}(\omega) = \left[ \int A_s(\omega') \exp[i\Phi_s(\omega')] M(\omega - \omega') d\omega' \right] \times [\text{компл. сопр.}] \quad (4)$$

Распределения интенсивностей (4) и известная функция, описывающая модулирующее воздействие фильтра  $M(\omega)$  на анализируемое излучение, позволяют найти амплитудную и фазовую структуры спектра сигнала. На основании формул (4) определяется амплитудный спектр сигнала  $A_s(\omega)$  и путем решения интегрального уравнения находится фазовая структура  $\Phi_s(\omega)$  спектра сигнала. С помощью обратного преобразования Фурье по полученным значениям спектральных распределений восстанавливается амплитудно-фазовая структура анализируемого сигнала.

В качестве примера, иллюстрирующего работу схемы и показывающего возможность решения задачи, рассмотрим использование простого модулятора, обеспечивающего линейную во времени модуляцию амплитуды. Амплитудное пропускание модулятора описывается функцией  $M(t) = t/T_m$ . В этом случае комплексные амплитуды спектральных компонент световых полей, формируемых на выходе спектрального прибора, описываются выражениями  $\mathcal{E}_s(\omega)$  и

$$\mathcal{E}_{sm}(\omega) = \frac{i}{T_m} \int (-it) \mathcal{E}_s(t) \exp(-i\omega t) dt$$

$$= \frac{i}{T_m} \frac{d}{d\omega} \mathcal{E}_s(\omega). \quad (5)$$

Регистрируемые распределения интенсивностей спектров имеют следующий вид (см. (4)):

$$I_s(\omega) = A_s^2(\omega),$$

$$I_{sm}(\omega) = \frac{1}{T_m^2} \left[ \left( \frac{d}{d\omega} A_s(\omega) \right)^2 + A_s^2(\omega) \left( \frac{d}{d\omega} \Phi_s(\omega) \right)^2 \right]. \quad (6)$$

В процессе последующей обработки по распределению интенсивности  $I_s(\omega)$  определяются амплитудные распределения  $A_s(\omega)$  и  $dA_s(\omega)/d\omega$ . Далее с учетом полученных зависимостей по распределению интенсивности  $I_{sm}(\omega)$  находятся  $d\Phi_s(\omega)/d\omega$  и  $\Phi_s(\omega)$ . Наконец, с использованием полученных распределений амплитуд  $A_s(\omega)$  и фаз  $\Phi_s(\omega)$  в спектре рассчитывается структура изменения во времени анализируемого сигнала с учетом его амплитуд и фаз

$$\mathcal{E}_s(t) = a_s(t) \exp[i\phi_s(t)]$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int A_s(\omega) \exp[i\Phi_s(\omega)] \exp(i\omega t) d\omega, \quad (7)$$

что дает решение задачи.

### 3. Измерение амплитудно-фазовых изменяющихся во времени характеристик аппаратной функции или передающей среды

Схема анализа изменяющихся во времени амплитудных и фазовых характеристик исследуемой среды или изучаемой аппаратной функции путем зондирования оптическим сигналом с известной структурой приведена на рис.2.

Зондирующий сигнал вида (1) проходит через исследуемую среду или объект 4, воздействие которых описывается комплексной функцией  $R(t)$  или  $R(\omega)$ . Время воздействия среды  $T_r$  соизмеримо с длительностью сигнала ( $T_r \simeq T_s$ ). Дополнительный модулятор 1 выполняет модуляцию известного вида, характеризующую функцией  $M(t)$  или  $M(\omega)$ . Длительность воздействия модулятора  $T_m$  на излучение совпадает с длительностью сигнала или несколько превышает ее ( $T_m \geq T_s$ ). Поля с учетом воздействия среды и модулятора описываются, подобно (2), выражениями

$$E_{sr}(t) = \mathcal{E}_{sr}(t) \exp(-i\omega_0 t),$$

$$E_{srm}(t) = \mathcal{E}_{srm}(t) M(t) \exp(-i\omega_0 t). \quad (8)$$

С помощью оптической системы 2 излучение направляется на входную щель спектрального прибора 3, формирующего в плоскости регистрации спектры сигналов с распределениями амплитуд, которые, подобно (3), имеют следующий вид:

$$\mathcal{E}_{sr}(\omega) = A_{sr}(\omega) \exp[i\Phi_{sr}(\omega)],$$

$$\mathcal{E}_{srm}(\omega) = \int \mathcal{E}_{sr}(\omega') M(\omega - \omega') d\omega'. \quad (9)$$

