

выступать плотность мощности зондирующего излучения на торце волокна, вызывающая фотокоагуляцию крови.

Авторы выражают признательность Д. В. Шелопуту и В. М. Мاستихину, предоставивших акустооптические ячейки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Riva C., Ross B., Benedek G. Bidirectional LDV system for absolute measurement of blood speed in retinal vessels.— Invest. Ophthalmol., 1972, vol. 11, p. 939.
2. Tanaka T., Benedek G. B. Measurement of velocity of blood flow (in vivo) using a fiber optic catheter.— Ibid., 1979, vol. 18, p. 1000.
3. Ливин В. Н., Орлов В. А., Фомин Ю. Н., Чеботаев В. П. Лазерный доплеровский измеритель скорости непрозрачных потоков жидкости и частиц.— В кн.: Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности: Труды III Всесоюз. совещ. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1980.

Поступила в редакцию 3 мая 1983 г.;
окончательный вариант — 25 июля 1983 г.

УДК 551.501.74

В. Г. АСТАФУРОВ, А. А. МИЦЕЛЬ

(Томск)

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ЛИДАРНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ГАЗОВЫХ ПРИМЕСЕЙ АТМОСФЕРЫ

Введение. Системы лазерного зондирования атмосферы (лидары) позволяют получать с высокими пространственным и временным разрешениями информацию о различных параметрах атмосферы. Для контроля и обнаружения газовых примесей атмосферы широко используется метод дифференциального поглощения (МДП), основанный на различии сигналов обратного рассеяния лазерного излучения в пределах линии поглощения измеряемого газа и вне ее [1, 2].

В данной работе рассматривается обработка лидарных сигналов, полученных методом дифференциального поглощения в режиме счета фотонов. Выбор указанного режима регистрации связан с необходимостью расширения высотного диапазона измерений газовых примесей атмосферы. Анализ режимов регистрации дан в работе [3]. Существенной особенностью применения МДП является то, что обработка экспериментальных данных связана с некорректно поставленной задачей дифференцирования эмпирических функций. Кроме того, при регистрации лидарных сигналов методом счета фотонов необходимо учитывать инерционность регистрирующей аппаратуры.

Восстановление разрешенного по трассе профиля концентрации газа из лидарных измерений МДП сводится к дифференцированию на сетке дальности $A = R_1 < R_2 < \dots < R_n = B$ функции

$$F(R_i) = (1/2) \ln \{U_{c2}(R_i)/U_{c1}(R_i)\}, \quad (1)$$

где $U_{cj}(R_i)$ — оценки средней мощности лидарного сигнала в пределах ($j=1$) и вне ($j=2$) линии поглощения на дальности R_i .

Построение оценок для $U_{cj}(R_i)$ в режиме счета фотонов. Одним из методов определения интенсивности слабых оптических сигналов явля-

ется счет одноэлектронных импульсов (ОИ) на выходе ФЭУ. В этом случае для определения средней мощности сигнала используется оценка \tilde{n}_{cj} среднего числа ОИ \bar{n}_{cj} на выходе ФЭУ ($\tilde{n}_{cj} \sim \bar{U}_{cj}$), которая имеет вид [4]

$$\tilde{n}_{cj} = \sum_{i=1}^N M_{ij}/N - \bar{n}_{шj}, \quad j = 1, 2. \quad (2)$$

Здесь M_{ij} — число одноэлектронных импульсов в i -м измерении для j -го канала на интервале времени ΔT , N — число измерений, $\bar{n}_{шj}$ — среднее число ОИ, обусловленное внешними шумами и темновым током ФЭУ. В дальнейшем будем считать, что значения $\bar{n}_{шj}$ известны, например, из предварительных измерений. Время ΔT связано с разрешением ΔR по наклонной дальности соотношением $\Delta R = c\Delta T/2$, где c — скорость света.

