

В.К. Ошлаков

Модель составного сигнала в интерпретации поляризационных атмосферно-оптических наблюдений

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 20.12.1999 г.

Рассматривается применение модели составного сигнала в задачах интерпретации поляризационных атмосферно-оптических наблюдений. Исходя из условия облучения контролируемого объема излучением от двух некогерентных источников неполяризованного излучения, одно из которых считается фоновым, выведены формулы определения угла и плоскости линейной поляризации излучения от одного из источников с использованием результатов наблюдений фонового и смеси излучений.

Во многих прикладных задачах зондирования атмосферы, основанных на использовании явления поляризации, применяются параметры, называемые степенью линейной поляризации и углом поляризации. Как известно, поддающиеся измерению интенсивности естественного (наблюдаемого) света связаны с суперпозицией множества простых волн, сменяющих друг друга в очень быстрой последовательности и имеющих взаимно независимые фазы [3,5]. Естественным, неполяризованным светом называются световые волны, у которых направления колебаний электрического и магнитного векторов хаотически меняются так, что равновероятны все направления колебаний в плоскостях, перпендикулярных к лучу. При рассеянии естественного света происходит его частичная поляризация.

Рассеянное в атмосфере солнечное излучение формирует фоновые поля яркости и степени поляризации. Распределения яркости и степени поляризации солнечного излучения по небосводу подчиняются известным закономерностям. При мониторинге оптического состояния атмосферы возможны ситуации, когда в дневное время поле рассеянного излучения формируется не только основным источником – Солнцем, но и случайными источниками оптического излучения – вспышкой, взрывом, пожаром и т.п. Возможно расположение дополнительных источников как на поверхности Земли, так и в атмосфере, как в поле обзора системы наблюдателя, так и за горизонтом. По времени действия дополнительные источники могут быть кратковременно или постоянно действующими.

Рассмотрим задачу, в условиях которой контролируемый объем облучается излучением от двух источников неполяризованного монохроматического излучения, разнесенных в плоскости источников на заданный угол. Требуется сделать выводы о степени поляризации и об угле поляризации излучения от каждого из источников на основе анализа последовательности результатов поляризационных наблюдений.

Упрощая условия, допустим, что источники излучения и наблюдатель находятся в одной плоскости. Учтем, что большинство наблюдаемых ситуаций может быть сведено к двум вариантам условий эксперимента. Первый – когда объем облучается попеременно излучением от двух источников, и второй – когда один из источников действует непрерывно, а время включения и длительность дей-

ствия второго источника – события случайные. Определим два класса отсчетов в наблюдаемой последовательности: «сигнал» – излучение от одного из источников и «фон» – излучение от второго источника. Таким образом, в наблюдаемой последовательности присутствуют сигналы обоих классов, но в первом варианте возможно разделение на классы «фон» и «сигнал», во втором варианте – на классы «фон» и «сигнал + фон».

Для интерпретации последовательности результатов наблюдения суммарного излучения $I_n(t)$ воспользуемся моделью составного сигнала, суть которой заключается в представлении комбинируемых сигнальных процессов (в данном случае $I_c(t)$ и $I_\phi(t)$) с помощью единичной переключающей функции $q(t)$ [2]. Если переключающая функция имеет случайный характер, то распределение точек «включения» $q(t)$ на временной оси может быть описано, например, распределением Пуассона и в каждой точке включения функция $q(t)$ принимает значение 1 с некоторой вероятностью $m = P[q(t) = 1]$ [2].

Для первого варианта условий задачи наблюдаемую последовательность можно представить в виде

$$I_n(t) = q(t) I_c(t) + [1 - q(t)] I_\phi(t) = I_\phi + q(t)(I_c - I_\phi), \quad (1)$$

где контролируемый объем облучается или излучением от источника класса «сигнал» ($q(t) = 1$), или излучением от источника класса «фон» ($q(t) = 0$); для второго варианта условий задачи – в виде

$$I_n(t) = I_\phi + q(t) I_c(t). \quad (1a)$$

Здесь к излучению постоянно действующего источника класса «фон» с некоторой вероятностью примешивается излучение источника класса «сигнал».

Полагая комбинируемые процессы стационарными и статистически независимыми, проведем усреднение по интервалу значений параметра t . Так как дальнейшие рассуждения будут проведены для усредненных по параметру t величин, то знаки усреднения опустим, используя для обозначения средних значений прописные буквы. Среднее значение переключающей функции равно m – вероятности того, что функция $q(t)$ принимает значение 1. Усреднен-

