АЛГОРИТМ ДЕКОНВОЛЮЦИИ В ЗОНДИРОВАНИИ ЛИДАРОМ СО СЛОЖНОЙ ФОРМОЙ ИМПУЛЬСА ЛАЗЕРА

Волков С.Н.[1], Зайцев Н.Г.[1], Пак С.-Х.[2], Ким Д.-Х.[3], Нох Е.-М.[2]

[1]Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

[2]Пукенг национальный университет, г. Пусан, Республика Корея

[3]Ханбат национальный университет, г. Тэджон, Республика Корея

e-mail: snvolk@iao.ru, zaicevng@iao.ru, shpark0723@pukyong.ac.kr, dhkim7575@hanmail.net, nym@pknu.ac.kr

Облака нижнего яруса как предмет исследования представляют большой интерес для исследователей. Часто это облачные образования, состоящие из слоев с очень малой оптической толщиной около 0.2 и менее. Зондирование облаков такого типа предпочтительно лидаром расположенным на земной поверхности. Световодный лидар на основе Q-switch лазера эффективен для этих целей. На стадии предварительной обработки результатов зондирования необходимо учитывать, что излучение Q-switch лазера обладает сложной формой и в процессе предварительной обработки данных применяется метод деконволюции сигналов лидарного зондирования. В работе показывается оптимальный алгоритм деконволюции сигналов зондирования лидаром со сложной формой импульса лазера.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, облака нижнего яруса, деконволюция

Облака нижнего яруса как предмет исследования представляют большой интерес для исследователей. Облака нижнего яруса расположены близко к земной поверхности. Часто это облачные образования, состоящие из слоев с очень малой оптической толщиной около 0.2 и менее. Зондирование облаков такого типа затруднительно из космоса. Зондирование лидаром расположенным на земной поверхности предпочтительнее для этой цели. Как правило, облачность характеризуется быстрой изменчивостью, поэтому предпочтительно увеличивать частоту излучения лазера лидара и уменьшать время накопления данных в лидарных измерениях. В работе [1] было показано, что световодный лидар на основе Q-switch лазера эффективен для этих целей. Зондирование лидаром проводится в режиме счета фотонов. Лазер световодного лидара излучает импульсы с частотой 30 кГц. Это позволяет уменьшать время накопления сигналов лидарного зондирования до одной минуты. На стадии предварительной обработки результатов зондирования необходимо учитывать, что излучение Q-switch лазера обладает сложной формой и в процессе предварительной обработки данных применяется метод восстановления сигналов лидарного зондирования. Алгоритм преобразования рассматривается с точки зрения теории оценок [2]. С этой точки зрения деконволюция представлена как

линейная модель параметров. Это в свою очередь приводит к решению проблемы оценок ошибок на основе метода наименьших квадратов.

Алгоритм деконволюции основан на представлении импульса лазера в виде пакета *M* последовательных импульсов $h=(h_0,h_1,...,h_M)$, передаваемых в атмосферу. Каждому короткому импульсу h_n соответствует лидарный сигнал обратного рассеяния в точке приема. Эти сигналы идентичны для всех коротких импульсов с точностью до множителя, задаваемого калибровочным значением. Фотоприемник лидара регистрирует суммарный сигнал $f=(f_0,f_1,...,f_N)$, который, согласно принципу аддитивности, представляет собой свертку

$$f_i=\sum_{k=0}^{i}h_{i-k}p_k,\ (i=1,2,...,N) \tag{1}$$

где $p=(p_0,p_1,...,p_N)$- восстановленный сигнал, а форма излучения h лазера нормирована как

$$\sum_{k=0}^{M}h_k=1. \tag{2}$$

Уравнение (1) в матричной форме имеет вид

$$Ap=f, \tag{3}$$

где *NxN* матрица $A=(a_{ij})$ определена как

$$a_{ij}=h_{i-j},\ (a_{ij}=0 \text{ if } 0>(i-j)>M). \tag{4}$$

В [2] показано, что, если известны ошибки измерений $D(f)$ и $D(h)$, то решением (3) будет

$$\hat{p}=(A^TD^{-1}A)^{-1}A^TD^{-1}f, \tag{5}$$

с оценками ошибок в виде

$$\hat{D}=B^{-1}=(A^TD^{-1}A)^{-1}, \tag{6}$$

где *NxN* диагональная матрица $D=(D_{i,i})$ имеет вид $D_{i,i}=D(f_i)+\sum_{k=0}^{i}p_{i-k}^2D(h_k),\ (i=1,2,...,N).$