Регистрирующая аппаратура обладает инерционностью или «мертвым» временем. Вследствие этого часть ОИ не регистрируется. Считая M_{ij} в (2) числом зарегистрированных ОИ, можно сделать вывод о том, что \tilde{n}_{cj} является смещенной оценкой, соответствующей заниженным значениям измеряемой мощности. Инерционность регистрирующей аппаратуры практически не учитывается при обработке лидарных сигналов, а это, как будет показано ниже, может привести к существенным ошибкам в интерпретации лидарных измерений.

При определении интенсивности методом счета ОИ тракт регистрирующего устройства включает в себя дискриминатор-формирователь и собственно счетчик импульсов. Обычно дискриминатор-формирователь для группы перекрывающихся на уровне порога дискриминации ОИ формирует один стандартный импульс, который затем регистрируется счетчиком. В этом случае ФЭУ с регистратором можно отнести к счетчику фотонов с «мертвым» временем продлевающегося типа [4]. Величина «мертвого» времени τ определяется шириной ОИ на уровне порога дискриминации. Вопросы классификации типов «мертвого» времени подробно изложены в [5].

В условиях применимости пуассоновской статистики фотоэлектронов совокупности «сигнал — шум» [3] средние числа ОИ \bar{n} и фотоотсчетов (зарегистрированные числа ОИ) \bar{M} связаны соотношением [5]

$$\bar{M} = \bar{n}e^{-\bar{n}\nu} \quad (3)$$

($\nu = \tau/\Delta T$). Решение уравнения (3) относительно \bar{n} можно получить методом итераций по следующей схеме:

$$\hat{n}_j^{(l+1)} = \left(\sum_{i=1}^N M_{ij}/N \right) \exp(\hat{n}_j^{(l)}\nu),$$

где l — номер итерации. Начальное приближение $\hat{n}_j^{(0)} = \sum_{i=1}^N M_{ij}/N$. Число итераций определяется требуемой точностью решения уравнения (3). Последовательность $\{\hat{n}_j^{(l)}\}$ сходится к решению уравнения при $\bar{n}\nu < 1$. Таким образом, с учетом инерционности регистратора оценка \tilde{n}_{cj} запишется в виде

$$\tilde{n}_{cj} = \hat{n}_j - \bar{n}_{шj}. \quad (4)$$

Можно показать [4], что (4) является несмещенной оценкой с относительной ошибкой, обусловленной флуктуациями сигналов и шумов:

$$\delta(\tilde{n}_{cj}) = \sqrt{D(\tilde{n}_{cj})/\tilde{n}_{cj}} \approx \sqrt{\bar{n}_j(1-\nu)e^{\Psi_j}(1-2\Psi_je^{-\Psi_j}) - e^{\Psi_j} + (1+\Psi_j)^2} / \sqrt{\bar{N}[1-\Psi_j(1-\nu)]}. \quad (5)$$

Здесь $D(\tilde{n}_{cj})$ — дисперсия оценки (4), $\Psi_j = \bar{n}_j\nu$, $\bar{n}_j = \bar{n}_{cj} + \bar{n}_{шj}$. Необходимо отметить, что на практике при расчетах $\delta(\tilde{n}_{cj})$ вместо неизвестных значе-

ний \bar{n}_j обычно используют значения оценок \tilde{n}_j . Значения $\delta(\tilde{n}_{cj})$ при данном \bar{n} возрастают с ростом v , поэтому наличие инерционности приводит к ухудшению точности измерения средней мощности лидарного сигнала.

Восстановление профиля концентрации газа. Применение МДП связано с дифференцированием экспериментально измеренной функции $\tilde{F}(R_i)$ лидарных сигналов. Указанная задача [6] относится к классу некорректно поставленных и требует привлечения регуляризующих алгоритмов для восстановления профилей концентрации газовых примесей. Вследствие некорректности указанной задачи традиционно используемая разностная схема вычисления концентрации газа [1]

$$\rho(R_i) = (1/(2\Delta R_i K(R_i))) \ln \{F(R_{i+1}) - F(R_i)\} \quad (6)$$

($K(R_i)$ — массовый коэффициент поглощения измеряемого газа на дальности R_i , $\Delta R_i = R_{i+1} - R_i$) весьма неустойчива к ошибкам в исходных данных, что особенно сказывается при измерении малых концентраций и увеличении пространственно-временного разрешения (уменьшение ΔR и объема выборки N).

