

СОВРЕМЕННЫЕ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРЫ - НОВАЯ ВЕТВЬ КОМПЬЮТЕРИЗОВАННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Оптическая Фурье-спектроскопия - быстро развивающаяся область современной спектроскопии, охватывающая субмиллиметровый, инфракрасный, видимый и ультрафиолетовый диапазоны спектра.

Известные преимущества Фурье-спектрометров перед щелевыми спектрометрами в светосиле, в многоканальности, в объединении с лазерным интерферометром позволяют гибко использовать их для достижения предельно высоких параметров аппаратуры в одном из трех качеств - высоком разрешении, высокой фотометрической точности (большое отношение сигнал/шум), большом быстродействии или в удачном сочетании любой пары из этих признаков. Отсюда и потенциальное многообразие типов Фурье-спектрометров.

Значительная часть этого многообразия Фурье-спектрометров быстро реализуется за последнее десятилетие за рубежом (в США, Франции, ФРГ, Великобритании, Японии, Канаде) как в исследовательских лабораториях, так и в виде коммерческой спектральной аппаратуры, выпускаемой более чем десятком фирм. Сразу отметим одну важную тенденцию - Фурье-спектрометры среднего и низкого разрешения за последние 3-5 лет стали успешно конкурировать с классическими дифракционными спектрометрами, превосходя их по точности и быстродействию. Более того, такие фирмы как Perkin Elmer, Beckman, известные сорокалетней историей выпуска классических дифракционных и призмных спектрометров, стали выпускать Фурье-спектрометры широкого применения. Если 10-20 лет назад Фурье-спектроскопия, завоевывая себе право на существование, шла по пути создания универсальных измерительных комплексов, обладавших и высоким разрешением и очень широким рабочим диапазоном длин волн, чтобы этими параметрами превзойти классические спектрометры и выдержать конкуренцию с ними, то теперь ситуация иная. Фирмы стали специализировать свои Фурье-спектрометры, упрощая их конструкцию, уменьшая габариты, повышая надежность, но сохраняя достаточно мощные ЭВМ в составе прибора.

Основным элементом любого Фурье-спектрометра является двухлучевой интерферометр, например интерферометр Майкельсона, одно из зеркал которого движется поступательно в направлении нормальном своей поверхности (рис. 1). Это перемещение позволяет прибору регистрировать функцию автокорреляции входящего в него излучения с амплитудой электрического поля $E(t)$. Поясним это. Пластина светоделителя делит падающий световой поток пополам. После прохождения некоторого оптического пути в плечах интерферометра полученные пучки снова смешиваются, причем один из них приобретает временную задержку τ по отношению к другому. Фотоприемник регист-

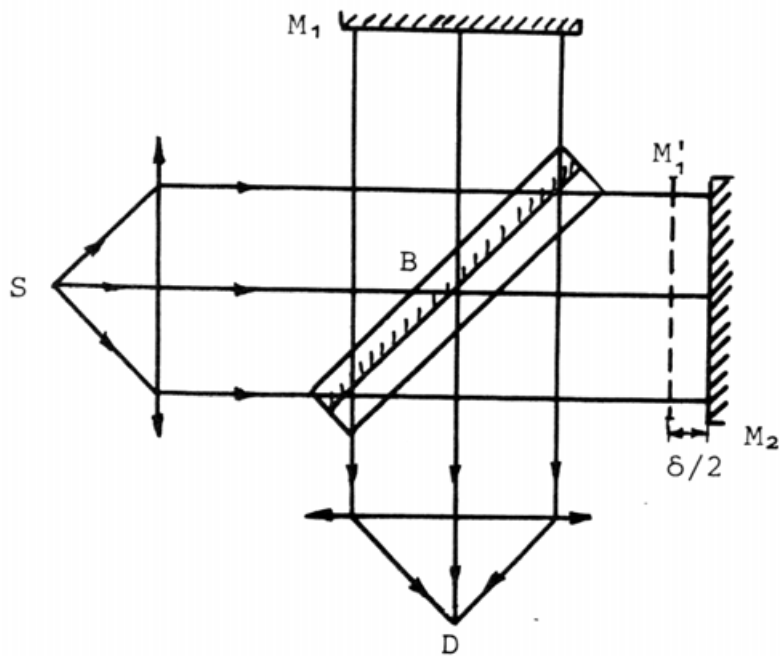


Рис. 1. Схема интерферометра Майкельсона:
 S - источник излучения, M_1 - фиксированное
 зеркало, M_2 - подвижное зеркало, M_1' - изображение
 фиксированного зеркала в плече зеркала M_2 ,
 B - светоделитель, D - фотоприемник

