



УДК 681.785.3 (0.45)

Фотополариметрический метод определения параметров поляризованного излучения

М.М. Асанов¹, Е.В. Кожохина¹, И.В. Линчевский², А.В. Скрипец¹, В.Д. Тронько¹¹Национальный авиационный университет²Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Данная работа посвящена разработке и описанию метода определения компонент вектора Стокса оптического излучения. В основе метода лежит измерение угла эллиптичности и азимута эллипса поляризации оптического излучения фотополариметрическим способом. Предложены меры по увеличению чувствительности и точности измерений.

ФОТОПОЛЯРИМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ, Асанов М.М., Кожохіна О.В., Лінчевський І.В., Скрипец А.В., Тронько В.Д. — Дана робота присвячена розробці і описанню методу визначення компонент вектора Стокса оптичного випромінювання. У основі методу лежить вимірювання кута еліптичності та азимута еліпса поляризації оптичного випромінювання фотополариметричним способом. Запропоновані заходи по збільшенню чутливості і точності вимірювань.

PHOTOPOLARIMETRIC METHOD OF POLARIZATION RADIATION PARAMETERS DETERMINATION, by Asanov M.M., Kozhokhina O.V., Linchevskiy I.V., Skrypets A.V., Tronko V.D. — This work is devoted to development and description of optical radiation's Stokes vector components determination method. The method is based on measuring of ellipticity angle and polarization ellipse's azimuth of optical radiation by photopolarimetric means. Activities are offered to increase measuring sensitiveness and exactness.

Ключевые слова: фотополариметр; вектор Стокса; поляризованное излучение.

Key words: photopolarimeter; Stokes vector; polarization radiation.

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование поляризационных методов при исследовании различного рода растворов, веществ, поверхности объектов дает широкое представление об их свойствах и строении. Эти методы нашли применение в частности в медицине [1–6], исследовании поверхности материалов [7–8], а также аэрокосмическом дистанционном зондировании [9–15]. Известны работы по полариметрическим исследованиям комет [11, 13], астероидов [9, 14], спутников планет [14, 15]. В ходе полариметрических исследований выводы о строении анализируемого объекта делают на основании состояния поляризации его излучения или излучения, которое с ним взаимодействовало.

В настоящее время существует большое количество различных стокс-полариметров, измеряющих все четыре компоненты вектора Стокса I , M , C , S [10, 16–20]. По мнению ряда авторов, существует два основных типа схем [16, 19]: включающие в себя преобразователи поляризации с механически управляемыми параметрами (поларизаторы, фазовые пластинки и др.) и электрически управляемыми параметрами (магнитооптические, электрооптические, акустооптические ячейки и др.). Работа таких стокс-полариметров заключается в том, что относительно четырех компонент вектора Стокса формируется система уравнений. Для этого измеряется интенсивность излучения, прошедшего стокс-полариметр, при различных азимутах его составных элементов.

Некоторые авторы [17, 18] выделяют еще и третий тип стокс-полариметров, где для измерения параметров Стокса применяется вращающаяся с определенной частотой фазовая пластинка. При регистрации интенсивности излучения, прошедшего через вращающуюся фазовую пластинку и неподвижно установленный перед фотоприемником анализатор, фотоэлектрический сигнал модулирован с частотами, кратными частоте вращения фазовой пластинки. Этот сигнал несет в себе информацию о поляризационных характеристиках излучения.

Недостатками первых двух типов стокс-полариметров является необходимость проведения четырех измерений, изменяя при этом азимуты составных элементов полариметра, оптимальные значения которых рассчитывают для минимизации погрешностей, что увеличивает время проведения исследования и, следовательно, ограничивает возможности применения данных типов стокс-полариметров. Недостатками многоканальных стокс-полариметров [10] является наличие большого числа составных элементов, каждый из которых необходимо сориентировать с максимальной точностью по определенному азимуту, заранее рассчитанному для минимизации погрешностей.

