

## ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПОЛЯРИМЕТРИИ С ВРАЩАЮЩИМСЯ АНАЛИЗАТОРОМ

© 2011 г. Г. Н. Вишняков, доктор техн. наук; Г. Г. Левин, доктор техн. наук; А. Г. Ломакин

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва

E-mail: vish@vniiofi.ru

Представлен метод измерения угла вращения плоскости поляризации на основе метода дифференциальной поляриметрии с использованием быстрого преобразования Фурье. Достигнута высокая точность его измерения с расширенной неопределенностью  $0,0014^\circ$  при коэффициенте охвата 3.

*Ключевые слова:* угол вращения плоскости поляризации, поляриметрия, оптическая активность, сдвиг фаз.

Коды OCIS: 120.2130

Поступила в редакцию 10.06.2010

### Введение

Высокоточные измерения угла вращения плоскости поляризации (УВП) необходимы во многих областях науки и техники [1, 2]. Простейшие поляриметры построены на основе полутеневого схемы, измерение в которой сводится к визуальному выравниванию интенсивностей двух секторов поля зрения прибора и считыванию УВП по барабану с нониусом. На смену ручным поляриметрам пришли более совершенные приборы, в которых проводится автоматическое сравнение интенсивностей за счет модуляции азимута линейно поляризованного излучения. Этот тип измерений относится к “амплитудным”, поэтому чувствительность таких поляриметров ограничена флуктуационными помехами [3]. Другие недостатки данного метода связаны с необходимостью использования прецизионных угломерных устройств и сервоприводов, а также с зависимостью точности измерения УВП от диапазона измеряемых углов.

Как известно [3], чувствительность “фазовых” измерений можно повысить не только за счет снижения уровня флуктуаций интенсивности излучения, но и повышением амплитуды сигнала.

Поэтому в поляриметрии появилось новое направление в методах определения УВП, основанное на фазовых измерениях. Впервые такой метод был предложен Л.А. Тумерманом

в патенте [4]. В этом методе определение УВП сводится к измерению разности фаз двух гармонических сигналов. Суть метода состоит в том, что на вход оптической системы поляриметра подается линейно поляризованное излучение, плоскость поляризации которого непрерывно вращается вокруг оптической оси. Это достигается тем, что неполяризованный свет от обычного источника проходит через равномерно вращающийся линейный поляризатор. Далее это излучение делится на два луча. Первый луч проходит через неподвижный анализатор и попадает на фотоприемник, формируя опорный электрический сигнал синусоидального вида. Вторым лучом проходит через кювету с исследуемым веществом и претерпевает дополнительный поворот плоскости поляризации. Поэтому после второго неподвижного анализатора и фотоприемника возникает электрический сигнал, смещенный по времени на некоторую величину. Сигналы с обоих фотоприемников поступают на вход фазометра, по данным которого проводится расчет УВП.

В данной схеме на светоделительный элемент падает излучение с различным азимутом поляризации, поэтому он изменяет состояние поляризации света, прошедшего через него. В связи с этим формы сигнала в двух каналах могут отличаться, что влияет на точность расчета разности фаз. Фазометр, представленный в работе, регистрирует сигналы в аналоговом

виде, что не позволяет осуществлять их дополнительную математическую обработку.

В патенте [5] идея, изложенная в работе [4], развита и предложена одноканальная схема поляриметра с вращающимся анализатором. Излучение источника света проходит последовательно неподвижный поляризатор, измерительную кювету с оптически-активным веществом, вращающийся анализатор, после которого для повышения точности установлен дополнительный поляризатор, и попадает на фотоприемник. Изменение азимута поляризации, вызванное оптически-активным веществом, в данной схеме пропорционально взаимному смещению сопряженных временных интервалов, образующихся между моментами полного гашения излучения.

Данный способ отличается простотой оптической схемы и высоким быстродействием измерений, однако их точность существенно зависит от разрешающей способности счетных устройств, стабильности излучения осветителя и электронных помех схемы.

