

К ТЕОРИИ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ РАССЕИВАЮЩИХ СРЕД

Рассмотрена задача восстановления пространственного распределения коэффициентов ослабления при зондировании с подвижных и неподвижных объектов по бистатической томографической схеме. Получено аналитическое решение для профилей коэффициентов ослабления, прозрачности, не требующее вычисления логарифмических производных регистрируемых (с погрешностью) сигналов рассеяния. Показано, что погрешность измерения данных оптических характеристик определяется практически только погрешностью измерения регистрируемых сигналов вследствие устойчивости метода к дестабилизирующим факторам, к вкладу многократного рассеяния. Практическая реализация метода позволяет существенно изменить метрологические и эксплуатационные возможности томографической аппаратуры различного назначения.

В настоящее время томографические методы получили широкое распространение во многих областях науки, техники, практики. Касается это и томографического зондирования рассеивающих сред (атмосферы, воды, облачности и т.п.).

Томографический подход, связанный с получением информации об исследуемой среде из локационных сигналов, приходящих с различных направлений, предложен в [1] применительно к схеме наблюдений с помощью самолетного лидара. Используемый конечно-разностный алгоритм обработки локационных сигналов требовал априорного задания граничных значений определяемых характеристик. В дальнейшем были получены в аналитическом виде решения интегральных уравнений самолетного лидарного томографического зондирования атмосферы для двух- и трехлучевых схем [2, 3]. Аналитические решения задачи томографического зондирования получены также для схем, не требующих перемещения измерительной системы, и основаны на использовании углового сканирования двумя и тремя лидарами в некоторой заданной области [4, 5].

В отличие от традиционных схем лазерного зондирования атмосферы, водных сред томографическая методика восстановления пространственного распределения коэффициентов ослабления не требует привлечения дополнительной априорной информации о функциональной взаимосвязи между их оптическими характеристиками либо об их пространственной структуре. Однако центральным моментом предложенных схем томографического зондирования [2–6] является вычисление логарифмических производных сигналов рассеяния. Учитывая дискретный характер реальной экспериментальной информации, а также некорректность задачи численного дифференцирования регистрируемых сигналов, можно считать, что практическая реализация данной методики является неэффективной вследствие того, что малые погрешности измеряемой части могут привести к

большим ошибкам в решении, т.е. в определении коэффициентов ослабления [6]. В настоящей статье представлено аналитическое решение задачи томографического зондирования рассеивающих сред (атмосфера, водная среда) как с подвижных носителей измерительной системы, так и при угловом сканировании с неподвижной установки, не требующее вычисления логарифмических производных регистрируемых сигналов.

Рассмотрим решение поставленной задачи в рамках бистатической схемы лазерной локации на примере томографического зондирования с угловым сканированием. Схема зондирования изображена на рисунке.

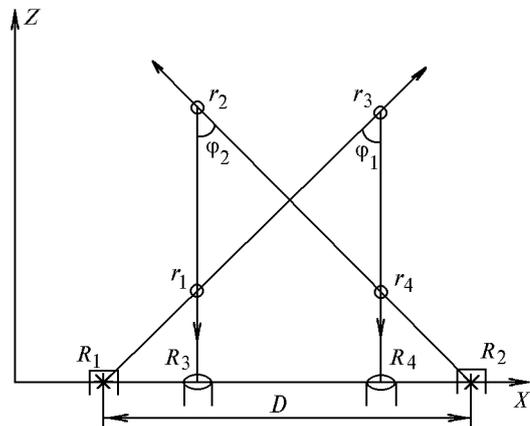


Схема бистатического томографического зондирования

Источники излучения 1 и 2 расположены соответственно в точках R_1 и R_2 , расстояние между которыми D . Посылка излучения осуществляется из точек R_1 и R_2 на пересекающихся направлениях. На линии, соединяющей источники 1 и 2, в точках R_3 и R_4 устанавливаются приемники излучения 3 и 4, оптические оси которых пересекаются в точках r_i , $i = 1, \dots, 4$, с направлениями посылки зондирующих излучений источниками 1 и 2. Локационные сигна-

лы в точках R_3 и R_4 от рассеивающих объемов с координатами r_1, r_3 при посылке зондирующего излучения источником I определяется выражением [7]:

$$S(R_1, r_1, R_3) = A_1 P_{01} \sigma_{\varphi_1}(r_1) T(R_1, r_1) T(R_3, r_1), \quad (1)$$

$$S(R_1, r_3, R_4) = A_2 P_{01} \sigma_{\varphi_1}(r_3) T(R_1, r_3) T(R_4, r_3),$$

где

$$S(R_1, r_1, R_3) = P(R_1, r_1, R_3) |r_1 - R_3|^2;$$

$$S(R_1, r_3, R_4) = P(R_1, r_3, R_4) |r_3 - R_4|^2; |r_1 - R_3|, |r_3 - R_4| -$$

