

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2023. Т. 31, № 4  
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2023;31(4)

Научная статья  
УДК 543.454; 517.44

DOI: 10.18500/0869-6632-003047  
EDN: VVWJWG

### Анализ погрешности алгоритма обработки сигналов дифференциального фазового поляриметра

Г. Н. Вишняков<sup>1,2</sup>, А. И. Юрин<sup>3,1</sup>✉, В. Л. Минаев<sup>1,3</sup>, А. А. Голополов<sup>1,3</sup> 

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

E-mail: vish@vniiofi.ru, ✉ ayurin@hse.ru, minaev@vniiofi.ru, golopolosov@vniiofi.ru

Поступила в редакцию 5.04.2023, принята к публикации 14.04.2023,

опубликована онлайн xx.xx.xxxx

**Аннотация.** Цель данной работы — анализ влияния алгоритма обработки сигналов поляриметра на результаты измерений угла вращения плоскости поляризации для повышения точности измерений в дифференциальной поляриметрии. **Методы.** В работе рассмотрены методы поляриметрии, применяемые для анализа оптически активных веществ, основанные на методах фазовых измерений, используемых для вычисления угла вращения плоскости поляризации. Отмечена целесообразность применения преобразования Фурье для расчета разности фаз сигналов дифференциального поляриметра. Для анализа погрешности алгоритма применено математическое моделирование процессов обработки измерительной информации при различных параметрах сигналов. **Результаты.** Приведены результаты исследования влияния разрядности аналого-цифрового преобразователя, количества отсчетов за период сигнала и времени накопления на точность восстановления разности фаз. Также исследовано влияние соотношения амплитуд сигналов и уровня амплитудных и фазовых шумов, вызванных несовершенством измерительной системы. **Заключение.** Полученные результаты позволяют выбрать оптимальные параметры элементов поляриметра и режима измерений с целью повышения точности измерений угла вращения плоскости поляризации с помощью дифференциального фазового поляриметра на основе преобразования Фурье.

**Ключевые слова:** поляриметрия, угол вращения плоскости поляризации, фазовые измерения, анализ гармонических сигналов, амплитудный и фазовый шум, преобразование Фурье.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Всероссийского научно-исследовательского института оптико-физических измерений.

**Для цитирования:** Вишняков Г. Н., Юрин А. И., Минаев В. Л., Голополов А. А. Анализ погрешности алгоритма обработки сигналов дифференциального фазового поляриметра // Известия вузов. ПНД. 2023. Т. 31, № 4. С. xxx–xxx. DOI: 10.18500/0869-6632-003047. EDN: VVWJWG

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

## Analysis of the accuracy of the signal processing algorithm of the differential phase polarimeter

G. N. Vishnyakov<sup>1,2</sup>, M. V. Yurin<sup>3,1</sup>✉, V. L. Minaev<sup>1,3</sup>, A. A. Golopolosov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Russia

<sup>3</sup>HSE University, Moscow, Russia

E-mail: vish@vniiofi.ru, ✉ ayurin@hse.ru, minaev@vniiofi.ru, golopolosov@vniiofi.ru

Received 5.04.2023, accepted 14.04.2023, available online xx.xx.xxxx

**Abstract.** The purpose of this work is to analyze the effect of the polarimeter signal processing algorithm on the results of measurements of the optical rotation angle of the polarization plane to improve the accuracy of measurements in differential polarimetry. **Methods.** The paper considers the methods of polarimetry used for the analysis of optically active substances, based on the methods of phase measurements used to calculate the optical rotation angle. The expediency of using the Fourier transform to calculate the phase difference of differential polarimeter signals is noted. To analyze the error of the algorithm, mathematical modeling of the measurement information processing for various signal parameters is applied. **Results.** The results of the study of the effect of the bit depth of the analog-to-digital converter, the number of samples over the period of the signal and the accumulation time on the accuracy of restoring the phase difference are presented. The influence of the ratio of signal amplitudes and the level of amplitude and phase noise caused by the imperfection of the measuring system has also been investigated. **Conclusion.** The obtained results make it possible to optimize the operating mode and improve the accuracy of the optical rotation angle measurements using a differential phase polarimeter based on the Fourier transform.

**Keywords:** polarimetry, optical rotation angle, phase measurements, harmonic signal analysis, amplitude and phase noise, Fourier transform.

**Acknowledgements.** This work was supported by All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements.

**For citation:** Vishnyakov GN, Yurin AI, Minaev VL, Golopolosov AA. Analysis of the accuracy of the signal processing algorithm of the differential phase polarimeter. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2023;31(4):xxx–xxx. DOI: 10.18500/0869-6632-003047

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).*

### Введение

Поляриметрические методы исследования основаны на измерении угла вращения плоскости поляризации (УВП) света, прошедшего через оптически активную среду [1]. Оптическая активность веществ заключается в изменении плоскости поляризации света и обусловлена строением кристаллической решетки или молекул, поэтому измеряя УВП, можно определять состав вещества, конфигурацию молекул, концентрацию растворов и т. д.

В оптических приборах различного назначения часто применяют поляризационные материалы, для контроля качества которых требуются высокоточные измерения [2]. Поляризационные измерения широко используют в астрономии [3], зондировании земли из космоса [4], пищевой промышленности для определения содержания сахара [5], идентификации масел и других оптически активных жидкостей [6], в медицине — для контроля качества лекарств [7], офтальмологии [8] и т. д. В более сложных случаях, для анализа смесей нескольких оптически активных веществ используют спектрополяриметрические методы [9], в которых исследуют изменение УВП в зависимости от длины волны света.

