

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

УДК 535.361.: [551.501.816.:528.8.044.6.:551.465.41]

Д.В. Власов, Е.В. Зубков, С.И. Шамаев

ИНВЕРСИЯ УРАВНЕНИЯ ЛИДАРА С УЧЕТОМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ*

В развитие алгоритма Клетта как устойчивой формы инверсии (обращения) уравнения лидара, обеспечивающей восстановление профилей показателя экстинкции (ослабления), по данным лазерного зондирования, получено модифицированное решение, учитывающее характерное для морских вод малоугловое рассеяние.

Посредством численного лидарного эксперимента для среды с различными моделями вертикальных профилей показателя ослабления проведено сопоставление ошибок инверсии известного и модифицированного алгоритмов.

Обратная задача лазерного зондирования морской среды – восстановление вертикальных профилей гидрооптических характеристик по сигналам обратного рассеяния – в общем виде является не корректной с математической точки зрения задачей.

Причина тому – трудноучитываемые эффекты многократного рассеяния коллимированного лазерного излучения в неоднородной (как по объемной концентрации, так и по распределению числа рассеивателей в зависимости от размера) среде, а также эффекты, связанные с двукратным прохождением излучения через случайную морскую поверхность [1].

В ряде прикладных задач, для решения которых применяется лазерное аэрозондирование морской среды, как правило, представляют интерес относительные измерения гидрооптических характеристик, в особенности их пространственных распределений и пространственно-временной изменчивости различных масштабов, в то время как измерение абсолютных значений несущественно для этих задач.

Подходы к решению обратной задачи, исходя из целей прикладных исследований, основываются на использовании приближенных выражений, в той или иной степени учитывающих специфику лазерного зондирования верхнего слоя океана и в то же время достаточно простых для того, чтобы удовлетворить требованиям обработки в реальном масштабе времени.

В качестве такого средства известен алгоритм Клетта [2 – 4], позволяющий осуществить обращение (инверсию, по терминологии автора) уравнения лидара относительно показателя ослабления (экстинкции), применявшийся к сигналам обратного рассеяния как атмосферы [2], так и морской среды [5]. Известны работы, посвященные анализу возможностей и особенностей данного алгоритма [6 – 9].

В работе [2] используемое уравнение лидара

$$P(r) = P_n \frac{c \tau_n}{2} \Phi \frac{\sigma(\pi, r)}{r^2} \exp \left[-2 \int_0^r \varepsilon(l) dl \right], \quad (1)$$

где P_n – импульсная мощность; τ_n – длительность импульса; c – скорость света; Φ – эффективная площадь приемной антенны; σ – показатель рассеяния; r – расстояние по трассе зондирования; $\sigma(\pi, r)$ – значение индикатрисы показателя рассеяния в направлении назад; $\varepsilon(r) = \sigma(r) + \kappa(r)$ – показатель ослабления; $\kappa(r)$ – показатель поглощения, которое решается относительно $\varepsilon(r)$ в предположении о существовании зависимости

$$\sigma = B \varepsilon^k, \quad (2)$$

* Работа выполнена в 1987 г.
1324

где B и k – постоянные, причем величина k лежит в пределах $0,67 \div 1,0$ в зависимости от типа рассеивающих частиц.

Полученное Клеттом решение

$$\varepsilon(r) = \frac{\exp [(S(r) - S_m)/k]}{\frac{1}{\varepsilon_m} + \frac{2}{k} \int_r^{r_m} \exp [(S(r') - S_m)/k] dr'}, \quad (3)$$

где $S(r) = \ln [P(r) r^2]$ – логарифм взвешенной по дальности мощности $P(r)$ сигнала обратного рассеяния; r_m – максимальное расстояние по трассе зондирования, соответственно, $\varepsilon_m = \varepsilon(r_m)$ и $S_m = S(r_m)$, устойчиво.

Однако, как отмечает сам автор [2], оно не учитывает эффектов малоуглового рассеяния и, добавим, – эффектов двукратного прохождения излучения через случайную границу раздела сред. Поскольку строгое (с учетом этих эффектов) выражение для мощности эхосигнала [1] практически не поддается численному анализу, то возникает необходимость поиска приближенных решений.