Регистрируемые в спектрах сигналов распределения интенсивностей  $I_{sr}(\omega)$  и  $I_{srm}(\omega)$  с учетом известной функции  $M(\omega)$  и (9) описываются, подобно (4), как

$$I_{sr}(\omega) = A_{sr}^2(\omega),$$

$$I_{srm}(\omega) = \left[ \int A_{sr}(\omega') \exp[i\Phi_{sr}(\omega')] M(\omega - \omega') d\omega' \right] \times [\text{компл. сопр.}] \quad (10)$$

и позволяют, в принципе, определить амплитудную ( $A_{sr}(\omega)$ ) и фазовую ( $\Phi_{sr}(\omega)$ ) структуры зондирующего сигнала, прошедшего через исследуемую среду или объект, и, следовательно, частотные и амплитудные характеристики среды или объекта при известной исходной структуре зондирующего сигнала.

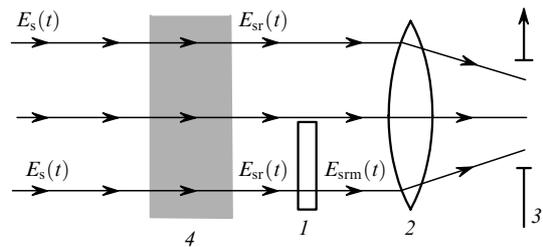


Рис.2. Принципиальная двухканальная оптическая схема анализа изменений во времени оптических характеристик среды распространения сигнала. Обозначения те же, что и на рис.1; 4 – исследуемая среда.

Как и выше, в качестве примера рассматривается модуляция, обеспечивающая линейное во времени изменение амплитуды сигнала. Пропускание модулятора описывается функцией  $M(t) = t/T_m$ . Комплексные амплитуды в спектре зондирующего сигнала с учетом действия модулятора имеют вид  $\mathcal{E}_{sr}(\omega)$  (см. (9)) и

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{srm}(\omega) &= \frac{i}{T_m} \int (-it)\mathcal{E}_{sr}(t) \exp(-i\omega t) dt \\ &= \frac{i}{T_m} \frac{d}{d\omega} \mathcal{E}_{sr}(\omega). \end{aligned} \quad (11)$$

Регистрируемые распределения интенсивностей в спектрах сигналов в данном случае описываются выражениями (см. (6))

$$\begin{aligned} I_{sr}(\omega) &= A_{sr}(\omega)^2, \\ I_{srm}(\omega) &= \frac{1}{T_m^2} \left\{ \left[ \frac{d}{d\omega} A_{sr}(\omega) \right]^2 + A_{sr}^2(\omega) \left[ \frac{d}{d\omega} \Phi_{sr}(\omega) \right]^2 \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

На основании распределения интенсивности  $I_{sr}(\omega)$  находятся  $A_{sr}(\omega)$  и  $dA_{sr}(\omega)/d\omega$ , а на основании распределения  $I_{srm}(\omega)$  рассчитываются  $d\Phi_{sr}(\omega)/d\omega$  и  $\Phi_{sr}(\omega)$  и затем определяются комплексные амплитуды  $\mathcal{E}_{sr}(\omega)$  и  $\mathcal{E}_{srm}(\omega)$ .

При дальнейшем анализе следует принять во внимание характер воздействия исследуемой среды или объекта на зондирующее излучение. Практически рассматриваются два варианта такого воздействия. Первый представляет собой модуляцию и описывается операцией умножения, что дает функцию  $R$ , характеризующую воздействие среды или объекта на излучение, в виде

$$\mathcal{E}_{sr}(t) = \mathcal{E}_s(t)R(t), \quad R(t) = \frac{\mathcal{E}_{sr}(t)}{\mathcal{E}_s(t)}. \quad (13)$$

Второй вариант соответствует преобразованию излучения, которое характеризуется операцией свертки и описывается как

$$\mathcal{E}_{sr}(t) = \int \mathcal{E}_s(t')R(t-t')dt' \quad \text{или} \quad \mathcal{E}_{sr}(\omega) = \mathcal{E}_s(\omega)R(\omega). \quad (14)$$

Это позволяет получить описание воздействия среды или объекта в виде  $R(\omega) = \mathcal{E}_{sr}(\omega)/\mathcal{E}_s(\omega)$  или  $R(t)$  путем обратного преобразования Фурье.