## 1. Методы измерений угла вращения плоскости поляризации света

Среди методов, применяемых для измерения характеристик оптически активных веществ, можно выделить две группы. К первой группе относятся нулевые методы, в которых добиваются минимальной интенсивности (гашения) светового потока путем изменения относительного углового положения оптических элементов — поляризатора и анализатора [10]. Недостатками подобных методов являются необходимость использования высокоточных угломерных устройств, сильное влияние электрических шумов и флуктуаций интенсивности источника света, поскольку момент гашения необходимо определять путем измерения минимального уровня сигнала. В методах второй группы применяют модуляцию поляризации светового потока [10], при этом можно использовать как амплитудные, так и фазовые характеристики сигналов для расчета искомых величин.

Методы, основанные на анализе фазовых характеристик, обладают меньшей чувствительностью к шумам и получили развитие в дифференциальной поляриметрии [11], в которой модуляцию поляризации лучей обычно осуществляют с помощью вращающегося с постоянной скоростью анализатора. Суть дифференциальной поляриметрии заключается в пропускании первого (объектного) модулированного поляризованного луча через кювету с исследуемым веществом, а второго (опорного) — минуя эту кювету (рис. 1).

При этом первый луч претерпевает дополнительный поворот плоскости поляризации из-за оптической активности исследуемого вещества, поэтому сигналы на фотоприемниках будут различаться по фазе. Таким образом, измерение УВП сводится к расчету разности фаз гармонических сигналов. Для анализа спектральной зависимости УВП используют источники излучения с различной длиной волны.

Однако существующие методы дифференциальной поляриметрии обладают недостатками в области схемных решений и реализованных алгоритмов вычисления результатов измерений, поэтому их усовершенствование является актуальной задачей. Целью данной работы является повышение точности дифференциальной поляриметрии за счет анализа влияния алгоритма обработки сигналов на результаты измерений УВП.

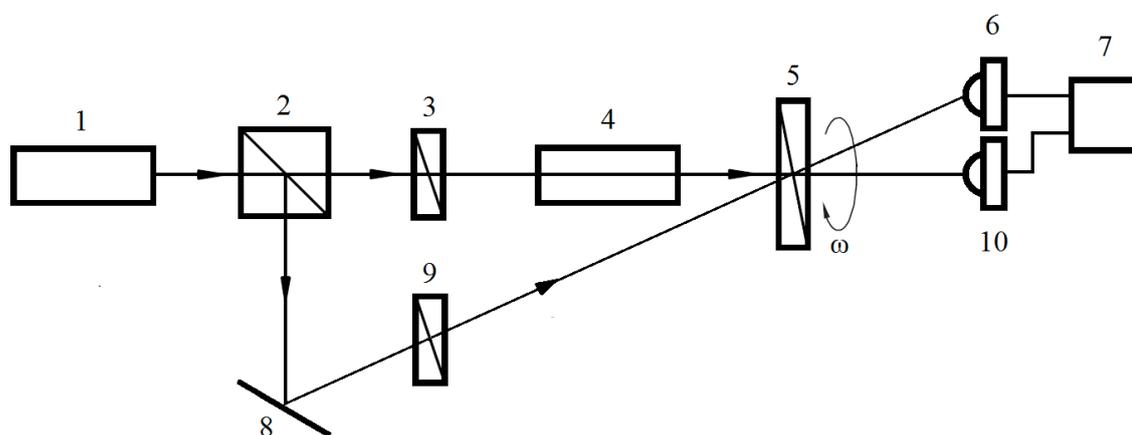


Рис. 1. Схема дифференциального поляриметра: 1 — источник монохроматического излучения; 2 — светоделитель; 3, 9 — поляризаторы; 4 — кювета с исследуемым веществом; 5 — вращающийся анализатор; 6, 10 — фотоприемники; 7 — фазометр; 8 — неподвижное зеркало

Fig. 1. Scheme of differential polarimeter: 1 — source of monochromatic radiation; 2 — beam splitter; 3, 9 — polarizers; 4 — cuvette with the test substance; 5 — rotating analyzer; 6, 10 — photodetectors; 7 — phase meter; 8 — fixed mirror

## 2. Методы фазовых измерений

Разработаны и широко применяются различные методы фазовых измерений [12]. В простейшем случае используют преобразование разности фаз сигналов в постоянное напряжение или временной интервал. Недостаток подобных методов заключается в том, что для расчета фазы используется только малая часть информационного сигнала в областях его перехода через определенный уровень, поэтому шумы и флуктуации сигнала будут оказывать заметное воздействие на точность измерений.

Для использования всего массива информации о фазе можно использовать корреляционные (интегральные) методы, которые применяют для анализа изображений [13]. Эти методы, как правило, реализуют в частотной области через преобразование Фурье, однако лишь максимум корреляционной функции содержит информацию о фазовом сдвиге, расчет которого в дискретном виде с высокой точностью представляет собой довольно сложную задачу [12].

Если же вновь обратиться к методам обработки изображений, то можно использовать богатый опыт в области расшифровки интерферограмм, а задачу измерения разности фаз гармонических сигналов решать с помощью методов цифровой интерферометрии. Для вычисления фазы волнового фронта при анализе интерферограмм обычно используют метод фазовых шагов или метод, основанный на преобразовании Фурье (фурье-метод) [14].

Метод фазовых шагов в различных модификациях является весьма популярным, однако требует анализа как минимум трех интерферограмм, в связи с чем его трудно применять для работы с быстропротекающими процессами. Фурье-метод позволяет рассчитывать разность фаз по одной интерферограмме, но с меньшей разрешающей способностью, что связано с ограничением спектра сигнала [15]. Однако, поскольку измерительные сигналы дифференциального поляриметра обладают очень узким спектром, то для расчета разности фаз целесообразно применять именно фурье-метод и использовать аналого-цифровой преобразователь (АЦП) вместо фазометра.