ную по параметру t последовательность отсчетов для первого варианта представим в виде

$$I_n = m I_c + [1 - m] I_\phi = I_\phi + m(I_c - I_\phi), \quad (2)$$

для второго – в виде

$$I_n = I_\phi + m I_c. \quad (2a)$$

На практике в атмосферно-оптических наблюдениях степень поляризации для различных углов рассеяния определяется методом В.Г. Фесенкова, заключающимся в измерении интенсивностей рассеянного света при нескольких положениях поляроида, например трех, отличающихся один от другого на 60° [1, 4]. Следуя [4], определим, что при втором положении направление наибольшего пропускания поляроида перпендикулярно плоскости рассеяния (в задачах рассеяния в качестве опорной плоскости для падающего и рассеянного лучей выбирают плоскость, содержащую оба этих луча). Интенсивность рассеянного в любом заданном направлении света, прошедшего поляридом, описывается с помощью параметров Стокса. Измерения, выполненные при трех положениях поляроида, дают три значения интенсивности: $I_{1н}$, $I_{2н}$, $I_{3н}$, по которым можно определить три параметра Стокса – S_1 , S_2 , S_3 :

$$\begin{aligned} S_1 &= 2(I_{1н} + I_{2н} + I_{3н})/3; \\ S_2 &= -2[2I_{2н} - (I_{1н} + I_{3н})]/3; \\ S_3 &= -2(I_{3н} - I_{1н})/\sqrt{3}, \end{aligned} \quad (3)$$

а с их помощью – степень линейной поляризации света P_n и значение угла поляризации γ_n – угла между плоскостью поляризации рассеянного света и плоскостью рассеяния:

$$P_n = \frac{\sqrt{S_2^2 + S_3^2}}{S_1}; \quad \text{tg} 2\gamma_n = \frac{S_3}{S_2}. \quad (4)$$

Учитывая (2), (2a) и свойства аддитивности вектор-параметров Стокса для некогерентных световых пучков, запишем в первом варианте

$$S_{in} = m S_{ic} + (1 - m) S_{i\phi} = S_{i\phi} + m(S_{ic} - S_{i\phi}), \quad (5)$$

а во втором варианте

$$S_{in} = S_{i\phi} + m S_{ic}, \quad (5a)$$

где $i = 1, 2, 3$ – номера параметра Стокса; $m = (0 \dots 1)$ – вероятностный коэффициент. Тогда значение угла поляризации для первого варианта («фон» – «сигнал») определяется из соотношения

$$\text{tg} 2\gamma_n = \frac{m S_{3c} + (1 - m) S_{3\phi}}{m S_{2c} + (1 - m) S_{2\phi}}, \quad (6)$$

для второго варианта («фон» – «сигнал + фон») – из соотношения

$$\text{tg} 2\gamma_n = \frac{m S_{3c} + S_{3\phi}}{m S_{2c} + S_{2\phi}}. \quad (6a)$$

Значение степени поляризации для первого варианта определяется из соотношения

$$P_n = \left\{ m^2[(S_{2c} - S_{2\phi})^2 + (S_{3c} - S_{3\phi})^2] + 2m[S_{2\phi}(S_{2c} - S_{2\phi}) + S_{3\phi}(S_{3c} - S_{3\phi})] + S_{2\phi}^2 + S_{3\phi}^2 \right\}^{1/2} / [m(S_{1c} - S_{1\phi}) + S_{1\phi}] \quad (7)$$

и для второго варианта – из соотношения

$$P_n = \frac{\sqrt{m^2(S_{2c}^2 + S_{3c}^2) + 2m(S_{2c}S_{2\phi} + S_{3c}S_{3\phi}) + S_{2\phi}^2 + S_{3\phi}^2}}{m S_{1c} + S_{1\phi}}. \quad (7a)$$

Следует обратить внимание на то, что для обоих вариантов условий задачи подкоренные выражения в функциональной зависимости степени поляризации от вероятностного коэффициента (рис. 1) представляют собой полиномы второй степени относительно m (параболы в системе координат $\{P, m\}$).

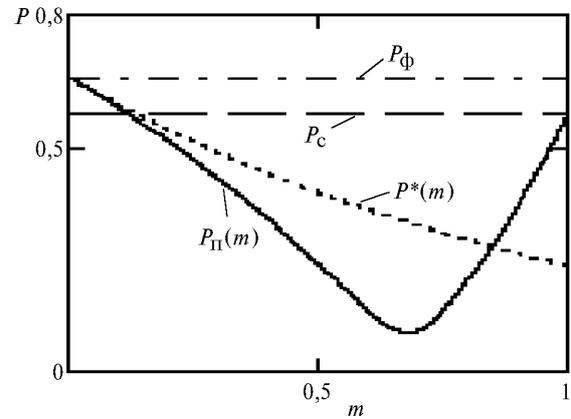


Рис. 1. Зависимость степени поляризации от вероятности наличия в реализации отсчетов класса «сигнал»: P_n – в смеси «сигнал» – «фон»; P^* – в смеси «фон» – «сигнал + фон»; P_ϕ – в классе «фон»; P_c – в классе «сигнал»; m – вероятность

Преобразуя (6) и (6a), получим два варианта выражения угла поляризации в классе «сигнал». Первый вариант при обработке смеси «фон» – «сигнал»:

$$\text{tg} 2\gamma_c = \frac{\text{tg} 2\gamma_n [m + (1 - m)(S_{2\phi} / S_{2c})] - (1 - m)(S_{3\phi} / S_{2c})}{m}, \quad (8)$$

и второй вариант – при обработке смеси «фон» – «сигнал + фон»:

$$\text{tg} 2\gamma_c = \frac{\text{tg} 2\gamma_n [m + (S_{2\phi} / S_{2c})]}{m}. \quad (8a)$$

Здесь $0 < m \leq 1$.