Для учета малоуглового рассеяния в решении (3) нами использовано известное из работы Л.С. Долина и В.А. Савельева [10] выражение, описывающее изменение сечения пучка (в малоугловом приближении) в неоднородной рассеивающей среде:

$$s(r) = s_0(r) + \pi \int_0^r \gamma_0^2(\xi) \sigma(\xi) (r - \xi)^2 d\xi, \quad (4)$$

где $s_0(r) = \pi (r \operatorname{tg} \alpha_{\text{л}})^2$ – сечение пучка без учета рассеяния; $\alpha_{\text{л}}$ – угловая расходимость пучка; $\gamma_0^2(\xi)$ – дисперсия угла отклонения при единичном акте рассеяния. При этом был сделан ряд допущений.

1. Зондирование осуществляется с высоты H через гладкую поверхность раздела сред ($n_1, \kappa_1, n_2, \sigma_2, \kappa_2$), причем $n_1 = 1$; $n_2 = n$ (n – показатель преломления); $\sigma_1 \ll \sigma_2 = \sigma$; $\kappa_1 \ll \kappa_2 = \kappa$.

2. Распределение числа рассеивателей по размерам принято неизменным по глубине, что позволяет считать дисперсию угла отклонения при единичном акте рассеяния величиной, не зависящей от r :

$$\gamma_0^2(r) = \gamma_0^2 = \text{const.}$$

3. Используемое Клеттом со ссылкой на работу советских исследователей [11] соотношение (2) относится к случаю замутненной атмосферы (туман, дым, дождевая облачность), когда преобладают процессы рассеяния, а поглощение по сравнению с ним невелико.

Допустим, что соотношение (2) справедливо и для некоторых типов вод.

Положим $\kappa \leq 0,1 \sigma$ и примем согласно [12, с. 185] среднее значение $\bar{\kappa}$ ($\lambda = 530$ нм) = $0,03 \text{ м}^{-1}$; тогда $\sigma \geq 0,3 \text{ м}^{-1}$. Подобные случаи (в соответствии с классификацией типов вод [12]), по-видимому, могут наблюдаться в районах выноса эоловой взвеси, в прибрежной зоне и районах высокой биопродуктивности океана. Это не противоречит данным физической модели ослабления излучения [12, с. 231], если оценивать соотношение между κ и σ , исходя из величины вероятности выживания фотона

$$\Lambda = \sigma / (\sigma + \kappa),$$

которая для диапазона длин волн (510 ÷ 550) нм составляет $\geq 0,9$ (для прибрежных) и $0,77 \div 0,88$ (для океанических вод) для глубин меньше 100 м.

Если рассматривать мелкомасштабную изменчивость в вертикальном разрезе морской среды, то локальные образования такого типа могут, очевидно, наблюдаться в тонкой структуре сезонного термоклина в виде прослоек повышенной мутности, где величина показателя ослабления может изменяться в несколько раз [13].

В связи с принятым допущением о применимости соотношения (2) для некоторых типов вод необходимо упомянуть работу [5], где приведены результаты обработки сигналов лазерного зондирования морской среды, в том числе и с помощью алгоритма Клетта.

Распределение точек на диаграммах в системе координат ε, B , где B (сохранено обозначение, принятое в работе [5]) – величина, пропорциональная обратному рассеянию, свидетельствует о наличии разнообразных типов функциональной связи, близкой к линейной, между указанными величинами.

В пределах ограниченного района исследований отмечено наличие различных типов вод, характерных для областей выноса продуктов речного стока, отмелей и чистых вод океанического течения, что проявляется как в изменении наклона точечных образований, группирующихся относительно некоторых средних направлений как в системе координат ε, B , так и в их смещении на координатной плоскости.

4. Профили $\sigma(r)$ и $\sigma(\pi, r)$ разумно считать подобными, т.к. хорошо известно, что основные вариации рассеяния определяются в основном изменениями концентрации рассеивающих частиц и, в меньшей степени, изменением распределения частиц по размерам.

