

УДК 551.508

М.М. КУТЕЙКО, С.В. КВАЧЕНОК

О ВЫДЕЛЕНИИ ГРАНИЦ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Easily automated algorithms for determination of the boundaries and size of the inhomogeneities in scattering media from the measurements of backscattering signals are offered. By means of numerical simulation, efficiency of the offered algorithms is investigated, their robustness to background and noise disturbance is shown.

Лазерная локация атмосферы в настоящее время широко применяется для решения ряда важных практических задач: контроля за загрязнением атмосферы [1] и возникновением пожаров [2], установления нижней границы облаков [3], дистанционного измерения с летательных аппаратов оптических характеристик на участках «атмосфера - гидросфера» [4] и т. п. Практически во всех перечисленных областях применения лазерной локации требуется устанавливать границы неоднородностей в рассеивающей среде, характеризующие наличие облаков, дыма, выбросов из труб промышленных предприятий, а также изменения состава атмосферы за счет появления в ней компонентов индустриальной деятельности.

Большинство лазерно-локационных методов выделения границ неоднородностей основано на сравнении величины отраженного сигнала с пороговыми уровнями, предварительно устанавливаемыми экспериментально или из априорной информации о среде [5]. Поскольку состояние среды между выделяемой неоднородностью изменяется, что отражается на регистрируемых сигналах, то задача установления порогового уровня становится проблематичной и затрудняет автоматизацию измерений.

В процессе контроля состояния окружающей среды о степени загрязненности судят по оптическим характеристикам (коэффициентам ослабления оптического излучения $\sigma(r)$, коэффициентам обратного рассеяния $\sigma_{\pi}(r)$), количественные значения которых получают из измеряемых сигналов обратного рассеяния $P(r)$ из точек r прохождения лазерного зондирующего импульса. Практически все известные методы восстановления профилей оптических характеристик из сигналов обратного рассеяния требуют предположения о постоянстве индикатрисы рассеяния в направлении назад $g_{\pi}(r) = \sigma_{\pi}(r)/\sigma(r)$ по трассе зондирования [6], которая изменяется в соответствии со структурным составом рассеивающей среды (при появлении в атмосфере компонентов индустриального происхождения). Для слоисто-неоднородных сред данное предположение вообще не может использоваться, по-

сколькx при переходе из одного слоя в другой значения оптических характеристик, в том числе и $g_{\pi}(r)$, могут изменяться на порядки. В этих случаях при интерпретации сигналов обратного рассеяния относительно оптических характеристик для повышения точности сигнал корректируется на границе раздела в соответствии со степенью неоднородности среды согласно установленному в [6] алгоритму. Таким образом, как в экологических, так и в локационных задачах по обнаружению объектов (облака, дыма) и установлению их размеров требуется разработка оперативных, легко автоматизируемых, не требующих установления пороговых значений, алгоритмов выделения границ неоднородностей. Если для выделения одной ближней границы неоднородности (слоя) известен алгоритм [3], удовлетворяющий отмеченным условиям, то другие задачи (установление протяженности границы слоя и его размеров) с использованием данного алгоритма не решаются. Рассмотрим предлагаемый нами алгоритм, позволяющий их решать.

В [3] алгоритм, определяющий границу слоя по максимуму функции, записывается следующим образом:

$$D_s(r) = \frac{d}{dr} \frac{P(r)r^2}{\int_{r_{\min}}^r P(r)r^2 dr}, \quad (1)$$

где r_{\min} - минимальный предел интегрирования, определяемый перекрытием апертур источника и приемника излучения. По существу, (1) является производной от профиля коэффициента ослабления $\sigma(r)$, определяемого из измеряемых сигналов обратного рассеяния $P(r)$ [6]:

$$\sigma(r) = \frac{P(r)r^2}{2 \int_r^{\infty} P(r)r^2 dr} = \frac{P(r)r^2}{2I_m(r)}. \quad (2)$$

По (1) определяется не асимптотический сигнал $I_m(r) = \int_r^{\infty} P(r)r^2 dr$, для которого требуется накопление от участков среды с оптической толщиной $\tau=3$, где $\tau = \int_0^r \sigma'(r) dr$, а сигнал $I(r) = \int_{r_{\text{шум}}}^r P(r)r^2 dr$, не равный $I_m(r)$. При несоответствии сигнала $I_m(r)$ условию $\tau=3$ в (2) наблюдается так называемый «краевой эффект», заключающийся в резком увеличении $\sigma(r)$ на конечных участках трассы зондирования. А поскольку $I(r)$ в (1) не равен $I_m(r)$, то этот эффект будет наблюдаться и для $D_s(r)$ при использовании алгоритма (1).