## 3. Алгоритм вычисления фазового сдвига по сигналам дифференциального фазового поляриметра

Рассмотрим процесс получения измерительной информации с помощью дифференциального фазового поляриметра (см. рис. 1). В дифференциальном фазовом поляриметре для модуляции луча используется вращающийся с постоянной скоростью поляризатор, при этом интенсивность света на его выходе описывается законом Малюса [16]. Тогда сигналы на фотоприемниках можно описать уравнениями

$$S_1(t) = M_1 + \sigma_1 \eta(t) + A_1 \cos(\omega_0 t + \sigma_{\phi 1} \eta_{\phi}(t) + \phi_{01}), \quad (1)$$

$$S_2(t) = M_2 + \sigma_2 \eta(t) + A_2 \cos(\omega_0 t + \sigma_{\phi 2} \eta_{\phi}(t) + \phi_{02}), \quad (2)$$

где  $S_1(t)$  — сигнал с объектного фотоприемника;  $S_2(t)$  — сигнал с опорного фотоприемника;  $M_1, M_2, \sigma_1, \sigma_2$  — средние значения и средние квадратические отклонения (СКО) постоянной составляющей сигналов;  $A_1, A_2$  — амплитуды сигналов;  $\eta(t)$  — аддитивный амплитудный шум, вызываемый непостоянством интенсивности источника излучения;  $\omega_0 = 2\pi/T$  — циклическая частота сигнала (определяемая периодом  $T$ );  $\sigma_{\phi 1}, \sigma_{\phi 2}, \eta_{\phi}(t)$  — СКО фаз и фазовый шум, вызываемые неравномерностью вращения поляризатора;  $\phi_{01}, \phi_{02}$  — начальные фазы;  $t$  — время.

Предполагается, что шумы  $\eta(t)$  и  $\eta_{\phi}(t)$  имеют нормальное распределение, но к фазовому шуму применена низкочастотная фильтрация.

Опишем этапы обработки сигналов с помощью предлагаемого алгоритма.

- 1) Исходные опорный и объектный сигналы (1) и (2) умножаются на аподизирующую функцию: модифицированное окно Блекмена–Харриса четвертого порядка [17], имеющего аналитическое представление в виде:

$$w(n) = a_0 - a_1 \cos(2\pi n/N) + a_2 \cos(4\pi n/N) - a_3 \cos(6\pi n/N), \quad 0 \leq n \leq N, \quad (3)$$

где  $a_0 = 0.3635819$ ,  $a_1 = 0.4891775$ ,  $a_2 = 0.1365995$ ,  $a_3 = 0.0106411$ ,  $N$  — общее число отсчетов.

- 2) Выполняется прямое преобразование Фурье.
- 3) Выполняется полосовая фильтрация первого порядка в спектре полученных сигналов на этапе 2 фильтром Баттерворта пятого порядка, описываемая уравнением

$$F(\omega) = \frac{1}{1 + \left( \frac{\omega - \omega_1}{\Delta\omega_c} \right)^{2k}}, \quad (4)$$

где  $\omega_c = 0.1\omega_1$  — частота среза,  $k$  — порядок фильтра.

- 4) Выполняется обратное преобразования Фурье от фильтрованных сигналов.
- 5) Вычисляется разность фаз  $\Delta\phi(t)$  опорного и объектного сигналов по формуле

$$\Delta\phi(t) = \arg[S_1^i \cdot S_2^{i*}], \quad (5)$$

где знак \* означает комплексно-сопряжённое значение;  $\arg$  — функция вычисления аргумента комплексного числа;  $S_1^i$ ,  $S_2^i$  — сигналы, полученные на этапе 4.

- 6) Вычисляется среднее значение полученного фазового распределения  $\Delta\phi(t)$ , которое представляет собой искомое значение УВПП.

#### 4. Анализ влияния различных параметров на погрешности алгоритма

Приведем результаты оценки влияния на погрешность алгоритма вычисления фазового сдвига по сигналам дифференциального фазового поляриметра следующих параметров: разрядности уровней квантования, количества отсчетов за период и длительности накопления сигнала, соотношения амплитуд сигналов, амплитудного шума и фазового шума, вызванного неравномерностью вращения анализатора. Математическое моделирование проводилось в среде MATLAB [18]. Целью данного моделирования является выбор параметров схемы поляриметра и оптимального режима его работы.

Анализ погрешности алгоритма проводился следующим образом.

- 1) Задавались объектный и опорный сигналы по формулам (1) и (2) с различными параметрами. При этом фазовый сдвиг между исходными сигналами для всех реализаций постоянен,  $\Delta\phi_0 = \phi_{01} - \phi_{02}$ , где  $\phi_{01} = 0^\circ$  и  $\phi_{01} = 45^\circ$  — начальные фазы объектного и опорного сигналов, соответственно.
- 2) Вычислялся фазовый сдвиг  $\Delta\phi(t)$  между сигналами с помощью предложенного алгоритма.
- 3) Абсолютная погрешность алгоритма оценивалась по разности между заданным и вычисленным фазовым сдвигом:  $\Delta\phi = \Delta\phi(t) - \Delta\phi_0(t)$ . Дополнительно вычислялось СКО  $\sigma_{\Delta\phi}$ .

**4.1. Влияние разрядности уровней квантования.** При оцифровке сигналов возникает погрешность квантования (шум квантования), которая зависит от количества уровней квантования, связанных с разрядностью применяемого АЦП. Поэтому для выбора оптимального значения уровней квантования рассмотрим его влияние на погрешность измерения. **Параметры математической модели сигналов** приведены в табл. 1, где  $Q$  — максимальное значение сигнала в заданной разрядности системы.

Результаты моделирования приведены на рис. 2, *a*, *b*.

Как следует из анализа полученных зависимостей, разрядность уровней квантования оказывает незначительное влияние на погрешность и СКО, и для оцифровки сигнала дифференциального поляриметра можно использовать недорогие 12-разрядные АЦП.