– расстояния от приемников до рассеивающих объемов; A_1, A_2 – аппаратные постоянные приемников излучения 3 и 4; $P(R_1, r_i, R_j), P_{01}$ – соответственно мощности принимаемого приемниками 3 и 4 излучаемого источником I сигналов; $\sigma_{\varphi_1}(r_i)$ – коэффициенты рассеяния под углом φ_1 в точках r_1 и r_3 :

$$T(R_1, r_3) = T(R_1, r_1) T(r_1, r_3),$$

$$T(R_4, r_3) = T(R_4, r_4) T(r_4, r_3),$$

$$T(R_1, r_1) = \exp \left\{ - \int_{R_1}^{r_1} \varepsilon(r) dr \right\},$$

$$T(r_1, r_3) = \exp \left\{ - \int_{r_1}^{r_3} \varepsilon(r) dr \right\},$$

$$T(R_4, r_4) = \exp \left\{ - \int_{R_4}^{r_4} \varepsilon(r) dr \right\},$$

$$T(r_4, r_3) = \exp \left\{ - \int_{r_4}^{r_3} \varepsilon(r) dr \right\};$$

$\varepsilon(r)$ – коэффициент ослабления в точке r .

Аналогичные выражения можно записать для локационных сигналов в точках R_4 и R_3 от рассеивающих объемов с координатами r_4 и r_2 при посылке зондирующего излучения источником 2:

$$S(R_2, r_4, R_4) = A_2 P_{02} \sigma_{\varphi_2}(r_4) T(R_2, r_4) T(R_4, r_4), \quad (2)$$

$$S(R_2, r_2, R_3) = A_1 P_{02} \sigma_{\varphi_2}(r_2) T(R_2, r_2) T(R_3, r_2),$$

где P_{02} – мощность излучения источника 2; $\sigma_{\varphi_2}(r_i)$ – коэффициенты рассеяния под углом φ_2 в точках r_4 и r_2 :

$$T(R_2, r_2) = T(R_2, r_4) T(r_4, r_2),$$

$$T(R_3, r_2) = T(R_3, r_1) T(r_1, r_2),$$

$$T(R_2, r_4) = \exp \left\{ - \int_{R_2}^{r_4} \varepsilon(r) dr \right\},$$

$$T(r_4, r_2) = \exp \left\{ - \int_{r_4}^{r_2} \varepsilon(r) dr \right\},$$

$$T(R_3, r_1) = \exp \left\{ - \int_{R_3}^{r_1} \varepsilon(r) dr \right\},$$

$$T(r_1, r_2) = \exp \left\{ - \int_{r_1}^{r_2} \varepsilon(r) dr \right\}.$$

Совместное решение системы уравнений (1) и (2) приводит к следующему выражению:

$$\frac{S(R_1, r_3, R_4) S(R_2, r_2, R_3)}{S(R_1, r_1, R_3) S(R_2, r_4, R_4)} = \frac{\sigma_{\varphi_1}(r_3) \sigma_{\varphi_2}(r_2)}{\sigma_{\varphi_1}(r_1) \sigma_{\varphi_2}(r_4)} \times T(r_4, r_3) T(r_1, r_2) T(r_1, r_3) T(r_4, r_2). \quad (3)$$

Если рассеивающий объем, включающий точки $r_i, i = 1, \dots, 4$, небольшой, то для него выполняется обычно условие однородности. В этом случае выражение (3) преобразуется к виду

$$\bar{\varepsilon}(r) = - \frac{1}{\alpha} \ln \frac{S(R_1, r_3, R_4) S(R_2, r_2, R_3)}{S(R_1, r_1, R_3) S(R_2, r_4, R_4)}, \quad (4)$$

где $\alpha = |r_2 - r_1| + |r_3 - r_1| + |r_2 - r_4| + |r_3 - r_4|$.

Как видно из (4), выражение для коэффициента ослабления не содержит ни аппаратных констант приемно-излучающих, регистрирующих блоков, ни энергии источников излучения, ни параметров, определяющих ослабление излучения на участках между источником и приемником. А это означает, что предлагаемый метод устойчив к нестабильности оптического и электрического трактов, загрязнениям оптических элементов, изменениям состояния среды между исследуемым объемом и измерительной системой. Кроме того, только что сказанное означает, что данная томографическая схема зондирования не требует калибровочных измерений.

Устойчив предлагаемый алгоритм томографического зондирования и к вкладу многократного рассеяния, поскольку сигналы измеряются от точек, разнесенных на небольшое расстояние. Вклады многократного рассеяния C_i для таких отсчетов (отличающихся на величину $\Delta r \rightarrow 0$) практически одинаковы. Таким образом, алгоритм вида (4) можно записать как

$$\varepsilon(r) = - \frac{1}{\alpha} \ln \frac{C_1 S_1 C_2 S_2}{C_3 S_3 C_4 S_4} = - \frac{1}{\alpha} \ln \frac{S_1 S_2}{S_3 S_4},$$

так как $C_1 \approx C_2 \approx C_3 \approx C_4$. А это и означает устойчивость его к вкладу многократного рассеяния.