#### 4. Одновременное измерение амплитудно-фазовых характеристик изменяющихся во времени оптических сигналов и аппаратных или передаточных функций

Рассматриваемый вариант схемы предназначен для одновременного определения и анализа изменяющихся во времени амплитудно-фазовых структур сигнала и передаточной или аппаратной функции, описывающей воздействие передающей среды, объекта или оптической системы на распространяющийся сигнал (рис. 3).

Зондирующий анализируемый сигнал вида (1) характеризуется комплексной амплитудой спектральных компонент  $\mathcal{E}_s(\omega)$ , сосредоточенных в окрестности средней частоты  $\omega_0$ , причем для полосы частот спектра сигнала  $\Delta\omega_s$  выполняется условие  $\Delta\omega_s \ll \omega_0$ . В четырехканальной

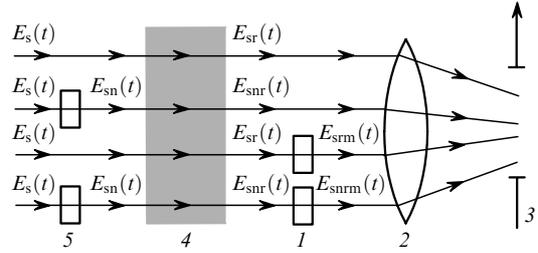


Рис.3. Принципиальная четырехканальная оптическая схема одновременного анализа изменений во времени амплитудной и фазовой структур светового сигнала  $E_s(t)$  и оптических характеристик среды  $R(t)$  его распространения. Обозначения те же, что и на рис.1, 2; 5 – дополнительный модулятор.

схеме два сигнала проходят через дополнительный модулятор 5, воздействие которого на излучение описывается функцией  $N(t)$  или  $N(\omega)$ . Длительность  $T_n$  воздействия модулятора на излучение должна равняться длительности анализируемого сигнала или несколько превышать ее ( $T_n \geq T_s$ ). С учетом действия модулятора и для сокращения записи поля представляются в виде

$$E_j(t) = \mathcal{E}_j(t) \exp(-i\omega_0 t).$$

Здесь и далее индекс  $j = s, sn$ . Воздействие передающей среды или аппаратной функции объекта описывается как  $R(t)$  или  $R(\omega)$ , причем время  $T_r$  воздействия среды или объекта соизмеримо с длительностью сигнала ( $T_r \approx T_s$ ). Еще одна модуляция для двух каналов вводится модулятором 1, воздействие которого на излучение описывается как  $M(t)$  или  $M(\omega)$ . Длительность воздействия модулятора  $T_m$ , как и выше, совпадает с длительностью сигнала или несколько превышает ее ( $T_m \geq T_s$ ). Поля, формируемые с учетом воздействия среды и двух модуляторов, имеют вид (см. (2) или (8))

$$E_{jr}(t) = \mathcal{E}_{jr}(t) \exp(-i\omega_0 t),$$

$$E_{jrm}(t) = \mathcal{E}_{jr}(t)M(t) \exp(-i\omega_0 t).$$

На выходе спектрального прибора формируются четыре спектра, описываемых, как в (3) или (9), комплексными амплитудами

$$\mathcal{E}_{jr}(\omega) = A_{jr}(\omega) \exp[i\Phi_{jr}(\omega)], \quad (15)$$

$$\mathcal{E}_{jrm}(\omega) = \int \mathcal{E}_{jr}(\omega')M(\omega - \omega')d\omega'.$$

Регистрируемые распределения интенсивностей в спектрах, подобно (4) или (10), даются выражениями

$$I_{jr}(\omega) = A_{jr}^2(\omega), \quad (16)$$

$$I_{jrm}(\omega) = \left[ \int A_{jr}(\omega') \exp[i\Phi_{jr}(\omega')]M(\omega - \omega')d\omega' \right]^2$$

× [компл. сопр.].

Для иллюстрации возможности реализации данного метода измерения, как и выше, приводится пример конкретной модуляции в виде линейной амплитудной модуляции.