Используя соотношения (3), несложно получить выражения для величин угла и степени поляризации через «индексированные» значения интенсивности света, рассеянного от контролируемого объема и прошедшего поляридом при различных его положениях. Эти выражения здесь не приводятся ввиду их некоторой громоздкости, с одной стороны, и очевидности – с другой. На рис. 1 и 2 для двух вариантов условий эксперимента приведены примеры расчета зависимости степени поляризации и угла поляризации от вероятности наличия в наблюдаемой последовательности отсчетов из класса «сигнал». Очевидно, что при обра-

ботке наблюдаемых последовательностей выводы о степени и угле поляризации в каждом классе сигналов нельзя сделать без предварительной классификации смеси сигналов.

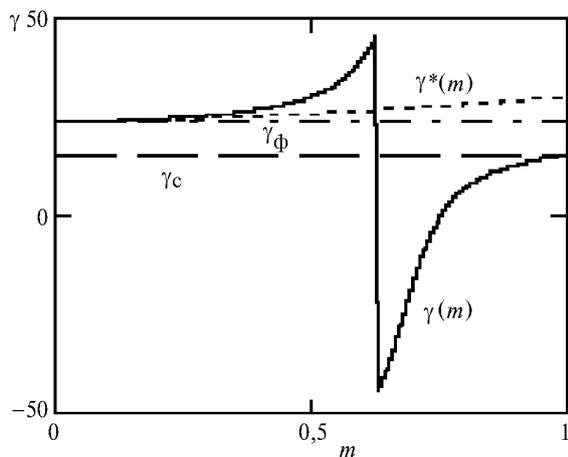


Рис. 2. Зависимость угла поляризации (град) от вероятности наличия в реализации отсчетов класса «сигнал»: γ – в смеси «сигнал» – «фон»; γ^* – в смеси «фон» – «сигнал + фон»; γ_c – в классе «сигнал»; γ_ϕ – в классе «фон»; m – вероятность

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

Если при поляризационных наблюдениях результатов рассеяния излучения от двух источников (классы «сигнал» и «фон») имеется априорная информация об излучении в одном из классов («фон»), то с помощью модели составного сигнала может быть построен алгоритм вычисления степени поляризации и угла между плоскостью рассеяния и плоскостью поляризации в каждом классе сигналов.

V.K. Oshlakov. Model of a compound signal for interpretation of polarization atmospheric-optical observations.

An application of a compound signal model to problems of interpretation of polarization atmospheric optical observations is considered. Formulae for determination of the scattering angle and the plane of linear polarization of radiation from one of the sources are derived based on the results of observation of background and mixed radiation under the conditions of irradiating a controllable volume by the radiation from two incoherent sources of unpolarized radiation, one of which is treated as background.

Алгоритм классификации сигналов может быть построен на условии отличия значения наблюдаемой поляризации от фоновой. Это условие выполняется, если:

- средние значения интенсивностей излучения в каждом классе и вероятность наблюдения смеси сигналов отличны от нуля,
- угловые координаты источников определены и не меняются в течение наблюдения.

Сравнение в течение некоторого промежутка времени (t_1, t_2) величин наблюдаемой поляризации P_H и вычисление отношения числа отличий от фоновых значений к общему числу наблюдений дадут оценку вероятности наличия в серии отсчетов добавочного излучения («сигнал») к фоновому.

Предварительный анализ результатов поляризационных наблюдений показал, что условие отличия наблюдаемой поляризации от фоновой надежно выполняется при наблюдении результатов рассеяния излучения от двух источников в направлении, в котором достигается максимальное значение степени поляризации в одном из классов сигналов (для молекулярного рассеяния угол максимальной поляризации равен $\pi/2$).

Таким образом, использование модели составного сигнала в интерпретации результатов поляризационных наблюдений смеси излучений дает возможность доопределения неизвестных параметров – вероятности наблюдения сигналов от разных источников, а также степени и угла линейной поляризации в каждом классе сигналов.

1. Фесенков В.Г. // Докл. АН СССР. 1934. Т. 3. № 6. С. 447–449.
2. Френкс Л. Теория сигналов. М.: Сов. радио, 1974. 344 с.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. 928 с.
4. Торопова Т.П., Тен А.П. и др. Оптические свойства приземного слоя атмосферы // Ослабление света в земной атмосфере. Алма-Ата: Наука, 1976. С. 33.
5. Ку-Нан Лиоу. Основы радиационных процессов в атмосфере. Л.: Гидрометиздат, 1984. 376 с.