рирует усредненную за время Q интенсивность (Q - постоянная времени приемно-регистрирующей системы):

$$I_Q(t) = (\rho u/2) \langle [E(t) + E(t - \tau)]^2 \rangle =$$

$$= (\rho u/2) [\langle E^2(t) \rangle + \langle E^2(t - \tau) \rangle + \langle 2E(t)E(t - \tau) \rangle],$$

где

ρ - пропускание;

u - геометрический фактор прибора.

Излучение света атомами является случайным процессом, соответственно величина $E(t)$ оказывается случайной функцией. Если при этом $E(t)$ - стационарная функция [1] и Q значительно больше времени когерентности (что обычно выполняется), то

$$\langle E^2(t) \rangle = \langle E^2(t - \tau) \rangle = I_0$$

постоянная во времени величина, а

$$I(\tau) = \langle E(t)E(t - \tau) \rangle$$

оказывается функцией автокорреляции, зависящей от τ .

По теореме Винера-Хинчина [2] функция автокорреляции стационарного случайного процесса представляется интегралом Фурье

$$I(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} B'(\omega) \exp(i\omega\tau) d\omega.$$

Обратное Фурье-преобразование дает

$$B'(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} I(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau. \quad (1)$$

Для действительных $E(t)$ функции $I(\tau)$ и $V'(\omega)$ четные, и (1) принимает вид

$$V(\omega) = 2V'(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} I(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau, \quad (2)$$

где $V(\omega)$ - спектральная плотность процесса $E(t)$ или просто спектр.

Перейдем к типичным для спектроскопии переменным ($\sigma = 1/\lambda$, где σ - волновое число, λ - длина волны электромагнитного излучения; $\delta = \tau \cdot c$ - оптическая разность хода в интерферометре, c - скорость света). В этом случае соотношение (2) принимает вид:

$$V(\sigma) = 2V'(\sigma) = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} I(\delta) \cos(2\pi\sigma\delta) d\delta.$$

Фурье-спектрометр измеряет интерферограмму, переменная часть которой $I(\delta)$ пропорциональна функции автокорреляции исследуемого излучения. Спектр обычно получают, выполняя Фурье-преобразование этой части. В этом случае, если L - максимальная разность хода между интерферирующими пучками, то функция автокорреляции оказывается известной в интервале от 0 до $\tau_{\max} = L/c$, чему соответствует разрешение $\delta f \sim 1/\tau_{\max}$ или в волновых числах $\delta\sigma \sim 1/L$.

К преимуществам Фурье-спектроскопии следует в первую очередь отнести:

1. Выигрыш Фелжета [3]. Фактор мультиплексности, заключающийся в одновременной регистрации всего исследуемого спектрального диапазона.
2. Преимущество Жакино [4]. Большой геометрический фактор - выигрыш в светосиле, обусловленный осевой симметрией интерферометра и значительными размерами входной диафрагмы. В классических (дифракционных) спектрометрах геометрический фактор (инвариант Лагранжа-Гельмгольца) определяется произведением площади щели на телесный угол, задаваемый коллиматором. В Фурье-спектрометрах площадь круглой входной диафрагмы значительно превышает площадь щели классического спектрометра при одинаковом разрешении и фокусных расстояниях коллиматоров.
3. Преимущество Конна [5-6]. Высокая точность определения волновых чисел в спектре. Она обеспечивается точным измерением оптической разности хода интерферирующих световых пучков в интерферометре, обусловленным применением в качестве стандарта частоты стабилизированного He-Ne лазера. Эта особенность Фурье-спектрометра гарантирует точность измерения волновых чисел, по меньшей мере, на порядок большую, чем в классических спектрометрах.
4. Постоянное во всем исследуемом спектральном диапазоне разрешение, которое определяется только величиной предельной оптической разности хода, обеспеченной в интерферометре и не связанной с размерами каких-то оптических элементов.
5. Широкий диапазон исследуемого спектра. Спектральный диапазон, регистрируемый за один скан, ограничивается только областью пропускания

светоделителя и областью спектральной чувствительности приемника. Так, например, спектр пропускания в области от 2 до 25 мкм может быть зарегистрирован с одним источником, одним светоделителем и одним приемником излучения.

