

Г.М. Игонин, А.И. Исакова, В.Д. Теушеков

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ «ФИЛЬТРОН-В» ДЛЯ ОБРАБОТКИ НА МИКРО-ЭВМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

В работе описываются возможности и особенности системы автоматизации «ФИЛЬТРОН-В», предназначенной для создания на микро-ЭВМ программных средств по обработке временных реализаций лидарных сигналов с применением алгоритмов оптимальной марковской фильтрации.

Оперативные данные о полях атмосферно-оптических параметров необходимы для решения различных задач физики и оптики атмосферы. Методы лазерного (лидарного) зондирования [1–3] позволяют проводить измерения динамически изменяющихся атмосферных величин в реальном масштабе времени, если осуществляется автоматизированная обработка лидарных измерений с применением средств вычислительной техники, как правило, микро-ЭВМ. Автоматизация измерений и обработки помимо наличия ЭВМ предполагает создание и использование, во-первых, аппаратных средств, обеспечивающих высокоскоростную регистрацию полученных результатов и сопряжение приемной системы лидара с ЭВМ как ее внешнего устройства, во-вторых, системного и проблемного программного обеспечения, реализующего ввод и запоминание экспериментальной информации на ЭВМ и ее обработку с целью определения атмосферно-оптических величин.

В данной работе описывается система, предназначенная для автоматизации экспериментальных исследований с применением алгоритмов оптимальной марковской фильтрации и получившая название пакет программ «ФИЛЬТРОН-В».

Алгоритм оптимальной марковской фильтрации лидарных сигналов. Применяемая в лидарных приемниках простейшая обработка сигналов не является оптимальной. Она не учитывает статистической структуры сигналов и помех, поэтому ее эффективность существенно ограничена флуктуациями различных пространственно-временных масштабов, возникающих до и после детектора. Поле коэффициента обратного рассеяния $\beta^H(t; z)$ стохастично, поэтому временные реализации $\beta^H(t; z)$ подчиняются определенным статистическим закономерностям, учет которых позволяет оптимизировать обработку лидарных сигналов. В частности, такая оптимизация достигается с помощью аппарата марковской фильтрации, как например, при восстановлении профилей термодинамических параметров атмосферы [4]. Для этого предполагается, что временные, сглаженные в рассеивающем объеме реализации коэффициента обратного рассеяния $\beta(t, z)$ – марковские, которые можно представить в виде $\beta = \bar{\beta} + \Delta\beta$, где $\bar{\beta}$, $\Delta\beta$ – среднее и флуктуация β . Считая, что реализация нормированных флуктуации $\eta(t; z) = \Delta\beta(t; z)/\sigma_\beta(z)$, где $\sigma_\beta(z)$ – дисперсия $\beta(t; z)$, является гауссовским марковским процессом, имеем

$$\beta(t; z) = \bar{\beta}(z) [1 + m_\beta(z) \cdot \eta(t; z)],$$

где $m_\beta(z) = \sigma_\beta(z)/\bar{\beta}(z)$ – глубина модуляции $\beta(t; z)$.

В режиме счета фотонов с интегрированием заряда в стробе с длительностью Δt_c исходными данными для алгоритма фильтрации являются значения временного ряда накопленных на интервалах дискретизации $\Delta t \ll t_k$ в моменты t чисел $n(t, \Delta t)$ фотоэлектронов: пуассоновского потока с интенсивностью

$$v(t) = \kappa_2 \{P_c(t, z_c) + \chi_1 P_\Phi\} / h\nu + i_T / q, \quad (1)$$

где t_k – временной эффективный радиус корреляции $\beta(t, z)$; κ_1 , κ_2 – коэффициент потерь в приемной оптике и квантовая эффективность фотодетектора; $h\nu$ – энергия кванта излучения; q – заряд электрона; i_T – темновой ток, P_c , P_Φ – мощности обратнорассеянного излучения и фона, z_c – высота, соответствующая выбранному стробу.

