УДК 535.330

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ В АБСОРБЦИОННОМ МЕТОДЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭМИССИОННОГО СПЕКТРА

А. Е. Булышев

Исследована возможность абсорбционного метода для определения непосредственно спектра излучения. В работе подробно перечислены достоинства данного метода.

Применение современных методов решения обратных задач математической физики позволяет использовать непрямые, т. е. не связанные с пространственным разделением монохроматических компонент излучения, методы для получения эмиссионных спектральных характеристик. Примерами могут служить методы спектроскопии Фурье и Адамара [1], различные варианты методов магнитного сканирования [2] и т. п. В данной работе исследована возможность абсорбционного метода, предложенного в работе [3], для определения непосредственно спектра излучения.

Сущность абсорбционного метода предельно проста: излучение, спектральный состав которого исследуется, проходит через кювету, наполненную селективно поглощающим веществом с коэффициентом поглощения $\varkappa(\nu)$, концентрацией N и толщиной x, после чего измеряется интегральный поток на выходе кюветы $f(Nx)$ в зависимости от концентрации или толщины x. Ниже для определенности будем говорить о зависимости от x.

Таким образом,

$$\int_{\nu_1}^{\nu_2} \varphi(\nu) \exp[-\varkappa(\nu) N x]\, d\nu = f(x), \qquad (1)$$

где $\varphi(\nu)$ — спектральная плотность исходного потока. Границы интервала ν_1 и ν_2, в котором определяется $\varphi(\nu)$, должны быть выбраны из следующего условия: как показано в [3], уравнение (1) однозначно разрешимо при условии, что $\varkappa(\nu)$ — есть строго монотонная функция частоты; поэтому интервал $[\nu_1, \nu_2]$ обязательно должен быть участком монотонности $\varkappa(\nu)$. Однако, как справедливо указано в [3], однозначной разрешимости еще не достаточно для определения $\varphi(\nu)$ в условиях реального эксперимента: необходимо учесть погрешность при измерении $f(x)$ ввиду некорректности задачи [4]. В настоящее время методы решения таких задач разработаны достаточно хорошо. В данной работе изучен вопрос о восстановлении $\varphi(\nu)$ в случае, когда $f(x)$ известна с некоторыми погрешностями. В отличие от [3] мы рассмотрим метод без дополнительной оптической системы, ввиду того что эта система не только не является необходимой, но, наоборот, снижает светосилу установки и может служить дополнительным источником погрешностей.

Уравнение (1) решалось в замкнутом цикле: задавалось точное модельное решение, вычислялось $f(x)$, согласно формуле (1), на $f(x)$ «набрасывалась» случайная нормально распределенная величина с дисперсией порядка процента от $f(x)$, после чего решение восстанавливалось. Для решения были выбраны равномерные сетки по шкалам ν и x. Интегральный оператор заменялся матричным. При алгебраизации использовалась квадратичная аппроксимация, интегрирование производилось по формуле Симпсона. В итоге получается система уравнений

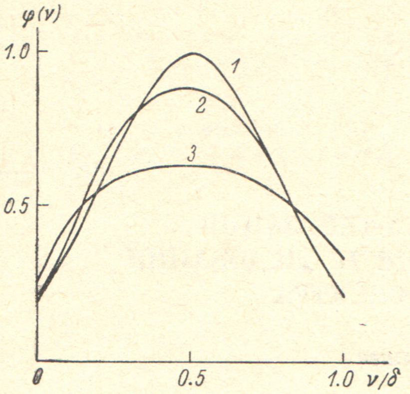

Рис. 1.

1 — точное модельное решение, 2 — восстановленное решение при $\beta=1$, 3 — восстановленное решение при $\beta=0.2$.

$$\sum_j K_{ij}\varphi_j = f_i, \tag{2}$$

где K_{ij} — алгебраизованный оператор, $\varphi_i=\varphi(\nu_j)$, $f_i=f(x_i)$.

Для решения системы (2) был использован итерационный метод, предложенный Кряневым [5]. В данном случае метод реализован следующим образом:

$$(\hat{K}^+\hat{K} + \alpha\hat{\Omega})\,\varphi^{n+1} = \alpha\hat{\Omega}\varphi^n + \hat{K}^+\mathbf{f}, \tag{3}$$

где K — матрица $\|K_{ij}\|$, K^+ — матрица сопряжения к $\hat{K}$, $\hat{\Omega}$ — регуляризатор Тихонова, φ^n — n-я итерация вектора $\varphi=\{\varphi_j\}$, $\mathbf{f}=\{f_j\}$. Параметр α и число итераций выбирались в соответствии с рекомендациями работы [6]. По вышеизложенной схеме был проделан цикл вычислений для исследования возможностей метода. В частности, был изучен вопрос о влиянии спектральной зависимости коэффициента поглощения $\varkappa(\nu)$ на качество

