«Оптика атмосферы», т. 4, № 10 (1991)

УДК 519.2 : 551.501 : 681.3

П.В. Голубцов, Ю.П. Пытьев, О.А. Филатова

ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ЛИДАРНОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНЫХ ПРИМЕСЕЙ

Рассматривается задача определения концентраций атмосферных примесей методом дифференциального поглощения. Анализ сложной нелинейной системы большой размерности позволяет провести последовательно-параллельную декомпозицию её на более простые компоненты, для каждой из которых может быть построено оптимальное редукционное преобразование — линейная, ряд простых нелинейных, пространственно-инвариантная ИС.

Введение

Проблема интерпретации результатов лидарных измерений представляется одной из наиболее значимых в исследованиях атмосферы. Эта задача считается решенной, если на основании результатов лидарных измерений для атмосферы получены оценки значений интересующих параметров (например, распределение плотностей или концентраций примесей вдоль луча) с достаточно высокой точностью [1, 2, 3].

На практике для сложных процессов измерения, к которым относится и лидарное зондирование, оказывается невозможной непосредственная интерпретация результата измерения. Однако если известна математическая модель процесса, связывающая объект и результат измерения, то можно указать целый спектр методов обработки этих результатов, следующих из постановки задачи интерпретации [4].

Измерения в лидарных системах имеют, как правило, следующий вид: посылается лазерный импульс в атмосферу (на удаленную топографическую мишень), и принимается обратнорассеянное излучение. В результате оптимальной обработки поступивших сигналов (спектров) необходимо дать оценки параметров атмосферы (концентраций атмосферных примесей или распределения частиц по размерам).

В настоящей статье речь идет о создании измерительно-вычислительной системы [1] предельно высокой чувствительности или разрешения (ИВС СВР) на базе имеющейся лидарной измерительной системы (ИС). В общем случае для построения оптимальной вычислительной компоненты ИВС (оптимального алгоритма обработки) требуются достаточно точные сведения о модели измерения.

Лидарная измерительная система представляет собой сложную нелинейную систему большой размерности, однако она позволяет произвести последовательно-параллельную декомпозицию на простые компоненты: линейную, ряд простых параллельных нелинейных и многомерную линейную пространственно-инвариантную ИС, для каждой из которых строится оптимальный вычислительный алгоритм [4, 5]. Полный алгоритм обработки (вычислительная компонента ИВС) представляется в виде параллельно-последовательной композиции соответствующих алгоритмов.

Вычислительная компонента такой лидарной ИВС реализует комплексное оптимальное преобразование сигнала на основе адекватного учета спектральной интенсивности лазера (его немонохроматичности), эталонных спектров поглощения различных примесей, априорной информации о примесях или распределении по размерам, формируя на выходе оценки интересующих параметров — концентраций поглощающих примесей или распределения частиц по размерам.

Лидарная измерительная система

При трассовом зондировании атмосферы на удаленную топографическую мишень посылается лазерный импульс и принимается обратнорассеянное излучение. Схема измерения может быть представлена в следующем виде:

$$\xi(\nu_0)=\frac{B\int a(\nu,\ \nu_0)\exp\Big(-2R\sum_{i=1}^{k}N_i\,\sigma_i(\nu)\Big)\,d\nu}{\int a(\nu,\ \nu_0)\,d\nu}+\eta, \qquad (1)$$

где $\xi(\nu_0)$ — результат измерения спектра в некотором интервале частот; ν_0 — текущая координата в области перестройки, меняющаяся с шагом перестройки; измеренный спектр имеет размерность K точек, на результат измерений влияют k концентраций примесей; $a(\nu,\ \nu_0)$ — спектральная характеристика излучения лазера при настройке на частоту ν_0 (обычно полагается Гауссовой формы с полушириной γ_λ); B — множитель, зависящий от площади приемника, коэффициента отражения от топографической мишени, от кпд приемной системы (от потерь в оптическом тракте), объемных потерь на трассе, от R^{-2}; η — шум; k — число предполагаемых поглощающих компонент в атмосфере; N_i — концентрация i-й компоненты; R — длина трассы, $\sigma_i(\nu)$ — функция, описывающая поглощение i-й компоненты (сечение поглощения), обычно задается в виде линейной суперпозиции отдельных линии поглощения фиксированной формы, например:

$$\sigma_i(\nu) = \sum_{j=1}^{m_i} S_{0j}^{(i)} \Bigg/ \left\{1 + \left(\frac{\nu - \nu_{0j}^{(i)}}{\gamma_{0j}^{(i)}}\right)^2\right\},$$

