

В.В. Марьенко, Б.Н. Колисниченко, С.Н. Савенков

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ОПТИЧЕСКОГО ПОЛЯ, РАССЕЯННОГО ПРИРОДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Проведен анализ требований, предъявляемых к измерительным оптическим системам при проведении исследований поляризационной структуры оптического излучения, рассеянного различного рода объектами с флуктуирующими параметрами. Обсуждается возможность решения возникающих при этом трудностей посредством использования в зондирующем канале описанного в статье поляриметра электрически управляемой фазовой пластинки на основе электрооптического кристалла ниобата лития. Это позволяет сделать процесс калибровки и измерений полностью автоматизированным и снизить погрешность измерения элементов матриц Мюллера.

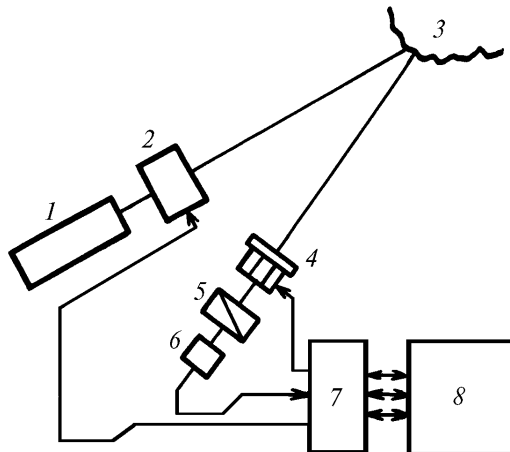
При взаимодействии луча света произвольной поляризации с объектом состояние поляризации рассеянного света связано с состоянием поляризации падающего посредством матрицы размером 4×4 [1]. Эта матрица, называемая матрицей Мюллера или поляризационной матрицей, является характеристикой объекта и представляет его полное оптическое описание. Таким образом, задача определения поляризационной структуры оптического поля, рассеянного различного рода объектами, решается путем измерения элементов их поляризационных матриц.

Наиболее перспективными методами измерения поляризационных матриц являются так называемые модуляционные методы. Это связано с тем, что модуляционные методы позволяют производить измерения в реальном масштабе времени [2]. Последнее, очевидно, является необходимым условием при исследовании различного рода объектов с флуктуирующими параметрами (атмосферные образования, взволнованная водная поверхность и т.д.). В основе этих методов лежит непрерывное изменение по заданному закону поляризации зондирующего и отраженного от исследуемого объекта излучения. При этом в спектре принимаемого сигнала можно выделить 16 частотных компонент, интенсивности которых пропорциональны только одному элементу поляризационной матрицы объекта. Проще всего для модуляции поляризации применить механически вращающуюся фазовую пластинку. Однако в этом случае появляются трудности синхронизации механического вращения с ЭВМ, управляющей процессом измерения. Кроме того, становится невозможной перестройка измерительной системы в диапазоне оптических частот без замены пластинки. Отдельной проблемой являются величины погрешностей измерений элементов поляризационных матриц. Вследствие того, что процесс рассеяния суть процесс статистический и распространение оптического излучения через атмосферу сопровождается различного рода искажениями, возникает необходимость многократных измерений. Это также ужесточает требования к скоростным характеристикам измерительной системы, которые не могут быть удовлетворены, если использовать механически вращающиеся фазовые пластинки.

В этих случаях применяют так называемые активные преобразователи поляризации [2]: магнитооптические, акустооптические, электро-оптические и т.д. Все они обладают определенными достоинствами и недостатками. Например, большинство магнитооптических преобразователей характеризуются большим поглощением, малым удельным поворотом плоскости поляризации, большими постоянными времени и габаритными размерами. Акустооптические преобразователи являются узкополосными устройствами, работающими на фиксированных частотах.

В связи с этим для преодоления трудностей и удовлетворения требованиям, возникающим при создании систем для измерения поляризационных матриц объектов с флуктуирующими параметрами, наиболее перспективными, на наш взгляд, являются вращающиеся фазовые пластинки на основе электрооптических кристаллов.

С использованием вращающейся фазовой пластинки, реализованной на основе электро-оптического кристалла ниобата лития, была создана экспериментальная автоматизированная система, блок-схема которой приведена на рисунке. Электрооптическая фазовая пластинка используется в зондирующем канале системы, в приемном канале системы применена кристаллическая фазовая пластинка, изменение ориентации быстрой оси которой производится посредством шагового двигателя. Управление параметрами системы и процессом измерения осуществляется ЭВМ посредством стандартного быстродействующего интерфейса КАМАК.