В третьем типе стокс-поляриметров одним из основных источников погрешностей является неточность в установке его составных элементов на заранее рассчитанные оптимальные азимуты. Кроме того, несмотря на уменьшение продолжительности измерений данными стокс-поляриметрами, полученные результаты требуют значительного времени на обработку для вычисления компонент вектора Стокса. Следует также отметить, что в состав стокс-поляриметров третьего типа входит вращающаяся фазовая пластинка, что может уменьшить надежность данных схем при проведении длительных экспериментов.

Кроме того, во всех типах стокс-поляриметров для нахождения компонент вектора Стокса измеряется интенсивность, точность определения которой обычно не превышает 1%.

В данной работе предложен фотополяриметрический метод измерения компонент вектора Стокса, призванный повысить точность определения их относительных значений.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Блок-схема устройства, реализующего предлагаемый метод измерения компонент вектора Стокса, изображена на рис. 1.

Для прошедшего через канал светового потока вектор Стокса равен:

$$(V_e)_{\text{пр}} = [P_A][P_\delta](V_i)$$

$$(V_i) = \begin{pmatrix} I \\ M \\ C \\ S \end{pmatrix} = I' \begin{pmatrix} 1 \\ \cos 2\omega \cos 2\lambda \\ \cos 2\omega \sin 2\lambda \\ \sin 2\omega \end{pmatrix} + I'' \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

где $[P_\delta]$, $[P_A]$ — соответственно матрицы, описывающие свойства фазосдвигающей пластинки и анализатора; (V_i) — вектор Стокса падающего луча; ω — угол эллиптичности; λ — азимут эллипса поляризации [21]; I' , I'' — соответственно полностью поляризованная и полностью деполаризованная компоненты интенсивности падающего луча.

Матрица фазосдвигающей пластинки, азимут оси наибольшей скорости которой равен нулю, а параметры Стокса для нормированного собственного вектора наибольшей скорости равны $M = 1$, $C = 0$, $S = 0$, имеет вид [21]:

$$[P_\delta] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}$$

где δ — фазовый сдвиг пластинки.

Рассчитаем матрицу фазосдвигающей пластинки с произвольным азимутом α :

$$[P_{\delta,\alpha}] = [T(-2\alpha)][P_\delta][T(2\alpha)],$$

где $[T(-2\alpha)]$, $[T(2\alpha)]$ — матрицы поворота [21].

Произведя вычисления, получим:

$$[P_{\delta,\alpha}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\alpha + \sin^2 2\alpha \cos \delta & \sin 2\alpha \cos 2\alpha (1 - \cos \delta) & -\sin 2\alpha \sin \delta \\ 0 & \sin 2\alpha \cos 2\alpha (1 - \cos \delta) & \sin^2 2\alpha + \cos^2 2\alpha \cos \delta & \cos 2\alpha \sin \delta \\ 0 & \sin 2\alpha \sin \delta & -\cos 2\alpha \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}.$$

Матрица идеального анализатора с произвольным азимутом β имеет вид [21]:

$$[P_A] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\beta & \sin 2\beta & 0 \\ \cos 2\beta & \cos^2 2\beta & \cos 2\beta \sin 2\beta & 0 \\ \sin 2\beta & \cos 2\beta \sin 2\beta & \sin^2 2\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

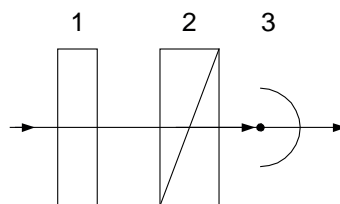


Рис. 1. Блок-схема стокс-поляриметра: 1 — фазосдвигающая пластинка; 2 — анализатор; 3 — фотоприемник

Интенсивность светового потока, прошедшего через оптический канал, определяется по формуле:

$$I_{\text{вых}} = \frac{I'}{2} \left\{ 1 + \cos 2\omega \left[\cos 2\lambda \cos 2\beta (\cos^2 2\alpha + \sin^2 2\alpha \cos \delta) + \cos 2\lambda \sin 2\beta \sin 2\alpha \cos 2\alpha (1 - \cos \delta) + \sin 2\lambda \cos 2\beta \sin 2\alpha \cos 2\alpha (1 - \cos \delta) + \sin 2\lambda \sin 2\beta (\sin^2 2\alpha + \cos^2 2\alpha \cos \delta) \right] + \sin 2\omega [\sin 2(\beta - \alpha) \sin \delta] \right\} + \frac{I''}{2}. \quad (1)$$