Воздействие модулятора описывается функцией  $M(t) = t/T_m$ . В этом случае комплексные амплитуды в спектрах четырех полей на выходе спектрального прибора описываются как  $\mathcal{E}_{jr}(\omega)$  (см. (15)) и

$$\mathcal{E}_{jrm}(\omega) = \frac{i}{T_m} \int (-it) \mathcal{E}_{jr}(t) \exp(-i\omega t) dt = \frac{i}{T_m} \frac{d}{d\omega} \mathcal{E}_{jr}(\omega).$$

Регистрируемые в выходной плоскости распределения интенсивностей в спектрах, подобно (6) или (12), с учетом (20) имеют вид

$$I_{jr}(\omega) = A_{jr}^2(\omega),$$

$$I_{jrm}(\omega) = \frac{1}{T_m^2} \left[ \left( \frac{d}{d\omega} A_{jr}(\omega) \right)^2 + A_{jr}^2(\omega) \left( \frac{d}{d\omega} \Phi_{jr}(\omega) \right)^2 \right].$$

При обработке результатов из распределений интенсивностей  $I_{jr}(\omega)$  находятся амплитудные структуры  $A_{jr}(\omega)$ ,  $dA_{jr}(\omega)/d\omega$ , а затем, на основании  $I_{jrm}(\omega)$ , – фазовые распределения  $d\Phi_{jr}(\omega)/d\omega$ ,  $\Phi_{jr}(\omega)$ . Рассчитанные амплитудные ( $A_{jr}(\omega)$ ) и фазовые ( $\Phi_{jr}(\omega)$ ) распределения определяют комплексные амплитуды полей в частотном ( $\mathcal{E}_{jr}(\omega)$ ) и временном ( $\mathcal{E}_{jr}(t)$ ) представлениях.

При дальнейшем анализе необходимо учесть характер воздействия анализируемой среды или объекта на зондирующее излучение. В случае воздействия среды, описываемого операцией свертки, комплексные амплитуды полей имеют вид (см. (14))

$$\mathcal{E}_{jr}(t) = \int \mathcal{E}_j(t') R(t-t') dt', \quad \mathcal{E}_{jr}(\omega) = \mathcal{E}_j(\omega) R(\omega). \quad (17)$$

Использование модулятора 5, обеспечивающего линейную амплитудную модуляцию во времени  $N(t) = t/T_n$ , формирует комплексные амплитуды в спектральном представлении, имеющие вид  $\mathcal{E}_s(\omega)$  (см. (3)) и

$$\mathcal{E}_{sn}(\omega) = \frac{i}{T_n} \int (-it) \mathcal{E}_s(t) \exp(-i\omega t) dt = \frac{i}{T_n} \frac{d}{d\omega} \mathcal{E}_s(\omega).$$

Выделение на основании (17) для найденных  $\mathcal{E}_{jr}(\omega)$  с учетом амплитудных структур  $A_{jr}(\omega)$ ,  $dA_{jr}(\omega)/d\omega$  и фазовых распределений  $d\Phi_{jr}(\omega)/d\omega$ ,  $\Phi_{jr}(\omega)$  функции

$$R(\omega) = \frac{\mathcal{E}_{sr}(\omega)}{\mathcal{E}_s(\omega)} = \frac{\mathcal{E}_{snr}(\omega)}{\mathcal{E}_{sn}(\omega)} \quad (18)$$

дает дифференциальное уравнение для нахождения  $\mathcal{E}_s(\omega)$ :

$$\frac{i}{T_n} \mathcal{E}_{sr}(\omega) \frac{d}{d\omega} \mathcal{E}_s(\omega) = \mathcal{E}_{snr}(\omega) \mathcal{E}_s(\omega).$$

Решение уравнения с граничными условиями

$$\mathcal{E}_s(\omega) = 0 \text{ при } \omega = \omega_0 \pm \frac{\Delta\omega_s}{2}$$

позволяет получить  $\mathcal{E}_s(\omega)$  и на основании (18) –  $R(\omega)$ . Обратное преобразование Фурье позволяет найти искомые функции  $\mathcal{E}_s(t)$  и  $R(t)$ .