Блок-схема экспериментальной автоматизированной системы: 1 – ОКГ; 2– вращающаяся фазовая пластинка на основе электро-оптического кристалла LiNbO_3 ; 3 – исследуемый объект; 4 – фазовая пластинка $\lambda/4$, управляемая шаговым двигателем; 5 – анализатор; 6 – ФЭУ; 7 – КАМАК; 8 – ЭВМ

Оптическое поле на фотодетекторе может быть найдено с помощью матричного формализма Мюллера из уравнения

$$S_{\text{фд}} = [M4] [M3] [M2] [M1] S, \quad (1)$$

где матрицы Мюллера [1]: $M1$ – вращающейся фазовой пластинки, $M2$ – исследуемого объекта, $M3$ – фазовой пластинки с фиксированным набором азимутов ориентаций быстрой оси, $M4$ – анализатор с горизонтально ориентированной осью пропускания; $S_{\text{фд}}$, S – векторы Стокса соответственно оптического поля на фотодетекторе и поля, падающего на вращающуюся фазовую пластинку.

Сигнал, выделяемый на фотоприемнике, представляющий собой первый элемент вектора Стокса, в этом случае будет иметь вид

$$\begin{aligned} 2 I_0 = & S_0 N_1 + S_1 (1 + \beta) N_2 / 2 + S_2 (1 + \beta) N_3 / 2 + S_3 \beta N_4 + \\ & + \mu (S_3 N_3 - S_2 N_4) \cos(2\Omega t) + \mu (S_1 N_4 - S_3 N_2) \sin(2\Omega t) + \\ & + [(1 - \beta)(S_1 N_2 - S_2 N_3) / 2] \cos(4\Omega t) + [(1 - \beta)(S_1 N_3 - S_2 N_2) / 2] \sin(4\Omega t), \end{aligned} \quad (2)$$

где S_0, S_1, S_2, S_3 – элементы вектора Стокса оптического поля, падающего на вращающуюся фазовую пластинку; $N_j^k = M_{1j} + a_1^k M_{2j} + a_2^k M_{3j} - a_3^k M_{4j}$, M_{ij} – элементы матрицы Мюллера исследуемого объекта, $a_1^k = \cos^2(2\alpha_k) + \beta \sin^2(2\alpha_k)$, $a_2^k = (1 - \beta) \cos(2\alpha_k) \sin(2\alpha_k)$, $a_3^k = \mu \sin(2\alpha_k)$, $i, j, k = \overline{1, 4}$; α_k – угол ориентации быстрой оси фазовой пластинки $M3$; $\beta = \cos(D)$; $\mu = \sin(D)$, D – вносимый сдвиг фаз вращающейся фазовой пластинки; Ω – частота вращения фазовой пластинки.

Таким образом, в спектре сигнала (2) содержится четыре частотные компоненты, интенсивности которых пропорциональны соответствующим элементам матрицы Мюллера исследуемого объекта. Произведя измерения интенсивности сигнала, выделяемого на фотоприемнике, для четырех заданных ориентаций быстрой оси фазовой пластинки $M3$, осуществляя

дискретное преобразование Фурье этого сигнала и полагая, для определенности, что вектор Стокса оптического поля, падающего на вращающуюся фазовую пластинку, имеет вид $S = \{1, -1, 0, 0\}$, получим четыре системы линейных уравнений (относительно элементов матрицы Мюллера исследуемого объекта) вида

$$\begin{cases} M_{12} + a_1^1 M_{22} + a_2^1 M_{32} - a_3^1 M_{42} = -I_{C4}^1 / C, \\ M_{12} + a_1^2 M_{22} + a_2^2 M_{32} - a_3^2 M_{42} = -I_{C4}^2 / C, \\ M_{12} + a_1^3 M_{22} + a_2^3 M_{32} - a_3^3 M_{42} = -I_{C4}^3 / C, \\ M_{12} + a_1^4 M_{22} + a_2^4 M_{32} - a_3^4 M_{42} = -I_{C4}^4 / C; \end{cases} \quad (3 \text{ а})$$

$$\begin{cases} M_{13} + a_1^1 M_{23} + a_2^1 M_{33} - a_3^1 M_{43} = -I_{S4}^1 / C, \\ M_{13} + a_1^2 M_{23} + a_2^2 M_{33} - a_3^2 M_{43} = -I_{S4}^2 / C, \\ M_{13} + a_1^3 M_{23} + a_2^3 M_{33} - a_3^3 M_{43} = -I_{S4}^3 / C, \\ M_{13} + a_1^4 M_{23} + a_2^4 M_{33} - a_3^4 M_{43} = -I_{S4}^4 / C; \end{cases} \quad (3 \text{ б})$$

