

А.С. Мартынов, Г.И. Уткин

**ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ, АНАЛИЗА  
И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ  
РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ ПОЛЯРИМЕТРОВ**

*Представлены результаты разработки специализированных программных средств для моделирования, анализа и обработки сигналов развертывающих поляриметров. С помощью разработанного программного обеспечения показано, что наиболее быстрым алгоритмом обработки сигналов развертывающих поляриметров является ортогональный, обеспечивающий линейный рост времени вычисления от объема полученного цифрового сигнала.*

**E-mail: utkin@bmstu.ru**

**Ключевые слова:** поляриметрия, оптико-электронный поляриметр развертывающего измерения, турбополяриметр.

Поляриметры широко используются в химической и пищевой промышленности, в медицине и при биологических исследованиях для анализа свойств органических и биологических оптически активных веществ. Разработаны лазерные быстродействующие поляриметры, предназначенные для проведения высокоточных измерений при исследовании кинетики быстропротекающих химических реакций с использованием оптически активных реагентов [1—3]. В основе их работы лежит развертывающий метод измерения угла вращения плоскости поляризации (УВПП), который позволил упростить электромеханические узлы и повысить быстродействие в десятки раз по сравнению с поляриметрами, выполненными по классической схеме.

В развертывающем методе измерения УВПП используется линейно поляризованное излучение, модулированное по азимуту плоскости поляризации. При прохождении через исследуемую среду излучение приобретает дополнительный поворот плоскости поляризации. Двухканальный анализатор выделяет из полученного излучения две ортогонально поляризованные составляющие, интенсивность которых изменяется по гармоническому закону с частотой, в 2 раза превышающей частоту вращения поляризатора, и разностью фаз  $\pi$  [2]. Информация об УВПП исследуемой средой содержится в фазе сигналов измерительного тракта:

$$S_1(t) = 0,5I_0\tau_{\text{ПМ}}\tau_{\text{ср}} [1 + \mu_{\text{д}} \cos (2\theta - 2\alpha)];$$

$$S_2(t) = 0,5I_0\tau_{\text{ПМ}}\tau_{\text{ср}} [1 - \mu_{\text{д}} \cos (2\theta - 2\alpha)],$$

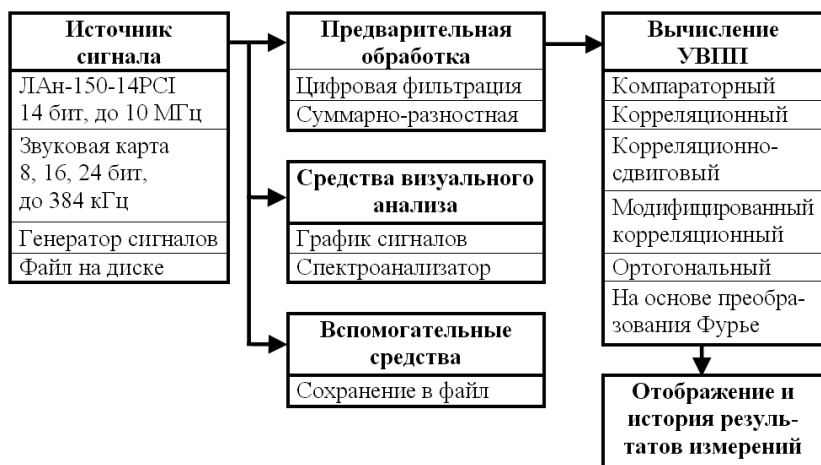
где  $I_0$  — интенсивность источника излучения;  $\tau_{\text{ПМ}}$  — коэффициент пропускания поляризационного модулятора (ПМ);  $\tau_{\text{ср}}$ ,  $\mu_{\text{д}}$  — коэффициенты пропускания и деполяризации излучения средой;  $\theta = 2\pi\omega t$ ;  $\omega$  — частота вращения поляризатора;  $2\alpha$  — УВПИ среды.