В свою очередь, аномальные изменения концентрации какой-либо отдельной фракции полидисперсной взвеси могут привести к появлению экстремумов на индикатрисе рассеяния и, как следствие, к расхождению в виде профилей $\sigma(r)$ и $\sigma(\pi, r)$. Однако, как отмечается в [12, с. 170], «для большинства морских индикатрис локальные экстремумы не обнаруживаются».

С учетом сделанных допущений для случая двукратного прохождения коллимированного излучения через границу раздела сред (воздух–вода) уравнение лидара (1) можно представить в следующем виде:

$$P(r) = \frac{A \sigma(\pi, r) \exp \left[-2 \int_0^r \varepsilon(l) dl \right]}{\left[1 + \left(\frac{v}{nH+r} \right)^2 \int_0^r \sigma(\xi) (r-\xi)^2 d\xi \right] (nH+r)^2}, \quad (5)$$

где $v = \gamma_0 n / \text{tg} \alpha_{\text{Л}}$ и A – аппаратная постоянная лидара.

Повторив для полученного выражения (5) ход решения уравнения лидара, подробно изложенный в [2], мы получили модифицированное выражение, в котором (принимая во внимание сделанные допущения) учитываются эффекты рассеяния:

$$\varepsilon(r) = \frac{\{F(r)/[F(r_m)]\}^{1/k} \exp \{[S(r) - S_m]/k\}}{\frac{1}{\varepsilon_m} + \frac{2}{k} \int_r^{r_m} \left[\frac{F(r)}{F(r_m)} \right]^{1/k} \exp \left[\frac{S(r') - S_m}{k} \right] dr'}, \quad (6)$$

где

$$F(r) = 1 + [v/(nH+r)]^2 \int_0^r \sigma(\xi) (r-\xi)^2 d\xi. \quad (7)$$

Следует отметить, что полученное решение (6) близко по форме решению уравнения лидара, известному из работы [3] для случая зависимости:

$$\sigma(r) = B(r) [\varepsilon(r)]^k. \quad (8)$$

Отличие заключается в том, что вместо члена $[B(r_m)/B(r)]^{1/k}$ в новом решении присутствует отношение функционалов

$$[F(r)/F(r_m)]^{1/k}.$$

Численное моделирование процессов восстановления профилей $\varepsilon(r)$ с помощью модифицированного (6) и известного (3) алгоритмов проводилось применительно к средам с различными моделями распределения $\varepsilon(r)$. Использовались следующие модели:

а) однородная:

$$\sigma(r) = \sigma_0; \quad (9)$$

б) линейная:

$$\sigma(r) = \sigma_0 + ar, \quad (10)$$

где $a \geq 0$, причем $|a| < \sigma_0/r_m$;

в) экспоненциальная:

$$\sigma(r) = \sigma_0 \exp(ar), \quad (11)$$

где при $a < 0$ существует ограничение:

$$|a| = (1/r_m) \ln [\sigma(r_m)/\sigma_0]; \quad (12)$$

г) гармоническая

$$\sigma(r) = \sigma_0 [1 + m \sin(qr)], \quad (13)$$

где $q = 2\pi/r_0$; r_0 – пространственный период изменения $\epsilon(r)$;

д) модель Лоренца [14]:

$$\sigma(r) = \sigma_0 \{1 + \alpha\delta^2/[(r - r_0)^2 + \delta^2]\}, \quad (14)$$

где r_0 – координата максимума концентрации рассеивателей; δ – полуширина распределения $\sigma(r)$; $\alpha \geq 0$ – коэффициент, определяющий максимальную величину σ в пике распределения.