Сдвиг фазы установленной пластинки равен:

$$\delta = \frac{\pi}{2}.$$

Выражение (1) преобразуется к виду:

$$I_{\text{вых}} = \frac{I'}{2} [1 + \cos 2\omega \cos 2(\alpha - \lambda) \cos 2(\beta - \alpha) + \sin 2\omega \sin 2(\beta - \alpha)] + \frac{I''}{2}. \quad (2)$$

Для определения параметров λ и ω необходимо произвести два измерения.

В первом случае ориентируем азимут плоскости наибольшей скорости фазовой пластинки относительно азимута плоскости наибольшего пропускания анализатора на угол 90° :

$$\beta - \alpha = \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

Выражение для интенсивности на выходе (2) примет вид:

$$I_{\text{вых}} = \frac{I}{2} \left[1 - \frac{I'}{I} \cos 2\omega \cos 2(\alpha - \lambda) \right], \quad (4)$$

где $I = I' + I''$ — полная интенсивность падающего луча.

Выражение (4) есть не что иное, как модифицированный закон Малюса, I'/I — степень поляризации p оптического луча [21], а $\cos 2\omega$ определим как параметр эллиптичности p_3 .

Если сравнить (4) с выражением для интенсивности на выходе, полученным в [22], то видно, что произведение pp_3 — это степень поляризации оптического канала P в случае с эллиптически поляризованным излучением на входе фотополариметра. Т.к. степень поляризации p и параметр эллиптичности p_3 в (4) входят равнозначно как произведение, их изменение в одинаковой степени влияет на качество оптического канала, независимо от того, какой именно параметр меняется.

Вращая синхронно поляризатор и четвертьволновую пластинку, выполняя при этом условие (3), настраиваем фотополариметр на минимум пропускания света:

$$I_{\text{вых min}} = \frac{I}{2} \left[1 - \frac{I'}{I} \cos 2\omega \cos 2(\alpha_{\text{min}} - \lambda) \right], \quad (5)$$

где α_{min} — азимут плоскости наибольшей скорости фазовой пластинки, при котором интенсивность на выходе минимальна.

Из (5) следует:

$$\lambda = \alpha_{\text{min}} + \Delta, \quad (6)$$

где Δ — угол разбалансирования оптической системы.

Таким образом, выполняя условие (3) и впоследствии настраивая фотополариметр на минимум сигнала на выходе, измеряя азимут пластинки α_{min} , можно определить параметр λ .

Для нахождения ω , установим азимут плоскости наибольшей скорости фазосдвигающей пластинки по направлению большой (или малой) оси эллипса поляризации светового потока:

$$\alpha = \lambda. \quad (7)$$

Условие (3) при этом не сохраняется.

В этом случае, выражение (2) преобразуется к виду:

$$I_{\text{вых}} = \frac{I}{2} \left[1 + \frac{I'}{I} \cos 2(\omega - \beta + \lambda) \right]. \quad (8)$$

Как и при определении параметра λ , будем измерять ω , настраивая фотополариметр на минимум интенсивности на выходе исходя из условия:

$$\omega - \beta_{\text{min}} + \lambda = \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

где β_{min} — азимут плоскости наибольшего пропускания анализатора, при котором интенсивность на выходе минимальна.

Из (8) и (9) следует, что выполнив условие (7) и настраивая фотополариметр на минимум сигнала на выходе, зная β_{min} и λ , можно определить параметр ω :

$$\omega = \frac{\pi}{2} + \beta_{\text{min}} - \lambda + \Delta \quad (10)$$

При частично поляризованном излучении только параметров λ и ω недостаточно для определения компонент M , C и S . Для нахождения абсолютных величин всех компонент вектора Стокса необходимо