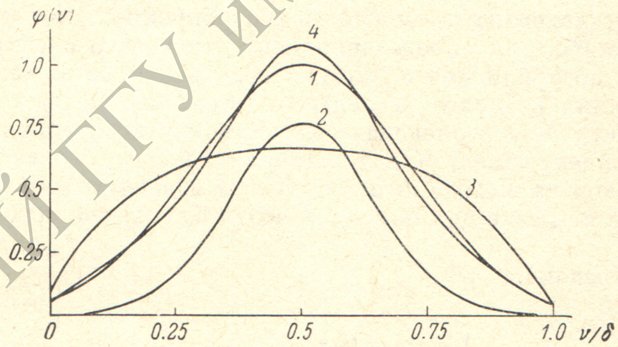

Рис. 2.

1 — точное решение, 2 — начальное приближение, 3 — решение, восстановленное при нулевом начальном приближении, 4 — решение, восстановленное при начальном приближении 2.

восстановления. В [3] выведена формула для разрешающей силы R, согласно которой

$$R \sim \left|\frac{\varkappa'(\nu)}{\varkappa(\nu)}\right|. \tag{4}$$

Решалась модельная задача, в которой

$$\varkappa(\nu) = k_0 e^{-\beta\nu}. \tag{5}$$

таким образом,

$$R \sim \left|\frac{\varkappa'(\nu)}{\varkappa(\nu)}\right| = \beta. \tag{6}$$

Точное решение было выбрано в виде

$$\varphi(\nu) = \exp\left(-\left(\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu}\right)^2\right). \tag{7}$$

Вычисления, проделанные с разными β, в целом подтвердили выводы работы [3]. Некоторые результаты расчета приведены на рис. 1. В результате численных экспериментов было установлено, что метод оказы-

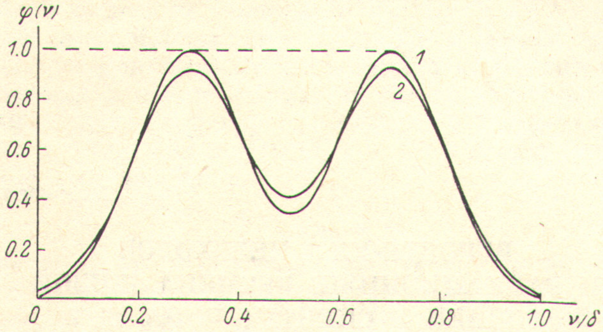

Рис. 3.
1 — точное решение, *2* — восстановленное решение.

вается особенно эффективным, когда известно хорошее начальное приближение. Точность восстановления в этом случае существенно возрастает. Этот результат продемонстрирован на рис. 2. На рис. 2 кривая *1* — точное модельное решение, кривая *2* — начальное приближение, кривая *3* — решение, полученное при нулевом начальном приближении, *4* — решение при использовании начального приближения. На рис. 3 и 4 продемонстрированы результаты восстановления контуров сложной формы: типа самообращения линий и линий с сателитами. Достоинствами данного метода являются его большая светосила (это свойство присуще всем интегральным методам), а также возможность работать в различных спектральных диапазонах, что может быть достигнуто заменой поглощающего вещества в кювете. В заключение автор приносит благодарность Н. Г. Преображенскому за научное руководство и В. П. Козлову за полезное обсуждение.

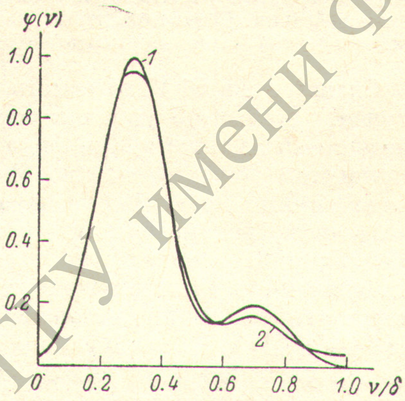

Рис. 4.
1 — точное решение, *2* — восстановленное решение.

Литература

[1] Ю. А. Толмачев. Новые спектральные приборы. Изд. ЛГУ, Л., 1976.
[2] А. Е. Булышев, Н. Г. Преображенский. Опт. и спектр., *44*, 178, 1978.
[3] В. П. Козлов, А. А. Яковлев. Ж. прикл. спектр., *7*, 684, 1967.
[4] А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. Методы решения некорректных задач. «Наука», М., 1974.
[5] А. В. Крянев. ЖВМиМФ, *14*, 25, 1974.
[6] А. Е. Булышев, Г. А. Ведерников. В сб.: Физическая газодинамика, в. 6, 173. Новосибирск, ИТПМ, 1976.

Поступило в Редакцию 6 марта 1978 г.