6. Практическое отсутствие рассеянного излучения, которое является основным источником фотометрической погрешности в классической спектроскопии.

7. Высокая степень автоматизации спектральных исследований. Она обуславливается самой природой метода Фурье-спектроскопии, требующей численного восстановления спектра из интерферограммы. В связи с этим все Фурье-спектрометры содержат в своем составе ЭВМ, что в свою очередь создает важнейшие дополнительные преимущества. Имеется возможность накопления, запоминания и сравнения спектров и последующей обработки спектральной информации. Таким образом, ЭВМ обеспечивает контроль основных параметров спектрометра, управления прибором и процессом сканирования, расчет искомого спектра и его документирование.

Электронно-вычислительная машина была впервые использована для расчета спектров из интерферограмм (Гебби [7]), полученных на интерферометре Майкельсона в 1955 г., а к 1961 г. были сформулированы (Ж. Конн [8]) основные требования к математическому обеспечению ЭВМ в применении к Фурье-спектроскопии. Таким образом окончательно оформился метод спектральных исследований, подготовленный Майкельсоном, Жакино и др., но не реализованный ранее в полной мере из-за отсутствия вычислительных средств. В это же время образовались первые коммерческие фирмы (Grubb Parsons и RIIC), которые стали выпускать Фурье-спектрометры.

Дальнейшее развитие Фурье-спектроскопии стало определяться общей эволюцией вычислительной техники, протекающей независимо от волн и усилий спектроскопистов, а также двумя революционными событиями, кардинально повлиявшими на спектральный эксперимент. К последним следует отнести появление в 1948 г. транзисторной техники и в 1965 г. - алгоритмов быстрого Фурье-преобразования (БФП) [9]. В свою очередь, из эволюционных процессов в вычислительной технике выделим развитие мини- и микроЭВМ в 60-80-е годы, резкое снижение стоимости электронной памяти и мощное развитие операционных систем в 70-х и начале 80-х годов, появление и распространение с конца 70-х годов ЭВМ с параллельными процессорами.

Приведем ряд примеров для иллюстрации нарастающей эффективности качественных изменений, происходящих в Фурье-спектроскопии.

В 1961 г. время обработки интерферограммы на машине IBM 704 составляло [8]

$$0,48 M^2 \cdot 10^{-2} \text{ с} \leq t \leq M^2 \cdot 10^{-2} \text{ с},$$

где M - число точек получаемого спектра.

В 1970 г. в результате внедрения алгоритмов БФП обработка массива данных в 4К точек на IBM 7040 стала занимать 68 с вместо 1 ч 23 мин (выигрыш в 70 раз). В свою очередь переход от IBM 7040 к IBM 360/75 (результат эволюции вычислительной техники) дал выигрыш еще в 100 раз, то есть близкий к эффекту от использования БФП. (Все эти изменения наглядно демонстрирует рис. 2.)