Для случая воздействия среды или объекта на излучение, описываемого операцией умножения (см. (13))

$$\mathcal{E}_{jr}(t) = \mathcal{E}_j(t) R(t), \quad (19)$$

модулятор 5 выполняет линейную амплитудную модуляцию по спектру в окрестности частоты  $\omega_0$  в диапазоне  $\Delta\omega_n$  вида  $N(\omega) = \omega/\Delta\omega_n$ . Распределения комплексных амплитуд в спектральном и временном представлениях записываются в виде  $\mathcal{E}_s(\omega)$  (см. (3)) и

$$\mathcal{E}_{sn}(\omega) = \mathcal{E}_s(\omega) N(\omega),$$

а также  $\mathcal{E}_s(t)$  (см. (1)) и

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{sn}(t) &= -\frac{i}{\Delta\omega_n} \int (i\omega) \mathcal{E}_s(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \\ &= -\frac{i}{\Delta\omega_n} \frac{d}{dt} \mathcal{E}_s(t). \end{aligned}$$

Выделение в (19) функции

$$R(t) = \frac{\mathcal{E}_{sr}(t)}{\mathcal{E}_s(t)} = \frac{\mathcal{E}_{snr}(t)}{\mathcal{E}_{sn}(t)} \quad (20)$$

дает дифференциальное уравнение для нахождения функции  $\mathcal{E}_s(t)$

$$-\frac{i}{\Delta\omega_n} \mathcal{E}_{sr}(t) \frac{d}{dt} \mathcal{E}_s(t) = \mathcal{E}_{snr}(t) \mathcal{E}_s(t)$$

с учетом найденных  $\mathcal{E}_s(t)$ ,  $\mathcal{E}_{snr}(t)$  и при граничных условиях

$$\mathcal{E}_s(t) = 0 \text{ при } t = 0 \text{ и } t = T_s.$$

Решение уравнения дает  $\mathcal{E}_s(t)$  и, в соответствии с (20), позволяет найти  $R(t)$ , т. е. получить искомые функции.

### 5. Оценки характеристик спектральной аппаратуры

Приведем некоторые численные оценки характеристик спектральной аппаратуры. Полный регистрируемый спектр  $\Delta\nu$  или  $\Delta\lambda$  определяет получаемое разрешение во времени

$$\delta t = \frac{1}{\Delta\nu} = \frac{\lambda^2}{c\Delta\lambda}.$$

Спектральное разрешение  $\delta\nu$  или  $\delta\lambda$ , обеспечиваемое прибором, характеризуется шириной аппаратной функции и определяет полное время регистрации

$$T_s = \frac{1}{\delta\nu} = \frac{\lambda^2}{c\delta\lambda}.$$

Для спектрального прибора с отражательной дифракционной решеткой с треугольным профилем штриха отношение

$$\frac{\Delta\nu}{\delta\nu} = \frac{\Delta\lambda}{\delta\lambda}$$

достаточно велико:  $10^4 - 10^5$  и более. Следовательно, отношение полного времени регистрации  $T_s$  к временному разрешению  $\delta t$  столь же велико.

Для спектра сигнала, сосредоточенного в окрестности  $\lambda \sim 1000$  нм, и для дифракционной решетки, имеющей 800 штр./мм и длину 150 мм, разрешающая способность  $R = \lambda/\delta\lambda = 120 \times 10^3$ , что обеспечивает спектральное разрешение  $\delta\lambda \sim 0.008$  нм и, следовательно, полное время регистрации  $T_s \sim 4 \times 10^{-10}$  с. Разрешение во времени  $\delta t \sim 10^{-14}$  с обеспечивается при регистрации спектрального диапазона  $\Delta\lambda \sim 300$  нм.

Аналогично для спектра сигнала в окрестности длины волны  $\lambda \sim 800$  нм и для дифракционной решетки, имеющей 1000 штр./мм и длину 150 мм,  $R = \lambda/\delta\lambda = 15 \times 10^3$ ,  $\delta\lambda \sim 0.005$  нм и  $T_s \sim 4 \times 10^{-10}$  с. Разрешение во времени  $\delta t \sim 10^{-14}$  с достигается при регистрации спектрального диапазона  $\Delta\lambda \sim 200$  нм.

При работе от узкой грани штриха дифракционной решетки в рассматриваемых случаях возможна работа во втором порядке дифракции, что увеличивает полное время регистрации до  $\sim 10^{-9}$  с [30, 31].

Таким образом, применение спектральных приборов с достаточно распространенными характеристиками позволяет получить весьма высокое разрешение во времени.

Возможность получения полного времени регистрации  $T_s \sim 10^{-9}$  с позволяет надеяться на успешное использование существующих модуляторов для реализации требуемого режима работы. Это могут быть механические модуляторы на газовых опорах с турбинным приводом, подобные используемым в фотохронографах [6], или модуляторы на основе электрооптических кристаллов [4].

