

В.В. Марьенко, С.Н. Савенков

АКТИВНАЯ СТОКС-ПОЛЯРИМЕТРИЯ В УСЛОВИЯХ ЧАСТИЧНО ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ФОНОВОЙ ЗАСВЕТКИ

Обсуждается оригинальная методика, позволяющая исключить вклад частично поляризованной фоновой компоненты входного оптического поля в величины элементов вектора Стокса, при исследовании поляризационных свойств различного рода природных объектов. В основе метода лежит осуществление наряду с модуляцией поляризации в регистрирующем канале, модуляции интенсивности оптического поля в зондирующем канале поляриметра. Данная методика может быть реализована в любой оптической схеме модуляционного поляриметра. Показано, что при этом не требуется знание конкретной абсолютной величины и значения начальной фазы частоты модуляции амплитуды.

При проведении поляризационных измерений в естественных условиях всегда наблюдается ситуация, при которой на входе приемной части поляриметра, наряду с информационной компонентой, действует также фоновая компонента исследуемого оптического поля. Последняя приводит к значительному искажению информации о поляризационной структуре принимаемого оптического поля. Если в лабораторных условиях удастся свести величину фоновой компоненты к нулю, то в естественных условиях сделать это практически невозможно. Использование интерференционных фильтров не решает полностью проблемы. В настоящей статье речь идет об активной Стокс-поляриметрии в том смысле, что поляризационная структура исследуемого оптического поля на входе поляриметра представляет собой результат преобразования определенным образом сформированной поляризации зондирующего поля при его взаимодействии с объектом.

Так как, очевидно, информационная и фоновая компоненты входного оптического поля некогерентны, суммарное световое воздействие на входе Стокс-поляриметра опишется вектором Стокса вида $S^{ком} = [S_0 + S_0^\Phi, S_1 + S_1^\Phi, S_2 + S_2^\Phi, S_3 + S_3^\Phi]$, где $[S_0, S_1, S_2, S_3]$ и $[S_0^\Phi, S_1^\Phi, S_2^\Phi, S_3^\Phi]$ – векторы Стокса соответственно информационной и фоновой компонент. Положим, что приемный канал Стокс-поляриметра содержит вращающуюся фазовую пластинку, неподвижный, горизонтально ориентированный анализатор и следующий за ним фотодетектор. Такая оптическая схема позволяет получить на фотодетекторе сигнал с наиболее простым спектром, содержащим четыре частотные компоненты, интенсивности которых пропорциональны соответствующим элементам вектора Стокса входного поля. Вектор Стокса оптического поля на входе фотодетектора может быть найден из матричного уравнения [1]:

$$S^{фл} = [M_2] * [M_1] * S^{ком}, \quad (1)$$

где M_1, M_2 – матрицы Мюллера соответственно вращающейся фазовой пластинки и анализатора.

В результате сигнал фотодетектора, который представляет собой первый элемент вектора Стокса $S_0^{фл}$, будет иметь вид

$$S_0^{фл} = \frac{1}{2} (S_0 + S_0^\Phi) + \frac{1}{4} (S_1 + S_1^\Phi) (1 + \cos(\delta)) + \frac{1}{4} (S_1 + S_1^\Phi) (1 - \cos(\delta)) \cos(4\Omega_2 t) + \\ + \frac{1}{4} (S_2 + S_2^\Phi) (1 - \cos(\delta)) \sin(4\Omega_2 t) - \frac{1}{2} (S_3 + S_3^\Phi) \sin(\delta) \sin(2\Omega_2 t), \quad (2)$$

где δ – сдвиг фаз, вносимый вращающейся фазовой пластинкой; Ω_2 – частота модуляции поляризации.

Далее, вычислив посредством дискретного преобразования Фурье интенсивности спектральных компонент сигнала (2), получаем явный вид элементов вектора Стокса информационной компоненты входного поля

$$\begin{aligned}
 S_0 &= 2 \left[I_0 - \frac{1}{4} (S_1 + S_1^\Phi) (1 + \cos(\delta)) \right] - S_0^\Phi; \\
 S_1 &= [4 I_{4c} / (1 - \cos(\delta))] - S_1^\Phi; \\
 S_2 &= [4 I_{4s} / (1 - \cos(\delta))] - S_2^\Phi; \\
 S_3 &= [2 I_{2s} / \sin(\delta)] - S_3^\Phi,
 \end{aligned} \tag{3}$$

$I_{4c}, I_{4s}, I_{2s}, I_0$ – интенсивности соответствующих спектральных компонент сигнала (2).