Таблица 1. Значения параметров математической модели сигналов

Table 1. Parameters values of the mathematical model of signals

Параметр	Значение
Разрядность АЦП	8...16
Среднее значение объектного сигнала	$Q/2$
Среднее значение опорного сигнала	$Q/2$
Амплитуда объектного сигнала	$Q/2$
Амплитуда опорного сигнала	$Q/2$
Период сигнала, с	0.1
Количество отсчетов на период	1000
Длительность накопления сигнала, с	20

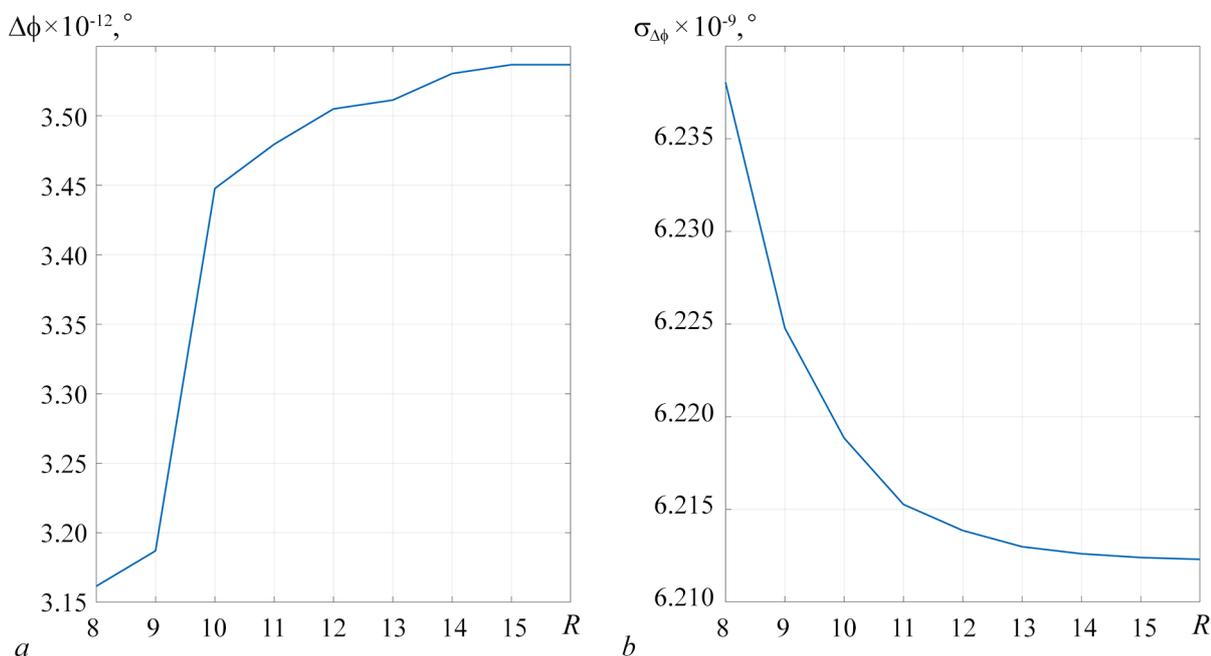


Рис. 2. Влияние разрядности АЦП  $R$  на погрешность  $\Delta\phi$  (*a*) и СКО  $\sigma_{\Delta\phi}$  (*b*) восстановленной разности фаз

Fig. 2. The effect of the analog-to-digital converter bit rate  $R$  on the error  $\Delta\phi$  (*a*) and the standard deviation  $\sigma_{\Delta\phi}$  (*b*) of the restored phase difference

#### 4.2. Влияние количества отсчетов за период и длительности накопления сигнала.

Далее рассмотрим влияние количества отсчетов за период и длительности накопления сигнала (рис. 3, *a*, *b*). Параметры математической модели сигналов приведены в табл. 2.

Как следует из рис. 3, *a* и 3, *b*, наибольшее влияние на погрешность и СКО оказывает время накопления сигнала (то есть количество анализируемых периодов). При этом значения данных параметров слабо изменяются после времени накопления больше 30 секунд (или 300 периодов), поэтому можно ограничить объем получаемой информации с учетом этих результатов.

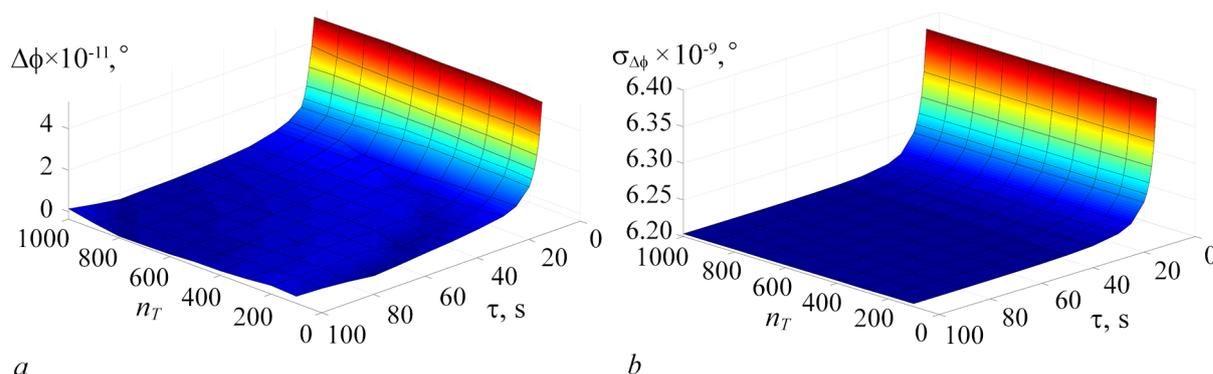


Рис. 3. Влияние количества отсчетов на период  $n_T$  и времени накопления сигнала  $\tau$  на погрешность  $\Delta\phi$  (*a*) и СКО  $\sigma_{\Delta\phi}$  (*b*) восстановленной разности фаз

