

А.И. Исакова, Г.М. Игонин

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Приведены результаты использования алгоритма эффективной марковской фильтрации для обработки данных лидарного зондирования для различных лидарных станций. Определен диапазон высот, где фильтрация позволяет достичь необходимой точности восстановления.

Произведено сравнение методов обработки данных лидарного зондирования с использованием аппарата марковской фильтрации и скользящего сглаживания. Показано, что марковская фильтрация обеспечивает существенный выигрыш в точности оценивания реализации коэффициента обратного рассеяния $\beta(t)$.

Широкий класс экспериментов атмосферной оптики состоит в измерении пространственных или временных реализаций случайных полей оптических параметров атмосферы. Имеются в виду эксперименты, использующие оптическое зондирование в различных схемах с рассеянием на аэрозолях для измерения коэффициентов ослабления, дифференциального рассеяния, концентрации и т.д.

Лидарное измерение оптических параметров сопровождается сглаживанием этих реализаций в пространстве и времени, что позволяет задать их статистическую структуру [1]. Тогда для эффективной обработки экспериментальных данных возможно применение оптимальной марковской фильтрации лидарных сигналов. Необходимое требование к оцениваемому параметру – стохастичность, т. е. его зависимость от времени или дальности должна быть реализацией случайного процесса, который обладает свойствами гауссовости и марковости. В частности, пространственные и временные зависимости сглаженных лидарным импульсом температуры, плотности и давления воздуха, флуктуаций коэффициента обратного рассеяния аэрозоля и других параметров являются такими процессами. Оптимальная фильтрация должна быть много эффективней неоптимальных обработок сигналов, чтобы оправдать усложнение расчетов и предъявляемых к нему требований. Расчет эффективности необходим и для других целей, например, прогноза эффективности зондирования в назначенном диапазоне условий при разработке лидара и, в частности, при выборе его основных параметров.

Эффективность фильтрации лидарных сигналов и, следовательно, эффективность зондирования заданного атмосферного параметра описываются различными характеристиками. Простейшей характеристикой является зависимость от времени апостериорной дисперсии $D(\beta_a^*)$ или, что то же самое, зависимость $K(t)$, где $K(t) = D(\beta_a^*)/D(\beta_a)$ – отношение апостериорной и априорной дисперсий в момент времени t . Если в качестве оценки реализации $\beta_a(t)$ взять заданное априори среднее $\bar{\beta}_a$, то в ансамбле флуктуаций $\beta_a(t)$ оценка реализации имеет дисперсию $\sigma^2(\beta_a)$. Поэтому $K(t)$ задает локальный выигрыш фильтрации в сравнении с этой априорной «оценкой»: чем меньше K , тем больше выигрыш. Например, в качестве локальной эффективности фильтрации в момент времени t можно взять $[K(t)]^{-1/2}$. Глобальный критерий эффективности фильтрации на заданном интервале $[t_0, t_m]$ задается формулой

$$W = \left[\frac{1}{[t_m - t_0]} \int_{t_0}^{t_m} K(t) dt \right]^{-1/2}. \quad (1)$$

Как будет показано ниже, при временной фильтрации в стационарных условиях ($D(\beta_a) = \text{const}$) $K(t)$ быстро спадает до значения \bar{K} , а затем становится постоянным. Поэтому

если $(t_m - t_0)$ много больше интервала установления Δt_y , то $W \approx 1/\sqrt{\bar{K}}$. Таким образом, с точки зрения и локального, и глобального критериев при $(t_m - t_0) \gg \Delta t_y$ важнейшими величинами, определяющими эффективность фильтрации, являются $\bar{K}(t)$ и Δt_y .

Уравнение для $K(t)$ на $t \in [t_0, t_m]$ имеет вид

$$\frac{dK}{dt} = -\frac{2}{t_k} K + \frac{2}{t_k} \frac{\bar{v}_s^2 m_\beta^2}{\bar{v}} K^2 \quad (2)$$

с начальным условием $K(t_0) = 1$. Здесь t_k – временной радиус корреляции процесса $\beta_a(t, z)$; \bar{v}_s, \bar{v} – сигнальная и суммарная плотности фотоэлектронных потоков; $m_\beta = \sigma(\beta_a)/\bar{\beta}_a$ – априорная относительная средне-квадратичная фильтрация процесса $\beta_a(t, z)$ или его глубина модуляции. Величина $Q = \bar{v}_s^2 m_\beta^2 t_k / \bar{v}$ – обобщенное отношение сигнал-шум. Важность этой величины состоит в том, что при $Q \gg 1$ фильтрация лидарных сигналов наиболее эффективна.

Выражение (2) не зависит от выборочных данных и может быть решено априори, что дает возможность прогнозировать эффективность фильтрации в предполагаемых условиях зондирования и определять диапазон высот, в котором фильтрация позволяет достичь необходимой точности восстановления. На рис. 1 представлена временная динамика $K(t, z)$ при одинаковых условиях зондирования с учетом различных значений энергетического потенциала (таблица) лидарных станций (χ_0 – произведение коэффициента потерь и квантовой эффективности; f_n – частота повторения лазерных импульсов; E – энергия, излучаемая передатчиком импульса; λ_0 – рабочая длина волны; S_a – эффективная площадь приемной антенны).