Таким образом, измерение УВПИ сводится к определению сдвига фазы сигналов при отсутствии и наличии исследуемой среды. Для этого используется привязка по времени, получаемая с помощью встроенного независимого опорного тракта. Для получения поляризационно-модулированного излучения могут быть использованы различные схемы, например путем пропускания неполяризованного излучения через вращающийся поляризатор ( $\tau_{\text{ПМ}} = 0,5$ ) или вращением линейно поляризованного источника излучения вокруг своей оси ( $\tau_{\text{ПМ}} = 1$ ).

Применение двухканального измерительного тракта позволяет применять суммарно-разностную обработку сигналов для снижения влияния амплитудных и поляризационных помех источника излучения, но может приводить к увеличению уровня помех электронного тракта.

Ослабление и деполяризация проходящего излучения исследуемой средой приводит к снижению отношения сигнал/шум до значений, близких к единице. Для обработки сигналов в этих случаях требуется применение помехоустойчивых алгоритмов обработки сигналов измерительного тракта.

В данной работе для анализа точности разработанных алгоритмов разработано специальное программное обеспечение (ПО), структурная схема которого приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Структурная схема специального ПО для моделирования, анализа и обработки сигналов двухканального измерительного тракта

Модульная архитектура обеспечивает возможность легкого подключения дополнительных средств. Общий вид программы приведен на рис. 2.

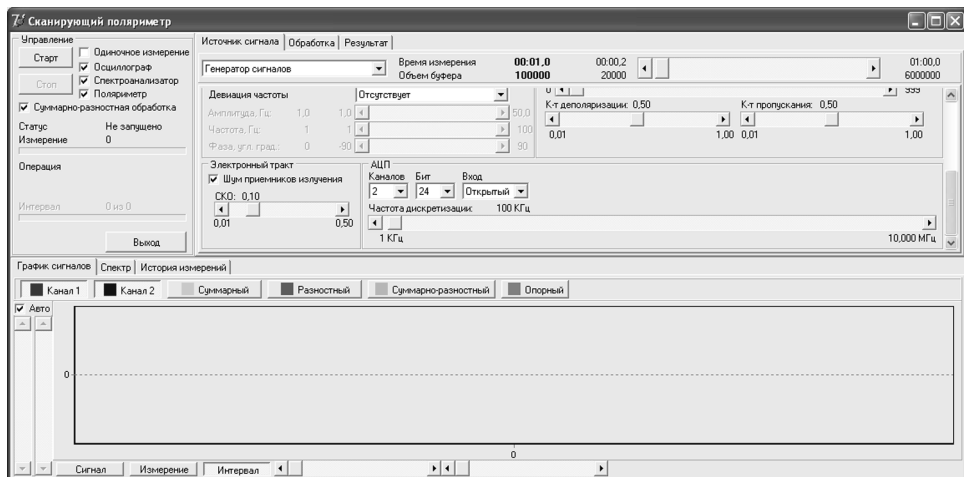


Рис. 2. Общий вид программы

Сигналы измерительного тракта можно получить с прибора. Для этого были разработаны модули источников сигнала, взаимодействующие с платой сбора данных ЛАН-150-14РСІ ЗАО «Руднев — Шиляев» и стандартной звуковой карты. Устройство ЛАН-150-14РСІ оснащено двумя синхронными 14-разрядными АЦП и позволяет проводить преобразование сигналов с частотой дискретизации до 10 МГц. Параллельно с аналогово-цифровым преобразованием возможна запись значений двух одноразрядных цифровых каналов, что применяется для получения меток опорного сигнала. Помимо этого, на плате реализованы программно-управляемые механизм включения в аналоговую цепь конденсатора (режим закрытого входа) и предварительный усилитель с коэффициентами усиления 2, 5 или 10. С помощью звуковой карты возможно получение одного из двух каналов измерительного тракта и сигнала опорного тракта с числом разрядов 8, 16 или 24 и частотой дискретизации до 384 кГц. Отсутствие возможности получения двух сигналов измерительного тракта, а также работа только в режиме закрытого входа при использовании звуковой карты значительно снижают возможности дальнейшей обработки сигналов.