$$\begin{cases} M_{14} + a_1^1 M_{24} + a_2^1 M_{34} - a_3^1 M_{44} = -I_{S2}^1 / F, \\ M_{14} + a_1^2 M_{24} + a_2^2 M_{34} - a_3^2 M_{44} = -I_{S2}^2 / F, \\ M_{14} + a_1^3 M_{24} + a_2^3 M_{34} - a_3^3 M_{44} = -I_{S2}^3 / F, \\ M_{14} + a_1^4 M_{24} + a_2^4 M_{34} - a_3^4 M_{44} = -I_{S2}^4 / F; \end{cases} \quad (3 \text{ в})$$

$$\begin{cases} M_{11} + a_1^1 M_{21} + a_2^1 M_{31} - a_3^1 M_{41} = 2(I_0^1 + dN_2^1), \\ M_{11} + a_1^2 M_{21} + a_2^2 M_{31} - a_3^2 M_{41} = 2(I_0^2 + dN_2^2), \\ M_{11} + a_1^3 M_{21} + a_2^3 M_{31} - a_3^3 M_{41} = 2(I_0^3 + dN_2^3), \\ M_{11} + a_1^4 M_{21} + a_2^4 M_{31} - a_3^4 M_{41} = 2(I_0^4 + dN_2^4), \end{cases} \quad (3 \text{ г})$$

где $I_0^k, I_{s2}^k, I_{s4}^k, I_{c4}^k$ - интенсивности соответствующих частотных компонент при k -й ориентации фазовой пластинки $M3$; $C = (1 - \beta)/4$, $F = \mu/2$, $d = (1 + \beta)/4$.

С целью калибровки системы производились измерения матрицы Мюллера пустого пространства, которые показали, что погрешность измерения элементов матрицы не превышает для единичного измерения 0,1%. Время измерения, которое определяется временем позиционирования шаговым двигателем фазовой пластинки $M3$, составляет 2 с. Измерения производились в двух диапазонах оптических длин волн 0,63 и 1,06 мкм. Переход с одной длины волны на другую в отношении электрически управляемой фазовой пластинки осуществляется соответствующим увеличением управляющего напряжения, в отношении же фазовой пластинки в приемном канале требуется лишь учет соответствующего изменения вносимого фазового сдвига, который производится программно. Конструктивно вращающаяся фазовая пластинка представляет собой кристалл ниобата лития, размерами $2 \times 2 \times 40$ мм, вырезанный вдоль оптической оси, с помещенными на боковые грани электродами. Частота вращения быстрой оси фазовой пластинки равна 1 кГц. Так как на этой частоте измеренная величина параллельного сопротивления кристалла составляет 500 МОм и соответствующее четвертьволновое напряжение для кристалла указанной геометрии и длине волны оптического излучения 0,63 мкм равно 95 В, то мощность, необходимая для управления кристаллом, измеряется милливаттами.

Таким образом, описанная выше оптическая система позволяет с высокой точностью измерять поляризационные характеристики объектов с флуктуирующими параметрами в реальном масштабе времени. Анализ показывает, что значительное снижение времени (10^{-3} с и ниже) и повышение точности измерений возможны посредством использования и в приемном канале, вместо кристаллической фазовой пластинки с фиксированным набором ориентаций быстрой оси, электрооптической фазовой пластинки. Но применение электрически управляемых фазовых пластинок на основе одноосных кристаллов в приемном канале затруднено их значительной естественной анизотропией. Здесь можно было бы использовать фазовую пла-

стинку на основе подходящего (область прозрачности, величины электрооптических коэффициентов и т.д.) кубического кристалла, вырезанного в соответствии с требованиями, приведенными в [3], либо применить фазовую пластинку на основе одноосного кристалла с ограничивающими входной и выходной пучки соосными точечными диафрагмами. Последнее приведет к значительным потерям энергии принятого излучения, однако в лабораторных условиях при небольших расстояниях до исследуемого объекта это может быть вполне допустимо.

1. Шерклиф У. Поляризованный свет. М.: Мир, 1965. 264 с.
2. Шутков А. М. //ОМП. 1985. N11. С. 52–56.
3. Мар'енко В.В., Савенков С.Н., Красинский И.М. // Вестник Киевского ун-та. Физика. 1990. N31. С. 6-12.

Киевский университет
им. Тараса Шевченко

Поступила в редакцию
29 июля 1993 г.

V.V. Mar'jenko, B.N. Kolisnichenko, S.N. Savenkov. Automated System for the Investigation of the Polarization Structure of Optical Fields Scattered by Natural Objects.

In this paper we analyze certain requirements to optical measuring devices that should be satisfied when studying polarization structure of optical radiation scattered by different objects with fluctuating parameters. We also propose some ways to overcome certain difficulties that can occur during the studies by using, in the sounding channel of a polarimeter described in this paper, an electrically controlled phase plate of a LiNbO₃ crystal. This could be very useful for automating measurement and calibration procedures and as a result for improving the accuracy of Muller's matrices.