В поляриметре Г.И. Уткина [6] входной световой поток также модулируется по азимуту плоскости поляризации при прохождении через вращающийся поляризатор. Далее происходит разделение потока на две составляющие: первая, пройдя анализатор, попадает на “нуль”-детектор, другая, пройдя через исследуемый объект и анализатор, попадает на измерительный детектор. УВПП измеряется по фазовой задержке сигналов двух детекторов с помощью счетного устройства.

Главным недостатком схемы Уткина является существенное влияние неравномерности вращения поляризатора на точность измерения. Также вклад в погрешность вносят флуктуации интенсивности источника излучения, собственные шумы детекторов, различные характеристики анализаторов, входящих в схему, и погрешность счетного устройства.

В работе [7] предложено в качестве опорного сигнала использовать электрический сигнал, управляющий приводом вращения анализатора. Рабочий сигнал формируется в одноканальной схеме, в которой линейно поляризованный пучок света, пройдя через исследуемый объект и вращающийся анализатор, регистрируется фотоприемником.

Поскольку опорный и рабочий сигналы имеют разную физическую природу, при расчете УВПП не представляется возможным компенсировать флуктуации интенсивности источни-

ка света и неравномерность вращения анализатора, что практически сводит на нет достоинства дифференциального метода.

Оригинальный метод формирования опорного сигнала был предложен в работе [8]. С целью модуляции опорного сигнала в диске вращающегося анализатора предусмотрены щели. Оптронная пара, расположенная в районе щелей, формирует короткие прямоугольные импульсы. Рабочий гармонический сигнал с фотоприемника и опорное напряжение поступают в блок формирования импульса, на выходе которого образуется прямоугольный импульс с длительностью, пропорциональной разности фаз между напряжениями. Длительность импульса определяется либо с помощью частотомера, либо измерением амплитуд его гармоник. В данном подходе опорный сигнал используется лишь для задания начальной точки расчета разности фаз. Этот сигнал не несет информации о неравномерности вращения анализатора и флуктуациях излучения источника света.

И, наконец, необходимо рассмотреть схему двухканального дифференциального поляриметра, описанную в патенте [9]. Световой поток делится на две составляющие, соответствующие рабочей и опорной ветвям поляриметра. Оба пучка проходят через входной неподвижный поляризатор, затем рабочий пучок проходит через исследуемый объект и вращающийся анализатор в рабочей ветви, а опорный пучок – минуя объект, проходит через второй вращающийся анализатор в опорной ветви. Оба анализатора кинематически связаны и приводятся в движение от одного привода через ременную передачу. После анализаторов свет попадает на фотодетекторы, сигналы которых поступают в фазометр. Разность фаз гармонических сигналов фотодетекторов соответствует удвоенному УВПП исследуемого объекта.

В данном методе основной недостаток связан со способом вращения анализаторов, поскольку при передаче вращения от привода к анализаторам через пассик велика вероятность проскальзывания элементов друг относительно друга, что отражается на форме сигналов и приводит к ошибке расчета разности фаз. Другой серьезный недостаток заключен в использовании в составе схемы двух разных анализаторов, характеристики которых могут отличаться весьма существенно. Не стоит забывать и о флуктуациях интенсивности источника света, которые в данной схеме никак не компенсируются.

В настоящей работе метод дифференциальной фазовой поляриметрии получил дальнейшее развитие. Предложенный метод измерения УВПП усовершенствован таким образом, что он компенсирует основные недостатки, описанные выше, а именно, влияние флуктуаций длины волны и интенсивности источника света, неравномерность вращения анализатора и различий в характеристиках поляризационных элементов, температурный дрейф. В нашем поляриметре сигналы фотоприемников оцифровываются, затем в цифровом виде передаются на компьютер с разработанным пакетом программ, где происходит вычисление УВПП.

### Устройство цифрового поляриметра

В оптической схеме цифрового поляриметра (рис. 1) используется двухканальная фотоэлектрическая регистрация оптических сигналов с высоким временным разрешением и последующими фазовыми измерениями.