Для тестирования процесса обработки и моделирования работы алгоритмов обработки сигналов разработан модуль генерации сигналов поляриметра с двухканальным измерительным трактом. Для генерации сигналов используется математическая модель двухканального измерительного тракта развертывающего поляриметра, в которой учтены следующие помехи:

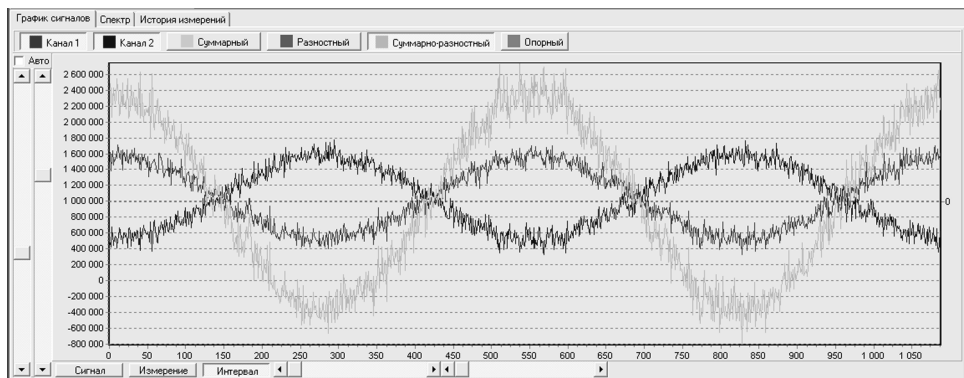
- амплитудные помехи источника излучения (шумовые с нормальным распределением, гармоническая наводка);
- поляризационные помехи источника излучения с учетом схемы формирования поляризационно-модулированного излучения;
- нестабильность частоты поляризационной модуляции (гармоническая, линейная);
- ослабление и деполяризация излучения исследуемой средой;
- шумы приемников и электронного тракта.

Диапазон возможных значений УВПП  $\pm 89,999^\circ$ . Для квантования значений сигналов используется модель АЦП, позволяющая учитывать дифференциальную нелинейность [4]. Число разрядов моделируемого АЦП может быть 8, 10, 12, 14, 16 и 24 бита, частота дискретизации — от 1 кГц до 10 МГц; также реализована возможность имитации режима закрытого входа.

Включение в программное средство наряду с получением сигналов от устройства возможности моделирования сигналов позволяет проводить отладку и проверку реализованных и подключаемых алгоритмов обработки сигналов.

Для анализа различных вариантов обработки предусмотрена возможность сохранения полученного цифрового сигнала в файл с последующим его чтением. Для этого были разработаны соответствующие модули источника и сохранения сигнала.

Для визуального анализа сигналов и предварительной настройки прибора реализованы средства отображения графиков сигналов и их спектров (рис. 3). Помимо самих сигналов на графике могут быть отображены суммарный сигнал, флуктуация интенсивности излучения источника, а также суммарно-разностный сигнал.



**Рис. 3. График сигналов измерительного тракта и суммарно-разностного сигнала**

Предварительная обработка сигналов включает в себя суммарно-разностную обработку и цифровую фильтрацию сигналов.

Суммарно-разностную обработку можно проводить в тех случаях, когда присутствуют два сигнала измерительного тракта. При наличии одного сигнала обработка не проводится.