## 6. Заключение

Таким образом, выявлена принципиальная возможность определения, измерения и анализа изменения во времени спектральных, амплитудных и фазовых характеристик изменяющихся во времени оптических сигналов произвольной структуры с высоким временным разрешением при использовании двухканальной схемы спектрального анализа и дополнительной модуляции сигнала. Подобный подход позволяет также определять и анализировать изменяющиеся амплитудные и фазовые характеристики оптических сред или объектов путем зондирования их излучением с известным изменением структуры последнего во времени. Использование четырехканальной схемы спектрального прибора с двумя дополнительными модуляторами дает возможность одновременно получать информацию о структуре сигналов и о воздействии среды или объекта на зондирующее излучение.

Для решения задач не требуется привлечения какой-либо дополнительной информации или выполнения спе-

циальных условий. Обработка информации реализуется без использования итерационных процедур, что позволяет получить результаты в квазиреальном времени.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 96-02-19107а и 02-02-16482, а также гранта ФЦНТП Минпромнауки по направлению «Фундаментальная спектроскопия».

1. Глебович Г.В., Андриянов А.В., Введенский Ю.В., Ковалев И.П., Крылов В.В., Рябинин Ю.А. *Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов* (М.: Радио и связь, 1984).
2. Крюков П.Г. В сб. *Фундаментальная оптика и спектроскопия* (М.: изд-е ФИАН, 1998, вып. 1, с. 20–100).
3. Крюков П.Г. *Квантовая электроника*, **31**, 95 (2001).
4. Брэдли Д.Дж., Нью Джеффри Г.К. *Труды ИИЭР*, **62**, № 3, 31 (1974).
5. Бутслев М.М., Степанов Б.М., Фанченко С.Д. *Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях* (М.: Наука, 1978).
6. Новицкий Л.А., Степанов Б.М. *Фотометрия быстротекущих процессов (справочник)* (М.: Машиностроение, 1983).
7. Кузнецова Т.И. *Препринт ФИАН № 47* (М., 1968).
8. Кузнецова Т.И. *Труды ФИАН*, **84**, 62 (1975).
9. Зубов В.А., Крайский А.В., Кузнецова Т.И. *Письма в ЖЭТФ*, **13**, 443 (1971).
10. Зубов В.А., Кузнецова Т.И. *Квантовая электроника*, № 1(13), 135 (1973).
11. Мазуренко Ю.Т. *Квантовая электроника*, **12**, 1235 (1985).
12. Мазуренко Ю.Т., Путилин С.Э., Кузнецов В.В., Лавренов Л.М. *Оптика и спектроскопия*, **71**, 385 (1991).
13. Weiner A.M., Leaird D.E., Reitze D.H., Paek E.G. *Opt. Lett.*, **17**, 224 (1992).
14. Мазуренко Ю.Т. *Оптический журнал*, **61**, 40 (1994).
15. Ребане А.К., Каарли Р.К., Саари П.М. *Письма в ЖЭТФ*, **38**, 320 (1983).
16. Саари П.М., Ребане А.К. *Изв. АН ЭССР. Сер. физ.-матем.*, **33**, 322 (1984).
17. Саари П.М. *Труды ИФ АН ЭССР*, **59**, 157 (1986).
18. Мальшев В.И., Масалов А.В., Сычев А.А. *ЖЭТФ*, **59**, № 1(7), 48 (1970).
19. Treasu E.V. *Appl. Phys. Lett.*, **17**, 14 (1970).
20. Сычев А.А. *Труды ФИАН*, **84**, 3 (1982).
21. Ферверда Х.А. *Проблема восстановления фазы волнового фронта по амплитудному распределению и функции когерентности*. В кн. *Обратные задачи в оптике* (М.: Машиностроение, 1984).
22. Кузнецова Т.И. *УФН*, **154**, 677 (1988).
23. Кузнецова Т.И. *Труды ФИАН*, **212**, 38 (1991).
24. Зубов В.А. *Квантовая электроника*, **14**, 1715 (1987).
25. Зубов В.А. *Квантовая электроника*, **17**, 229 (1990).
26. Зубов В.А. *Квантовая электроника*, **23**, 378 (1996).
27. Папулис А. *Теория систем и преобразований в оптике* (М.: Мир, 1971).
28. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теория поля* (М.: Наука, 1988).
29. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М.: Наука, 1973).
30. Мальшев В.И. *Введение в экспериментальную спектроскопию* (М.: Наука, 1979).
31. Лебедева В.В. *Техника оптической спектроскопии* (М.: изд-во МГУ, 1986).