Чтобы применить результаты [4], где рассмотрен токовый режим детектирования, будем считать, что усредненной на интервале Δt интенсивности потока (1) фотоэлектронов соответствует «ток» [3] $y(t) = qGv(t)$, где G – коэффициент усиления ФЭУ. Так как полоса фотодетектирования $\Pi = \Delta t^{-1}$ удовлетворяет условию $\Pi t_k \gg 1$ аддитивные флуктуации в каждом измерении такого «квантитокового» метода обработки независимы, а при $v(t) \cdot \Delta t \gg 1$ – гауссовские.

Оптимальная оценка η^* , используемая для определения $\beta^* = \beta(1 + m_\beta \eta^*)$, удовлетворяет системе дифференциальных стохастических уравнений

$$\dot{\eta}^*(t; z_c) = -\frac{1}{t_k} \eta^*(t; z_c) + \quad (2)$$

$$+ K(t; z_c) m_\beta \frac{\bar{v} - \bar{v}_\phi}{\bar{v}} \{v(t; z_c) - \bar{v}_\phi - (\bar{v} - \bar{v}_\phi) (1 + m_\beta \eta^*(t; z_c));$$

$$\dot{K}(t; z_c) = \frac{2}{t_k} [1 - K(t; z_c) - \frac{(\bar{v} - \bar{v}_\phi)^2}{\bar{v}} m_\beta^2 t_k K^2(t; z_c)]. \quad (3)$$

Начальные условия задаются в момент t_0 : $\eta^*(t_0; z_c) = 0$, $K(t_0; z_c) = 1$; \bar{v} , \bar{v}_ϕ — средние на интервале наблюдения $[t_0, t_{\max}]$ интенсивности: потоков суммарных и фоновотемновых фотоэлектронов; $K(t; z_c) = \sigma_\beta^2 / \sigma_\phi^2$ представляет отношение апостериорной и априорной дисперсий, по которому можно судить об ожидаемом качестве фильтрации. Алгоритм оптимальной марковской фильтрации осуществляет численное решение системы уравнений (2), (3). Получаемые оценки η^* , β^* являются оптимальными в смысле двух критериев: максимума апостериорной плотности вероятности и минимума среднего квадрата ошибки, так как (2), (3) получены в гауссовском приближении апостериорной плотности вероятности η [4]. В связи с тем, что дисперсионное уравнение (3) не зависит от выборочных данных, его можно решать априори. Это позволяет прогнозировать эффективность фильтрации в предполагаемых условиях зондирования, определять диапазон высот, где фильтрация позволяет достичь необходимую точность восстановления, выбирать параметры на стадии разработки лидара и оценивать возможности имеющегося.

Назначение и возможности пакета программ «ФИЛЬТРОН-В».

Пакет программ предназначен для эффективного внедрения описанного выше алгоритма оптимальной марковской фильтрации временных реализаций лидарных сигналов на мини- и микро-ЭВМ, входящих в состав автоматизированных лидарных станций.

Первая версия пакета программ позволяет:

- на языке предметной области в режиме диалога «человек–ЭВМ» уточнять значения исходных данных задачи;
- получать случайные временные реализации лидарных сигналов с требуемыми статистическими характеристиками;
- проводить статистическую обработку реальных и имитируемых реализаций сигналов;
- осуществлять оптимальную марковскую фильтрацию лидарных сигналов.