решить систему уравнений:

$$\begin{cases} I_{\text{вых}1} = \frac{I'}{2} [1 + \cos 2\omega \cos 2(\alpha_1 - \lambda) \cos 2(\beta_1 - \alpha_1) \sin 2\omega \sin 2(\beta_1 - \alpha_1)] + \frac{I''}{2} = I' \frac{A_1}{2} + I'' \frac{1}{2}; \\ I_{\text{вых}2} = \frac{I'}{2} [1 + \cos 2\omega \cos 2(\alpha_2 - \lambda) \cos 2(\beta_2 - \alpha_2) \sin 2\omega \sin 2(\beta_2 - \alpha_2)] + \frac{I''}{2} = I' \frac{A_2}{2} + I'' \frac{1}{2}. \end{cases} \quad (11)$$

Из (11) нетрудно определить I' и I'' , зная которые, можно найти все четыре компоненты вектора Стокса:

$$\begin{aligned} I &= I' + I'' = \frac{2I_{\text{вых}1} - 2I_{\text{вых}2}}{A_1 - A_2} + \frac{2A_1 I_{\text{вых}2} - 2A_2 I_{\text{вых}1}}{A_1 - A_2}; \\ M &= I' \cos 2\omega \cos 2\lambda = \frac{2I_{\text{вых}1} - 2I_{\text{вых}2}}{A_1 - A_2} \cos 2\left(\frac{\pi}{2} + \beta_{\min} - \lambda + \Delta\right) \cos 2(\alpha_{\min} + \Delta); \\ C &= I' \cos 2\omega \sin 2\lambda = \frac{2I_{\text{вых}1} - 2I_{\text{вых}2}}{A_1 - A_2} \cos 2\left(\frac{\pi}{2} + \beta_{\min} - \lambda + \Delta\right) \sin 2(\alpha_{\min} + \Delta); \\ S &= I' \sin 2\omega = \frac{2I_{\text{вых}1} - 2I_{\text{вых}2}}{A_1 - A_2} \sin 2\left(\frac{\pi}{2} + \beta_{\min} - \lambda + \Delta\right). \end{aligned}$$

3. УВЕЛИЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОПИСАННОГО МЕТОДА

При высокой деполяризации и рассеивании в оптическом канале очень трудно настроить фотополяриметр на минимум пропускания света, т.к. сигнал на выходе фотоприемника скрывается в шумах при скрещенном положении оптических элементов.

Одним из способов повышения точности и чувствительности измерений является модуляция плоскости поляризации падающего на фотополяриметр излучения.

В работах [5, 22, 23] в качестве модулятора предложено использовать магнитооптическую ячейку Фарадея с кристаллом иттрий феррита-граната. Данные кристаллы при магнитных полях до 80 А/м позволяют получить углы раскочки плоскости поляризации до 100°, что дает возможность работать с оптическими каналами низкого качества [23].

На рис. 2 изображена блок-схема стокс-поляриметра с модулятором Фарадея.

Выражение для интенсивности на выходе анализатора стокс-поляриметра, блок-схема которого изображена на рис. 2, примет вид:

$$I_{\text{вых}} = \frac{I'}{2} [1 + \cos 2\omega \cos 2(\alpha - \lambda + \theta) \cos 2(\beta - \alpha) + \sin 2\omega \sin 2(\beta - \alpha)] + \frac{I''}{2}, \quad (12)$$

где θ — угловая амплитуда колебаний плоскости поляризации, изменяющаяся по периодическому закону: $\theta = \theta_0 \Phi(t)$, где $\Phi(t)$ — произвольная периодическая функция, изменяющаяся во времени с частотой Ω .

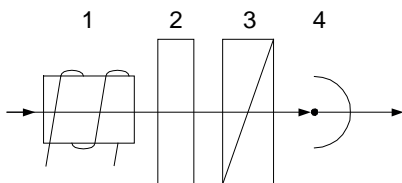


Рис. 2. Блок-схема стокс-поляриметра: 1 — модулятор; 2 — четвертьволновая фазосдвигающая пластинка; 3 — анализатор; 4 — фотоприемник

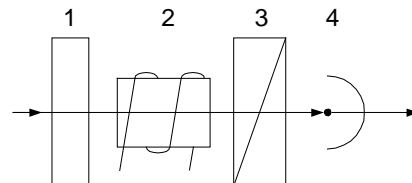


Рис. 3. Блок-схема стокс-поляриметра: 1 — четвертьволновая фазосдвигающая пластинка; 2 — модулятор; 3 — анализатор; 4 — фотоприемник.