С помощью светоделительной призмы 4 излучение лазера 1 делится на два пучка примерно равной интенсивности. Затем пучки проходят поляризаторы 6, 8, в качестве которых используются призмы Глана–Томпсона. Используя терминологию голографической интерферометрии, назовем “объектным” тот пучок лазерного излучения, который после поляризатора 8 направляется на эталонную поляриметрическую пластинку 9. “Опорным” же назовем тот пучок, который после поляризатора 6 сразу направляется на вращающийся анализатор 10. Излучение по-

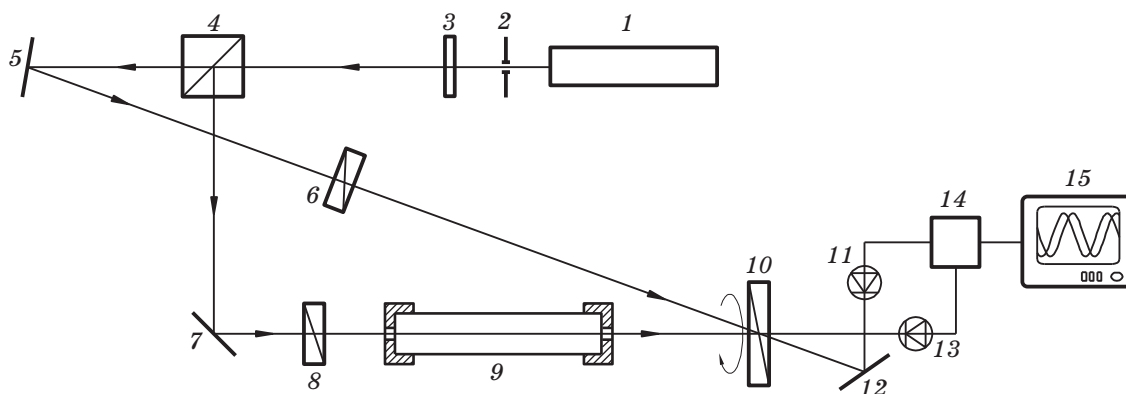
сле поляриметрической пластинки 9 также проходит через вращающийся анализатор 10 и регистрируется фотоприемником 13. В качестве вращающегося анализатора 10 используется обычный пленочный дихроичный поляризатор.

Отличительной особенностью предложенной схемы является то, что “опорный” и “объектный” пучки проходят через один и тот же участок вращающегося анализатора 10, совпадающий с осью вращения, поэтому неоднородность направления плоскости поляризации по его площади не будет сказываться на сигналах с фотоприемников 11 и 13.

Так как оба пучка сформированы из одного лазерного луча, то флуктуация его интенсивности будет одинакова в обоих каналах. Как будет показано в следующем разделе, в этом случае алгоритм обработки сигналов позволяет компенсировать эти флуктуации.

Более того, в предложенном поляриметре используется один вращающийся анализатор 10, поэтому неравномерность его угловой скорости вращения будет одинаково сказываться на форме электрического сигнала с обоих фотоприемников 11 и 13, при этом сдвиг фаз между сигналами будет оставаться постоянным. Для оцифровки этих сигналов используется высококачественный 4-канальный 24-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 14, после которого сигналы обрабатываются в персональном компьютере 15.

Вся установка заключена в климатическую камеру с точностью поддержания температуры в области измерения, равной 0,01 °С.



**Рис. 1.** Принципиальная схема цифрового поляриметра. 1 – источник излучения (стабилизированный по частоте He-Ne-лазер), 2 – диафрагма, 3 – нейтральный светофильтр, 4 – светоделительная призма, 5, 7, 12 – зеркала, 6, 8 – поляризаторы, 9 – тестовая кварцевая пластинка, 10 – вращающийся анализатор, 11, 13 – фотоприемные устройства, 14 – АЦП, 15 – персональный компьютер.

## Метод вычисления УВПП

Продолжим использовать аналогию с интерферометрией.