Fig. 3. The effect of the number of samples for the period  $n_T$  and the time of accumulation of the signal  $\tau$  on the error  $\Delta\phi$  (*a*) and the standard deviation  $\sigma_{\Delta\phi}$  (*b*) of the restored phase difference

Таблица 2. Значения параметров математической модели сигналов

Table 2. Parameters values of the mathematical model of signals

Параметр	Значение
Разрядность АЦП	12
Среднее значение объектного сигнала	2048
Среднее значение опорного сигнала	2048
Амплитуда объектного сигнала	2048
Амплитуда опорного сигнала	2048
Период сигнала, с	0.1
Количество отсчетов на период	100...1000
Длительность накопления сигнала, с	5...100

**4.3. Влияние соотношения амплитуд сигналов.** Поскольку интенсивность объектного и опорного лучей может быть неодинаковой, рассмотрим влияние соотношения амплитуд сигналов на погрешность и СКО. Для этого можно провести моделирование при различных значениях коэффициента ослабления амплитуды сигналов  $K_i$ . Параметры математической модели приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения параметров математических моделей сигналов  
 Table 3. Parameters values of mathematical models of signals

Параметр	Значение
Разрядность АЦП	12
Среднее значение объектного сигнала	$K_1 \cdot 2048$
Среднее значение опорного сигнала	$K_2 \cdot 2048$
Амплитуда объектного сигнала	$K_1 \cdot 2048$
Амплитуда опорного сигнала	$K_2 \cdot 2048$
Период сигнала, с	0.1
Количество отсчетов на период	1000
Длительность накопления сигнала, с	30

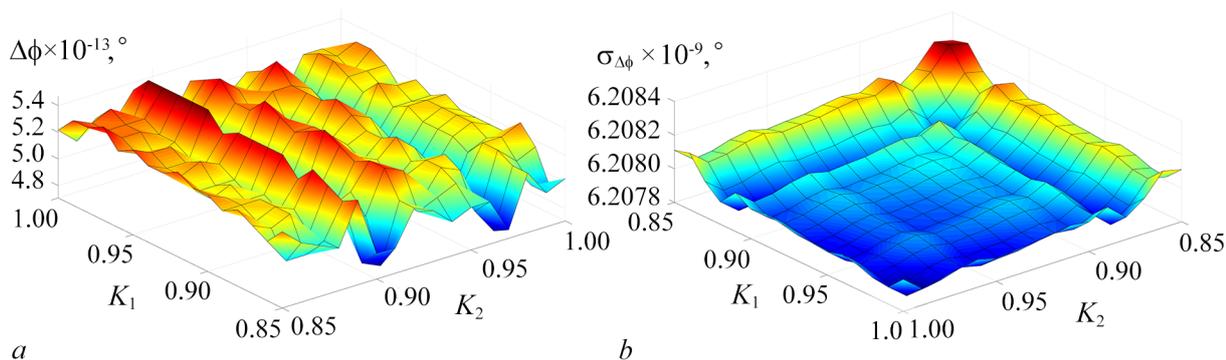


Рис. 4. Влияние коэффициента ослабления сигналов  $K_i$  на погрешность  $\Delta\phi$  (a) и СКО  $\sigma_{\Delta\phi}$  (b) восстановленной фазности фаз

Fig. 4. The effect of the signal attenuation coefficient  $K_i$  on the error  $\Delta\phi$  (a) and the standard deviation  $\sigma_{\Delta\phi}$  (b) of the restored phase difference

По результатам моделирования можно сделать вывод, что изменение отношения амплитуд сигналов в пределах 15% не будет оказывать значимого влияния на погрешность вычислений.

**4.4. Влияние амплитудного шума.** Моделирование по п. 4.1–4.3 проводилось для случая отсутствия шумов случайных составляющих  $\eta(t)$  и  $\eta_\phi(t)$  — амплитудного и фазового шума. Далее рассмотрим влияние на погрешность алгоритма этих параметров.

Уровень амплитудного шума задавался изменением СКО шума объектного и опорного сигналов  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  с помощью размерного коэффициента  $\eta$ , варьируемого в диапазоне 0.001...0.01. Амплитуды сигналов при этом примем за 95% от максимального значения. Значения погрешности и СКО будем рассматривать в зависимости от отношения сигнал/шум  $\mu_A$ , которое для опорного сигнала вычисляется по формуле

$$\mu_A = 20 \lg(M_1/\sigma_1), \quad (6)$$

Параметры математической модели приведены в табл. 4.

Таким образом, значение амплитудного шума (рис. 5, a, b) оказывает заметное влияние на погрешность алгоритма, и желательно добиваться повышения отношения сигнал/шум в измерительной системе до уровня 50 дБ и выше.

Таблица 4. Значения параметров математических моделей сигналов  
 Table 4. Parameters values of mathematical models of signals

Параметр	Значение
Разрядность АЦП	12
Среднее значение объектного сигнала	2048
Среднее значение опорного сигнала	2048
Амплитуда объектного сигнала	$0.95 \cdot 2048$
Амплитуда опорного сигнала	$0.95 \cdot 2048$
СКО шума объектного сигнала	$\eta \cdot 4096$
СКО шума опорного сигнала	$\eta \cdot 4096$
Период сигнала, с	0.1
Количество отсчетов на период	1000
Длительность накопления сигнала, с	30