Для устранения «краевого эффекта» при определении профиля $\sigma(r)$ в [6] предложен следующий алгоритм определения $I_m(r)$:

$$I_m(r) = \frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} P(r)r^2 dr}{1 - T^2(r_{\min}, r_{\max})} - \int_{r_{\min}}^r P(r)r^2 dr, \quad (3)$$

где $T^2(r_{\min}, r_{\max}) = \exp(-2\tau(r_{\min}, r_{\max}))$ - прозрачность участка среды $[r_{\min}, r_{\max}]$, r_{\max} - точка, в которой достигается задаваемое соотношение сигнал/шум.

Значения прозрачности в алгоритме (3) устанавливаются исходя из состояния исследуемой среды, что не представляет особых затруднений, поскольку величины оптической толщины таких ее состояний, как чистая атмосфера, туман, облачность, дым и т. п., хорошо изучены. Даже при неточном значении τ всегда выполняется условие $I_m \geq 0, \forall r \in [r_{\min}, r_{\max}]$. Следовательно, при использовании алгоритмов (2) и (3) не появится отрицательное или бесконечное $\sigma(r)$, а в случае недостаточно точного значения при этом определении $I_m(r)$ будет происходить отклонение по всей трассе зондирования вычисленного $\sigma(r)$ от истинного.

Для исключения влияния отмеченного отклонения на результат выделения границы слоя предлагается перейти к следующему алгоритму:

$$\Delta_1(r) = D_1(r) - D_1(r_{\min}), \quad (4)$$

где $D_1(r)$ и $D_1(r_{\min})$ - производные от $\sigma(r)$, вычисленные по (2) и (3) в точках r и r_{\min} соответственно, поскольку в этом случае будет отслеживаться разница в скорости изменения $\sigma(r)$ по трассе зондирования относительно точки r_{\min} и на этом фоне более четко проявляться граница раздела.

Следующая требующая разрешения проблема - максимальное исключение в алгоритмах выделения влияния шумовой и фоновой составляющих, присутствующих в сигнале $P(r)$. Поскольку в рассматриваемом алгоритме $P(r)$ умножается на r^2 , а значит, усиливается шумовая (фоновая) компонента в r^2 раз, то для подавления ее влияния в алгоритм вводится множитель $I_m(r)/r^2$, выравнивающий уровень шума по всей трассе. Выражение (4) в этом случае принимает вид

$$K_1(r) = \frac{D_1(r) - D_1(r_{\min})}{r^2} I_m(r). \quad (5)$$

Из математического анализа известно, что при исследовании функций информативными являются и вторые производные. В связи с этим предлагается дополнительно использовать следующий алгоритм, позволяющий расширять и уточнять получаемую информацию:

$$K_2(r) = \frac{D_2(r) - D_2(r_{\min})}{r^2} I_m(r), \quad (6)$$

где $D_2(r) = \frac{d^2}{dr^2} \sigma(r)$.

Исследуем эффективность предлагаемых алгоритмов путем численного математического моделирования, заключающегося в следующем: по заданным профилям $\sigma(r)$, $g_\pi(r)$ рассчитывается сигнал обратного рассеяния, задается оценка оптической толщины $\tau(r_{\min}, r_{\max})$, по которой определяется значение $T(r_{\min}, r_{\max})$. Численное дифференцирование производится по методу наименьших квадратов (рис. 1-3).