Из (3) следует, что, для того чтобы вычислить элементы вектора Стокса информационного поля, необходимо исключить из системы (3) величины $S_0^\Phi, S_1^\Phi, S_2^\Phi, S_3^\Phi$. Последнее осуществляется возможным за счет осуществления дополнительной модуляции интенсивности зондирующего поля. Действительно, полагая, что модуляция интенсивности осуществляется по синусоидальному закону и воспользовавшись матричным уравнением (1), для сигнала, выделяемого на фотодетекторе, получим

$$\begin{aligned}
 S_{0\text{мод}}^\Phi &= \frac{1}{2} \left[S_0^\Phi + \frac{1}{2} S_1 (1 + \cos(\delta)) + \frac{1}{2} S_1^\Phi (1 - \cos(\delta)) \cos(4\Omega_2 t) + \frac{1}{2} S_2^\Phi (1 - \cos(\delta)) \sin(4\Omega_2 t) - \right. \\
 & S_3^\Phi \sin(\delta) \sin(2\Omega_2 t) \left. \right] + \frac{1}{2} \left[S_0 + \frac{1}{2} S_1 (1 + \cos(\delta)) + \frac{1}{2} S_1 (1 - \cos(\delta)) \cos(4\Omega_2 t) + \right. \\
 & \left. + \frac{1}{2} S_2 (1 - \cos(\delta)) \sin(4\Omega_2 t) - S_3 \sin(\delta) \sin(4\Omega_2 t) \right] [1 + \sin(\Omega_1 t)],
 \end{aligned} \tag{4}$$

где Ω_1 – частота модуляции интенсивности зондирующего оптического поля.

При $\Omega_1 \gg 4\Omega_2$ частотный спектр сигнала фотодетектора разделяется на две области: низкочастотная – обусловленная модуляцией поляризации, и высокочастотная – обусловленная модуляцией интенсивности. В этом случае частично поляризационная фоновая компонента входного поля не дает вклада в высокочастотную область сигнала фотодетектора. Для аппаратного разделения частотных областей необходимо чтобы $4\Omega_2$ и $(\Omega_1 - 4\Omega_2)$ были разнесены не менее чем на порядок.

Известно [2], что посредством многозвенной пассивной фильтрации, в принципе, может быть достигнута крутизна спада амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фильтра до 80 дБ на октаву при подавлении вне полосы пропускания 80–90 дБ. Тогда при равенстве величин информационной и фоновой компонент на входе поляриметра <фоновый вклад> в относительную погрешность измерений величин элементов вектора Стокса информационного поля не превысит 0,01%.

Вычисляя значения интенсивностей спектральных компонент высокочастотной области спектра сигнала (4), получим

$$\begin{aligned}
 S_0 &= I_0 - [4 I_1 (1 + \cos(\delta)) / (1 - \cos(\delta))]; \\
 S_1 &= 8 I_1 / (1 - \cos(\delta)); \\
 S_2 &= 8 I_2 / (1 - \cos(\delta)); \\
 S_3 &= -4 I_3 / \sin(\delta),
 \end{aligned} \tag{5}$$

где I_0 – интенсивность компоненты спектра сигнала (4) на частоте Ω_1 ; I_1, I_2, I_3 – интенсивности компонент на частотах соответственно $\sin(\Omega_1 - 4\Omega_2)$, $\cos(\Omega_1 - 4\Omega_2)$, $\cos(\Omega_1 - 4\Omega_2)$. Могут быть также использованы суммарные комбинационные частоты сигнала (4).