Каждой модели соответствует свой функционал $F[\sigma(r)]$, найденный путем интегрирования выражения (7). Ниже приведены результаты интегрирования для случая $H = 0$:

а) однородная модель:

$$F(r) = 1 + (\sigma_0 v^2/3) r; \quad (15)$$

б) линейная модель:

$$F(r) = (a v^2/12) r^2 + (\sigma v^2/3) r + 1; \quad (16)$$

в) экспоненциальная модель:

$$F(r) = 1 - [v/(ar)]^2 \sigma_0 [(ar + 1)^2 - 2e^{ar} + 1]/a; \quad (17)$$

г) гармоническая модель:

$$F(r) = 1 + \sigma_0 \left(\frac{v}{r}\right)^2 \left\{ \frac{r^3}{3} + m \frac{qr^2 - 2[1 - \cos(qr)]}{q^3} \right\}; \quad (18)$$

д) модель Лоренца:

$$F(r) = 1 + \sigma_0 (v/r)^2 \{ (r^3/3) + \alpha\delta^2 r + \alpha\delta [(r - r_0)^2 - \delta^2] [\arctg((r - r_0)/\delta) + \arctg(r_0/\delta)] - \alpha\delta^2 (r - r_0) \ln[(r - r_0)^2 + \delta^2]/(r_0^2 + \delta^2) \}. \quad (19)$$

Программа моделирования предусматривала восстановление профиля

$$\epsilon(r) = \sigma(r) + \kappa \quad (20)$$

в равноотстоящих точках трассы, ограниченной величиной r_m , с помощью двух алгоритмов инверсии: без учета эффектов рассеяния (3) и с учетом этих эффектов (6).

Предварительно рассчитывались истинный модельный профиль $\epsilon(r)$ и имитируемая величина $S(r)$ входного сигнала, взвешенного по дальности в логарифмическом масштабе, учитывающая эффекты многократного малоуглового рассеяния для заданной модели стратификации:

$$S(r) = \ln[P(r)(nH+r)^2] = \ln A + \ln[\sigma(\pi, r)] - 2 \int_0^r \varepsilon(l) dl - \ln \left[1 + \left(\frac{v}{nH+r} \right)^2 \int_0^r \sigma(\xi) (r-\xi)^2 d\xi \right]. \quad (21)$$

Программа (Фортран БЭСМ-6) предусматривала двукратное обращение к каждому алгоритму (3), (6). В первом случае граничное условие для решения дифференциального уравнения лидера задается с помощью истинной величины $\varepsilon_m = \varepsilon(r_m)$. Во втором случае задача приближена к реальной ситуации, когда величина ε_m в конечной точке трассы априорно неизвестна, а используется предложенная Клеттом оценка [2]

$$\hat{\varepsilon}(r_m) = \frac{1}{2} \frac{S_0 - S_m}{r_m - r_0} \quad (22)$$

на основе имитируемых значений реального сигнала.

Восстановление профилей $\varepsilon(r)$ согласно моделям (9)–(14) с помощью полученного алгоритма (6), использующего функционал $F(r)$ для однородной среды (15), наиболее полно имитирует реальную ситуацию при дистанционном зондировании, когда отсутствует априорная информация о характере профиля $\varepsilon(r)$ и, тем более, о значении ε_m в конечной точке трассы.

В то же время предварительная проверка полученного алгоритма (6) с помощью функционалов (15) – (19), соответствующих заданным моделям (9) – (14), показала полное совпадение исходных и восстанавливаемых профилей.

Результаты моделирования представлены на рис. 1–5. В верхней части рисунков штриховой линией указана зависимость $S(r)$ (см. (21)).