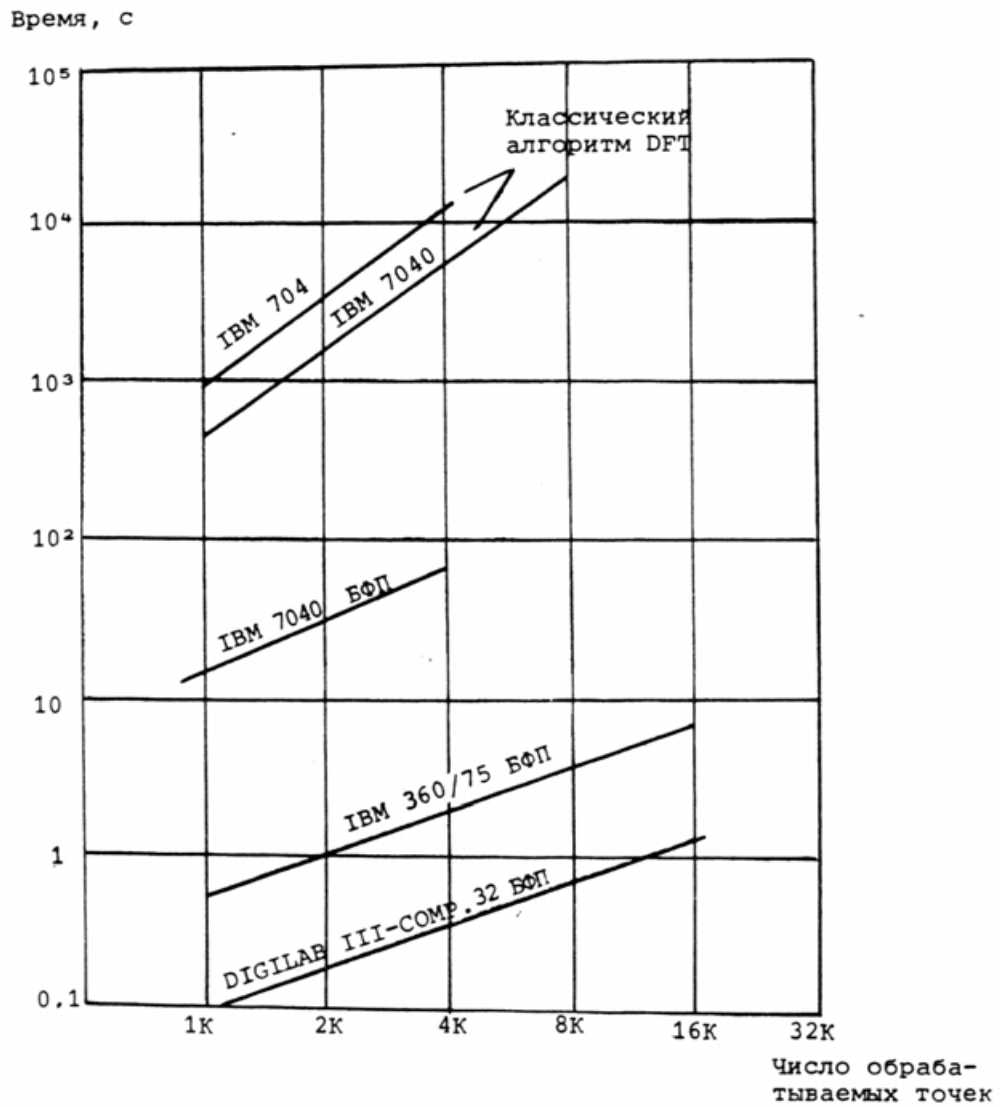


Рис. 2. Диаграмма времени выполнения Фурье-преобразования классического и БФП алгоритмов на различных ЭВМ

В 1981 г. вычислительная система Фурье-спектрометров фирмы Digilab стоимостью лишь в несколько тысяч долларов выполняла аналогичное преобразование за 360 мс, что эквивалентно скорости вычисления на IBM 360/75 стоимостью в 1 млн. долл.

Решаемые ЭВМ задачи, связанные вначале лишь с преобразованием и коррекцией зарегистрированных (как правило, автономно) интерферограммы, становились все более разнообразными и охватили к настоящему времени широкое поле проблем:

- управление интерферометром, аппаратными и операционными ресурсами ЭВМ (размещением их в работе с использованием в реальном времени в соответствии с иерархией, устанавливаемой оператором);

- выборку и хранение спектральной информации;

- восстановление спектра (аподизация, Фурье-преобразование, фазовая коррекция и т.п.);

- отображение информации (видео- и графическое представление спектров, включающее не только автоматическую регистрацию на графопостроителях с произвольным масштабированием, но и немедленное отображение на дисплее, манипуляцию всей последовательностью данных на алфавитно-цифровом или графическом терминалах, передачу ряда просмотренных данных на другие устройства для дальнейшей обработки);

- различные приложения (адаптацию математического обеспечения к условиям конкретного эксперимента - газовой и жидкостной хроматографии с Фурье-спектроскопией, Фурье-спектроскопии с временным разрешением и т.п.).

В последние годы прогресс в расчетах в реальном масштабе времени, обусловленный использованием более совершенных вычислительных устройств, открыл дополнительные возможности в диалоговом взаимодействии и отображении информации:

- обработку полученного спектра (факторный и количественный анализ, вычисление пиков газовой хроматографии и т.п.);

- создание необходимых пользователю программ;

- использование нескольких терминалов для большого числа пользователей;

- поиск накопленных прежде данных;

- анализ формы контуров полос.