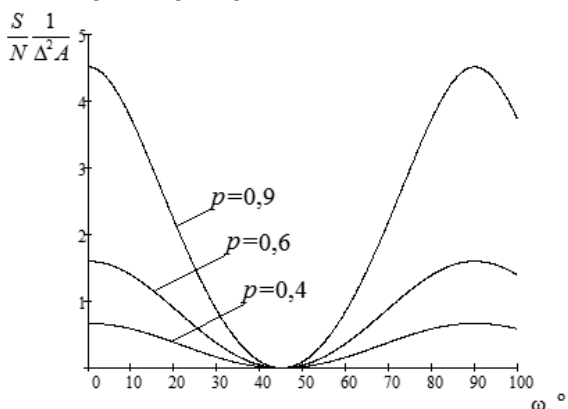


Рис. 4. График зависимости $\frac{S}{N \Delta^2 A}$ (A — постоянная, зависящая от свойств фотоприемника).

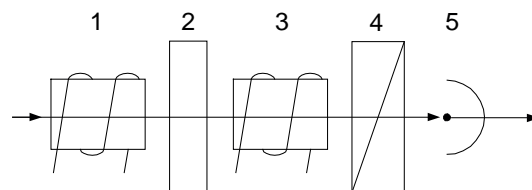


Рис. 5. Блок-схема стокс-поляриметра: 1 — модулятор; 2 — четвертьволновая фазосдвигающая пластинка; 3 — модулятор; 4 — анализатор; 5 — фотоприемник.

По аналогии с рассмотренным выше методом определения λ стокс-поляриметром без модулятора, настроим азимут плоскости наибольшей скорости фазовой пластинки относительно азимута плоскости наибольшего пропускания анализатора согласно условию (3). Выражение (12) преобразуется к виду:

$$I_{\text{вых}} = \frac{I}{2} \left[1 - \frac{I'}{I} \cos 2\omega \cos 2(\alpha - \lambda + \theta) \right].$$

Настраивая фотополяриметр на минимум сигнала на выходе, определяем параметр λ по формуле (6). Интенсивность на выходе анализатора при этом равна:

$$I_{\text{вых min}} = \frac{I}{2} [1 - P \cos 2\theta + 2\Delta P \sin 2\theta], \quad (13)$$

где $P = pp_s = \frac{I'}{I} \cos 2\omega$.

Для определения параметра ω блок-схема стокс-поляриметра преобразуется — модулятор следует поместить между фазосдвигающей пластинкой и анализатором (см. рис. 3).

Выражение для интенсивности на выходе анализатора в этой схеме будет иметь вид:

$$I_{\text{вых}} = \frac{I'}{2} [1 + \cos 2\omega \cos 2(\alpha - \lambda) \cos 2(\beta - \alpha - \theta) + \sin 2\omega \sin 2(\beta - \alpha - \theta)] + \frac{I''}{2} \quad (14)$$

После выполнения условия (7) выражение (14) примет вид:

$$I_{\text{вых}} = \frac{I}{2} \left[1 + \frac{I'}{I} \cos 2(\omega - \beta + \lambda + \theta) \right].$$

Настраивая фотополяриметр на минимум сигнала на выходе, определим ω по формуле (10). Интенсивность на выходе анализатора в данном случае имеет вид:

$$I_{\text{вых min}} = \frac{I}{2} [1 - p \cos 2\theta + 2\Delta p \sin 2\theta]. \quad (15)$$

Выражения (13) и (15) совпадают с полученными в [22, 23], что позволяет воспользоваться вычислениями данных работ. В частности, по (13), пользуясь результатами работ [22, 23] была построена зависимость отношения сигнала к шуму по мощности на выходе стокс-поляриметра от угла эллиптичности падающего излучения при оптимальном значении угла раскачки, при этом форма управляющих сигналов прямоугольная (см. рис. 4).