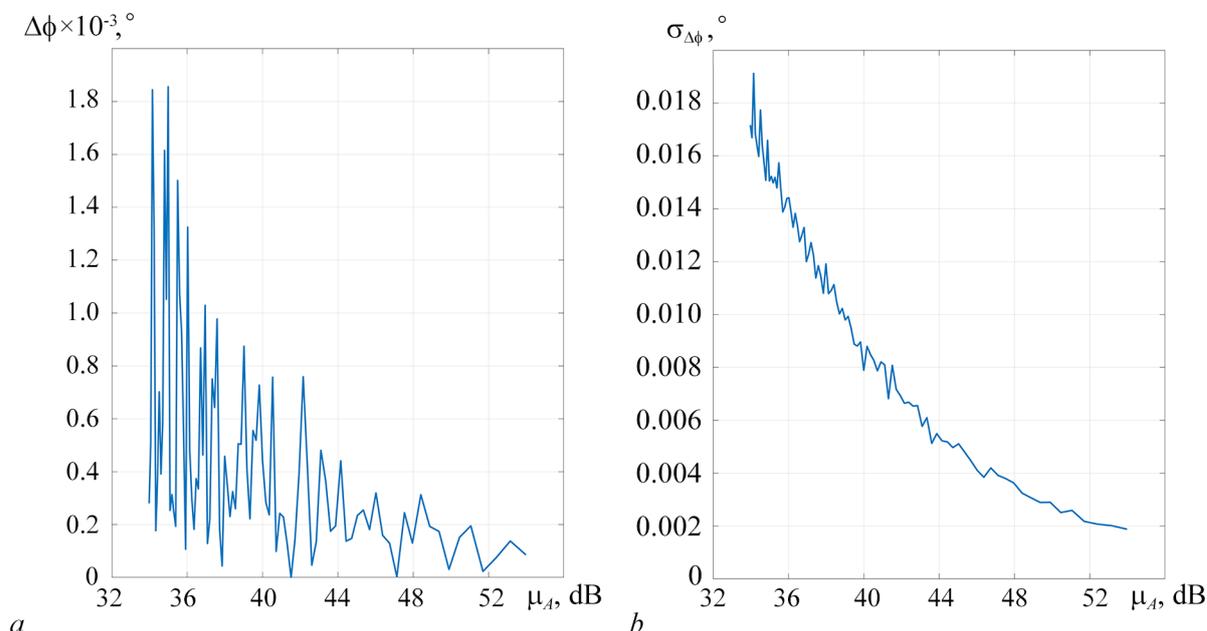


Рис. 5. Влияние отношения сигнал/шум  $\mu_A$  на погрешность  $\Delta\phi$  (a) и СКО  $\sigma_{\Delta\phi}$  (b) восстановленной разности фаз

Fig. 5. The effect of the signal-to-noise ratio  $\mu_A$  on the error  $\Delta\phi$  (a) and the standard deviation  $\sigma_{\Delta\phi}$  (b) of the restored phase difference

**4.5. Влияние фазового шума.** Рассмотрим также влияние фазового шума, вызванного неравномерностью вращения анализатора, которую можно оценить через коэффициент неравномерности вращения  $\delta$  [19], определяемый по формуле

$$\delta = (\omega_{\max} - \omega_{\min})/\omega_0, \quad (7)$$

где  $\omega_{\max}$ ,  $\omega_{\min}$ ,  $\omega_0$  — максимальное, минимальное и среднее значения угловой скорости за 1 цикл. Данный коэффициент зависит от типа электродвигателя, вращающего поляризатор, и типовые значения  $\delta$  составляют 0.001...0.01 [19], поэтому было проведено моделирование влияния нерав-

номерности вращения при наличии низкочастотного фазового шума в диапазоне от 0 до  $0.01\omega_0$ . Параметры математической модели приведены в табл. 5.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что неравномерность вращения анализатора в пределах  $0...0.01\omega_0$  компенсируется алгоритмом обработки и слабо влияет на результаты измерений.

Таблица 5. Значения параметров математических моделей сигналов

Table 5. Parameters values of mathematical models of signals

Параметр	Значение
Разрядность АЦП	12
Среднее значение объектного сигнала	2048
Среднее значение опорного сигнала	2048
Амплитуда объектного сигнала	2048
Амплитуда опорного сигнала	4096
Амплитуда фазового шума объектного сигнала	$0...0.01\omega_0$
Амплитуда фазового шума опорного сигнала	$0...0.01\omega_0$
Период сигнала, с	0.1
Количество отсчетов на период	1000
Длительность накопления сигнала, с	30