Легко получить аналитическое выражение для погрешности предлагаемой томографической схемы зондирования. Применив к (4) метод конечных приращений [8], получаем при равенстве $\delta S_1 = \delta S_2 = \delta S_3 = \delta S_4$

$$\delta\varepsilon = \Delta\varepsilon/\varepsilon = \frac{4}{\varepsilon} \delta S + \delta\alpha. \quad (5)$$

Из (5) следует, что погрешность определения коэффициента ослабления для однородных участков среды (при $\delta\alpha = 0$, т.е. если считать, что $\Delta r = r_j - r_i$ известно точно) определяется только погрешностью измерения рассеянных сигналов. Для неоднородных участков исследуемой среды выражение для погрешности (полученное из (3) методом конечных приращений)

$$\delta\varepsilon = 4(\delta S/\varepsilon + \delta\sigma_\varphi) + \delta\alpha \quad (6)$$

включает составляющие $\delta\sigma_\varphi$, обусловленные разбросом коэффициента рассеяния в точках r_i в пределах исследуемого объема (считалось, что $\delta\sigma_\varphi(r_1) = \delta\sigma_\varphi(r_2) = \delta\sigma_\varphi(r_3) = \delta\sigma_\varphi(r_4)$).

Основным же достоинством предлагаемого варианта томографии рассеивающих сред следует считать исключение в нем необходимости вычисления логарифмических производных сигналов рассеяния. Это обстоятельство делает задачу бистатистического томографического зондирования корректной и исключает необходимость использования регуляризирующих алгоритмов и аппарата метода сплайнов. Для исследований с использованием данного метода, по существу, снимается задача разработки вычислительных алгоритмов решения обратных задач с учетом дискретного характера реальной измерительной информации, необходимая лидарному томографическому зондированию по сигналам обратного рассеяния.

При изменении направлений посылки зондирующего излучения в точках R_1 и R_2 выделяется другой рассеивающий объем (r'_1, r'_2, r'_3, r'_4). Изменение отслеживаемой точки достигается и сканированием оптических осей приемных устройств в точках R_3 и R_4 .

Бистатистическое томографическое зондирование по предлагаемой схеме можно проводить и с подвижных носителей. Однако, учитывая ограниченность параметра D для известных носителей (самолетов, вертолетов и т.п.), необходимо создавать уз-

кие диаграммы расходимости зондирующего и приема рассеянного излучений. Наиболее подходящим объектом исследования по варианту с перемещаемым носителем является водная среда. Учитывая высокую плотность воды, параметр D для нее может составлять от десятков сантиметров до метра и легко реализовываться на любом перемещаемом по воде и неподвижном объекте. По существу, с созданием бистатистического томографического дистанционного измерителя прозрачности отпадает необходимость в использовании буксируемых прозрачномеров.

Таким образом, в статье рассмотрено аналитическое решение задачи бистатистического томографического зондирования как при неподвижных, так при перемещаемых приемно-излучающих устройствах. В отличие от традиционных локационных схем томографии рассеивающих сред в ней не требуется вычисление логарифмических производных регистрируемых с погрешностью сигналов рассеяния. Погрешность определения коэффициентов и прозрачности ослабления данным методом определяется практически только погрешностью измерения регистрируемых сигналов. Это достигается благодаря устойчивости метода к дестабилизирующим факторам как в приемно-излучающих, регистрирующих блоках, так и в окружающей среде, а также устойчивости к вкладам многократного рассеяния. Практическая реализация метода позволит существенно изменить метрологические и эксплуатационные возможности томографической аппаратуры различного назначения.

1. Weinman J.A. // Appl. Opt. 1984. V. 23. N 21. P. 3882.
2. Кугейко М.М. А. с. СССР N 1798664. Б.И. N 8. 1993.
3. Веретенников В.В. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 6. С. 638–652.
4. Веретенников В.В. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. N 7. С. 675–680.
5. Сергеев Н.М., Кугейко М.М., Ашкинадзе Д.А. А.с. СССР N 38, 1982.
6. Воскобойников Ю.Е., Преображенский Н.Г., Седельников А.И. Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике. Новосибирск: Наука, 1984. 240 с.
7. Балин Ю.С., Самохвалов И.В., Матвиенко Г.Г. и др. // Вопросы дистанционного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1975. С. 23–29.
8. Щиголов Б.М. Математическая обработка наблюдений. М.: Наука, 1969. 344 с.

Белорусский государственный университет,
г. Минск

Поступила в редакцию
19 декабря 1997 г.

M.M. Kugeiko, D.M. Onoshko. To the Theory of Tomographic Sensing of Scattering Media.

The problem of the recovery of spatial distribution of the attenuation coefficients at the sensing from moving and stationary objects using bistatistical tomographic scheme has been discussed. Analytical solution for the attenuation coefficient profiles and transparency has been found, this solution doesn't need computation of the logarithmic derivatives of the scattering signals registered with some error. It is shown that the error of the measurement data of optical signals is determined practically only by the error of the signals recording because of the insensitivity of the method to the disturbing factors and to the contribution of the multiple scattering. Practical realization of this method will allow one to change substantially the metrological and operation possibilities of tomographic apparatus of different purposes.