Многочисленные программы, входящие в состав операционных систем различных Фурье-спектрометров, имеют много общего. Как правило, они написаны на Фортране, легко приспособляются под конкретные аппаратные возможности систем и основного математического обеспечения спектрометров, легко осваиваются пользователями. Заметим также, что вклад пользователей в математическое обеспечение настолько значителен, что дальнейшее его развитие для Фурье-спектроскопии будет осуществляться в основном через пользователей, а не фирмы, производящие Фурье-спектрометры.

Как упоминалось, традиционная процедура восстановления спектра (нахождения спектральной оценки) опирается на теорему Винера-Хинчина, связывающую спектральную плотность мощности исследуемого процесса с его автокорреляционной функцией (в нашем случае - с интерферограммой) посредством преобразования Фурье. Конечность интервала регистрации интерферограммы по оптической разности хода приводит при таком варианте к по-

лучению спектра с ограниченным разрешением, к появлению боковых экстремумов аппаратной функции (искажающих спектр из-за перераспределения энергии каждой спектральной гармоники в боковые экстремумы и подавления главных максимумов слабых сигналов боковыми экстремумами сильных) и к появлению в ряде случаев отрицательных значений спектра.

Отметим и достоинства такого приема спектрального оценивания, обусловившие (наряду с традиционностью) его широкое распространение. В первую очередь это, конечно, вычислительная эффективность (методы БПФ) и то, что получаемые оценки спектра прямо пропорциональны мощности спектральных компонент истинного спектра. Кроме того, в этом случае для получения спектра не требуется априорная информация.

В действительности об исследуемом процессе имеется, как правило, достаточно много сведений или, по крайней мере, можно сделать более разумные предположения, чем равенство нулю значений интерферограммы вне регистрируемого интервала. Использование такой информации позволяет выбрать модель, хорошо аппроксимирующую реальный процесс, и с помощью определения параметров модели по результатам измерений получить более точную спектральную оценку.

За последние десятилетия предложено большое число различных методов спектрального оценивания [10,11], разработанных с целью ослабления недостатков, присущих традиционному подходу. За отсчетную точку в их развитии стоит принять, по-видимому, 1967 г., когда на 37-й сессии Общества разведочной геофизики (Оклахома-Сити, США) Д. Берч выступил с докладом "Спектральный анализ по методу максимальной энтропии" [12].

В предложенном методе максимальной энтропии все заданные оценки коэффициентов автокорреляции (в нашем случае выборки интерферограммы) остаются без изменений, а для коэффициентов, которые нельзя измерить непосредственно, используется оценка, не равная нулю. Принцип их оценивания состоит в том, что спектральная оценка соответствует максимально случайному процессу, то есть имеет максимальную энтропию по сравнению с любой другой спектральной плотностью, согласующейся с измеренными данными. Этот метод анализа обеспечивает значительное повышение разрешающей способности спектральной оценки при не очень большом росте времени вычислений [10,11]. В последние годы появились работы, связанные с использованием метода максимальной энтропии в практической Фурье-спектроскопии [13,14]. Полученные в них результаты представляются обнадеживающими.

В 1968 г. Парзен [15] формально обосновал авторегрессионный метод спектрального оценивания. В этом случае исследуемый сигнал моделируют авторегрессионным процессом, что позволяет получить хорошее частотное разрешение даже при коротком наборе данных. Один из довольно удачных приемов использования авторегрессионной модели в Фурье-спектроскопии,

дающий спектральную оценку на основе метода наименьших квадратов, рассмотрен в работах [16,17]. Его работоспособность подтверждена не только тестовыми примерами, но и реальными результатами, полученными при измерении высококогерентных субмиллиметровых волн (рис. 3) и электронно-циклотронного излучения плазмы стелларатора (рис. 4).