Здесь принципиально важным обстоятельством является то, что для измерения величин элементов векторов Стокса, кроме информации об абсолютной величине частоты модуляции поляризации и ее начальной фазе, необходима информация об абсолютной величине и начальной фазе частоты модуляции интенсивности и информация о величине разности фаз этих частот. На практике это означает, что необходима аппаратная синхронизация процесса измерений с частотой модуляции интенсивности и этих частот между собой. Обойти это возможно, если осуществлять Фурье обработку не самой высокочастотной области сигнала (4), а ее квадрата:

$$\begin{aligned}
(S_{0\text{вн}(4)}^{\text{фл}})^2 = & \frac{1}{2} \left[S_0^2 + \frac{1}{2} S_1^2 (1 + \cos(\delta))^2 + \frac{1}{2} S_1^2 (1 - \cos(\delta))^2 \cos^2(4\Omega_2 t) + \frac{1}{2} S_2^2 (1 - \cos(\delta))^2 \sin^2(4\Omega_2 t) + \right. \\
& + S_3^2 \sin^2(\delta) \sin^2(2\Omega_2 t) + S_0 S_1 (1 + \cos(\delta)) + S_0 S_1 (1 - \cos(\delta)) \cos(4\Omega_2 t) + S_0 S_2 (1 - \cos(\delta)) \sin(4\Omega_2 t) - \\
& - 2 S_0 S_3 \sin(\delta) \sin(2\Omega_2 t) + \frac{1}{2} S_1^2 (1 - \cos(\delta)) \cos(4\Omega_2 t) + \frac{1}{2} S_1 S_2 (1 - \cos^2(\delta)) \sin(4\Omega_2 t) - \\
& - S_1 S_3 (1 + \cos^2(\delta)) \sin(\delta) \sin(2\Omega_2 t) + \frac{1}{2} S_1 S_2 (1 - \cos(\delta))^2 \cos(4\Omega_2 t) \sin(4\Omega_2 t) - \\
& - S_1 S_3 (1 - \cos(\delta)) \cos(4\Omega_2 t) \sin(2\Omega_2 t) \sin(\delta) - \\
& \left. - S_2 S_3 (1 - \cos(\delta)) \sin(4\Omega_2 t) \sin(2\Omega_2 t) \sin(\delta) \right] \sin^2(\Omega_1 t). \quad (6)
\end{aligned}$$

Анализ (6) показывает, что значения S_0, S_1, S_2, S_3 могут быть найдены из выражений для интенсивности нулевой, второй и четвертой гармоник частоты модуляции поляризации, т.е. из системы

$$\begin{aligned}
I_0 = & S_0^2 + \frac{1}{4} S_1^2 (1 + \cos(\delta))^2 + \frac{1}{8} S_1^2 (1 - \cos(\delta))^2 + \frac{1}{8} S_2^2 (1 - \cos(\delta))^2 + \frac{1}{2} S_3^2 \sin^2(\delta) + S_0 S_1 (1 - \cos(\delta)); \\
I_{4s} = & S_0 S_2 (1 - \cos(\delta)) + \frac{1}{2} S_1 S_2 (1 - \cos^2(\delta)); \\
I_{2s} = & -2 S_0 S_3 \sin(\delta) - S_1 S_3 (1 + \cos(\delta)) \sin(\delta) - \frac{1}{2} S_1 S_3 (1 - \cos(\delta)) \sin(\delta); \\
I_{4c} = & -\frac{1}{2} S_3^2 \sin(\delta) + S_0 S_1 (1 - \cos(\delta)) + \frac{1}{2} S_1^2 (1 - \cos^2(\delta))^2. \quad (7)
\end{aligned}$$

Можно показать также, что якобиан системы (7) в общем случае отличен от нуля.

Таким образом, осуществление дополнительной модуляции интенсивности зондирующего поля позволяет исключить влияние частично поляризованной фоновой компоненты на результаты измерения векторов Стокса информационного поля. При этом не требуется информация об абсолютном значении и начальной фазе частоты модуляции интенсивности. Более того, анализ показывает, что эта частота может произвольным образом изменяться во времени, но изменения эти должны быть медленнее, чем четвертая частота модуляции поляризации. Это делает возможным использование для модуляции интенсивности электромеханических модуляторов.