Необходимость задания исходных характеристик в диалоговом режиме обусловлена многообразием значений параметров различных лидаров, режимов их работы и используемой обработки физиком-экспериментатором, а не программистом. Генерация случайных реализаций сигналов осуществляется в процессе проведения замкнутых численных экспериментов, необходимых как для проверки правильности реализации алгоритмов фильтрации, так и с целью определения области применения этих алгоритмов и получения показателей их эффективности. Статистическая обработка реальных и имитируемых реализаций сигналов предусматривает расчет первых двух моментов, авто- и взаимно-корреляционной функций, построение гистограмм распределения отсчетов, сравнение по χ^2 — критерию с нормальным и пуассоновским законами распределения и т.д. и проводится, в частности, с целью определения априорных данных, используемых в алгоритме фильтрации. Системы дифференциальных стохастических уравнений, описывающие алгоритм оптимальной марковской фильтрации лидарных сигналов [4], решаются одним из трех численных методов: Эйлера, Эйлера–Коши и Рунге–Кутты четвертого порядка, выбираемых по желанию пользователя с учетом требуемой точности решения и ограничений на время его получения. Результаты обработки временных реализаций лидарных сигналов могут быть просмотрены на экране терминала и, при необходимости, выведены в форме таблиц в листинг задачи, формируемый на внешнем запоминающем устройстве (ВЗУ) ЭВМ. Содержание листинга зависит от указаний пользователя, выдаваемых программе в диалоговом режиме.

Состав и особенности реализации пакета программ. Пакет программ «ФИЛЬТРОН-В» разрабатывается на языке ФОРТРАН, ориентирован на операционную систему РАФОС-2 (RT-11) и представляет собой комплект взаимоувязанных подпрограмм и необходимых инструкций, которые позволяют относительно быстро создавать на микро-ЭВМ программные средства систем автоматизации экспериментов на лидарных станциях, работающих как в токовом, так и в счетно-фотонном режимах регистрации. С этой целью в основу организации пакета программ положены принципы модульности и функциональности. При разработке модулей были выделены и проанализированы процессы, обычно выполняемые в системах обработки лидарной информации, каждый из которых имел части, не зависящие от конкретного эксперимента и особенностей лидарной станции, и части, зависящие от них. Независимые подпроцессы реализуются в виде подпрограмм пакета таким образом, что они обеспечивают выполнение тех или иных функций по обработке данных, используемых по желанию пользователя в эксперименте. Назначение этих подпрограмм шире и не зависит от источников получения экспериментальной информации. Зависимые части процессов реализуются в виде подпрограмм, учитывающих особенности конкретного эксперимента, лидарной станции, а также имеющиеся

оверлейную структуру с двумя уровнями перекрытий. Необходимость использования оверлейной структуры программы обусловлена ограниченным объемом оперативной памяти на микро-ЭВМ, входящих в состав лидарных станций. Первый уровень перекрытий образуют в основном транзитные подпрограммы, реализующие зависимые части вычислительных процессов и последовательно вызываемые непосредственно головной программой MARK. На втором уровне перекрытий выполняются транзитные подпрограммы, реализующие в основном независимые части вычислительных процессов и вызываемые головной программой или (и) подпрограммами первого уровня перекрытий. Эти подпрограммы (MODEL, STATIS, GISTOG, SCREEN, ...) не зависят от конкретного эксперимента, осуществляют статистическую обработку реализаций, проведение на ЭВМ замкнутого численного эксперимента или предоставляют сервисные услуги по просмотру и печати экспериментальных данных и результатов их обработки. Рабочие программы, разработанные на основе пакета программ «ФИЛЬТРОН-В» для других лидарных станций, имеют аналогичную оверлейную структуру. Такой подход обеспечил функционирование систем обработки на мини- и микро-ЭВМ с объемом оперативной памяти 64 Кбайт и одним ВЗУ на гибком или жестком магнитном диске. Длина рабочей программы MARK, предусматривающей одновременную обработку двух реализаций длиной по 1024 отсчета составляет 38516 байт. Суммарный же объем всех выполняемых программ равен 75854 байт и ограничивается, как правило, только свободным местом на ВЗУ.