где m_i — число линий поглощения в i-м эталонном спектре; $s_{0j}^{(i)}, \nu_{0j}^{(i)}, \gamma_{0j}^{(i)}$ — соответственно интенсивность j-й линии, ее центральная частота и полуширина в i-й компоненте.

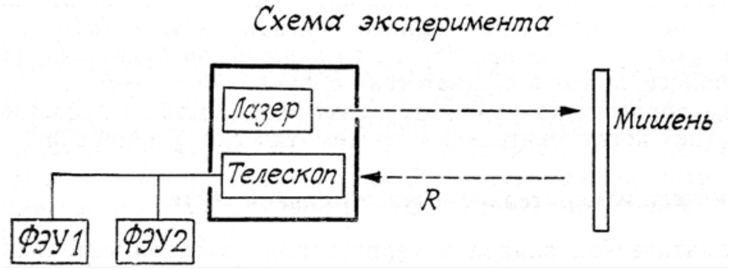

Рис. 1

В рамках данной задачи схема измерения (1) может быть приведена в следующем виде [2]:

$$\xi(\nu_0) = \int I(\nu) \exp\left\{-2R \sum_{i=1}^{k} N_i \sigma_i(\nu)\right\} a(\nu - \nu_0)\, d\nu + \eta, \qquad (2)$$

так как имеет место пространственная инвариантность измерительной системы (инвариантность относительно сдвига по частоте). Здесь $a(\nu-\nu_0)$ определяет форму линии, так как лазер, настроенный на частоту ν_0, реально будет излучать в некоторой полосе частот в соответствии с функцией $a(\nu-\nu_0)$; $I(\nu)$ — мощность лазера.

Последовательно-параллельная декомпозиция измерительной системы

Схема измерения (2) для задачи определения концентраций поглощающих примесей методом дифференциального поглощения представляет собой нелинейную схему измерения большой размерности, поэтому задача восстановления исходного сигнала по результатам измерений представляется нетривиальной.

Для решения такой задачи представим лидарное измерение в виде трех последовательных «математических» измерений. Линейное измерение 1 — это переход от вектора концентраций $\mathbf{N} = (N_1, \ldots, N_k)^*$ размерности k к многомерному сигналу $S(\nu) = 2R\sum_{i=1}^{k} N_i\sigma_i(\nu)$ — суммарному спектру поглощения или пропускания.

В качестве измерения 2 выступает декомпозиция на K одномерных нелинейных измерениях $g(\nu) = I(\nu)\exp(-S(\nu))$, где $g(\nu)$ — интенсивность принятого излучения на данной частоте, если бы излучение велось монохроматическим источником (на частоте ν) с интенсивностью этого источника $I(\nu)$. Здесь учитывается частотная зависимость приемного тракта, B = const.

Измерение 3 — пространственно-инвариантная измерительная система, где получается многомерный сигнал $\xi(\nu_0) = \int a(\nu - \nu_0) g(\nu) d\nu$. Если лазер настроен на частоту ν_0, то реально он будет излучать в некоторой полосе частот в соответствии с функцией $a(\nu-\nu_0)$.

Таким образом, полную схему измерения можно представить как серию из трех последовательных «математических» измерений.

Задача синтеза измерительно-вычислительной системы

Математическая задача интерпретации экспериментальных данных ставится как задача получения оценки N для концентраций по результату измерения $\xi(\nu_0)$, т.е. как задача построения алгоритма, оптимальным образом преобразующего $\xi(\nu)$ в оценку для $\mathbf{N}$ и адекватно учитывающего погрешность измерения. Следует особенно подчеркнуть, что это алгоритм, теоретически гарантирующий погрешность редукции (т.е. погрешность в определении $\mathbf{N}$).