Из рис. 4 видно, что когда поляризация падающего светового излучения близка к круговой, т.е. $\cos 2\omega \approx 0$, то отношение сигнала к шуму стремится к нулю и описанным методом определить λ нельзя. Кроме того, со снижением степени поляризации p излучения, значения отношения сигнала к шуму по мощности прогнозируемо снижаются.

Описанный метод может быть реализован, к примеру, с использованием двух модуляторов (см. рис. 5), на которые поочередно подают управляющие сигналы.

Несмотря на то, что модулятор на кристалле иттрий феррита-граната позволяет повысить точность и чувствительность измерений, он ограничивает область применения описанного стокс-поляриметра: только ИК диапазон. Если на стокс-поляриметр падает излучение с отличной от ИК диапазона длиной волны, модуляцию плоскости поляризации можно осуществлять, поочередно вращая фазосдвигающую пластинку (при определении λ) и анализатор (при определении ω) на угол $\pm\theta$, при этом обязательно должны выполняться условия (3) и (7) соответственно.

4. ВЫВОДЫ

1. Предложенный метод позволяет с фотополяриметрической точностью, достигающей угловых секунд [24], определять относительные значения компонент M , C и S вектора Стокса падающего излучения.
2. Для нахождения действительных значений всех компонент вектора Стокса необходимо определить полностью поляризованную I' и полностью деполаризованную I'' компоненты интенсивности падающего луча, что ограничивает точность измерений до 1%.
3. Использование модулятора на иттрий-феррите гранате позволит увеличить точность и чувствительность измерения угла эллиптичности и азимута эллипса поляризации за счет дополнительной раскачки плоскости поляризации оптического излучения.
4. Если поляризация падающего светового луча круговая или близка к таковой, предлагаемый метод использовать нельзя, что является его недостатком.

1. Гарасевич С.Г., Коренюк П.Л., Мягченко Ю.О., Осипов С.Л., Слободянюк О.В. Застосування оптимізованого класичного поляриметра для визначення вмісту оптично активних речовин в прозорих та темних розчинах // Вісник Київського університету, серія: фізико-математичні науки. — 1999. — № 1. — С. 311–321.
2. Рогаткин Д.А. Об особенностях в определении оптических свойств мутных биологических тканей и сред в расчетных задачах медицинской неинвазивной спектрофотометрии // Медицинская техника. — 2007. — № 2. — С. 10–16.