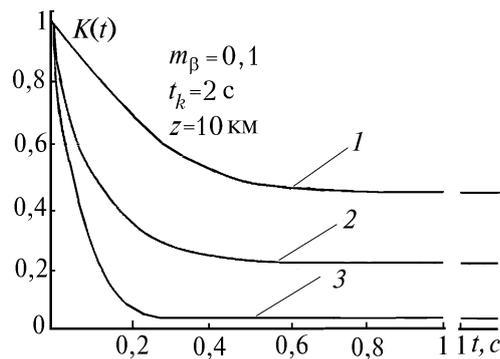


Рис. 1. Динамика $K(t)$ для лидаров, энергетический потенциал которых приведен в таблице

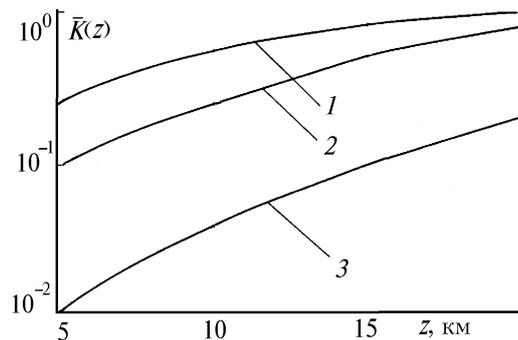


Рис. 2. Высотные зависимости стационарных значений относительной дисперсии для этих же лидаров

Характер временных зависимостей для всех лидаров одинаков: $K(t, z)$ сравнительно быстро убывает от начального значения $K(t_0, z) = 1$ до стационарного $\bar{K}(z)$ значения $K(t, z)$ в установившемся режиме фильтрации, которое существенно зависит от энергетического потенциала на данной высоте. Время установления $\Delta t_y \ll t_k/Q$. Решение, соответствующее периоду

стационарной фильтрации (после переходного режима), может быть найдено из уравнения $QK^2 + K - 1 = 0$, получаемого из (2) при условии $dK / dt = 0$. На рис. 2 приведены зависимости $\bar{K}(z)$, которые позволяют оценивать возможности зондирования на различных высотах. Так, наилучшие возможности по реализации алгоритма марковской фильтрации имеет лидер N 3 в плане прогнозов эффективности по всему диапазону высот зондирования.

№	χ_0	$f_n, \Gamma\text{ц}$	$E, \text{Дж}$	$\lambda_0, \text{мкм}$	$S_a, \text{м}^2$
1	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^3$	$0,2 \cdot 10^{-3}$	0,532	0,75
2	0,01	12,5	$10 \cdot 10^{-3}$	0,532	0,1963
3	0,016	12,5	$10 \cdot 10^{-3}$	0,532	0,785

Ниже приведены результаты сравнения методов обработки данных лидарного зондирования с использованием аппарата марковской фильтрации и скользящего сглаживания. Простая оценка в виде скользящего сглаживания методом наименьших квадратов (на прямоугольном окне длительностью $T = M\Delta t_g$) имеет вид $\hat{\beta}_{i+2} = \frac{1}{M} \sum_{j=i}^{i+M} \beta_j$ (Δt_g – интервал дискретизации). Дисперсию этой оценки определим в предположении экспоненциальной корреляции. С помощью [2, 3] получена дисперсия такой оценки в следующем виде:

$$D(\hat{\beta}_i) = \frac{D_0}{A^2 M} + \frac{2\xi D_0}{A^2 M^2} \left[\frac{(M-1)e^\gamma - M + e^{-(M-1)\gamma}}{(e^\gamma - 1)^2} \right]. \quad (3)$$

Выигрыш фильтрации показывает отношение $\Psi = D(\hat{\beta}_a) / D(\hat{\beta}_a^*)$. На рис. 3 приведены зависимости $\Psi(\xi; M)$, рассчитанные для $0,1 \leq \xi \leq 0,9$ и $M = 3, 5, 7, 9, 11$ в предположении $t_k = T$; A, γ – калибровочные постоянные.

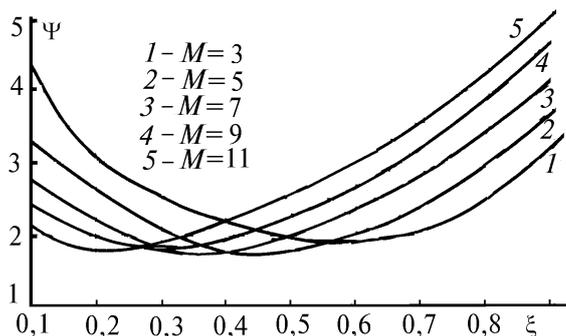


Рис. 3. Оценка выигрыша алгоритма марковской фильтрации в точности оценивания реализации $\beta(t)$

Видно, что применение алгоритма марковской фильтрации обеспечивает существенный выигрыш по сравнению с методом скользящего сглаживания в точности оценивания реализации $\beta(t)$.

1. Глазов Г.И., Глазов Гр.Н., Игонин Г.М. //Автометрия. 1985. N 5. С. 46–51.
2. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1971. 408 с.
3. Невельсон М.Б., Хасьминский Р.З. Стохастическая аппроксимация и рекуррентное оценивание. М.: Наука, 1972. 304 с.
4. Полляк Ю.Г. Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах. М.: Советское радио, 1971. С. 188–189.
5. Исакова А.И., Игонин Г.М. //Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 1. N 5. С. 104–109.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
26 октября 1995 г.

A. I. Isakova, G. M. Igonin. **Efficiency of Lidar Sounding Data Processing.**

The results of application of the efficient Markov filtration algorithm to the processing of the lidar sounding data are presented. The range of heights is determined in which the filtration allows obtaining the necessary reconstructing accuracy. It is derived from the comparison of the Markov filtration and moving fitting methods that the first method provides significantly better accuracy in estimation of the backscattering coefficient $\beta(t)$ representation.