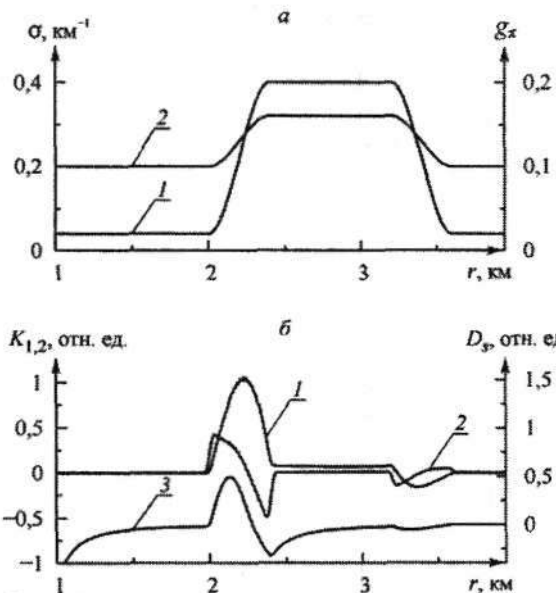


Рис. 1. Результаты выделения границ неоднородности в рассеивающей среде с резко выраженным оптически плотным слоем: а - кривые 1, 2 - задаваемые профили $\sigma(r)$, $g_\pi(r)$; б - кривые 1, 2, 3 рассчитаны с использованием алгоритмов (5), (6) и (1) соответственно

На рис. 1 а приведены профили $\sigma(r)$ (кривая 1) и $g_\pi(r)$ (кривая 2), отражающие наличие слоя оптической неоднородности с размытой границей раздела. Профили $K_1(r)$ (кривая 1), $K_2(r)$ (кривая 2) изображены на рис. 1 б. Данные результаты получены при равенстве задаваемой в алгоритмах при расчете прозрачности $T^2(r_{\min}, r_{\max})$ оптической толщины действительному значению, использованному для моделирования отраженного сигнала ($\tau=1$). Как видно из приведенных кривых 1 и 2 (см. рис. 1 б), положение максимумов и минимумов определяет соответственно положение передней и задней границ неоднородностей: $K_2(r)$ (максимум) позволяет уточнить положение передней границы (повышает точность ее нахождения), а так-

же определяет протяженность передней границы неоднородности (минимум). При использовании же алгоритма [3] с $D_s(r)$ выделяется только передняя граница (рис. 1 б, кривая 3).

Чувствительность алгоритма к медленным изменениям $\sigma(r)$ иллюстрируется результатами моделирования на рис. 2. Поскольку максимум и минимум функции $K_1(r)$ (кривая 1 на рис. 2 б) указывают границы неоднородности при задаваемой оптической толщине $\tau=1$, отличающейся от истинной $\tau=0,42$, соответствующей данной ситуации, то при этом несколько возрастает погрешность определения границ раздела. Это в принципе закономерно, поскольку граница предполагает минимальный перепад между значениями $\sigma(r)$, позволяющий говорить об изменении состава среды. В то же время алгоритм [3], использующий $D_s(r)$, не дает возможности определить положение границы, так как имеет локальный максимум в области передней границы неоднородности, а наибольшее значение соответствует удаленному участку трассы. Функция $D_s(r)$, как следует из рис. 1 и 2, эффективна только при резко выраженных неоднородностях.

Для проверки устойчивости предлагаемого алгоритма к помехам на рассчитанный сигнал накладывалась шумовая составляющая, соответствующая нормальному закону распределения. В этом случае задаваемая в алгоритме оптическая толщина $\tau=1$ значительно отличается от соответствующей данной ситуации $\tau=2,2$. Полученные результаты приведены на рис. 3 а, где кривая 1 - профиль $\sigma(r)$, кривая 2 - профиль сигнала с наложенным шумом. Как видно из рис. 3 б, максимум $K_1(r)$ (кривая 1) соответствует передней границе неоднородности, в то время как минимум $K_1(r)$ не отражает изменения характеристик слоя, попадая на случайный шумовой выброс. Таким образом, алгоритм выделения задней