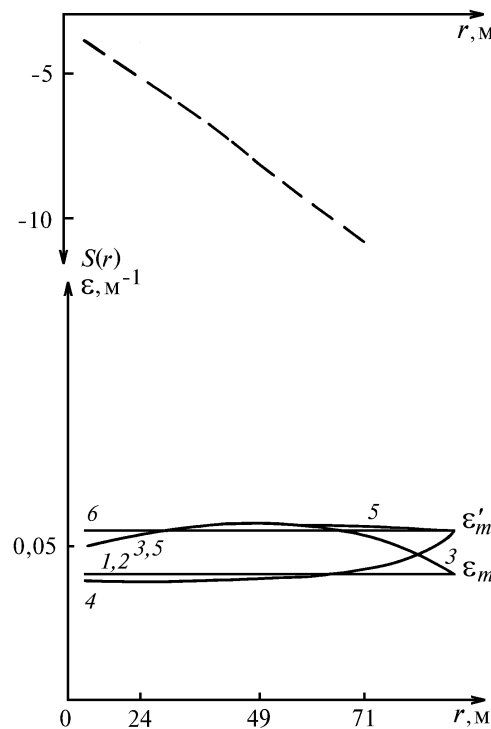


Рис. 1. Сравнительные результаты восстановления профиля $\varepsilon(r)$ для однородной модели среды (см. (9)) с учетом (модифицированный алгоритм) и без учета (известный алгоритм) эффектов малоуглового рассеяния при различном выборе граничных условий. Кривые: 1 – истинный профиль $\varepsilon(r)$; 2, 3 – восстановление при граничных условиях, заданных истинной величиной $\varepsilon_m = \varepsilon(r_m)$; 4, 5 – восстановление при граничных условиях, заданных оценкой $\varepsilon'_m = \hat{\varepsilon}(r_m)$ (согласно (22)); 2, 4 – результаты восстановления с учетом эффектов многократного рассеяния (модифицированный алгоритм (6)); 3, 5 – результаты восстановления без учета этих эффектов (известный алгоритм (3)); 6 – (только для рис. 1) – уровень величины ε_m по оценке (22). $S(r)$ – на рис. 1–5 обозначено пунктирной линией (см. (21))

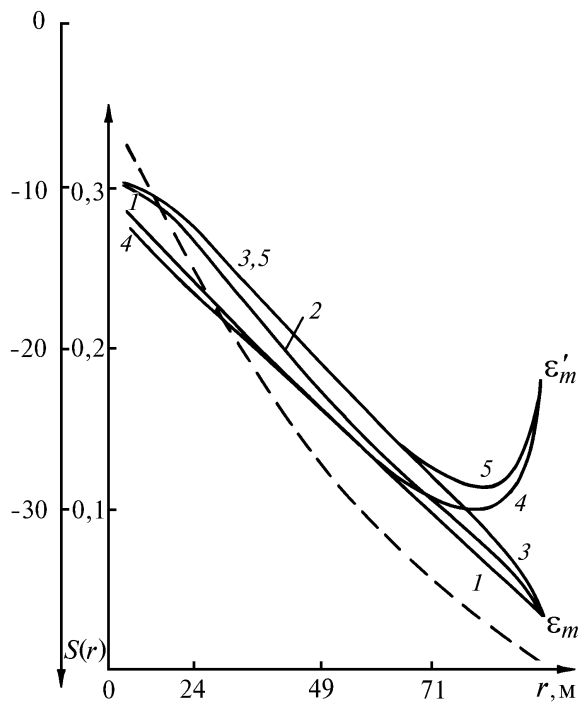


Рис. 2. То же, что и рис. 1, но для линейной модели профиля $\varepsilon(r)$ ($a < 0$, см. (10))

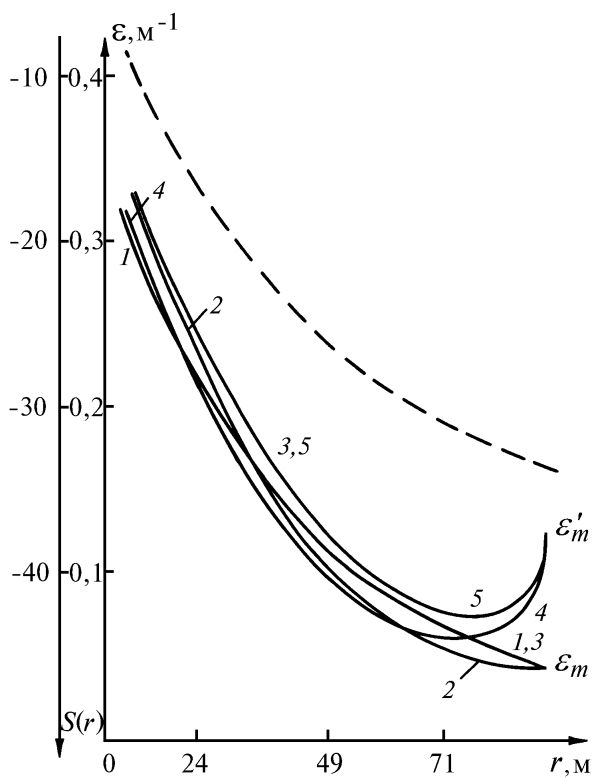


Рис. 3. То же, что и рис. 1, но для экспоненциальной модели ($a < 0$, см. (11, 12))