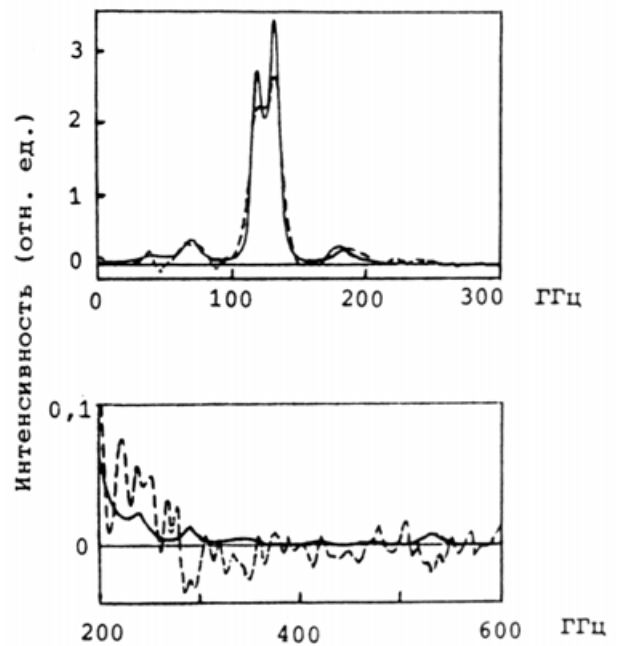
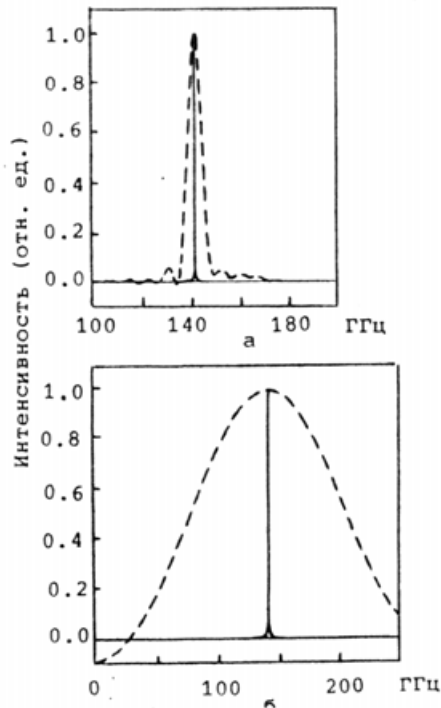


Рис. 3. Нормализованные спектры излучения клистрона [16]: а - полученные Фурье-преобразованием из 175 точек интерферограммы (штриховая линия) и авторегрессионным методом из 100 точек интерферограммы (порядок модели $N=14$, сплошная линия); б - полученные из 9 точек интерферограммы Фурье-преобразованием (штриховая линия) и авторегрессионным методом ($N=8$, сплошная линия)

Рис. 4. Спектры излучения плазмы стелларатора [16], полученные Фурье-преобразованием из 180 точек интерферограммы (штриховая линия) и авторегрессионным методом из 140 точек интерферограммы ($N=35$, сплошная линия)

Существует еще ряд приемов, опирающихся на априорные значения о виде исследуемого сигнала: например, процедура гармонического разложения В. Писаренко [18], позволяющая определить точные частоты и мощности m гармоник в присутствии белого шума, если известны $2m+1$ значений автокорреляционной функции, включая ее значение при нулевой задержке (прием, удобный для нахождения линейчатого спектра); метод Прони [19], в котором сигнал представляется суммой затухающих по экспоненте синусоид (случай довольно распространенный в практике Фурье-спектроскопии), и другие методы [10].

Еще одним из нетрадиционных для Фурье-спектроскопии подходов к получению спектра является подход, в котором спектральная оценка ищется из решения интегрального уравнения вида:

$$\int_a^b V(\sigma) A(\sigma, \sigma') d\sigma = V^*(\sigma'), \quad (3)$$

где

$V(\sigma)$ и $V^*(\sigma)$ - идеальный и соответственно получаемый (например, с помощью БФП) спектры;

$A(\sigma, \sigma')$ - ядро интегрального преобразования, определяемое конечностью интервала регистрации интерферограммы по оптической разности хода, протяженностью источника излучения, абберационными и дифракционными эффектами и т.п.

В силу вырожденности ядра и наличия шумов задача нахождения $V(\sigma)$ из (3) является некорректной. Для ее решения целесообразно использование методов регуляризации А. Тихонова [20]. Данный прием использован в работе [21], где рассмотрены линейные, нелинейные и итерационные приемы решения уравнения (3) с использованием априорной информации о сигнале.