1. Рассмотрим первую “экспозицию”. В этом случае в “объектном” канале отсутствует поляриметрическая пластина  $\vartheta$  или в кювете нет

исследуемой оптически активной жидкости. Интенсивность света “объектного” и “опорного” пучков на выходе вращающегося анализатора  $1\theta$  описываются законом Малюса. Тогда сигналы с фотоприемников, спектральные характеристики которых обозначим через  $S_1(\lambda)$  и  $S_2(\lambda)$ , можно записать в виде

$$\begin{aligned} i'_{\text{об}}(t) &= k_1 [\Phi_0 + \delta\Phi(t)] S_1(\lambda) \left[ \cos^2(\omega_0 t + \varphi_1 + \delta\varphi(t)) + T_{\perp} \right], \\ i'_{\text{оп}}(t) &= k_2 [\Phi_0 + \delta\Phi(t)] S_2(\lambda) \left[ \cos^2(\omega_0 t + \varphi_2 + \delta\varphi(t)) + T_{\perp} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $k_1, k_2$  – коэффициенты деления светового потока,  $\Phi_0$  – постоянная составляющая интенсивности излучения лазера,  $\delta\Phi(t)$  – функция флуктуации интенсивности лазерного излучения,  $\omega_0$  – частота вращения анализатора,

$\delta\varphi(t)$  – функция нестабильности вращения анализатора,  $\varphi_1, \varphi_2$  – начальные фазы сигналов,  $T_{\perp}$  – пропускание анализатора в скрещенном состоянии.

Упростим выражения (1)

$$\begin{aligned} i'_{\text{об}}(t) &= k_1 [\Phi_0 + \delta\Phi(t)] S_1 \left[ 1 + \cos(2\omega_0 t + 2\varphi_1 + 2\delta\varphi(t)) + 2T_{\perp} \right] / 2, \\ i'_{\text{оп}}(t) &= k_2 [\Phi_0 + \delta\Phi(t)] S_2 \left[ 1 + \cos(2\omega_0 t + 2\varphi_2 + 2\delta\varphi(t)) + 2T_{\perp} \right] / 2. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, во время первой “экспозиции”, в отсутствие поляриметрической пластинки, разность фаз между сигналами (2) равна

$$\varphi'_{12} = 2(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (3)$$

2. Во время второй “экспозиции” в “объектный” канал перед анализатором вставляется исследуемая поляриметрическая пластинка, поворачивающая плоскость поляризации света на определенный угол  $\Delta\varphi$ . Тогда фаза сигнала “объектного” канала изменится на величину  $2\Delta\varphi$

$$\begin{aligned} i''_{\text{об}}(t) &= k_1 [\Phi_0 + \delta\Phi(t)] S_1 \left[ 1 + \cos(2\omega_0 t + 2\varphi_1 + 2\Delta\varphi + 2\delta\varphi(t)) + 2T_{\perp} \right] / 2, \\ i''_{\text{оп}}(t) &= k_2 [\Phi_0 + \delta\Phi(t)] S_2 \left[ 1 + \cos(2\omega_0 t + 2\varphi_2 + 2\delta\varphi(t)) + 2T_{\perp} \right] / 2. \end{aligned} \quad (4)$$

Фаза “опорного” канала останется неизменной. Во время второй “экспозиции” измеряется разность фаз между сигналами (4)

$$\varphi''_{12} = 2\varphi_1 + 2\Delta\varphi - 2\varphi_2 = 2\Delta\varphi + \varphi'_{12},$$

отсюда находим искомый угол поворота плоскости поляризации поляриметрической пластинки

$$\Delta\varphi = (\varphi''_{12} - \varphi'_{12}) / 2. \quad (5)$$

Таким образом, задача измерения УВПП сводится к измерению разности фаз двух одномерных гармонических сигналов.

Существует множество методов измерения разности фаз сигналов. К простейшим можно отнести методы временных интервалов, глав-

ный недостаток которых заключается в том, что измерительную информацию несет малая часть сигнала в областях перехода сигнала через “ноль”, при этом большая часть сигнала не используется [3].