В качестве регуляризующего алгоритма предлагается алгоритм на основе сглаживающих кубических сплайнов [7], суть которого состоит в дифференцировании предварительно сглаженной исходной функции $\tilde{F}(R_i)$. Реализация алгоритма на ЭВМ заключается в построении на интервале $[A, B]$ (A, B — границы поглощающего слоя) дважды дифференцируемой функции $S_{\alpha,n}(R)$, которая минимизирует функционал [7]

$$\Phi_{\alpha} [S_{\alpha,n}(R)] = \alpha \int_A^B [S_{\alpha,n}''(R)]^2 dR + \sum_{i=1}^N p_i [\tilde{F}(R_i) - S_{\alpha,n}(R_i)]^2,$$

где p_i — весовые множители, характеризующие значимость i -го значения функции $\tilde{F}(R_i)$; α — параметр сглаживания.

Как показано в [7], решение этой задачи в классе кубических сплайнов существует, т. е. $S_{\alpha,n}$ является кусочно-непрерывной кубической функцией. После построения кубического сплайна значение $\rho(R)$ в слое $R_i < R < R_{i+1}$ рассчитывается по формуле

$$\rho(R) = (1/K(R)) [b_i + 2c_i(R - R_i) + 3d_i(R - R_i)^2],$$

b_i, c_i, d_i — коэффициенты сплайна $S_{\alpha,n}(R)$, вычисленные по значениям вторых производных $S_{\alpha,n}''(R_i)$ в узлах R_i .

Точность вычисления $\rho(R)$ зависит от выбора параметра сглаживания α и весовых множителей p_i . Способ выбора параметра α изложен в работе [8]. Весовые множители p_i связаны с ошибками определения функции $\tilde{F}(R_i)$, которые, в свою очередь, определяются точностью оценок \tilde{n}_{cj} . При расчетах можно брать значения p_i равными $1/\sigma_i^2$, где $\sigma_i^2 = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^2 \frac{D[\tilde{n}_{cj}(R_i)]}{\tilde{n}_{cj}(R_i)}$ — приближенное значение дисперсии оценки (1).

Не менее важен вопрос о точности извлекаемой из эксперимента информации об искомом параметре. В работе [9] получены соотношения, позволяющие вычислять ошибки дифференцирования эмпирических функций сглаживающими кубическими сплайнами. Приведем лишь окончательные выражения для дисперсии восстановленного профиля влажности $\sigma_{\rho}^2(R_i)$ в узлах R_i :

$$\begin{aligned} \sigma_{\rho}^2(R_i) = & (1/K^2(R_i)) \{ [V_a(i, i) + V_a(i+1, i+1) - 2V_a(i+1, i)]/\Delta R_i^2 + \\ & + \Delta R_i^2 [4V_m(i-1, i-1) + V_m(i, i) + 4V_m(i, i-1)]/36 \}, \\ & i = 1, 2, \dots, n-1, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\sigma_{\rho}^2(R_n) = \sigma_{\rho}^2(R_{n-1}) - (\Delta R_{n-1}^2/12K^2(R_{n-1})) V_m(n-2, n-2), \quad (8)$$

где $V_a(i, j), V_m(i, j)$ — элементы корреляционных матриц коэффициентов $a_i = S_{\alpha,n}(R)$ и значений $m_i = S_{\alpha,n}''(R_{i+1})$. В выражениях опущены члены

взаимной корреляции V_a и V_m вследствие их малости. Формулы для матриц V_a и V_m являются громоздкими и поэтому в данной работе не приводятся (см. [9]).

Полученные алгоритмы составляют основу для автоматизированной обработки экспериментальных данных при использовании МДП.