По-видимому, новые принципы спектрального оценивания будут широко использоваться в будущих разработках Фурье-спектрометров и существенно повлияют на их параметры. Современные Фурье-спектрометры можно условно разделить на три группы: высокого разрешения ($0,05-0,005 \text{ см}^{-1}$), среднего разрешения ($0,5-0,05 \text{ см}^{-1}$) и специализированные с разрешением в широких пределах ($10-0,01 \text{ см}^{-1}$).

В группу Фурье-спектрометров высокого разрешения входят приборы-рекордсмены по разрешению: три действующих во Франции Фурье-спектрометра на видимую и ближнюю ИК области [8,22,23], один спектрометр есть в США (в одном из учреждений ВВС [24]). Все они построены самостоятельно учеными в исследовательских лабораториях. С начала 80-х годов мелкосерийный выпуск подобных приборов освоила канадская фирма Bomem, поставив их в Национальное Бюро стандартов (США), институт Герцберга (Канада) и ряд других спектроскопических лабораторий мира. Близкие по характеристикам спектрометры (IFS-120 HR) выпустила и фирма Bruker. В СССР малую серию Фурье-спектрометров (УФС-02) высокого разрешения ($0,005 \text{ см}^{-1}$) для области длин волн от 1 до 25 мкм с возможностью расширения до 100 мкм разработало и выпустило ЦКБ УП АН СССР.

В отличие от уникальных дорогостоящих установок, обычно сосредоточенных в нескольких центрах, Фурье-спектрометры среднего разрешения являются приборами широкого применения. Они используются в химических, биохимических, биологических, физических лабораториях, в лабораториях материаловедения и в технологических линиях современной электронной промышленности. Приборостроительная промышленность капиталистических стран выпускает такие спектрометры серийно уже около 20 лет. В СССР в последние годы также появились первые образцы подобных приборов (ФС-01, ЛАФС-50). В отличие от уникальных установок к приборам этого типа предъявляются более высокие требования по надежности и удобствам эксплуатации, чтобы с ними мог работать менее квалифицированный, чем в первом случае, персонал.

Особенностью специализированных Фурье-спектрометров является индивидуальность их параметров и конструкции, продиктованная требованиями исследовательской задачи, для решения которой предназначается прибор. Можно привести примеры отечественных спектрометров подобного типа, разработанных в ЦКБ УП АН СССР. Одним из них является автоматизированный лабораторный субмиллиметровый Фурье-спектрометр ЛСФС-01, предназначенный для калибровки и настройки субмиллиметровой аппаратуры, используемой для пассивной и активной диагностики плазмы на установках по магнитному удержанию термоядерной плазмы. Другим может служить автоматизированный фотоэлектрический спектрометр АФС-01, предназначенный для определения химического состава и количества остаточных электрически активных примесей в чистых и сверхчистых полупроводниковых материалах до 10^{-16} атомных процентов, а также для исследования оптических свойств твердых тел при низких температурах и в магнитных полях.

Особый интерес представляет разработанный в ЦКБ УП АН СССР и обладающий уникальными параметрами быстросканирующий Фурье-спектрорадиометр, предназначенный для измерения спектральной яркости поляризованного электромагнитного излучения высокотемпературной замагниченной плазмы в коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазона. Прибор обладает высоким временным разрешением и может быть использован для исследования спектров электромагнитного излучения различных стационарных объектов при исследовании динамики быстропротекающих физических, химических и физико-химических процессов.

Дальнейшую эволюцию Фурье-спектроскопии естественно связать с прогрессом техники и технологии. Уже сейчас видны интересные примеры такого развития. Так, повышение быстродействия, вычислительной эффективности и миниатюризации ЭВМ, их специализации и наращивания объема памяти (см., например, систему Starlab фирмы Mattson Instruments Inc., США) позволяет с новых позиций пересмотреть принципы работы спектральной аппаратуры.

Потребности скоростной спектроскопии слабых источников видимой области спектра привели к возникновению интересной ветви Фурье-спектрометров с пространственно фиксированной интерферограммой. Для ее регистрации используется линейка фотодиодов [25].

Большие перспективы у фазовой Фурье-спектроскопии [26]. "Асимметричные" интерферометры, созданные первоначально для субмиллиметровой спектроскопии, работают теперь вплоть до видимой области спектра [27], обеспечивая высокоточными данными по оптическим постоянным материалов.