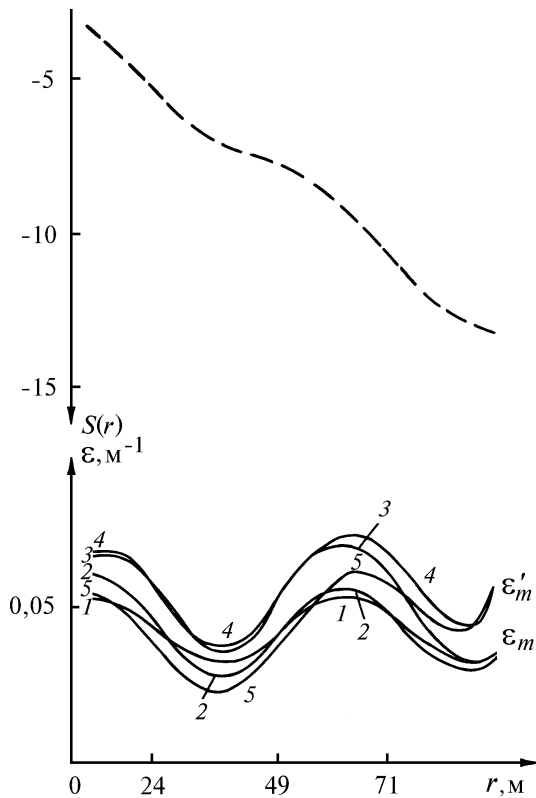


Рис. 4. То же, что и рис. 1, но для гармонической модели ($r_0 = 50$ м, $m = 0,5$, см. (13))

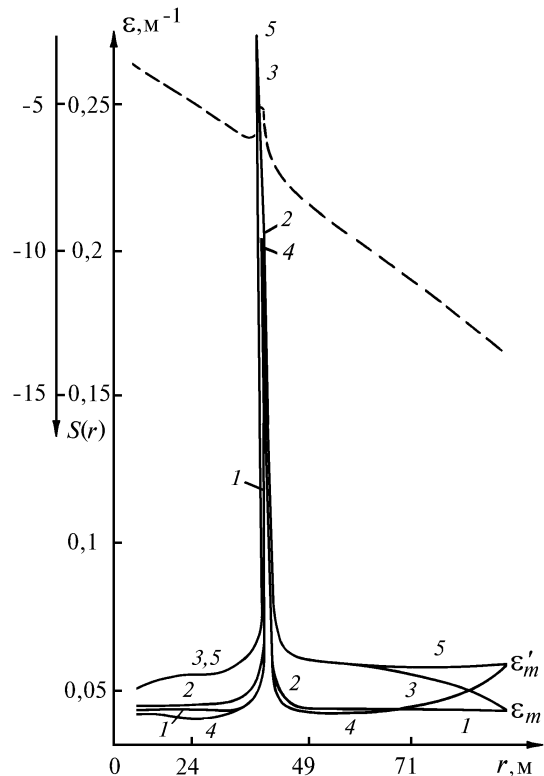


Рис. 5. То же, что и рис. 1, но для модели Лоренца ($\alpha = 5$; $\delta = 7,5$; $r_0 = 40$ м, см. (14))

Из полученных результатов для случая однородной среды (рис. 1) следует, что без учета рассеяния относительная ошибка восстановления профиля (при оценке $\varepsilon = \varepsilon(r_m)$ в максимуме превышает 37% (кривые 1, 3). Тогда как восстановление профиля с помощью модифицированного алгоритма при использовании $\varepsilon'_m = \hat{\varepsilon}(r_m)$ (кривая 4) обеспечивает на 84% протяженности трассы ошибку, не превышающую 12%.