3. Пат. 2325630 Российская Федерация, МПК⁶ G 01 N 21/21. Способ измерения концентрации оптически активных веществ в мутных растворах и устройство для его осуществления / Пеньковский А.И.; патентообладатель ФГУП «ЦКБ «Фотон». — № 2006135303/28; заявл. 05.10.2006; опубл. 27.05.2008. Бюл. № 15.
4. *Иванов А.П.* Поляризация света и ее использование в различных задачах оптики рассеивающих сред // Оптика и спектроскопия. — 2009. — **107**. — С. 183–195.
5. Пат. 92837 UA, МПК⁹ G 01 N 21/21. Спосіб реєстрації кута повороту площини поляризації світлового потоку в мутних активних середовищах / Скрипець А.В., Тронько В.Д., Асанов М.М.; патентовласник Скрипець А.В., Тронько В.Д., Асанов М.М. — № а200904243; заявл. 29.04.2009; опубл. 10.12.2010. Бюл. № 23.
6. Пат. 92836 UA, МПК⁹ G 01 N 21/21. Спосіб вимірювання кута повороту площини поляризації світлового променя в оптично активних мутних середовищах і пристрій для його реалізації / [Скрипець А.В., Тронько В.Д., Краснов В.М., Асанов М.М. та ін.]; патентовласник [Скрипець А.В., Тронько В.Д., Краснов В.М., Асанов М.М. та ін.]. — № а200904241; заявл. 29.04.2009; опубл. 10.12.2010. Бюл. № 23.
7. А. с. 1567882 СССР, МКИ⁵ G 01 B 11/30. Способ определения функции распределения высот и углов наклона шероховатой поверхности / А.Г.Ушенко, С.Б.Ермоленко (СССР). — № 4467676/25-28; заявл. 29.07.88; опубл. 30.05.90, Бюл. № 20.
8. *Петров В.В., Крючин А.А., Савенков С.Н. и др.* Исследование поляриметрических характеристик оптических дисковых носителей // Реєстрація, зберігання і обробка даних. — 2009. — **11**, № 2. — С. 3–11.
9. *Киселев Н.Н., Лушишко Д.Ф., Чернова Г.П., Шкуратов Ю.Г.* Поляриметрия астероида 1685 Торо // Кинематика и физика небесных тел. — 1990. — **6**, № 2. — С. 77–82.
10. *Шутов А.М., Быстранов В.Б., Киселев А.К.* Концепция стокс-поляриметрического панорамного устройства для дистанционного исследования объектов из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2006. — **1**, № 3. — С. 231–236.
11. *Розенбуш В.К., Величко Ф.П., Киселев Н.Н. и др.* Поляриметрические и фотометрические исследования кометы C/2002 T7 (LINEAR) // *Астрономический вестник*. — 2006. — **40**. — С. 253–262.
12. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. и др.* Модель дистанционного зондирования земной поверхности (суша, океан) с учетом поляризации излучения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2007. — **2**, № 4. — С. 109–115.
13. *Киселев Н.Н., Розенбуш В.К., Шаховской Н.М. и др.* Поляриметрические исследования комет в Крымской астрофизической обсерватории // *Известия Крымской астрофизической обсерватории*. — 2007. — **103**, № 4. — С. 216–230.
14. *Розенбуш В.К., Киселев Н.Н., Шаховской Н.М. и др.* Исследование поляризации излучения избранных высокоальбедных объектов вблизи оппозиции // *Известия Крымской астрофизической обсерватории*. — 2007. — **103**, № 4. — С. 279–289.
15. *Аврамчук В.В., Розенбуш В.К., Бульба Т.П.* Фотометрические исследования больших спутников Урана // *Астрономический вестник*. — 2007. — **41**. — С. 204–222.
16. *Шутов А.М.* Оптические схемы устройств измерения параметров поляризованного излучения // *Оптико-механическая промышленность*. — 1985. — № 11. — С. 52–56.
17. *Длугунович В.А., Снопко В.Н., Царюк О.В.* Анализ метода измерения поляризационных характеристик стокс-поляриметром с вращающейся фазовой пластинкой // *Оптический журнал*. — 2001. — **68**, № 4. — С. 37–42.
18. *Савенков С.Н., Климов А.С., Оберемок Е.А.* Погрешность определения элементов матрицы Мюллера и ее влияние на решение обратной задачи поляриметрии // *Журнал прикладной спектроскопии*. — 2009. — **76**, № 5. — С. 784–792.
19. *Савенков С.М., Климов О.С., Оберемок Е.А.* Стокс-поляриметр на рідкокристалічних комірках: аналіз похибок // *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки*. — 2009. — № 1. — С. 215–222.
20. *Firdous S., Atif M., Nawaz M.* Stokes vector determination of polarized light propagation in turbid medium // *Оптика и спектроскопия*. — 2011. — **110**, № 3. — С. 475–478.
21. *Шерклифф У.* Поляризованный свет / пер. с англ. под ред. Н.Д.Жевандрова. — М.: Мир, 1965. — 264 с.
22. *Скрипець А.В., Тронько В.Д., Асанов М.М.* Передача азимута объекта на расстоянии с применением магнито-оптического модулятора // *Електроніка та системи управління*. — 2011. — № 1(27). — С. 5–8.
23. *Ванюрихин А.И., Кузнецов Ю.А., Майстренко В.Ф., Тронько В.Д.* Регистрация угла плоскости колебания линейно поляризованного инфракрасного излучения // *Оптико-механическая промышленность*. — 1970. — Вып. 8. — С. 30–33.
24. *Снопко В.Н.* Поляризационные характеристики оптического излучения и методы их измерения. — Мн.: Наука и техника, 1992. — 336 с.

Поступила в редакцию 30.11.2011