Рассмотрим реализацию методики двойной модуляции в описанном поляриметре при использовании для модуляции интенсивности механического прерывателя. Прерыватель формирует зондирующее поле в виде последовательности близких к прямоугольным импульсов, то есть имеет место импульсная модуляция интенсивности. Тогда, используя представление импульсной последовательности в виде ряда Фурье, сигнал фотодетектора (1) и учитывая (2), найдем

$$S_{0\text{им}}^{\text{фл}} = S_{0(2)}^{\text{фл}} \left[1 + \frac{2}{\pi} \sum \frac{1}{(2k+1)} \sin((2k+1)\Omega_1) \right]. \quad (8)$$

Сигнал (8) по структуре частотного спектра аналогичен сигналу (4), и если пренебречь всеми членами ряда Фурье, кроме первого, то получим ситуацию, полностью совпадающую с рассмотренной выше, при синусоидальной модуляции интенсивности посредством, скажем, электрооптического модулятора. Имея информацию о величине частоты и ее начальной фазе Ω_1 , а также о начальной фазе разности частот $\Omega_1 - \Omega_2$, для вычисления элементов вектора Стокса информационной компоненты можно непосредственно воспользоваться выражениями (5). Вместе с тем, осуществив Фурье-обработку квадрата высокочастотной области спектра сигнала (8) аналогично тому, как это было сделано в выражении (6), чтобы исключить необходимость дополнительной синхронизации с частотой Ω_1 , легко убедиться, что значения элементов вектора Стокса информационного поля могут быть найдены из системы (7). Изменится лишь общий числовой коэффициент справа. Значение коэффициента равно сумме числового ряда, появляющегося при возведении в квадрат Фурье-представления последовательности импульсов [вторая скобка выражения (8)]. Таким образом, задача измерения элементов вектора Стокса при наличии частично поляризованной фоновой компоненты оптического поля на входе поляриметра с успехом решается с помощью импульсной модуляции интенсивности зондирующего поля.

Представленная здесь методика (при синусоидальной модуляции интенсивности посредством электрооптического модулятора на основе кристалла ниобата лития) была реализована авторами в Стокс-поляриметре, работающем на двух длинах волн $\lambda = 0,63$ и $1,15$ мкм. В качестве источника излучения использовался лазер ЛГ-126, анализатор-призма Глана. Переход в дальнюю ИК-область потребует замены поляризационных элементов и фотодетектора. Методика с использованием механического прерывателя была реализована в Стокс-поляриметре, работающем в диапазоне $10,6$ мкм. С помощью этого прибора проводились измерения поляризационных характеристик различного рода дымов в реальных условиях в дневное время. Данный эксперимент показал, что проведение поляризационных измерений в этом диапазоне оптических частот с сохранением постоянной составляющей сигнала фотодетектора проблематично. Это связано с наличием фоновой компоненты, а также с тем что, как известно, в указанном диапазоне для регистрации излучения применяются фоторезисторы, охлаждаемые азотом. С течением времени из-за неравномерности охлаждения у них значительно, произвольным образом, меняется сопротивление, что также приводит к нерегулярным изменениям постоянной составляющей регистрируемого сигнала. Из-за существенного разброса параметров фоторезисторов построить компенсационную или следящую схему регистрации постоянной составляющей не представляется возможным. При этом погрешность измерений элементов вектора Стокса, при десятикратном усреднении, составляет в лучшем случае $15-20\%$. Двойная модуляция обеспечила снижение погрешности для единичного измерения до $2-3\%$. Численное моделирование работы Стокс-поляриметра с двойной модуляцией поля позволило выяснить, что погрешность измерений в данном случае связана не с нестабильностью импульсной модуляции интенсивности оптического поля, а с нестабильностью начальной фазы вращения фазовой пластинки (применялась механически вращающаяся кристаллическая CdS пластинка) в приемном канале поляриметра.

1. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. 584 с.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Мир, 1984. 600 с.

Киевский университет
им. Тараса Шевченко

Поступила в редакцию
29 июля 1993 г.

V. V. Mar'jenko, S. N. Savenkov. Active Stokes-Polarimetry under the Presence of Partially Polarized Background Noise.

In this paper we discuss an original technique for eliminating the influence of a partially polarized background component of an input optical field on the measurements of the Stokes vector when studying polarization properties of different natural objects. This technique is based not only on the polarization modulation of light in a recording channel but also on modulation of intensity of a light field in the sounding channel of a polarimeter. This technique can be performed using any modulation polarimeter. It is shown in the paper that no information about the absolute values of the initial phase and frequency of the amplitude modulation is needed to perform this technique.