Цифровая фильтрация сигналов возможна как до проведения суммарно-разностной обработки (применяется только к сигналам измерительного тракта), так и после нее (с возможностью применения также и к суммарно-разностному сигналу). Процедура цифровой фильтрации реализована в системе LabView компании National Instruments и позволяет применять КИХ-фильтр, БИХ-фильтры (с окнами Бесселя, Баттерворта, Чебышева I и II рода, эллиптическим) и сглаживающий фильтр («скользящее среднее» с прямоугольным или треугольным окном, экспоненциальный). При этом были использованы фильтры с нулевым фазовым сдвигом. Для взаимодействия с подсистемой фильтрации в основной системе реализован модуль, осуществляющий прием/передачу данных с помощью интерфейса DataSocket и файлов. Интерфейс подключаемой программы цифровой фильтрации представлен на рис. 4.

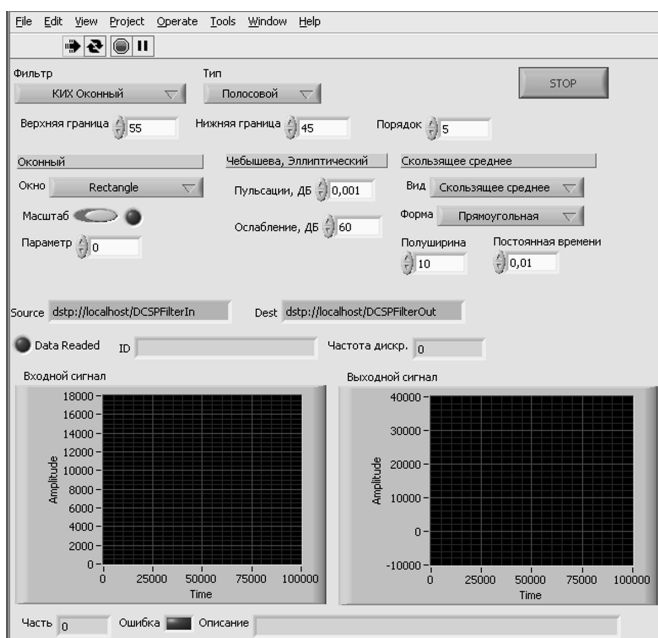
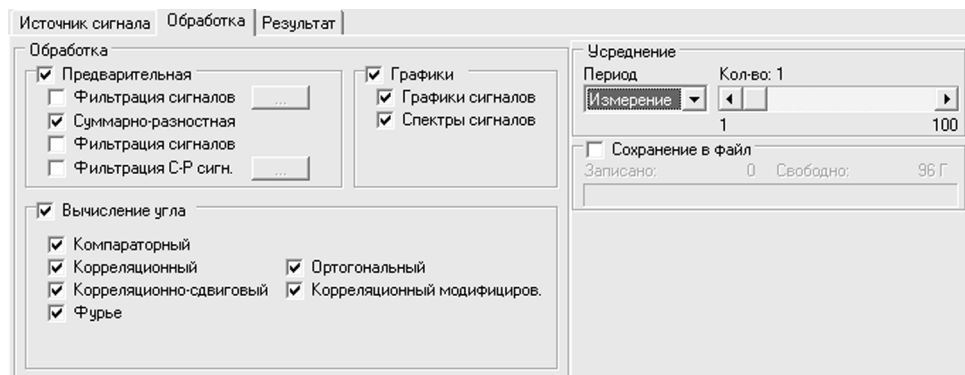


Рис. 4. Интерфейс программы цифровой фильтрации

Для вычисления фазы сигналов измерительного тракта относительно нулевого значения, задаваемого сигналом опорного тракта, реализованы и адаптированы следующие алгоритмы: компараторный [1—3], корреляционный [5], модифицированный корреляционный [6], корреляционно-сдвиговой [7], ортогональный [7] и алгоритм на основе преобразования Фурье [8].

На рис. 5 показана панель управления со списком модулей предварительной обработки, вычисления УВПИ и вспомогательных модулей, позволяющая включать или исключать их из процесса обработки.