В практике применения метода приходится решать большие системы линейных уравнений с размерностью матриц 600x600. Выбор прикладного метода вычислений оценок параметров из выражений (5) и (6) зависит от ряда условий. Оптимальным можно считать метод с наименьшими затратами при необходимом уровне допустимых погрешностей вычислений. Показано, что для этих целей подходит метод решения систем линейных уравнений Качмажа [3]. Для получения оценок ошибок в алгоритме деконволюции применяется метод обращение матриц. Показано, что метод Шульца эффективно решает проблему

обращения матриц [4]. Алгоритм проекционного метода основан на представлении матрицы B в виде строк $B=(B_n)$. Итерационная последовательность $\left\{ p^n \right\}$ вычисления матрицы-столбца p выглядит следующим образом

$$p^{k+1}=p^k+\frac{B_i^T\left(y_i - B_i p^k\right)}{\left\|B_i\right\|_2^2},\ \left(\begin{array}{l} k=0,1,... \\ i=1,2,...,N \end{array}\right). \qquad (7)$$

Здесь k это номер итерации, $\left\| \cdot \right\|_2$ это евклидова норма строки матрицы B. Следуя алгоритму вычислений, вначале необходимо задать начальное приближение матрицы-столбца p^0. Затем, эта матрица-столбец последовательно обновляется, производя вычисления по формуле (7) по всем строкам матрицы B. На следующем шаге итерации процедура последовательного вычисления повторяется. Обычно в качестве критерия остановки вычислений используется выполнение неравенства

$$\frac{\left\|p^{n+1} - p^n\right\|_2}{\left\|p^n\right\|_2}\le\eta\ , \qquad (8)$$

где η это параметр, величина которого определяет момент завершение вычислений.

Отметим, что критерий выбора завершения итерации в методе Качмажа является косвенным, поскольку не известно точное решение. Это затрудняет применение метода в случае медленной сходимости. Однако достоинство метода Качмажа в том, что нет особых условий для выбора начального приближения p^0. Кроме того, этот метод не требует прямого вычисления обратной матрицы B^{-1}.

Однако, для получения оценок ошибок по формуле (6) требуется вычислять обратную матрицу $\overset{\sqcup}{D}=B^{-1}$. Метод Качмажа для этой цели показывает медленную сходимость и, таким образом, выбор критерия завершения итерации затруднен. Удовлетворительные результаты показывает итерационный метод Шульца [4]

$$\overset{\sqcup}{D}^{k+1}=\overset{\sqcup}{D}^k\left(2E - B\overset{\sqcup}{D}^k\right),\ \ (k=0,1,...). \qquad (9)$$

Здесь последовательность $\left\{ \overset{\sqcup}{D}^n \right\}$ это итерационное приближение к матрице B^{-1}, k это номер итерации, E это единичная диагональная матрица, B это исходная матрица для обращения по формуле (6, 7). Размер этой матрицы определяет размер матриц $\overset{\sqcup}{D}$ и E. Этот метод также известен как метод Ньютона и для устойчивой сходимости требуется выполнение начального приближения $\left\|E - B\overset{\sqcup}{D}^0\right\|<1$, где $\left\| \cdot \right\|$ это известная норма матрицы, $\overset{\sqcup}{D}^0$ это начальное

приближение. Удовлетворительные результаты показывает выбор начального приближения обратной матрицы в виде

$$\overset{\sqcup}{D}^{0} = \frac{1}{\|B\|_2} B, \tag{10}$$

где $\|\cdot\|_2$ это Евклидова норма матрицы. Итерация завершается по достижении условия $\left\|E - B\overset{\sqcup}{D}^{n}\right\| < \eta$. Таким образом, несмотря на сложности в выборе начального приближения, метод Шульца обладает тем преимуществом что позволяет задать точность вычислений, на которой завершается итерационная процедура.