Корреляционные методы охватывают весь массив данных и реализуются, как правило, в частотной области через фурье-преобразование – так называемый метод фазовой корреляции. Недостаток этих методов в том, что лишь максимум корреляционной функции несет информацию о фазовом сдвиге, нахождение которого в дискретном виде с высокой точностью представляет собой весьма нетривиальную задачу [10–13].

Если опять использовать аналогию с интерферометрией, то задачу измерения разности

фаз двух временных гармонических сигналов можно рассматривать как задачу восстановления пространственной фазы по одномерной интерферограмме. В этом случае можно использовать богатый накопленный опыт в области автоматической расшифровки интерферограмм. Как известно, основными методами для расчета разности фаз в цифровой интерферометрии являются метод фазовых шагов (МФШ) и метод, основанный на фурье-преобразовании [14]. МФШ, имеющий сотни модификаций и применимый наилучшим образом в приборах, которые позволяют вносить каким-либо способом фазовый сдвиг в один из сигналов, является весьма мощным средством расчета. МФШ требует как минимум три экспозиции, в связи с чем он трудно применим для работы с быстропротекающими процессами, однако обладает высо-

кой пространственной (временной) разрешающей способностью. Фурье-метод, в отличие от МФШ, позволяет рассчитывать разность фаз по одной интерферограмме, но с меньшей разрешающей способностью, что связано с ограничением спектра сигнала [14–16]. Поскольку измерительный сигнал настоящего цифрового поляриметра является низкочастотным, а спектр несущей частоты – весьма узким, уместно было использовать именно фурье-метод для расчета разности фаз. Высокое пространственное разрешение в данном случае не являлось ключевым фактором при выборе метода, при этом фурье-метод позволяет полностью использовать преимущества дифференциальной схемы поляриметра. Остановимся более подробно на фурье-методе.

Перепишем выражение (2) в экспоненциальной форме

$$\begin{aligned} i'_{ог}(t) &= a_1(t) + c_1 \left\{ b(t) \exp[i2(\omega_0 t + \varphi_1)] + b^*(t) \exp[-i2(\omega_0 t + \varphi_1)] \right\} / 2, \\ i'_{он}(t) &= a_2(t) + c_2 \left\{ b(t) \exp[i2(2\omega_0 t + \varphi_2)] + b^*(t) \exp[-i2(2\omega_0 t + \varphi_2)] \right\} / 2, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} a_1(t) &= k_1 [\Phi_0 + \delta\Phi(t)] S_1(\lambda) (1 + 2T_{\perp}) / 2, \\ c_1 &= k_1 S_1(\lambda) / 2, \\ b(t) &= [\Phi_0 + \delta\Phi(t)] \exp[i2\delta\varphi(t)], \\ a_2(t) &= k_2 [\Phi_0 + \delta\Phi(t)] S_2(\lambda) (1 + 2T_{\perp}) / 2, \\ c_2 &= k_2 S_2(\lambda) / 2, \\ b^*(t) &= [\Phi_0 + \delta\Phi(t)] \exp[-i2\delta\varphi(t)]. \end{aligned}$$

Выполнив прямое преобразование Фурье сигналов (6), получим

$$\begin{aligned} I'_{ог}(\omega) &= A_1(\omega) + c_1 \left[ B(\omega - 2\omega_0) \exp(i2\varphi_1) + B^*(\omega - 2\omega_0) \exp(-i2\varphi_1) \right] / 2, \\ I'_{он}(\omega) &= A_2(\omega) + c_2 \left[ B(\omega - 2\omega_0) \exp(i2\varphi_2) + B^*(\omega - 2\omega_0) \exp(-i2\varphi_2) \right] / 2, \end{aligned} \quad (7)$$

где прописными буквами обозначены спектры соответствующих временных компонент. Вырежем в спектрах (7) первую гармонику сигналов в положительной области частот, умножив спектр на функцию полосового пропускающего фильтра  $H$

$$\begin{aligned} I'_{ог}(\omega) H(\omega) &= c_1 \exp(i2\varphi_1) B(\omega - 2\omega_0) H(\omega) / 2, \\ I'_{он}(\omega) H(\omega) &= c_2 \exp(i2\varphi_2) B(\omega - 2\omega_0) H(\omega) / 2. \end{aligned} \quad (8)$$