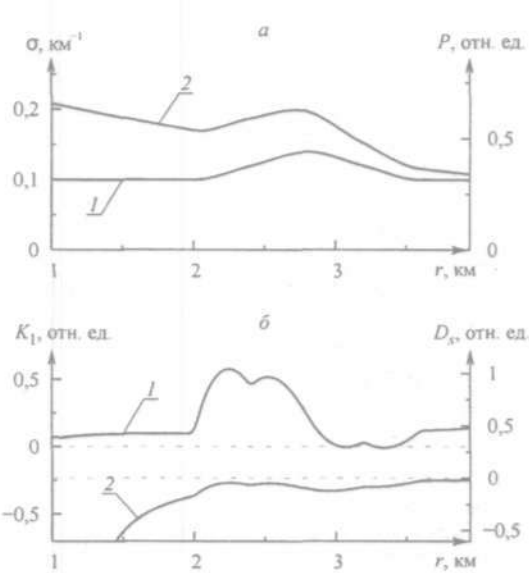


Рис. 2. Результаты выделения границ неоднородностей в рассеивающей среде с медленным изменением оптической плотности: а – кривые 1, 2 – заданный профиль $\sigma(r)$ и сигнал обратного рассеяния, восстановленный на квадрат расстояния соответственно; б – кривые 1, 2 рассчитаны с использованием алгоритмов (5) и (1) соответственно

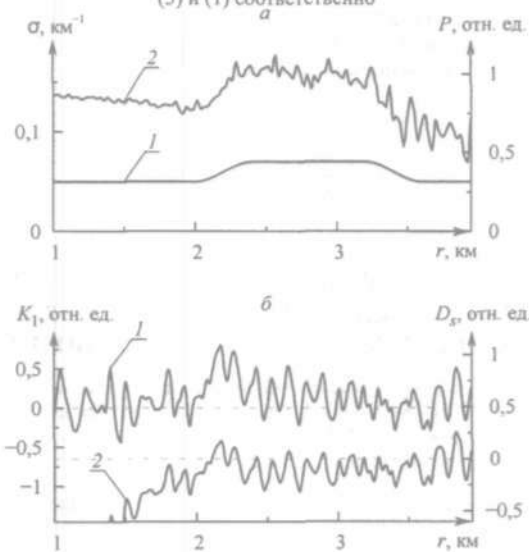


Рис. 3. Результаты выделения границ неоднородности в рассеивающей среде с резко выраженным оптически плотным слоем при наличии шума: а – кривые 1, 2 – заданный профиль $\sigma(r)$ и сигнал обратного рассеяния с наложенным шумом, восстановленный на квадрат расстояния соответственно; б – кривые 1, 2 рассчитаны с использованием алгоритмов (5) и (1) соответственно

границы неоднородности по минимуму $K_1(r)$ менее устойчив к шуму в сигнале по сравнению с алгоритмом выделения передней границы. Это объясняется тем, что шумовая составляющая в сигнале быстро растет при увеличении расстояния и соотношение сигнал/шум в области задней границы значительно ухудшается по сравнению с областью передней границы. В то же время по $D_3(r)$ (кривая 2) определить даже переднюю границу не удастся.

Таким образом, результаты численного моделирования показывают, что предлагаемые алгоритмы позволяют эффективно определять как границы, так и размеры неоднородностей в рассеивающих средах, а также протяженность передней границы по измеренным сигналам обратного рассеяния. Использование в качестве критерия наличия границ максимума и минимума функций $K_1(z)$ и $K_2(z)$ легко обеспечивает автоматизацию процесса измерений. Отсутствие в алгоритмах пороговых значений, минимальное использование априорной информации расширяют и диапазон атмосферных ситуаций, в которых можно использовать предлагаемые алгоритмы выделения неоднородностей.

1. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск, 1986.

2. Захаров В.М., Костко О.К. Метеорологическая лазерная локация. Л., 1977.

3. Kovalev V., Newton J., Wold S, Hao W. // Appl. Opt. 2005. Vol. 44. № 9. P. 1761.

4. Кугейко М.М., Малевич И.А. // Исследования Земли из космоса. 1991. № 1. С. 47.

5. Молебный В.В. Оптико-локационные системы. М., 1981.

6. Кугейко М.М., Оношко Д.М. Теория и методы оптико-физической диагностики неоднородных рассеивающих сред. Мн., 2003.

Поступила в редакцию 08.06.06.

Михаил Михайлович Кугейко - доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой квантовой радиофизики и оптоэлектроники.

Сергей Владимирович Кваченок - студент 3-го курса факультета радиофизики и электроники.