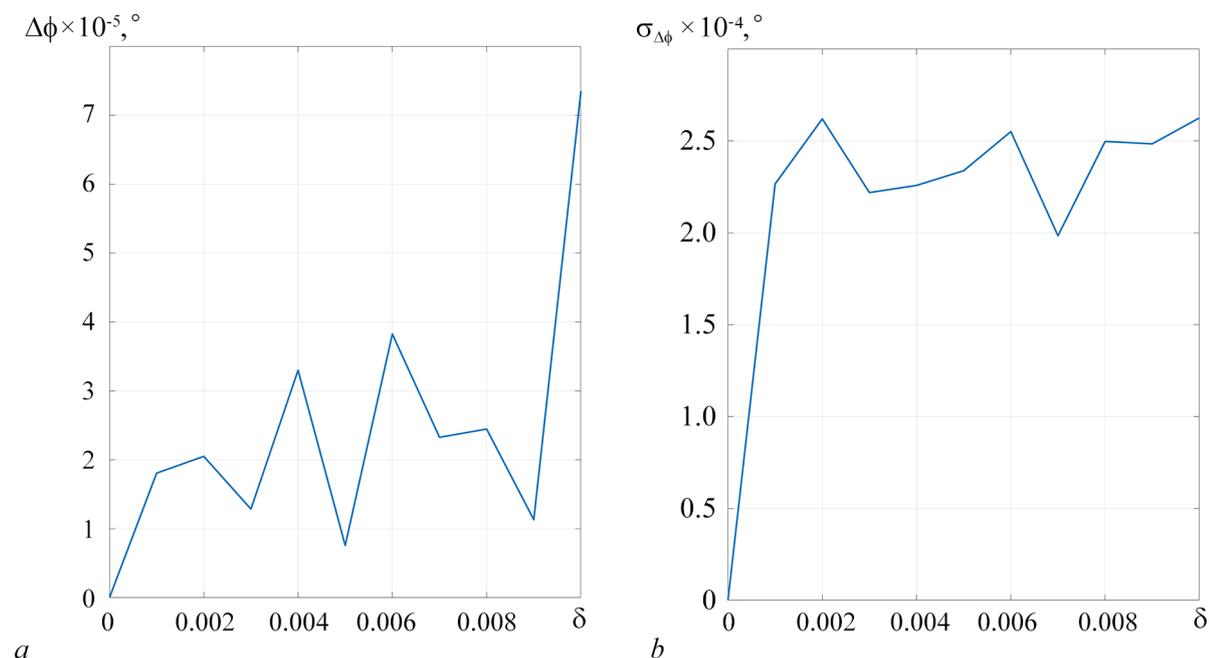


Рис. 6. Влияние коэффициента неравномерности вращения поляризатора  $\delta$  на погрешность  $\Delta\phi$  (a) и СКО  $\sigma_{\Delta\phi}$  (b) восстановленной разности фаз

Fig. 6. The effect of the coefficient of rotation unevenness of the polarizer  $\delta$  on the error  $\Delta\phi$  (a) and the standard deviation  $\sigma_{\Delta\phi}$  (b) of the restored phase difference

## Заключение

В работе представлены результаты анализа погрешности алгоритма обработки сигналов дифференциального поляриметра, в котором угловые измерения заменены фазовыми. Благодаря отказу от угловых измерений положения анализатора существенно снижаются требования к поворотному устройству и фотоприемникам, что удешевляет устройство поляриметра. Для расчета УВПП предложен алгоритм обработки сигналов, основанный на преобразовании Фурье. Для оценки погрешности алгоритма проведено математическое моделирование процесса обработки измерительной информации при различных параметрах сигналов. Полученные результаты позволяют оценить требования к элементам поляриметра (разрядности и частоты дискретизации АЦП, скорости и неравномерности вращения двигателя, отношения сигнал/шум), а также оптимизировать режим его работы.

## Список литературы

1. Волкова Е. А. Поляризационные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1974. 156 с.
2. Хасанов Т. Измерение оптических постоянных подложек на основе отражения // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2011. Т. 8, № 3. С. 62–71.
3. Клочкова В. Г., Панчук В. Е., Романенко В. П., Найденов И. Д. Поляриметрия и спектрополяриметрия звезд. Приборы и методы // Бюллетень Специальной астрофизической обсерватории РАН. 2005. Т. 58. С. 132–144.
4. Дмитриев А. В., Чимитдоржиев Т. Н., Гусев М. А., Дагуров П. Н., Емельянов К. С., Захаров А. И., Кирбижекова И. И. Базовые продукты зондирования земли космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой // Исследование Земли из космоса. 2014. № 5. С. 83–91. DOI: 10.7868/S0205961414050042.
5. ГОСТ 12517-2013. Сахар. Метод определения сахарозы. М.: Стандартинформ, 2016. 10 с.
6. Орлова А. В., Кононов Л. О. Поляриметрия как метод изучения структуры водных растворов углеводов: корреляция с другими методами // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2020. Т. 12, № 1. С. 95–106. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.095.
7. Сыроешкин А. В., Оготовева Д. Д., Галкина Д. А., Джавахян М. А., Елизарова Т. Е., Успенская Е. В., Плетенева Т. В. Поляриметрия и динамическое светорассеяние в контроле качества настоек // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2022. Т. 25, № 9. С. 3–9. DOI: 10.29296/25877313-2022-09-01.
8. Руднева М. А. Ранняя диагностика и контроль динамики прогрессирования глаукомы методом сканирующей лазерной поляриметрии (GDxVCC) // Глаукома. 2006. № 4. С. 41–44.
9. Уткин Г. И. Схемы построения прецизионных спектрополяриметров для физико-химического анализа // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 7 (19). С. 1–15. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-7-941.
10. Снопко В. Н. Поляризационные характеристики оптического излучения и методы их измерения. Минск: Наука и техника, 1992. 336 с.
11. Вишняков Г. Н., Левин Г. Г., Ломакин А. Г. Измерение угла вращения плоскости поляризации методом дифференциальной поляриметрии с вращающимся анализатором // Оптический журнал. 2011. Т. 78, № 2. С. 53–60.
12. Webster J. G. Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays. Boca Raton: CRC Press, 2003. 768 p. DOI: 10.1201/9780203009406.
13. Павельева Е. А. Обработка и анализ изображений на основе использования информации о фазе // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42, № 6. С. 1022–1034. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-1022-1034.
14. Goldberg K. A., Bokor J. Fourier-transform method of phase-shift determination // Applied Optics. 2001. Vol. 40, no. 17. P. 2886–2894. DOI: 10.1364/AO.40.002886.
15. Вишняков Г. Н., Левин Г. Г., Лоцилов К. Е., Сухоруков К. А. Фурье-синтез профиля поверхно-

сти трехмерных объектов методом многокурсовой проекции полос // Оптика и спектроскопия. 2005. Т. 99, № 4. С. 680–684.

16. *Яворский Б. М., Детлаф А. А.* Справочник по физике. 4-е изд. М.: Наука, 1968. 940 с.
17. *Oppenheim A. V., Schaffer R. W., Buck J. R.* Discrete-Time Signal Processing. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, 1999. 893 p.
18. MATLAB [Electronic resource]. Available from: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
19. *Артоболевский И. И.* Теория механизмов и машин: Учебное пособие для вузов. 4-е изд. М.: Наука, 1988. 640 с.