Применив операцию обратного фурье-преобразования к выражениям (8), получим временные комплексные сигналы вида

$$\begin{aligned} \tilde{i}'_{ог}(t) &= c_1 \exp(i2\varphi_1) \tilde{d}(t) / 2, \\ \tilde{i}'_{он}(t) &= c_2 \exp(i2\varphi_2) \tilde{d}(t) / 2, \\ \tilde{d}(t) &= \left\{ [\Phi_0 + \delta\Phi(t)] \exp[i2(\delta\varphi(t) + \omega_0 t)] \right\} \otimes \tilde{h}(t), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\otimes$  означает операцию свертки, а тильда над символами – комплексные переменные,  $\tilde{h}(t)$  – фурье-образ от фильтра  $H$ .



Из выражений (9) следует, что для нахождения разности фаз между сигналами  $\tilde{i}'_{ог}(t)$ ,  $\tilde{i}'_{он}(t)$  нужно умножить один из сигналов на комплексное сопряжение другого и вычислить аргумент результата

$$\varphi'_{12} = \text{Arg}[\tilde{i}'_{ог}(t)\tilde{i}'_{он*}(t)] = 2(\varphi_1 - \varphi_2) + \text{Arg}[\tilde{d}(t)] + \text{Arg}[\tilde{d}^*(t)], \quad (10)$$

где Arg означает аргумент комплексного выражения.

Последние два члена выражения, содержащие функции нестабильности вращения анализатора и нестабильности излучения лазера, при сложении обрзаются в ноль.

Таким образом, выражение (10) позволяет вычислить искомую разность фаз сигналов (3), при этом нестабильности излучения лазера и вращения анализатора компенсируются.

### Результаты измерения УВПП

Измерения проводятся в два этапа. Во время первого этапа (первой экспозиции) эталонная поляризметрическая пластинка 9 отсутствует. В персональный компьютер через многоканальный АЦП 14 вводятся два синусоидальных сигнала. Небольшой сдвиг синусоид по времени обусловлен несовпадением направления поляризации, задаваемого поляризаторами 6, 8, которая остается неизменной в течение всех измерений. По описанной методике вычисляется первоначальный сдвиг фаз  $\varphi'_{12}$  между опорным и объектным сигналами (рис. 2).

После этого в оптическую схему эталона вводится поляризметрическая пластинка 9 и выполняется второй этап измерений (вторая экспозиция). Графики сигналов во время второй экспозиции приведены на рис. 3. Видно, что один сигнал сместился относительно второго. Это вызвано тем, что поляризметрическая пластинка дополнительно поворачивает плоскость поляризации света на определенный угол  $\Delta\varphi$ . После второй экспозиции измеряется разность фаз  $\varphi''_{12}$ . Полуразность между фазами во время первой и второй экспозиций дает искомый УВПП  $\Delta\varphi$  (5). Типичный вид восстановленной разности фаз представлен на рис. 4. Колебания на графике отражают флуктуации фазы во времени в процессе измерения, связанные с остаточным неустранимым рассогласованием каналов поляриметра. В идеальном случае график фазы должен был бы представлять собой горизонтальную прямую. Выбросы на краях гра-

фика вызваны ограничением спектра при выполнении цифровой фильтрации и могут быть минимизированы надлежащим подбором окна цифрового фильтра.

Электрические сигналы фотоприемников оцифровывались 24-разрядным АЦП в диапазоне  $\pm 4$  В на частоте дискретизации 10,016 кГц. Скорость вращения анализатора составляла около 270 об/мин.