Восстановление профиля влажности. Для иллюстрации различных ситуаций и ошибок, связанных с МДП при регистрации лидарных сигналов в режиме счета фотонов, проведен замкнутый численный эксперимент по восстановлению профиля влажности. Результаты численного эксперимента показаны на рис. 1. Предварительно для заданного модельного профиля влажности $\rho_1(R)$ (кривая 1) [10], оптической модели атмосферы [11] и параметров линии поглощения водяного пара с центром $\lambda_0 = 0,694383$ мкм были рассчитаны высотные зависимости $\bar{n}_{c_j}(R_i)$. При этом задавались параметры лидара: энергия излучения в импульсе $E = 0,1$ Дж, диаметр приемного зеркала $d = 0,5$ м, $\Delta R = 1$ км, квантовая эффективность $\eta = 0,1$, коэффициент потерь в оптике $\gamma = 0,2$ и $N = 100$.

Для рассчитанных зависимостей $\bar{n}_{c_j}(R_i)$ при $\bar{n}_{m_j} = 0$ было проведено восстановление профилей влажности для следующих вариантов:

1. Влияние инерционности регистрирующей аппаратуры несущественно: $\bar{n}_{c_j}(R_i)\nu \ll 1$. На значения $\bar{n}_{c_j}(R_i)$ накладывалась ошибка $\Delta_j(R_i)$ с гауссовой плотностью вероятности, нулевым средним и дисперсией

$$D_1[\Delta_j(R_i)] = D[\bar{n}_{c_j}(R_i)] = \bar{n}_{c_j}(R_i)/N,$$

равной дисперсии оценки (2). По зависимостям $\bar{n}_{c_j}(R_i) + \Delta_j(R_i)$ на основе разностной схемы был восстановлен профиль влажности $\rho_2(R)$ (кривая 2).

2. Аналогично варианту 1, но $\rho_3(R)$ восстановлен с помощью сглаживающих кубических сплайнов (кривая 3).

3. Инерционность регистратора существенна. С учетом выражения (3) рассчитывались значения $\bar{M}_{c_j}(R_i)$ при $\tau = 10$ нс. Затем, как и в варианте 1, на них накладывались ошибки с нулевым средним и дисперсией [4, 5]

$$D_2[\Delta_j(R_i)] \approx \bar{M}_{c_j}(R_i) \left[1 - 2\bar{n}_{c_j}(R_i)\tau e^{-\bar{n}_{c_j}(R_i)\tau} \right] / N,$$

равной дисперсии оценки (2) с учетом инерционности. При $\nu \rightarrow 0$ $D_2(\Delta_j) \rightarrow D_1(\Delta_j)$. С помощью зависимостей $\bar{M}_{c_j}(R_i) + \Delta_j(R_i)$ и сглаживающих сплайнов был восстановлен профиль влажности $\rho_4(R)$ (кривая 4). Значения $\rho_4(R)$ найдены без коррекции на эффекты, связанные с «мертвым» временем регистрирующей аппаратуры.

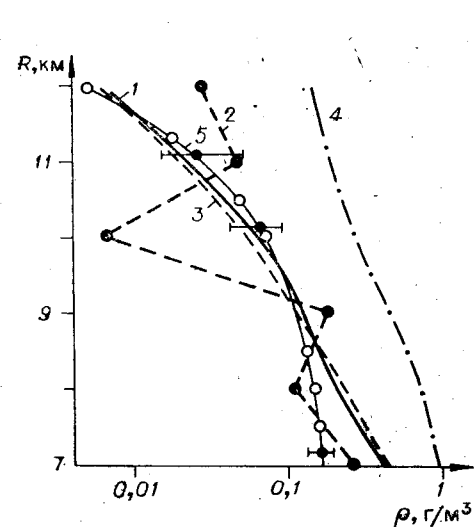


Рис. 1.