**Рис. 5. Панель управления методами обработки**

Для всех алгоритмов, кроме компараторного, реализована возможность проводить вычисления как для сигнала с суммарно-разностной обработкой, если таковая была выполнена, так и без нее. Для оценки влияния периода вычислений проводится вычисление за один период вращения ПМ и за все периоды, попавшие в измерение. Результаты вычисления фазы проходят статистическую обработку в соответствии с настройками и выводятся на экран (рис. 6).

Параметр	Суммарно-разностная обр.		Без суммарно-разностной обработки		С суммарно-разностной обработкой			
	Период усреднения:		Измерение		Интервал		Измерение	
	Интервал	СКО	Значение	СКО	Значение	СКО	Значение	СКО
Кол-во интервалов			25,0000	0,0000				
Длина периода	20000,0000	0,0000	500000,0000	0,0000				
Длина метки	1,0000	0,0000						
Компараторный	4,8539	1,2577						
Корреляционный	35,3483	0,0167	35,3483	0,0000	5,6764	0,0236	5,6765	0,0000
Корреляционно-сдвиговой	3,0034	0,0492	3,0035	0,0000	2,9985	0,0295	2,9985	0,0000
Ортогональный	3,0033	0,0492	3,0033	0,0000	2,9985	0,0295	2,9985	0,0000
Корреляционный модифициров.	0,9544	0,0157	0,9544	0,0000	2,9792	0,0295	2,9792	0,0000
Фурье	3,0039	0,0493	3,0039	0,0000	2,9985	0,0297	2,9985	0,0000

**Рис. 6. Панель отображения результатов измерения**

Полученные результаты сохраняются в истории измерений (рис. 7).

С помощью разработанного программного обеспечения проведено тестирование алгоритмов обработки сигналов, на основании которого сделаны следующие выводы.

1. Использование компараторного метода даже при низком уровне шумов приводит к высокой погрешности, а при высоком уровне шумов становится невозможным.

2. Корреляционный и модифицированный корреляционный методы обладают высокой чувствительностью к наличию постоянной составляющей, поэтому пригодны для обработки сигналов, полу-

График: сигналов   Спектр   История измерений									
N	Дл.итг	СКО	Дл.итг	СКО	Без СРФ	СКО	С РФ	СКО	Код.
28	20000.0000	0.0000	1.0000	0.0000	3.0022	0.0412	2.9853	0.0312	25
27	20000.0000	0.0000	1.0000	0.0000	3.0025	0.0403	3.0025	0.0355	25
26	20000.0000	0.0000	1.0000	0.0000	2.9876	0.0502	3.0049	0.0309	25
25	20000.0000	0.0000	1.0000	0.0000	2.9951	0.0495	2.9934	0.0387	25
24	20000.0000	0.0000	1.0000	0.0000	3.0074	0.0295	3.0022	0.0269	25
23	20000.0000	0.0000	1.0000	0.0000	2.9933	0.0446	2.9974	0.0255	25
22	20000.0000	0.0000	1.0000	0.0000	3.0001	0.0436	3.0059	0.0275	25
21	20000.0000	0.0000	1.0000	0.0000	3.0095	0.0383	3.0067	0.0275	25
20	20000.0000	0.0000	1.0000	0.0000	3.0016	0.0451	3.0025	0.0268	25
19	20000.0000	0.0000	1.0000	0.0000	3.0022	0.0503	2.9913	0.0239	25
18	20000.0000	0.0000	1.0000	0.0000	2.9819	0.0455	2.9913	0.0284	749
23	20000.0000	1.0000	1.0000	0.0000	2.9855	0.0310	3.0135	-0.0127	748
22	20000.0000	1.0000	1.0000	0.0000	2.9979	-0.0015	2.9859	0.0149	747
21	20000.0000	1.0000	1.0000	0.0000	2.9879	0.0086	2.9829	0.0178	746
20	20000.0000	1.0000	1.0000	0.0000	3.0489	-0.0493	3.0059	-0.0551	745
19	20000.0000	1.0000	1.0000	0.0000	2.9716	0.0249	2.9896	0.0111	744
18	20000.0000	1.0000	1.0000	0.0000	3.0005	-0.0040	3.0058	-0.0051	743
17	20000.0000	1.0000	1.0000	0.0000	2.9147	0.0818	2.9478	0.0529	742
16	20000.0000	1.0000	1.0000	0.0000	2.9259	0.0705	2.9385	0.0642	741
15	20000.0000	1.0000	1.0000	0.0000	3.0500	-0.0535	3.0624	-0.0617	740
14	20000.0000	1.0000	1.0000	0.0000	3.0638	-0.0674	3.0461	-0.0454	739
13	20000.0000	1.0000	1.0000	0.0000	2.9688	0.0277	3.0121	-0.0113	738
12	20000.0000	1.0000	1.0000	0.0000	2.9475	0.0469	3.0029	-0.0021	737
11	20000.0000	1.0000	1.0000	0.0000	2.9904	0.0061	3.0071	-0.0064	736
10	20000.0000	1.0000	1.0000	0.0000	2.9959	0.0006	3.0155	-0.0148	735