Исходные оцифрованные данные подвергались низкочастотной фильтрации гауссовым окном, затем для сужения ширины спектра гармоник проводилась аподизация окном Блэкумена 5-го порядка, отличающимся наискорейшим затуханием и наименьшей амплитудой боковых лепестков частотной характеристики [17]. Аналогичное окно было взято и в качестве частотного полосового пропускающего фильтра рис. 5. Ширина окна фильтра должна быть выбрана такой, чтобы сохранялась большая часть спектра модулированного сигнала. Однако, поскольку спектр сигнала бесконечен, неизбежно происходит его ограничение, что приводит

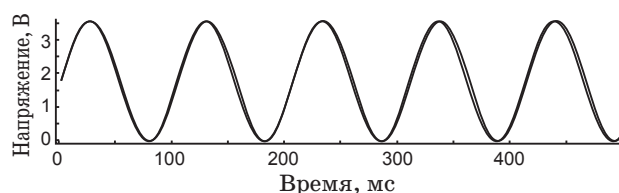


Рис. 2. Графики опорного и объектного сигналов. Первая экспозиция.

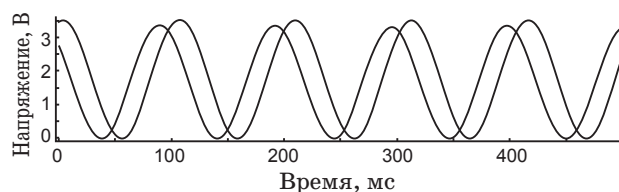


Рис. 3. Графики опорного и объектного сигналов. Вторая экспозиция.

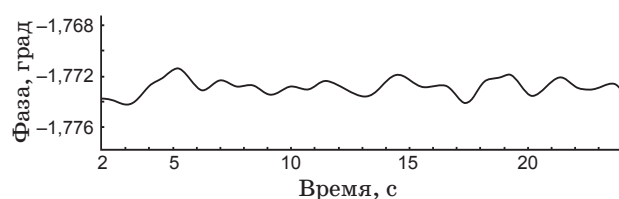


Рис. 4. Типичная зависимость изменения во времени функции искомой разности фаз.

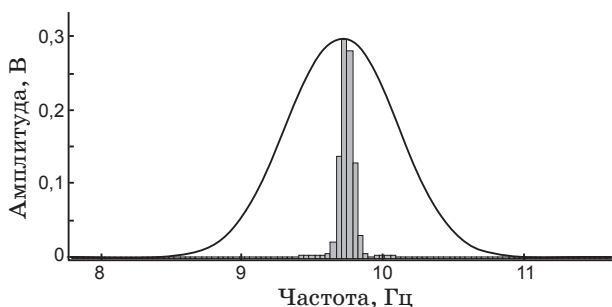


Рис. 5. Частотная характеристика полосового пропускающего фильтра, наложенная на частотный спектр исходного сигнала.

к появлению выбросов фазы на краях графика (рис. 4). В связи с этой особенностью в расчете участвовала только средняя часть функции фазы с отсечением по 20% данных от каждого края графика. За результат измерения принималось число, рассчитанное как среднее значение по 10 последовательным измерениям.

Разработанный поляриметр в настоящее время используется во ВНИИОФИ в составе Государственного первичного эталона единицы угла вращения плоскости поляризации ГЭТ 50-2008 и обеспечивает точность измерения на уровне лучших зарубежных аналогов [18].

В 2009 году были проведены предварительные двухсторонние сличения между ВНИИОФИ и РТВ (Германия). Эталон ГЭТ 50-2008 обладает расширенной неопределенностью измерений УВП, равной  $0,0014^\circ$  при коэффициенте охвата 3 [19]. Эталонная установка немецкого физико-технического института (РТВ), собранная на базе фотоэлектрического поляриметра с ячейкой Фарадея, имеет расширенную неопределенность измерений  $0,0010^\circ$  при коэффициенте охвата 2. В качестве эталонных мер УВП были выбраны две поляриметрические пластинки фирмы *Bellingham-Stanley Ltd*. Измерения проводились на длине волны 632,9914 нм. Результаты измерений приведены в таблице. В 2009–2011 гг. намечено проведение круговых международных сличений в области поляри-

Результаты двухстороннего сличения точности измерения УВП

Номер пластинки	РТВ Угол, град.	ВНИИОФИ Угол, град.
QCP 34-21	4,5122	4,5115
QCP 34-22	-9,0517	-9,0493

метрии СООМЕТ.PR-S2, в которых ВНИИОФИ выступает страной-пилотом.