Из рис. 2 – 5 видно, что применение модифицированного алгоритма при априорно неизвестной форме профиля (с использованием функционала (15) для случая однородной среды) и оценке граничных условий $\varepsilon = \varepsilon(r_m)$ обеспечивает малые (до (10÷15)%) ошибки восстановления (кривые 1, 2 на всех рисунках).

Исключение составляет область пиковых значений в модели Лоренца (рис. 5), где ошибка возрастает примерно до 39%. В то же время без учета рассеяния она еще выше, т.е. около 83% (кривая 3).

Как следует из всех представленных рисунков (кривые 4, 5), основные ошибки восстановления профиля определяются выбором граничных условий, в частности $\varepsilon'_m = \hat{\varepsilon}(r_m)$, что изначально присуще данному алгоритму инверсии.

Приведенные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Во-первых, по сравнению с известным алгоритмом инверсии полученное решение вносит существенные поправки за счет эффектов рассеяния. При этом следует иметь в виду сделанные допущения, ограничивающие область его применения.

Во-вторых, особенностью алгоритма Клетта (безотносительно к рассеянию) является сильная зависимость профиля от выбора величины $\hat{\varepsilon}_m$ (граничных условий в конечной точке трассы зондирования). Этот недостаток, очевидно, может быть в какой-то степени преодолен, если учесть тот факт, что изменчивость показателя ослабления морской среды с глубиной снижается и одновременно монотонно падает его величина. Экстраполяция сглаженного профиля в конечную точку трассы поможет приблизить оценку $\hat{\varepsilon}_m$ к истинной величине и тем самым снизить ошибку.

1. Бункин А.Ф., Власов Д.В., Миркамилов Д.М. Физические основы лазерного аэрозондирования поверхности Земли. Ташкент: Фан, 1987. 272 с.
2. Klett J. D. // Appl. Optics. 1981. V. 20. N 2. P. 211–220.
3. Klett J. D. // Appl. Optics. 1985. V. 24. N 11. P. 1638–1643.
4. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
5. Billard B., Abbot R. H., Penny M. F. // Appl. Optics. 1986. V. 25. N 13. P. 2080–2088.
6. Bissonnette Luc. R. // Appl. Optics. 1986. V. 25. N 13. P. 2182–2185.
7. Hughes H. G., Ferguson J. A., Stephens D. H. // Appl. Optics. 1985. V. 24. N 11. P. 1609–1613.
8. К ä estner M. // Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Univ. Munchen. 1987. N 56. P. 148–156.
9. Weinman J. A. // Appl. Optics. 1988. V. 27. N 19. P. 3994–4001.
10. Долин Л.С., Савельев В.А. // Оптика моря. М.: Наука, 1983. С. 123–128.
11. Бартенева О.Д. // Вестник АН СССР. 1960. Т. 1. N 12. С. 852.
12. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана / Под ред. А.С. Мони́на. М.: Наука, 1983. 370 с.
13. Оптика океана. Т. 2. Прикладная оптика океана / Под ред. А.С. Мони́на. М.: Наука, 1983. 235 с.
14. Власов Д.В., Стрельцов В.Н., Слободянин В.П. // Труды ИОФАН. Дистанционное зондирование океана. М.: Наука, 1986. Т. 1. С. 39–59.

Центральное научно-производственное объединение «Комета»,
г. Москва

Поступила в редакцию
8 июня 1994 г.

D. V. Vlasov, E. V. Zubkov, S. I. Shamaev. Lidar Inversion Solution Providing for Multiple-scattering Effects.

The stable form of the inversion algorithm by Klett allows estimation of the extinction profiles. However, multiple-scattering contribution is not taken into account. Based on the Klett algorithm, the modified analytical solution, which includes the effects of a small angle scattering, corresponding, for example, to the typical oceanic waters, has been proposed. Numerical lidar experiment for the assumed models of the extinction profiles was conducted to compare the Klett algorithm with the modified algorithm.