Решение задачи редукции проводится поэтапно. На первом этапе по результату измерения ξ оптимальным образом восстанавливается g, используется вся специфика этого измерения 3 [5]: измерение типа сканирующего, инвариантность схемы измерения относительно сдвига по частоте.

На втором этапе по всем компонентам g оптимальным образом (параллельно) восстанавливаются компоненты S. На третьем этапе по S также оптимальным образом восстанавливается вектор концентраций $\mathbf{N}$.

Следует отметить, что поскольку ξ получен с погрешностью, имеющей известные стохастические характеристики, то g восстанавливается оптимальным образом с некоторой контролируемой погрешностью; затем для S, а также при оценивании $\mathbf{N}$ будут получены оценки с контролируемой погрешностью.

Таким образом, полные схемы измерения и редукции будут выглядеть следующим образом (рис. 2).

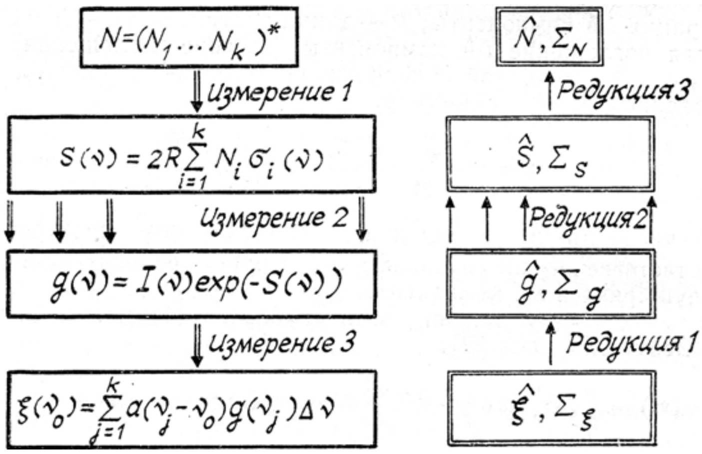

Рис. 2

В схеме присутствуют лишь два типа измерений — линейное и простое нелинейное (экспонента).

Линейная измерительная система

Пусть некоторое измерение описывается линейной стохастической схемой измерения с аддитивным шумом [4]

$$\zeta = Az + \mu,$$

где z — случайный вектор с известным ковариационным оператором F; векторы μ и ζ — соответственно случайная погрешность с нулевым средним и корреляционным оператором Σ и результат измерения; A — линейный оператор. Пусть для оценки вектора Uz (U — линейный оператор) используется преобразование R (редукционный оператор [4]). Тогда качество оператора R обычно определяют как среднеквадратическую погрешность оценки

$$h(R,\ A) = \mathbf{E}\|R\zeta - Uz\|^2.$$

Оптимальным в данном случае естественно считать оператор R_A такой, при котором

$$h(R_A,\ A) = \min\{h(R,\ A)\,|\,R{:}\tilde{\mathbf{R}} \to \mathbf{U}\}.$$

Решение задачи редукции для этого случая имеет вид

$$R_A = UFA^*(AFA^* + \Sigma)^{-1},$$

$$h(R_A,\ A) = \mathrm{tr}(UFU^* - UFA^*(AFA^* + \Sigma)^{-1}AFU^*).$$

Для редукции 1 это означает, что

$$g = R\xi,\ \Sigma_g = UGU^* - UGA^*(AGA^* + \Sigma)^{-1}AGU^*,\ \text{а}\ \Sigma_\xi = \Sigma.$$

Аналогично строится решение и для редукции 3.