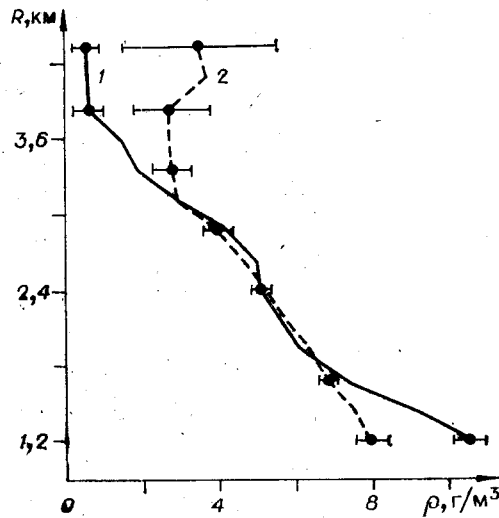


Рис. 2.

4. Аналогично варианту 3, но профиль влажности $\rho_j(R)$ (кривая 5) восстанавливался с предварительной коррекцией значений $\bar{M}_{c_j}(R_i) + \Delta_j(R_i)$ с помощью итерационного алгоритма.

Результаты численного эксперимента наглядно свидетельствуют об эффективности применения сглаживающих сплайнов в МДП и необходимости учета инерционности регистрирующей аппаратуры. Используя выражения (3) и (6), найдем относительную ошибку $\delta(\rho)$ определения влажности, обусловленную пренебрежением инерционностью регистратора:

$$\delta(\rho) = \nu \sum_{j=1}^2 (-1)^j \bar{n}_{c_j}(R_i) \{1 - \exp[-2\Delta R_i \sigma_j(R_i)]\} / 2\Delta R_i K(R_i),$$

где $\sigma_j(R_i)$ — коэффициент ослабления в пределах ($j=1$) и вне ($j=2$) линии поглощения на дальности R_i . Можно показать, что $\delta(\rho) > 0$, т. е. необоснованное использование оценки (2) приводит к завышенным значениям определяемой влажности. Величина ошибки $\delta(\rho)$ может служить в качестве критерия выбора оценки (2) или (4) для вычисления средней мощности сигнала.

На рис. 2 представлены результаты восстановления высотных профилей влажности с коррекцией (кривая 1) и без нее (кривая 2) на основе лидарных измерений в режиме счета фотонов, проведенных В. Н. Маричевым [11], при $\Delta R = 240$ м, числе измерений $N = 160$ в пределах линии и $N = 100$ вне линии поглощения, $\tau = 15$ нс. Подробное описание аппаратуры и методики измерений приведено в [12]. Из рис. 2 видно, что кажущаяся инверсия в диапазоне высот 3,5—4,2 км обусловлена игнорированием «мертвого» времени регистрирующей аппаратуры при восстановлении $\rho(R)$.

В заключение авторы выражают благодарность Г. Н. Глазову за внимание к работе и обсуждение полученных результатов, В. Н. Маричеву за любезно предоставленные экспериментальные данные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коллис Р. Т. Х., Рассел П. Б. Лидарные измерения аэрозольных частиц и газов посредством упругого рассеяния в направлении назад и дифференциального поглощения. — В кн.: Лазерный контроль атмосферы. М.: Наука, 1979.
2. Захаров В. М., Костко О. К. Метеорологическая лазерная локация. — Л.: Гидрометеиздат, 1977.
3. Астафуров В. Г., Глазов Г. Н. Статистика фотоотчетов и режимы регистрации лидарного сигнала. — В кн.: Дистанционное зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1978.
4. Астафуров В. Г., Глазов Г. Н. О точности измерения интенсивности одноэлектронными оптическими приемниками. — В кн.: VI Всесоюз. симп. по распространению лазерного излучения в атмосфере (Тез. докл.). Томск: ИОА СО АН СССР, 1981, ч. 2.
5. Гольданский В. И., Куценко А. В., Подгорецкий М. И. Статистики отсчетов при регистрации ядерных частиц. — М.: Физматгиз, 1959.
6. Демидович В. Б. Восстановление функций и ее производных по экспериментальной информации. — В кн.: Вычислительные методы и программирование. М.: МГУ, 1967, № 8.
7. Стечкин С. Б., Субботин Ю. Н. Сплайны в вычислительной математике. — М.: Наука, 1976.
8. Воскобойников Ю. Е., Мицель А. А. Использование сглаживающих сплайнов для восстановления профиля коэффициента молекулярного поглощения H_2O . — Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана, 1981, т. 17, № 2.
9. Воскобойников Ю. Е., Мицель А. А. Использование априорной информации о шуме измерения при восстановлении профиля молекулярного коэффициента поглощения H_2O . — В кн.: V Всесоюз. симп. по распространению лазерного излучения в атмосфере (Тез. докл.) Томск: ИОА СО АН СССР, 1979, ч. 3.
10. Комаров В. С., Мицель А. А., Ишоплятов И. И., Блаховская Т. В. Метеорологические модели для численного моделирования задач дистанционного зондирования атмосферы. — В кн.: VII Всесоюз. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы (Тез. докл.) Томск: ТФ СО АН СССР, 1982, ч. 2.
11. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. — Новосибирск: Наука, 1982.