## Заключение

В работе представлены оригинальный метод и разработанный поляриметр для измерения УВП, в которых угловые измерения заменены фазовыми, т. е. измерением разности фаз между двумя гармоническими сигналами. Отказ от угловых измерений положения анализатора и отсутствие необходимости измерения угловой скорости вращения анализатора существенно упростили оптико-механическую схему поляриметра. В поляриметре используется два пучка света, сформированные из одного с помощью светоделителя, проходящие через ось вращения анализатора. Вследствие этого непостоянство угловой скорости вращения анализатора и флуктуации интенсивности источника излучения одинаковы в обоих каналах. Цифровой алгоритм обработки сигналов, основанный на преобразовании Фурье, построен таким образом, что эти флуктуации эффективно компенсируются. Важным достоинством метода является также независимость погрешности измерения УВП от диапазона измеряемых углов. Достигнута высокая точность измерения УВП с расширенной неопределенностью  $0,0014^\circ$  при коэффициенте охвата 3.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Волкова Е.А. Поляризационные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1974. 156 с.
2. Ванюрихин А.И., Герчановская В.П. Оптико-электронные поляризационные устройства. Киев: Техника, 1984. 160 с.
3. Снопко В.Н. Поляризационные характеристики оптического излучения и методы их измерения. Минск: Наука и техника, 1992. 336 с.
4. Тумерман Л.А. Способ измерения величины оптической активности // А. с. № 374972, 1974.
5. Аксенов А.С., Фролов А.К. Способ измерения изменений азимута плоскости поляризации светового излучения // А. с. № 744294, 1980.
6. Уткин Г.И. Поляриметр Г.И. Уткина // Патент России № 1696896. 1993.
7. Пукинкас Г.Б. Автоматизированная установка для спектральных измерений оптического вращения // Приборы и техника эксперимента. 1986. № 3. С. 243–244.
8. Биленко Д.И., Дворкин Б.А., Сысуев П.С. Измерение наклона оси эллипса поляризации света //

- Приборы и техника эксперимента. 1975. № 6. С. 218–220.
9. *Newman A.L., Stanbro W.D.* Phase sensitive differential polarimetry technique and apparatus // Patent US № 4912059. 1990.
  10. *Галахова О.П., Колтик Е.Д., Кравченко С.А.* Основы фазометрии. Л.: Энергия, 1976. 273 с.
  11. *Смирнов П.Т.* Цифровые фазометры. Л.: Энергия, 1974. 144 с.
  12. *Чмых М.К.* Цифровая фазометрия. М.: Радио и связь, 1993. 184 с.
  13. *John G.W.* Electrical measurement, signal processing, and displays. N. Y.: CRC Press, 2004. 768 p.
  14. *Takeda M., Mutoh K.* Fourier transforms profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes // *App. Opt.* 1983. V. 22. P. 3977–3982.
  15. *Вишняков Г.Н., Левин Г.Г., Лоцилов К.Е., Сухорукоев К.А.* Фурье-синтез трехмерной поверхности по методу многоакурсной проекции полос // *Опт. и спектр.* 2005. Т. 99. В. 4. С. 680–684.
  16. *Левин Г.Г., Вишняков Г.Н., Лоцилов К.Е.* Способ оптического измерения формы поверхности трехмерного объекта (варианты) // Патент России № 2232373. 2003.
  17. *Oppenheim A.V., Schaffer R.W.* Discrete-Time Signal Processing. Upper Saddle River. New Jersey: Prentice-Hall, 1999. P. 468–471.
  18. *Вишняков Г.Н., Лахов В.М., Левин Г.Г., Ломакин А.Г.* Государственный первичный эталон единицы угла вращения плоскости поляризации // *Измерительная техника.* 2010. № 3. С. 3–7.
  19. ГОСТ 8.590-2009 “Государственная поверочная схема для средств измерений угла вращения плоскости поляризации”.
-