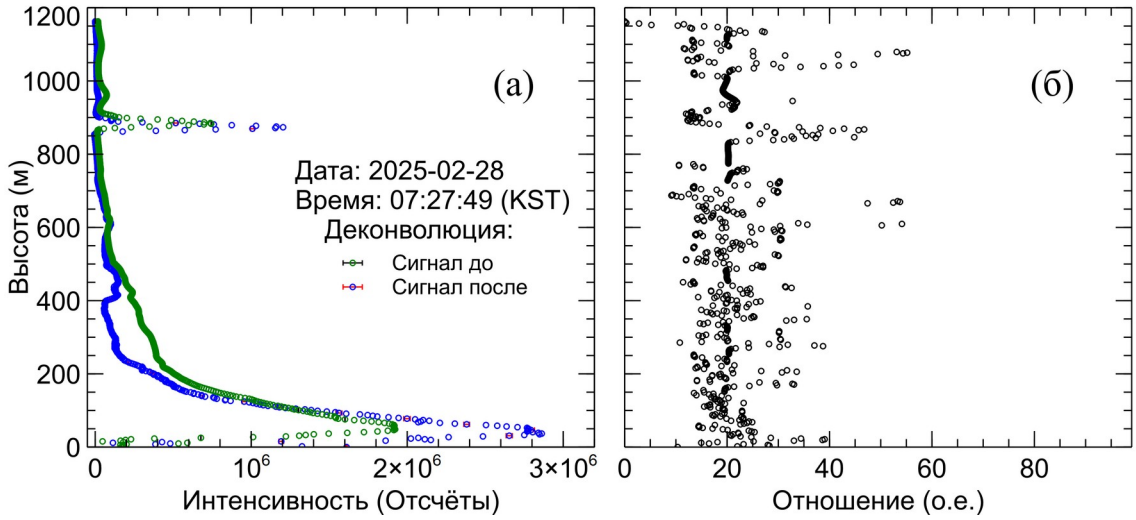


Рисунок 1 – Пример деконволюции лидарного сигнала (а) и профиль отношения стандартных отклонений восстановленного сигнала относительно сигнала до преобразования (б).

Деконволюция или восстановление формы лидарных сигналов в соответствие с формой импульса лазера лидара, производится на заключительном этапе предварительной обработки данных измерений. На рисунке 1 показан пример деконволюции лидарного сигнала (а) и профиль отношения стандартного отклонения восстановленного сигнала к стандартному отклонению сигнала до преобразования (б). Можно отметить хорошую сходимость алгоритма основанного на проекционном методе решения систем линейных уравнений Качмажа. Отметим также примерно 20 кратное увеличение оценок стандартного отклонения сигналов в результате применения операции деконволюции. Оценки ошибок восстановленного профиля лидарного сигнала производятся итерационным методом матричного обращения Шульца. При задании параметра завершения итерационного процесса равным 0.001, для завершения работы алгоритма Качмажа требуется примерно 1500 итераций, тогда как для завершения работы алгоритма Шульца требуется не более 60 итераций. Однако, алгоритм Шульца использует значительно большее количество операций обращения к памяти вычислительного устройства,

поэтому использует большее на порядок время вычислений по сравнению с алгоритмом Качмажа.

Результаты исследования показывают перспективность выбранного направления развития лидарного зондирования. Работа выполнена при поддержке государственного задания ИОА СО РАН.

Литература:

1. *Volkov S.N., Zaitsev N.G., Park S.-H., Kim D.-H., Noh Y.-M.* Fiber lidar for control of the ecological state of the Atmosphere // Atmosphere. 2024. V. 15. Is. 6. 729.

2. *Park S.-H., Volkov S.N., Zaitsev N.G., Lee H.-L., Kim D.-H., Noh Y.-M.* Fiber lidar sensing of the vertical profiles of low-level cloud extinction coefficients at 1064 nm // Remote Sens. 2026. V. 18. Is. 6. 891.

3. *Kaczmarz S.* Approximate solution of systems of linear equations // Int. J. Control. 1993. V. 57. P. 1269–1271.

4. *Schulz G.* Iterative Berechung der reziproken Matrix // Zamm-zeitschrift Fur Angewandte Mathematik Und Mechanik. 1933. V. 13. P. 57-59.