Особый интерес вызывает появление в последнее время и развитие криогенных Фурье-спектрометров, поскольку предел чувствительности ИК спектральной аппаратуры (например, к обнаружению и исследованию малых оптических плотностей вещества) определяется в большинстве случаев фоновой

засветкой фотоприемника, которая связана с тепловым излучением стенок спектрального прибора и его оптических элементов. Количество фотонов теплового фона в ИК области спектра (особенно в длинноволновой ИК) при комнатной температуре всего лишь в 5-10 раз меньше числа фотонов, излучаемых обычными источниками излучения. Большая фоновая засветка фотоприемника ограничивает его пороговую чувствительность, которая при этом не превышает 10^{-12} Вт·Гц $^{\frac{1}{2}}$. Снижение температуры всего спектрального прибора позволяет в ИК области перейти к счету фотонов, что ранее с теплыми приборами было недоступно, и, соответственно, достичь пороговой чувствительности фотоприемников 10^{-15} - 10^{-16} Вт·Гц $^{\frac{1}{2}}$.

Приведенные примеры наглядно свидетельствуют о прогрессе аппаратуры, обусловленном тем, что становятся доступными новые мощные ЭВМ, высококачественная интерференционная оптика, новые приемники излучения. Не исчерпаны резервы и новых принципов и схем устройства спектральных приборов.

Л и т е р а т у р а

1. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. Случайные процессы. М.: Наука, 1976.
2. Левин Б.Р. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике. М.: Сов. радио, 1957.
3. Fellgett P.V. Infrared Phys., 1984, v. 24, p. 95.
4. Jacquinot P. Infrared Phys., 1984, v. 24, p. 99.
5. Connes J., Connes P. - J. Opt. Soc. Amer., 1969, v. 56, № 7, p. 896.
6. Белл Р. Введение в Фурье-спектроскопию. М.: Мир, 1975.
7. Gebbie H.A., Vanasse G.A. Nature, 1956, v. 178, p. 432.
8. Инфракрасная спектроскопия высокого разрешения: Сб. статей / Под ред. Г.Н. Жижина. М.: Мир, 1971.
9. Cooley J.W., Tukey J.W. Math. Comput., 1965, v. 19, p. 297.
10. Кей С.М., Марпл С.Л. ТИИЭР, 1981, т. 69, № 11, с. 5.
11. Робинсон Э.А. ТИИЭР, 1982, т. 70, № 9, с. 6.
12. Burg J.P. Maximum Entropy Spectral Analysis. - Oklahoma-City: OK, 1967.
13. Jinnó S. et al. Ninth Intern. Conf. on IR and MM Waves. Conf. Digest., 1984, p. 173.
14. Minami K. et al. Appl. Opt., 1995, v. 24, p. 162.
15. Parzen E. Multivariate Analysis II / Ed. Krishnaiah P.R. New York.: Acad. Press, 1969, p. 389.

16. I w a m a N. et al. J. Appl. Phys., 1981, v. 52, p. 546.
 17. I w a m a N. et al. J. Appl. Phys., 1982, v. 53, p.754.
 18. P i s a r e n k o V.F. Geophysical J. Royal Astronomical Soc., 1973, v. 33, p. 347.
 19. V a n B r a r i c u m M.L., M i t t r a R. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1978, v. AP-26, p. 174.
 20. Т и х о н о в А.Н., А р с е н и н В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986.
 21. В а с и л е н к о Г.И., Т а р а т о р и н А.М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986.
 22. G u e l a c h v i l i G. Appl. Opt., 1978, v. 17, p.1322.
 23. L u c P., G e r s t e n k o r n S. Appl. Opt., 1978, v. 17, p. 1327.
 24. P a l m e r B.A., E n g l e m a n R. Intern. Conf. on Fourier and Computerized Infrared Spectroscopy / Ed. Grasselli J.G., Cameron D.G. Ottawa. Ontario, Canada: Proc. SPIE, 1985, v. 553, p. 413.
 25. O k a m o t o T. et al. Appl. Spectrosc., 1986, v. 40, p. 691.
 26. B i r c h J.R., P a r k e r T.J. Infrared and Millimeter Waves. Acad. Press. Inc., 1979, v. 2, p. 137.
 27. B u r t o n N.J. et al. Opt. Commun., 1983, v. 45, p. 367.
-