Нелинейная измерительная система

Рассмотрим нелинейную схему измерения [6]

$$\zeta = a(z) + \mu.$$

Задача редукции формулируется следующим образом: построить редукционное преобразование r, при котором

$$h = \mathbf{E}\|r(\zeta) - U(z)\| \to \min.$$

В нашей задаче каждое отдельное измерение простое (с экспоненциальной зависимостью) и для него можно построить аналитическое решение. Действительно, рассмотрим схему измерения

$$\zeta = \exp(-z) + \mu.$$

Если предположить, что z равномерно распределен от 0 до $z_{\max}$ (что отвечает реальным условиям), а шум μ — равномерно от $-\delta$ до δ, то $r(\zeta)$ — искомое редукционное преобразование (рис. 3). Подобная схема измерения используется в редукции 2.

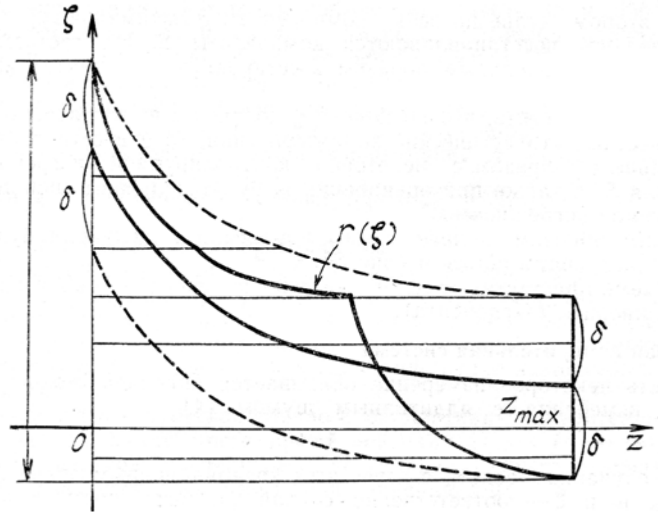

Рис. 3

Заключение

Данная концепция реализована для ряда задач лидарного зондирования (например, для определения концентраций атмосферных примесей по методу дифференциального поглощения). Создание измерительно-вычислительной системы, а именно синтеза оптимального алгоритма обработки лидарных измерений, позволяет по имеющемуся экспериментальному спектру вычислять в реальном масштабе времени параметры спектральных линий с контролируемой погрешностью.

Изложенные принципы последовательно-параллельной декомпозиции измерительных систем могут быть использованы при решении задач анализа и интерпретации экспериментальных данных в широком спектре проблем лидарного зондирования.

1. Golubtsov P.V., Kozlov A.A., Pyt'ev Yu.P., Filatova S.A., Chulichcov A.I. // ITTIAPR'90. Proc. P. 2. USSR. Lviv. 1990. P. 34–38.
2. Filatova S.A., Pyt'ev Yu.P., Golubtsov P.V., Kurbatov A.V., Migulin A.V. // Annal. geophysicae. Supp. 1991. V. 9. P. 566.
3. Kurbatov A.V.. Migulin A.V., Pyt'ev Yu.P., Filatova S.A. // 15th International Laser Radar Conference. Abst. of papers. P. 2. Tomsk. USSR. 1990. P. 205–207.
4. Пытьев Ю.П. Математические методы интерпретации эксперимента. М.: Высшая школа, 1989.
5. Голубцов П.В., Филатова С.А. // Математическое моделирование. 1990. Т. 2. № 10.
6. Пытьев Ю.П. // Математическое моделирование. 1989. Т. 1. № 5.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию
27 июня 1991 г.

P.V. Golubtsov, Yu.P. Pyt'ev, S.A. Filatova. **Measurement and Computer System for Lidar Monitoring of the Atmospheric Impurities.**

In laser monitoring of the atmosphere a problem on appropriate estimation of the atmospheric parameters (concentration of absorbing atmospheric constituents) from lidar returns arises. Mathematically, this problem is the construction of optimum (in a certain sense) reduction transformation, converting experiment data to estimations of the parameters of interest. As a result, this leads to the problem on optimum synthesis of a Measurement and Computer System. The DIAL arrangement corresponds to complex nonlinear multi-dimensional measurement system and allows one to accomplish series-parallel decomposition of measurement to simple components, for any of which an optimal reduction transformation can be constructed.