12. Маричев В. Н. Высотное зондирование водяного пара атмосферы мощным перестраиваемым лазером на рубине.— В кн.: Зондирование физико-химических параметров атмосферы с использованием мощных лазеров. Томск: ИОА СО АН СССР, 1979.

Поступила в редакцию 3 июня 1983 г.

УДК 681.53.08

О. Ю. ПОЛЯНСКИЙ, А. Я. ШУЛЬМАН
(Москва)

УПРАВЛЯЕМЫЙ ЭВМ РЕШЕТОЧНЫЙ СПЕКТРОМЕТР НА БАЗЕ ИКС-29

В современных спектроскопических исследованиях настолько возросла сложность аппаратуры и методов обработки данных, что для получения требуемой физической информации необходимо использовать ЭВМ на всех этапах, начиная с управления измерительной аппаратурой и кончая представлением результатов. Такой подход сейчас является уже общепринятым (см., например, [1]), так что центр тяжести переносится в область выбора наилучших решений вопросов, возникающих при автоматизации спектральных исследований. Несмотря на рост числа автоматизированных спектрометров, выпускаемых промышленностью, задачи сопряжения имеющихся неавтоматизированных спектрометров с ЭВМ или модификации (с целью улучшения) автоматизированных промышленных спектрометров еще значительное время, по-видимому, будут оставаться актуальными и решаться силами самих потребителей [2]. Поскольку методы решения задач автоматизации, применяемые крупными производителями спектральной аппаратуры, не всегда могут быть перенесены в лабораторные условия, то становятся необходимыми обмен информацией и систематизация накопленного в этой области опыта. В настоящей работе описывается схема подключения распространенного промышленного двухлучевого решеточного спектрометра ИКС-29 (рабочий диапазон $400-4200 \text{ см}^{-1}$) к мини-ЭВМ в режиме «in line». При этом были расширены функциональные возможности спектрометра и автоматизированы процессы измерения, сбора, хранения, обработки и представления данных. Кроме того, реализовано также управление от ЭВМ поворотом дифракционной решетки, величиной щелей и сменными фильтрующими элементами оптического тракта.

Одной из существенных особенностей разработки системы автоматизации с управлением процессом измерений является необходимость серьезного системного анализа проблемы (достижимая степень автоматизации эксперимента, распределение управляющих и информационных связей в треугольнике «человек — ЭВМ — экспериментальная аппаратура» и т. п.), а также использование системных методов программирования при конструировании и тестировании программ (например, учет временных соотношений между периодами активности различных элементов системы, планирование реакции на отказы аппаратуры или неправильные действия оператора и т. д.).

Следует отметить, что целью работы было не просто создание автономного автоматизированного прибора, а автоматизация спектрометра ИКС-29 в рамках многоэкспериментальной лабораторной системы автоматизации на базе ЭВМ типа персонального компьютера. Такой подход позволяет унифицировать техническое и программное обеспечение, используемое в автоматизированных измерительных комплексах, сокращает время на автоматизацию новых экспериментов и расширяет возможности мо-