Применение пакета программ. На основе пакета программ «ФИЛЬТРОН-В» были созданы системы обработки экспериментальных данных с применением алгоритмов оптимальной марковской фильтрации для нескольких лидарных станций: ВЛ-ЗП [5] и «СТРАТОСФЕРА-1М» [6], использующих счетно-фотонный режим детектирования, и для ЛОЗА-4 [7], работающей в токовом режиме. Для этих станций проводилась обработка реальных экспериментальных данных с целью определения временных реализаций коэффициента обратного рассеяния и получения оптимально оцениваемых реализаций лидарных сигналов. Часть пакета программ, касающаяся проведения замкнутого численного эксперимента в токовом режиме детектирования, используя уравнение лидара [1] и алгоритм фильтрации [4], принята в Государственный фонд алгоритмов и программ [8].

Перспективы развития. Первая версия пакета программ применялась для временной фильтрации реализаций лидарных сигналов. Переход к пространственной фильтрации, характеризующейся нестационарностью лидарного сигнала, не потребует существенного расширения пакета и усилий разработчиков, так как алгоритмы марковской фильтрации применяются как раз для нестационарных процессов. Появятся новые подпрограммы, реализующие изменившиеся зависимые части вычислительных процессов. Реализация пространственно-временной фильтрации на микро-ЭВМ будет осложнена ее ограниченными вычислительными ресурсами, что потребует, вероятно, разработки и применения более эффективных вычислительных методов по решению систем дифференциальных стохастических уравнений. Другое направление развития пакета — встраивание алгоритмов фильтрации в системы регистрации лидарных сигналов с целью получения оценок параметров атмосферы в реальном масштабе времени, осуществляя компромисс между точностью решения уравнений фильтрации и временем его получения.

Авторы благодарны Г.Н. Глазову за полезные замечания и предложения, которые были учтены при разработке алгоритмов временной фильтрации и их реализации в пакете программ. Авторы признательны коллегам по Институту оптики атмосферы СО АН СССР, физикам-экспериментаторам В.Н. Маричеву, О.А. Краснову и И.А. Разенкову, на лидарных станциях которых апробировалась первая версия пакета программ.

1. Лазерный контроль атмосферы/Под ред. Е.Д. Хинкли. — М.— Мир, 1979. — 146 с.
2. Зуев В. Е. Лазерное зондирование атмосферы. — Оптико-механическая промышленность, 1986, № 3, с. 45—56.
3. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. — М.: Мир, 1987 — 550 с.
4. Глазов Г. Н., Глазов Гр. Н., Игонин Г. М. Применение оптимальной марковской фильтрации в оптическом зондировании атмосферы. — Автометрия, 1985, № 4, с. 46—51.
5. Ельников А. В., Маричев В. Н., Шелевой К. Д., Шелефонтьук Д. И. Лазерный локализатор для исследования вертикальной стратификации аэрозоля. — Оптика атмосферы, 1988, № 4, с. 117.
6. Кауль Б. В., Краснов О. А., Самохвалов И. В., Шелевой В. Д. Многоволновой поляризационный аэрозольный лидар «Стратосфера-1М». — В кн.: VIII Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы (Тез. докладов), ч. I. Томск: 1984, с. 58.
7. Балин Ю. С., Байрашин Г. С., Бурков В. В. и др. Мобильный лазерный локализатор «ЛОЗА-4». — В кн.: VIII Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы (Тез. докл.), ч. II. Томск: ТФ СО АН СССР, 1984, с. 364-367.
8. Игонин Г. М., Исакова А. И., Теушеков В. Д. Оптимальная марковская временная фильтрация лидарного сигнала в токовом режиме регистрации. — Алгоритмы и программы. Информационный бюллетень. — Всесоюз. научно-техн. инф. центр, 1988, № 2, с. 12.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
25 февраля 1988 г.

G. M. Igonin, A. I. Isakova, V. D. Teushchekov. **Microcomputer—Aided System Filtron—V for Processing Atmospheric Data from Lidar Remote Sounding.**

Capabilities and specific features of a microcomputer—aided system Filtron-V intended for development of software products for processing temporal realizations of lidar signals using the Markovian optimal filtration algorithms are discussed.