Рис. 7. История результатов измерения

ченных в режиме закрытого входа или после суммарно-разностной обработки.

3. Корреляционно-сдвиговый, ортогональный методы и метод на основе преобразования Фурье обладают примерно одинаковой высокой устойчивостью к воздействию шумов и помех и не подвержены влиянию постоянной составляющей.

4. Наиболее быстрым является ортогональный алгоритм, обеспечивающий линейное увеличение времени вычисления от объема полученного цифрового сигнала. Корреляционно-сдвиговый алгоритм медленней на пять порядков. Метод на основе преобразования Фурье в зависимости от условий может быть сравним по скорости с ортогональным методом, время его работы также на несколько порядков больше.

5. Применение цифровой фильтрации при частоте сигнала 50 Гц возможно при частоте дискретизации не более 100 кГц. При длине метки опорного тракта в опытном образце  $7 \cdot 10^{-4}$  с частотой 100 кГц является минимальной, а для точного определения интервалов требуется 1...5 МГц, поэтому возможно только использование сглаживающих фильтров типа «скользящее среднее».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Utkin G. I. Compact turbopolarimeter, in Lightmetry: Metrology, Spectroscopy, and Testing Techniques Using Light // Proceedings of SPIE. – Vol. 4517. – 2001. – P.153–157.
2. Polarimeter UTKINA. Patent RU 1696896. Official catalogue 44-th World Exhibition of invention, Research and industrial innovation «BRUSSELS EUREKA 95». – Brussels, 1995. – P. 319–320.
3. Уткин Г. И. Пат. РФ RU2269101. Турбополяриметр. МКИ G01J 4/04. Заяв. 2004118823/28 от 23.06.2004. Оpubл. 27.01.2006. Бюл. Открытия, изобретения. – 2006. – № 3. – 7 с.

4. Оценка влияния параметров аналогово-цифрового преобразователя на статистические характеристики сигнала моделируемого оптоэлектронного тракта / В.И. Алехнович, А.С. Мартынов, А.В. Перчик, Г.И. Уткин // Измерительная техника. – 2007. – № 8. – С. 12–15.
5. Воронов А. С. Измерение разности фаз сигналов [Электронный ресурс] // Горизонты образования – 2007. – № 9. – Электрон. журн. – Алтайский государственный технический университет. Режим доступа: <http://edu.secna.ru/media/f/phaze.pdf>
6. Цифровые методы измерения сдвига фаз /А.С. Глинченко, С.С. Кузнецкий, А.М. Фиштейн, М.К. Чмых. – Новосибирск: Наука, 1979.
7. Чмых М. К. Цифровая фазометрия. – М.: Радио и связь, 1993. – 184 с.
8. Государственный первичный эталон единицы угла вращения плоскости поляризации / Г.Н. Вишняков, В.М. Лахов, Г.Г. Левин, А.Г. Ломакин // Измерительная техника. – 2010. – № 3. – С. 3–7.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012