## References

1. Volkova EA. Polarization Measurements. Moscow: Nauka; 1974. 156 p. (in Russian).
2. Khasanov T. Measurement of optical constants of substrates based on reflection. Basic Problems of Material Science. 2011;8(3):62–71 (in Russian).
3. Klochkova VG, Panchuk VE, Romanenko VP, Naidenov ID. Polarimetry and spectropolarimetry of stars. Devices and methods. Bulletin of the Special Astrophysical Observatory. 2005;58:132–144 (in Russian).
4. Dmitriev AV, Chimitdorzhiev TN, Gusev MA, Dagurov PN, Emelyanov KS, Zakharov AI, Kirbizhekova II. Basic products of Earth remote sensing by means of spaceborne synthetic aperture radars. Earth Observation and Remote Sensing. 2014;(5):83–91 (in Russian). DOI: 10.7868/S0205961414050042.
5. GOST 12517-2013. Sugar. Method for Determination of Sucrose. Moscow: Standartinform; 2016. 10 p. (in Russian).
6. Orlova AV, Kononov LO. Polarimetry as a method for studying the structure of aqueous carbohydrate solutions: Correlation with other methods. Radioelectronics. Nanosystems. Information Technology. 2020;12(1):95–106. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.095.
7. Syroeshkin AV, Ogotoeva DD, Galkina DA, Dzhavakhyan MA, Elizarova TE, Pleteneva TV, Uspenskaya EV. Identification of tinctures by the polarimetric method. Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry. 2022;25(9):3–9 (in Russian). DOI: 10.29296/25877313-2022-09-01.
8. Rudneva MA. Early diagnosis and monitoring of glaucoma progression by method of scanning laser polarimetry (GDxVCC). Glaucoma. 2006;(4):41–44 (in Russian).
9. Utkin GI. Construction arrangement of precision spectropolarimeters for physical and chemical analysis. Engineering Journal: Science and Innovation. 2013;7(19):1–15 (in Russian). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-7-941.
10. Snopko VN. Polarization Characteristics of Optical Radiation and Methods of Measurement. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1992. 336 p. (in Russian).
11. Vishnyakov GN, Levin GG, Lomakin AG. Measuring the angle of rotation of the plane of polarization by differential polarimetry with a rotating analyzer. Journal of Optical Technology. 2011;78(2):124–128. DOI: 10.1364/JOT.78.000124.
12. Webster JG. Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays. Boca Raton: CRC Press; 2003. 768 p. DOI: 10.1201/9780203009406.
13. Pavelyeva EA. Image processing and analysis based on the use of phase information. Computer Optics. 2018;42(6):1022–1034 (in Russian). DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-1022-1034.
14. Goldberg KA, Bokor J. Fourier-transform method of phase-shift determination. Applied Optics. 2001;40(17):2886–2894. DOI: 10.1364/AO.40.002886.
15. Vishnyakov GN, Levin GG, Loshchilov KE, Sukhorukov KA. Fourier synthesis of a three-dimensional surface by the method of multiangle projection of fringes. Optics and Spectroscopy. 2005;99(4):654–658. DOI: 10.1134/1.2113386.

16. Yavorsky BM, Detlaf AA. Handbook of Physics. Moscow: Mir Publishers; 1972. 965 p.
17. Oppenheim AV, Schafer RW, Buck JR. Discrete-Time Signal Processing. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall; 1999. 893 p.
18. MATLAB [Electronic resource]. Available from: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
19. Artobolevskii II. Theory of Mechanisms and Machines. 4th edition. Moscow: Nauka; 1988. 640 p. (in Russian).



*Вишняков Геннадий Николаевич* — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Всероссийского научно-исследовательского института оптико-физических измерений. Область научных интересов: оптика, метрология, рефрактометрия, поляриметрия, эллипсометрия.

Россия, 119361 Москва, ул. Озерная, 46  
 Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений  
 E-mail: [vish@vniiofi.ru](mailto:vish@vniiofi.ru)  
 ORCID: 0000-0003-0237-4738  
 AuthorID (eLibrary.Ru): 36013



*Юрин Александр Игоревич* — родился в 1979 году. Окончил Московский институт электроники и математики по специальности «Метрология и метрологическое обеспечение» (2002). Кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Область научных интересов: метрология, коррекция погрешностей, оптико-физические измерения, рефрактометрия.

Россия, 101000 Москва, ул. Мясницкая, 20  
 Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
 E-mail: [ayurin@hse.ru](mailto:ayurin@hse.ru)  
 ORCID: 0000-0002-6401-5530  
 AuthorID (eLibrary.Ru): 675922



*Минаев Владимир Леонидович* — родился в 1978 году. Доктор технических наук, заведующий научно-исследовательским отделением голографии, оптической томографии, нанотехнологий и наноматериалов Всероссийского научно-исследовательского института оптико-физических измерений. Область научных интересов: оптика, голография, оптическая томография, оптическая микроскопия.

Россия, 119361 Москва, ул. Озерная, 46  
 Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений  
 E-mail: [minaev@vniiofi.ru](mailto:minaev@vniiofi.ru)  
 ORCID: 0000-0002-4356-301X  
 AuthorID (eLibrary.Ru): 383772



*Голополосов Александр Андреевич* — окончил Московский государственный университет геодезии и картографии по специальности «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения» (2022). Работает техником во Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений. Область научных интересов: математическое моделирование, оптико-физические измерения.

Россия, 119361 Москва, ул. Озерная, 46  
 Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений  
 E-mail: [goloplosov@vniiofi.ru](mailto:goloplosov@vniiofi.ru)  
 ORCID: 0000-0002-1223-204X  
 AuthorID (eLibrary.Ru): 1122568